

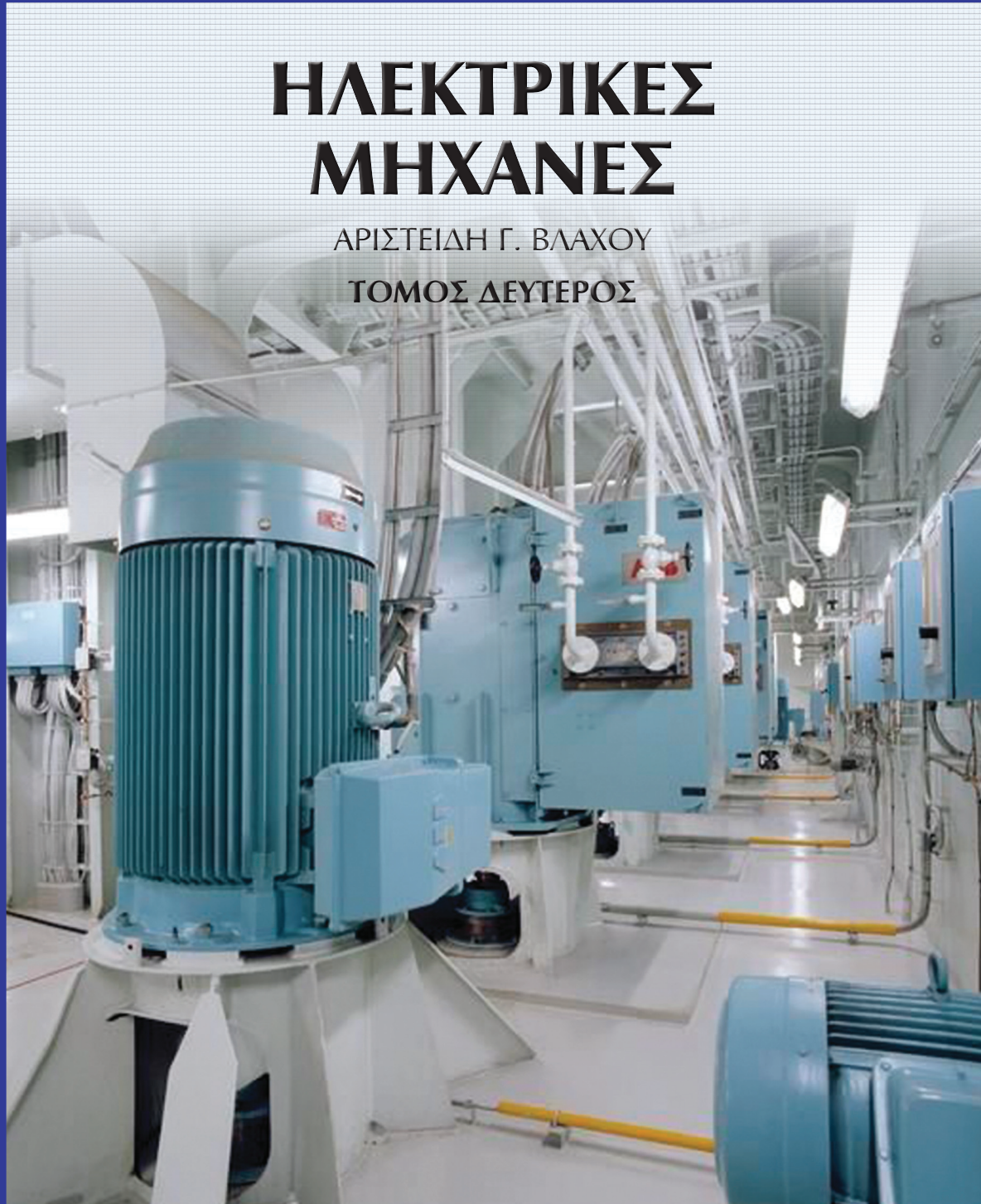


ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ
ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ
ΑΚΑΔΗΜΙΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΑΡΙΣΤΕΙΔΗ Γ. ΒΛΑΧΟΥ
ΤΟΜΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟΣ



ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ



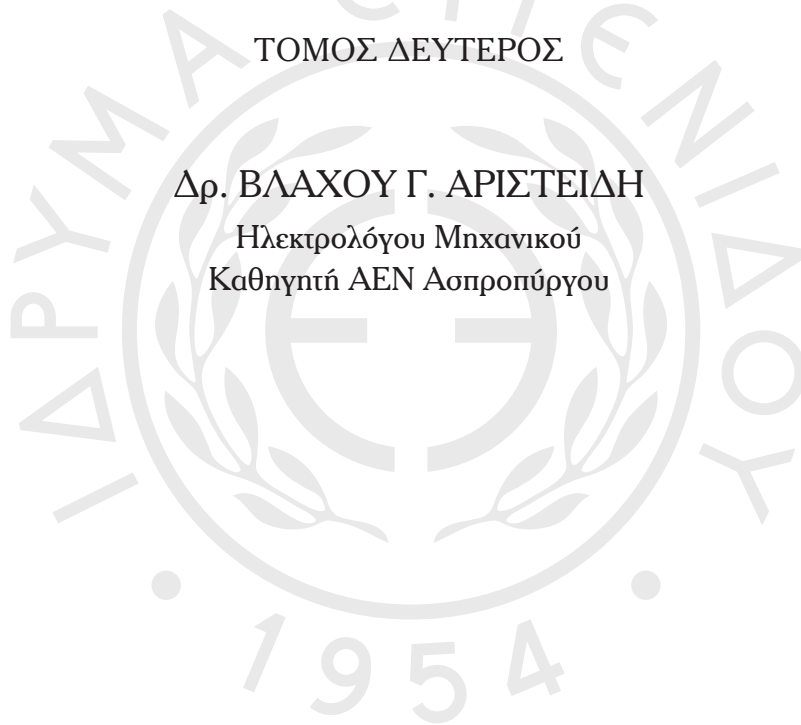
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ
ΑΚΑΔΗΜΙΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

Ι Δ Ρ Υ Μ Α Ε Υ Γ Ε Ν Ι Δ Ο Υ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΤΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΤΟΜΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟΣ

Δρ. ΒΛΑΧΟΥ Γ. ΑΡΙΣΤΕΙΔΗ
Ηλεκτρολόγου Μηχανικού
Καθηγητή ΑΕΝ Ασπρούργου



ΑΘΗΝΑ
2020



Α' ΕΚΔΟΣΗ 2016

ISBN: 978-960-337-062-8

Copyright © 2016 Ίδρυμα Ευγενίδου

Απαγορεύεται η ολική ή μερική ανατύπωση του βιβλίου και των εικόνων με κάθε μέσο καθώς και η διασκευή, η προσαρμογή, η μετατροπή και η κυκλοφορία του. (Άρθρο 3 του ν. 2121/1993).

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Το 1952 ο Ευγένιος Ευγενίδης (1882-1954) όρισε με τη διαθήκη του τη σύσταση του Ιδρύματος Ευγενίδου, του οποίου ως μοναδικό σκοπό έταξε «να συμβάλη εις την εκπαίδευσιν νέων έλληνικής ύπηκοότητας εν τῷ επιστημονικῷ καὶ τεχνικῷ πεδίῳ». Ο ιδρυτής και χορηγός του Ιδρύματος Ευγενίδου ορθά προέβλεψε ότι αναγκαίο παράγοντα για την πρόοδο της Ελλάδος αποτελεί η άρτια κατάρτιση των Ελλήνων τεχνιῶν κατὰ τα πρότυπα της επαγγελματικής εκπαίδευσης άλλων ευρωπαϊκῶν χωρῶν.

Την 23η Φεβρουαρίου του 1956 εγκρίθηκε η σύσταση του κοινωφελούς Ιδρύματος Ευγενίδου, την διοίκηση και διαχείριση του οποίου κατὰ την ρητή επιθυμία του ιδρυτή του ανέλαβε η αδελφή του Μαριάνθη Σίμου (1895-1981). Τότε ξεκίνησε η υλοποίηση του σκοπού του Ιδρύματος και η εκπλήρωση μίας από τις βασικότερες ανάγκες του εθνικού μας βίου από την Μαριάνθη Σίμου και τους επιστημονικούς συνεργάτες της.

Το έργο της Μαριάνθης Σίμου συνέχισε από το 1981 ο πολύτιμος συνεργάτης και διάδοχος του Ευγενίου Ευγενίδη, Νικόλαος Βερνίκος-Ευγενίδης (1920-2000). Από το 2000 το έργο του Ιδρύματος Ευγενίδου συνεχίζει ο Λεωνίδας Δημητριάδης-Ευγενίδης, ο οποίος υλοποιεί τον σκοπό του Ιδρύματος προσαρμόζοντας το όραμα του ιδρυτή του στις σύγχρονες εξελίξεις.

Μία από τις πρώτες δραστηριότητες του Ιδρύματος Ευγενίδου, ευθύς μετά την ίδρυσή του, υπήρξε η συγγραφή και έκδοση εκπαιδευτικῶν βιβλίων για τους μαθητές των τεχνικῶν σχολῶν, καθώς διαπιστώθηκε ότι αποτελεί πρωταρχική ανάγκη ο εφοδιασμός τους με σειρές από βιβλία, τα οποία θα έθαιαν τα ορθά θεμέλια για την παιδεία τους και θα αποτελούσαν συγχρόνως πολύτιμη βιβλιοθήκη για κάθε τεχνικό. Καρπός αυτής της δραστηριότητας είναι η Βιβλιοθήκη του Τεχνίτη, η οποία αριθμεί 32 τίτλους, η Βιβλιοθήκη του Τεχνικού, που περιλαμβάνει 50 τίτλους, η Τεχνική Βιβλιοθήκη με 11 τίτλους και η Βιβλιοθήκη του Τεχνικού Βοηθού Χημικού με 3 τίτλους. Επιπλέον, από το 1977 μέχρι σήμερα έχουν εκδοθεί 171 τίτλοι για τους μαθητές των Τεχνικῶν και Επαγγελματικῶν Λυκείων και 16 για τους μαθητές των Σχολῶν Μέσης Τεχνικής και Επαγγελματικής εκπαίδευσης.

Ξεχωριστή σειρά βιβλίων του Ιδρύματος Ευγενίδου αποτελεί η Βιβλιοθήκη του Ναυτικού (1967 έως σήμερα), η οποία είναι το αποτέλεσμα της συνεργασίας του Ιδρύματος Ευγενίδου με την Διεύθυνση Εκπαίδευσης Ναυτικῶν του Υπουργείου Ναυτιλίας. Η συγγραφή και έκδοση των εκπαιδευτικῶν βιβλίων για τους σπουδαστές των ναυτικῶν σχολῶν ανατέθηκε στο Ίδρυμα Ευγενίδου με την υπ' αριθμ. 61288/5031/9.8.1966 απόφαση του Υπουργείου Εμπορικής Ναυτιλίας, οπότε και λειτούργησε η αρμόδια Επιτροπή Εκδόσεων, η οποία είχε συσταθεί ήδη από το 1958. Η συνεργασία Ιδρύματος Ευγενίδου και Υπουργείου Εμπορικής Ναυτιλίας ανανεώθηκε και επικαιροποιήθηκε με Υπουργικές Αποφάσεις το 1999 και το 2005, με τις οποίες το YEN ανέθεσε στο Ίδρυμα Ευγενίδου την συγγραφή των εκπαιδευτικῶν βοηθημάτων για τις Ακαδημίες Εμπορικού Ναυτικού (Α.Ε.Ν.). Η ανάθεση της αρμοδιότητας για την έκδοση των διδακτικῶν βιβλίων για τις Ακαδημίες επαναβεβαιώθηκε με νομοθετική ρύθμιση τον Μάρτιο του 2020 (Ν. 4676).

Στην Βιβλιοθήκη του Ναυτικού περιλαμβάνονται 137 διδακτικά βιβλία ναυτικής εκπαίδευσης, καθώς και σχετικές έρευνες και πρακτικά συνεδρίων. Όλα τα βιβλία της Βιβλιοθήκης του Ναυτικού ανταποκρίνονται στις ανάγκες των σπουδαστῶν των ΑΕΝ και είναι γενικότερα χρήσιμα για όλους τους αξιωματικούς του Εμπορικού Ναυτικού, που ασκοῦν το επάγγελμα ή εξελίσσονται στην ιεραρχία. Επιπλέον οι συγγραφείς και η Επιτροπή Εκδόσεων καταβάλλουν κάθε προσπάθεια ώστε τα διδακτικά βιβλία να είναι επιστημονικῶς άρτια, να επικαιροποιούνται με βάση τα εκάστοτε αναλυτικά προγράμματα σπουδῶν των Α.Ε.Ν. και να παραμένουν συμβατά με τις μεταβαλλόμενες διεθνείς απαιτήσεις.

Η διαχρονική συμβολή του Ιδρύματος Ευγενίδου στη Ναυτική Εκπαίδευση επιτυγχάνεται όχι μόνο

με την έκδοση των σχετικών εκπαιδευτικών βιβλίων αλλά και με δωρεές στις Ακαδημίες Εμπορικού Ναυτικού, υποτροφίες σε αξιωματικούς του Λιμενικού Σώματος, εκπόνηση μελετών/ερευνών και διεξαγωγή συνεδρίων για την ναυτική εκπαίδευση και την ναυτιλία γενικότερα, καθώς και παροχή πρόσβασης σε κορυφαίες ναυτιλιακές βάσεις δεδομένων μέσω της Βιβλιοθήκης του.

Με την προσφορά των εκδόσεων του στους καθηγητές, στους σπουδαστές των ΑΕΝ και σε όλους τους αξιωματικούς του Εμπορικού Ναυτικού, αλλά και με την πλειάδα εκδόσεων για Τεχνικούς, το Ίδρυμα Ευγενίδου συνεχίζει να συμβάλλει στην τεχνική εκπαίδευση της Ελλάδος, υλοποιώντας επί 60 και πλέον χρόνια το όραμα του ιδρυτή του, αείμνηστου ευεργέτη Ευγένιου Ευγενίδη.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Ιωάννης Γκόλιας, Καθηγητής ΕΜΠ, Πρόεδρος.

Αχιλλέας Ματσάγγος, Αντιναύαρχος Λ.Σ. (ε.α.).

Γεώργιος Γεωργούλης, Πλοίαρχος Α' Ε.Ν., Ε.Δι.Π. Παν/μίου Αιγαίου.

Αντώνιος Βουτσινάς, Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., Υπ. Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής.

Κωνσταντίνος Σουφλέρης, Τμηματάρχης ΔΕΚΝ Α'.

Γραμματέας της Επιτροπής, **Ελευθερία Τελειώνη**.

Ειδικός Επιστημονικός Σύμβουλος του βιβλίου «Ηλεκτρικές Μηχανές Τόμος Β» ο κ. **Ιωάννης Προυσαλίδης**, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ (Σχολή Ναυπηγών, Μηχανολόγων-Μηχανικών).

Διατελέσαντα μέλη της Επιτροπής

Πρόεδροι

Α. Παππάς (1955-1983) καθηγητής ΕΜΠ, *Μ. Αγγελόπουλος* (1983-2003) ομ. καθηγητής ΕΜΠ, *Α. Σιαυρόπουλος* ομ. καθηγητής Πανεπ. Πειραιώς (2003-2008), *Ε. Δρns*, Ομ. Καθηγητής ΕΜΠ (2008-2020)

Λοιπά μέλη

Γ. Κακριδής (1955-1959) Καθηγητής ΕΜΠ, *Α. Καλογεράς* (1957-1970) Καθηγητής ΕΜΠ, *Χ. Καβοννίδης* (1955-1984) Μnx. Ηλ. ΕΜΠ, *Μ. Αγγελόπουλος* (1970-1983), Ομ. Καθηγητής ΕΜΠ, *Σπ. Γουλιέλμος* (1958) Αντιπλοίαρχος, *Ξ. Αντωνιάδης* (1959-1966) Αντιπλοίαρχος, Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Γ. Τσακίρης* (1967-1969) Πλοίαρχος, Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ελλ. Σίδερης* (1967-1969) Υποναύαρχος, *Π. Φουσιέρης* (1969-1971) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Αλ. Μοσχονάς* (1971-1972) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Χρυσανθακόπουλος* (1972-1974) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Αθαν. Σωτηρόπουλος* (1974-1977) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Σπαρτιώτης* (1977) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., προσωρινός Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Θ. Πουλάκης* (1977-1979) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Λυκούδης* (1979-1981) Πλοίαρχος Λ. Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Αναστ. Δημαράκης* (1981-1982) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Τσαντίλας* (1982-1984) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ε. Τζαβέλας* (1984-1986) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Γρηγοράκος* (1986-1988) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Α. Μπαρκασιός* (1988-1989) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Παπαναστασίου* (1989) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Λάμπρου* (1989-1992) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Κοκορέτσιος* (1992-1993) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Μαρκάκης* (1993-1994) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Ζουμπούλης* (1994-1995) Πλοίαρχος Λ.Σ., *Φ. Ψαρράς* (1995-1996) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Καλαρώνης* (1996-1998) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Θ. Ρενιζιέρης* (1998-2000) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Στεφανάκης* (2000-2001) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Μαρίνος* (2001) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Εξαρχόπουλος* (2001-2003) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Μπριλάκης* (2003-2004) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ν. Θεμέλαρος* (2003-2004) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Κουβέλης* (2004-2005) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Δ. Βασιλάκης* (2005-2008) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Πειρόπουλος* (2008-2009) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Α. Ματσάγγος* (2009-2011) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Σέργης* (2011-2012) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Τζαβάρας*, (2004-2013) Αντιναύαρχος Λ.Σ. (Ε.Α.), *Ι. Τεγόπουλος* (1988-2013) Ομ. Καθηγητής ΕΜΠ, *Α. Θεοφανόπουλος* (2012-2014) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Β. Καλλιπολίτου* (2014-2017) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ. Δ/ντρια Ναυτ. Εκπαιδ., *Σ. Μπέλλας* (2017-2018) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ. Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Α. Τοερίκης* (2018-2019) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ. Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ
Α' ΕΚΔΟΣΕΩΣ

Το βιβλίο αυτό απευθύνεται στους σπουδαστές Μηχανικούς Ε' εξαμήνου των Ακαδημιών Εμπορικού Ναυτικού (Α.Ε.Ν.).

Έχει γραφεί σύμφωνα με τα οριζόμενα αναλυτικά και ωρολόγια προγράμματα σπουδών των Α.Ε.Ν., όπως περιγράφονται στο ΦΕΚ 2303/16 Σεπτεμβρίου 2013, που εκδόθηκε σε εφαρμογή της αναθεωρημένης Δ.Σ. STCW 1978 (2010 τροποποιήσεις Manila).

Το βιβλίο αυτό θα έχει εκπληρώσει το σίχιο του αν οι σπουδαστές καιανοήσουν την αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών διατάξεων-συσκευών που αναλύονται στα αντίστοιχα κεφάλαια.

Αισθάνομαι επιτακική την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά όλο το προσωπικό του Τμήματος Εκδόσεων του Ιδρύματος Ευγενίδου για την πλήρη και αποδοτική συνεργασία την οποία είχα. Ειδικά θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Γιάννη Προσαλίδη ο οποίος ως κριτής και ειδικός επιστημονικός σύμβουλος αφιέρωσε χρόνο στη μελέτη των αρχικών κειμένων και με εύστοχες παρατηρήσεις και υποδείξεις του βοήθησε σημαντικά στη βελτίωση του παρόντος βιβλίου.

Θεωρώντας ότι η βελτίωση αυτού του βιβλίου είναι έργο της δημιουργικής και καλόπιστης κριτικής, θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ των προτέρων τους αναγνώστες που θα απευθύνουν παρατηρήσεις, υποδείξεις ή σχόλια τα οποία θα βοηθήσουν στη βελτίωσή του σε επόμενη έκδοση.

Ο συγγραφέας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΠΛΟΙΑ

1.1	Εισαγωγή.....	1
1.2	Κατηγορίες ηλεκτρικών εγκαταστάσεων εμπορικών πλοίων.	1
1.3	Χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων.	3
1.4	Συστήματα τάσεων, ρευμάτων και συχνοτήτων των ηλεκτρικών δικτύων πλοίων.	3
1.5	Διόρθωση του συντελεστή ισχύος.	7
1.6	Τάσεις και συχνότητες ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων.	11
1.7	Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος σε εμπορικά πλοία.	11
1.8	Εξηλεκτρισμένο εμπορικό πλοίο.	13
1.9	Ερωτήσεις.	23
1.10	Θέματα εργασίας.....	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ (ΕΡ)

2.1	Εισαγωγή.....	25
2.2	Ηλεκτρικός ισολογισμός.....	25
2.3	Λεπτομερής ηλεκτρικός ισολογισμός ισχύος.	27
2.4	Ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη και ηλεκτροστάσια.....	33
2.5	Στροβιλογεννήτριες.....	34
2.6	Ο κινητήρας ντίζελ των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών.	35
2.7	Αεριοστροβίλος.....	35
2.8	Ερωτήσεις.	40
2.9	Παράλληλη λειτουργία γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος.	40
2.10	Ερωτήσεις.	63
2.11	Προτεινόμενες ασκήσεις.	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ (ΕΡ)

3.1	Εισαγωγή.....	65
3.2	Σύστημα πρωτεύουσας και δευτερεύουσας διανομής.	65
3.3	Μονογραμμικά διαγράμματα των ηλεκτρικών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας σε εμπορικά πλοία.	67
3.4	Κύριοι ηλεκτρικοί πίνακες μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου.....	70
3.5	Δίκτυο διανομής έκτακτης ανάγκης.....	72
3.6	Ηλεκτροδότηση ελλιμενισμένων πλοίων.	73
3.7	Όργανα ενδείξεως και ελέγχου των κυρίων ηλεκτρικών πινάκων.....	74

3.8 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών πινάκων και βαθμοί προστασίας για το περίβλημα ενός ηλεκτρικού πίνακα Χ.Τ.	74
3.9 Χρήση των μετασχηματιστών στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων.	77
3.10 Ερωτήσεις.	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ **ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΕΩΣ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ (ΕΡ)**

4.1 Εισαγωγή.	79
4.2 Δομή του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.	79
4.3 Γενικές αρχές λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα.	81
4.4 Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα στη λειτουργία με φορτίο.	87
4.5 Επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων του ασύγχρονου κινητήρα στη λειτουργία του.	92
4.6 Πειραματικός προσδιορισμός των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος του ασύγχρονου κινητήρα	97
4.7 Εκκίνηση των τριφασικών ασυγχρόνων κινητήρων.	99
4.8 Ασύγχρονοι κινητήρες διπλού κλωβού.	104
4.9 Κυκλικό διάγραμμα του ασύγχρονου κινητήρα.	106
4.10 Ρύθμιση στροφών των ασυγχρόνων κινητήρων.	111
4.11 Προστασία ασυγχρόνων κινητήρων.	115
4.12 Σύγχρονοι κινητήρες.	119
4.13 Προτεινόμενες ασκήσεις.	136
4.14 Ερωτήσεις.	138

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ **ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ**

5.1 Εισαγωγή.	139
5.2 Μεγέθη ανά μονάδα (p.u.)	139
5.3 Παρουσίαση ενός συστήματος ηλεκτρικής ισχύος ενός εμπορικού πλοίου.	140
5.4 Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκυκλώσεως σε σύστημα ηλεκτρικής ισχύος.	144
5.5 Μέτρα προστασίας για βραχυκυκλώματα.	154
5.6 Συνεργασία ασφαλιστικών διατάξεων και οργάνων διακοπής ρευμάτων βραχυκυκλώσεως.	170
5.7 Ερωτήσεις.	172
5.8 Προτεινόμενες ασκήσεις.	172

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ **ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ**

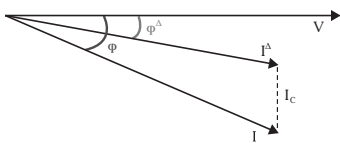
6.1 Εισαγωγή.	173
6.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσεως δικτύων Μέσης Τάσεως (Μ.Τ.).....	173
6.3 Τυπικά δίκτυα Μέσης Τάσεως.	173
6.4 Δομή ηλεκτρικών δικτύων Μ.Τ.	174
6.5 Ασφάλειες, διακόπτες, ηλεκτρικά καλώδια και πίνακες σε εγκαταστάσεις Μ.Τ. ενός πλοίου.	176
6.6 Κίνδυνοι στη Μ.Τ.	184
6.7 Ερωτήσεις.	184

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ

7.1	Εισαγωγή.....	185
7.2	Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων στην ηλεκτρική πρόωση.	186
7.3	Ηλεκτρική πρόωση με συνεχές ρεύμα.	187
7.4	Ηλεκτρική πρόωση με εναλλασσόμενο ρεύμα (ΕΡ).	192
7.5	Μετατροπείς.....	194
7.6	Τυπικά συστήματα ηλεκτρικής προώσεως με εναλλασσόμενο ρεύμα (ΕΡ).....	197
7.7	Φαινόμενα ποιότητας ισχύος.....	200
7.8	Ερωτήσεις.....	200

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

8.1	Εισαγωγή.....	201
8.2	Κύρια χαρακτηριστικά των συσσωρευτών.....	201
8.3	Συσσωρευτές μολύβδου (Pb).....	202
8.4	Συσσωρευτές σιδηρονικελίου (Fe-Ni).....	204
8.5	Συσσωρευτές καδμιονικελίου (Cd-Ni).....	204
8.6	Αλκαλικοί συσσωρευτές τύπου Ni-MH.....	204
8.7	Συσσωρευτές έκτακτης ανάγκης.....	205
8.8	Συστήματα φορτίσεως συσσωρευτών.....	205
8.9	Ερωτήσεις.....	206
Πίνακας συμβόλων.....		207
Ευρετήριο.....		208



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΠΛΟΙΑ

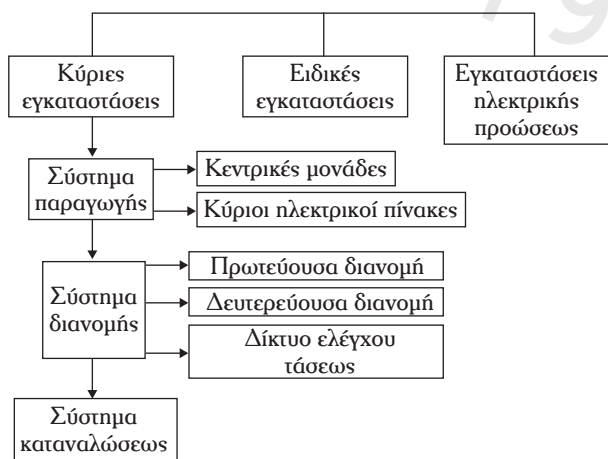
1.1 Εισαγωγή.

Το ηλεκτρικό σύστημα ενός εμπορικού πλοίου είναι αυτόνομο και ανεξάρτητο. Η συνολική ηλεκτρική ισχύς διανέμεται σε πλήθος φορτίων διαφορετικού τύπου, όπως φορτία φωτισμού, ψυγεία, διάφορες αντλίες, κινητήρες, τα οποία ενεργοποιούν διάφορα μηχανικά φορτία. Η ηλεκτρική ισχύς παράγεται από τις σύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες τοποθετούνται σε χώρο του μηχανοστασίου που ονομάζεται **ηλεκτροστάσιο**.

Η ενεργοποίηση των γεννητριών εμπορικών πλοίων πραγματοποιείται από διάφορους τύπους κινητηρίων μηχανών (κινητήρες ντίζελ, στρόβιλοι κ.λπ.), ανάλογα με τον τύπο και την αποστολή του πλοίου.

1.2 Κατηγορίες ηλεκτρικών εγκαταστάσεων εμπορικών πλοίων.

Ως ηλεκτρική εγκατάσταση χαρακτηρίζεται το σύνολο των γεννητριών παραγωγής τάσεων, των ηλεκτρικών πινάκων και των ηλεκτρικών δικτύων που εξυπηρετούν τις ανάγκες ενός συστήματος καταναλωτών. Διακρίνουμε τις ακόλουθες κατηγορίες ηλεκτρικών εγκαταστάσεων (σχ. 1.2α):



Σχ. 1.2α

Κατηγορίες ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων.

1) Τις **κύριες εγκαταστάσεις** στις οποίες ανήκουν:

α) Το **σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος** (σύγχρονες γεννήτριες) και οι κύριοι ηλεκτρικοί πίνακες.

β) Το **σύστημα διανομής ηλεκτρικής ισχύος** το οποίο αποτελείται:

- Από την πρωτεύουσα διανομή, δηλαδή το ηλεκτρικό δίκτυο το οποίο συνδέει τους πινάκες των κεντρικών μονάδων με τους υποσταθμούς και τους διάφορους υποπίνακες. Διανέμει ηλεκτρική ισχύ σε ζωτικής σημασίας συστήματα.
- Από τη δευτερεύουσα διανομή που είναι το ηλεκτρικό δίκτυο μέσω του οποίου διανέμεται ηλεκτρική ισχύς στα συστήματα κινήσεως και φωτισμού και
- από το ηλεκτρικό δίκτυο έλεγχου της τάσεως.

γ) Τις **σύστημα καταναλώσεων** στο οποίο ανήκουν όλες οι καταναλωτικές συσκευές και διατάξεις.

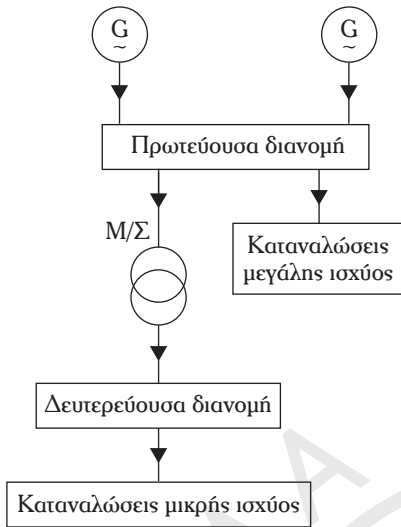
2) Τις **ειδικές εγκαταστάσεις** στις οποίες ανήκουν οι καταναλώσεις που τροφοδοτούνται με ηλεκτρικό ρεύμα διαφορετικού τύπου από εκείνο το οποίο παράγεται από τις γεννήτριες πλοίων (γυροπυξίδες, ραντάρ και διάφοροι τύποι ηλεκτρονικών διατάξεων και συσκευών).

3) Τις **εγκαταστάσεις ηλεκτρικής προώσεως** στις οποίες ανήκουν όλα τα συστήματα ηλεκτροκινήσεως, μέσω των οποίων ενεργοποιούνται οι ελικοφόροι άξονες. Συνήθως, είναι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (EP) ή σπανιότερα κινητήρες συνεχούς (ΣΡ), με τις αντίστοιχες διατάξεις χειρισμών.

Στη συνέχεια δίδονται οι διαγραμματικές παραστάσεις διαφόρων τύπων ηλεκτρικών εγκαταστάσεων εμπορικών πλοίων, ενώ δίδεται έμφαση στην κατανόηση της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας διανομής των ηλεκτρικών δικτύων διανομής.

Πρωτεύουσα διανομή ονομάζεται το ηλεκτρικό δίκτυο (σχ. 1.2β) το οποίο τροφοδοτεί μέσω του **κέντρου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας** (ηλεκτρογεννήτριες) τον υποσταθμό μετασχηματισμού

τάσεως και τις καταναλώσεις μεγάλης ισχύος. Το κέντρο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από το **σύστημα των ηλεκτρογεννητριών**, τον κύ-



Σχ. 1.2β

Σχηματική παρουσίαση της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε τύπο εμπορικού πλοίου. Όπου G = γεννήτρια.

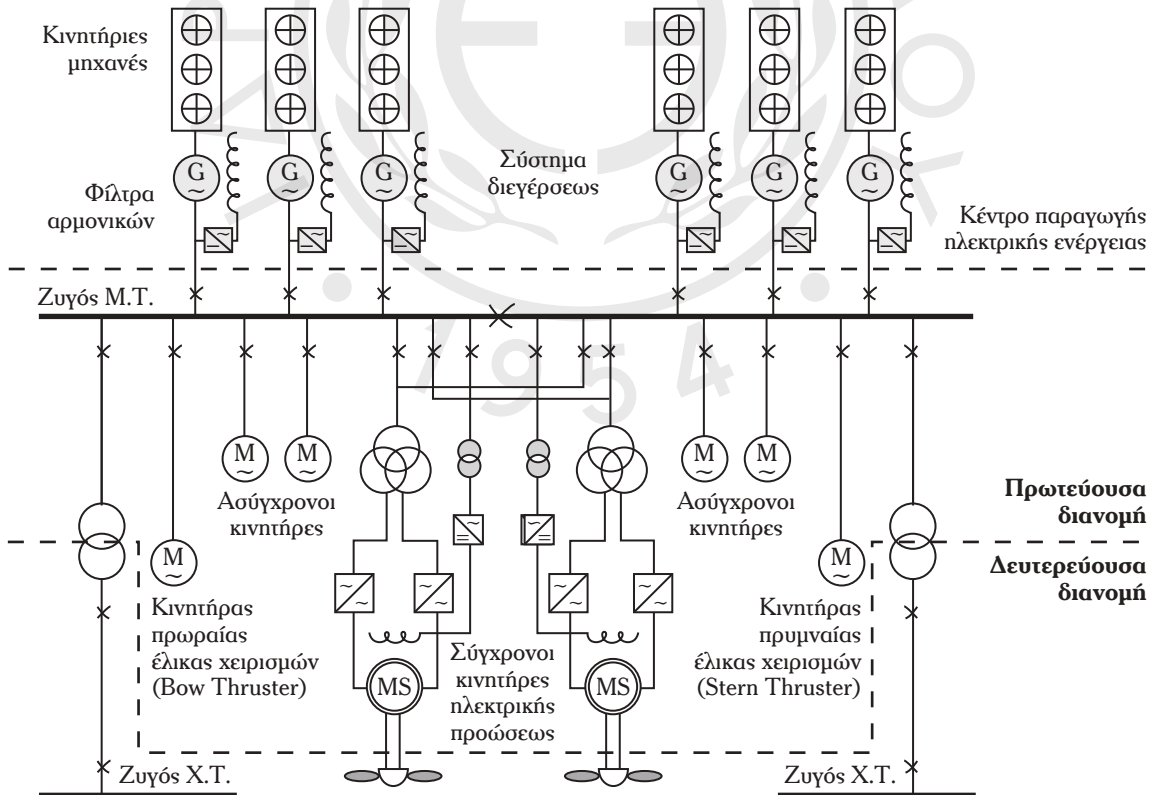
ριο πίνακα και από τις **συσκευές έλεγχου**.

Δευτερεύουσα διανομή ονομάζεται το ηλεκτρικό δίκτυο (σχ. 1.2β), το οποίο τροφοδοτεί μέσω του υποσταθμού τις καταναλώσεις μικρής ισχύος. Το ηλεκτρικό δίκτυο δευτερεύουσας διανομής τροφοδοτείται από τους μετασχηματιστές (Μ/Σ) οι οποίοι τροφοδοτούνται από το ηλεκτρικό δίκτυο της πρωτεύουσας διανομής.

Στο σχήμα 1.2γ, δίδεται αναλυτικά το ηλεκτρικό δίκτυο πρωτεύουσας και δευτερεύουσας διανομής, μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης πλοίου Μέσης Τάσεως (Μ.Τ.) (δηλ. ηλεκτρικό δίκτυο πάνω από 1.000 V).

Η μεγάλη αύξηση των ηλεκτρικών καταναλώσεων στα σύγχρονα εμπορικά πλοία απαιτεί η τιμή της τάσεως της δευτερεύουσας διανομής (τριφασική ηλεκτρική γραμμή) να είναι 440 V, 690 V και σε σπάνιες περιπτώσεις 1.000 V. Όταν αυξάνεται το επίπεδο της τάσεως προκύπτουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- 1) Μείωση της διατομής των καλωδίων και του αντίστοιχου βάρους και όγκου.
- 2) Μείωση των πτώσεων τάσεως στα καλώδια και μείωση των αντίστοιχων απωλειών.



Σχ. 1.2γ

Μονογραμμική παράσταση μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης Μέσης Τάσεως (Μ.Τ.), ενός εμπορικού πλοίου. Όπου MS = σύγχρονος κινητήρας.

1.3 Χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων.

Η ηλεκτρική εγκατάσταση ενός εμπορικού πλοίου πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

1) **Αξιοπιστία**, δηλαδή η ασφαλής λειτουργία κάθε συστημάς της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως, ακόμα και στις πιο δυσμενείς περιπτώσεις.

2) **Συνέχεια λειτουργίας**, δηλαδή η εγγύηση πως η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται κανονικά και στις περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, ώστε να λειτουργήσουν οι σημαντικές ηλεκτρικές διατάξεις, οι οποίες συνδέονται με την ασφαλή λειτουργία του πλοίου.

3) **Εξοικονόμηση χώρου και πόρων**, που αφορά στη μείωση του βάρους, του όγκου και του κόστους προμήθειας της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως και της αντίστοιχης λειτουργίας της.

Στη συνέχεια, τα χαρακτηριστικά αυτά αναλύονται διεξοδικότερα.

1) Αξιοπιστία.

Στον περιβάλλοντα χώρο ενός εμπορικού πλοίου επικρατούν δυσμενείς συνθήκες για το ηλεκτρολογικό υλικό της εγκαταστάσεώς του, όπως:

α) Οι μεγάλες ποσότητες υγρασίας και αλατότητας, που οφείλονται στη θάλασσα.

β) Οι ατμοί λαδιού, ειδικά στον χώρο του μηχανοστασίου, οι οποίοι οφείλονται κυρίως στη λειτουργία των μηχανολογικών συσκευών.

γ) Οι υδρατμοί, που οφείλονται στις εγκαταστάσεις ατμοστροβίλων.

δ) Οι υψηλές θερμοκρασίες, που αναπτύσσονται στον χώρο του μηχανοστασίου, στον οποίο τοποθετούνται οι γεννήτριες αλλά και στους ηλεκτρικούς πίνακες.

ε) Οι μηχανικές ταλαντώσεις που αναπτύσσονται όταν χρησιμοποιούνται κινητήριες μηχανές παλινδρομικού τύπου, καθώς το πλοίο θεωρείται ελαστικό μέσο.

στ) Οι κλίσεις του πλοίου, οι οποίες οφείλονται στον κυματισμό της θάλασσας ή σε διάφορες βλάβες.

Αυτοί οι παράγοντες προσδιορίζουν τις δυσμενείς συνθήκες, που επιβαρύνουν τόσο το ηλεκτρολογικό υλικό της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως όσο και των ηλεκτρικών διατάξεων και συσκευών, που συνδέονται σε αυτήν. Γενικά, η υλοποίηση της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως ενός εμπορικού πλοίου, καθώς και η επιλογή των ηλεκτρικών διατάξεων και συσκευών πρέπει για λόγους αξιοπιστίας να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους παράγοντες.

2) Συνέχεια λειτουργίας.

Ακόμα και στις χειρότερες συνθήκες λειτουργίας του, είναι απαραίτητο να τροφοδοτούνται αδιαλείπτως με ηλεκτρική ενέργεια οι ηλεκτρικές συστημάς της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως (αντλίες κατασβέσεως πυρκαγιάς, αντλίες πηδαλίου κ.λπ.) ενός εμπορικού πλοίου.

Η αξιοπιστία αφορά στα επιμέρους τμήματα της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως, ενώ η συνέχεια λειτουργίας αφορά στην ηλεκτρική εγκατάσταση στο σύνολό της.

Οι ηλεκτρικές προστασίες (ο τύπος τους, τα κριτήρια επιλογής τους, η σωστή τοποθέτησή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο και η συντονισμένη λειτουργία τους) είναι εκείνες, οι οποίες καθορίζουν τη συνέχεια λειτουργίας της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως.

3) Εξοικονόμηση χώρου και πόρων.

Οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι απαραίτητο να επιλέγονται με αυστηρά τεχνικοοικονομικά κριτήρια. Η τεχνολογική εξέλιξη των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων εγγυάται τη βέλτιστη λειτουργία τους, καθώς και τη μείωση του βάρους και του όγκου της. Τελικά, η κατασκευή της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως ενός εμπορικού πλοίου, πρέπει να είναι απλή και να μην παρουσιάζει δυσκολίες, ακόμη και στην περίπτωση κατά την οποία το τεχνικό προσωπικό δεν είναι κατάλληλα εκπαιδευμένο.

1.4 Συστήματα τάσεων, ρευμάτων και συχνότητων των ηλεκτρικών δικτύων πλοίων.

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας στα εμπορικά πλοία γίνεται μέσω τριφασικών συστημάτων εναλλασσομένων ημιτονοειδών τάσεων και ρευμάτων. Τα κύρια **πλεονεκτήματα** του εναλλασσόμενου ημιτονοειδούς ρεύματος έναντι του συνεχούς είναι:

1) Η χρήση του στατού Μ/Σ μέσω του οποίου επιτρέπεται η μεταβολή των επιπέδων των τάσεων και των ρευμάτων, οπότε διαμορφώνονται ευνοϊκές συνθήκες διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

2) Η δημιουργία μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου απ' το εναλλασσόμενο ρεύμα, οπότε είναι δυνατή η λειτουργία του ασύγχρονου κινητήρα και

3) η μεταφορά πραγματικής ισχύος με λιγότερους αγωγούς ή με αγωγούς μικρότερης διατομής, οπότε προκύπτουν οικονομικά οφέλη.

1.4.1 Τριφασικά συστήματα.

Τα τριφασικά συστήματα, στα εμπορικά πλοία,

χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας διότι:

1) Οι τριφασικές γεννήτριες έχουν μικρότερο όγκο και βάρος έναντι των άλλων μονοφασικών ηλεκτρικών συστημάτων, αλλά και των ηλεκτρικών συστημάτων ΣΡ.

2) Γενικά, οι τριφασικές ηλεκτρικές γραμμές έχουν μικρότερο βάρος έναντι των άλλων ηλεκτρικών γραμμών, λαμβάνοντας υπόψη τις ίδιες ηλεκτρικές παραμέτρους.

Από ηλεκτρικής απόψεως, οι τριφασικές γεννήτριες εκφράζονται, σχηματικά, μέσω τριών γεννητριών οι οποίες παράγουν μια τάση ίδιου μέτρου αλλά διαφορετικής φάσεως, με βάση τις σχέσεις:

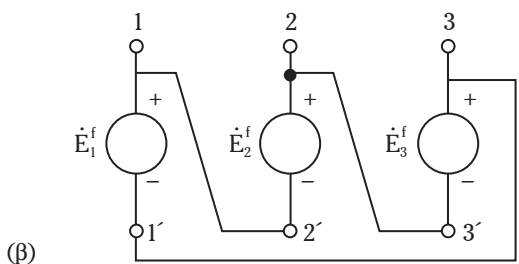
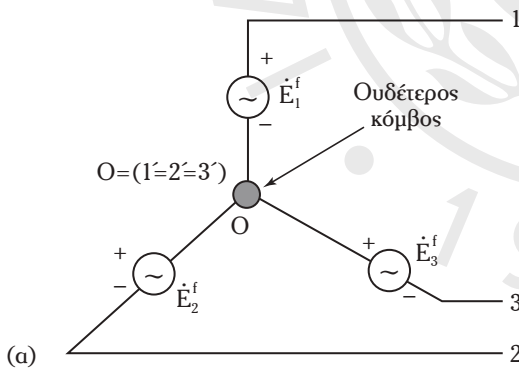
$$E_1^f = |E_o^f| \quad (1.1)$$

$$E_2^f = |E_o^f| e^{-j\frac{2}{3}\pi} \quad (1.2)$$

$$E_3^f = |E_o^f| e^{-j\frac{4}{3}\pi} = |E_o^f| e^{j\frac{2}{3}\pi} \quad (1.3)$$

Ονομάζουμε **φασική τάση** την ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ), την οποία παρέχει κάθε σύγχρονη γεννήτρια. Οι σύγχρονες γεννήτριες συνδέονται:

- 1) Σε αστέρα, χωρίς ουδέτερο αγωγό [σχ. 1.4α(α)] και
- 2) σε τρίγωνο [σχ. 1.4α(β)].



Σχ. 1.4α

Συνδεσμολογία φάσεων μιας γεννήτριας (α) σε αστέρα και (β) σε τρίγωνο.

Τα τριφασικά συστήματα κατηγοριοποιούνται σε συνάρτηση των τριάδων των ΗΕΔ τους και των αντιστοίχων ρευμάτων τους.

Ένα σύστημα ΗΕΔ είναι συμμετρικό (σχ. 1.4β), αν ισχύει:

$$\dot{E}_1^f + \dot{E}_2^f + \dot{E}_3^f = 0.$$

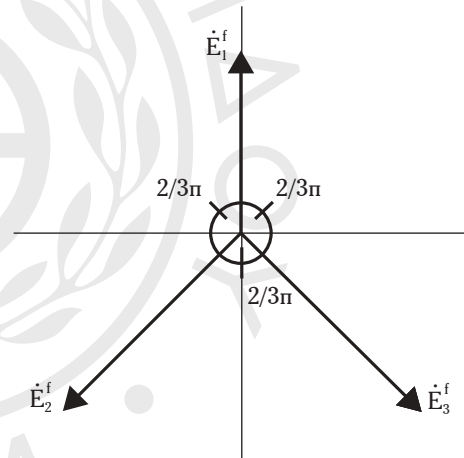
Ισορροπημένο σύστημα ονομάζεται το σύστημα των ρευμάτων για τα οποία ισχύει:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0. \quad (1.4)$$

Ένα κανονικό σύστημα φορτίων με ίδιες σύνθετες αντιστάσεις σε αστέρα ή τρίγωνο είναι ισορροπημένο. Ένα μη κανονικό σύστημα φορτίων με σύνθετες αντιστάσεις διαφορετικές είναι μη ισορροπημένο.

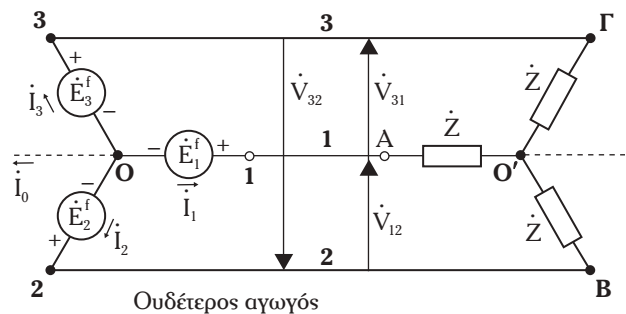
1) Τριφασικά συστήματα συμμετρικά και ισορροπημένα και φορτία σε σύνδεση σε αστέρα.

Στο σχήμα 1.4γ, δίδεται σχηματικά ένα τριφασικό σύστημα φάσεων μίας γεννήτριας και φορτίων σε σύνδεση αστέρα. Στη συνδεσμολογία του σχήματος,



Σχ. 1.4β

Τριφασικό συμμετρικό σύστημα τάσεων.



Σχ. 1.4γ

Τριφασικό σύστημα φάσεων γεννήτριας και φορτίων σε σύνδεση αστέρα.

το ρεύμα γραμμής είναι το ίδιο με το ρεύμα, το οποίο παράγεται σε κάθε φάση της γεννήτριας. Ισχύει:

$$I_1 = \frac{E_1^f}{Z} \quad (1.5)$$

$$I_2 = \frac{E_2^f}{Z} \quad (1.6)$$

$$I_3 = \frac{E_3^f}{Z}. \quad (1.7)$$

V_{32} , V_{12} , και V_{31} είναι οι πολικές τάσεις (τάσεις μεταξύ των φάσεων) του συστήματος. Το ρεύμα στον ουδέτερο αγωγό, ισούται με το μηδέν, οπότε απαιτούνται μόνο τρεις αγωγοί:

$$I_0 = -(I_1 + I_2 + I_3) = -\frac{1}{Z}(E_1^f + E_2^f + E_3^f) = 0. \quad (1.8)$$

Οι σχέσεις μεταξύ των πολικών και των φασικών τάσεων δίδονται ως εξής:

$$V_{12} = E_1^f - E_2^f \quad (1.9)$$

$$\dot{V}_{12} = |\dot{E}_o^f| - |\dot{E}_o^f| \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} = |\dot{E}_o^f| \left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right). \quad (1.10)$$

Αυτό προκύπτει διότι ισχύει:

$$|E_o^f| = |E_o^f| \cdot \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) + j|E_o^f| \cdot \sin\left(-\frac{2\pi}{3}\right).$$

Επί πλέον ισχύει:

$$\cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2} \quad \text{και} \quad \sin\left(-\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

$$\text{Οπότε έχουμε: } |\dot{E}_o^f| \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} = |\dot{E}_o^f| \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right).$$

$$\begin{aligned} \text{Ισχύει: } |\dot{E}_o^f| \cdot \left(\frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) &= \\ = \sqrt{\left(|\dot{E}_o^f| \cdot \frac{3}{2} \right)^2 + \left(|\dot{E}_o^f| \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2} \cdot e^{j\theta} & \stackrel{\text{για } \theta}{=} \frac{|\dot{E}_o^f| \frac{\sqrt{3}}{2}}{|\dot{E}_o^f| \frac{3}{2}} = \sqrt{3} |\dot{E}_o^f| e^{j\frac{\pi}{6}} \end{aligned}$$

$$\text{Οπότε έχουμε: } \dot{V}_{12} = \sqrt{3} |\dot{E}_M^f| \cdot e^{j\frac{\pi}{6}}.$$

Για λόγους συμμετρίας ισχύει:

$$V_{32} = |V_{12}| \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad (1.11)$$

$$V_{31} = |V_{12}| \quad (1.12)$$

Στο σχήμα 1.48 δίδεται η διανυσματική παράσταση των φασικών και πολικών τάσεων.

2) Τριφασικά συστήματα συμμετρικά και ισορροπημένα και φορτία σε σύνδεση σε τρίγωνο.

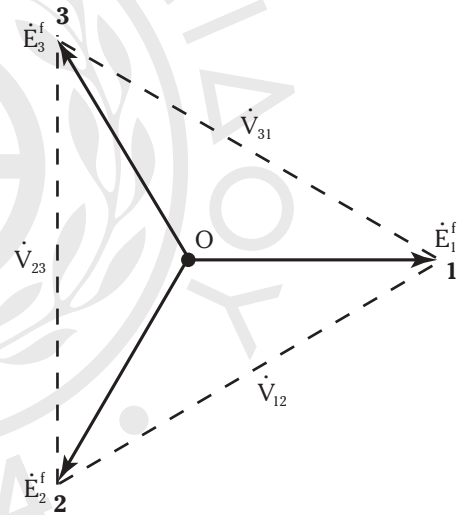
Στο σχήμα 1.4ε δίδεται συμμετρικό σύστημα τάσεων, σε τρίγωνο, το οποίο τροφοδοτεί κανονικό σύστημα καταναλώσεων σε τρίγωνο.

Τα ρεύματα γραμμής ($\dot{I}_{\ell 2}$, $\dot{I}_{\ell 3}$, $\dot{I}_{\ell 1}$) διαφέρουν από τα φυσικά ρεύματα της συνδεσμολογίας:

$$I_1 = I_1 = I_{\ell 2} - I_{\ell 3} \quad (1.13)$$

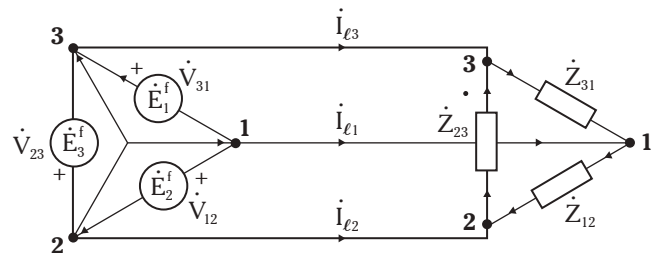
ρεύμα γραμμής φασικά ρεύματα

$$\dot{I}_{\ell 2} = \dot{I}_2 = \dot{I}_{23} - \dot{I}_{12} \quad (1.14)$$



Σχ. 1.48

Διανυσματική παράσταση πολικών και φασικών τάσεων στη συνδεσμολογία σε αστέρα.



Σχ. 1.4ε

Συμμετρικό σύστημα τάσεων και κανονικό φορτίο συνδεσμολογίας τριγώνου.

$$I_3 = I_3 = I_{31} - I_{23}. \quad (1.15)$$

$$\text{Είναι: } I_1 + I_2 + I_3 = 0. \quad (1.16)$$

Για ωμικό-επαγωγικό κανονικό (ισορροπημένο) φορτίο:

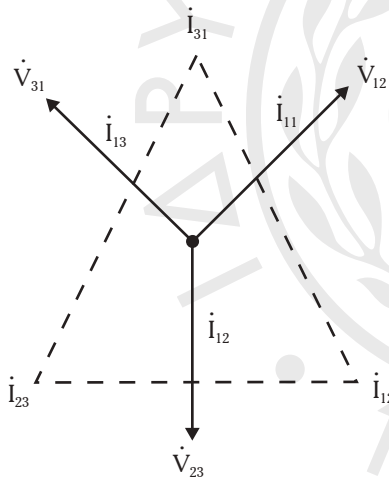
$$Z_{12} + Z_{23} + Z_{31} = Z. \quad (1.17)$$

$$\text{Ισχύει: } I_{12} = \frac{V_{12}}{Z} \quad (1.18)$$

$$I_{23} = \frac{V_{23}}{Z} = \left| \frac{V_{12}}{Z} \right| \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} = |I_{12}| \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad (1.19)$$

$$I_{31} = \frac{V_{31}}{Z} = \left| \frac{V_{12}}{Z} \right| \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} = |I_{12}| \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}}. \quad (1.20)$$

Στο σχήμα 1.4στ δίδεται το διανυσματικό διάγραμμα των φασικών ρευμάτων, των ρευμάτων γραμμής και των πολικών τάσεων.



Σχ. 1.4στ

Διανυσματικό διάγραμμα φασικών ρευμάτων, ρευμάτων γραμμής και πολικών τάσεων στη συνδεσμολογία σε τρίγωνο.

Η σχέση μεταξύ των ρευμάτων γραμμής και των φασικών ρευμάτων, στη συνδεσμολογία σε τρίγωνο είναι:

$$I_1 = I_{12} - I_{31} = |I_{12} - I_{31}| e^{j\frac{2\pi}{3}} = |I_{12}| \left(1 - e^{j\frac{2\pi}{3}} \right). \quad (1.21)$$

$$\text{Ισχύει όμως: } e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

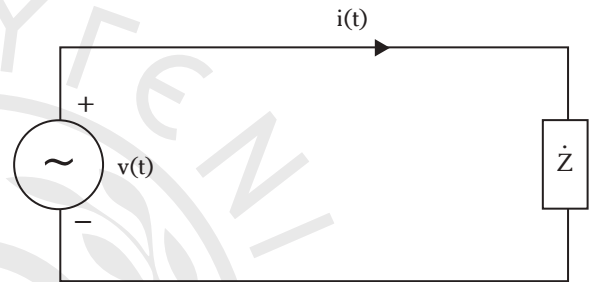
Οπότε έχουμε:

$$I_1 = |I_{12}| \left(\frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = |I_{12}| \cdot \sqrt{3} e^{-j\frac{\pi}{6}}. \quad (1.22)$$

Το ίδιο ισχύει και για τα ρεύματα I_2 και I_3 .

1.4.2 Ισχύς στα τριφασικά συστήματα τάσεων και ρευμάτων. Πραγματική ισχύς, άεργος ισχύς και φαινόμενη ισχύς.

Έστω ένας καταναλωτής, σύνθετης αντιστάσεως Z , ο οποίος τροφοδοτείται από πηγή τάσεως στιγμιαίας τιμής $v(t)$ και απορροφά ρεύμα στιγμιαίας τιμής $i(t)$ (σχ. 1.4ζ).



Σχ. 1.4ζ

Κύκλωμα πηγής τάσεως και σύνθετης αντιστάσεως.

Η τάση στους ακροδέκτες του καταναλωτή είναι:

$$v(t) = V_0 \eta \mu \omega t \quad (1.23)$$

όπου V_0 , είναι η μέγιστη τιμή της τάσεως $v(t)$.

Το ρεύμα που απορροφά ο καταναλωτής είναι:

$$i(t) = I_0 \eta \mu(\omega t - \phi) \quad (1.24)$$

όπου: I_0 είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος $i(t)$ και ϕ , η διαφορά φάσεως μεταξύ τάσεως και εντάσεως του ρεύματος.

Σε κάθε χρονική στιγμή t , ο καταναλωτής απορροφά τη στιγμιαία ισχύ:

$$P(t) = v(t)i(t) = V_0 I_0 \eta \mu \omega t \cdot \eta \mu(\omega t - \phi). \quad (1.25)$$

Ισχύει ότι:

$$\eta \mu \omega t \cdot \eta \mu(\omega t - \phi) = \frac{1}{2} [\text{συν}\phi - \text{συν}(2\omega t - \phi)]. \quad (1.26)$$

Η εξίσωση 1.25 με βάση την εξίσωση 1.26 γίνεται:

$$p(t) = \frac{V_0 I_0}{2} [\text{συν}\phi - \text{συν}(2\omega t - \phi)]$$

$$\hat{\eta} \quad p(t) = \frac{V_0 I_0}{2} \cdot \text{συν}\phi - \frac{V_0 I_0}{2} \cdot \text{συν}(2\omega t - \phi). \quad (1.27)$$

Η στιγμιαία ισχύς αποτελείται από δύο όρους. Ο **πρώτος** είναι ανεξάρτητος του χρόνου, οπότε αν εισάγουμε τις ενεργές τιμές στη θέση των μεγίστων τιμών παίρνομε:

$$\frac{V_0}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_0}{\sqrt{2}} \cdot \cos\varphi = VI\cos\varphi. \quad (1.28)$$

Ο **δεύτερος** όρος μεταβάλλεται στον χρόνο με τον νόμο του συνημιτόνου με μέση τιμή ίση με το μηδέν.

Η εξίσωση 1.28 εκφράζει την **πραγματική ισχύ** την οποία απορροφά ο καταναλωτής και η μονάδα μετρήσεως της είναι το Watt. Ο όρος $\cos\varphi$ εκφράζει τον συντελεστή ισχύος.

Η γωνία φ είναι θετική, αρνητική ή μηδέν στην περίπτωση κατά την οποία οι καταναλωτές είναι χωρητικοί, επαγωγικοί ή ωμικοί αντίστοιχα. Η πραγματική ισχύς είναι:

$$P \equiv P_{\mu} = VI\cos\varphi. \quad (1.29)$$

Η μέση ισχύς την οποία απορροφά ο καταναλωτής σε μια περίοδο T , δίδεται ως εξής:

$$P_{\mu} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt, \quad (1.30)$$

οπότε:

$$\begin{aligned} P_{\mu} &= \frac{1}{T} \int_0^T VI [\cos\varphi - \sin(2\omega t - \varphi)] dt = \\ &= VI\cos\varphi - \frac{VI}{T} \int_0^T \sin(2\omega t - \varphi) dt. \end{aligned} \quad (1.31)$$

Αλλά:
$$\int_0^T \sin(2\omega t - \varphi) dt = 0.$$

Η **μέση ισχύς** ονομάζεται και πραγματική ισχύς (μονάδα μετρήσεως σε Watt) και ουσιαστικά απεικονίζει την ισχύ η οποία καταναλώνεται στο κύκλωμα (απορροφάται).

Αντίστοιχα ορίζεται η άεργος ισχύς:

$$Q = VI\eta\mu\varphi. \quad (1.32)$$

Η **άεργος ισχύς** δεν παράγει μηχανικό έργο, αλλά διαδοχικά απορροφάται και στη συνέχεια αποδίδεται από το μαγνητικό πεδίο (επαγωγικά φορτία) ή από το ηλεκτρικό πεδίο (χωρητικά φορτία). Η μονάδα μετρήσεως της άεργου ισχύος είναι το **VAR**.

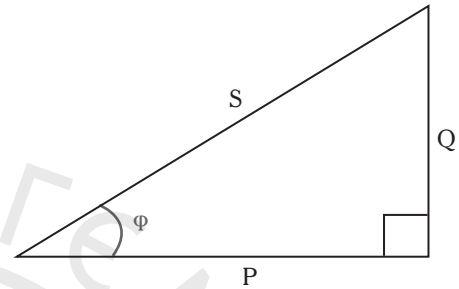
Γενικά, για την λειτουργία των επαγωγικών φορτίων απαιτούνται δύο ειδών ισχύες: η **πραγματική** (P) και η **άεργος ισχύς** (Q). Η άεργος ισχύς χρησιμοποιείται από τα επαγωγικά φορτία για την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Το γινόμενο των ενεργών τιμών της τάσεως και του ρεύματος σε ένα κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος εκφράζει τη **φαινόμενη ισχύ**, S :

$$S = VI. \quad (1.33)$$

Η **φαινόμενη ισχύς** μετρείται σε VA.

Η σχέση μεταξύ της φαινόμενης, πραγματικής και άεργου ισχύος δίδεται στο ορθογώνιο τρίγωνο (τρίγωνο των ισχύων) του σχήματος 1.4n.



Σχ. 1.4n

Το τρίγωνο των ισχύων.

Από το τρίγωνο η φαινόμενη ισχύς S , είναι:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (1.34)$$

Οι ισχύες στο τριφασικό σύστημα ορίζονται μέσω των πολικών τους μεγεθών, των τάσεων και των ρευμάτων:

$$P = \sqrt{3}V_{\pi}I_Y\cos\varphi \quad (1.35)$$

$$Q = \sqrt{3}V_{\pi}I_Y\eta\mu\varphi \quad (1.36)$$

$$S = \sqrt{3}V_{\pi}I_Y. \quad (1.37)$$

1.5 Διόρθωση του συντελεστή ισχύος.

1.5.1 Αναγκαιότητα διορθώσεως του συντελεστή ισχύος.

Στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων, το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο είναι ωμικό-επαγωγικό. Οι γεννήτριες πλοίων, παρέχουν εκτός από την πραγματική ισχύ (P) και άεργο ισχύ (Q), η οντότητα της οποίας εξαρτάται από τον συντελεστή ισχύος ($\cos\varphi$) του συνολικού φορτίου.

Λόγιο για τους οποίους επιβάλλεται η διόρθωση του συντελεστή ισχύος των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων είναι η μείωση:

1) Της εντάσεως του ρεύματος, το οποίο απορροφά η εγκατάσταση από τις γεννήτριες,

2) των απωλειών της ηλεκτρικής ενέργειας στους αγωγούς του δικτύου,

3) της διατομής των αγωγών και

4) η μείωση του μεγέθους των γεννητριών, των Μ/Σ και, γενικά, των συστημάτων παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

1.5.2 Διόρθωση συντελεστή ισχύος μονοφασικού φορτίου.

Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος (αντιστάθμιση) ενός μονοφασικού επαγωγικού φορτίου, γίνεται τοποθετώντας παράλληλα με το φορτίο έναν πυκνωτή κατάλληλης χωρητικότητας (σχ. 1.5α).

Υπενθυμίζουμε ότι με βάση το Θεώρημα του Boucherot:

1) Η συνολική πραγματική ισχύς είναι ίση με το αριθμητικό άθροισμα των επί μέρους πραγματικών ισχύων.

2) Η συνολική άεργος ισχύς είναι ίση με το αλγεβρικό άθροισμα των επί μέρους άεργων ισχύων, θεωρώντας θετικές τις επαγωγικές και αρνητικές τις χωρητικές, αντίστοιχα, άεργες ισχύες.

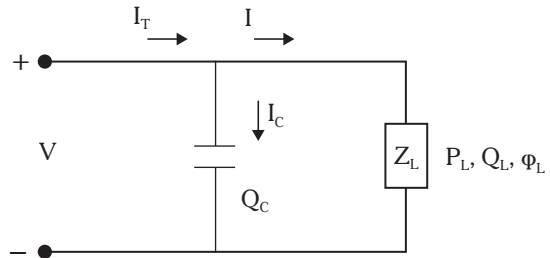
3) Η συνολική φαινόμενη ισχύς ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των επί μέρους φαινομένων ισχύων, οι οποίες θεωρούνται μιγαδικά μεγέθη.

Η άεργος ισχύς η οποία απορροφάται από τον πυκνωτή αντισταθμίζει την άεργο ισχύ που απορροφά ο επαγωγικός καταναλωτής. Όταν η συνολική άεργος ισχύς μηδενίζεται, τότε έχουμε **τέλεια** διόρθωση του συντελεστή ισχύος (αντιστάθμιση), διαφορετικά έχουμε **μερική** διόρθωση του συντελεστή ισχύος (αντιστάθμιση) (σχ. 1.5β).

Στην τέλεια, το επαγωγικό ρεύμα I , προστίθεται διανυσματικά με το χωρητικό ρεύμα I_C , και παίρνουμε το ρεύμα I_T , το οποίο δεν περιλαμβάνει την άεργο συνιστώσα, ενώ στη μερική αντιστάθμιση το ρεύμα I διατηρεί μία άεργο συνιστώσα, όμως, μικρότερη από το ρεύμα φορτίου.

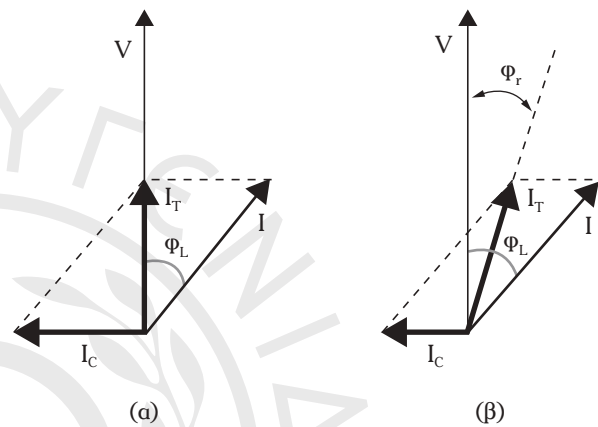
Στο ίδιο αποτέλεσμα καταλήγουμε όταν αναφερόμαστε στο τρίγωνο των ισχύων (σχ. 1.5γ), για μερική αντιστάθμιση.

Το φορτίο απορροφά μία πραγματική ισχύ P_L και μία άεργο (επαγωγική) ισχύ Q_L , το άθροισμα των οποίων δίνει τη φαινόμενη ισχύ $S_{\phi,L}$ (συνφ $_{L}$ είναι ο συντελεστής ισχύος του φορτίου). Ο πυκνωτής προσφέρει άεργο (επαγωγική) ισχύ Q_C , η οποία αφαιρείται από την άεργο ισχύ του φορτίου με αποτέλεσμα να παίρνουμε τη συνισταμένη άεργο (επαγωγική) ισχύ Q_r , στην οποία αντιστοιχεί η φαινόμενη ισχύς $S_{\phi,r}$ μικρότερη της $S_{\phi,L}$ και ένας συντελεστής ισχύος συνφ $_{r}$, μεγαλύτερος του συντελεστή ισχύος συνφ $_{L}$.



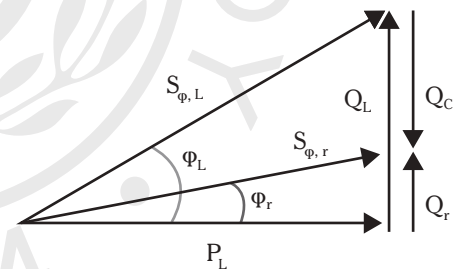
Σχ. 1.5α

Διόρθωση συντελεστή ισχύος μονοφασικού φορτίου.



Σχ. 1.5β

(α) Τέλεια αντιστάθμιση, (β) μερική αντιστάθμιση.



Σχ. 1.5γ

Τρίγωνο των ισχύων στη διόρθωση του συντελεστή ισχύος.

1.5.3 Υπολογισμός της ισχύος αντισταθμίσεως και της χωρητικότητας του πυκνωτή.

Ο υπολογισμός της ισχύος, η οποία είναι αναγκαία για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος ενός φορτίου από μια τιμή συνφ $_{L}$ σε μια τιμή συνφ $_{r}$, γίνεται με βάση το τρίγωνο των ισχύων.

Πράγματι, γνωρίζοντας ότι $\epsilon\phi\phi = \frac{Q}{P}$ (σχ. 1.4η), οπότε: $Q = P\epsilon\phi\phi$, βρίσκουμε:

$$\begin{aligned} Q_C &= Q_L - Q_r = P_L \epsilon\phi\phi_L - P_L \epsilon\phi\phi_r = \\ &= P_L (\epsilon\phi\phi_L - \epsilon\phi\phi_r). \end{aligned} \quad (1.38)$$

Η τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή είναι:

$$Q_C = \frac{V^2}{X_C} = V^2 \omega C = V^2 2\pi f C$$

και
$$C = \frac{Q_C}{2\pi f V^2} \quad (1.39)$$

όπου X_C η χωρητική αντίδραση του πυκνωτή.

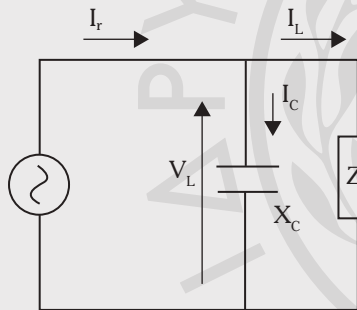
Η τιμή του ρεύματος το οποίο διατρέχει τον πυκνωτή δίδεται από την εξίσωση της αέργου ισχύος: $Q_C = VI_C$, λύνοντάς την ως προς I_C :

$$I_C = \frac{Q_C}{V}. \quad (1.40)$$

- Λυμένη Άσκηση.

Ένα φορτίο τροφοδοτείται με τάση 230 V, 50 Hz, ενώ απορροφά πραγματική ισχύ 2.500 W με $\text{συνφ} = 0,66$. Να διορθωθεί ο συντελεστής ισχύος στην τιμή 0,93 (σχ. 1.58).

Να υπολογίσετε τα ρεύματα I_r , I_c , I_L .



Σχ. 1.58

Λύση.

Ισχύουν τα ακόλουθα:

$P_L = 2.500 \text{ W}$: πραγματική ισχύς του φορτίου.

$\text{συνφ}_L = 0,66$: συντελεστής ισχύος φορτίου.

$V_L = 230 \text{ V}$: τάση τροφοδοσίας του φορτίου.

$\text{συνφ}_r = 0,93$: ζητούμενη τιμή συντελεστή ισχύος.

$f = 50 \text{ Hz}$: συχνότητα της τάσεως V_L .

Ζητούνται: Q_C η απαιτούμενη αέργου ισχύς αντισταθμίσεως, C η χωρητικότητα του πυκνωτή αντισταθμίσεως και I_L , I_c , I_r : το ρεύμα φορτίου, το ρεύμα του πυκνωτή και το ρεύμα της πηγής τάσεως, αντίστοιχα.

Η απαιτούμενη ισχύς Q_C , για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος είναι: $Q_C = P_L (\text{εφ}\phi_L - \text{εφ}\phi_r) = 2.500 (1,14 - 0,40) = 1.850 \text{ VAR}$.

Ισχύει ότι:
$$Q_C = \frac{V^2}{X_C} = \frac{V^2}{\frac{1}{\omega C}} = V^2 2\pi f C.$$

Λύνοντας ως προς C , προκύπτει:

$$C = \frac{Q_C}{2\pi f V^2} = \frac{1.850}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (230)^2} = 111 \mu\text{F}.$$

Τα ρεύματα I_r , I_L , I_c , υπολογίζονται με τον υπολογισμό των φαινομένων ισχύων:

Είναι:
$$S_r = V_L I_r \text{ και } I_r = \frac{S_{\phi,r}}{V_L}.$$

Είναι:
$$S_L = V_L I_L \text{ και } I_L = \frac{S_{\phi,L}}{V_L}.$$

Ισχύει ότι:
$$S_r = \sqrt{P_L^2 + Q_r^2} \text{ και } S_L = \sqrt{P_L^2 + Q_L^2}.$$

Είναι:
$$Q_L = P_L \cdot \text{εφ}\phi_L = 2.500 \cdot \text{εφ}0,66 = 2.846 \text{ VAR}.$$

Από το Θεώρημα του Boucherot έχουμε:

$$Q_r = Q_L - Q_C = 2.846 - 1.850 = 996 \text{ VAR}.$$

Οπότε αντικαθιστώντας, έχουμε:

$$S_r = \sqrt{(2.500)^2 + (996)^2} = 2.691 \text{ VA}$$

και
$$S_L = \sqrt{(2.500)^2 + (2.846)^2} = 3.788 \text{ VA}$$

τότε
$$I_r = \frac{2.691}{230} = 11,7 \text{ A}, I_L = \frac{3.788}{230} = 16,47 \text{ A}.$$

Το ρεύμα του πυκνωτή είναι:

$$I_c = \frac{V}{Z_C} = \frac{230}{28,70} = 8,01 \text{ A},$$

γιατί
$$Z_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{0,034854} = 28,70 \Omega.$$

Από την φαινόμενη ισχύ στο φορτίο, βρίσκουμε το μέτρο της σύνθετης αντιστάσεως του φορτίου:

$$S_L = \frac{V^2}{Z_L} \text{ και}$$

$$Z_L = \frac{V_L^2}{S_L} = \frac{(230)^2}{3.788} = 13,97 \Omega.$$

1.5.4 Διόρθωση συντελεστή ισχύος τριφασικών φορτίων.

Όταν το σύστημα των τάσεων και των ρευμάτων είναι τριφασικό, τότε το σύστημα των πυκνωτών που χρησιμοποιείται για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος συνδέεται σε αστέρα ή τρίγωνο (σχ. 1.5ε).

Στην **σύνδεση πυκνωτών σε αστέρα**, σε κάθε πυκνωτή εφαρμόζεται η φασική τάση (V_ϕ) του δικτύου. Η άεργος ισχύς, η οποία απορροφάται από το σύστημα πυκνωτών, είναι τριπλάσια από την αντίστοιχη άεργο ισχύ, που απορροφάται από έναν πυκνωτή του συστήματος, δηλαδή:

$$\begin{aligned} Q_C &= 3 \frac{V_\phi^2}{X_C} = 3\omega C_Y V_\phi^2 = \\ &= 3\omega C_Y \frac{V_n^2}{3} = \omega C_Y V_n^2 \end{aligned} \quad (1.41)$$

$$\text{και} \quad C_Y = \frac{Q_C}{\omega V_n^2} \quad (1.42)$$

όπου V_n η πολική τάση του δικτύου.

Στην **σύνδεση πυκνωτών σε τρίγωνο**, κάθε πυκνωτής τροφοδοτείται με την πολική τάση V_n του δικτύου. Η άεργος ισχύς, η οποία απορροφάται από το σύστημα πυκνωτών, είναι:

$$Q_C = 3 \frac{V_n^2}{X_C} = 3\omega C_\Delta V_n^2 \quad (1.43)$$

$$\text{και} \quad C_\Delta = \frac{Q_C}{3\omega V_n^2} \quad (1.44)$$

Η χωρητικότητα των πυκνωτών που συνδέονται σε τρίγωνο αποτελούν το $1/3$ της χωρητικότητας των πυκνωτών οι οποίοι συνδέονται σε αστέρα.

Για δεδομένη χωρητικότητα οι πυκνωτές οι οποίοι συνδέονται σε τρίγωνο απορροφούν μια άεργο ισχύ τριπλάσια από την αντίστοιχη ισχύ την οποία απορροφούν όταν συνδέονται σε αστέρα, με προφανές οικονομικό πλεονέκτημα.

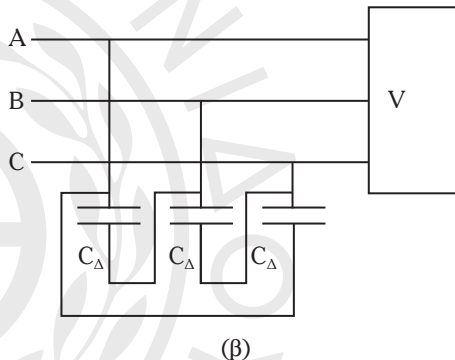
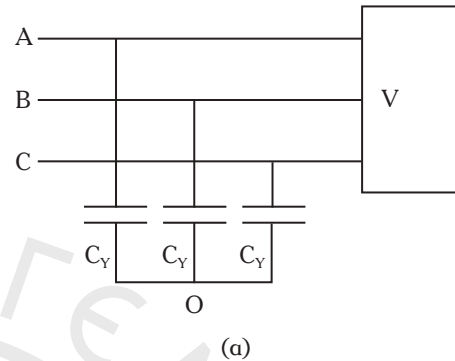
Στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις Χαμηλής Τάσεως (ΧΤ) χρησιμοποιείται η σύνδεση πυκνωτών σε τρίγωνο για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος, ενώ στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις Υψηλής Τάσεως (ΥΤ) χρησιμοποιείται η σύνδεση πυκνωτών σε αστέρα για την διόρθωση του συντελεστή ισχύος.

1.5.5 Τρόποι αντιστάθμισης.

Οι τρόποι αντιστάθμισης οι οποίοι, συνήθως, χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθοι:

- 1) Η **ατομική αντιστάθμιση** κατά την οποία

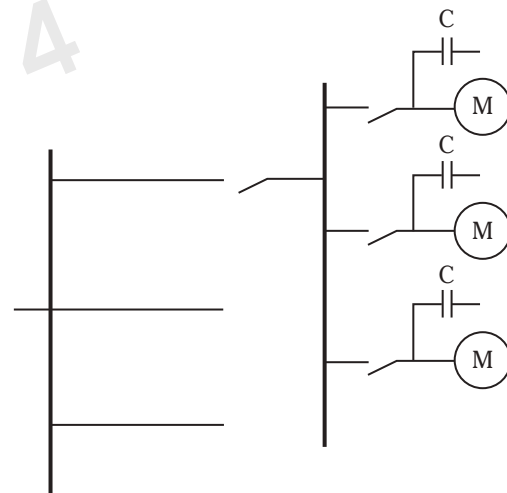
σε κάθε καταναλωτή ξεχωριστά, τοποθετείται ένας κατάλληλος πυκνωτής (σχ. 1.5στ). Αυτός ο τρόπος αντιστάθμισης, από τεχνικής απόψεως, είναι ο καλύτερος γιατί εγγυάται τη μείωση των απωλειών και των πτώσεων τάσεως. Η ατομική αντιστάθμιση συμφέρει μόνο όταν υπάρχουν μεγάλα συγκεντρωμένα φορτία.



Σχ. 1.5ε

Σύνδεση πυκνωτών

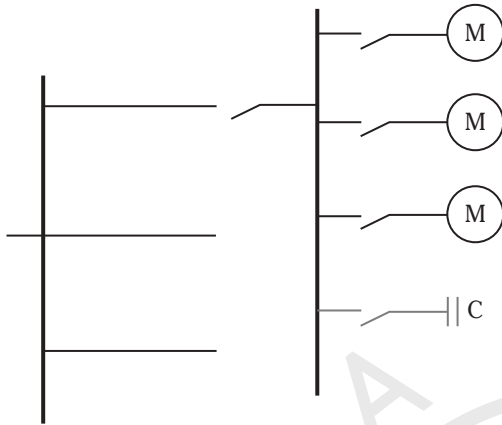
(α) σε αστέρα και (β) σε τρίγωνο.



Σχ. 1.5στ

Ατομική αντιστάθμιση.

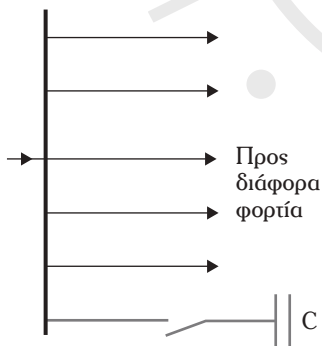
2) Η **ομαδική αντιστάθμιση** κατά την οποία κάθε ομάδα πυκνωτών αντισταθμίσεως συνδέεται παράλληλα με την αντίστοιχη ομάδα φορτίου ίδιας ισχύος (σχ. 1.5ζ). Οι ομάδες αντισταθμίσεως λειτουργούν για τον ίδιο αριθμό ωρών ταυτόχρονα.



Σχ. 1.5ζ
Ομαδική αντιστάθμιση.

3) Η **κεντρική αντιστάθμιση** κατά την οποία χρησιμοποιούνται συστοιχίες πυκνωτών για τον έλεγχο της αέργου ισχύος (σχ. 1.5η).

Η συστοιχία των πυκνωτών συνδέεται απ' ευθείας με κεντρικό ή δευτερεύοντα πίνακα. Αυτός ο τρόπος αντισταθμίσεως συνιστάται όταν στις εγκαταστάσεις υπάρχουν πολλαπλά φορτία με διαφορετικές απαιτήσεις ισχύος και διαφορετικούς χρόνους εκκινήσεως.



Σχ. 1.5η
Κεντρική αντιστάθμιση.

1.6 Τάσεις και συχνότητες ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων.

Στον πίνακα 1.6, δίνονται οι τυπικές τιμές των τάσεων και των αντιστοιχών συχνοτήτων, που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων.

Η τιμή της τάσεως 6.600 V για τις ηλεκτρικές

Πίνακας 1.6

Τυπικές τιμές των τάσεων και των αντιστοιχών συχνοτήτων, μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίων.

Χαμηλή τάση	Συχνότητα	Μέση τάση	Συχνότητα
380 V	50 Hz	2.200 V	50 Hz
415 V	60 Hz	3.300 V	50 Hz
440 V	60 Hz	6.000 V	50 Hz
600 V	60 Hz	6.600 V	50 Hz/60 Hz
660 V	60 Hz	11.000 V	60 Hz

εγκαταστάσεις πλοίων είναι το όριο της μέσης τάσεως. Οι τιμές των τάσεων μεγαλύτερες από 6.600 V ανήκουν στην κατηγορία των υψηλών τάσεων.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς (νιογνώμονες) το επιτρεπόμενο ποσοστό μεταβολής τάσεως στα μεταβατικά στάδια λειτουργίας της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως είναι έως $\pm 20\%$ για μέγιστη διάρκεια 1,5 s, ενώ στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι 6–10%. Από τον πίνακα 1.6 προκύπτει ότι οι συχνότητες των ηλεκτρικών δικτύων ενός εμπορικού πλοίου είναι 50 ή 60 Hz. Επιτρέπονται μεταβολές συχνότητας $\pm 10\%$ στη μεταβατική κατάσταση (με μέγιστη διάρκεια 10 s) και $\pm 5\%$ στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, αντίστοιχα, του ηλεκτρικού δικτύου.

Η συχνότητα των 60 Hz υπερέρχει από εκείνη των 50 Hz. Πράγματι, ένας κινητήρας ο οποίος λειτουργεί στα 60 Hz έχει καλύτερη σχέση ισχύος/βάρους από έναν αντίστοιχο των 50 Hz γιατί κατασκευάζεται με μικρότερες διαστάσεις και κοστίζει λιγότερο.

Μεγάλη αύξηση των τιμών της συχνότητας προκαλεί μεγάλες απώλειες λόγω μαγνητικής υστερήσεως και δινορρευμάτων στα μαγνητικά κυκλώματα των ηλεκτρικών διατάξεων, καθώς επίσης αυξάνεται και η ανά μήκος συνολική αντίδραση των ηλεκτρικών γραμμών, με αποτέλεσμα να μειώνεται η μεταφερόμενη ηλεκτρική ισχύς.

Μεγάλες τιμές της συχνότητας προκαλούν μεγάλες απώλειες του επιδερμικού φαινομένου των ηλεκτρικών αγωγών.

1.7 Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος σε εμπορικά πλοία.

Σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου, χαμηλής τάσεως, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται, συνήθως

από σύγχρονες γεννήτριες (εναλλακτήρες) 450 V, 440 V, πολικές τάσεις 60 Hz και 127 V, 110 V, αντίστοιχα για φασικές τάσεις. Για πλοία, τα οποία δραστηριοποιούνται αποκλειστικά στην Ευρώπη, το σύστημα πολικής τάσεως είναι 380 V, και το σύστημα φασικών τάσεων 220 V με συχνότητα 50 Hz.

Τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα εμπορικό πλοίο, ανάλογα με τον τύπο της κύριας μηχανής που ενεργοποιεί την/τις γεννήτρια/ιες, κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες:

- 1) Γεννήτριες με κινητήριες μηχανές ντιζέλ.
- 2) Γεννήτριες με κινητήριες μηχανές στροβίλους.
- 3) Γεννήτριες, οι οποίες ενεργοποιούνται απευθείας από την κινητήρια μηχανή προώσεως (ΚΜΠ), γεννήτριες άξονα ή εξαρτημένες γεννήτριες.
- 4) Συνδυασμός αξονικής γεννήτριας και συμβατικών ηλεκτροπαραγωγών ζευγών.

1.7.1 Γεννήτριες με κινητήριες μηχανές ντιζέλ.

Το σύστημα ντιζελογεννήτριας χρησιμοποιείται συχνά με αυτόνομο τρόπο, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου, σύμφωνα με το διάγραμμα του σχ. 1.7α.

1.7.2 Γεννήτριες με κινητήριες μηχανές στροβίλου.

Στο σχήμα 1.7β, δίδεται η σχηματική διαγραμματική παράσταση μιας εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία συνδυάζει στροβιλογεννήτρια και ντιζελογεννήτρια.

Οι αυτόνομες μονάδες ντιζελογεννητριών παρεμβαίνουν όταν οι ανάγκες σε ηλεκτρική ισχύ δεν μπορούν να καλυφθούν από την στροβιλογεννήτρια.

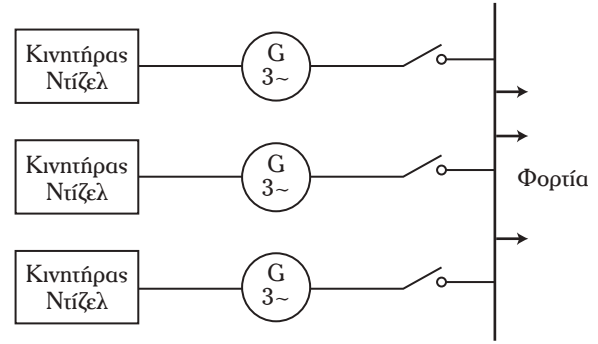
1.7.3 Αξονική γεννήτρια.

Η ιδέα της αξονικής γεννήτριας αναπτύχθηκε στο τέλος της δεκαετίας του '60, όταν λόγω της ενεργειακής κρίσεως, οι κατασκευαστές την πρότειναν προκειμένου να κάνουν οικονομία του καυσίμου της κινητήριας μηχανής του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους.

Η αξονική γεννήτρια (σχ. 1.7γ) παράγει ηλεκτρική ενέργεια εκμεταλλευόμενη την περιστροφή του ελικοφόρου άξονα, ο οποίος συνδέεται με τον κινητήρα προώσεως.

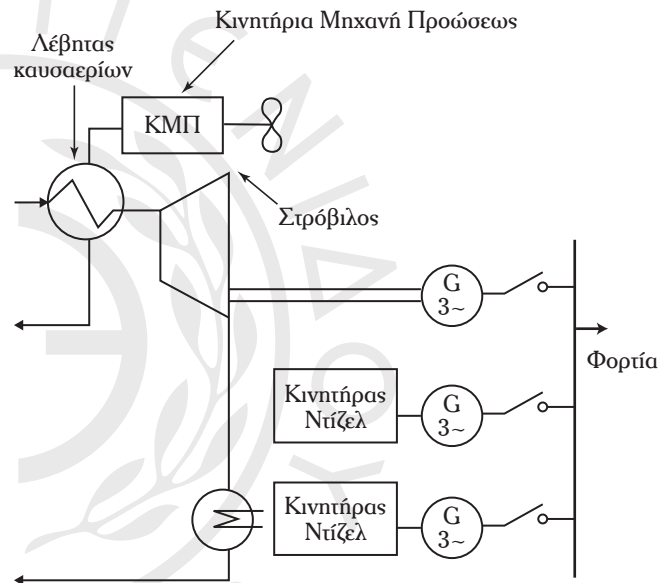
Στο σχήμα 1.7γ προβλέπεται πολλαπλασιαστής στροφών για να περιστρέφεται η γεννήτρια με μεγαλύτερο αριθμό στροφών απ' τις στροφές της έλικας.

Υπάρχουν δύο θεμελιώδη προβλήματα τα οποία προκύπτουν από τη λειτουργία του συστήματος παρα-



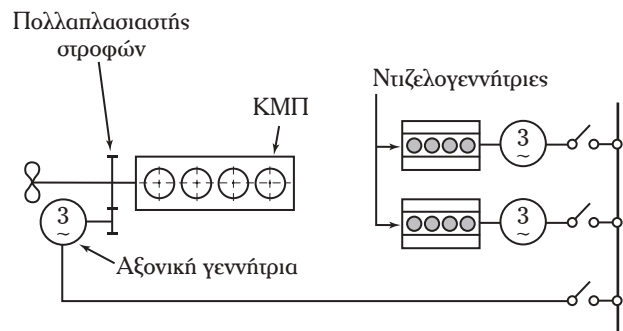
Σχ. 1.7α

Σχηματική διαγραμματική παράσταση ενός συστήματος ντιζελογεννήτριας.



Σχ. 1.7β

Σχηματική παράσταση εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία συνδυάζει στροβιλογεννήτρια και ντιζελογεννήτρια.



Σχ. 1.7γ

Αξονική γεννήτρια, η οποία ενεργοποιείται από ΚΜΠ.

γωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αξονική γεννήτρια:

1) Οι επιπτώσεις της μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής του ελικοφόρου άξονα στην ηλεκτρική τάση και τη συχνότητα. Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αξονική γεννήτρια προορίζεται, κυρίως, σε πλοία στα οποία οι μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής των κινητηρίων μηχανών προώσεως περιλαμβάνονται σε περιορισμένα διαστήματα.

2) Η ευστάθεια του ηλεκτρικού συστήματος, ενός πλοίου, όταν η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται παράλληλα με την αξονική γεννήτρια με τα συμβατικά ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, γιατί πρόκειται για συστήματα παραγωγής με τελείως διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.

Για την εξασφάλιση της ευστάθειας του ηλεκτρικού συστήματος υλοποιούνται ειδικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, οι οποίες προσφέρουν τις ακόλουθες δυνατότητες λειτουργίας:

1) Λειτουργία της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως μόνο με συμβατικά ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη.

2) Λειτουργία της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως μόνο με αξονικές γεννήτριες.

3) Σωστή, σύμφωνα με τους κανονισμούς, παράλληλη λειτουργία.

Όταν ο αριθμός στροφών της αξονικής γεννήτριας μεταβάλλεται λόγω μεταβολής της ταχύτητας της κινητήριας προωστικής μηχανής, τότε μεταβάλλεται η συχνότητα και η ηλεκτρική τάση.

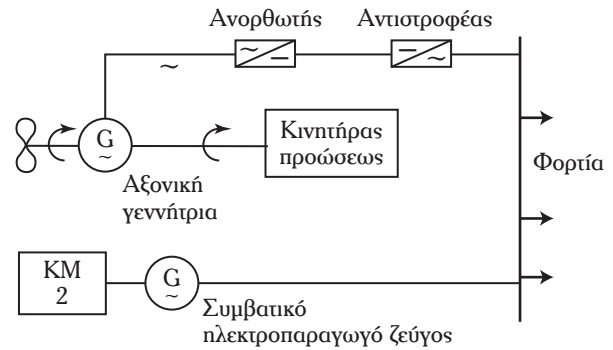
Σε αυτήν την περίπτωση (σχ. 1.7δ) μετά την σύγχρονη γεννήτρια τοποθετείται μετατροπέας συχνότητας, ο οποίος αποτελείται από ανορθωτή και από αντιστροφή, έτσι ώστε η συχνότητα να είναι σταθερή.

1.7.4 Συνδυασμός αξονικής γεννήτριας και συμβατικών ηλεκτροπαραγωγών ζευγών.

Στο σχήμα 1.7ε παρουσιάζεται ένα απλό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο συνδυάζει την αξονική γεννήτρια με συμβατικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγών ζευγών και περιλαμβάνει και δύο αντλίες λαδιού για τη λειτουργία των μηχανημάτων καταστρώματος.

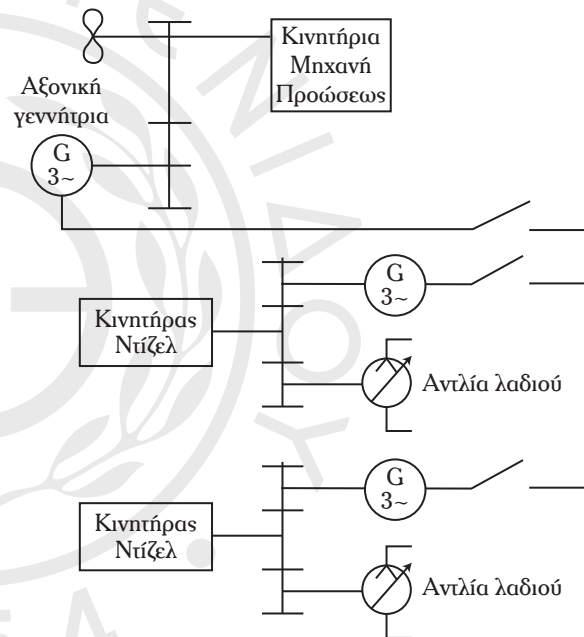
1.8 Εξηλεκτρισμένο εμπορικό πλοίο (All electric ship).

Τα τελευταία χρόνια οι εφαρμογές της ηλεκτρικής ενέργειας στα εμπορικά πλοία αποκτούν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Ένας ορισμένος αριθμός ντιζελογεννητριών, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια η οποία καλύπτει τις ανάγκες ηλεκτρικής προώσεως και άλλες



Σχ. 1.7δ

Σχηματική παράσταση εγκαταστάσεως παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός εμπορικού πλοίου, η οποία συνδυάζει αξονική γεννήτρια μεταβλητού αριθμού στροφών και συμβατικό ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος.



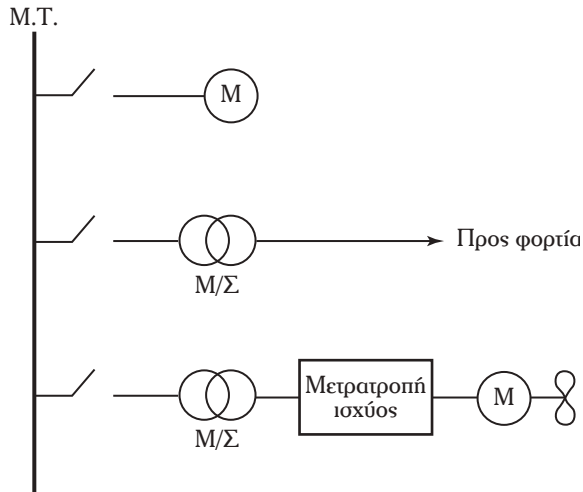
Σχ. 1.7ε

Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αξονική γεννήτρια και συμβατικά ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη.

λειτουργικές απαιτήσεις ενός πλοίου. Η απόλυτη «κυριαρχία» της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα εμπορικό πλοίο καθορίζει το εξηλεκτρισμένο πλοίο. Στο σχήμα 1.8α, δίδεται το διάγραμμα του ενιαίου τύπου ηλεκτροστασίου.

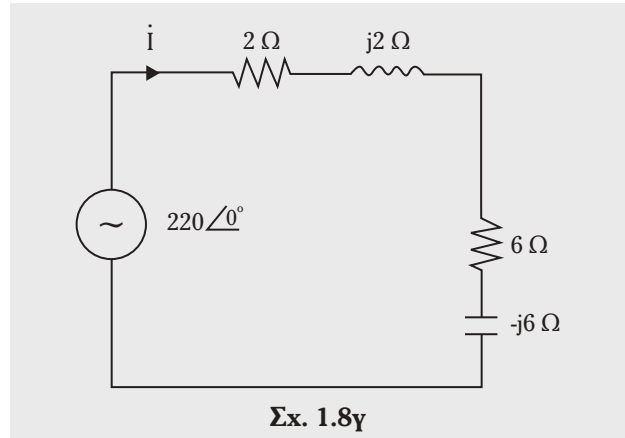
Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ντιζελογεννητρίες 6 kV, 60 Hz, που τροφοδοτούν τον κύριο πίνακα της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως του πλοίου.

Η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα προώσεως είναι 3 kV.



Σχ. 1.8α

Τύπος ενιαίου πλεκροασίου.



Σχ. 1.8γ

Είναι: $I_a = I = 24,60 \angle 26,56^\circ \text{ A}$

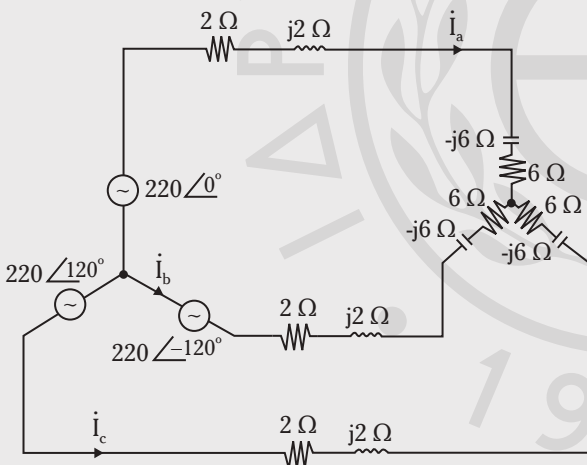
$$\begin{aligned} \dot{I}_b &= 24,60 \angle 26,56^\circ - 120^\circ \text{ A} \\ &= 24,60 \angle -93,44^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_c &= 24,60 \angle 26,56^\circ + 120^\circ \text{ A} \\ &= 24,60 \angle 146,56^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

- Λυμένες Ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Για το κύκλωμα του σχήματος 1.8β να βρεθούν τα ρεύματα I_a , I_b και I_c .



Σχ. 1.8β

Λύση.

Το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 1.8γ.

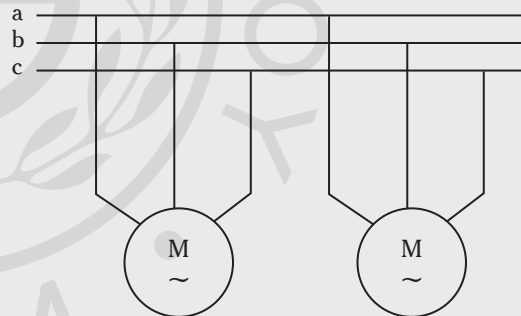
Από το κύκλωμα προκύπτει ότι:

$$Z_{\text{ολ}} = 6 + 2 + j2 - j6 = 8 - j4 \Omega.$$

Οπότε:
$$I = \frac{V}{Z_{\text{ολ}}} = \frac{220 \angle 0^\circ}{8 - j4 \Omega} = \frac{220 \angle 0^\circ}{8,94 \angle -26,56^\circ} = 24,60 \angle 26,56^\circ \text{ A}.$$

Άσκηση 2.

Δύο τριφασικοί κινητήρες συνδέονται παράλληλα σε δίκτυο πολικής τάσεως 380 V (σχ. 1.8δ).



$1^{\text{ος}} M$
 $P_1 = 26 \text{ kW}$
 $\text{συν}\phi_1 = 0,67 \text{ επαγ.}$
 50 Hz

$2^{\text{ος}} M$
 $P_2 = 41 \text{ kW}$
 $\text{συν}\phi_2 = 0,76 \text{ επαγ.}$
 50 Hz

Σχ. 1.8δ

Να υπολογίσετε:

- 1) Τη φαινόμενη και την άεργο ισχύ του κάθε κινητήρα.
- 2) Τη συνολική φαινόμενη, πραγματική και άεργο ισχύ.
- 3) Το συνολικό ρεύμα γραμμής και τον συνολικό συντελεστή ισχύος $\text{συν}\phi$.
- 4) Αν ο συντελεστής ισχύος $\text{συν}\phi$ διορθωθεί σε $\text{συν}\phi = 0,94$, ποια είναι η τιμή του συνολικού ρεύματος γραμμής;

5) Ποια η χωρητική ισχύς και η χωρητικότητα των πυκνωτών στην συνδεσμολογία σε αστέρα και σε τρίγωνο.

Λύση.

1) Η φαινόμενη ισχύς των κινητήρων είναι:

$$S^{(1)} = \frac{P_1}{\cos\phi_1} = \frac{26 \text{ kW}}{0,67} = 38,80 \text{ kVA}$$

$$S^{(2)} = \frac{P_2}{\cos\phi_2} = \frac{41 \text{ kW}}{0,76} \approx 54 \text{ kVA.}$$

Η άεργος ισχύς των κινητήρων είναι:

$$Q_1 = S^{(1)} \cdot \sin\phi_1 = P_1 \cdot \tan\phi_1 = 26 \text{ kW} \cdot \tan 47,93^\circ = 28,80 \text{ kVAR}$$

$$Q_2 = S^{(2)} \cdot \sin\phi_2 = P_2 \cdot \tan\phi_2 = 41 \text{ kW} \cdot \tan 40,53^\circ \approx 35 \text{ kVAR.}$$

2) $P_{\text{ολ}} = 26 + 41 = 67 \text{ kW}$,

$$Q_{\text{ολ}} = 28,80 + 35 = 63,8 \text{ kVAR}$$

$$S^{(\text{ολ})} = \sqrt{P_{\text{ολ}}^2 + Q_{\text{ολ}}^2} = \sqrt{(67)^2 + (63,8)^2} = \sqrt{8.559,44} = 92,52 \text{ kVA.}$$

3) Το συνολικό ρεύμα είναι:

$$I = \frac{S^{(\text{ολ})}}{\sqrt{3}V_n} = \frac{92,52 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 140,7 \text{ A}$$

όπου V_n η πολική τάση του δικτύου.

Ο συντελεστής ισχύος δίδεται ως εξής:

$$\cos\phi = \frac{P_{\text{ολ}}}{S^{(\text{ολ})}} = \frac{67}{92,52} = 0,724 \text{ επαγ.}$$

Οπότε η διανυσματική έκφραση του ρεύματος I είναι:

$$I = 140,7 \angle -43,61^\circ \text{ A.}$$

4) Όταν ο συντελεστής ισχύος διορθώνεται, στο $\cos\phi = 0,94$, τότε το συνολικό ρεύμα είναι:

$$I = \frac{P_{\text{ολ}}}{\sqrt{3} \cdot V_n \cdot \cos\phi} = \frac{67.000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,94} \approx 108 \text{ A.}$$

Οπότε η νέα τιμή της αέργου ισχύος είναι:

$$Q_{\text{ολ}}^{(1)} = P_{\text{ολ}} \cdot \tan\phi = 67 \cdot \tan 19,95^\circ = 24,32 \text{ kVAR.}$$

Η άεργος ισχύς των πυκνωτών είναι:

$$Q_{\text{πυκ.}} = Q_{\text{ολ}} - Q_{\text{ολ}}^{(1)} = 63,8 - 24,32 = 39,48 \text{ kVAR.}$$

5) Για τη συνδεσμολογία σε τρίγωνο η χωρητικότητα C_{Δ} είναι:

$$C_{\Delta} = \frac{Q_{\text{πυκ.}}}{3V_n^2\omega} = \frac{39,48 \cdot 10^3}{3 \cdot 380^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} \approx 300 \mu\text{F.}$$

Για την συνδεσμολογία σε αστέρα η C_Y είναι:

$$C_Y = 3C_{\Delta} = 900 \mu\text{F.}$$

Άσκηση 3.

Να αποδείξετε γιατί το τριφασικό σύστημα πλεονεκτεί έναντι του μονοφασικού συστήματος.

Λύση.

Έστω ένα τριφασικό φορτίο συνδέεται σε μια τριφασική ηλεκτρική γραμμή, ενώ ένα μονοφασικό φορτίο συνδέεται στην αντίστοιχη μονοφασική γραμμή.

Ποια από τις δύο λύσεις πλεονεκτεί;

Υποθέτουμε ότι η πολική τριφασική τάση V_n συμπίπτει με την τάση V στη μονοφασική ηλεκτρική γραμμή. Έχομε $V_{3\phi} = V_{1\phi}$ και έστω ότι τα δύο φορτία βρίσκονται στην ίδια απόσταση. Η πραγματική ισχύς την οποία απορροφούν τα δύο φορτία είναι:

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}V_{3\phi}I_{3\phi}\cos\phi, \quad P_{1\phi} = V_{1\phi}I_{1\phi}\cos\phi.$$

Έστω ότι τα δύο φορτία απορροφούν την ίδια πραγματική ισχύ: $P_{3\phi} = P_{1\phi}$.

Οπότε έχομε: $\sqrt{3}I_{3\phi} = I_{1\phi}$.

Συμπέρασμα: Στη μονοφασική γραμμή το ρεύμα γραμμής είναι $\sqrt{3}$ φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο στην τριφασική γραμμή.

Ποιες είναι οι απώλειες στις ηλεκτρικές γραμμές στις δύο περιπτώσεις;

Έχομε:

Αν W οι απώλειες γραμμής, τότε:

$$W_{3\phi} = 3 \left(\rho \cdot \frac{L}{A_{3\phi}} \right) \cdot I_{3\phi}^2, \quad W_{1\phi} = 2 \left(\rho \cdot \frac{L}{A_{1\phi}} \right) \cdot I_{1\phi}^2$$

όπου: ρ η ειδική αντίσταση του υλικού των ηλεκτρικών γραμμών, L το μήκος των ηλεκτρικών γραμμών και A το εμβαδόν διατομής των αγωγών της ηλεκτρικής γραμμής (οι αγωγοί κατασκευάζονται από χαλκό).

Αν οι απώλειες και στις δυο περιπτώσεις είναι ίδιες, τότε: $W_{3\phi} = W_{1\phi}$ και $A_{1\phi} = 2A_{3\phi}$.

Υπολογίζομε τον όγκο του χαλκού για τις δύο ηλεκτρικές γραμμές:

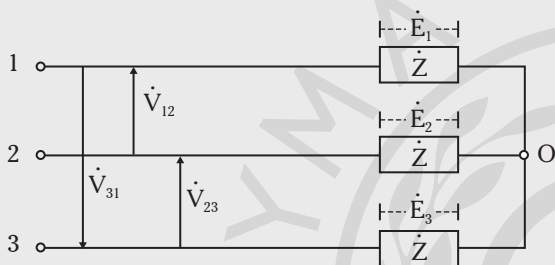
$$\begin{aligned} (\text{Όγκος})_{3\phi} &= 3LA_{3\phi} = 3L \frac{A_{1\phi}}{2} = \\ &= \frac{3}{4}(2LA_{1\phi}) = \frac{3}{4}(\text{Όγκος})_{1\phi}. \end{aligned}$$

Συμπέρασμα: Όταν για την ίδια τάση έχουμε ίδια μεταφερόμενη πραγματική ισχύ και ίδιες απώλειες στην ηλεκτρική γραμμή, στην περίπτωση της τριφασικής γραμμής έχουμε οικονομία καλωδίου ίση με 25%.

Άσκηση 4.

Δίδεται η συνδεσμολογία του σχήματος 1.8ε.

Ισχύουν τα ακόλουθα: $V_{12} = 380 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $Z = 6 + j5 \Omega$ (η ανά φάση σύνθετη αντίσταση των ηλεκτρικών γραμμών).



Σχ. 1.8ε

Να υπολογίσετε τα ρεύματα γραμμών.

Λύση.

$$\dot{E}_1 = \frac{V_{12}}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ} = 220 \cdot e^{-j30^\circ} \text{ V},$$

$$E_2 = 220 \cdot e^{-j150^\circ} \text{ V}, \quad E_3 = 220 \cdot e^{-j240^\circ} \text{ V}.$$

Είναι: $Z = 6 + j5 = 7,8 \cdot e^{j40^\circ} \Omega,$

$$I_1 = \frac{E_1}{Z} = \frac{220 \cdot e^{-j30^\circ}}{7,8 \cdot e^{j40^\circ}} = 28 \cdot e^{-j70^\circ} \text{ A},$$

$$I_2 = \frac{E_2}{Z} = \frac{220 \cdot e^{-j150^\circ}}{7,8 \cdot e^{j70^\circ}} = 28 \cdot e^{-j220^\circ} \text{ A},$$

$$I_3 = \frac{E_3}{Z} = \frac{220 \cdot e^{-j240^\circ}}{7,8 \cdot e^{j70^\circ}} = 28 \cdot e^{-j310^\circ} \text{ A}.$$

Άσκηση 5.

Δίδεται η εγκατάσταση του σχήματος 1.8στ.

Στο σημείο Α συνδέεται φορτίο συνδεδεμένο σε αστέρα, συνολικής ισχύος:

$P_A = 16 \text{ kW}$, $\text{συν}\phi_A = 0,877$, $V_A = 400 \text{ V}$ και 50 Hz .

Στη γραμμή Α-Β, για κάθε αγωγό έχουμε:

$$R_1 = 0,06 \Omega \quad \text{και} \quad X_1 = 0,04 \Omega.$$

Στο σημείο Β συνδέονται πυκνωτές συνδεδεμένοι σε τρίγωνο. Κάθε πυκνωτής έχει: $X_C = 80 \Omega$.

Στη γραμμή Β-Γ, για κάθε αγωγό έχουμε:

$$R_2 = 0,06 \Omega \quad \text{και} \quad X_2 = 0,05 \Omega.$$

Να υπολογίσετε τα ρεύματα: I_1 , I_2 , I_C , τις τάσεις στα σημεία Β και Γ και τον συντελεστή ισχύος στο σημείο Γ.

Λύση.

Υπολογίζουμε αρχικά το ρεύμα I_1 , το οποίο απορροφά το φορτίο, συνδεδεμένο σε αστέρα.

$$I_1 = \frac{P_A}{\sqrt{3}V_A \text{συν}\phi_A} = \frac{16.000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,877} = 26,36 \text{ A}.$$

Η άεργος ισχύς στο σημείο Α είναι:

$$Q_A = P_A \epsilon\phi_A = 16 \cdot 0,55 = 8,8 \text{ kVAR}.$$

Υπολογισμός πραγματικής και αέργου ισχύος στο τμήμα ΑΒ της γραμμής:

$$P_{AB} = 3R_1 I_1^2 = 3 \cdot 0,06 \cdot (26,36)^2 = 125 \text{ W}$$

$$Q_{AB} = 3X_1 I_1^2 = 3 \cdot 0,04 \cdot (26,36)^2 = 83,38 \text{ VAR}.$$

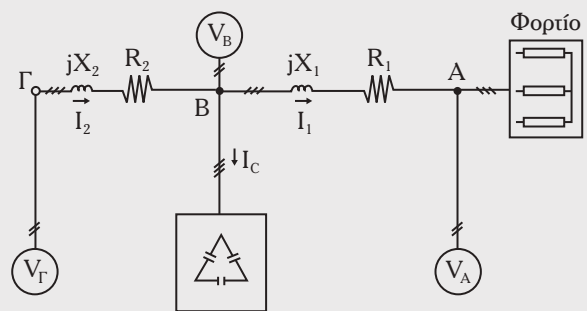
Δεδομένα στο σημείο Β, όταν δεν πάρουμε υπόψη την σύνδεση των πυκνωτών (φορτίο σε αστέρα και γραμμή Α-Β):

$$P_A^* = P_A + P_{AB} = 16.000 + 125 = 16,12 \text{ kW}$$

$$Q_A^* = Q_A + Q_{AB} = 8.800 + 83,38 = 8,87 \text{ kVAR}.$$

Φαινόμενη ισχύς στο τμήμα Α-Β:

$$\begin{aligned} S^* &= \sqrt{(P_A^*)^2 + (Q_A^*)^2} = \\ &= \sqrt{(16,12)^2 + (8,87)^2} = 18,40 \text{ kVA} \end{aligned}$$



Σχ. 1.8στ

$$\text{συν}\varphi_A^* = \frac{P_A^*}{S^*} = \frac{16,12}{18,40} = 0,87 \text{ (τμήμα A-B).}$$

Η τάση στο σημείο Β είναι:

$$V_B = \frac{S^*}{\sqrt{3}I_1} = \frac{18.400}{45,60} = 403,50 \text{ V.}$$

Υπολογισμός της αέργου ισχύος, αρνητικού προσήμου, του συστήματος πυκνωτών:

$$Q_C = 3 \frac{V_B^2}{X_C} = 3 \cdot \frac{(403,50)^2}{80} = -6,10 \text{ kVAR.}$$

Το ρεύμα I_C το οποίο απορροφούν οι πυκνωτές είναι:

$$\text{Φασικό ρεύμα: } I_C^{\varphi} = \frac{V_B}{X_C} = \frac{403,50}{80} = 5,04 \text{ A.}$$

Το φασικό ρεύμα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με $\sqrt{3}$ (λόγω της συνδέσεως σε τρίγωνο):

$$I_C = \sqrt{3} \cdot 5,04 = 8,72 \text{ A.}$$

Η πραγματική ισχύς των πυκνωτών αμελείται γιατί το σύστημα πυκνωτών θεωρείται καθαρό χωρητικό φορτίο.

Η πραγματική ισχύς στο σημείο Β είναι:

$$P_B = P_A + P_{AB} = 16.000 + 125 = 16,12 \text{ kW.}$$

Η άεργος ισχύς στο σημείο Β είναι:

$$Q_B = Q_A + Q_{AB} + Q_C = 8.800 + 83,38 - 6.100 = 2,78 \text{ kVAR.}$$

Η φαινόμενη ισχύς στο Β είναι:

$$S^{(B)} = \sqrt{(P_B)^2 + (Q_B)^2} = 16,37 \text{ kVA.}$$

Από αυτήν την ισχύ στον κόμβο Β, παίρνομε την τιμή του ρεύματος I_2 το οποίο ρέει στο τμήμα Β-Γ:

$$I_2 = \frac{S^{(B)}}{\sqrt{3}V_B} = \frac{16,370}{698,055} = 23,45 \text{ A.}$$

Πραγματική ισχύς στο τμήμα της γραμμής Β-Γ:

$$P_{B\Gamma} = 3R_2I_2^2 = 3 \cdot 0,06 \cdot (23,45)^2 = 98,98 \text{ W.}$$

Η άεργος ισχύς στο τμήμα της γραμμής Β-Γ είναι:

$$Q_{B\Gamma} = 3X_2I_2^2 = 3 \cdot 0,05 \cdot (23,45)^2 = 82,48 \text{ VAR.}$$

Ο υπολογισμός της συνολικής πραγματικής

ισχύος, της συνολικής αέργου ισχύος και της συνολικής φαινομένης ισχύος στο σημείο Γ της εγκαταστάσεως είναι:

$$P_{\Gamma} = P_B + P_{AB} = 16.120 + 98,98 = 16,21 \text{ kW}$$

$$Q_{\Gamma} = Q_B + Q_{B\Gamma} = 2.780 + 82,48 = 2,86 \text{ kVAR}$$

$$S^{(\Gamma)} = \sqrt{(P_{\Gamma})^2 + (Q_{\Gamma})^2} = 16,46 \text{ kVA}$$

$$V_{\Gamma} = \frac{S_{\Gamma}}{\sqrt{3}I_2} = \frac{16,46 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 23,45} = \frac{16.460}{40,5685} = 405,73 \text{ V.}$$

Ο συντελεστής ισχύος στο σημείο Γ είναι:

$$\text{συν}\varphi_{\Gamma} = \frac{P_{\Gamma}}{S^{(\Gamma)}} = \frac{16,21}{16,46} = 0,98.$$

Ο συντελεστής ισχύος στο σημείο Γ είναι υψηλός λόγω του συστήματος πυκνωτών, οι οποίοι τοποθετούνται στο σημείο Β της ηλεκτρικής γραμμής της εγκαταστάσεως.

Άσκηση 6.

Για την εγκατάσταση του σχήματος 1.8ζ ισχύει: Φορτίο συνδέσεως σε τρίγωνο στο σημείο Α:

$$P_A = 26 \text{ kW, } \text{συν}\varphi_A = 0,74 \text{ και } V_A = 380 \text{ V, } 50 \text{ Hz.}$$

Γραμμή Α-Β για κάθε αγωγό:

$$R_1 = 0,02 \Omega \text{ και } X_1 = 0,03 \Omega.$$

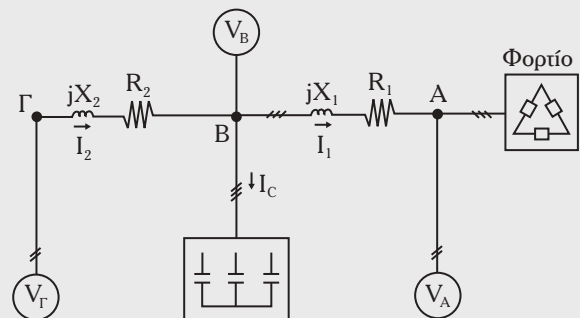
Φορτίο στο σημείο Β:

3 πυκνωτές συνδεδεμένοι σε αστέρα με $X_C = 40 \Omega$.

Γραμμή Β-Γ: για κάθε αγωγό:

$$R_2 = 0,03 \Omega \text{ και } X_C = 0,04 \Omega.$$

Να υπολογίσετε τα ρεύματα I_1 , I_2 , I_C , τις τάσεις V_B , V_{Γ} , και τον συντελεστή ισχύος στο σημείο Γ της εγκαταστάσεως.



Σχ. 1.8ζ

Λύση.

Το ρεύμα, το οποίο απορροφά το φορτίο (σύνδεση σε τρίγωνο) στο σημείο Α δίδεται:

$$I_1 = \frac{P_A}{\sqrt{3}V_A \cos\varphi_A} = \frac{26.000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,740} = 53,44 \text{ A.}$$

Η άεργος ισχύς στο σημείο Α είναι:

$$Q_A = P_A \tan\varphi_A = 26 \cdot 0,90 = 23,4 \text{ kVAR.}$$

Η πραγματική και η άεργος ισχύς στο τμήμα Α-Β είναι: $P_{AB} = 3R_1 I_1^2 = 171,35 \text{ W}$, $Q_{AB} = 3X_1 I_1^2 = 257,02 \text{ VAR}$.

Η συνολική πραγματική, άεργος και φαινομένη ισχύς στο σημείο Β είναι:

$$P_A^* = P_A + P_{AB} = 26 + 0,17135 = 26,17 \text{ kW,}$$

$$Q_A^* = Q_A + Q_{AB} = 23,4 + 0,27502 = 23,67 \text{ kVAR,}$$

$$S = \sqrt{(P_A^*)^2 + (Q_A^*)^2} = 35,28 \text{ kVA,}$$

$$\cos\varphi_{AB} = \frac{P_A^*}{S} = \frac{26,17}{35,89} = 0,74.$$

Η τάση στο σημείο Β είναι:

$$V_B = \frac{S}{\sqrt{3}I_1} = \frac{35,43 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 53,44} = 381,15 \text{ V.}$$

Υπολογισμός της άεργου ισχύος Q_C , αρνητικού προσήμου, των πυκνωτών σε σύνδεση σε αστέρα:

$$Q_C = 3 \frac{\left(\frac{V_B}{\sqrt{3}}\right)^2}{X_C} = -3.680 \text{ kVAR.}$$

Το ρεύμα I_C το οποίο απορροφούν οι πυκνωτές δίδεται ως εξής:

$$I_C = \frac{V_B}{\sqrt{3}X_C} = \frac{221,520}{40} = 5,53 \text{ A.}$$

Η συνολική πραγματική, άεργος και φαινομένη ισχύς στο σημείο Β είναι:

$$P_B^* = P_A + P_{AB} = 26,17 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} Q_B^* &= Q_A + Q_{AB} + Q_C = \\ &= 23,62 + 0,25702 - 3,680 = \\ &= 19,68 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S^{(B)} &= \sqrt{(P_B^*)^2 + (Q_B^*)^2} = \\ &= \sqrt{(26,17)^2 + (19,68)^2} = 32,74 \text{ kVA} \end{aligned}$$

$$\text{και} \quad \cos\varphi_B = \frac{P_B^*}{S^{(B)}} = \frac{26,17}{32,74} = 0,800.$$

Υπολογισμός ρεύματος I_2 , το οποίο ρέει στο τμήμα Γ-Β:

$$I_2 = \frac{S^{(B)}}{\sqrt{3}V_B} = \frac{32,74 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 383,23} = 49,38 \text{ A.}$$

Υπολογισμός ισχύων στο τμήμα Β-Γ της ηλεκτρικής γραμμής:

$$P_{B\Gamma} = 3R_2 I_2^2 = 3 \cdot 0,03 \cdot (49,38)^2 = 219,45 \text{ W}$$

$$Q_{B\Gamma} = 3X_2 I_2^2 = 3 \cdot 0,04 \cdot (49,38)^2 = 292,60 \text{ VAR.}$$

Υπολογισμός των συνολικών ισχύων, της τάσεως και του συντελεστή ισχύος στο σημείο Γ της ηλεκτρικής γραμμής:

$$P_\Gamma = P_B^* + P_{B\Gamma} = 26,17 + 0,21945 = 26,39 \text{ kW}$$

$$Q_\Gamma = Q_B + Q_{B\Gamma} = 19,68 + 0,2926 = 19,97 \text{ kVAR}$$

$$\begin{aligned} S^{(\Gamma)} &= \sqrt{(P_\Gamma)^2 + (Q_\Gamma)^2} = \\ &= \sqrt{(26,39)^2 + (19,97)^2} = 33,09 \text{ kVA} \end{aligned}$$

$$V_\Gamma = \frac{S^{(\Gamma)}}{\sqrt{3}I_2} = \frac{33,09 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 49,38} = 387,34 \text{ V}$$

$$\cos\varphi_\Gamma = \frac{P_\Gamma}{S^{(\Gamma)}} = \frac{26,39}{33,09} = 0,797.$$

Άσκηση 7.

Δίδεται η ακόλουθη μονοφασική ηλεκτρική γραμμή με τάση στο σημείο Α 235 V, 50 Hz (σχ. 1.8n). Σ' αυτήν τη γραμμή συνδέονται τα εξής φορτία:

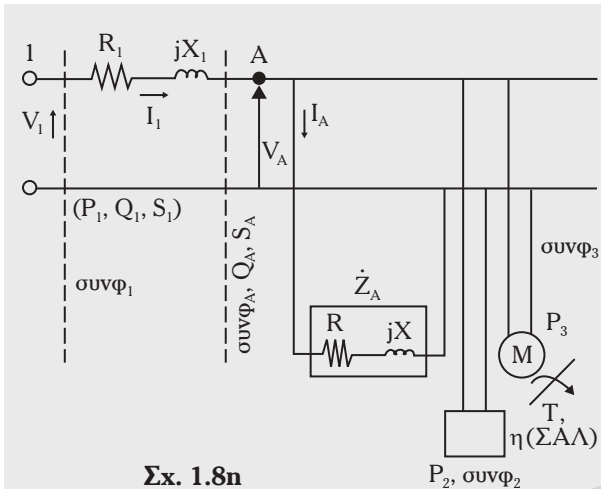
1) Σύνθετη αντίσταση:

$$Z_A = R + jX = 8 + j6\Omega.$$

2) Ωμικο-χωρητικό φορτίο, το οποίο απορροφά ισχύ $P_2 = 2 \text{ kW}$ με συντελεστή ισχύος:

$$\cos\varphi_2 = 0,85 \text{ χωρ..}$$

3) Επαγωγικός κινητήρας με απόδοση $\eta = 0,80$ και συντελεστή ισχύος $\cos\varphi_3 = 0,75$ επαγ., ο άξονας



Σχ. 1.8n

του οποίου περιστρέφεται με ταχύτητα 1.350 ΣΑΛ, ενώ η ροπή στον άξονά του είναι $T = 10 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Γνωρίζοντας ότι η σύνθετη αντίσταση της γραμμής είναι $Z_1 = 0,1 + j0,15 \Omega$ να υπολογίσετε:

- Το ρεύμα I_1 και τον συντελεστή ισχύος $\text{συν}\varphi_1$.
- Την τάση V_1 και τον συντελεστή ισχύος $\text{συν}\varphi_1$.

Λύση.

Απάντηση στην 1^η ερώτηση:

- Για το φορτίο $Z_A = 8 + j6 \Omega$ ισχύει:

$$|I_A| = \frac{|V_A|}{|Z_A|}, |Z_A| = Z = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \Omega$$

$$I_A = \frac{235}{10} = 23,5 \text{ A}, P_A = R I_A^2 = 8 \cdot (23,5)^2 = 4.418 \text{ W}$$

$$Q_A = X I_A^2 = 6 \cdot (23,5)^2 = 3.313,5 \text{ VAR.}$$

- Για το φορτίο με τα χαρακτηριστικά: P_2 και $\text{συν}\varphi_2$, ισχύει $P_2 = 2.000 \text{ W}$,

$$Q_2 = P_2 \varepsilon \varphi_2 = 2.000 \cdot 0,619 = 1.239 \text{ VAR.}$$

Σε αυτήν την περίπτωση επειδή ο συντελεστής ισχύος είναι χωρητικός, η άεργος ισχύς είναι χωρητικού τύπου.

- Για τον επαγωγικό κινητήρα ισχύει:

$$P = T \cdot \omega, \quad \omega = 2\pi f = 2\pi \frac{n}{60}$$

όπου: n , ο αριθμός στροφών και P , η ισχύς στον άξονα του κινητήρα.

$$\text{Άρα ισχύει: } \omega = 2\pi \cdot \frac{1.350}{60} = 141,3 \text{ rad/s}$$

$$\text{και } P = T\omega = 10 \cdot 141,3 = 1.413 \text{ W.}$$

Ενώ η ισχύς την οποία απορροφά ο κινητήρας δίδεται ως εξής:

$$P_3 = \frac{P}{\eta} = \frac{1.413}{0,80} \approx 1.766 \text{ W}$$

όπου η , η απόδοση του κινητήρα.

Η άεργος ισχύς του κινητήρα είναι:

$$Q_3 = P_3 \varepsilon \varphi_3 = 1.766 \cdot 0,88 = 1.554,08 \text{ VAR.}$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα του Boucherot¹:

$$P_{\text{ολ}}^{(A)} = P_A + P_2 + P_3 = 4.418 + 2.000 + 1.766 = 8.184 \text{ W}$$

$$Q_{\text{ολ}}^{(A)} = \pm Q_A \pm Q_2 \pm Q_3 = 3.313,5 - 1.239 + 1.554,08 = 3.628,58 \text{ VAR}$$

$$\text{και } S^{(A)} = \sqrt{[P_{\text{ολ}}^{(A)}]^2 + [Q_{\text{ολ}}^{(A)}]^2} =$$

$$= \sqrt{(8.184)^2 + (3.628,58)^2} = 8.952,34 \text{ VA.}$$

Υπολογισμός του I_1 και $\text{συν}\varphi_1$:

$$I_1 = \frac{S^{(A)}}{V_1} = \frac{8.952,34}{235} = 38,10 \text{ A}$$

$$\text{και } \text{συν}\varphi_1 = \frac{8.184}{8.952,34} = 0,91 \text{ επαγ.}$$

Απάντηση στη 2^η ερώτηση:

Εφαρμόζοντας το θεώρημα του Boucherot στο τμήμα 1 της ηλεκτρικής γραμμής έχουμε:

$$P_1 = P_{\text{ολ}}^{(A)} + R_1 I_1^2 = 8.184 + 0,1 \cdot (38,10)^2 \cong 8.329 \text{ W}$$

$$Q_1 = Q_{\text{ολ}}^{(A)} + X_1 I_1^2 = 3.628,58 + 0,15 \cdot (38,10)^2 \cong 3.846 \text{ VAR.}$$

$$\text{Είναι: } S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{(8.329)^2 + (3.846)^2} \cong 9.174 \text{ VA.}$$

¹ Για ένα ηλεκτρικό σύστημα, στο εναλλασσόμενο ημιτονοειδές ρεύμα και τάση, το οποίο αποτελείται από πολλούς καταναλωτές ισχύει: Πραγματική ισχύς: $P = \Sigma P$ [W]. Άεργος ισχύς: $Q = \Sigma (\pm Q)$ [VAR]. Φαινόμενη ισχύς: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ [VA].

Οπότε: $V_1 = \frac{S^{(1)}}{I_1} = \frac{9.174}{38,10} \cong 241 \text{ V}$

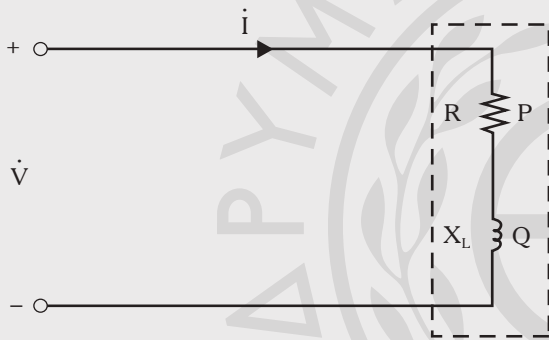
και $\text{συν}\varphi_1 = \frac{P_1}{S^{(1)}} = \frac{8.329}{9.174} = 0,907 \text{ επαγ.}$

Άσκηση 8.

Έστω ότι έχουμε μονοφασικό ωμικο-επαγωγικό φορτίο το οποίο τροφοδοτείται από μια μονοφασική ηλεκτρική γραμμή. Να υπολογίσετε τη χωρητικότητα των πυκνωτών, οι οποίοι τοποθετούνται για την διόρθωση του συντελεστή ισχύος της εγκατάστασης.

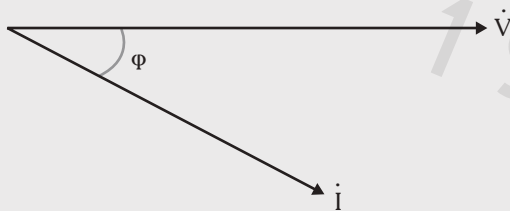
Λύση.

Ως εγκατάσταση εννοούμε το σύστημα μονοφασική ηλεκτρική γραμμή και μονοφασικό ωμικο-επαγωγικό φορτίο (σχ. 1.8θ).



Σχ. 1.8θ

Η σχέση τάσεως και ρεύματος δίδεται από το σχήμα 1.8ι.



Σχ. 1.8ι

Τοποθετώντας έναν πυκνωτή παράλληλα στο φορτίο, το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρεύματων τροποποιείται όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8ια.

Το ρεύμα γραμμής I' είναι:

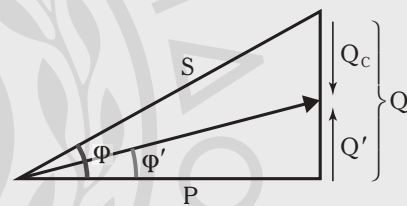
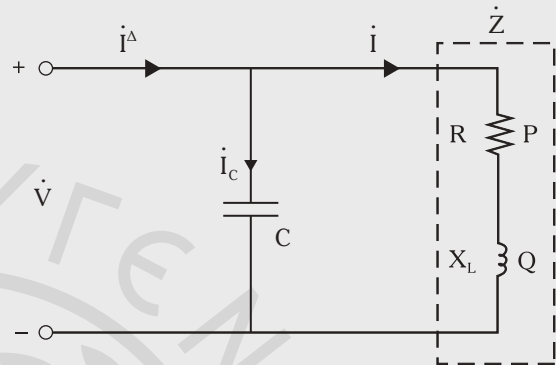
$$I' = I + I_C = I + j\omega CV.$$

Πριν τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος έχουμε:

$$\text{εφ}\varphi = \frac{Q}{P}.$$

Μετά τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος ισχύει:

$$\text{εφ}\varphi' = \frac{Q'}{P} = \frac{Q - |Q_C|}{P} = \frac{P\text{εφ}\varphi - \omega CV^2}{P}.$$



Σχ. 1.8ια

Τελικά η χωρητικότητα του πυκνωτή που απαιτείται για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος δίδεται από τη σχέση:

$$C = \frac{P(\text{εφ}\varphi - \text{εφ}\varphi')}{\omega V^2}.$$

Άσκηση 9.

Έστω ότι επιθυμούμε να διορθώσουμε τον συντελεστή ισχύος μιας τριφασικής εγκατάστασης (πολική τάση 400 V), η οποία απορροφά 350 kW από 0,75 στο 0,90. Ποια είναι η τιμή της άεργου ισχύος, την οποία δίνει ένα σύστημα πυκνωτών, που συνδέεται στην τριφασική εγκατάσταση;

Λύση.

Το ρεύμα το οποίο απορροφά η εγκατάσταση είναι:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}V_n \text{συν}\varphi_1} = \frac{350 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,75} = 674,37 \text{ A.}$$

Η άεργος ισχύς την οποία παρέχουν οι πυκνωτές είναι:

$$Q_C = P(\epsilon\phi\phi_1 - \epsilon\phi\phi_2) = 350 \cdot (0,88 - 0,48) = 140 \text{ kVAR.}$$

Λόγω της διορθώσεως του συντελεστή ισχύος η εγκατάσταση απορροφά ρεύμα:

$$I_a = \frac{P}{\sqrt{3}V_n \text{ συν}\phi_2} = \frac{350 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,90} = 562 \text{ A.}$$

Οπότε τα βασικά πλεονεκτήματα της διορθώσεως του συντελεστή ισχύος είναι:

- 1) Βέλτιστη χρησιμοποίηση των ηλεκτρικών μηχανών,
- 2) βέλτιστη χρήση των αγωγών,
- 3) μείωση των απωλειών, και
- 4) μείωση της πτώσεως τάσεως.

Οι γεννήτριες και οι Μ/Σ κατασκευάζονται με βάση τη φαινόμενη ισχύ, η οποία για μια δεδομένη τιμή της πραγματικής ισχύος είναι τόσο μικρή, όσο μικρή είναι η άεργος ισχύς. Οπότε, διορθώνοντας τον συντελεστή ισχύος, οι ηλεκτρικές μηχανές κατασκευάζονται για μια φαινόμενη ισχύ μικρότερη, δίδοντας την ίδια πραγματική ισχύ.

Στον πίνακα 1.8.1 δίδονται οι μεταβολές της παρεχόμενης ισχύος για τριφασικούς Μ/Σ (Μέση Τάση/Χαμηλή Τάση) σε συνάρτηση με τον συντελεστή ισχύος του καταναλωτή.

Έστω ότι τροφοδοτούμε μια σειρά φορτίων με ισχύ 221 kW με συντελεστή ισχύος 0,7. Πρέπει να χρησιμοποιηθεί Μ/Σ 315 kVA. Αν τα φορτία απορροφούν την ίδια πραγματική ισχύ αλλά με συντελεστή ισχύος 0,9, τότε απαιτείται Μ/Σ 250 kVA.

Μια ανάλογη προσέγγιση γίνεται και για τις γεννήτριες.

Διορθώνοντας τον συντελεστή ισχύος προκύπτουν ανάλογα οφέλη και για τα καλώδια μεταφοράς της ηλεκτρικής ισχύος. Αυξάνοντας τον συντελεστή ισχύος, για συγκεκριμένη τιμή της πραγματικής ισχύος, μειώνεται το ρεύμα.

Έστω ότι ένα φορτίο απορροφά πραγματική ισχύ 180 kW με $\text{συν}\phi_1 = 0,7$ και τάση 400 V.

Το ρεύμα I_1 του φορτίου είναι:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}V_n \text{ συν}\phi_1} = \frac{180 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,7} = 484,4 \text{ A.}$$

Πίνακας 1.8.1

Φαινόμενη ισχύς (kVA)	Παρεχόμενη πραγματική ισχύς (kW)					
	συνφ					
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
63	32	38	44	50	57	63
100	50	60	70	80	90	100
125	63	75	88	100	113	125
160	80	96	112	128	144	160
200	100	120	140	160	180	200
250	125	150	175	200	225	250
315	158	189	221	252	284	315
400	200	240	280	320	360	400
630	315	378	441	504	567	630
800	400	480	560	640	720	800
1.000	500	600	700	800	900	1.000
1.250	625	750	875	1.000	1.125	1.250

Αν χρησιμοποιηθεί ένα μονοπολικό καλώδιο ισχύος, χαλκίνων αγωγών, όπου η μόνωσή του είναι τύπου EPR² τοποθετημένο σε επίπεδη επιφάνεια, σε κανονικές συνθήκες, όπως δίδεται στον πίνακα 1.8.2, απαιτείται μια διατομή 185 mm².

Στην περίπτωση κατά την οποία γίνεται η διόρθωση του συντελεστή ισχύος στην τιμή $\text{συν}\phi_2 = 0,9$ το ρεύμα I_2 το οποίο απορροφά το φορτίο για την πραγματική ισχύ είναι:

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3}V_n \text{ συν}\phi_2} = \frac{180 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,9} = 289 \text{ A.}$$

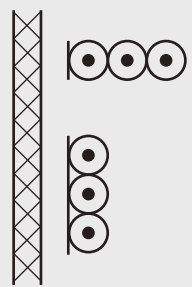
Οπότε απαιτείται διατομή 95 mm² καλωδίου.

Οι απώλειες ισχύος σε έναν αγωγό εξαρτώνται από την ωμική αντίσταση του αγωγού και από το τετράγωνο του ρεύματος, το οποίο ρέει στον αγωγό.

Για μια τιμή της παρεχόμενης πραγματικής ισχύος όσο μεγαλύτερη τιμή έχει ο συντελεστής ισχύος τόσο μειώνεται η τιμή του ρεύματος στον αγωγό, οπότε μειώνονται και οι απώλειες.

² Neoprene, Αιθυλένιο – Προπυλένιο.

Πίνακας 1.8.2

$S\{mm^2\}$		
	Cu	
	XLPE ³ /EPR	PVC ⁴
	I[A]	
25	141	114
35	176	143
50	216	174
70	279	225
95	342	275
120	400	321
150	464	372
185	533	427
240	634	507
300	736	587
400	868	689
500	998	789
630	1.151	905

Σε ένα τριφασικό σύστημα οι απώλειες δίδονται:

$$W = 3RI^2 = \frac{P^2 + Q^2}{V_n^2}$$

Από τον τύπο της φαινόμενης ισχύος προκύπτει:

$$I = \frac{S_a}{\sqrt{3}V_n} = \frac{\sqrt{(P^2 + Q^2)}}{\sqrt{3}V_n}$$

Οι απώλειες πριν τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος είναι:

$$W_1 = R \frac{(P^2 + Q^2)}{V_n^2} = \frac{R}{V_n^2} \cdot S_a^2 = \frac{R}{V_n^2} \cdot \frac{P^2}{(\cos\phi_1)^2}$$

Μετά τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος οι απώλειες είναι:

$$W_2 = \frac{R}{V_n^2} \cdot \frac{P^2}{(\cos\phi_2)^2}$$

Οπότε η μείωση των απωλειών ΔW , όταν υλοποιείται η διόρθωση του συντελεστή ισχύος, είναι:

$$\Delta W = W_1 - W_2 = \frac{R}{V_n^2} \cdot \frac{P^2}{(\cos\phi_1)^2} - \frac{R}{V_n^2} \cdot \frac{P^2}{(\cos\phi_2)^2} = W_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{\cos\phi_1}{\cos\phi_2} \right)^2 \right]$$

Από αυτήν τη σχέση προκύπτει ότι η αύξηση του συντελεστή ισχύος από 0,7 στο 0,9 μειώνει τις απώλειες κατά 39,5% περίπου⁵.

Άσκηση 10.

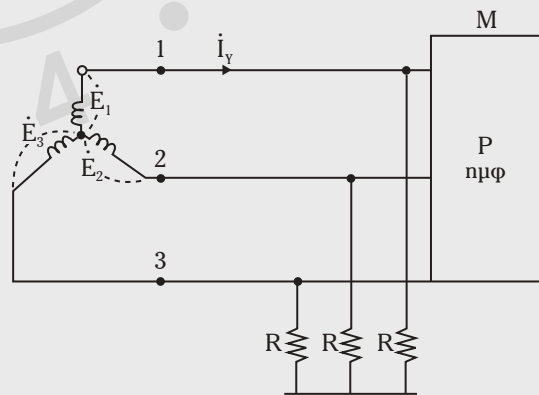
Δίδεται το ακόλουθο τριφασικό δίκτυο (σχ. 1.81β), το οποίο αποτελείται από μία τριάδα συμμετρικών τάσεων ενεργού τιμής E . Στο δίκτυο συνδέεται τριφασικό σύστημα αντιστάσεων R ωμικής τιμής ανά φάση κι ένα φορτίο M .

Δίνονται:

$$|E_1| = |E_2| = |E_3| = |E| = 220 \text{ V}, R = 40 \Omega,$$

$$P = 10 \text{ kW}, \eta_{\text{M}} = 0,664, f = 50 \text{ Hz}.$$

- 1) Να υπολογίσετε το ρεύμα γραμμής, I_Y .
- 2) Να διορθώσετε τον συντελεστή ισχύος στο $\cos\phi = 0,9$ τοποθετώντας ένα σύστημα πυκνωτών στις θέσεις 1-2-3.



Σχ. 1.81β

³ Δικτυωμένο πολυαιθυλένιο.

⁴ Polyvinyl Chloride – PVC (Πολυβινυλοχλωρίδιο).

⁵ Το παράδειγμα έχει ληφθεί από το τετράδιο γνωστής εταιρείας.

Λύση.

1) Το φορτίο M απορροφά πραγματική ισχύ $P = 10 \text{ kW}$ και άεργο ισχύ:

$$Q = P \cdot \epsilon\phi [\eta\mu^{-1}0,664] = 8,87 \text{ kVAR.}$$

Το ωμικό φορτίο είναι συνδεδεμένο σε αστέρα και συνδέεται παράλληλα στο φορτίο M.

Σε κάθε αντίσταση εφαρμόζεται η φασική τάση $|E| = E$. Η πραγματική ισχύς την οποία απορροφούν οι αντιστάσεις είναι:

$$P_R = 3 \cdot \frac{E^2}{R} = 3,63 \text{ kW, ενώ είναι } Q_R = 0.$$

Στις θέσεις 1-2-3 η συνολική πραγματική ισχύς είναι:

$$P_{\text{ολ}} = P + P_R = 10 + 3,63 = 13,63 \text{ kW,}$$

ενώ η άεργος ισχύς είναι:

$$Q_{\text{ολ}} = Q + Q_R = 8,87 \text{ kVAR.}$$

Η φαινόμενη ισχύς σε μιγαδική μορφή είναι:

$$S = P_{\text{ολ}} + jQ_{\text{ολ}} = (13,63 + j8,87) \cdot 10^3$$

άρα ισχύει: $S = \sqrt{P_{\text{ολ}}^2 + Q_{\text{ολ}}^2} = 3EI_Y$

$$\text{και } I_Y = \frac{\sqrt{P_{\text{ολ}}^2 + Q_{\text{ολ}}^2}}{3E} = 24,63 \text{ A.}$$

2) Στις θέσεις 1-2-3 έχουμε τον ακόλουθο συντελεστή ισχύος:

$$\text{συν}\phi = \text{συν} \left[\epsilon\phi^{-1} \left(\frac{Q_{\text{ολ}}}{P_{\text{ολ}}} \right) \right] = 0,86.$$

Τοποθετούμε ένα σύστημα πυκνωτών στις θέσεις 1-2-3. Απαιτείται μια συνολική άεργος ισχύς Q^* :

$$Q^* = P_{\text{ολ}} \epsilon\phi\phi = P_{\text{ολ}} \cdot \epsilon\phi\phi [\text{συν}^{-1}(0,86)] = 6,60 \text{ kVAR.}$$

Οπότε το σύστημα πυκνωτών απορροφά μια συνολική άεργο ισχύ, Q_C :

$$Q_C = Q^* - Q_{\text{ολ}} = 6,60 - 8,87 = -2,27 \text{ kVAR.}$$

Συνδέοντας τους πυκνωτές σε αστέρα στις 1-2-3, τότε σε κάθε πυκνωτή εφαρμόζεται η φασική τάση E, οπότε:

$$Q_C = -\frac{3E^2}{X_C} = -6\text{pf}C_Y E^2,$$

$$C_Y = -\frac{Q_C}{6\text{pf}E^2} = \frac{2,27 \cdot 10^2}{6 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (220)^2} = 49,7 \text{ }\mu\text{F}$$

όπου C_Y , η χωρητικότητα του κάθε πυκνωτή, σε σύνδεση αστέρα.

Αν οι πυκνωτές συνδέονται σε τρίγωνο, τότε η χωρητικότητα του κάθε πυκνωτή είναι:

$$C_{\Delta} = -\frac{Q_C}{6\text{pf}V^2} = \frac{2,27 \cdot 10^3}{6 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (380)^2} = 16,68 \text{ }\mu\text{F}$$

όπου $V = \sqrt{3} \cdot 220 \text{ V}$ και $C_Y = 3C_{\Delta}$.

1.9 Ερωτήσεις.

1) Σε ποιες κατηγορίες κατατάσσονται οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής και εφαρμογής της ηλεκτρικής ισχύος;

2) Τι εννοούμε με τον όρο «σύστημα διανομής ηλεκτρικής ισχύος» και ποιες συνιστώσες μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου περιλαμβάνει;

3) Ποια μέρη μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου ανήκουν στην κατηγορία των ειδικών εγκαταστάσεων και γιατί;

4) Τι εννοούμε με τους όρους «αξιοπιστία» και «συνέχεια λειτουργίας μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου» και ποιοι οι παράγοντες διαμορφώσεώς τους;

5) Με τι είδους ρεύματα παράγει η ηλεκτρική ισχύς σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου και γιατί;

6) Τι είδους τάσεις χρησιμοποιούνται στα εμπορικά πλοία και ποια τα επίπεδά της;

7) Για ποιους λόγους δεν χρησιμοποιούνται υψηλές τάσεις στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων;

8) Πόσων ειδών ηλεκτρικές συχνότητες χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά δίκτυα πλοίων;

9) Ποια είναι η σημασία της ηλεκτρικής συχνότητας στην παραγωγή της τάσεως και του ρεύματος και στην συμπεριφορά των ηλεκτρικών συνιστωσών μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου;

10) Σε ποιες κατηγορίες κατατάσσονται οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων ανάλογα με τον τύπο της κινητήριου μηχανής που χρησιμοποιείται;

11) Τι εννοούμε με τον όρο «αξονική γεννήτρια»;

12) Τι εννοούμε με τον όρο «All Electric Ship»;

13) Σχεδιάστε τον πρακτικό αστέρα και το πρακτικό τρίγωνο. Ποια σχέση υπάρχει μεταξύ τάσεων και ρευμάτων στην περίπτωση του αστέρα και στην περίπτωση του τριγώνου;

14) Τι εννοούμε με τον όρο «συντελεστής ισχύος μιας εγκαταστάσεως»;

15) Ποιος είναι ο ρόλος της πραγματικής και αέργου συνιστώσας του ρεύματος που παράγεται από μια γεννήτρια πλοίου;

16) Πόσων ειδών ισχύες έχουμε στα τριφασικά συστήματα;

17) Πώς διορθώνουμε τον συντελεστή ισχύος μιας εγκαταστάσεως;

1.10 Θέματα εργασίας.

Εργασία 1^η.

Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με τριφασικό εναλλασσόμενο ημιτονοειδές ρεύμα. Τα πλεονεκτήματα του τριφασικού συστήματος ρευμάτων.

Εργασία 2^η.

Η επίδραση της μεταβολής της ηλεκτρικής συχνότητας στα μαγνητικά κυκλώματα των γεννητριών και κινητήρων μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου.

Εργασία 3^η.

Το επιδερμικό φαινόμενο. Πώς επηρεάζεται από τη μεταβολή της ηλεκτρικής συχνότητας;

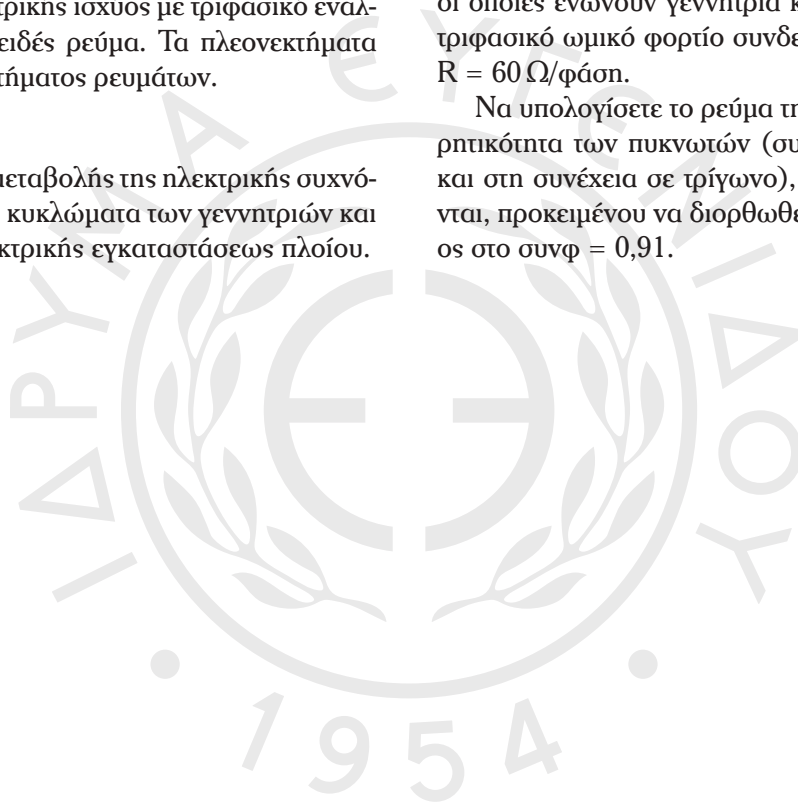
Εργασία 4^η.

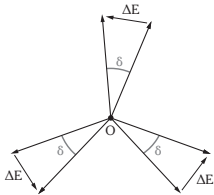
Συστήματα αξονικών γεννητριών και ο ρόλος τους σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου.

Εργασία 5^η.

Η φασική τάση μιας γεννήτριας πλοίου είναι 220 V (ενεργός τιμή). Η γεννήτρια τροφοδοτεί φορτίο, το οποίο απορροφά ισχύ 15 kW και έχει $\mu\phi = 0,755$, $f = 50$ Hz. Συνδέουμε στις ηλεκτρικές γραμμές, οι οποίες ενώνουν γεννήτρια και κύριο πίνακα, ένα τριφασικό ωμικό φορτίο συνδεδεμένο σε αστέρα με $R = 60 \Omega/\text{φάση}$.

Να υπολογίσετε το ρεύμα της γραμμής και τη χωρητικότητα των πυκνωτών (συνδεδεμένων σε αστέρα και στη συνέχεια σε τρίγωνο), οι οποίοι τοποθετούνται, προκειμένου να διορθωθεί ο συντελεστής ισχύος στο $\cos\phi = 0,91$.





ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ

2.1 Εισαγωγή.

Η συνολική ισχύς των ηλεκτρογεννητριών οι οποίες τοποθετούνται στα εμπορικά πλοία πρέπει να ισούται με τη μέγιστη ισχύ που απορροφάται, συγχρόνως, από τις καταναλώσεις της εγκαταστάσεως συν ένα ορισμένο μέρος ισχύος που έχει σχέση με τη μελλοντική επέκταση της εγκαταστάσεως.

Η συνολική ισχύς διαιρείται σε ορισμένο αριθμό ηλεκτρογεννητριών έτσι, ώστε:

1) Όταν μια ηλεκτρογεννήτρια είναι εκτός λειτουργίας, λόγω βλάβης ή συντηρήσεως, να εξασφαλίζεται η λειτουργία των ζωικής σημασίας συσκευών της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου.

2) Στις διάφορες συνθήκες φορτίου να είναι δυνατή η λειτουργία ορισμένων ηλεκτρογεννητριών, οι οποίες λειτουργούν με υψηλή απόδοση, δηλαδή, σχεδόν με πλήρες φορτίο.

Στην πράξη ο αριθμός των ηλεκτρογεννητριών που θα εγκατασταθούν γίνεται με βάση τους παρακάτω πρακτικούς κανόνες:

1) Για μέγιστο φορτίο μέχρι 500 kW, επιλέγονται δύο ηλεκτρογεννήτριες.

2) Για μέγιστο φορτίο μέχρι 1.300 kW, επιλέγονται τρεις ηλεκτρογεννήτριες, και

3) για μεγαλύτερες ισχύες, επιλέγονται τέσσερις ή περισσότερες γεννήτριες.

Η σωστή επιλογή του αριθμού των ηλεκτρογεννητριών μιας εγκαταστάσεως γίνεται με βάση τον ηλεκτρικό ισολογισμό στον οποίο υπολογίζεται η πραγματική ηλεκτρική ισχύς του συνόλου των καταναλωτών σε ένα πλοίο, στις διάφορες χαρακτηριστικές καταστάσεις λειτουργίας του π.χ. πορεία, χειρισμοί, στο λιμάνι κ.λπ..

2.2 Ηλεκτρικός ισολογισμός¹.

Ηλεκτρικός ισολογισμός είναι ο υπολογισμός της πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος του συνόλου των

καταναλωτών σε ένα εμπορικό πλοίο στις διάφορες χαρακτηριστικές καταστάσεις λειτουργίας του, π.χ. κανονική πορεία, χειρισμοί στο λιμάνι κ.λπ..

2.2.1 Προκαταρκτική εκτίμηση ηλεκτρικού φορτίου.

Στο πρώτο στάδιο του σχεδιασμού της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως του πλοίου, είναι απαραίτητη μια πρώτη εκτίμηση του ηλεκτρικού φορτίου του πλοίου. Επειδή στο στάδιο αυτό δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για λεπτομερή προσδιορισμό, το φορτίο υπολογίζεται με τη βοήθεια των εμπειρικών σχέσεων ή διαγραμμάτων.

2.2.2 Πλοία με πρόωση ατμού.

Το εκτιμώμενο ηλεκτρικό φορτίο που απαιτείται υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$P_G = (A + B + C)P_{sm} + 1,6z + 9\sqrt{z} + P_C \quad (2.1)$$

όπου: P_G το ηλεκτρικό φορτίο σε kW, P_{sm} η μέγιστη συνεχής ισχύς στον άξονα σε HP και z ο αριθμός μελών πληρώματος.

Οι παράμετροι A , B , C και P_C έχουν ως εξής:

1) $A = 0,011$ για βοηθητικά μηχανήματα συνεχούς λειτουργίας, έγχυση θαλασσινού νερού (scoop injection) στο ψυγείο, για ηλεκτροκίνητες αντλίες κενού.

2) $B = 0,07$ για ηλεκτροκίνητη κύρια αντλία κυκλοφορίας θαλασσινού αέρα (όταν χρησιμοποιείται).

3) $C = 0,16 \cdot 10$ (μανομετρικό του ανεμιστήρα προσαγωγής αέρα στον λέβητα σε cmH_2O) συνήθως $C = 0,0048$.

4) P_C τα πρόσθετα ηλεκτρικά φορτία για ψύξη και αφύγρανση φορτίου ή άλλα ειδικά συστήματα.

Το μανομετρικό του ανεμιστήρα προσαγωγής αέρα στον λέβητα κυμαίνεται στην περιοχή των 25–38 cmH_2O . Για προθερμαντήρες αέρα με καυσάερα, το μανομετρικό κυμαίνεται από 5–7,5 cmH_2O .

¹ Ο ηλεκτρικός ισολογισμός στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων βασίζεται στο σύγγραμμα του Ι. Π. Ιωαννίδη: «Μέθοδος για την κατάσταση θερμικού ισολογισμού ναυτικών προωστικών εγκαταστάσεων ατμού, ΕΜΠ 1998».

Σε λέβητες μεγάλης ατμοπαραγωγής, το μανομετρικό μπορεί να αυξηθεί λόγω περιορισμένου χώρου κατά 5–10 cmH₂O.

Η εξίσωση 2.1 ισχύει όταν:

- 1) Υπάρχει εγκατάσταση κλιματισμού.
 - 2) Όλα τα βοηθητικά μηχανήματα είναι ηλεκτροκίνητα, εκτός από τις κύριες τροφοδοτικές αντλίες.
 - 3) Μέλη πληρώματος (z) = από 20 έως 100.
- Εάν δεν υπάρχει κλιματισμός, αφαιρείται η αντίστοιχη ηλεκτρική ισχύς:

$$P_{κλ} = 34,0 + 0,33z \quad (2.2)$$

όπου $P_{κλ}$ σε kW.

Η επιλογή των γεννητριών στηρίζεται στο μέγεθος:

$$P_{NG} = (A'+B'+C')P_{sm} + 1,6z + 9\sqrt{z} + 80 + P_c \quad (2.3)$$

όπου P_{NG} η ονομαστική ισχύς γεννήτριας (ή γεννητριών) σε kW.

Οι παράμετροι A' , B' , C' έχουν ως εξής:

1) $A' = 0,0017$ για βοηθητικά μηχανήματα σε συνεχή και διακεκομμένη λειτουργία (δεν περιλαμβάνεται η κύρια αντλία κυκλοφορίας θαλασσινού νερού).

2) $B' = 0,007$ για πλοία με ηλεκτροκίνητη κύρια αντλία κυκλοφορίας, χωρίς έγχυση θαλάσσιου νερού στο ψυγείο.

3) $C' = 0,0042$ για πλοία με έγχυση θαλάσσιου νερού και ηλεκτροκίνητη κύρια αντλία κυκλοφορίας, η οποία χρησιμοποιείται μόνο κατά τη διάρκεια χειρισμών.

$$C' = 0,16 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\dot{m}\varphi_{\max}}{\dot{m}\varphi} \right) 3 \cdot \Delta H\varphi \quad (2.4)$$

όπου: $\dot{m}\varphi_{\max}$ η μέγιστη παροχή του φουσητήρα του λέβητα, $\dot{m}\varphi$ η παροχή του φουσητήρα στην μέγιστη συνεχή ισχύ στον άξονα P_{sm} και $\Delta H\varphi$ το μανομετρικό του φουσητήρα στην P_{sm} σε cmH₂O.

Συνήθως ισχύει: $C = 0,006$.

Οι τυποποιημένες ονομαστικές ισχύες των στροβιλογεννητριών είναι οι εξής: 500, 630, 800, 1.000, 1.250, 1.500, 2.000, 2.500 kW.

– Λυμένη άσκηση.

Ατμοκίνητο πλοίο έχει ηλεκτροκίνητη αντλία κυκλοφορίας χωρίς έγχυση θαλασσινού νερού. Εάν προβλέπονται 30 μέλη πληρώματος και ισχύς άξονα 12.000 HP, να γίνει μια πρώτη εκτίμηση του ηλεκτρικού φορτίου και να επιλεγεί γεννήτρια (ή γεννήτριες) τυποποιημένης ισχύος.

Λύση.

Από τα παραπάνω ισχύει:

$$A + B + C = 0,11 + 0,007 + 0,0048 = 0,0228$$

$$A' + B' + C' = 0,017 + 0,007 + 0,006 = 0,0300$$

$$P_c = 0.$$

Οι εξισώσεις 2.1 και 2.3, γράφονται:

$$P_G = 0,0228 \cdot 12.000 + 1,6 \cdot 30 + 9\sqrt{30} + 80 + 0 = 451 \text{ kW}$$

$$P_{NG} = 0,030 \cdot 12.000 + 1,6 \cdot 30 + 9\sqrt{30} + 80 + 0 = 537 \text{ kW}.$$

Μια γεννήτρια τυποποιημένης ονομαστικής ισχύος 630 kW ικανοποιεί τις ανάγκες του ηλεκτρικού φορτίου. Επειδή όμως οι κανονισμοί απαιτούν την εγκατάσταση τουλάχιστον δύο γεννητριών για λόγους ασφαλείας, επιλέγονται δύο γεννήτριες με τυποποιημένη ονομαστική ισχύ 500 kW η κάθε μία. Η επιλογή αυτή οδηγεί σε υπερβολική περίσσεια ισχύος. Θα άξιζε τον κόπο να διερευνηθεί η δυνατότητα και η βέλτιστη οικονομική λύση της εγκαταστάσεως γεννητριών μικρότερης, έστω και μη τυποποιημένης ισχύος.

2.2.3 Πλοία με πρόωση ντιζελ.

Όταν οι αντλίες νερού και λαδιού είναι ηλεκτροκίνητες, το ηλεκτρικό φορτίο υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$P_G = 0,015 \cdot P_{DM} + 1,6z + 9\sqrt{z} + 80 + P_c \quad (2.5)$$

όπου P_{DM} η μέγιστη συνεχής ισχύς στον άξονα, σε HP.

Όταν οι αντλίες είναι εξαρτημένες, τότε ισχύει:

$$P_G = 0,008 \cdot P_{DM} + 1,6z + 9\sqrt{z} + 80 + P_c. \quad (2.6)$$

Οι σχέσεις 2.5 και 2.6, ισχύουν όταν υπάρχει εγκατάσταση κλιματισμού. Εάν δεν υπάρχει, αφαιρείται το ποσό $P_{κλ}$ το οποίο προκύπτει από την σχέση 2.2.

Η ονομαστική ισχύς για την επιλογή των γεννητριών προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$P_{NG} = \frac{P_G}{\beta} \quad (2.7)$$

όπου $\beta = 0,75$ έως $0,90$ (συνήθως $\beta = 0,82$).

Οι τυποποιημένες ονομαστικές ισχύες ντιζελογεννητριών είναι οι εξής: 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1.000, 1.250 kW.

– Λυμένη άσκηση.

Ντιζελοκίνητο πλοίο έχει ανεξάρτητες ηλεκτροκίνητες αντλίες νερού και λαδιού, η ισχύς στον άξονα είναι 12.000 HP και τα μέλη του πληρώματος 30. Να εκτιμηθεί το ηλεκτρικό φορτίο και να επιλεγούν ηλεκτρογεννήτριες τυποποιημένης ισχύος.

Λύση.

Οι εξισώσεις 2.5 και 2.7 δίνουν:

$$P_G = 0,015 \cdot 12.000 + 1,6 \cdot 30 + 9\sqrt{30} + 80 + 0 = 375 \text{ kW}$$

$$P_{NG} = \frac{P_G}{0,8} = 446 \text{ kW}.$$

Θα αρκούσε μια γεννήτρια τυποποιημένης ονομαστικής ισχύος 500 kW για την κάλυψη των αναγκών. Όμως, για τους λόγους ασφαλούς λειτουργίας, μπορούν να επιλεγούν δύο γεννήτριες ονομαστικής ισχύος 250 kW, αρκεί η κάθε μία να μπορεί να καλύψει φορτία ζωτικής σημασίας² (μία γεννήτρια 250 kW και μία 200 kW επίσης θα κάλυπταν το φορτίο). Η λύση με τις δύο γεννήτριες ισχύος 250 kW προσφέρει τη δυνατότητα μειωμένης ποσότητας ανταλλακτικών στο πλοίο.

2.3 Λεπτομερής ηλεκτρικός ισολογισμός ισχύος.

Με τον όρο **λεπτομερής ηλεκτρικός ισολογισμός ισχύος** σε ένα εμπορικό πλοίο εννοούμε τον υπολογισμό της πραγματικής ισχύος του συνόλου των φορτίων του πλοίου, στις εξής καταστάσεις λειτουργίας του:

- 1) Κανονική πορεία.
- 2) Χειρισμοί.
- 3) Εν όρμω.

Ηλεκτρικός ισολογισμός ισχύος σε εμπορικό πλοίο δίδεται με τους ακόλουθους δύο τρόπους.

1) Πρώτος τρόπος.

Η διαμόρφωση του ισολογισμού περιλαμβάνει τη δημιουργία του πίνακα 2.3.1 με όλα τα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου. Ο πίνακας περιλαμβάνει όλες τις καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου.

Στην 1^η στήλη δίδεται το σύνολο των καταναλώσεων του πλοίου. Στην 2^η στήλη δίδεται η εγκαταστημένη ισχύς του σε kW. Οι στήλες 3–8 υπολογίζουν για τις τρεις καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου και δίδουν τον συντελεστή χρησιμοποίησης f_s , για κάθε λειτουργική κατάσταση και την τελική ισχύ λειτουργίας σε kW.

Πίνακας 2.3.1
Λεπτομερής Ηλεκτρικός Ισολογισμός (Πρώτος τρόπος).

1	2	3	4	5	6	7	8
Καταναλωτής	Εγκαταστάσεις ισχύος	Ισχύς κανονικής πορείας	Ισχύς χειρισμών		Ισχύς «εν όρμω»		
	$P_{εγκ}$ (kW)	f_s	$P_{λειτ}$ (kW)	f_s	$P_{λειτ}$ (kW)	f_s	$P_{λειτ}$ (kW)
Αντλία μηχανισμού πηδαλίου Νο 1							
Αντλία μηχανισμού πηδαλίου (εφεδρική)							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
•							
Ψυκτική μονάδα							
Σύνολο							

² Φορτία ζωτικής σημασίας είναι εκείνα τα οποία είναι απαραίτητα για την ασφάλεια του προσωπικού και για την ασφαλή πλοήγηση και πρόωση του πλοίου.

όπου N το πλήθος των ομοίων καταναλωτών.

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης f_s , υπολογίζεται με την ακόλουθη σχέση:

$$f_s = \frac{\text{Μέσο φορτίο 24-ώρου}}{\text{Ονομαστικό φορτίο}} = \frac{\sum_i P_i t_i}{24 \cdot P_{\text{ov.αποδ.}}} \quad (2.11)$$

όπου: P_i η ισχύς λειτουργίας κατά τη χρονική περίοδο i του 24ώρου και t_i οι ώρες λειτουργίας με ισχύ P_i κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου.

Στον πίνακα 2.3.3 δίνονται τυπικές τιμές του f_s για διάφορους καταναλωτές.

Η μέση απορροφώμενη ισχύς λειτουργίας σε κάθε κατάσταση, υπολογίζεται για ηλεκτροκίνητα μηχανήματα ως εξής:

Η ισχύς λειτουργίας, $P_{\text{λειτ.}}$ [kW] δίδεται:

$$P_{\text{λειτ.}} [\text{kW}] = P_{\text{ov.αποδ.}} [\text{kW}] \cdot N' \cdot f_s \quad (2.12)$$

όπου N' το πλήθος των ομοίων καταναλωτών στην λειτουργία στην κατάσταση λειτουργίας.

Οι τιμές των $P_{\text{λειτ.}}$ γράφονται στις στήλες 10, 13 και 16 (πίν. 2.3.2).

Το άθροισμα των τιμών της στήλης με την ισχύ λειτουργίας δίνει την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ σε κάθε κατάσταση λειτουργίας του πλοίου.

– Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Ζητείται η μέση απορροφώμενη ισχύς μιας κύριας αντλίας κυκλοφορίας θαλασσινού νερού, όταν λειτουργεί επί 24ώρου βάσεως και είναι γνωστά τα εξής μεγέθη: Ονομαστική αποδιδόμενη

ισχύς του κινητήρα 125 PS, όπου $1 \text{ PS} = 0,736 \text{ kW}$, αποδιδόμενη ισχύς του κινητήρα κατά τη διάρκεια λειτουργίας 113 PS, βαθμός αποδόσεως γραμμής και κινητήρα 0,85.

Λύση.

Η μέση απορροφώμενη ισχύς υπολογίζεται με την εξίσωση 2.12, όταν πρώτα προσδιοριστεί ο συντελεστής λειτουργίας με την εξίσωση 2.11.

$$f_s = \frac{113 \cdot 24}{24 \cdot 125} = 0,90$$

$$P_{\text{λειτ.}} = \frac{125 \text{ Ps}}{0,85} \cdot 0,90 \cdot 0,736 \frac{\text{kW}}{\text{PS}} = 97,4 \text{ kW.}$$

Στον πίνακα 2.3.3 δίδονται οι προτεινόμενοι συντελεστές λειτουργίας για την εκτίμηση του ηλεκτρικού φορτίου.

Άσκηση 2.

Η ολική εγκατεστημένη ισχύς των συσκευών κουζίνας πλοίου είναι 67 kW. Εάν η κουζίνα λειτουργεί επί 9 ώρες/24-ώρο με συντελεστή φορτίσεως 70%, να προσδιοριστεί η μέση απορροφώμενη ισχύς λειτουργίας.

Λύση.

Συντελεστής λειτουργίας:

$$f_s = \frac{0,7 \cdot 67 \cdot 9}{24 \cdot 67} = 0,26.$$

Μέση απορροφώμενη ισχύς λειτουργίας:

$$P_{\text{λειτ.}} = 67 \cdot 0,26 = 17,4 \text{ kW.}$$

Πίνακας 2.3.3

Τυπικές τιμές του f_s για την εκτίμηση του ηλεκτρικού φορτίου.

Περιγραφή	Μέγιστη τιμή	Κανονικής πορείας	Χειρισμών	Όρμου	Παρατηρήσεις
Βοηθητικά μηχανήματα προώσεως					
Κύρια αντλία κυκλοφορίας	0,90	0,85	0,85	0,0	
Βοηθητική αντλία κυκλοφορίας	0,90	0,0	0,70	0,70	
Κύρια αντλία συμπυκνώματος	0,75	0,40	0,40	0,0	
Βοηθητική αντλία συμπυκνώματος	0,75	0,0	0,0	0,75	
Κύρια τροφοδοτική αντλία	0,80 (a)				
Τροφοδοτική αντλία ανάγκης	0,0 (c)				

(συνεχίζεται)

<i>Περιγραφή</i>	<i>Μέγιστη τιμή</i>	<i>Κανονικής πορείας</i>	<i>Χειρισμών</i>	<i>Όρμου</i>	<i>Παρατηρήσεις</i>
<i>Βοηθητικά μηχανήματα προώσεως</i>					
Τροφοδοτική αντλία όρμου	0,0 (c)				
Αντλία συμπυκνωμάτων προθερμαντήρων Χαμηλής Πιέσεως (Χ.Π.)	0,65	0,65	0,65	0,0	
Αντλία μεταγίσεως συμπυκνώματος ψυγείου	0,60	0,60	0,60	0,60	
Αντλία λαδιού λιπάνσεως	0,90	0,85	0,85	0,0	
Αντλία μεταγίσεως λαδιού	0,0 (c)				
Αντλία κυκλοφορίας ψυγείου λαδιού λιπάνσεως	0,90	0,90	0,90	0,0	
Αντλία τροφοδοτήσεως καυσίμου	0,85	0,80	0,80	0,0	
Αντλία μεταγίσεως βαρέος καυσίμου	0,10	0,10	0,0	0,0	
Υπηρετική αντλία θάλασσας	0,80				
Τροφοδοτική αντλία αποστακτήρα ακαθάρτων	0,65				
Αντλία κυκλοφορίας ατμοσφαιρικού ψυγείου	0,0(c)				
Ανεμιστήρας προσαγωγής λέβητα	(b)				0,5 0,5 0,2
Αεροσυμπίεστής αυτοματισμού	0,40	0,20	0,20	0,20	
Καθαριστής λαδιού λιπάνσεως	0,35	0,35	0,35	0,0	
Προθερμαντήρας λαδιού λιπάνσεως	0,10	0,0	0,0	0,10	
Μηχανισμός πηδαλίου	0,20	0,10	0,20	0,0	
Ανεμιστήρες προσαγωγής μηχανοστασίου	0,85	0,85	0,85	0,20	
Ανεμιστήρες εξαγωγής μηχανοστασίου	0,85	0,85	0,85	0,85	
Ανεμιστήρας αναρροφήσεως λαβυρίνθων	0,90	0,90	0,90	0,90	
Τύμπανο προθερμαντήρα αέρα	0,90	0,90	0,90	0,0	
Φωτισμός μηχανοστασίου	0,90	0,90	0,90	0,90	
Αντλία κενού	0,80	0,80	0,80	0,0	
Κύριος αεροσυμπίεστής	0,85	0,10	0,85	0,10	0,30 εάν η Κ/Μ είναι ατμ/βίλος
Αντλία κυκλοφορίας νερού ψύξεως κυλίνδρων	0,85	0,85	0,85	0,0	
Αντλία κυκλοφορίας νερού ψύξεως εμβόλων	0,85	0,85	0,85	0,0	
Αντλία νερού ψύξεως καυστήρων	0,85	0,85	0,85	0,0	
Αντλία μεταγίσεως ελαφρού πετρελαίου	0,0 (c)				
Καθαριστής βαρέος πετρελαίου	0,70	0,70	0,0	0,0	
Καθαριστής ελαφρού πετρελαίου	0,0 (c)				
Βοηθητικός ανεμιστήρας Κύριας Μηχανής	0,85	0,0	0,0	0,80	
Μηχανισμός περιστροφής άξονα	0,80	0,0	0,0	0,80	
Σύστημα καύσεως συνδυασμένου λέβητα	0,80	0,50	0,80	0,80	
Αντλία λαδιού λιπάνσεως μειωτήρα	0,90	0,90	0,90	0,0	

<i>Περιγραφή</i>	<i>Μέγιστη τιμή</i>	<i>Κανονικής πορείας</i>	<i>Χειρισμών</i>	<i>Όρμου</i>	<i>Παρατηρήσεις</i>
<i>Βοηθητικά μηχανήματα χώρων διαμονής</i>					
Φωτισμός διαμερισμάτων	0,60	0,40	0,40	0,60	
Αερισμός διαμερισμάτων	0,85	0,85	0,85	0,85	
Ατομικοί ανεμιστήρες	0,50	0,30	0,0	0,40	
Συσκευές μαγειρείου	0,30	0,30	0,30	0,30	
Συσκευές πλυντηρίου	0,20	0,20	0,0	0,20	
Συσκευές νοσοκομείου	0,20	0,20	0,20	0,20	
Ηλεκτρική θέρμανση νερού	0,50	0,0	0,20	0,50	
Θέρμανση διαμερισμάτων	0,40	0,40	0,40	0,40	
Αντλία κυκλοφορίας ζεστού νερού	0,70	0,70	0,70	0,70	
Αντλία κυκλοφορίας πολύ κρύου νερού	0,70	0,70	0,70	0,70	
Αντλία ποσίμου νερού	0,50	0,50	0,50	0,50	
Πίδακες πόσιμου νερού	0,30	0,30	0,30	0,30	
Αντλία κυκλοφορίας κολυμβητικής δεξαμενής	0,20	0,20	0,0	0,0	
Αντλία υγιεινής	0,40	0,40	0,40	0,40	
<i>Βοηθητικά μηχανήματα χώρων διαμονής</i>					
Εγκαταστάσεις αποχετεύσεως	0,70	0,70	0,70	0,70	
Συμπίεστης ψυκτικής	0,40	0,40	0,40	0,40	
Αντλία κυκλοφορίας θάλασσας	0,40	0,40	0,40	0,40	
Μεμονωμένα ψυγεία	0,30	0,30	0,30	0,30	
Συμπίεστης κλιματισμού	0,75	0,75	0,75	0,75	
Αντλία κρύου νερού κλιματισμού	0,75	0,75	0,75	0,75	
Αντλία ζεστού νερού κλιματισμού	0,75	0,75	0,75	0,75	
Αντλία κυκλοφορίας θάλασσας κλιματισμού	0,75	0,75	0,75	0,75	
Ανεμιστήρας κλιματισμού	0,75	0,75	0,75	0,75	
Αντλία τροφοδοτήσεως θαλασσινού νερού στον αποστακτήρα	0,75	0,75	0,0	0,0	
Αντλία εξαγωγής υπολειμμάτων αποστάξεως	0,75	0,75	0,0	0,0	
Αντλία συμπυκνώματος νερού αποστάξεως	0,60	0,50	0,0	0,0	
Αντλία αποστραγγίσεως αποστακτήρα	0,60	0,0	0,0	0,60	
Αντλία μεταγγίσεως αποσταγμένου νερού	0,60	0,60	0,0	0,0	
Αντλία τροφοδοτήσεως χημικών στο αποσταγμένο νερό	0,20	0,20	0,0	0,0	

(συνεχίζεται)

<i>Περιγραφή</i>	<i>Μέγιστη τιμή</i>	<i>Κανονικής πορείας</i>	<i>Χειρισμών</i>	<i>Όρμου</i>	<i>Παρατηρήσεις</i>
<i>Βοηθητικά μηχανήματα σκάφους</i>					
Αντλία πυρκαγιάς	0,0 (c)				
Αντλία πυρκαγιάς και κύτους	0,0 (c)				
Αντλία πυρκαγιάς και γενικής χρήσεως	0,0 (c)				
Αντλία κύτους και έρματος	0,20	0,20	0,0	0,20	
Υποβρύχια αντλία κύτους	0,10	0,10	0,0	0,0	
Αντλία έρματος	0,90	0,0	0,0	0,10	Φόρτωση/εκφόρτωση
Αντλία πληρώσεως φυγοκεντρικών αντλιών	0,10	0,0	0,0	0,10	
Αεροσυμπίεστης σκάφους	0,30	0,30	0,30	0,30	
Φωτισμός καταστρώματος	0,90	0,0	0,0	0,90	0,35 εάν χρησιμοποιείται τοπικός φωτισμός
<i>Βοηθητικά μηχανήματα σκάφους</i>					
Φωτισμός ναυσιπλοΐας	0,50	0,50	0,50	0,0	
Φωτισμός χώρου ασύρματου	0,50	0,50	0,50	0,0	
Εσωτερικές επικοινωνίες	0,40	0,40	0,40	0,40	
Ηλεκτρονικά	0,45	0,45	0,45	0,30	
Φόρτιση συσσωρευτών	0,20	0,20	0,20	0,20	
Πίνακας ελέγχου ηλεκτρικών συσκευών	0,20	0,20	0,0	0,20	
Γυροπυξίδα	0,40	0,40	0,40	0,20	
Θερμαντές μηχανημάτων καταστρώματος	1,00	1,00	1,00	1,00	
Εργαλειομηχανές	0,10	0,10	0,0	0,10	
Αερισμός φορτίου	0,85	0,85	0,85	0,85	
Ξήρανση φορτίου	0,50	0,50	0,50	0,50	
Γερανός μηχανοστασίου	0,80	0,0	0,0	0,40	
Εργάτης άγκυρας	0,0 (c)				
Βαρούλκα	0,0 (c)				
Υδραυλικοί κινητήρες καλυμμάτων κυτών	0,10	0,0	0,0	0,10	
Φορτωτές φορτίου	0,50	0,0	0,0	0,35	

(a) Στην περίπτωση εγκαταστάσεως ηλεκτροκινήτων αντλιών.

(b) Να υπολογιστεί η ισχύς χωριστά.

(c) Δεν χρησιμοποιείται παρά σπάνια.

2.4 Ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη και ηλεκτροστάσια.

Η ηλεκτρική γεννήτρια και η Κύρια Μηχανή αποτελούν το λεγόμενο **ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος**. Οι κύριες μηχανές οι οποίες χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις πλοίων είναι, συνήθως, ατμοστρόβιλοι και μηχανές εσωτερικής καύσεως (ΜΕΚ). Σπάνια χρησιμοποιούνται αξονικές γεννήτριες και αεριοστρόβιλοι.

Πρακτικά ο τύπος του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, εξαρτάται από τον τύπο της πρόωσης (πλοία με πρόωση ατμού ή με πρόωση ντίζελ) και από το είδος της λειτουργίας του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους. Στα πλοία με πρόωση ατμού υπάρχουν στροβιλογεννήτριες για την κανονική λειτουργία της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως και ντιζελογεννήτριες για τις καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Σε μερικές περιπτώσεις υπάρχουν ντιζελογεννήτριες για τη λειτουργία της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως του πλοίου στο λιμάνι, οι οποίες χρησιμοποιούνται, καμιά φορά, για την κάλυψη φορτίων αιχμής. Στην πρόωση με ντίζελ υπάρχουν ομάδες ντιζελογεννητριών για κάθε είδος λειτουργίας της εγκαταστάσεως.

Ηλεκτροστάσιο ονομάζεται ο χώρος στον οποίο τοποθετούνται τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, οι πίνακες διανομής και το σύστημα των διατάξεων για τους χειρισμούς και τον έλεγχο της παραγωγής και της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα ηλεκτροστάσια τοποθετούνται στο χώρο του μηχανοστασίου για λειτουργικούς λόγους και για λόγους οικονομίας χώρου. Πράγματι, το προσωπικό βάρδιας επιτηρεί συγχρόνως τον μηχανολογικό εξοπλισμό και το ηλεκτροστάσιο της εγκαταστάσεως.

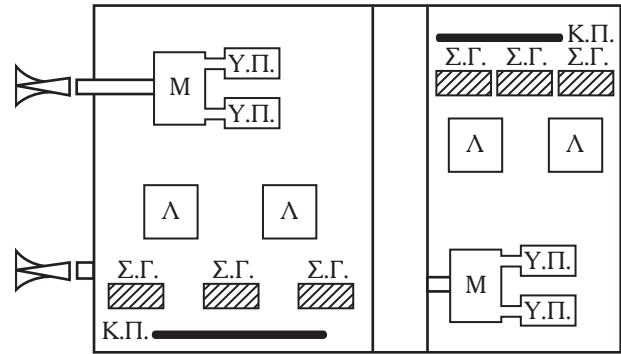
Ο αριθμός και ο τύπος των ηλεκτροστασίων εξαρτάται από τον τύπο του εμπορικού πλοίου.

Στα στροβιλοκίνητα κρουαζιερόπλοια τα οποία διαθέτουν δύο ξεχωριστά μηχανοστάσια, υπάρχουν, αντίστοιχα, δύο ηλεκτροστάσια με στροβιλογεννήτριες, αντίστοιχα για κάθε μηχανοστάσιο (σχ. 2.4α). Σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει ένα τρίτο ηλεκτροστάσιο με ντιζελογεννήτριες, σε ξεχωριστό χώρο για τη λειτουργία του πλοίου στο λιμάνι (σχ. 2.4β).

Στο σχήμα 2.4γ δίδεται το ηλεκτροστάσιο ενός κρουαζιερόπλοιου με ένα μηχανοστάσιο.

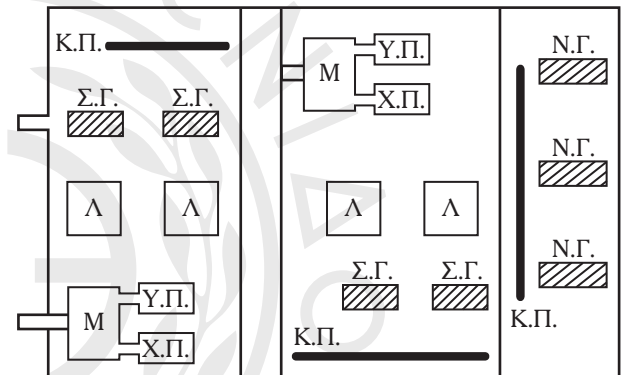
Τα φορτηγά πλοία και τα Δ/Ξ έχουν ένα ηλεκτροστάσιο το οποίο τοποθετείται στο χώρο του μηχανοστασίου (σχ. 2.4δ).

Για όλα τα εμπορικά πλοία, εκτός από τα μικρά και εκείνα τα οποία δρομολογούνται σε κοντινά ταξίδια, οι κανονισμοί προβλέπουν και ένα ανεξάρτητο ηλε-



Σχ. 2.4α

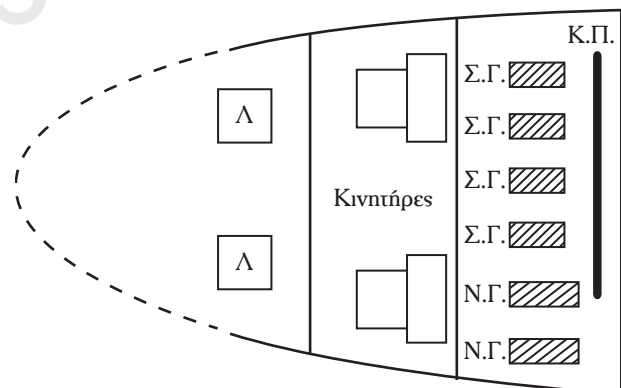
Ηλεκτροστάσια για στροβιλοκίνητα κρουαζιερόπλοια.
 Λ: λέβητες, Μ: μειωτήρας, Υ.Π.: στροβίλος υψηλής πίεσης, Χ.Π.: στροβίλος χαμηλής πίεσης, Σ.Γ.: στροβιλογεννήτρια, Κ.Π.: κύριος πίνακας.



Ν.Γ.: Ντιζελογεννήτριες

Σχ. 2.4β

Μεγάλο στροβιλοκίνητο πλοίο με δύο ηλεκτροστάσια για την κανονική του πορεία και ένα ηλεκτροστάσιο με ντιζελογεννήτριες για τη λειτουργία του στο λιμάνι.

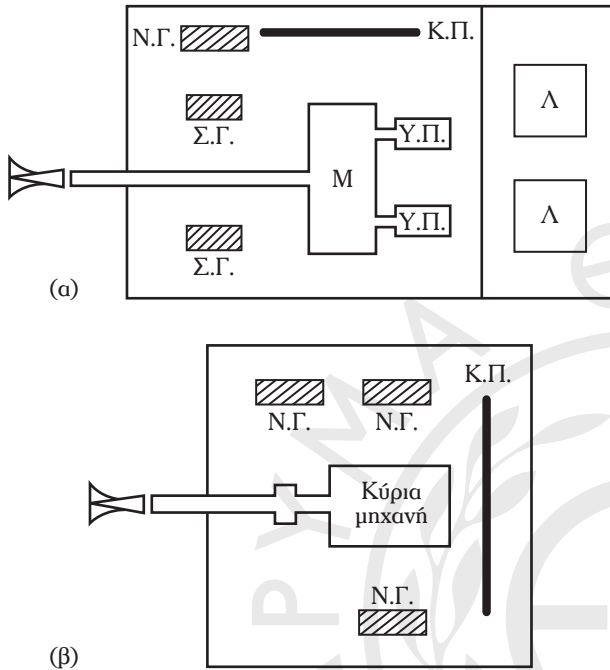


Σχ. 2.4γ

Κρουαζιερόπλοιο με ένα μηχανοστάσιο και ηλεκτροστάσιο σε ξεχωριστό χώρο.

κτροστάσιο, το οποίο ονομάζεται **πλεκτροστάσιο έκτακτης ανάγκης**.

Το πλεκτροστάσιο έκτακτης ανάγκης τροφοδοτεί για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα τους καταναλωτές ζωικής σημασίας όταν οι πλεκτρογεννήτριες κανονικής πορείας είναι εκτός λειτουργίας.



Σχ. 2.46

Ηλεκτροστάσια για (α) στροβιλοκίνητα πλοία και (β) για πλοία με πρόωση νίζελ.

2.5 Στροβιλογεννήτριες.

Ο ατμοστρόβιλος είναι ο πιο κατάλληλος κινητήρας για την ενεργοποίηση μιας ηλεκτρικής γεννήτριας. Τα πλεονεκτήματα του ατμοστρόβιλου είναι η σταθερή κινητήρια ροπή και οι ευκολίες ρυθμίσεως στροφών.

Ο ατμοστρόβιλος σε σύγκριση με τις ΜΕΚ παρουσιάζει και άλλα πλεονεκτήματα, όπως μικρότερο όγκο και βάρος (σχ. 2.5), λειτουργία χωρίς ταλαντώσεις και χωρίς θόρυβο και μικρότερη επιτήρηση και συντήρηση.

Αντίθετα ο ατμοστρόβιλος απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα για να τεθεί σε λειτουργία, απαραίτητο για την προθέρμανση, και παρουσιάζει υψηλές καταναλώσεις έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσεως (σχ. 2.5).

Η λειτουργία του ατμοστρόβιλου εξαρτάται από τον αποστακτήρα του συστήματος της κύριας μηχανής.

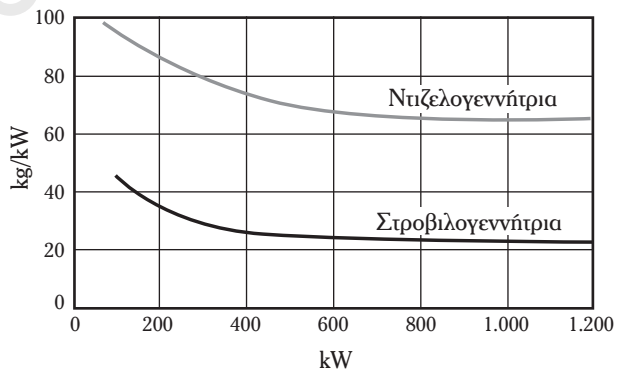
Προκειμένου να ενεργοποιηθεί το σύστημα της κύριας μηχανής με σβηστό λέβητα και να λειτουργήσουν οι στροβιλογεννήτριες απαιτείται η διάθεση άλλων μορφών ηλεκτρικής ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη ή τροφοδοσία από την ξηρά.

Κάθε στροβιλογεννήτρια αποτελείται από τον στρόβιλο, τον μειωτήρα, την ηλεκτρική γεννήτρια και τις απαραίτητες βοηθητικές διατάξεις, έτσι ώστε να διαμορφώνεται μια αυτόνομη μονάδα, η οποία αποτελεί βασική συνιστώσα του συστήματος της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως ενός πλοίου. Η σύνδεση μεταξύ στρόβιλου και γεννήτριας γίνεται μέσω ενός μειωτήρα έτσι, ώστε να διαμορφώνονται ταχύτητες 1.800 ή 1.200 ΣΑΛ, οι οποίες αντιστοιχούν στη σύγχρονη ταχύτητα του εναλλακτήρα (σύγχρονη γεννήτρια) των 60 Hz με 2 ή 3 ζευγάρια πόλων.

Οι ατμοστρόβιλοι διαθέτουν τις εξής ασφαλιστικές διατάξεις:

- 1) **Ρυθμιστές στροφών.**
- 2) **Διακόπτη υπερταχύνσεως.**
- 3) **Διακόπτη αντιθλίψεως,** ο οποίος σταματά τη μηχανή όταν αναπτυχθεί υπερβολική αντίθλιψη στην εξαγωγή, λόγω βλάβης της αντλίας κυκλοφορίας του ψυγείου ή οποιασδήποτε άλλης αιτίας.
- 4) **Διακόπτη χαμηλής πίεσεως λαδιού,** ο οποίος κλείνει τον ατμοφράκτη σε περίπτωση πτώσεως της πίεσεως λαδιού λιπάνσεως για την πρόληψη σοβαρών ζημιών.
- 5) **Χειροκίνητο διακόπτη,** με τον οποίο ο χειριστής μπορεί να σταματήσει γρήγορα τον στρόβιλο πατώντας ένα κουμπί.

Οι στρόβιλοι των εγκαταστάσεων πλοίων λειτουργούν στη μέγιστη απόδοση όταν η γεννήτρια παρέχει το 80% της ονομαστικής ισχύος.



Σχ. 2.5

Βάρη ανά μονάδα, για ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

Η στροβιλογεννήτρια μπορεί να λειτουργήσει με υπερφόρτιση:

1) Για δύο ώρες, δίνοντας ισχύ 25% περισσότερη της ονομαστικής και

2) διάρκειας πέντε λεπτών δίνοντας ρεύμα 150% του ονομαστικού ρεύματος, με χαμηλό συντελεστή ισχύος.

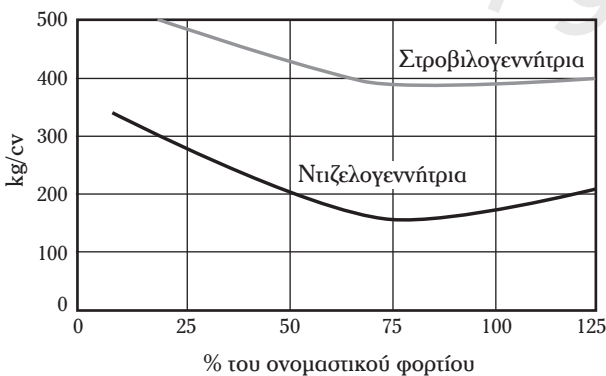
Η υπερφόρτιση των 25% εγγυάται τη διάθεση ισχύος για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης περιορισμένης χρονικής διάρκειας. Η υπερφόρτιση σε ρεύμα για πέντε λεπτά δίδει τη δυνατότητα στη σύγχρονη γεννήτρια να αντέξει τα ρεύματα εκκινήσεως των μεγάλων ασυγχρόνων κινητήρων. Τα ρεύματα αυτά έχουν μεγάλη τιμή, με χαμηλό συντελεστή ισχύος και μικρή χρονική διάρκεια.

2.6 Ο κινητήρας ντίζελ των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών.

Τα βασικά **πλεονεκτήματα** των κινητήρων ντίζελ έναντι των στροβίλων είναι οι μικρές ειδικές καταναλώσεις (σχ. 2.6), ότι δεν υπάρχουν σωληνώσεις ατμού και συμπυκνωτής (ψυγείο) και ότι τοποθετείται εύκολα σε λειτουργία. Η λειτουργία του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους είναι ανεξάρτητη απ' τον αποστακτήρα.

Τα κυριότερα **μειονεκτήματα** των κινητήρων ντίζελ είναι το βάρος (σχ. 2.5), οι ταλαντώσεις οι οποίες απαιτούν ειδικές διατάξεις για την έδρασή τους, ο όγκος, η μεγάλη αδράνεια που καθιστά δύσκολη τη ρύθμιση στροφών, η ανομοιομορφία της κινητήριας ροπής και η αναγκαιότητα συχνών συντηρήσεων.

Ο κινητήρας ντίζελ είναι μια παλινδρομική μηχανή, οπότε η αναπτυσσόμενη κύρια ροπή και η ταχύ-



Σχ. 2.6

Ειδικές καταναλώσεις για ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων σε διαφορετικές συνθήκες φορτίου.

τητα του δεν είναι σταθερά μεγέθη κατά τη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής του άξονα του κινητήρα, αλλά παλμικά. Αυτή η κατάσταση περιγράφεται μέσω του βαθμού ανομοιομορφίας J , ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$J = \frac{n_M - n_m}{n} \quad (2.13)$$

όπου: n_M , είναι η μέγιστη τιμή της ταχύτητας σε μία πλήρη περιστροφή του άξονα του κινητήρα, n_m η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας σε μια πλήρη περιστροφή του άξονα του κινητήρα και n , η μέση ταχύτητα του κινητήρα.

Ο βαθμός ομοιομορφίας, εκφράζει το μέτρο της διακυμάνσεως της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα ντίζελ. Επηρεάζει την ενεργό τιμή της παραγόμενης τάσεως και της συχνότητας, έτσι ώστε τα μεγέθη αυτά να μην είναι σταθερά αλλά παλμικά. Οι ταλαντώσεις της τάσεως και της συχνότητας εμποδίζουν την κανονική λειτουργία των ηλεκτρικών κινητήρων και προσβάλλουν τη σταθερότητα του φωτός (τρεμοσβήνει το φως) των ηλεκτρικών λαμπτήρων.

Για τη μείωση του βαθμού ανομοιομορφίας απαιτείται η παρουσία σφονδύλου.

Όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα του σφονδύλου, τόσο μικρότερες είναι οι διακυμάνσεις της γωνιακής ταχύτητας του στροφαλοθαλάμου (δηλ. μικρότερος ο βαθμός ανομοιομορφίας).

Η μάζα του σφονδύλου εξαρτάται:

1) Από τον αριθμό των κυλίνδρων. Οι πολυκύλινδρες μηχανές έχουν σφόνδυλο.

2) Από τον αριθμό των χρόνων της μηχανής. Οι δίχρονοι μηχανές για την ίδια ισχύ έχουν το μισό βάρος του σφονδύλου των τετραχρόνων μηχανών.

Οι ταχύστροφες μηχανές έχουν μικρότερο σφόνδυλο.

Σε συστήματα αξονικών γεννητριών, εφόσον αυτές είναι άμεσα συνδεδεμένες με την έλικα, υπολογίζεται και η έλικα σαν στρεφόμενη μάζα σφονδύλου, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται στο ελάχιστο ο σφόνδυλος αυτών.

2.7 Αεριοστρόβιλος.

Ο αεριοστρόβιλος άρχισε να χρησιμοποιείται για πρόωση πλοίων μετά το 1940. Το ενδιαφέρον της ναυτικής βιομηχανίας έχει οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις τόσο στο βαθμό αποδόσεως όσο και της αξιοπιστίας του.

Τα **πλεονεκτήματα** του αεριοστροβίλου είναι:

- 1) Το μικρό βάρος και ο μικρός του όγκος,
- 2) η απλή κατασκευή με μικρό αριθμό βοηθητικών μηχανημάτων,
- 3) οι μικρές απαιτήσεις συντηρήσεως,
- 4) η ταχεία εκκίνησή του και η ανάλογη παύση του και
- 5) η εύκολη αυτοματοποίηση.

Βασικό **μειονέκτημα** του αεριοστροβίλου είναι η **υψηλή κατανάλωση καυσίμου**.

– Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Στον πίνακα 2.7.1 δίδονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μηχανημάτων μιας ηλεκτρικής εγκατα-

στάσεως πλοίου. Να αναλυθεί και να κατανοηθεί ο ηλεκτρικός ισολογισμός.

Λύση.

Αρχικά δημιουργούμε μία κατανομή των διαφορών μηχανημάτων σε ομάδες, ούτως ώστε να έχουμε ενιαία διαμόρφωση των μερικών αθροισμάτων.

Έχουμε τρεις ομάδες:

- 1) Βοηθητικά μηχανήματα προώσεως.
- 2) Βοηθητικά μηχανήματα σκάφους.
- 3) Βοηθητικά μηχανήματα χώρων διαμονής.

Καταρτίζουμε τρεις πίνακες, έναν για κάθε μία από τις παραπάνω ομάδες.

Ο τρόπος κατασκευής των πινάκων δίδεται στους πίνακες 1, 2, 3 του γενικού πίνακα 2.7.1.

Πίνακας 2.7.1

1) Βοηθητικά μηχανήματα προώσεως (μέρος Α')

A/A	Πίνακας I Περιγραφή μηχανήματος ή εγκαταστάσεως	Εγκατεστημένη ισχύς			
		Αριθμός εγκατεστημένων μονάδων	Ονομ. ισχύς σε PS/βαθμός αποδόσεως	Ηλεκτρική ισχύς κάθε καταναλώσεως (kW)	Συνολική ηλεκτρική ισχύς (kW)
1	Κύρια αντλία θάλασσας	1	68/0,90	$0,736 \times 68/0,90 = 55,61$	55,61
2	Αντλία μεταγίσεως βαρέος πετρελαίου	1	20/0,87	$0,736 \times 20/0,87 = 16,92$	16,92
3	Αντλία κυκλοφορίας νερού ψύξεως	2	3/0,803	$0,736 \times 3/0,803 = 2,75$	5,5
4	Αντλία λαδιού λιπάνσεως	2	50/0,892	$0,736 \times 50/0,892 = 41,25$	82,5
5	Αντλία τροφοδοσίας καυσίμου	2	4/0,818	$0,736 \times 4/0,818 = 3,60$	7,2
6	Αντλία κυκλοφορίας νερού ψύξεως κυλίνδρων	2	40/0,888	$0,736 \times 40/0,888 = 33,15$	66,3
7	Μηχανισμός πηδαλίου	2	40/0,888	$0,736 \times 40/0,888 = 33,15$	66,3
8	Ανεμιστήρας προσαγωγής μηχανών	4	6,25/0,835	$0,736 \times 6,25/0,835 = 5,51$	22,04
9	Αντλία κυκλοφορίας νερού ψύξεως εμβόλων	2	21/0,870	$0,736 \times 21/0,870 = 17,76$	35,52
10	Καθαριστής βαρέος πετρελαίου	2	12/0,858	$0,736 \times 12/0,858 = 10,29$	20,58
11	Κύριος αεριοσυμπίεστής	2	78/0,905	$0,736 \times 78/0,905 = 63,43$	126,86
12	Φωτισμός μηχανοστασίου			14	14
13	Καθαριστής λαδιού λιπάνσεως	2	7,5/0,84	$0,736 \times 7,5/0,84 = 6,57$	13,14
14	Βοηθητικός ανεμιστήρας κύριας μηχανής	1	24/0,875	$0,736 \times 24/0,875 = 20,19$	20,19

1) Βοηθητικά μηχανήματα προώσεως (μέρος Β')

A/A	Πίνακας I Περιγραφή μηχανήματος ή εγκαταστάσεως	Φορτίο					
		Κανονικής πορείας		Χειρισμών		Εν όρμω	
		M.E./Σ.Λ.*	Ισχύς (kW)	M.E./Σ.Λ.*	Ισχύς (kW)	M.E./Σ.Λ.*	Ισχύς (kW)
1	Κύρια αντλία θάλασσας	1/0,85	47,26	1/0,85	47,26	0/0,00	0/0,00
2	Αντλία μεταγίσεως βαρέος πετρελαίου	1/0,10	1,692	1/0,00	0,00	0/0,00	0/0,00
3	Αντλία κυκλοφορίας νερού ψύξεως	1/0,85	2,337	1/0,85	2,337	0/0,00	0/0,00
4	Αντλία λαδιού λιπάνσεως	1/0,85	35,06	1/0,85	35,06	0/0,00	0/0,00
5	Αντλία τροφοδοσίας καυσίμου	1/0,80	2,88	1/80	2,88	0/0,00	0/0,00
6	Αντλία κυκλοφορίας νερού ψύξεως κυλίνδρων	1/85	28,18	1/85	28,18	0/0,00	0/0,00
7	Μηχανισμός πηδαλίου	1/0,10	3,315	2/0,20	13,26	0/0,00	0/0,00
8	Ανεμιστήρας προσαγωγής μηχανών	4/0,85	18,734	4/0,85	18,734	2/0,20	2,204
9	Αντλία κυκλοφορίας νερού ψύξεως εμβόλων	1/0,85	15,096	1/0,85	15,096	0/0,00	0/0,00
10	Καθαριστής βαρέος πετρελαίου	1/0,70	7,203	1/0,00	0,00	0/0,00	0/0,00
11	Κύριος αεριοσυμπεστής	1/0,10	6,343	1/0,85	53,91	1/0,10	6,343
12	Φωτισμός μηχανοστασίου	-/0,90	12,6	-/0,90	12,6	-/0,90	12,6
13	Καθαριστής λαδιού λιπάνσεως	1/0,35	2,299	1/0,35	2,299	0/0,00	0/0,00
14	Βοηθητικός ανεμιστήρας κύριας μηχανής	0/0,00	0	1/0,85	17,161	0/0,00	0/0,00
	ΣΥΝΟΛΟ		182,999		242,777		21,147

* Μονάδα Εγκαταστάσεως/Συντελεστής Λειτουργίας

2) Βοηθητικά μηχανήματα σκάφους.

A/A	Πίνακας II Περιγραφή μηχανήματος ή εγκαταστάσεως	Εγκατεστημένη ισχύς				Φορτίο					
		Αριθμός εγκατεστημένων μονάδων	Ονομ. ισχύς σε PS/βαθμός αποδόσεως	Ηλεκτρική ισχύς κάθε καταναλώσεως (kW)	Συνολική ηλεκτρική ισχύς (kW)	Κανονικής πορείας		Χειρισμών		Εν όρμω	
						M.Λ./Σ.Λ.*	Ισχύς (kW)	M.Λ./Σ.Λ.*	Ισχύς (kW)	M.Λ./Σ.Λ.*	Ισχύς (kW)
1	Εργαλειομηχανές			8,4	8,4	-/0,10	0,84	-/0,00	0,00	-/0,10	0,84
2	Γερανοί φορτώσεως	6	62/0,90	$0,736 \times 62/0,90 = 50,70$	304,2	0/0,00	0,00	0/0,00	0,00	6/0,35	106,47
3	Υδραυλικοί κινητήρες καλυμμάτων κυτών	4	2/0,78	$0,736 \times 2/0,78 = 1,88$	7,52	0/0,00	0,00	0/0,00	0,00	2/0,10	0,376

* Μονάδα λειτουργίας/Συντελεστής λειτουργίας

(συνεχίζεται)

Πίνακας II		Εγκατεστημένη ισχύς				Φορτίο					
A/A	Περιγραφή μηχανήματος ή εγκαταστάσεως	Αριθμός εγκατεστημένων μονάδων	Ονομ. ισχύς σε PS/βαθμός αποδόσεως	Ηλεκτρική ισχύς κάθε καταναλώσεως (kW)	Συνολική ηλεκτρική ισχύς (kW)	Κανονικής πορείας		Χειρισμών		Εν όρμω	
						M.Λ./Σ.Λ.*	Ισχύς (kW)	M.Λ./Σ.Λ.*	Ισχύς (kW)	M.Λ./Σ.Λ.*	Ισχύς (kW)
4	Εργάτης άγκυρας	1	100/0,91	$0,736 \times 100/0,91 = 80,88$	80,88	0/0,00	0,00	0/0,00	0,00	0/0,00	0,00
5	Ηλεκτρονικά όργανα				10	-/0,45	4,5	-/0,45	4,5	-/0,30	3
6	Αντλία έρματος	2	70/0,90	$0,736 \times 70/0,90 = 57,24$	114,48	0/0,00	0,00	0/0,00	0,00	1/0,90	51,516
7	Αντλία πυρκαγιάς και κύτους	1	60/0,898	$0,736 \times 60/0,898 = 49,17$	49,17	0/0,00	0,00	0/0,00	0,00	0/0,00	0,00
8	Γερανός μηχανοστασίου			4,3	4,3	-/0,00	0,00	-/0,00	0,00	-/0,40	1,72
ΣΥΝΟΛΟ							5,34		4,5		163,922

* Μονάδες λειτουργίας/Συντελεστής λειτουργίας

3) Βοηθητικά χώρων διαμονής.

Πίνακας III		Εγκατεστημένη ισχύς				Φορτίο					
A/A	Περιγραφή μηχανήματος ή εγκαταστάσεως	Αριθμός εγκατεστημένων μονάδων	Ονομ. ισχύς σε PS/βαθμός αποδόσεως	Ηλεκτρική ισχύς κάθε καταναλώσεως (kW)	Συνολική ισχύς (kW)	Κανονικής πορείας		Χειρισμών		Εν όρμω	
						M.Λ./Σ.Λ.*	Ισχύς (kW)	M.Λ./Σ.Λ.*	Ισχύς (kW)	M.Λ./Σ.Λ.*	Ισχύς (kW)
1	Φωτισμός διαμερισμάτων			22	22	-/0,40	8,8	-/0,40	8,8	-/0,60	13,2
2	Αερισμός διαμερισμάτων	1	24/0,874	$0,736 \times 24/0,874 = 20,21$	20,21	1/0,85	17,178	1/0,85	17,178	1/0,85	17,178
3	Συμπεστές ψυκτικής	1	30/0,88	$0,736 \times 30/0,88 = 25,09$	25,09	1/0,40	10,036	1/0,40	10,036	1/0,40	10,036
4	Συσκευές μαγειρείου			55	55	-/0,30	16,5	-/0,30	16,5	-/0,30	16,5
5	Αντλία πόσιμου	2	5/0,825	$0,736 \times 5/0,825 = 4,46$	8,92	2/0,50	4,46	2/0,50	4,46	2/0,50	4,46
6	Αντλία υγιεινής	1	5/0,825	$0,736 \times 5/0,825 = 4,46$	4,46	1/0,40	1,784	1/0,40	1,784	1/0,40	1,784
ΣΥΝΟΛΟ							58,758		58,758		63,158

* Μονάδα λειτουργίας/Συντελεστής λειτουργίας

Στον ακόλουθο πίνακα δίδονται τα τελικά αποτελέσματα παίρνοντας υπόψη τους πίνακες I, II και III για την ισχύ κανονικής πορείας, χειρισμών και εν όρμω.

Τελικά αποτελέσματα	Ισχύς κανονικής πορείας (kW)	Ισχύς χειρισμών (kW)	Ισχύς εν όρμω (kW)
ΠΙΝΑΚΑΣ I	182,999	243,777	21,147
ΠΙΝΑΚΑΣ II	5,34	4,5	163,922
ΠΙΝΑΚΑΣ III	58,758	58,758	63,158
ΣΥΝΟΛΟ	247,088	307,035	248,227

Η πλέον δυσμενής περίπτωση λειτουργίας είναι η λειτουργία όταν ένα εμπορικό πλοίο είναι εν πλω και γίνονται χειρισμοί. Από τις τυποποιημένες ισχύες νιζελογεννητριών επιλέγονται τρεις (3) των 160 kW τριφασικές, 60 Hz. Από αυτές οι

δύο μαζί πρέπει να καλύπτουν το σύνολο των αναγκών σε ισχύ του εμπορικού πλοίου σε κάθε κατάσταση λειτουργίας ενώ η τρίτη να χρησιμοποιείται ως εφεδρική.

Άσκηση 2.

Στον πίνακα 2.7.2 δίδονται οι καταναλώσεις ενός επιβατηγού-τουριστικού πλοίου (θαλαμηγός) του οποίου οι κύριες διαστάσεις είναι:

$L_{oa} = 28,540$ m (ολικό μήκος),

$L_{bp} = 23,075$ m (μήκος από πλώρη μέχρι πηδάλιο),

$L_{wl} = 23,715$ m (μήκος ισάλου),

$B = 5,380$ m (πλάτος),

$D = 2,930$ m (ύψος από γάστρα μέχρι κύριο κατάστρωμα) και

$d = 1,30 - 1,40$ m (ύψος βυθίσεως).

Να αναλυθεί και να κατανοηθεί ο αντίστοιχος ηλεκτρικός ισολογισμός.

Πίνακας 2.7.2

A/A	Καταναλώσεις	Εγκατεστημένη ισχύς	Ισχύς κανονικής πορείας		Ισχύς χειρισμών		Ισχύς εν όρμω	
		$P_{εγκ.}$ (kW)	f_s	$P_{λειτ.}$ (kW)	f_s	$P_{λειτ.}$ (kW)	f_s	$P_{λειτ.}$ (kW)
1	Ανλία μηχανισμού πηδαλίου Νο 1	0,37	0,3	0,111	0,5	0,185	0	0
2	Ανλία μηχανισμού πηδαλίου (εφεδρική)	0,37	0	0	0	0	0	0
3	Αντλίες πόσιμου νερού	1,5 (2×0,75)	0,5	0,75	0,5	0,75	0,5	0,75
4	Κινητήρας οσωσίβιας λέμβου	2	0	0	0	0	0	0
5	Ανλία καταλοίπων	2	0,1	0,2	0	0	0,1	0,2
6	Θερμοσίφωνα	4	0,8	3,2	0,8	3,2	0,8	3,2
7	Αφαλατωτής	2	0,5	1	0,5	1	0,5	1
8	Εργάτης πρύμνης	4	0	0	0,8	3,2	0	0
9	Ανλία θαλασσινού νερού υγιεινής	3	0,5	1,5	0,5	1,5	0,5	1,5
10	Διαχωριστήρας σεντινόερων	0,65	0,6	0,39	0	0	0,3	0,2
11	Ανλία γενικής χρήσεως Νο 1	3	0	0	0	0	0	0
12	Κομπρεσέρ αέρος	1,5	0,8	1,2	0,8	1,2	0,8	1,2
13	Ανλία γενικής χρήσεως Νο 2	3	0	0	0	0	0	0
14	Διαχωριστήρας καυσίμου νίτζελ	0,25	0,8	0,2	0	0	0,4	0,1
15	Πτερύγια πλεύσεως	0,6	0	0	0	0	0	0
16	Μετασχηματιστής φωτισμού	32	0,5	16	0,5	16	0,5	16

(συνεχίζεται)

A/A	Καταναλώσεις	Εγκατεστημένη ισχύς	Ισχύς κανονικής πορείας		Ισχύς χειρισμών		Ισχύς εν όρμω	
		$P_{εγκ.}$ (kW)	f_s	$P_{λεπ.}$ (kW)	f_s	$P_{λεπ.}$ (kW)	f_s	$P_{λεπ.}$ (kW)
17	Εργάτης άγκυρας	8	0	0	0,8	6,4	0	0
18	Αντλία κρύου νερού κλιματισμού	1,5	0,6	0,9	0,6	0,9	0,6	0,9
19	Ανορθωτικό σύστημα	4	0,8	3,2	0,8	3,2	0,8	3,2
20	Ανεμιστήρας μηχανοστασίου Νο 1	5,5	0,8	4,4	0,8	4,4	0,8	4,4
21	Ανεμιστήρας μηχανοστασίου Νο 2	5,5	0,8	4,4	0,8	4,4	0,8	4,4
22	Αντλία μεταφοράς πετρελαίου	1,5	0,3	0,45	0	0	0,3	0,45
23	Εξαεριστήρας μηχανοστασίου	1,5	0,8	1,2	0,8	1,2	0,8	1,2
24	Ψυκτική μονάδα	8,8	0,6	5,28	0,6	5,28	0,6	5,28
25	ΣΥΝΟΛΟ	96,54		44,4		52,8		44

Τα αποτελέσματα δίδονται συγκεντρωτικά στον ακόλουθο πίνακα:

	Ισχύς κανονικής πορείας (kW)	Ισχύς χειρισμών (kW)	Ισχύς εν όρμω (kW)
ΣΥΝΟΛΟ	44,4	52,8	44
% της $P_{εγκ.}$	46	54,7	45,6

Από αυτόν τον πίνακα βλέπουμε πως η μεγαλύτερη απαίτηση σε ισχύ είναι στην κατάσταση χειρισμών 52,8 kW και συνεπώς επιλέγουμε δύο γεννήτριες που να καλύπτουν η κάθε μία ξεχωριστά αυτήν την απαίτηση σε ισχύ. Επιλέγονται δύο σύγχρονες γεννήτριες των 64 kW η κάθε μία.

Άσκηση 3.

Στον πίνακα 2.7.3 δίδονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης πλοίου Ε/Γ-Ο/Γ. Να αναλυθεί και να κατανοηθεί ο αντίστοιχος ηλεκτρικός ισολογισμός.

2.8 Ερωτήσεις.

1) Με ποιον πρακτικό κανόνα γίνεται η επιλογή του αριθμού των γεννητριών σε ένα πλοίο;

2) Ποιοι είναι οι τρόποι με βάση τους οποίους πραγματοποιείται ο ηλεκτρικός ισολογισμός σε ένα πλοίο;

3) Από τι εξαρτάται ο τύπος του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους ενός πλοίου;

4) Τι εννοούμε με τον όρο «ηλεκτροστάσιο»;

5) Από τι εξαρτάται ο τύπος και ο αριθμός των ηλεκτροστασίων σε ένα πλοίο;

6) Ποια είναι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του αιμοστροβίλου σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου;

7) Ποια είναι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κινητήρων νίζελ σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου;

8) Τι είναι ο βαθμός ανομοιομορφίας και τι εκφράζει;

9) Ποιος είναι ο ρόλος του σφονδύλου;

10) Ποια είναι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των αεριοστροβίλων;

2.9 Παράλληλη λειτουργία γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος.

2.9.1 Γενικά.

Με τον ισολογισμό ενέργειας για μια ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου ορίζεται ο αριθμός των γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος (σύγχρονες γεννήτριες), που θα εγκατασταθούν στο χώρο του μηχανοστασίου (ηλεκτροστάσιο).

Στη λειτουργική κατάσταση του πλοίου εν πλω και εν πλω με χειρισμούς, ένας συγκεκριμένος αριθμός γεννητριών λειτουργεί παράλληλα, προκειμένου να ικανοποιήσει τις ανάγκες, σε πραγματική ισχύ, των φορτίων.

Πίνακας 2.7.3

Συσκευές	HP	Αριθμός συσκευών συνδεδεμένου φορτίου				Μέγιστο φορτίο εν πλω		Μέγιστο φορτίο απόπλου		24 ωρών φορτίο εν πλω	
		Ολικό	Σε χρήση	Ολικό (HP)	Ολικό εισόδου (kW)	Συντελ.	kW	Συντελ.	kW	Συντελ.	kW
Βαρούλκο Αγκυρών	15			15	11,25	0,50	5,62	0,50	5,62	0,50	5,62
Βαρούλκο καταπέλτη	15			15	11,25	0,50	5,62	0,50	5,62	0,50	5,62
Αντλίες											
Γενικής χρήσεως Νο 1	15,5			15,5	11,40	0,15	1,71	0,15	1,71	0,15	1,71
Γενικής χρήσεως Νο 2	15,5			15,5	11,40	0,15	1,71	0,15	1,71	0,15	1,71
Ποσίμου	6,50			6,50	4,80	0,40	1,92	0,40	1,92	0,40	1,92
Υγιεινής	6,50			6,50	4,80	0,73	3,50	0,73	3,50	0,73	3,50
Καυσίμου	1,50			1,50	1,10	0,80	0,88	0,80	0,88	0,80	0,88
Ανεμιστήρες μηχανοστασίου	1,50			1,50	1,10	0,85	0,93	0,85	0,93	0,85	0,93
Εξαερισμός μηχανοστασίου	1,50			1,50	1,10	0,85	0,93	0,85	0,93	0,85	0,93
Ανεμιστήρες ενδιαιτήσεως Νο 1	0,80			0,80	0,60	0,90	0,54	0,90	0,54	0,90	0,54
Ανεμιστήρες ενδιαιτήσεως Νο 2	0,80			0,80	0,60	0,90	0,54	0,90	0,54	0,90	0,54
Εξαεριστικό ενδιαιτήσεως	1,0			1,0	0,73	0,90	0,65	0,90	0,65	0,90	0,65
Θέρμανση					20,00	0,60	12,00	0,60	12,00	0,60	12,00
Φωτισμός μηχανοστασίου (π1)					1,80	0,90	1,62	0,90	1,62	0,90	1,62
Πίνακας σαλονιού (π2)					11,68	0,90	10,51	0,90	10,51	0,90	10,51
Πίνακας γέφυρας (π3)					11,52	0,90	10,42	0,90	10,42	0,90	10,42
Συντελεστής σύγχρονης λειτουργίας	:	0,90					59,19		59,19		59,19
							53,27		53,27		53,27
Μέγιστο Φορτίο = 53,27 kW ή 67 kVA											
Στο σκάφος θα τοποθετηθούν δύο γεννήτριες 80 kVA η κάθε μία.											

Γενικά, τα **πλεονεκτήματα** της παράλληλης λειτουργίας των συγχρόνων γεννητριών είναι ότι:

1) Παρέχεται πραγματική ισχύς σε σύνολο φορτίων, όταν μια γεννήτρια δεν έχει τη δυνατότητα να παράσχει την αντίστοιχη πραγματική ισχύ.

2) Ενισχύεται η αξιοπιστία της ηλεκτρικής εγκατάστασης πλοίου, γιατί στην περίπτωση βλάβης μιας γεννήτριας δεν διακόπεται η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

3) Δρομολογείται ένα ευέλικτο πρόγραμμα συντηρήσεως των γεννητριών.

Η παράλληλη λειτουργία των γεννητριών απαιτεί λεπτούς χειρισμούς και ικανοποίηση καταλλήλων συνθηκών παραλληλισμού.

Η παράλληλη λειτουργία των συγχρόνων γεννητριών μελετάται με τη βοήθεια των χαρακτηριστικών συχνότητας (f) -ισχύος (P) και της αντίστοιχης τάσεως (V) -αέργου ισχύος (Q), οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια.

2.9.2 Χαρακτηριστικές συχνότητας-ισχύος (f-P) και τάσεως-αέργου ισχύος (V-Q) των συγχρόνων γεννητριών.

Η σύγχρονη γεννήτρια τροφοδοτείται από τις ακόλουθες πηγές ενέργειας:

1) **Ηλεκτρική ενέργεια**, που παράγει το ηλεκτρικό πεδίο διεγέρσεως το οποίο μετατρέπεται σε άεργο

ισχύ. Αυτή η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από μια πηγή Συνεχούς Ρεύματος (ΣΡ) και είναι υπεύθυνη για το μέτρο της τάσεως ακροδεκτών της γεννήτριας. Προκειμένου να διατηρείται η τάση ακροδεκτών σταθερή μεταξύ πηγής τροφοδοτήσεως ΣΡ και κυκλώματος διεγέρσεως παρεμβάλλεται ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσεως AVR (Automatic Voltage Regulator). Ο μηχανισμός ο οποίος ρυθμίζει την παραγόμενη άεργη ισχύ για να έχουμε σταθερή τάση ονομάζεται «**V-Q**» **μηχανισμός**.

2) **Μηχανική ενέργεια**, η οποία με τη βοήθεια του φαινομένου της επαγωγής μετατρέπεται στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε πραγματική ισχύ. Την μηχανική ενέργεια την παρέχει η κινητήρια μηχανή στη σύγχρονη γεννήτρια. Αυτή η ενέργεια είναι υπεύθυνη για την συχνότητα των παραγομένων τάσεων και ρευμάτων. Προκειμένου η συχνότητα να διατηρείται σταθερή, στην κινητήρια μηχανή τοποθετείται διάταξη αυτομάτου ελέγχου που καθορίζει τον έλεγχο της συχνότητας, ο Αυτόματος Ρυθμιστής Συχνότητας (Speed Governor). Η διάταξη αυτή επεμβαίνει στον ρυθμό εγχύσεως καυσίμου προς την κινητήρια μηχανή. Μικρός ρυθμός εγχύσεως καυσίμου σημαίνει χαμηλή ταχύτητα περιστροφής (χαμηλή ηλεκτρική συχνότητα). Σ' αυτήν την περίπτωση ρυθμίζουμε την παραγόμενη ενεργό ισχύ της σύγχρονης γεννήτριας. Αυτός ο μηχανισμός ελέγχου ονομάζεται «**f-P**» **μηχανισμός**.

Οι δύο παραπάνω μηχανισμοί (σχ. 2.9α) είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Αναλυτικότερα:

1) Μηχανισμός «f-P».

Όταν αυξάνεται η προσφερόμενη μηχανική ισχύς στη σύγχρονη γεννήτρια, αυξάνεται η ενεργός ισχύς P, και συγχρόνως μειώνεται γραμμικά, η ταχύτητα του δρομέα, άρα και της κινητήριας μηχανικής, οπότε και της ηλεκτρικής συχνότητας f. Η σχέση συχνότητας και πραγματικής ισχύος, P, δίδεται στο σχήμα 2.9β.

Η κλίση της χαρακτηριστικής f-P είναι αρνητική, σταθερή, ονομάζεται **στατισμός συχνότητας** και καθορίζεται από τον κατασκευαστή της κινητήριας μηχανής και τον ρυθμιστή στροφών.

Όταν αυξάνεται ο ρυθμός εγχύσεως του καυσίμου η χαρακτηριστική μετατοπίζεται παράλληλα, προς τον αυτό της, προς τα πάνω. Η παράλληλη μετακίνηση της χαρακτηριστικής f-P παράλληλα προς τον αυτό της, προς τα κάτω ισοδυναμεί με μείωση της εγχύσεως του καυσίμου.

2) Μηχανισμός «V_t-Q».

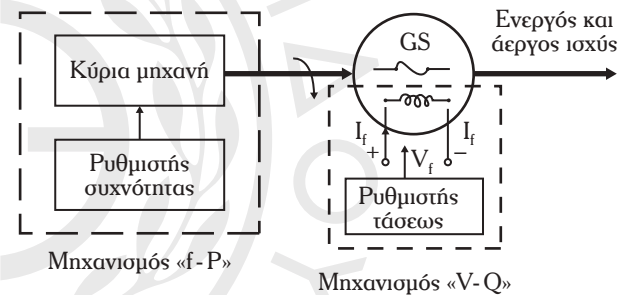
Όταν η σύγχρονη γεννήτρια τροφοδοτεί επαγωγικά φορτία (αύξηση της άεργου ισχύος), τότε μειώνεται το μέτρο της τάσεως ακροδεκτών V_t. Όταν, όμως τροφοδοτεί χωρητικά φορτία (μείωση της άεργου ισχύος), η τάση ακροδεκτών αυξάνεται.

Η σχέση «V_t-Q», παριστάνεται με μία ευθεία (για ορισμένες περιοχές τιμών) με αρνητική κλίση (σχ. 2.9γ).

Η κλίση της χαρακτηριστικής «V_t-Q» ονομάζεται **στατισμός τάσεως** (Voltage Droop – VD) και καθορίζεται από τον κατασκευαστή της γεννήτριας και του κυκλώματος διεγέρσεως.

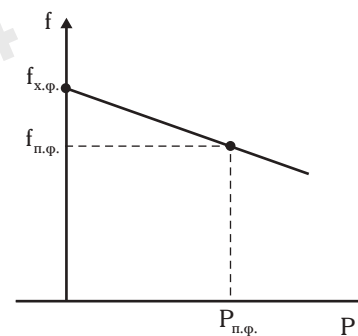
Ο ρυθμιστής τάσεως είναι υπεύθυνος για τον μηχανισμό «V_t-Q».

Αυξάνοντας την τιμή του ρεύματος διεγέρσεως η χαρακτηριστική «V_t-Q» μετατοπίζεται παράλληλα, προς τον αυτό της, προς τα πάνω. Το αντίθετο συμβαίνει όταν μειώνεται η τιμή του ρεύματος διεγέρσεως.



Σχ. 2.9α

Μηχανισμοί «f-P» και «V-Q» σε μια σύγχρονη γεννήτρια.



P_{n.φ.}: Ενεργός ισχύς (πραγματική) στην λειτουργία πλήρους φορτίου.
 f_{x.φ.}: Συχνότητα στη λειτουργία χωρίς φορτίο.
 f_{n.φ.}: Συχνότητα στη λειτουργία πλήρους φορτίου.

Σχ. 2.9β

Χαρακτηριστική f-P.

Τελικά, ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσεως (AVR) ενεργοποιείται μεταβάλλοντας το ρεύμα διεγέρσεως των τυλιγμάτων διεγέρσεως, προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η κανονική της λειτουργία, όταν εμφανίζονται καταστάσεις υπερδιεγέρσεως ή υποδιεγέρσεως και υπερφόρτιση. Ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσεως διατηρεί σταθερή την παραγόμενη τάση και αυξάνει αποτελεσματικά τη συνολική ευστάθεια της ηλεκτρικής εγκατάστασης.

Ο Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσεως έχει τις ακόλουθες, συγκεκριμένες, λειτουργίες:

1) Μετρά την παραγόμενη τάση και τη συγκρίνει με την τάση αναφοράς.

2) Ελέγχει τα όρια φορτίσεως της γεννήτριας, ώστε να μην ξεπερνά τα ανώτερα όρια φορτίσεώς της.

3) Προστατεύει συνεχώς την γεννήτρια, στην περίπτωση της λειτουργίας της στην κατάσταση υπερδιεγέρσεως ή υποδιεγέρσεως.

2.9.3 Συνθήκες παραλληλισμού συγχρόνων γεννητριών.

Για να λειτουργήσουν παράλληλα δύο ή περισσότερες σύγχρονες γεννήτριες πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες:

1) Οι πολικές τάσεις στους ακροδέκτες των γεννητριών να είναι ίσες.

2) Να υπάρχει ίδια διαδοχή των φάσεων των αντιστοίχων τάσεων.

3) Οι τάσεις των αντιστοίχων φάσεων των γεννητριών να είναι ίσες σε όλες τις χρονικές στιγμές.

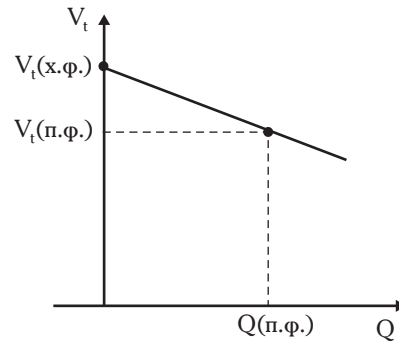
4) Η συχνότητα της παραγόμενης τάσεως της γεννήτριας, την οποία παραλληλίζουν να είναι λίγο μεγαλύτερη απ' την συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου.

Στο σχήμα 2.9δ παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα παραλληλισμού δύο συγχρόνων γεννητριών.

Θεωρούμε την συνδεσμολογία των φάσεων των γεννητριών G_A και G_B σε αστέρα. Η γεννήτρια G_A τροφοδοτεί το δίκτυο, ενώ η γεννήτρια G_B πρόκειται να παραλληλιστεί στο δίκτυο. Η διάταξη παραλληλισμού αποτελείται από έναν διακόπτη διπλής ενέργειας (δ), ένα βολτόμετρο (V), ένα συχνόμετρο (f) και τρεις πλοηγές λυχνίες (L_1, L_2, L_3) που ονομάζονται **λυχνίες συγχρονισμού**. Για να παραλληλιστεί η γεννήτρια G_B , γίνονται οι ακόλουθες ενέργειες:

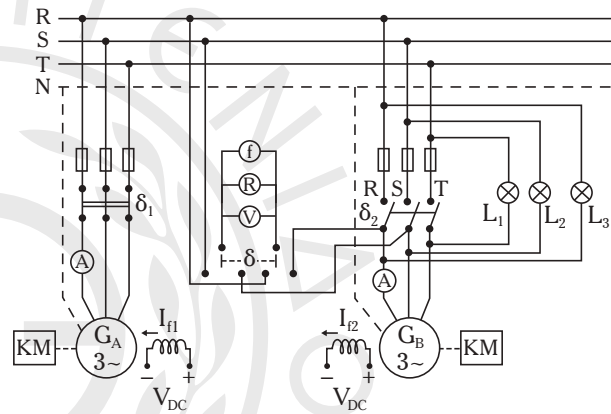
1) Αρχικά ο διακόπτης δ_2 είναι ανοικτός.

2) Θέτομε σε κίνηση την κινητήρια μηχανή KM_{II} και ρυθμίζομε την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας, ώστε να γίνει ίση με την σύγχρονη ταχύτητα της μηχανής.



$V_t(x.φ.)$: Τερματική τάση στη λειτουργία χωρίς φορτίο.
 $V_t(π.φ.)$: Τερματική τάση στο πλήρες φορτίο.

Σχ. 2.9γ
Χαρακτηριστική $V_t - Q$.



Σχ. 2.9δ

Σχηματικό διάγραμμα παραλληλισμού δύο συγχρόνων γεννητριών.

3) Ρυθμίζομε το ρεύμα διεγέρσεως I_{f2} , της γεννήτριας G_B , ώστε η τάση διεγέρσεώς της να γίνει ίση με την τάση του δικτύου. Τις δύο συνθήκες (1 και 2) ελέγχομε με το βολτόμετρο και το συχνόμετρο μέσω του διακόπτη (δ) διπλής ενέργειας (σχ. 2.9δ).

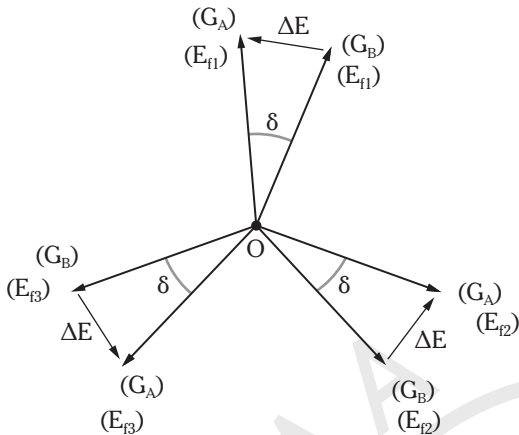
4) Ελέγχομε την διαδοχή των τάσεων των αντιστοίχων φάσεων. Ο έλεγχος γίνεται με τους ακόλουθους τρόπους:

α) Συνδέομε έναν κατάλληλο ασύγχρονο κινητήρα διαδοχικά στους ακροδέκτες των γεννητριών G_A και G_B . Αν η φορά περιστροφής του άξονα του κινητήρα είναι ίδια για τις γεννήτριες G_A και G_B , τότε η διαδοχή των φάσεων είναι ίδια. Στην αντίθετη περίπτωση, αντιστρέφεται η συνδεσμολογία των δύο φάσεων της γεννήτριας G_B , ώστε να έχομε την ίδια διαδοχή φάσεων.

β) Χρησιμοποιούμε τρεις πλοηγές λυχνίες (L_1, L_2, L_3) οι οποίες συνδέονται ομοιοπολικά. Οι λυχνίες

ες πρέπει να αντέχουν σε διπλάσιες τάσεις, της τάσεως ακροδεκτών κάθε γεννήτριας.

Στο σχήμα 2.9ε παρουσιάζονται τα περιστρεφόμενα διανύσματα των τάσεων των αντιστοίχων φάσεων των γεννητριών G_A και G_B .



Σχ. 2.9ε

Διανυσματικό διάγραμμα των τάσεων των φάσεων των γεννητριών G_A και G_B .

Αν παρατηρήσουμε ότι οι λυχνίες αναβοσβήνουν ταυτόχρονα με μια περιοδικότητα, η οποία εξαρτάται απ' τη διαφορά $f_2 - f_1$ των αντιστοίχων συχνοτήτων των γεννητριών G_A και G_B τότε έχουμε συνδέσει ομοιολογικά τις γεννήτριες (ίδια διαδοχή των φάσεων των τάσεων).

Όταν οι λαμπτήρες δεν αναβοσβήνουν ταυτόχρονα αλλά κυκλικά, τότε δεν έχουμε ίδια διαδοχή των φάσεων των αντιστοίχων τάσεων. Στην περίπτωση αυτή αντιστρέφουμε τη σύνδεση των δύο από τις τρεις φάσεις της γεννήτριας G_B , ώστε να πετύχουμε ταυτόχρονο αναβόσβημα των λαμπτήρων.

Κλείνουμε τον διακόπτη δ_2 όταν οι τρεις πλοηγές λυχνίες είναι ταυτόχρονα σβηστές. Η συνδεσμολογία των πλοηγών λυχνίων του σχήματος 2.9δ, ονομάζεται **σκοτεινή σύνδεση λαμπτήρων συγχρονισμού**.

Χρησιμοποιούμε ένα ειδικό όργανο το οποίο ονομάζεται **συγχρονοσκόπιο** [σχ. 2.9στ(α)] για να ελέγξουμε τη διαφορά των συχνοτήτων f_2 της γεννήτριας G_B και της συχνότητας f_1 της γεννήτριας G_A .

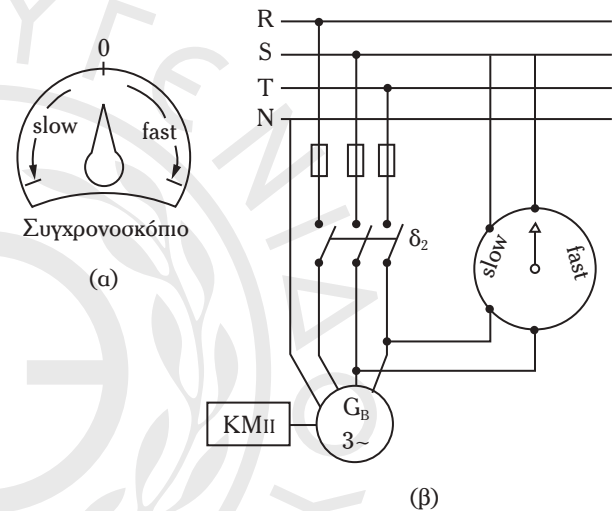
Το συγχρονοσκόπιο αποτελείται από δύο πηνία τα οποία τροφοδοτούνται το ένα από το δίκτυο και το άλλο από την γεννήτρια G_B [σχ. 2.9στ(β)]. Το όργανο αυτό περιλαμβάνει έναν περιστρεφόμενο δείκτη.

Όταν $\Delta f = f_2 - f_1 > 0$, όπου f_1 η συχνότητα της τά-

σεως του δικτύου, τότε ο δείκτης περιστρέφεται στη φορά των δεικτών του ρολογιού.

Όταν $\Delta f < 0$, τότε ο δείκτης περιστρέφεται στην αντίθετη φορά των δεικτών του ρολογιού. Η περιστροφή του δείκτη είναι αργή όταν η Δf είναι μικρή. Όταν $\Delta f = 0$, τότε ο δείκτης μένει ακίνητος στη θέση ισορροπίας. Ο διακόπτης δ_2 [σχ. 2.9στ(β)] κλείνει όταν ο δείκτης βρίσκεται στη θέση 0 [σχ. 2.9στ(α)].

Στην περίπτωση, κατά την οποία η διαφορά φάσεως της τάσεως του δικτύου και της γεννήτριας, είναι 180° και ο διακόπτης δ_2 κλείνει, θα δημιουργηθεί ισχυρό βραχυκύκλωμα, με αποτέλεσμα να υποστεί μεγάλες καταστροφές το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου.



Σχ. 2.9στ

- (α) Σχηματική παράσταση του συγχρονοσκοπίου.
- (β) Σύνδεση του συγχρονοσκοπίου με τη γεννήτρια G_B και το δίκτυο.

2.9.4 Χαρακτηριστικά ρυθμιστών στροφών των κινητηρίων μηχανών³.

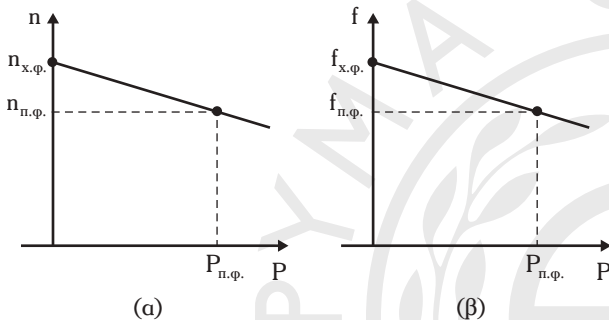
Η συχνότητα των παραγομένων τάσεων και ρευμάτων ενός συστήματος συγχρόνων γεννητριών, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα, διατηρείται σε προκαθορισμένα όρια όταν ρυθμίζεται κατάλληλα η ταχύτητα περιστροφής των αντιστοίχων κινητηρίων μηχανών τους. Η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής γίνεται μέσω **αυτομάτων ρυθμιστών στροφών** (governors), οι οποίοι επεμβαίνουν στην παροχή καυσίμου (ή ατμού όταν πρόκειται για κινητήριες μηχανές/στροβίλους), ώστε η ταχύτητα περιστροφής να διατηρείται σταθερή όταν μεταβάλλεται

³ C. I. Hubert. Electrical, Machines, Prentice Hall, 1991.

το φορτίο μίας ηλεκτρικής εγκατάστασης πλοίου.

Η μεταφορά της πραγματικής ισχύος μεταξύ παραλληλισμένων συγχρόνων γεννητριών γίνεται με ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής χωρίς φορτίο, η οποία καθορίζεται απ' τον ρυθμιστή στροφών των κινητηρίων μηχανών, ενώ η μεταφορά της αέργου ισχύος γίνεται με τη ρύθμιση του ρεύματος διεγέρσεως των συγχρόνων γεννητριών ή μέσω των σταθεροποιητών τάσεως.

Στο σχήμα 2.9ζ δίδονται οι χαρακτηριστικές ταχύτητας περιστροφής της κινητήριας μηχανής και της παραγόμενης πραγματικής ισχύος P , καθώς και οι χαρακτηριστικές της συχνότητας f , των παραγομένων τάσεων και ρευμάτων της σύγχρονης γεννήτριας και της αντίστοιχης παραγόμενης πραγματικής ισχύος P .



Σχ. 2.9ζ

(α) Χαρακτηριστική ταχύτητας – πραγματικής ισχύος κινητήριας μηχανής. (β) Χαρακτηριστική συχνότητας – πραγματικής ισχύος σύγχρονης γεννήτριας.

Οι χαρακτηριστικές ταχύτητας-ισχύος και συχνότητας-ισχύος είναι ευθείες με αρνητική κλίση, ενώ στην πραγματικότητα είναι μη γραμμικές.

Μηχανές με χαρακτηριστικές μηδενικής κλίσεως ονομάζονται **ισόχρονες** και είναι ασταθείς όταν λειτουργούν παράλληλα.

Τα χαρακτηριστικά των ρυθμιστών οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην παράλληλη λειτουργία των συγχρόνων γεννητριών για την κατανομή της πραγματικής ισχύος είναι:

1) Η **ρύθμιση της ταχύτητας του ρυθμιστή καινούριου** (Governor Speed Regulation – GSR), η οποία ορίζεται ως εξής⁴:

$$m = \frac{n_{x.φ.} - n_{p.φ.}}{n_{p.φ.}} = \frac{f_{x.φ.} - f_{p.φ.}}{f_{p.φ.}}, \text{ και}$$

2) η **πτώση ταχύτητας** (στατισμός, Governor Speed Droop – GD), η οποία ορίζεται ως εξής⁴:

$$m = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{f_{x.φ.} - f_{p.φ.}}{P_{p.φ.}}.$$

Η πτώση ταχύτητας δίδεται σε Hz/W ή Hz/kW.

2.9.5 Κατανομή πραγματικής ισχύος μεταξύ παραλληλισμένων συγχρόνων γεννητριών⁵.

Η κατανομή της πραγματικής ισχύος μεταξύ των συγχρόνων γεννητριών που λειτουργούν παράλληλα, γίνεται με βάση τους στατισμούς και τις χαρακτηριστικές f - P , οι οποίες ακολουθούν το σύστημα σύγχρονη γεννήτρια – κινητήρια μηχανή.

Η μεταβολή της πραγματικής ισχύος μεταξύ των συγχρόνων γεννητριών, σε παράλληλη λειτουργία γίνεται εύκολα, μεταβάλλοντας τον ρυθμιστή ταχύτητας χωρίς φορτίο (non load speed) των αντίστοιχων κινητηρίων μηχανών με τους ακόλουθους ρυθμιστές στροφών.

1) Μηχανές με ρυθμιστές στροφών ίδιων χαρακτηριστικών.

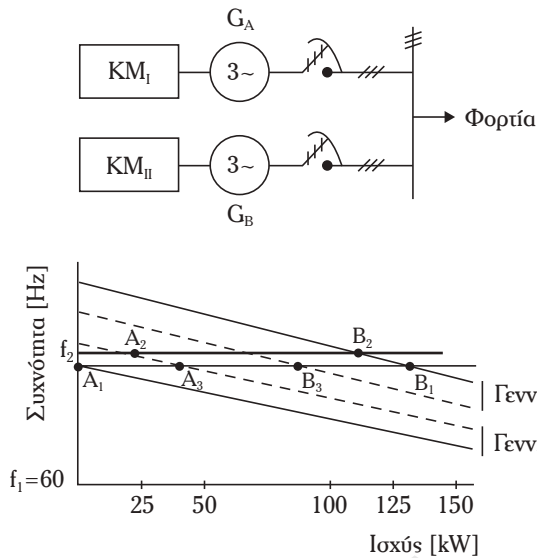
Στο σχήμα 2.9η δίδεται γραφικά η μεταφορά της πραγματικής ισχύος μεταξύ γεννητριών, των οποίων οι κινητήριες μηχανές έχουν ρυθμιστές στροφών με ίδια χαρακτηριστικά.

Η γεννήτρια G_B φέρει φορτίο 150 kW στη συχνότητα των 60 Hz. Η γεννήτρια G_A μόλις έχει παραλληλιστεί με την γεννήτρια G_B , και λειτουργεί χωρίς φορτίο. Έστω ότι μεταφέρεται μέρος της πραγματικής ισχύος από την γεννήτρια G_B στην γεννήτρια G_A χωρίς μόνιμη μεταβολή της συχνότητας του συστήματος. Θεωρούμε ότι το 1/3 του φορτίου της G_B μεταφέρεται στη G_A , οπότε η γεννήτρια G_B διαθέτει 100 kW (σημείο B_3 , σχ. 2.9η), ενώ η γεννήτρια G_A διαθέτει 50 kW (σημείο A_3 , σχ. 2.9η).

Μέσω του ρυθμιστή στροφών της κινητήριας μηχανής KM_1 αυξάνομε την ταχύτητα περιστροφής της, ώστε η γεννήτρια G_A να αναλάβει 25 kW (σημείο A_2). Η χαρακτηριστική f - P της G_A μετατοπίζεται παράλληλα, χωρίς να αλλάξει η κλίση της, σε μία μεγαλύτερη συχνότητα f_2 . Το σύστημα των γεννητριών λειτουργεί τώρα, σε μεγαλύτερη συχνότητα (f_2), ενώ η γεννήτρια G_B διαθέτει 125 kW (σημείο B_2).

⁴ Για την κλίση της f - P χαρακτηριστικής καμπύλης διάφοροι συγγραφείς χρησιμοποιούν τα σύμβολα GSP, SD και GD. Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε το σύμβολο m .

⁵ Βλ. υποσημ. 3.



Σχ. 2.9n

Διαγραμματική παράσταση πραγματικής ισχύος μεταξύ των γεννητριών G_A και G_B σε παράλληλη λειτουργία.

Ωστόσο, για να μεταφερθούν στην γεννήτρια G_A τα υπόλοιπα 25 kW από την γεννήτρια G_B , μειώνουμε την ταχύτητα περιστροφής χωρίς φορτίο της κινητήριας μηχανής KM_{II} . Η συχνότητα επανέρχεται στα 60 Hz και η νέα κατάσταση λειτουργίας του συστήματος περιγράφεται από τα σημεία A_3 και B_3 . Τελικά, η G_A αναλαμβάνει 50 kW και η G_B 100 kW.

Κατά τη διάρκεια των χειρισμών η χαρακτηριστική $f-P$ της γεννήτριας G_B μετατοπίζεται παράλληλα προς τα κάτω χωρίς να αλλάζει η κλίση της.

Επίσης, κατά τη διάρκεια της μεταφοράς της πραγματικής ισχύος από την μία γεννήτρια στην άλλη, υπάρχει ένα σύντομο χρονικό διάστημα, κατά το οποίο η ενεργειακή ισορροπία του συστήματος διαταράσσεται. Η κινητήρια μηχανή KM_I της γεννήτριας G_A αυξάνει την ταχύτητά της γιατί αυξάνεται η εισερχόμενη ενέργεια, που προκαλείται με αυξητική μεταβολή της ταχύτητας χωρίς φορτίο του ρυθμιστή στροφών της. Η κινητήρια μηχανή KM_{II} της γεννήτριας G_B αυξάνει την ταχύτητά της λόγω ελαττώσεως του φορτίου της.

Έξω από αυτό το σύντομο μεταβατικό διάστημα ενεργειακής διαταραχής, όταν οι γωνίες ισχύος των αντιστοίχων γεννητριών μεταβάλλονται, τότε και οι δύο γεννήτριες περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα περιστροφής.

2) Μηχανές με ανόμοιες χαρακτηριστικές ρυθμιστών στροφών.

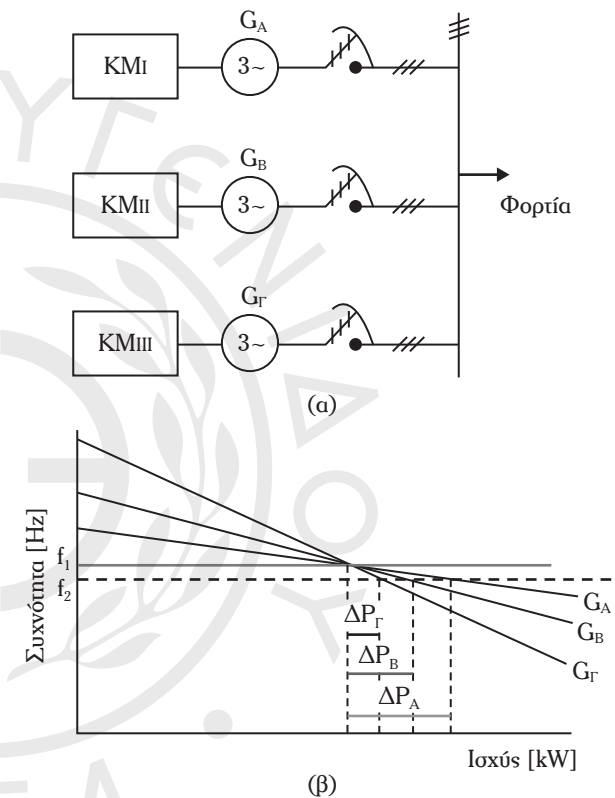
Συστήματα συγχρόνων γεννητριών με ανόμοιες

χαρακτηριστικές ρυθμιστών στροφών των αντιστοίχων κινητηρίων μηχανών τους δεν διαμερίζουν ισόδύναμα το φορτίο μεταξύ τους.

Η γεννήτρια με τον μικρότερο στατισμό αναλαμβάνει τη μεγαλύτερη ποσότητα φορτίου.

Στο σχήμα 2.9θ, τρεις γεννήτριες με ανόμοιες χαρακτηριστικές ρυθμιστών στροφών αναλαμβάνουν το ίδιο φορτίο στη συχνότητα f_1 .

Σε μια μικρότερη συχνότητα f_2 , η γεννήτρια με τον μικρότερο στατισμό αναλαμβάνει το μεγαλύτερο φορτίο.



Σχ. 2.9θ

(α) Τρεις γεννήτριες με ανόμοιες χαρακτηριστικές ρυθμιστών στροφών σε παράλληλη λειτουργία και (β) κατανομή φορτίου μεταξύ αυτών των γεννητριών.

– Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Δύο σύγχρονες γεννήτριες λειτουργούν παράλληλα και η κάθε μια παράγει τάση διεγέρσεως 850 V. Οι σύγχρονες σύνθετες αντιστάσεις των συγχρόνων γεννητριών είναι:

$$Z_{S1} = (0,01 + j15)\Omega/\text{φάση}$$

$$Z_{S2} = (0,1 + j2,5) \Omega/\text{φάση}.$$

Οι γεννήτριες τροφοδοτούν φορτίο:

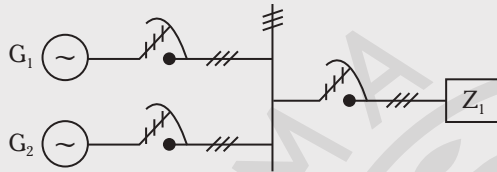
$$Z_L = (1 + j0,5) \Omega/\text{φάση}.$$

Να υπολογίσετε:

- 1) Την κοινή τάση ακροδεκτών των γεννητριών.
- 2) Τα ρεύματα που παρέχουν οι γεννήτριες, και
- 3) την ισχύ που παρέχουν οι γεννήτριες στο φορτίο.

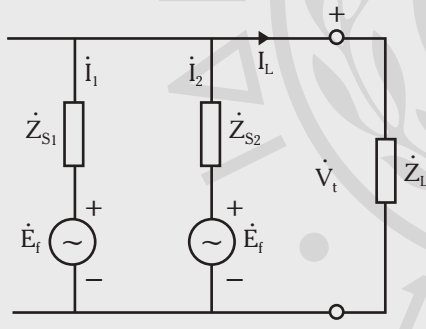
Λύση.

Στο παρακάτω σχήμα (σχ. 2.9i) έχουμε:



Σχ. 2.9i

Η ανά φάση κυκλωματική παράσταση των γεννητριών σε παράλληλη λειτουργία παρουσιάζεται στο σχήμα 2.9ia.



Σχ. 2.9ia

Οι σύγχρονες σύνθετες αντιστάσεις των αντιστοίχων γεννητριών είναι:

$$Z_{S1} = 0,01 + j1,5 = 1,5 \angle 89,62^\circ \Omega$$

$$Z_{S2} = 0,1 + j2,5 = 2,5 \angle 87,71^\circ \Omega.$$

Οι σύγχρονες ισοδύναμες ανηγμένες αγωγιμότητες των δύο μηχανών είναι:

$$Y_1 = \frac{1}{Z_{S1}} = \frac{1}{1,5 \angle 89,62^\circ} = 0,666 \angle -89,62^\circ$$

$$Y_1 = 0,666(0,006 - j0,999)$$

$$Y_2 = \frac{1}{Z_{S2}} = \frac{1}{2,5 \angle 87,71^\circ} = 0,4 \angle -87,71^\circ = 0,4(0,039 - j0,999)$$

$$Z_L = (1 + j0,5) = 1,118 \angle 26,56^\circ \Omega = 1,118(0,894 + j0,447) \Omega$$

$$Y_L = \frac{1}{1,118 \angle 26,56^\circ} = 0,894 \angle -26,56^\circ = 0,994(0,894 - j0,447).$$

1) Η κοινή τερματική τάση V_t , εφαρμόζοντας το Θεώρημα του Millman, είναι:

$$\begin{aligned} V_t &= \frac{E_1 \cdot Y_1 + E_2 \cdot Y_2}{Y_1 + Y_2 + Y_L} = 0,499 \angle -87,14^\circ \text{ V} \\ &= \frac{850 \angle 0^\circ \cdot 0,666 \angle -89,62^\circ + 850 \angle 0^\circ \cdot 0,4 \angle -87,7^\circ}{0,003 - j0,665 + 0,015 - j0,399 + 0,888 - j0,444} \\ &= \frac{566,1 \angle -89,62^\circ + 340 \angle -87,71^\circ}{0,906 - j1,508} \\ &= \frac{3,754 - j566 + 13,585 - j339,72}{1,758 \angle -59^\circ} \\ &= \frac{907,378 \angle -88,90^\circ}{1,758 \angle -59^\circ} = 516,14 \angle -29,9^\circ \end{aligned}$$

$$I_L = \frac{V_t}{Z_L} = \frac{516,14 \angle -26,9^\circ}{1,118 \angle 26,56^\circ} = 461,66 \angle -56,46^\circ \text{ A.}$$

2) Οι γεννήτριες παρέχουν τα ακόλουθα ρεύματα:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E_1 - V_t}{Z_{S1}} = \frac{850 - 510,14 \angle -29,9^\circ}{1,5 \angle 89,62^\circ} \text{ A} \\ &= \frac{850 - (447,44 - j257,28)}{1,5 \angle 89,62^\circ} \end{aligned}$$

$$= \frac{402,56 + j257,28}{1,5 \angle 89,62^\circ} = \frac{477,75 \angle 32,57^\circ}{1,5 \angle 89,62^\circ}$$

$$\acute{\eta} \quad I_1 = 318,5 \angle -57,05^\circ \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{E_2 - V_t}{Z_{S2}} = \frac{850 - 516,14 \angle -26,9^\circ}{2,5 \angle 87,71^\circ} =$$

$$= \frac{477,75 \angle 32,57^\circ}{2,5 \angle 87,71^\circ} \text{ A} = 191,1 \angle -55,14^\circ \text{ A.}$$

3) Η πραγματική ισχύς της πρώτης γεννήτριας είναι:

$$\begin{aligned} P_1 &= V_t I_1 \cos(\varphi_1) = \\ &= 516,14 \cdot 318,5 \cos[-29,9^\circ - (-57,05^\circ)] \\ &= 516,14 \cdot 318,5 \cos 27,15^\circ = 146,3 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2 &= V_t I_2 \cos(\varphi_2) = \\ &= 516,14 \cdot 191,1 \cos[-29,9^\circ - (-55,14^\circ)] \\ &= 516,14 \cdot 191,1 \cos 25,24^\circ = 92,95 \text{ kW}. \end{aligned}$$

Άσκηση 2.

Δίδονται δύο γεννήτριες A και B, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα και έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Γεννήτρια A: 600 kW, 60 Hz, 230 V, 6-πολική.

Γεννήτρια B: 400 kW, 60 Hz, 230 V, 4-πολική.

Και οι δύο γεννήτριες έχουν την ίδια κλίση της f-P, ίση με 2,53%. Οι γεννήτριες μοιράζονται φορτίο 500 kW σε ίσα μέρη και στη συχνότητα των 60,4 Hz. Αν το φορτίο του δικτύου αυξάνεται κατά 600 kW, να υπολογίσετε:

- 1) Την συχνότητα των ζυγών $f_{\text{ζυγών}}$, και
- 2) το φορτίο το οποίο αναλαμβάνει κάθε γεννήτρια.

Λύση.

Στο σχήμα 2.9ιβ δίδονται τα χαρακτηριστικά των ρυθμιστών στροφών των κινητηρίων μηχανών των αντιστοίχων γεννητριών.

$$1) \text{ Ισχύει: } \frac{m \cdot f_{\text{ov}}}{P_{\text{ov}}} = \frac{\Delta f}{\Delta P}$$

Γεννήτρια A

$$\frac{0,253 \cdot 60}{600} = \frac{\Delta f}{\Delta P_A}$$

$$\text{ή } \Delta P_A = 395,256 \Delta f$$

οπότε έχουμε:

$$\Delta P_A + \Delta P_B = (395,256 + 263,504) \Delta f$$

$$600 - 500 = 658,76 \Delta f \quad \text{ή} \quad \Delta f = 0,151 \text{ Hz}$$

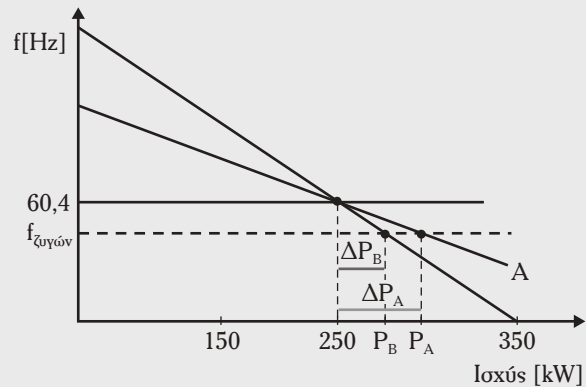
Η συχνότητα των ζυγών είναι:

$$f_{\text{ζυγών}} = 60,4 - 0,151 = 60,249 \text{ Hz}$$

Γεννήτρια B

$$\frac{0,523}{400} = \frac{\Delta f}{\Delta P_B}$$

$$\Delta P_B = 263,504 \Delta f$$



Σχ. 2.9ιβ

$$2) \text{ Είναι: } \Delta P_A = 395,256 \cdot 0,151 = 59,684 \text{ kW}$$

$$\text{όμως ισχύει: } \Delta P_A + \Delta P_B = 100$$

$$\text{και έχουμε: } P_A = 250 + 59,683 = 309,684 \text{ kW}$$

$$\text{και } P_B = 250 + 40,316 = 290,316 \text{ kW}.$$

Άσκηση 3.

Δίδονται σύγχρονες γεννήτριες A και B οι οποίες λειτουργούν παράλληλα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Γεννήτρια A: 1.500 kW, 60 Hz.

Γεννήτρια B: 650 kW, 60 Hz.

Οι δύο γεννήτριες έχουν τον ίδιο στατισμό: 0,0007 Hz/kW. Η γεννήτρια A αναλαμβάνει τα $\frac{3}{4}$ των 800 kW φορτίου του δικτύου με συχνότητα 60,1 Hz. Στη συνέχεια, συνδέεται φορτίο των 680 kW στο δίκτυο. Να υπολογίσετε:

- 1) Την συχνότητα $f_{\text{ζυγών}}$ και
- 2) το φορτίο της γεννήτριας A και B αντίστοιχα.

Λύση.

Οι γεννήτριες έχουν τον ίδιο στατισμό, οπότε αναλαμβάνουν ισόποσο φορτίο από αυτό το οποίο συνδέεται:

$$\Delta P_A = \Delta P_B = \frac{680}{2} = 340 \text{ kW}.$$

1) Από τον ορισμό του στατισμού έχουμε:

$$m = \frac{\Delta f}{\Delta P_A} \quad \text{ή} \quad 0,0007 = \frac{\Delta f}{340} \quad \text{ή} \quad \Delta f = 0,328 \text{ Hz}.$$

Η συχνότητα των ζυγών είναι:

$$f_{\text{ζυγών}} = 60,1 - 0,328 = 59,862 \text{ Hz}.$$

2) Φορτίο της Α γεννήτριας:

$$\frac{3}{4} \cdot 800 + 340 = 940 \text{ kW}.$$

Φορτίο της Β γεννήτριας:

$$\frac{1}{4} \cdot 800 + 340 = 540 \text{ kW}.$$

Άσκηση 4.

Τρεις νιζελογεννήτριες Α, Β, Γ, 60 Hz, λειτουργούν παράλληλα σ' ένα δίκτυο και μοιράζονται ισόποσα φορτίο 210 kW, 60 Hz. Οι ονομαστικές ισχύες των γεννητριών είναι 500 kW, 200 kW και 300 kW, αντίστοιχα. Η διαγραμματική παράσταση της εγκατάστασής και οι χαρακτηριστικές των ρυθμιστών ταχύτητας δίνονται στο σχήμα 2.9ιγ. Στο δίκτυο συνδέονται: ένα τριφασικό σύστημα μεικτών ανιστάσεων 440 kW, 60 Hz κι ένας τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας 200 kVA με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ..

Να υπολογίσετε:

- 1) Την συνολική ισχύ του συστήματος P_{sys} .
- 2) Την συχνότητα του συστήματος f_{sys} και
- 3) την ισχύ την οποία αναλαμβάνει κάθε γεννήτρια.

Λύση.

- 1) Η αύξηση του φορτίου στους ζυγούς, ΔP_{ζ} είναι:

$$\Delta P_{\zeta} = 440 + 0,8 \cdot 200 = 600 \text{ kW}.$$

Η ολική ισχύς του συστήματος είναι:

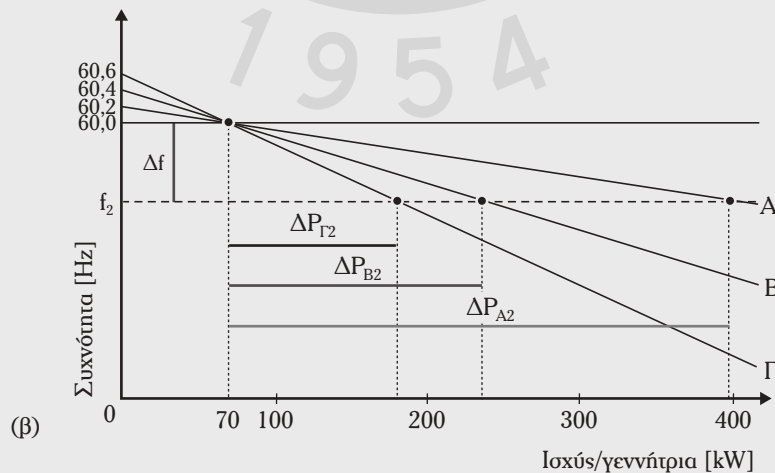
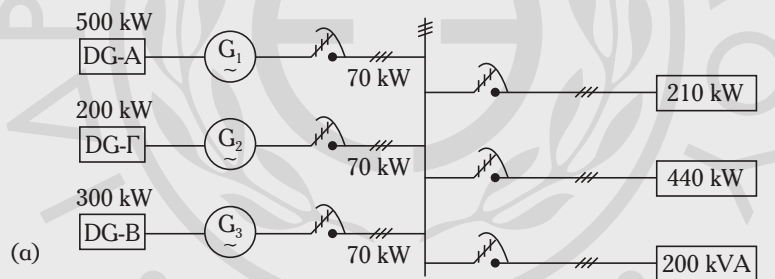
$$P_{\text{ολ}} = 210 + 600 = 810 \text{ kW}.$$

- 2) Από το σχήμα 2.9ιγ(β) οι στατισμοί είναι:

$$m_A = \frac{\Delta f_A}{\Delta P_A} = \frac{60,2 - 60}{70} = 0,002857 \text{ Hz/kW}$$

$$m_B = \frac{\Delta f_B}{\Delta P_B} = \frac{60,4 - 60}{70} = 0,005714 \text{ Hz/kW}$$

$$m_{\Gamma} = \frac{\Delta f_{\Gamma}}{\Delta P_{\Gamma}} = \frac{60,6 - 60}{75} = 0,008571 \text{ Hz/kW}.$$



Σχ. 2.9ιγ

(α) Διαγραμματική παράσταση της εγκατάστασής.

(β) Χαρακτηριστικές ρυθμιστών ταχύτητας των G_A , G_B και G_{Γ} .

Η αύξηση του φορτίου του δικτύου προκαλεί μείωση της συχνότητας στην τιμή f_2 . Η Δf είναι ίδια για όλες τις μηχανές:

$$\frac{\Delta f}{\Delta P_{A2}} = 0,002857, \quad \frac{\Delta f}{\Delta P_{B2}} = 0,005714,$$

$$\frac{\Delta f}{\Delta P_{\Gamma2}} = 0,008571$$

$$\acute{\eta} \quad \Delta P_{A2} = 350 \Delta f, \quad \Delta P_{B2} = 175 \Delta f, \\ \Delta P_{\Gamma2} = 116,666 \Delta f$$

$$\text{είναι:} \quad \Delta P_{A2} + \Delta P_{B2} + \Delta P_{\Gamma2} = 600$$

$$\acute{\eta} \quad (350 + 175 + 116,666) \Delta f = 600$$

$$\acute{\eta} \quad \Delta f = 0,9351 \text{ Hz.}$$

Η συχνότητα f_2 είναι: $f_2 = 60 - 0,9351 = 59,06 \text{ Hz}$.

3) Η ισχύς την οποία αναλαμβάνει κάθε γεννήτρια είναι:

$$P_{A2} = 70 + \Delta P_{A2} = 70 + 350 \cdot 0,9351 = 397,3 \text{ kW}$$

$$P_{B2} = 75 + \Delta P_{B2} = 70 + 175 \cdot 0,9351 = 233,6 \text{ kW}$$

$$P_{\Gamma2} = 70 + \Delta P_{\Gamma2} = 70 + 116,666 \cdot 0,9351 = 179,1 \text{ kW.}$$

Άσκηση 5.

Δύο σύγχρονες γεννήτριες A και B λειτουργούν παράλληλα και μοιράζονται ένα συνολικό φορτίο 400 kW στη συχνότητα 60 Hz. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γεννητριών είναι: 460 V, 600 kW, 60 Hz με $m = 0,020$. Η γεννήτρια A αναλαμβάνει φορτίο 200 kW και η γεννήτρια B 300 kW. Αν θεωρήσουμε ότι η γεννήτρια A βγαίνει εκτός λειτουργίας, να υπολογίσετε:

- 1) Τη συχνότητα της γεννήτριας A.
- 2) Τη συχνότητα της γεννήτριας B, και
- 3) τη συχνότητα των ζυγών f_z .

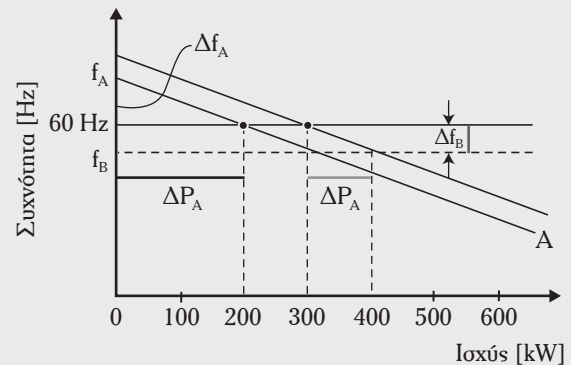
Λύση.

Οι χαρακτηριστικές f - P δίνονται στο διάγραμμα του σχήματος 2.9ιδ. Όταν η γεννήτρια A βγαίνει εκτός δικτύου η συχνότητά της αυξάνεται στην f_A . Η γεννήτρια B αναλαμβάνει όλο το φορτίο, οπότε η συχνότητα μειώνεται στην f_B .

Έχομε:

1) Γεννήτρια A:

$$\frac{m \cdot f_{ov}}{P_{ov}} = \frac{\Delta f_A}{\Delta P_A} \Rightarrow \frac{0,020 \cdot 60}{600} = \frac{\Delta f_A}{200}$$



Σχ. 2.9ιδ

$$\text{και} \quad \Delta f_A = 0,4 \text{ Hz}$$

$$\text{οπότε είναι:} \quad f_A = 60 + 0,4 = 60,4 \text{ Hz.}$$

2) Οι γεννήτριες έχουν ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά: $\Delta f_B = 0,4 \text{ Hz}$ και $f_B = 60 - 0,4 = 59,6 \text{ Hz}$.

3) Η συχνότητα των ζυγών f_z είναι η συχνότητα της γεννήτριας B: $f_z = 59,6 \text{ Hz}$.

Άσκηση 6.

Δύο τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες A και B, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, τροφοδοτούν ένα τριφασικό φορτίο συνδεσμολογημένο σε αστέρα, σύνθετης αντιστάσεως $(3 + j4) \Omega$ /φάση. Να υπολογίσετε την ανά φάση τερματική τάση, τον συντελεστή ισχύος και την ισχύ εξόδου κάθε γεννήτριας.

$$\text{Δίδεται:} \quad Z_S^{(A)} = (0,2 + j2) \Omega / \text{φάση}$$

$$Z_S^{(B)} = (0,2 + j2) \Omega / \text{φάση}$$

$$E_f^{(A)} = (200 + j0) \text{ V} / \text{φάση}$$

$$E_f^{(B)} = (220 + j0) \text{ V} / \text{φάση.}$$

Λύση.

Στο σχήμα 2.9ιε δίδεται το φασικό διάγραμμα συνδεσμολογίας των γεννητριών και του αντίστοιχου φορτίου.

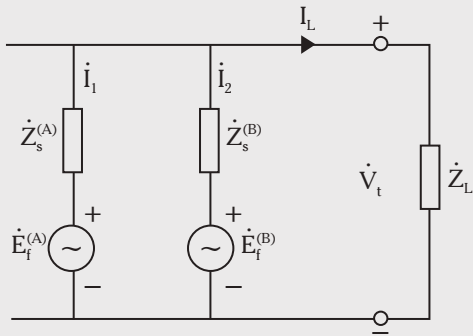
Έχομε:

$$\text{Γεννήτρια A:} \quad V_t = E_f^{(A)} - I_1 Z_S^{(A)} \quad (1)$$

$$\text{Γεννήτρια B} \quad V_t = E_f^{(B)} - I_2 Z_S^{(B)} \quad (2)$$

$$\text{Ισχύει:} \quad V_t = I_1 Z_L \quad (3)$$

$$\text{και} \quad I_L = I_1 + I_2. \quad (4)$$



Σχ. 2.9ε

Από τις εξισώσεις 1 και 2 προκύπτει:

$$I_1 = \frac{E_f^{(A)} - V_t}{Z_s^{(A)}} \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{E_f^{(B)} - V_t}{Z_s^{(B)}} \quad (6)$$

Προσθέτοντας κατά μέλη τις εξισώσεις 5 και 6 έχουμε:

$$I_1 + I_2 = \frac{E_f^{(A)} - V_t}{Z_s^{(A)}} + \frac{E_f^{(B)} - V_t}{Z_s^{(B)}} \quad (7)$$

Είναι:

$$I_1 + I_2 = \frac{V_t}{Z_L} \quad (8)$$

Η εξίσωση 7 με βάση την εξίσωση 8 γίνεται:

$$\frac{V_t}{Z_L} = \frac{E_f^{(A)} - V_t}{Z_s^{(A)}} + \frac{E_f^{(B)} - V_t}{Z_s^{(B)}}$$

$$\hat{n} \quad V_t \left(\frac{1}{Z_s^{(A)}} + \frac{1}{Z_s^{(B)}} + \frac{1}{Z_L} \right) = \frac{E_f^{(A)}}{Z_s^{(A)}} + \frac{E_f^{(B)}}{Z_s^{(B)}}$$

$$\hat{n} \quad V_t = \frac{\frac{E_f^{(A)}}{Z_s^{(A)}} + \frac{E_f^{(B)}}{Z_s^{(B)}}}{\frac{1}{Z_s^{(A)}} + \frac{1}{Z_s^{(B)}} + \frac{1}{Z_L}} \quad (9)$$

Γεννήτρια A: $V_t = (200 + j0) - I_1(0,2 + j2)$ V (10)

Γεννήτρια B: $V_t = (220 + j0) - I_2(0,2 + j2)$ V (11)

και $V_t = I_L Z_L = (I_1 + I_2)(3 + j4)$. (12)

Προσθέτοντας τις εξισώσεις 10 και 11 έχουμε:

$$2V_t = (420 + j0) - (I_1 + I_2)(0,2 + j2)$$

$$\hat{n} \quad V_t = (210 + j0) - (I_1 + I_2)(0,1 + j1) \quad (13)$$

Πολλαπλασιάζουμε και τα δύο μέρη των εξισώσεων 12 με $(0,1 + j1)$ και την εξίσωση 13 με $(3 + j4)$, οπότε έχουμε:

$$(0,1 + j)V_t = (I_1 + I_2)(3 + j4)(0,1 + j) \quad (14)$$

$$(3 + j4)V_t = 210(3 + j4) -$$

$$-(I_1 + I_2)(3 + j4)(0,1 + j). \quad (15)$$

Προσθέτουμε τις εξισώσεις 14 και 15:

$$(3,1 + j5)V_t = 630 + j840$$

και υπολογίζουμε τα ρεύματα I_1 και I_2 :

$$I_1 = \frac{E_f^{(A)} - V_t}{Z_s^{(A)}} = \frac{(200 + j0) - (177,7 - j15,75)}{(0,2 + j2)}$$

$$= 8,9 - j10,26 = 13,58 \angle -49,06^\circ \text{ A.}$$

Υπολογισμός του συντελεστή ισχύος της γεννήτριας A:

$$V_t = \frac{630 + j840}{3,1 + j5} = 177,7 - j15,75 =$$

$$= 178,9 \angle -5,06^\circ \text{ V}$$

$$I_2 = \frac{E_f^{(B)} - V_t}{Z_s^{(B)}} = \frac{(220 + j0) - 177,7 - j15,75}{(0,2 + j2)} =$$

$$= 9,89 - j20,16 = 22,455 \angle -63,86^\circ \text{ A}$$

$$\text{Σ.Ι.} = \text{συν}\varphi_1 = \text{συν}[-49,06^\circ - (-5,06^\circ)] =$$

$$= 0,7193 \text{ επαγ.}$$

Υπολογισμός του συντελεστή ισχύος της γεννήτριας B:

$$\text{Σ.Ι.} = \text{συν}\varphi_2 = \text{συν}[-63,86^\circ - (-5,06^\circ)] =$$

$$= \text{συν}(-58,8^\circ) = 0,518 \text{ επαγ.}$$

Ισχύς εξόδου μιας φάσεως της γεννήτριας A:

$$P_{\text{out}}^{(A)} = V_t I_1 \text{συν}\varphi_1 = 178,9 \cdot 13,58 \cdot 0,7193 =$$

$$= 1.747,51 \text{ W/φάση.}$$

Ισχύς εξόδου της μιας φάσεως της γεννήτριας B:

$$P_{\text{out}}^{(B)} = V_t I_2 \text{συν}\varphi_2 = 178,9 \cdot 22,455 \cdot 0,518 =$$

$$= 2.080,90 \text{ W/φάση.}$$

Άσκηση 7.

Δύο σύγχρονες Α και Β γεννήτριες, 960 kW η κάθε μία, λειτουργούν παράλληλα. Η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας Α μεταβάλλεται από 103% στη λειτουργία χωρίς φορτίο στο 100% στην λειτουργία με πλήρες φορτίο, ενώ της γεννήτριας Β από 104% στη λειτουργία χωρίς φορτίο στο 100% στο πλήρες φορτίο. Οι γεννήτριες τροφοδοτούν φορτίο 1.500 kW. Με πόση ισχύ τροφοδοτεί η κάθε μηχανή αυτό το φορτίο;

Λύση.

Οι χαρακτηριστικές ταχύτητας-ισχύος, οπότε f-P των γεννητριών Α και Β δίνονται στο σχήμα 2.9ιστ.

Ισχύς γεννήτριας Α

$$\overline{EK} = \overline{ZO} \cdot \frac{\overline{K\Gamma}}{\overline{O\Gamma}} = 960 \cdot \frac{3 - \overline{OK}}{103 - 100} = 320(3 - \overline{OK}).$$

Ισχύς γεννήτριας Β:

$$\overline{K\Theta} = \overline{HO} \cdot \frac{\overline{K\Delta}}{\overline{O\Delta}} = \frac{960}{4} \cdot (4 - \overline{OK}).$$

Οι γεννήτριες τροφοδοτούν φορτίο 1.500 kW.

$$\overline{EK} + \overline{K\Theta} = \overline{E\Theta}$$

$$\text{ή } 320 \cdot (3 - \overline{OK}) + \frac{960}{4} \cdot (4 - \overline{OK}) = 1.500$$

$$\text{ή } 360 \cdot (3 - \overline{OK}) + 240 \cdot (4 - \overline{OK}) = 1.500$$

$$\overline{OK} = 0,75.$$

Οπότε η γεννήτρια Α παρέχει ισχύ στο φορτίο: $320 \cdot (3 - 0,75) = 720 \text{ kW}$.

Η γεννήτρια Β παρέχει ισχύ:

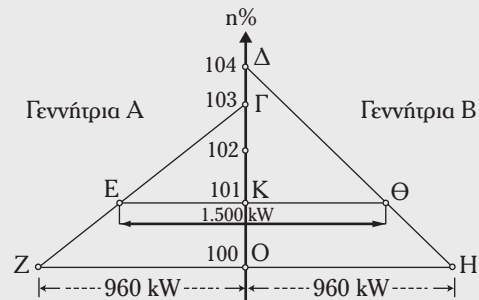
$$\frac{960}{4} \cdot (4 - 0,75) = 780 \text{ kW}.$$

Άσκηση 8.

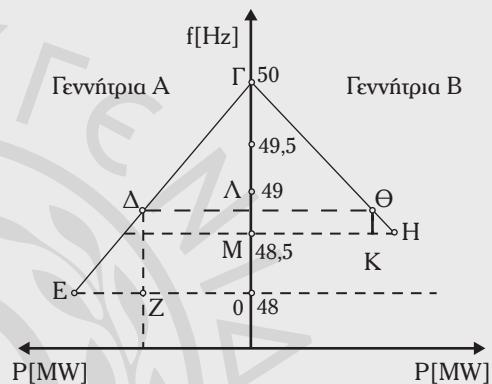
Δύο όμοιες στροβιλογεννήτριες Α και Β ονομαστικής ισχύος 20 MW η κάθε μία, λειτουργούν παράλληλα. Οι χαρακτηριστικές f-P των γεννητριών δίνονται στο σχήμα 2.9ιζ.

Γεννήτρια Α: Η συχνότητα στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι 50 Hz, ενώ στο πλήρες φορτίο είναι 48 Hz.

Γεννήτρια Β: Η συχνότητα στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι 50 Hz, ενώ στο πλήρες φορτίο είναι 48,5 Hz.

**Σχ. 2.9ιστ**

Μεταβολή της ταχύτητας επί τοις εκατό προς την ταχύτητα πλήρους φορτίου των γεννητριών Α και Β.

**Σχ. 2.9ιζ**

Χαρακτηριστικές f-P των γεννητριών Α και Β.

Οι γεννήτριες τροφοδοτούν φορτίο 30.000 kW. Πόση ισχύ παράγει η κάθε γεννήτρια;

Λύση.**Α' Τρόπος.**

Η ευθεία ΓΕ και η ευθεία ΓΗ εκφράζουν τις χαρακτηριστικές f-P των γεννητριών Α και Β αντίστοιχα. Εφόσον οι γεννήτριες λειτουργούν παράλληλα, η συχνότητα των φάσεων και ρευμάτων τους πρέπει να είναι ίση. Η ευθεία ΔΘ μέσω του σημείου Λ αντιπροσωπεύει φορτίο 30.000 kW. Η ισχύς που παράγει η γεννήτρια Α είναι:

$$\begin{aligned} \overline{\Lambda\Delta} &= \overline{OE} - \overline{EZ} = 20 - \frac{\overline{\Delta Z}}{\overline{O\Gamma}} \cdot \overline{OE} = \\ &= 20 - \frac{\overline{O\Lambda}}{50 - 48} \cdot 20 = 20 - 10 \cdot \overline{O\Lambda}. \end{aligned}$$

Η ισχύς της γεννήτριας Β είναι:

$$\begin{aligned} \overline{\Lambda\Theta} &= \overline{MH} - \overline{HK} = 20 \cdot \frac{\overline{\Theta K}}{\overline{\Gamma M}} \cdot \overline{HM} = \\ &= 20 - \frac{\overline{O\Lambda} - 0,5}{50 - 48,5} \cdot 20 = 20 - \frac{20}{1,5} \cdot (\overline{O\Lambda} - 0,5). \end{aligned}$$

Οι γεννήτριες τροφοδοτούν συνολικό φορτίο:

$$20 - 10 \cdot \overline{OL} + 20 - \frac{20}{1,5} \cdot (\overline{OL} - 0,5) = 30$$

$$\text{ή} \quad 40 - \frac{7}{3} \cdot \overline{OL} + \frac{20}{3} = 30$$

$$\text{ή} \quad \overline{OL} = \frac{5}{7}.$$

Η γεννήτρια A παράγει ισχύ:

$$20 - 10 \cdot \frac{5}{7} = 12,8572 \text{ MW}.$$

Η γεννήτρια B παράγει ισχύ:

$$20 - \frac{20}{1,5} \cdot \left(\frac{5}{7} - 0,5 \right) = 17,1428 \text{ MW}.$$

B' Τρόπος.

Οι σχέσεις μεταξύ ισχύος και συχνοτήτων για τις γεννήτριες δίνονται ως εξής:

$$\text{Για τη γεννήτρια A: } P_A = m_A \cdot (f_{x,\phi}^{(A)} - f_{n,\phi}^{(A)}).$$

$$\text{Για τη γεννήτρια B: } P_B = m_B \cdot (f_{x,\phi}^{(B)} - f_{n,\phi}^{(B)}).$$

Οι γεννήτριες λειτουργούν παράλληλα, οπότε $P_A = P_B$.

Οι κλίσεις των χαρακτηριστικών f - P των γεννητριών είναι:

$$m_A = \frac{P_A}{f_{x,\phi}^{(A)} - f_{n,\phi}^{(A)}} = \frac{20 \text{ MW}}{2 \text{ Hz}}$$

$$m_B = \frac{P_B}{f_{x,\phi}^{(B)} - f_{n,\phi}^{(B)}} = \frac{20 \text{ MW}}{1,5 \text{ Hz}}.$$

Οι γεννήτριες A και B τροφοδοτούν φορτίο 30 MW. Η συχνότητα f του συστήματος δίδεται:

$$\text{Για τη γεννήτρια A: } P_A = m_A \cdot (f_{x,\phi}^{(A)} - f).$$

$$\text{Για τη γεννήτρια B: } P_B = m_B \cdot (f_{x,\phi}^{(B)} - f).$$

Οι γεννήτριες τροφοδοτούν φορτίο 30 MW, οπότε έχουμε:

$$\begin{aligned} P_{\text{ολ}} = P_A + P_B &= m_A \cdot (f_{x,\phi}^{(A)} - f) + m_B \cdot (f_{x,\phi}^{(B)} - f) = \\ &= \frac{20 \text{ MW}}{2 \text{ Hz}} (50 - f) + \frac{20 \text{ MW}}{1,5 \text{ Hz}} (50 - f) = 30 \text{ MW}. \end{aligned}$$

$$\text{Είναι} \quad f = 48,71 \text{ Hz}.$$

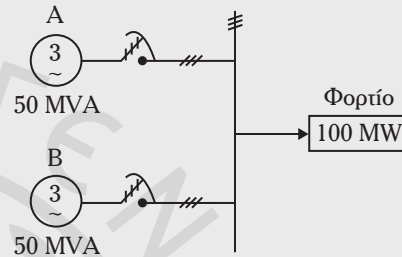
Η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια A είναι:

$$\begin{aligned} P_A &= m_A \cdot (f_{x,\phi}^{(A)} - f) = \\ &= \frac{20 \text{ MW}}{2 \text{ Hz}} (50 - 48,71) = 12,8572 \text{ MW}. \end{aligned}$$

Η ισχύς την οποία παρέχει η γεννήτρια B είναι: 17,1428 MW.

Άσκηση 9.

Στο σχήμα 2.9in δίνονται οι σύγχρονες γεννήτριες A και B οι οποίες λειτουργούν παράλληλα.



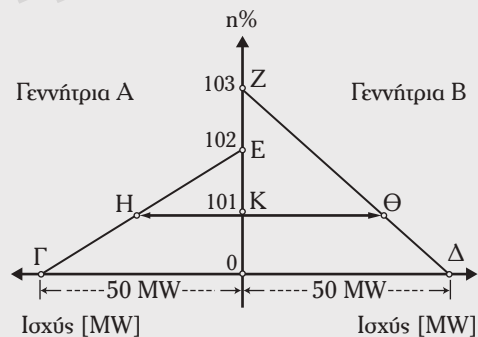
Σχ. 2.9in

Οι γεννήτριες A και B σε παράλληλη λειτουργία.

Η πώση ταχύτητας των κινητηρίων μηχανών των γεννητριών A και B από τη λειτουργία πλήρους φορτίου στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι 2% και 3% αντίστοιχα. Κάθε γεννήτρια είναι πλήρως φορτισμένη όταν συνδέεται φορτίο 100 MW. Πόση ισχύς παρέχει κάθε γεννήτρια όταν συνδεθεί φορτίο 60 MW;

Λύση.

Στο σχήμα 2.9iθ δίνονται οι χαρακτηριστικές ταχύτητας-ισχύος των γεννητριών A και B. Όταν



Σχ. 2.9iθ

Χαρακτηριστικές ταχύτητας-ισχύος των γεννητριών A και B.

οι γεννήτριες λειτουργούν παράλληλα έχουν την ίδια ταχύτητα περιστροφής και οι συχνότητες είναι ίσες.

Χαράσσομε την ευθεία φορτίου ΗΘ όταν το συνολικό φορτίο, στο οποίο πρέπει να τροφοδοτήσουν οι γεννήτριες είναι 60 MW.

Η γεννήτρια Α παρέχει ισχύ:

$$\begin{aligned} HK &= OG \cdot \frac{EK}{OE} = 50 \cdot \frac{(OE - OK)}{OE} = \\ &= 25(2 - OK). \end{aligned}$$

Η γεννήτρια Β παρέχει ισχύ:

$$\begin{aligned} K\Theta &= \Delta O \cdot \frac{ZK}{OZ} = 50 \cdot \frac{(3 - OK)}{3} = \\ &= \frac{50}{3} \cdot (3 - OK). \end{aligned}$$

Είναι: $HK + K\Theta = 60 \text{ MW}$.

Οπότε έχουμε: $25 \cdot (2 - OK) + \frac{50}{3} \cdot (3 - OE) = 60$.

και $OK = \frac{40}{\frac{P5}{3}} = 0,96$.

Η γεννήτρια Α παρέχει ισχύ:

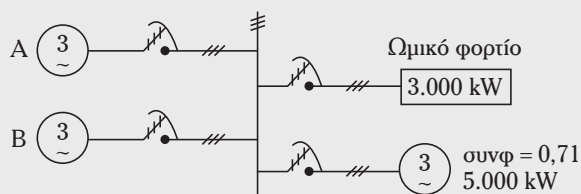
$$25 \cdot (2 - 0,96) = 26 \text{ MW}.$$

Η γεννήτρια Β παρέχει ισχύ:

$$\frac{50}{3} \cdot (3 - 0,96) = 34 \text{ MW}.$$

Άσκηση 10.

Δύο σύγχρονες γεννήτριες Α και Β λειτουργούν παράλληλα και τροφοδοτούν ωμικό φορτίο 3.000 kW και κινητήρα 5.000 kW με συντελεστή ισχύος 0,71 επαγ. (σχ. 2.9κ). Η γεννήτρια Α φορτίζεται με φορτίο πάνω από 5.000 kW και συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ.. Ποια είναι η ισχύς την



Σχ. 2.9κ

οποία παρέχει η γεννήτρια Β και ο αντίστοιχος συντελεστής ισχύος;

Λύση.

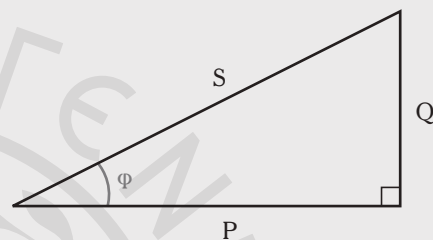
Φασική γωνία του ωμικού φορτίου φ_R :

$$\varphi_R = \arccos \cos^{-1} 1 \cdot 0 = 0^\circ.$$

Φασική γωνία του κινητήρα φ_M :

$$\varphi_M = \arccos \cos^{-1} 0,71 = 44,76^\circ.$$

Από το τρίγωνο των ισχύων (βλ. σχ. 2.9κα). Άεργος ισχύς του ωμικού φορτίου: 0 kVAR.



Σχ. 2.9κα

Άεργος ισχύς του κινητήρα:

$$5.000 \cdot \sin 44,76^\circ = 4.958 \text{ kW}.$$

Συνολική άεργος ισχύς:

$$0 + 4.958 = 4.958 \text{ kVAR}.$$

Συνολική πραγματική ισχύς:

$$3.000 + 5.000 = 8.000 \text{ kW}.$$

Η γεννήτρια Α παρέχει ισχύ 5.000 kW, ενώ η άεργος ισχύς της είναι:

$$5.000 \cdot \sin \arccos(0,8) = 5.000 \cdot 0,75 = 3.750 \text{ kVAR}.$$

Η γεννήτρια Β παρέχει ισχύ:

$$8.000 - 5.000 = 3.000 \text{ kW}.$$

Η άεργος ισχύς της γεννήτριας Β είναι:

$$4.958 - 3.750 = 1.208 \text{ kVAR}.$$

Για την γεννήτρια Β έχουμε:

$$\varphi_B = \arccos \frac{\text{kVAR}}{\text{kW}} = \arccos \frac{1.208}{3.000} = 21,9^\circ.$$

Ο συντελεστής ισχύος της γεννήτριας Β είναι:

$$\cos \varphi_B = \cos 21,9^\circ = 0,928 \text{ επαγ.}.$$

Άσκηση 11.

Δύο σύγχρονες γεννήτριες A και B, 2.000 kVA λειτουργούν παράλληλα. Η συχνότητα της γεννήτριας A στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι 50 Hz, ενώ στη λειτουργία στο πλήρες φορτίο είναι 48 Hz. Η συχνότητα της γεννήτριας B στη λειτουργία στο πλήρες φορτίο είναι 47,5 Hz. Πόση ισχύ προσφέρει κάθε γεννήτρια σε ένα φορτίο 3.000 kW;

Λύση.

Στο σχήμα 2.9κβ δίνονται οι χαρακτηριστικές f-P των γεννητριών A και B.

$$\text{Ισχύει: } P^{(A)} + P^{(B)} = P_L.$$

Η ισχύς $P^{(A)}$ της γεννήτριας A συνδέεται με την κλίση της χαρακτηριστικής f-P της ως εξής:

$$P^{(A)} = m_A \cdot (f_{x.φ.}^{(A)} - f) \quad (1)$$

όπου: m_A , είναι η κλίση της χαρακτηριστικής f-P της γεννήτριας A και f , η συχνότητα του συστήματος.

Αντίστοιχα η ισχύς $P^{(B)}$ της γεννήτριας B είναι:

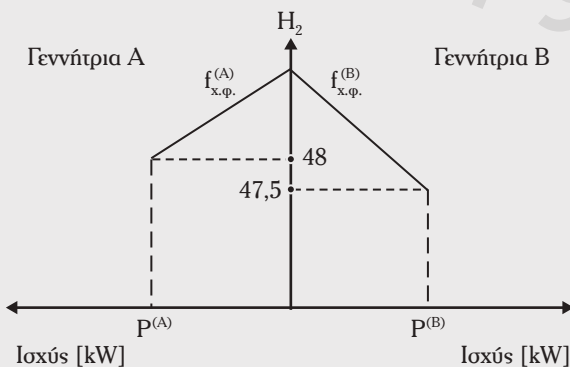
$$P^{(B)} = m_B \cdot (f_{x.φ.}^{(B)} - f). \quad (2)$$

Προσθέτουμε τις εξισώσεις 1 και 2:

$$P^{(A)} + P^{(B)} = m_A \cdot (f_{x.φ.}^{(A)} - f) + m_B \cdot (f_{x.φ.}^{(B)} - f). \quad (3)$$

$$\text{Είναι: } 3.000 = m_A \cdot (50 - f) + m_B \cdot (50 - f).$$

$$\text{Ισχύει: } P^{(A)} = m_A \cdot (f_{x.φ.}^{(A)} - f_{n.φ.}^{(B)})$$



Σχ. 2.9κβ
Χαρακτηριστικές f-P
των γεννητριών A και B.

όπου $f_{x.φ.}^{(A)}$, είναι η συχνότητα της γεννήτριας A στη λειτουργία χωρίς φορτίο:

$$2.000 = P^{(A)} = m_A \cdot (50 - 48) \quad \text{και} \quad m_A = \frac{2.000}{2}. \quad (4)$$

Ενώ για τη γεννήτρια B έχουμε:

$$P^{(B)} = m_B \cdot (f_{x.φ.}^{(B)} - f_{n.φ.}^{(B)})$$

$$2.000 = P^{(B)} = m_B \cdot (50 - 4,7)$$

$$\text{ή} \quad m_B = \frac{2.000}{2,5}. \quad (5)$$

Η εξίσωση 3 με βάση τις εξισώσεις 4 και 5 γίνεται: $3.000 = 1.000 \cdot (50 - f) + 800 \cdot (50 - f)$.

$$\text{Οπότε: } f = 48,33 \text{ Hz.}$$

Η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια A είναι:

$$P^{(A)} = m_A \cdot (f_{x.φ.}^{(A)} - f_{n.φ.}^{(A)}) = 1.670 \text{ kW}$$

και η γεννήτρια B:

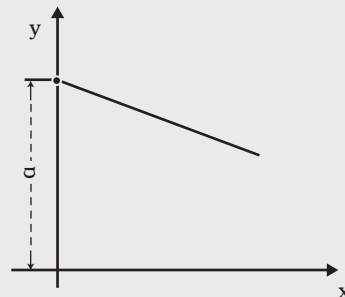
$$P^{(B)} = m_B \cdot (f_{x.φ.}^{(B)} - f_{n.φ.}^{(B)}) = 133,0 \text{ kW.}$$

Άσκηση 12.

Δύο σύγχρονες γεννήτριες A και B λειτουργούν παράλληλα στη συχνότητα των 50 Hz και παρέχουν 16 MW και 22 MW αντίστοιχα. Οι ταχύτητες περιστροφής τους στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι 3.030 ΣΑΛ και 3.020 ΣΑΛ αντίστοιχα. Να υπολογίσετε την συχνότητα των γεννητριών και το φορτίο της κάθε μίας αν το συνολικό φορτίο το οποίο τροφοδοτούν είναι 25 MW.

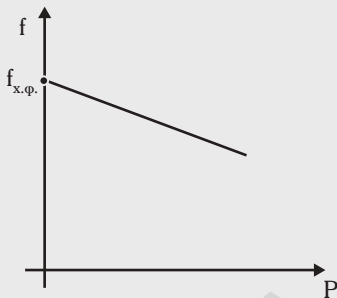
Λύση.

Γενικά, η σχέση f-P δίδεται από μια ευθεία γραμμή με αρνητική κλίση (σχ. 2.9κγ):



Σχ. 2.9κγ

Στο γράφημα απεικονίζεται η γραφική παράσταση της συναρτήσεως $y = a - \beta x$. Αν στον κάθετο άξονα αντιστοιχίσουμε την συχνότητα, στον οριζόντιο την ισχύ, τότε στο a αντιστοιχίζεται η συχνότητα χωρίς φορτίο ($f_{x,\varphi}$) και η κλίση m στο β . Οπότε προκύπτει το γράφημα του σχήματος 2.9κδ.



Σχ. 2.9κδ

Ισχύει: $f = f_{x,\varphi} - mP$

Γεννήτρια A: $f_{x,\varphi}^{(A)} = \frac{n_s^{(A)} \cdot P}{120}$ (1)

Γεννήτρια B: $f_{x,\varphi}^{(B)} = \frac{n_s^{(B)} \cdot P}{120}$ (2)

Οι ταχύτητες των γεννητριών είναι κοντά στις 3.000 ΣΑΛ. Πρόκειται για γεννήτριες με αριθμό πόλων ίσο με 2.

Οι εξισώσεις 1 και 2 γίνονται:

$$f_{x,\varphi}^{(A)} = \frac{3.030 \cdot 2}{120} = 50,50 \text{ Hz}$$

$$f_{x,\varphi}^{(B)} = \frac{3.020 \cdot 2}{120} = 50,33 \text{ Hz}.$$

Είναι:

Γεννήτρια A: $f^{(A)} = f_{x,\varphi}^{(A)} - m^{(A)} \cdot P^{(A)}$ (3)

Γεννήτρια B: $f^{(B)} = f_{x,\varphi}^{(B)} - m^{(B)} \cdot P^{(B)}$ (4)

Όταν οι γεννήτριες παραλληλίζονται ισχύει:

$$f^{(A)} = f^{(B)} = 50 \text{ Hz}.$$

Οι εξισώσεις 3 και 4 γίνονται:

$$50 = 50,5 - m^{(A)} \cdot 16m^{(A)} = \frac{0,5}{16} \quad (5)$$

$$50 = 50,33 - m^{(B)} \cdot 22m^{(B)} = \frac{0,33}{22}. \quad (6)$$

Από τις εξισώσεις 5 και 6 έχουμε:

$$50,5 - \frac{0,5}{16} \cdot P^{(A)} = 50,33 - \frac{0,33}{22} \cdot P^{(B)} \quad (7)$$

όπου P_A και P_B , οι ισχύες που παρέχουν οι γεννήτριες A και B στο φορτίο 25 MW.

Ισχύει: $P_A + P_B = 25$. (8)

Απ' το σύστημα των εξισώσεων 7 και 8 έχουμε:

$$P_A = 11,78 \text{ MW} \text{ και } P_B = 13,22 \text{ MW}$$

είναι οι ισχύες τις οποίες παρέχουν οι γεννήτριες στο φορτίο των 25 MW.

Η συχνότητα των γεννητριών είναι:

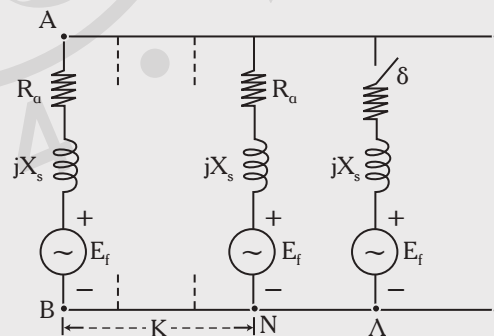
$$f^{(A)} = f^{(B)} = 50,5 - \frac{0,5}{16} \cdot 11,78 = 50,13 \text{ Hz}.$$

Άσκηση 13.

Έστω K όμοιες σύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα σε δίκτυο δεδομένης τάσεως λειτουργίας. Επιθυμούμε να παραλληλίσουμε μια γεννήτρια στο ίδιο δίκτυο τάσεως. Κλείνομε τον διακόπτη συγχρονισμού της γεννήτριας όταν διαφορά φάσεων των τάσεων είναι 180° . Τι θα συμβεί στο ηλεκτρικό σύστημα;

Λύση.

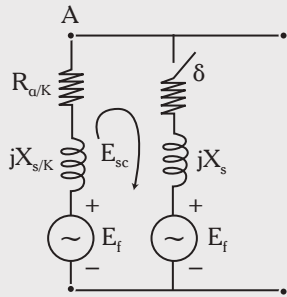
Το κυκλωματικό διάγραμμα της συνδεσμολογίας απεικονίζεται στο σχήμα 2.9κε.



Σχ. 2.9κε

Έστω ότι παραλληλίζουμε την γεννήτρια $K\Lambda$ όταν η διαφορά φάσεων των τάσεων είναι 180° . Εφαρμόζοντας το Θεώρημα Millman για τις K γεννήτριες έχουμε το ακόλουθο ισοδύναμο κύκλωμα (σχ. 2.9κστ):

Όταν κλείσουμε τον διακόπτη δ , τότε θα κυκλο-



Σχ. 2.9κστ

φορτίσει ισχυρό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{sc} , στο ηλεκτρικό σύστημα:

$$I_{sc} = \frac{E_f + E_f}{R_a \left(1 + \frac{1}{K}\right) + jX_s \left(1 + \frac{1}{K}\right)}$$

και

$$|I_{sc}| = \frac{2|E_f|}{\left(1 + \frac{1}{K}\right) \sqrt{R_a^2 + X_s^2}}$$

Ο λόγος $\frac{|E_f|}{\sqrt{R_a^2 + X_s^2}}$ είναι το ρεύμα βραχυκυκλώσεως που διαρρέει το τύλιγμα κάθε φάσεως, σε ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα, των γεννητριών.

Άσκηση 14.

Τρεις όμοιες γεννήτριες A, B και Γ λειτουργούν παράλληλα και τροφοδοτούν φορτίο 8 MW. Τα χαρακτηριστικά f-P και n-f των γεννητριών δίνονται στο σχήμα 2.9κζ.

Να υπολογίσετε την συχνότητα του f, του συστήματος και την ισχύ που παρέχει κάθε γεννήτρια στο φορτίο.

Λύση.

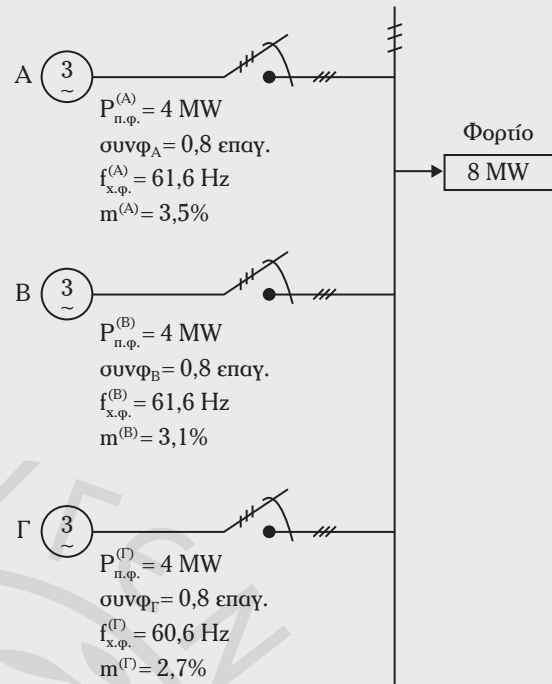
Για κάθε γεννήτρια είναι:

$$m = \frac{n_{x.φ.} - n_{n.φ.}}{n_{n.φ.}} \cdot 100\% = \frac{f_{x.φ.} - f_{n.φ.}}{f_{n.φ.}} \cdot 100\%.$$

Η συχνότητα πλήρους φορτίου $f_{n.φ.}$ είναι:

$$f_{n.φ.} = \frac{f_{x.φ.}}{m/100 + 1}$$

Οι συντελεστές πλήρους φορτίου των γεννη-



Σχ. 2.9κζ

τριών A, B και Γ είναι:

$$f_{x.φ.}^{(A)} = 61,6 \text{ Hz} \quad m^{(A)} = 3,5\%$$

$$f_{n.φ.}^{(A)} = \frac{f_{x.φ.}^{(A)}}{\frac{m^{(A)}}{100} + 1} = \frac{61,6}{\frac{3,5}{100} + 1} = 59,03 \text{ Hz}$$

$$f_{n.φ.}^{(B)} = \frac{f_{x.φ.}^{(B)}}{\frac{m^{(B)}}{100} + 1} = \frac{61,6}{\frac{3,1}{100} + 1} = 59,75 \text{ Hz}$$

$$f_{n.φ.}^{(\Gamma)} = \frac{f_{x.φ.}^{(\Gamma)}}{\frac{m^{(\Gamma)}}{100} + 1} = \frac{60,6}{\frac{2,7}{100} + 1} = 59,0 \text{ Hz}.$$

Οι κλίσεις των χαρακτηριστικών f-P των γεννητριών A, B και Γ είναι:

$$m^{(A)} = \frac{P_A}{f_{x.φ.}^{(A)} - f_{n.φ.}^{(A)}} = \frac{4}{61,6 - 59,03} = \frac{4}{2,57} \text{ Hz}$$

$$m^{(B)} = \frac{P_B}{f_{x.φ.}^{(B)} - f_{n.φ.}^{(B)}} = \frac{4}{61,6 - 59,75} = \frac{4}{1,85} \text{ Hz}$$

$$m^{(\Gamma)} = \frac{P_\Gamma}{f_{x.φ.}^{(\Gamma)} - f_{n.φ.}^{(\Gamma)}} = \frac{4}{60,6 - 59} = \frac{4}{1,6} \text{ Hz}.$$

Το συνολικό φορτίο P_L που τροφοδοτούν οι γεννήτριες A, B, και Γ είναι:

$$P_L = m^{(A)} \cdot (f_{x.\phi.}^{(A)} - f) + m^{(B)} \cdot (f_{x.\phi.}^{(B)} - f) + m^{(Γ)} \cdot (f_{x.\phi.}^{(Γ)} - f)$$

όπου f η συχνότητα του συστήματος των γεννητριών σε παράλληλη λειτουργία.

$$8 = 1,93 \cdot (61,6 - f) + 2,16 \cdot (61,6 - f) + 2,5 \cdot (60,6 - f) \quad \acute{\eta}$$

$$8 = 118,88 - 1,93f + 133,07 - 2,16f + 151,5 - 2,5f$$

$$\acute{\eta} \quad 395,45 = 6,59f$$

$$\acute{\eta} \quad f = 60 \text{ Hz.}$$

Η ισχύς την οποία παρέχουν οι γεννήτριες A, B και Γ στο φορτίο υπολογίζεται ως εξής:

Γεννήτρια A:

$$P_A = m^{(A)} \cdot (f_{x.\phi.}^{(A)} - f) = 1,93 \cdot (61,6 - 60) = 3,1 \text{ MW.}$$

Γεννήτρια B:

$$P_B = m^{(B)} \cdot (f_{x.\phi.}^{(B)} - f) = 2,16 \cdot (61,6 - 60) = 3,4 \text{ MW.}$$

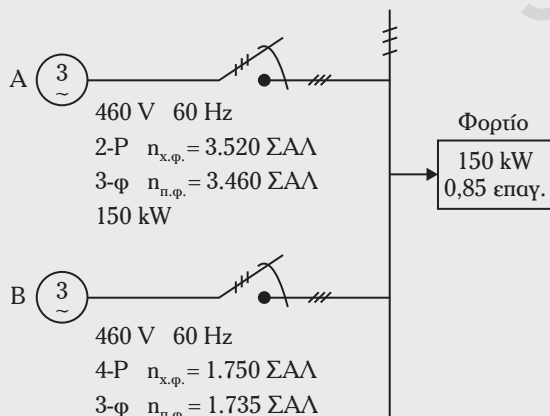
Γεννήτρια Γ:

$$P_\Gamma = m^{(Γ)} \cdot (f_{x.\phi.}^{(Γ)} - f) = 2,5 \cdot (60,6 - 60) = 1,5 \text{ MW.}$$

Η κατανομή φορτίου μεταξύ των γεννητριών δεν υπερβαίνει τα όρια φορτίσεως κάθε γεννήτριας.

Άσκηση 15.

Ένα σύστημα δύο συγχρόνων γεννητριών A και B λειτουργούν παράλληλα και τροφοδοτούν φορτίο 150 kW με συντελεστή ισχύος 0,85 επαγ.. Τα χαρακτηριστικά των γεννητριών δίδονται στο ακόλουθο διάγραμμα συνδεσμολογίας τους (σx. 2.9κx).



Σx. 2.9κx

Να υπολογίσετε:

1) Τις κλίσεις των χαρακτηριστικών f - P των γεννητριών A και B.

2) Την κοινή συχνότητα f λειτουργίας του συστήματος και

3) την ισχύ που παρέχει κάθε γεννήτρια στο φορτίο.

Λύση.

Υπολογίζουμε τη συχνότητα χωρίς φορτίο $f_{x.\phi.}^{(A)}$, τη συχνότητα στο πλήρες φορτίο, $f_{n.\phi.}$ και των $m^{(A)}$ και $m^{(B)}$ αντιστοίχων γεννητριών.

Γεννήτρια A	
$\therefore f_{x.\phi.}^{(A)} = \frac{n_{x.\phi.}^{(A)} P}{1.200} = \frac{3.520 \cdot 2}{120} = 58,66 \text{ Hz}$	
$\therefore f_{n.\phi.}^{(A)} = \frac{n_{n.\phi.}^{(A)} P}{120} = \frac{3.460 \cdot 2}{120} = 57,66 \text{ Hz}$	
$\therefore m^{(A)} = \frac{n_{x.\phi.}^{(A)} - n_{n.\phi.}^{(A)}}{m_{n.\phi.}^{(A)}} \cdot 100 = \frac{3.520 - 3.460}{3.460} \cdot 100 = 1,73\%$	
Γεννήτρια B	
$\therefore f_{x.\phi.}^{(B)} = \frac{n_{x.\phi.}^{(B)} P}{120} = \frac{1.750 \cdot 4}{120} = 58,33 \text{ Hz}$	
$\therefore f_{n.\phi.}^{(B)} = \frac{n_{n.\phi.}^{(B)} P}{120} = \frac{1.735 \cdot 4}{120} = 57,83 \text{ Hz}$	
$\therefore m^{(B)} = \frac{n_{x.\phi.}^{(B)} - n_{n.\phi.}^{(B)}}{n_{n.\phi.}^{(B)}} \cdot 100 = \frac{1.750 - 1.735}{1.735} \cdot 100 = 0,86\%$	

Η ισχύς την οποία παρέχει η γεννήτρια A δίδεται ως εξής:

$$P_A = m^{(A)} \cdot (f_{x.\phi.}^{(A)} - f)$$

και η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια B είναι:

$$P_B = m^{(B)} \cdot (f_{x.\varphi}^{(B)} - f) \text{ αντίστοιχα}$$

όπου f η συχνότητα του συστήματος.

1) Οι κλίσεις των χαρακτηριστικών f - P των γεννητριών Α και Β είναι:

Γεννήτρια Α:

$$m^{(A)} = \frac{P_A}{f_{x.\varphi}^{(A)} - f_{n.\varphi}^{(A)}} = \frac{150}{58,66 - 57,66} = 1 \frac{\text{kW}}{\text{Hz}}.$$

Γεννήτρια Β:

$$m^{(B)} = \frac{P_B}{f_{x.\varphi}^{(B)} - f_{n.\varphi}^{(B)}} = \frac{125}{58,33 - 57,83} = 250 \frac{\text{kW}}{\text{Hz}}.$$

2) Οι γεννήτριες τροφοδοτούν ένα συνολικό φορτίο P_L 150 kW, οπότε έχουμε:

$$P_A + P_B = P_L$$

$$\text{ή } m^{(A)} \cdot (f_{x.\varphi}^{(A)} - f) + m^{(B)} \cdot (f_{x.\varphi}^{(B)} - f) = 150$$

$$\text{ή } 1 \cdot (58,66 - f) + 250 \cdot (58,33 - f) = 150$$

$$\text{ή } f = 57,33 \text{ Hz.}$$

3) Η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια Α είναι:

$$P_A = m^{(A)} \cdot (f_{x.\varphi}^{(A)} - f) = 1 \cdot (58,66 - 57,33) = 0,93 \text{ kW.}$$

Η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια Β είναι:

$$P_B = m^{(B)} \cdot (f_{x.\varphi}^{(B)} - f) = 250 \cdot (58,33 - 57,33) = 250 \text{ kW.}$$

Άσκηση 16.

Σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου τρεις στροβιλογεννήτριες Α, Β και Γ 10 MW ισχύος η κάθε μία λειτουργούν παράλληλα για να καλύψουν τις απαιτήσεις ηλεκτρικού φορτίου, όταν το πλοίο είναι εν πλω. Στο σχήμα 2.9κθ δίδεται η διαγραμματική παράσταση των τριών γεννητριών σ' αυτήν την κατάσταση λειτουργίας τους.

1) Θεωρήστε ότι η συχνότητα χωρίς φορτίο, $f_{x.\varphi}$, και των τριών γεννητριών είναι 61,1 Hz. Αν η συχνότητα του συστήματος των γεννητριών είναι 60 Hz, πόση είναι η ισχύς την οποία παρέχει η κάθε γεννήτρια;

2) Ποια είναι η τιμή της μέγιστης ισχύος την οποία παράγουν οι γεννήτριες όταν ισχύει το ερώτημα (1) χωρίς να παραβιάζεται το όριο της ονομαστικής του ισχύος; Να υπολογίσετε την κοινή

συχνότητα f των γεννητριών και την ποσότητα της ισχύος την οποία παράγει η κάθε γεννήτρια.

3) Ποιες είναι οι τιμές των τάσεων διεγέρσεως E_f των γεννητριών όταν παρέχουν τα ονομαστικά kVA με ονομαστική τάση σε φορτίο;

Λύση.

Φορτίο με συντελεστή αντεπαγωγής 0,85 επαγ.. Δίδεται συχνότητα συστήματος 60 Hz.

1) Όταν η συχνότητα χωρίς φορτίο ($f_{x.\varphi}$) των γεννητριών είναι 61,1 Hz, ενώ η κοινή τους συχνότητα είναι 60 Hz, τότε κάθε γεννήτρια παρέχει την ακόλουθη ισχύ:

Γεννήτρια Α:

$$P_A = m^{(A)} \cdot (f_{x.\varphi}^{(A)} - f) = 2,4 \cdot (61,1 - 60) = 2,6 \text{ MW.}$$

Γεννήτρια Β:

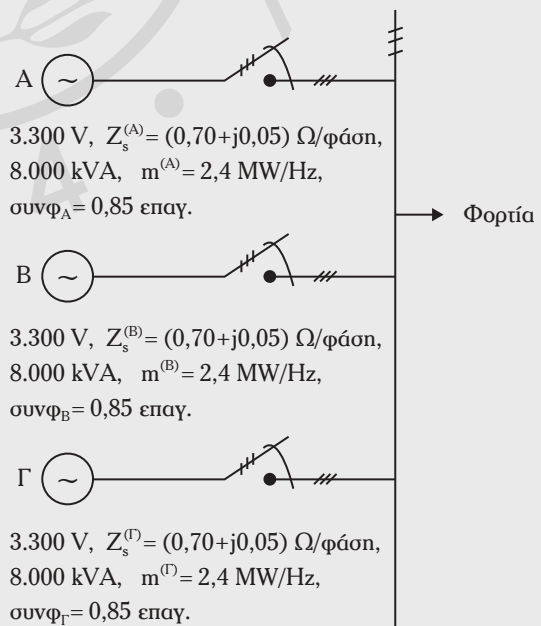
$$P_B = m^{(B)} \cdot (f_{x.\varphi}^{(B)} - f) = 2,4 \cdot (61,1 - 60) = 2,6 \text{ MW.}$$

Γεννήτρια Γ:

$$P_\Gamma = m^{(\Gamma)} \cdot (f_{x.\varphi}^{(\Gamma)} - f) = 2,2 \cdot (61,1 - 60) = 2,4 \text{ MW.}$$

Το συνολικό φορτίο των γεννητριών Α, Β και Γ είναι 7,6 MW.

2) Η μέγιστη ισχύς την οποία παρέχει κάθε



Σχ. 2.9κθ

γεννήτρια είναι:

$$(800 \text{ kVA}) \cdot (0,85) = 6,80 \text{ MW}.$$

Οι γεννήτριες Α και Β προσεγγίζουν αυτό το όριο, οπότε η γεννήτρια Α παρέχει αυτήν την ισχύ στη συχνότητα:

$$6,80 = 2,4 \cdot (61,6 - f)$$

$$139,84 = 2,4f$$

ή

$$f = 58,26 \text{ Hz}.$$

Η ισχύς που παρέχει κάθε γεννήτρια δίδεται παρακάτω:

Γεννήτριες Α και Β:

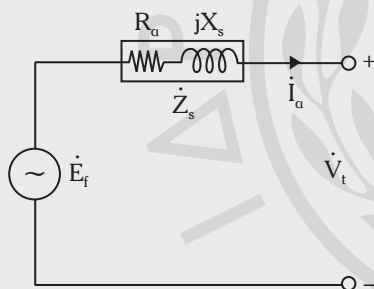
$$P_A = P_B = 2,4 \cdot (61,1 - 58,26) = 6,82 \text{ MW}.$$

Γεννήτρια Γ:

$$P_\Gamma = 2,2 \cdot (61,1 - 58,28) = 6,20 \text{ MW}.$$

Η συνολική ισχύς των γεννητριών είναι 13,02 MW.

3) Ισχύει το ανά φάση ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κάθε γεννήτριας του σχήματος 2.9λ:



Σχ. 2.9λ

Είναι:
$$E_f = V_t + I_a (R_a + jX_s).$$

Επειδή η συνδεσμολογία των φάσεων είναι σε αστέρα έχουμε:

$$V_t = |V_t| \angle 0^\circ \text{ V}.$$

Το διάνυσμα της τάσεως V_t θεωρείται διάνυσμα αναφοράς, οπότε το μέτρο του είναι:

$$V_t = \frac{3.300}{\sqrt{3}} = 1.907,52 \text{ V/φάση}.$$

Το ρεύμα το οποίο παρέχει κάθε γεννήτρια είναι:

$$I_a = \frac{S}{\sqrt{3} V_n} = \frac{8.000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 3.300} = 1.401,3 \text{ A}.$$

Οπότε ισχύει:

$$\begin{aligned} E_f &= V_t + I_a (R_a + jX_s) = \\ &= 1.907,52 + 1.401,3 \angle -31,78^\circ \cdot (0,7 + j0,05) = \\ &= 2.813 \angle -9,31^\circ / \text{φάση}. \end{aligned}$$

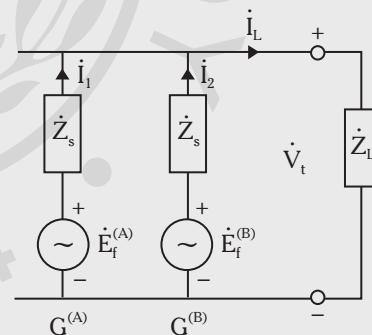
Άσκηση 17.

Δύο όμοιες τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες Α και Β, με συνδεσμολογία φάσεων σε αστέρα, λειτουργούν παράλληλα και τροφοδοτούν φορτίο 24.000 kW με συντελεστή ισχύος 0,85 επαγ.. Οι γεννήτριες λειτουργούν στα 380 V και έχουν σύγχρονη σύνθετη αντίσταση $Z_s = 0,4 + j12 \Omega/\text{φάση}$ η κάθε μία. Η ισχύς, την οποία προσφέρει η κάθε γεννήτρια είναι ίδια. Η γεννήτρια Α παρέχει ρεύμα 22 A με συντελεστή ισχύος επαγωγικό. Να υπολογίσετε:

- 1) Τον συντελεστή ισχύος της κάθε γεννήτριας.
- 2) Το ρεύμα το οποίο παρέχει στο φορτίο η γεννήτρια Β και
- 3) την τάση διεγέρσεως της κάθε γεννήτριας.

Λύση.

Στο σχήμα 2.9λα δίδεται το κυκλωματικό διάγραμμα της συνδεσμολογίας:



Σχ. 2.9λα

Είναι:

$$P_n^{(A)} + P_n^{(B)} = P_L, \quad P_n^{(A)} = P_n^{(B)}$$

και

$$P_n^{(A)} = P_n^{(B)} = \frac{P_L}{2} = \frac{24.000}{2} = 12.000 \text{ W}.$$

Είναι:

$$P_L = \sqrt{3} V_n I_Y \text{ συν}\phi_L$$

και

$$I_Y = I_L = \frac{P_L}{\sqrt{3} V_n \cos\phi_L} = \frac{24.000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 42,89 \text{ A}$$

$$\acute{\eta} \quad I_L = 42,89 \angle -36,87^\circ \text{ A.}$$

Θεωρώντας το διάνυσμα της τάσεως V_t , ως αναφορά, έχουμε:

$$\dot{V}_t = \frac{380}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ.$$

Γεννήτρια A:

$$P_n^{(A)} = \sqrt{3} V_n I_n \cos\phi_A \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \cos\phi_A &= \frac{P^{(A)}}{\sqrt{3} V_n I_n} = \frac{12.000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 22} = \\ &= 0,82 \text{ επαγ.} \end{aligned}$$

$$\text{Είναι} \quad I_1 = 22 \angle -35^\circ \text{ A}$$

Γεννήτρια B:

$$\begin{aligned} I_2 &= I_L - I_1 \\ &= 42,89 \angle -36,87^\circ - 22 \angle -35^\circ \\ &= (34,31 - j25,73) - (18,04 - j12,61) \\ &= 20,90 \angle -38,66^\circ \text{ A.} \end{aligned}$$

1) Ο συντελεστής ισχύος της γεννήτριας A είναι: $\cos\phi_A = 0,82$ επαγ..

Ο συντελεστής ισχύος της γεννήτριας B είναι:

$$\cos\phi_B = 0,78 \text{ επαγ..}$$

2) Το ρεύμα που παρέχει η γεννήτρια B είναι:

$$I_2 = 20,90 \angle -38,66^\circ \text{ A.}$$

3) Γεννήτρια A: $E_f^{(A)} = V_t + I_1 Z_s$.

Είναι:

$$\dot{E}_f^{(A)} = \frac{380}{\sqrt{3}} + 22 \angle -35^\circ \cdot 10,69 \angle 88,10^\circ \text{ V}$$

$$\begin{aligned} E_f^{(A)} &= 220 + 235,18 \angle 53,1^\circ \\ &= 361,2 + j188,07 \\ &= 407,23 \angle 27,47^\circ \text{ V.} \end{aligned}$$

Άσκηση 18.

Μια τριφασική σύγχρονη γεννήτρια με σύνδεση φάσεων σε τρίγωνο 20 MVA, 33 kV, 0,8 επαγ.

και 60 Hz, με $X_s = 0,8 \Omega$ /φάση συνδέεται σε δίκτυο τάσεως 3,3 kV, 60 Hz. Να υπολογίσετε:

1) Τη διακύμανση τάσεως.

2) Τις ονομαστικές τιμές της φαινομενικής ισχύος και της αντίστοιχης τάσεως της γεννήτριας όταν λειτουργεί στη συχνότητα των 50 Hz, γνωρίζοντας ότι οι απώλειες χαλκού και οι μαγνητικές απώλειες είναι ίδιες με τις αντίστοιχες στη λειτουργία της στα 60 Hz, και

3) τη διακύμανση τάσεως στο ερώτημα (β).

Λύση.

1) Η συνδεσμολογία των φάσεων είναι σε τρίγωνο, οπότε ισχύει:

$$S = \sqrt{3} V_n I_Y$$

$$\acute{\eta} \quad I_Y = \frac{S}{\sqrt{3} V_n} = \frac{20 \cdot 10^6 \text{ VA}}{\sqrt{3} \cdot 3,3 \cdot 10^3 \text{ V}} = 3.499 \text{ A.}$$

2) Στην περίπτωση κατά την οποία η γεννήτρια λειτουργεί στα 50 Hz, ενώ οι απώλειες χαλκού και οι μαγνητικές είναι ίδιες και στα 50 Hz, τότε θα πολλαπλασιάσουμε την ονομαστική τάση και την ονομαστική φαινόμενη ισχύ με 5/6:

$$V_n = \frac{5}{6} (3,3 \text{ kV}) = 2,75 \text{ kV}$$

$$S = \frac{5}{6} (20) = 16,66 \text{ MVA.}$$

Το ίδιο ισχύει για τη σύγχρονη αντίδραση:

$$X_s = \frac{5}{6} (0,8) = 0,66 \Omega.$$

3) Στα 50 Hz το ρεύμα γραμμής είναι:

$$I_Y = \frac{S}{\sqrt{3} V_n} = \frac{16,66 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 2,75 \text{ kV}} \cong 3,498 \text{ A.}$$

Το ρεύμα φάσεως είναι:

$$I_a = \frac{I_Y}{\sqrt{3}} = \frac{3,498}{1,73} \cong 2,022 \text{ A.}$$

$$\text{Ισχύει:} \quad E_f = V_t + I_a (R_a + jX_s).$$

Το ανά φάση ρεύμα της γεννήτριας είναι:

$$I_a = \frac{I_Y}{\sqrt{3}} = 2,022 \text{ A.}$$

Έχομε: $V_t = |V_t| \angle 0$ ή $|V_t| = 3.300 \text{ V}$.

Το ρεύμα τυμπάνου I_a είναι:

$$I_a = |I_a| \angle -36,87^\circ$$

ή $I_a = 2.022 \angle -36,87^\circ \text{ A}$.

Ισχύει:

$$E_f = 3.300 + 2.022 \angle -36,87^\circ \cdot 0,8 \angle 90^\circ \text{ V} = 3.300 + 1.617,6 \angle 53,13^\circ \text{ V}$$

ή $E_f = 3.300 + 970,56 + j1.294 \text{ V}$

ή $E_f \cong 4.462 \angle 16,69^\circ \text{ V/φάση}$.

Η διακύμανση τάσεως επί τοις εκατό είναι:

$$\varepsilon\% = \frac{\sqrt{3} \cdot 4.462 - 3.300}{3.300} \cdot 100 \cong 133\%.$$

Στην περίπτωση που έχομε:

$$V_n = 2,72 \text{ kV} \text{ είναι:}$$

$$E_f = 2,75 \cdot 10^3 + 2.022 \angle -36,87^\circ \cdot 0,8 \angle 90^\circ \text{ V} = 2.750 + 1.617,6 \angle 53,13^\circ \text{ V} = 2.750 + 970,56 + j1.294 \text{ V}$$

και $E_f = 3.939 \angle 18,77^\circ \text{ /φάση}$.

Η διακύμανση τάσεως είναι:

$$\varepsilon\% = \frac{\sqrt{3} \cdot 3.939 - 2.790}{2.750} \cdot 100 \cong 148\%.$$

Άσκηση 19.

Στο ηλεκτροστάσιο ενός μεγάλου κρουαζιερόπλοιου τοποθετούνται τέσσερεις σύγχρονες γεννήτριες, Α, Β, Γ και Δ, 80 MVA, 6,6 kV, 0,85 επαγ., οι οποίες εν πλώ λειτουργούν παράλληλα. Οι χαρακτηριστικές f-P των γεννητριών έχουν τον ίδιο στατισμό, ο οποίος είναι 2,3 Hz απ' τη λειτουργία χωρίς φορτίο στη λειτουργία με φορτίο. Οι τρεις γεννήτριες Α, Β και Γ τροφοδοτούν ένα φορτίο 60 MW στη συχνότητα των 60 Hz. Η τέταρτη γεννήτρια Δ χρησιμοποιείται για την διατήρηση της συχνότητας 60 Hz, σε σταθερό επίπεδο όταν μεταβάλλονται τα φορτία.

1) Έστω ότι το φορτίο τροφοδοτείται από το σύστημα των γεννητριών με 220 MW στα 60 Hz. Ποια είναι η συχνότητα, $f_{x,\phi}$, χωρίς φορτίο κάθε γεννήτριας;

2) Αυξάνομε το φορτίο του συστήματος στα 260 MW, με σταθερή ταχύτητα περιστροφής των γεννητριών. Ποια είναι η κοινή συχνότητα f του συστήματος;

3) Να υπολογίσετε τη συχνότητα χωρίς φορτίο της γεννήτριας Δ, ώστε η κοινή συχνότητα του συστήματος να γίνει 60 Hz.

4) Θεωρήστε ότι η γεννήτρια Δ αποσυνδέεται από το δίκτυο πώς θα αντιδράσει το ηλεκτρικό σύστημα;

Λύση.

1) Η πραγματική ισχύς πλήρους φορτίου των γεννητριών είναι:

$$(80 \text{ MVA}) \cdot (0,85) = 68 \text{ MW}.$$

Οι γεννήτριες έχουν την ίδια κλίση (στατισμός) από τη λειτουργία χωρίς φορτίο στη λειτουργία με φορτίο, η οποία είναι 2,3 Hz. Η κλίση της χαρακτηριστικής f-P κάθε γεννήτριας είναι:

$$m = \frac{68}{2,3} = 29,56 \text{ MW/Hz}.$$

Οι γεννήτριες Α, Β και Γ τροφοδοτούν φορτίο 60 MW η κάθε μία, οπότε η γεννήτρια Δ θα τροφοδοτεί φορτίο 40 MW.

Η συχνότητα χωρίς φορτίο της Α γεννήτριας είναι:

$$P_A = m^{(A)} \cdot (f_{x,\phi}^{(A)} - f)$$

ή $60 = 29,56 \cdot (f_{x,\phi}^{(A)} - 60 \text{ Hz})$

ή $f_{x,\phi}^{(A)} = 62,03 \text{ Hz}.$

Η συχνότητα χωρίς φορτίο της γεννήτριας Δ είναι:

$$P_\Delta = m^{(\Delta)} \cdot (f_{x,\phi}^{(\Delta)} - 60 \text{ Hz})$$

ή $60 = 29,56 \cdot (f_{x,\phi}^{(\Delta)} - 60 \text{ Hz})$

ή $f_{x,\phi}^{(\Delta)} = 61,35 \text{ Hz}.$

2) Οι κλίσεις των χαρακτηριστικών f-P των γεννητριών δεν μεταβάλλονται, οπότε η νέα κοινή τους συχνότητα f δίδεται ως εξής:

$$P_L = m^{(A)} \cdot (f_{x.\phi}^{(A)} - f) + m^{(B)} \cdot (f_{x.\phi}^{(B)} - f) + m^{(Γ)} \cdot (f_{x.\phi}^{(Γ)} - f) + m^{(Δ)} \cdot (f_{x.\phi}^{(Δ)} - f)$$

$$260 = 29,56 \cdot (62,03 - f) + 29,56 \cdot (62,03 - f) + 29,56 \cdot (62,03 - f) + 29,56 \cdot (61,35 - f),$$

οπότε: $f = 59,65 \text{ Hz}$.

3) Η παροχή καυσίμου της γεννήτριας Δ πρέπει να αυξηθεί, ώστε η συχνότητα να γίνει 60 Hz. Στα 60 Hz οι γεννήτριες Α, Β και Γ παρέχουν 60 MW η κάθε μία, ενώ η γεννήτρια Δ παρέχει ισχύ $260 - 3(60) \text{ MW} = 80 \text{ MW}$.

Οπότε έχουμε: $P_{\Delta} = m^{(Δ)} \cdot (f_{x.\phi}^{(Δ)} - f)$

ή $80 = 29,56 \cdot (f_{x.\phi}^{(Δ)} - 60)$

και $f_{x.\phi}^{(Δ)} = 62,70 \text{ Hz}$.

4) Όταν η γεννήτρια Δ βρεθεί εκτός δικτύου, τότε οι γεννήτριες Α, Β και Γ τροφοδοτούν το φορτίο 260 MW. Η κοινή τους συχνότητα f είναι:

$$P_L = m^{(A)} \cdot (f_{x.\phi}^{(A)} - f) + m^{(B)} \cdot (f_{x.\phi}^{(B)} - f) + m^{(Γ)} \cdot (f_{x.\phi}^{(Γ)} - f)$$

$$260 = 29,56 \cdot (62,03 - f) + 29,56 \cdot (62,03 - f) + 29,56 \cdot (62,03 - f)$$

ή $f = 59,09 \text{ Hz}$.

Κάθε γεννήτρια παρέχει την ακόλουθη ισχύ:

$$29,56 \cdot (62,03 - 59,09) = 86,01 \text{ MW}.$$

2.10 Ερωτήσεις.

- 1) Ποια είναι η αναγκαιότητα της παράλληλης λειτουργίας των συγχρόνων γεννητριών;
- 2) Ποια είναι τα πλεονεκτήματα από την παράλληλη λειτουργία των συγχρόνων γεννητριών;
- 3) Ποιες είναι οι συνθήκες παράλληλης λειτουργίας των συγχρόνων γεννητριών;
- 4) Ποιες ενέργειες πρέπει να γίνουν, ώστε μια γεννήτρια να παραλληλιστεί στο δίκτυο;
- 5) Με ποιους τρόπους ελέγχεται η διαδοχή των τάσεων των φάσεων;
- 6) Ποιος είναι ο ρόλος του συγχρονοσκοπίου;
- 7) Έστω ότι μια σύγχρονη γεννήτρια παραλληλίζεται σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Τι θα συμβεί αν η διαφορά φάσεως της τάσεως του δικτύου και της γεννήτριας είναι 180° ;

8) Πώς ελέγχεται η διαδοχή των φάσεων της γεννήτριας, η οποία πρόκειται να παραλληλιστεί;

9) Ποια είναι τα χαρακτηριστικά των ρυθμιστών στροφών των κινητηρίων μηχανών;

10) Πώς ορίζεται η ρύθμιση της ταχύτητας του ρυθμιστή-GSR;

11) Πώς γίνεται η καιανομή της πραγματικής ισχύος μεταξύ των παραλληλισμένων γεννητριών;

12) Έστω δύο μηχανές με ανόμοιες χαρακτηριστικές ρυθμιστών στροφών. Όταν παραλληλίζονται στο ηλεκτρικό δίκτυο πώς καιανέμεται η πραγματική ισχύς μεταξύ τους;

13) Χρησιμοποιώντας τα διανυσματικά διαγράμματα τάσεων-ρευμάτων αποδείξτε γιατί η καιανομή πραγματικής ισχύος μεταξύ των παραλληλισμένων γεννητριών προκαλεί μεταβολή της αέργου ισχύος μεταξύ τους.

2.11 Προτεινόμενες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Τρεις σύγχρονες γεννήτριες Α, Β και Γ 600 kW, 60 Hz, 480 V λειτουργούν παράλληλα. Η γεννήτρια Α τροφοδοτεί ένα φορτίο με 200 kW, η γεννήτρια Β τροφοδοτεί ένα φορτίο με 100 kW και η γεννήτρια Γ τροφοδοτεί ένα φορτίο με 300 kW. Η κλίση της f-P χαρακτηριστικής καμπύλης για κάθε κινητήρα είναι: 2%, 2% και 3% για τις γεννήτριες Α, Β και Γ αντίστοιχα. Αν το συνολικό φορτίο του δικτύου αυξηθεί κατά 2.000 kVA στα 70% του επαγωγικού συντελεστή ισχύος, να καθορίσετε τη νέα συχνότητα και την ισχύ την οποία παρέχει κάθε γεννήτρια στο δίκτυο.

Άσκηση 2.

Τρεις στροβιλοεναλλακτήρες Α, Β και Γ λειτουργούν παράλληλα συνδεδεμένοι σε δίκτυο 2.400 V, 25 Hz.

Γεννήτρια Α:

Ονομαστική ισχύς 500 kW και $m = 2\%$

Γεννήτρια Β:

Ονομαστική ισχύς 500 kW και $m = 1,5\%$

Γεννήτρια Γ:

Ονομαστική ισχύς 1.000 kW και $m = 4\%$

Οι γεννήτριες Α, Β και Γ φορτίζονται με 200 kW, 300 kW και 400 kW στο δίκτυο. Να υπολογίσετε τη νέα συχνότητα του συστήματος και την πραγματική ισχύ την οποία παρέχει κάθε γεννήτρια.

Άσκηση 3.

Έστω ότι μια σύγχρονη γεννήτρια Α, 700 kW, 60 Hz με $m = 2\%$ λειτουργεί παράλληλα με σύγχρονη γεννήτρια Β, 700 kW και $m = 6\%$ το συνολικό φορτίο του δικτύου 1.000 kVA, 60 Hz με 2.400 V και 80,6% του επαγωγικού φορτίου κατανέμεται εξίσου μεταξύ των γεννητριών. Αν φορτίο 200 kVA με 60% του επαγωγικού συντελεστή ισχύος αποσυνδέεται από το δίκτυο, να υπολογίσετε τη νέα συχνότητα συστήματος και την ισχύ, την οποία παρέχει κάθε γεννήτρια.

Άσκηση 4.

Τρεις όμοιες σύγχρονες γεννήτριες Α, Β και Γ

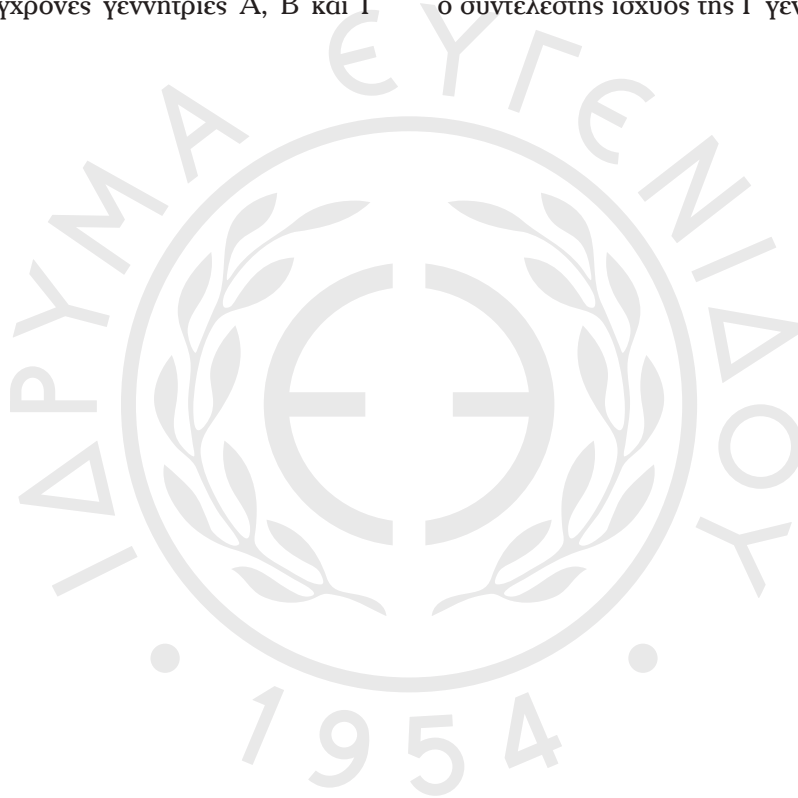
100 kW μοιράζονται εξίσου φορτίο 1.500 kW στα 450 V, 60 Hz και με 80% επαγωγικό συντελεστή ισχύος.

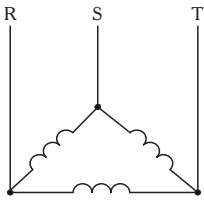
Γεννήτρια Α: $m = 1\%$.

Γεννήτρια Β: $m = 2\%$.

Γεννήτρια Γ: $m = 3\%$.

Να υπολογίσετε τη νέα συχνότητα του συστήματος και την ισχύ που παρέχει κάθε γεννήτρια όταν το φορτίο του δικτύου αυξηθεί στα 1.850 kW. Αν ο νέος συντελεστής ισχύος του συστήματος είναι 90% επαγωγικός, η γεννήτρια Α έχει 90% συντελεστή ισχύος επαγωγικό και η γεννήτρια Β έχει 60%. Ποιος είναι ο συντελεστής ισχύος της Γ γεννήτριας;





ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ (ΕΡ)

3.1 Εισαγωγή.

Το σύνολο των ηλεκτρικών συνδέσεων μεταξύ του κύριου πίνακα και των καταναλώσεων αποτελεί το **ηλεκτρικό δίκτυο** του **ηλεκτρικού συστήματος** ενός εμπορικού πλοίου, το οποίο παρουσιάζει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1) Έχει συγκεντρωμένα δίκτυα με διακεκριμένα συστήματα παραγωγής και φορτία συγκεντρωμένα σε πολύ μικρό χώρο.

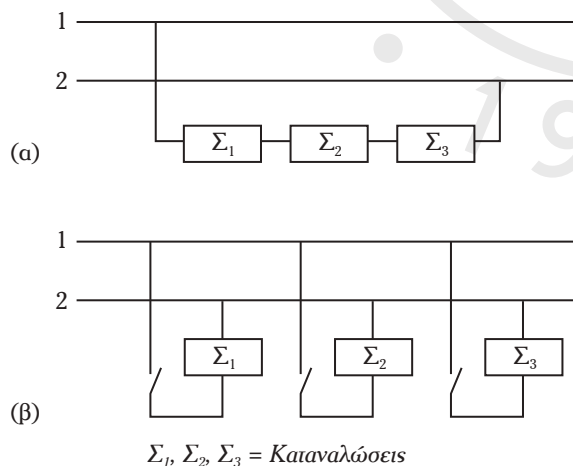
2) Είναι αυτόνομο σύστημα και περιλαμβάνει εφεδρικό ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος για την τροφοδότηση ορισμένων φορτίων ζωτικής σημασίας.

3) Το δίκτυο γειώσεώς του είναι αγείωτο.

4) Η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται μέσω ηλεκτρικών δικτύων μικρού μήκους.

Γενικά, η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με σύστημα διανομής σειράς και σύστημα παράλληλης διανομής.

Στο **σύστημα διανομής σειράς**, οι καταναλώσεις συνδέονται σε σειρά [σχ. 3.1(α)]. Σε αυτήν την



Σχ. 3.1

(α) Διανομή σειράς και (β) παράλληλη διανομή.

συνδεσμολογία το ρεύμα είναι σταθερό, ενώ διαφορετική είναι η τάση στους ακροδέκτες των καταναλώσεων. Η διανομή σε σειρά εφαρμόζεται σε ελάχιστες περιπτώσεις.

Στο **σύστημα παράλληλης διανομής**, οι καταναλώσεις συνδέονται παράλληλα στο δίκτυο [σχ. 3.1(β)]. Σ' αυτήν την συνδεσμολογία η τάση είναι σταθερή ενώ είναι διαφορετικό το ρεύμα το οποίο απορροφά η κάθε κατανάλωση.

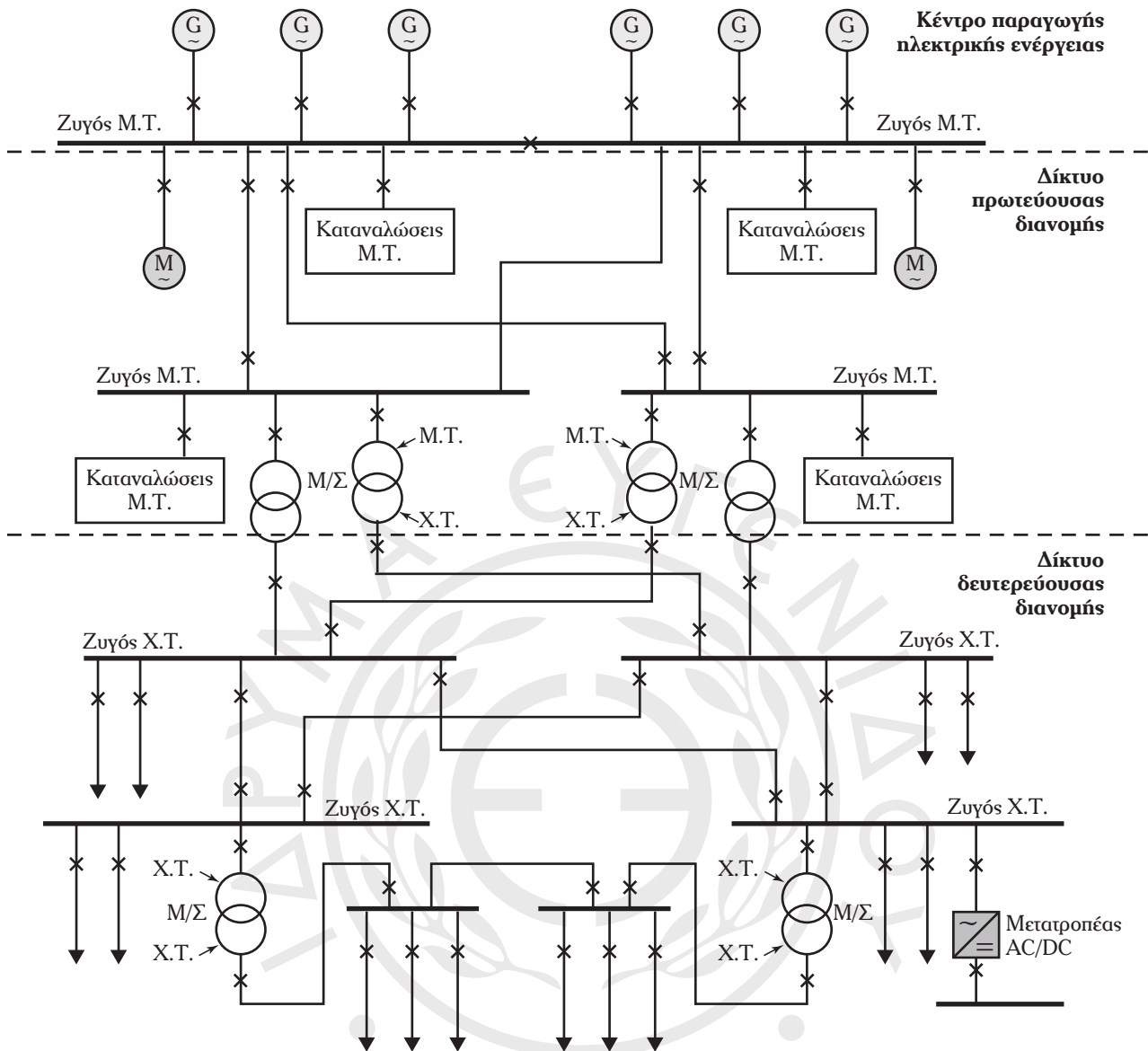
3.2 Σύστημα πρωτεύουσας και δευτερεύουσας διανομής.

Στο σχήμα 3.2α δίδεται η πρωτεύουσα και η δευτερεύουσα διανομή ηλεκτρικής ενέργειας μίας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως Μέσης Τάσεως (Μ.Τ.), ενός εμπορικού πλοίου.

Το ηλεκτρικό δίκτυο πρωτεύουσας διανομής, στη Μ.Τ., αποτελείται από τριφασικό σύστημα τριών αγωγών, χωρίς ουδέτερο αγωγό. Αυτό το δίκτυο λειτουργεί με αγείωτο ουδέτερο κόμβο ή με ουδέτερο κόμβο συνδεδεμένο με την γάστρα του πλοίου μέσω μιας ωμικής αντιστάσεως ή μέσω ενός πηνίου Petersen¹.

Γενικά, το αγείωτο σύστημα προτιμάται γιατί στην περίπτωση ενός μονοφασικού σφάλματος (βραχυκύκλωμα) εξασφαλίζεται η συνέχεια λειτουργίας της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως. Αν ένα μονοφασικό σφάλμα συμβεί σε μια γραμμή μεταφοράς ενός γειωμένου συστήματος, τότε αυτό ισοδυναμεί με βραχυκύκλωμα της γεννήτριας με την γάστρα του πλοίου. Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως το οποίο θα κυκλοφορήσει θα ενεργοποιήσει τα συστήματα προστασίας οπότε θα απομονωθεί το κύκλωμα του σφάλματος. Ωστόσο θα μπορούσε να προκληθεί επικίνδυνη κατάσταση για την ηλεκτρική εγκατάσταση του πλοίου και ειδικά αν το κύκλωμα, στο οποίο εμφανίστηκε το σφάλμα περιλαμβάνει ζωτικής σημασίας συστήματα, όπως εκείνο του πηδαλίου.

¹ Το πηνίο Petersen είναι ηλεκτρική διάταξη η οποία ανυπηρετείται από αυτεπαγωγή. Ο σκοπός αυτού του πηνίου είναι να δημιουργήσει συνθήκες συντονισμού σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση, οπότε ένα μονοφασικό σφάλμα γης μπορεί να εξαλειφθεί αυτόματα. Το πηνίο Petersen συνδέει τον ουδέτερο κόμβο με την γάστρα του πλοίου.



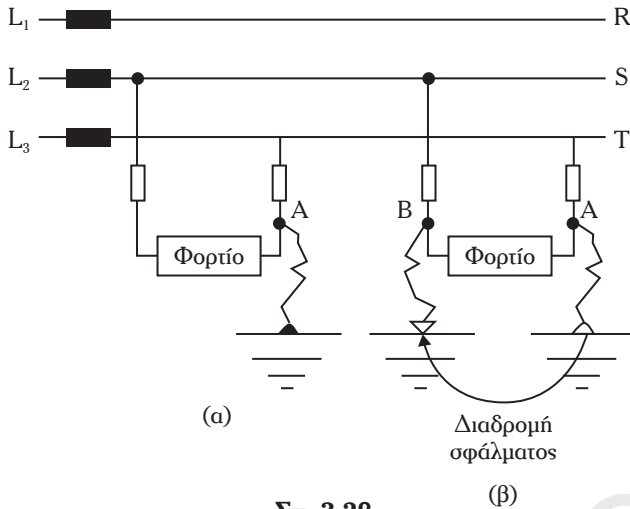
Σχ. 3.2α

Πρωτεύουσα και δευτερεύουσα διανομή ηλεκτρικής ενέργειας μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης Μ.Τ., ενός εμπορικού πλοίου.

Σε αντίθεση με το γειωμένο σύστημα αν ένα σφάλμα γης συμβεί, γενικά, στο σημείο Α [σχ. 3.2β(α)] ενός αγείωτου συστήματος διανομής, τότε αυτό δεν αποτελεί κίνδυνο για το δίκτυο, οπότε συνεχίζεται κανονικά η λειτουργία της ηλεκτρικής εγκατάστασης. Όμως πρέπει να εντοπιστεί το σφάλμα, μέσω των καταλλήλων διατάξεων και οργάνων γιατί έτσι αποτρέπεται η πιθανή ανάπτυξη ενός δεύτερου σφάλματος το οποίο θα είναι καταστροφικό για το δίκτυο.

Τελικά, στην περίπτωση μονοφασικού σφάλματος γης δεν υπάρχει δρόμος επιστροφής για το ρεύμα σφάλματος στην πηγή τάσεως, οπότε στο δίκτυο δεν κυκλοφορεί ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

Αν όμως συμβεί και δεύτερο σφάλμα (σημείο Β, [σχ. 3.2β(β)]) σε άλλη γραμμή του συστήματος, τότε τα δύο σφάλματα, ταυτόχρονα ισοδυναμούν με βραχυκύκλωμα της γεννήτριας με τη γάστρα του πλοίου, οπότε το μεγάλο ρεύμα βραχυκυκλώσεως θα ενεργοποιήσει τα συστήματα ηλεκτρικής προστασίας και την αποσύνδεση, πιθανώς μηχανισμών ζωτικής σημασίας θέτοντας σε κίνδυνο την ασφάλεια του πλοίου. Τελικά, ένα αγείωτο σύστημα απαιτεί δυο σφάλματα ώστε να κυκλοφορήσει ρεύμα βραχυκυκλώσεως στο δίκτυο και να λειτουργήσουν τα συστήματα ηλεκτρικής προστασίας, ενώ το γειωμένο σύστημα απαιτεί ένα μόνο σφάλμα.



Σχ. 3.2β

(α) Μονοφασικό σφάλμα γης.

(β) Διπλό σφάλμα γης σε αγείωτο σύστημα.

Γενικά, το αγείωτο σύστημα είναι αποτελεσματικότερο για τη συνέχεια λειτουργίας της ηλεκτρικής εγκατάστασης και γι' αυτό προτιμάται στα περισσότερα πλοία.

Αρχικά, όταν τα ηλεκτρικά δίκτυα στα εμπορικά πλοία ήταν περιορισμένης εντάσεως, με μικρές τιμές ισχύος, το ηλεκτρικό δίκτυο δευτερεύουσας διανομής αποτελείτο από μονοφασικό σύστημα μονωμένων αγωγών ή από σύστημα τριών αγωγών με το μέσο σημείο λήψης του δευτερεύοντος του Μ/Σ συνδεδεμένο στη γάστρα του πλοίου. Σήμερα που οι ισχύες στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων έχουν αυξηθεί, συμφέρει να επιλέγεται δίκτυο δευτερεύουσας διανομής, τριφασικό με τέσσερις αγωγούς. Ο τέταρτος αγωγός είναι ο ουδέτερος αγωγός, ο οποίος δεν συνδέεται στη γάστρα του πλοίου, οπότε υπάρχει δυνατότητα διαθέσεως πολικών και φασικών τάσεων.

Τα δίκτυα διανομής Χαμηλής Τάσεως (Χ.Τ.) υλοποιούνται, συνήθως, με τάσεις 400/230 V οι οποίες παρέχονται από Μ/Σ Χ.Τ/Χ.Τ.. Οι συχνότητες των τάσεων είναι 50 ή 60 Hz, ανάλογα με τον τύπο του εμπορικού πλοίου και τη χώρα κατασκευής του. Το συνεχές ρεύμα έχει τυπικές τιμές τάσεως: 48 V – 110 V ή 125 V για τα ηλεκτρικά κυκλώματα, τα οποία φορτίζουν συσσωρευτές ή για εκείνα τα οποία χρησιμοποιούνται στα βοηθητικά κυκλώματα αυτοματισμών.

3.3 Μονογραμμικά διαγράμματα των ηλεκτρικών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας σε εμπορικά πλοία.

Τα ηλεκτρικά δίκτυα διανομής έχουν μορφές ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ και τον τύπο του

πλοίου. Η μονογραμμική διαγραμματική μορφή ενός δικτύου της κύριας διανομής είναι:

- 1) Απλή ακτινική.
- 2) Ακτινική με υποπίνακες.
- 3) Ακτινική με υποσταθμούς.
- 4) Παρουσίαση εφεδρικών δικτύων τροφοδοσίας.
- 5) Η βροχοειδής μορφή δικτύου που δεν χρησιμοποιείται στην πράξη στις εγκαταστάσεις πλοίου, γιατί δεν εγγυάται την καλή επιλεκτικότητα των προσαρτήσεων.

Οποιαδήποτε και αν είναι η μορφή του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχουν ζωτικής σημασίας καταναλωτές (όπως το πηδάλιο), οι οποίοι τροφοδοτούνται απευθείας από τον κύριο πίνακα της ηλεκτρικής εγκατάστασης.

Τα ηλεκτρικά δίκτυα της δευτερεύουσας διανομής, τα οποία περιλαμβάνουν ηλεκτρικά κυκλώματα μεταξύ του δευτερεύοντος των μετασχηματιστών και των καταναλωτών που τροφοδοτούνται με μειωμένη τάση, έχουν μορφή απλή ακτινική.

Όταν η ηλεκτρική εγκατάσταση είναι περιορισμένης εκτάσεως και περιλαμβάνει μικρό αριθμό καταναλωτών, το ηλεκτρικό δίκτυο της δευτερεύουσας διανομής είναι μόνο ένα. Δηλαδή υπάρχει ένας μετασχηματιστής, ο οποίος τροφοδοτεί ένα σύστημα ζυγών που βρίσκονται στον κύριο πίνακα. Στους ζυγούς συνδέονται ακτινικά καταναλώσεις που λειτουργούν με τάση μικρότερη από εκείνη, την οποία παράγουν οι γεννήτριες της εγκατάστασης.

Σε μεγάλα πλοία υπάρχουν περισσότερα δίκτυα δευτερεύουσας διανομής. Κάθε δίκτυο τροφοδοτείται από έναν μετασχηματιστή και τροφοδοτεί ακτινικά ορισμένο αριθμό καταναλωτών.

Το ηλεκτρικό δίκτυο έκτακτης ανάγκης έχει την απλή ακτινική μορφή.

3.3.1 Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου απλής ακτινικής μορφής.

Στο σχήμα 3.3α δίδεται ένα δίκτυο διανομής με απλή ακτινική μορφή. Στην περίπτωση αυτή κάθε καταναλωση τροφοδοτείται κατευθείαν απ' τον Κύριο πίνακα μέσω μιας ηλεκτρικής γραμμής. Αυτή η μορφή του δικτύου διανομής είναι η πιο απλή και πραγματοποιείται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις μικρής ισχύος με περιορισμένο αριθμό καταναλωτών χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις ασφαλείας. Το δίκτυο με απλή ακτινική μορφή είναι το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε πλοία με εγκατεστημένη ισχύ μέχρι και 500 kW.

Στο δίκτυο απλής ακτινικής μορφής (σχ. 3.3α) σημαντική αξία έχουν:

1) Ο **κύριος πίνακας**, που αποτελείται από σύστημα ζυγών από τους οποίους τροφοδοτούνται οι καταναλώσεις και οι διάφοροι πίνακες φωτισμού και κινήσεως. Ο κύριος πίνακας είναι μεγάλος, γιατί περιλαμβάνει όλους τους διακόπτες και είναι το πιο ευαίσθητο μέρος της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως γιατί όλη η ηλεκτρική ενέργεια περνά από το μοναδικό σύστημα ζυγών του πίνακα.

2) Η **επιλεκτικότητα των προστασιών**. Ως επιλεκτικότητα εννοείται η ικανότητα των προστασιών να απομονώνουν το τμήμα του δικτύου, το οποίο περιλαμβάνει σφάλμα (βραχυκύκλωμα), ενώ το υπόλοιπο μέρος της εγκαταστάσεως λειτουργεί κανονικά. Το δίκτυο με απλή ακτινική μορφή επιτρέπει την μεγίστη επιλεκτικότητα των προστασιών και εγγυάται την μεγίστη συνέχεια λειτουργίας της εγκαταστάσεως.

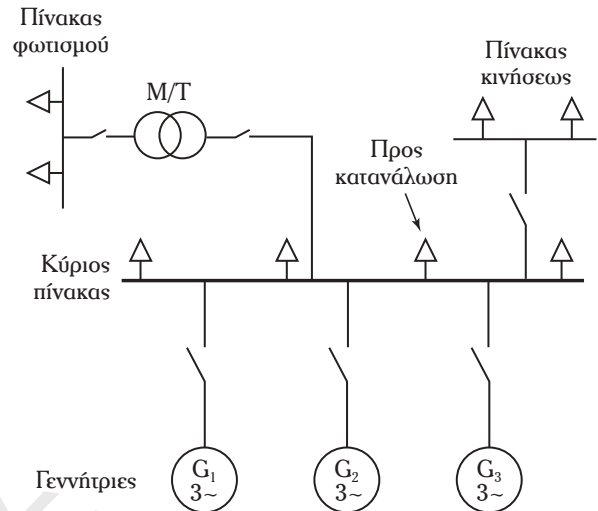
Με τον όρο σφάλμα εννοούμε ένα βραχυκύκλωμα το οποίο μπορεί να εμφανιστεί σε καταναλωτή και το οποίο, στη συνέχεια, προκαλεί ρεύμα βραχυκυκλώσεως στο δίκτυο. Μεταξύ του καταναλωτή και του συστήματος των ζυγών παρεμβάλλεται ένας μόνο διακόπτης, ο οποίος πρέπει να έχει μεγάλη ικανότητα διακοπής. Πράγματι, ένα βραχυκύκλωμα πριν τον διακόπτη εμπλέκει όλη την ισχύ του κύριου πίνακα και καθορίζει ένα ρεύμα βραχυκυκλώσεως πρακτικά ίσο με το ρεύμα των γεννητριών.

Η απλή ακτινική μορφή του δικτύου διανομής επιτρέπει την εύκολη επιτήρηση και την ομαλή διαδικασία χειρισμών του δικτύου, γιατί όλες οι συσκευές ελέγχου και χειρισμού τοποθετούνται στον κύριο πίνακα. Αντίθετα το ηλεκτρικό δίκτυο με απλή ακτινική μορφή, περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό ηλεκτρικών γραμμών, οπότε δύσκολα ελέγχεται η μόνωσή τους. Επίσης, η συνέχεια λειτουργίας είναι ελλιπής, γιατί η συνολική ηλεκτρική ενέργεια περνά από ένα και μόνο σύστημα ζυγών και ένα σφάλμα στο δίκτυο βγάζει εκτός λειτουργίας όλη την εγκατάσταση.

3.3.2 Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου ακτινικής μορφής με υποπίνακες.

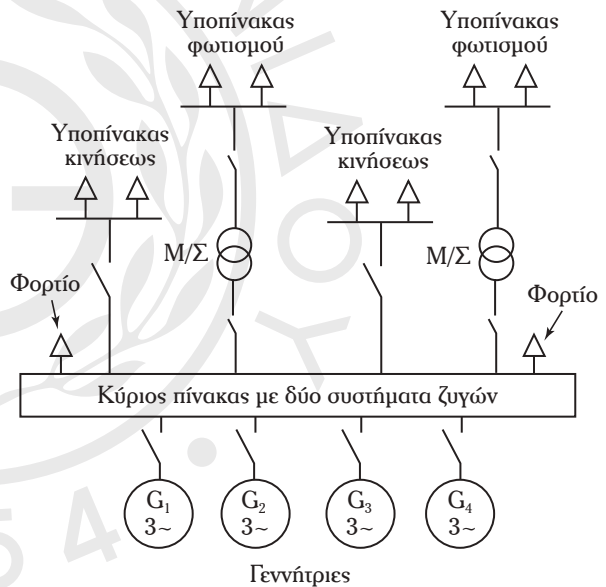
Οι υποπίνακες ή τα κέντρα φορτίου είναι κόμβοι οι οποίοι δέχονται ηλεκτρική ενέργεια από το σύστημα ζυγών του κύριου πίνακα και την διανέμουν ακτινικά στους καταναλωτές. Σε σχέση με την προηγούμενη μορφή του δικτύου, αυτό περιλαμβάνει λιγότερες ηλεκτρικές γραμμές.

Η επιλεκτικότητα των προστασιών, στο δίκτυο



Σχ. 3.3α

Απλή ακτινική μορφή ηλεκτρικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχ. 3.3β

Δίκτυο ακτινικής μορφής με υποπίνακες.

αυτό (σχ. 3.3β) και συνεπώς η παρεχόμενη συνέχεια λειτουργίας είναι μικρή, γιατί ένα σφάλμα στην ηλεκτρική γραμμή ενός υποπίνακα, θέτει εκτός λειτουργίας όλους τους καταναλωτές, οι οποίοι τροφοδοτούνται από αυτόν τον υποπίνακα.

Η συνολική συνέχεια λειτουργίας της εγκαταστάσεως, όμως, αυξάνεται, διαιρώντας τον κύριο πίνακα σε δύο ανεξάρτητες ζώνες με δυο συστήματα ζυγών (σχ. 3.3β), έτσι ώστε αν συμβεί ένα σφάλμα στο ένα σύστημα το άλλο να μπορεί να λειτουργεί κανονικά.

3.3.3 Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου ακτινικής μορφής με υποσταθμούς.

Η μορφή του δικτύου χρησιμοποιεί υποπίνακες, δηλαδή κόμβους διανομής περιορισμένης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι τροφοδοτούν καταναλωτές με όμοια χαρακτηριστικά. Ο υποσταθμός είναι ένας κόμβος, μεγαλύτερης σημασίας, ο οποίος τροφοδοτεί όλους τους καταναλωτές που τοποθετούνται στη ζώνη ευθύνης του ίδιου του υποσταθμού. Οι υποσταθμοί τοποθετούνται σε ειδικούς χώρους.

Στο σχήμα 3.3γ δίδεται ένα τυπικό δίκτυο ακτινικής μορφής με υποσταθμούς.

Το δίκτυο ακτινικής μορφής με υποσταθμούς, περιλαμβάνει, για λόγους ασφαλείας, δύο ξεχωριστά κέντρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με το καθένα να έχει τον δικό του κύριο πίνακα. Το πλοίο διαιρείται σε ζώνες λειτουργίας μεγάλων ηλεκτρικών φορτίων. Σε κάθε ζώνη αντιστοιχεί ένας υποσταθμός, ο οποίος τροφοδοτεί ακτινικά όλους τους καταναλωτές της αντίστοιχης ζώνης.

Το δίκτυο ακτινικής μορφής με υποσταθμούς χρησιμοποιείται σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις κρουαζιεροπλοίων.

3.3.4 Μονογραμμική παρουσίαση εφεδρικών δικτύων τροφοδοσίας.

Στα δίκτυα της κύριας διανομής προστίθενται και τα εφεδρικά δίκτυα τροφοδοσίας. Αυτά τα δίκτυα κατ'εξοχήν διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

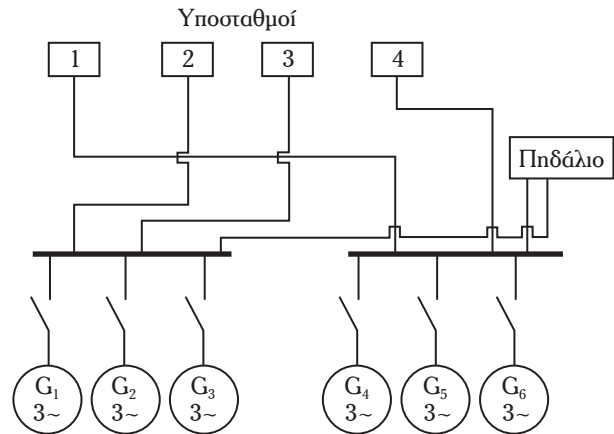
1) Κλειστά εφεδρικά δακτυλιοειδή δίκτυα.

Η μορφή αυτών των δικτύων χαρακτηρίζεται από ένα δακτυλιοειδές εφεδρικό κύκλωμα, το οποίο αναχωρεί από τον έναν κύριο πίνακα ή από το αντίστοιχο σύστημα ζυγών, συνδέει διαδοχικά όλους τους υποσταθμούς και τους υποπίνακες και καταλήγει στον άλλον κύριο πίνακα ή στο σύστημα ζυγών.

Στο σχήμα 3.3δ δίδεται ένα κλειστό εφεδρικό δακτυλιοειδές δίκτυο.

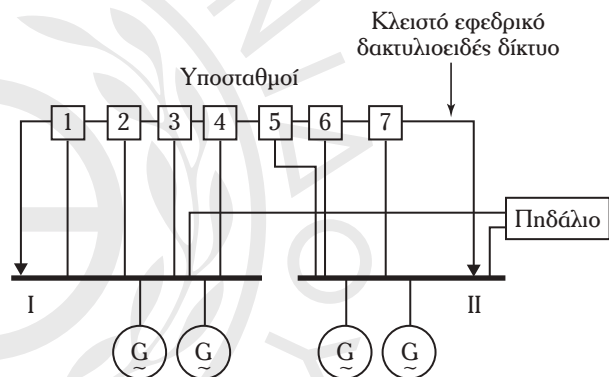
Στην περίπτωση κατά την οποία διακόπεται η λειτουργία του υποσταθμού 2 (σχ. 3.3ε), τότε αυτός μπορεί να τροφοδοτείται απ' τον υποσταθμό 1 ή απ' τον υποσταθμό 3.

Στην περίπτωση κατά την οποία διακόπεται η λειτουργία (λόγω σφάλματος) του κύριου πίνακα II, τότε οι υποσταθμοί οι οποίοι τροφοδοτούνταν από αυτόν το πίνακα, μπορούν να τροφοδοτούνται,



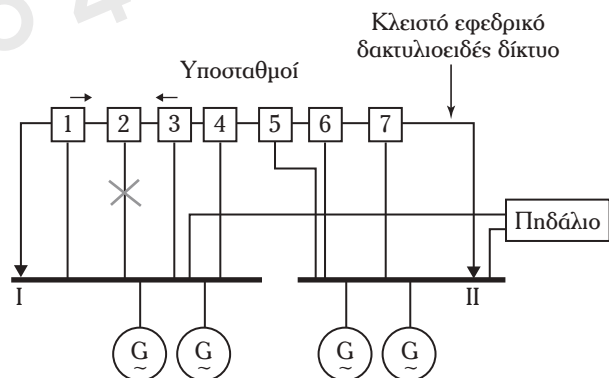
Σχ. 3.3γ

Τυπικό δίκτυο ακτινικής μορφής με υποσταθμούς. Δύο ξεχωριστά κέντρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αντίστοιχους κύριους πίνακες.



Σχ. 3.3δ

Κλειστό εφεδρικό δακτυλιοειδές ηλεκτρικό δίκτυο.



Σχ. 3.3ε

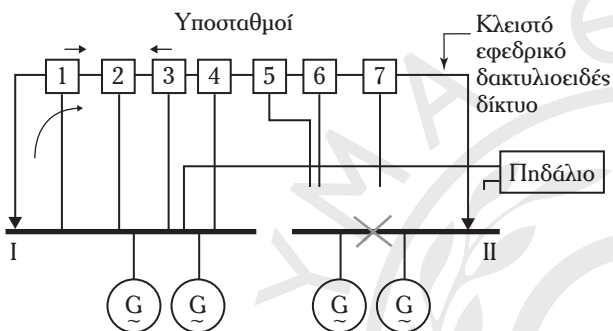
Συμπεριφορά του κλειστού εφεδρικού δικτύου στην περίπτωση κατά την οποία ο υποσταθμός 2 είναι εκτός λειτουργίας.

μερικώς, από τον κύριο πίνακα I μέσω του κλειστού δακτυλιοειδούς εφεδρικού δικτύου (σχ. 3.3στ).

2) Ανοιχτά δακτυλιοειδή εφεδρικά δίκτυα.

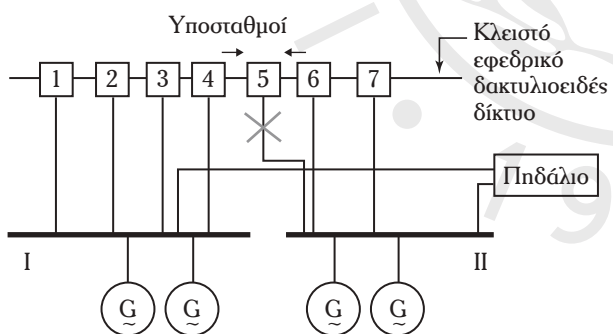
Το ανοιχτό δακτυλιοειδές εφεδρικό δίκτυο (σχ. 3.3ζ) είναι μια απλή μορφή ηλεκτρικού δικτύου, η οποία υλοποιεί μόνο τη σύνδεση των υποσταθμών.

Γενικά, οι εφεδρικές ηλεκτρικές συνδέσεις επιτρέπουν μεγαλύτερη ασφάλεια και συνέχεια λειτουργίας της εγκατάστασης, η οποία γίνεται πιο σύνθετη, λόγω της παρουσίας των διακοπών, αποζευκτών, πινάκων διανομής και των συσκευών, οι οποίες απαιτούνται για την αποφυγή εσφαλμένων χειρισμών.



Σχ. 3.3στ

Συμπεριφορά του κλειστού εφεδρικού δικτύου στην περίπτωση κατά την οποία ο κύριος πίνακας II είναι εκτός λειτουργίας.



Σχ. 3.3ζ

Ένα απλό ανοιχτό δακτυλιοειδές εφεδρικό δίκτυο.

3.4 Κύριοι ηλεκτρικοί πίνακες μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης πλοίου.

Ο κύριος ηλεκτρικός πίνακας, σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση Χ.Τ., είναι το στοιχείο εγκατάστασης που υλοποιεί τη σύνδεση μεταξύ των γεννητριών και των γραμμών διανομής οι οποίες τροφοδοτούν τους καταναλωτές. Κάθε κύριος ηλεκτρικός πίνακας

περιλαμβάνει: το σύστημα ζυγών, τους διακόπτες συνδέσεως με άλλους πίνακες, τους διακόπτες παραλληλισμού, τους διακόπτες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και τα όργανα μετρήσεως και ελέγχου της παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι κύριοι πίνακες (σχ. 3.4α) σύγχρονης τεχνολογίας είναι κλειστού τύπου και τα στοιχεία τα οποία βρίσκονται στο εμπρόσθιο μέρος δεν είναι υπό τάση.

Ο κύριος πίνακας τοποθετείται στον ίδιο χώρο με τα ηλεκτροπαραγωγικά ζεύγη και προστατεύεται από τους δυσμενείς παράγοντες του περιβάλλοντα χώρου.



Σχ. 3.4α

Τύπος κύριου ηλεκτρικού πίνακα.

Κάθε κύριος πίνακας αποτελείται από ορισμένο αριθμό κυψελών (μερών) και είναι κατασκευασμένος από μεταλλικές κάσες, με προστατευτικό κάλυμμα, το οποίο μπορεί να είναι μεταλλικό όπως το φύλλο ντουλαπιού ή διαφανές.

Τα όργανα μετρήσεως και έλεγχου τοποθετούνται στις υψηλότερες κυψέλες, τα κομβία χειρισμού στις μεσαίες, ενώ στις χαμηλές τοποθετούνται οι διακόπτες των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών.

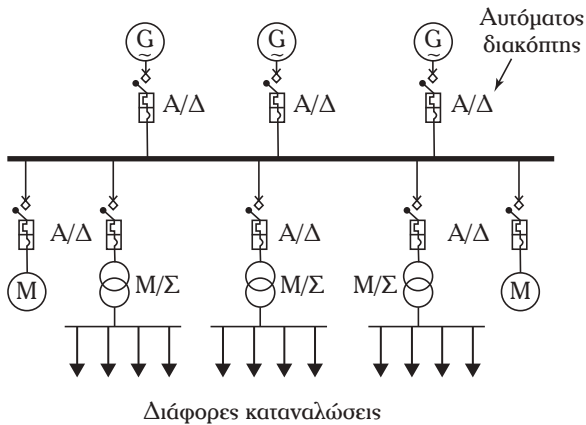
Στη συνέχεια δίδονται τα μονογραμμικά διαγράμματα διαφόρων τύπων κυρίων ηλεκτρικών πινάκων.

1) Μονογραμμικό διάγραμμα ενός κύριου ηλεκτρικού πίνακα με ένα μοναδικό σύστημα ζυγών (σχ. 3.4β).

2) Μονογραμμικό διάγραμμα ενός κύριου πίνακα με δύο συστήματα ζυγών (σχ. 3.4γ). Ο διακόπτης Δ_1 είναι ένας διακόπτης παραλληλισμού.

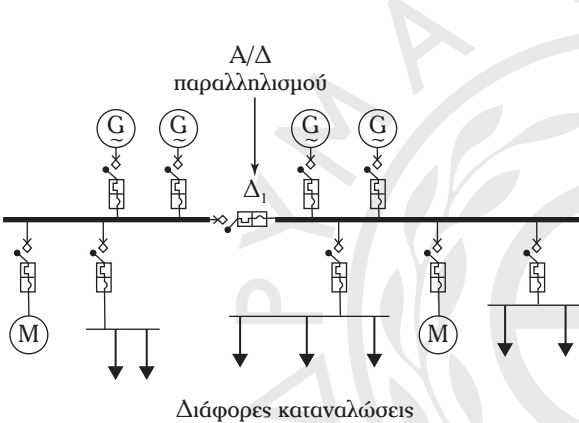
Στο σχήμα 3.4γ οι γεννήτριες διαιρούνται σε δύο συστήματα ζυγών, ώστε το ένα σύστημα να λειτουργεί εφεδρικά για το άλλο.

3) Μονογραμμικό διάγραμμα ενός κύριου πίνακα με ένα σύστημα κυρίων ζυγών και ένα αντίστοιχο σύστημα βοηθητικών ζυγών (σχ. 3.4δ).



Σχ. 3.4β

Μονογραμμικό διάγραμμα ενός κύριου ηλεκτρικού πίνακα με ένα μοναδικό σύστημα ζυγών.



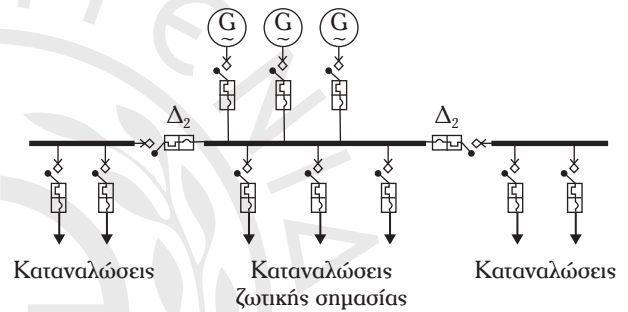
Σχ. 3.4γ

Μονογραμμικό διάγραμμα ενός κύριου πίνακα με δύο συστήματα ζυγών.

Στο σχήμα αυτό οι γεννήτριες είναι συνδεδεμένες στο σύστημα των κυρίων ζυγών, από το οποίο αναχωρούν οι γραμμές τροφοδοσίας των καταναλώσεων ζωτικής σημασίας. Από το βοηθητικό σύστημα ζυγών αναχωρούν οι γραμμές τροφοδοσίας των διάφορων καταναλωτών.

4) Μονογραμμικό διάγραμμα ενός κύριου πίνακα ο οποίος αποτελείται από δύο συστήματα κυρίων ζυγών και ένα σύστημα βοηθητικών ζυγών (σχ. 3.4ε).

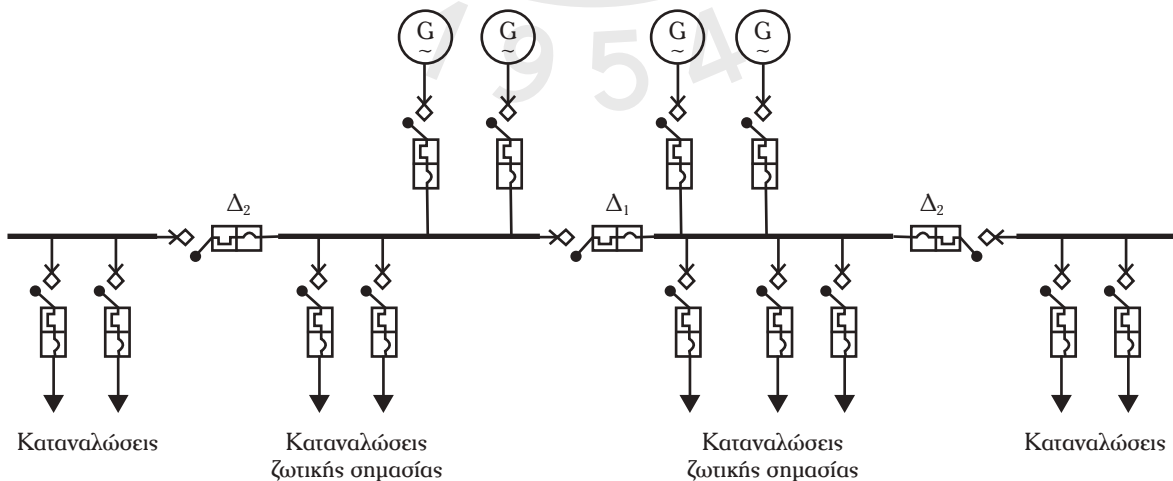
Ο κύριος πίνακας του σχήματος 3.4ε, είναι σύνθεση των κυρίων πινάκων των σχημάτων 3.4γ και 3.4δ αντίστοιχα. Ο κύριος πίνακας του σχήματος 3.4ε, εγγυάται το μέγιστο βαθμό της συνέχειας λειτουργίας και τον εύκολο τρόπο συντηρήσεως, γιατί αποτελείται από περισσότερα ανεξάρτητα τμήματα.



Οι A/Δ Δ₂ προκαλούν την αυτόματη αποσύνδεση στην περίπτωση υπερφορτίσεως του κύριου πίνακα.

Σχ. 3.4δ

Μονογραμμικό διάγραμμα ενός κύριου πίνακα με ένα σύστημα κυρίων ζυγών και ένα αντίστοιχο σύστημα βοηθητικών ζυγών.



Σχ. 3.4ε

Μονογραμμικό διάγραμμα ενός κύριου πίνακα ο οποίος αποτελείται από δύο συστήματα κυρίων ζυγών και ένα σύστημα βοηθητικών ζυγών.

3.5 Δίκτυο διανομής έκτακτης ανάγκης.

Για τα εμπορικά πλοία οι κανονισμοί απαιτούν την παρουσία μιας αυτόνομης πηγής ηλεκτρικής ενέργειας ανεξάρτητα απ' την αντίστοιχη κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (γεννήτριες που τοποθετούνται στο χώρο του ηλεκτοστασίου), η οποία μέσω ενός **δικτύου διανομής ανάγκης** (emergency distribution system) τροφοδοτεί συγκεκριμένα φορτία απαραίτητα για την ασφάλεια και λειτουργία του πλοίου όταν το κύριο δίκτυο είναι εκτός λειτουργίας.

Το δίκτυο διανομής έκτακτης ανάγκης (σχ. 3.5α) αποτελείται από:

1) Ένα σύστημα συσσωρευτών που καλύπτουν το φορτίο έκτακτης ανάγκης χωρίς να χρειάζεται η επαναφόρτίσή τους και χωρίς επί πλέον πτώσεις τάσεως.

2) Μία ή περισσότερες μονάδες ηλεκτροπαραγωγών ζευγών.

Οι διακόπτες Δ_1 και Δ_2 μανδαλώνονται μεταξύ τους (interlocked) κατά τέτοιον τρόπο, ώστε όταν ο ένας είναι κλειστός ο άλλος να είναι ανοικτός και αντίστροφα. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται ο παραλληλισμός μεταξύ των κυρίων γεννητριών και της πηγής έκτακτης ανάγκης.

Στην κανονική λειτουργία της εγκαταστάσεως ο διακόπτης Δ_1 είναι κλειστός, ενώ ο διακόπτης Δ_2 είναι ανοικτός. Στις συνθήκες έκτακτης ανάγκης συμβαίνει το αντίστροφο.

Η γεννήτρια έκτακτης ανάγκης έχει την δική της κινητήρια μηχανή, ξεχωριστή δεξαμενή καυσίμων (αν η κινητήρια μηχανή είναι ΜΕΚ), μηχανισμό εκκίνησης και πίνακα ελέγχου κοντά στον χώρο όπου τοποθετείται.

Η γεννήτρια έκτακτης ανάγκης μπορεί να ξεκινήσει με τη βοήθεια ενός χειροστροφάλου ή αυτόματα με συμπιεσμένο αέρα ή με έναν συσσωρευτή.

Ο πίνακας έκτακτης ανάγκης τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια απ' τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη έκτακτης ανάγκης. Η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές, για τους οποίους προβλέπεται αυτή η τροφοδοσία, όταν οι γεννήτριες είναι εκτός λειτουργίας. Τα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων έκτακτης ανάγκης για εμπορικά πλοία είναι:

1) Στην κανονική λειτουργία της εγκαταστάσεως, οι ζυγοί του πίνακα έκτακτης ανάγκης τροφοδοτούνται από τους κύριους πίνακες της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως του πλοίου.

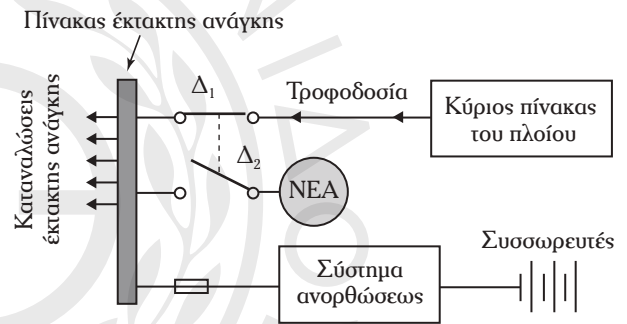
2) Η εκκίνηση των μονάδων έκτακτης ανάγκης και η τροφοδότηση των αντιστοίχων καταναλωτών γίνεται αυτόματα, όταν οι ζυγοί του πίνακα έκτακτης

ανάγκης δεν τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια από τους κύριους πίνακες.

3) Η αναγκαία ενέργεια για να κρατούνται σε ετοιμότητα οι μηχανές νίζελ προέρχεται από τους ίδιους τους ζυγούς του πίνακα έκτακτης ανάγκης, οι οποίοι τροφοδοτούνται από τους κύριους πίνακες στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας της εγκαταστάσεως.

Στο σχήμα 3.5β δίδεται σχηματικά το σύστημα έκτακτης ανάγκης ενός τυπικού στροβιλοκίνητου εμπορικού πλοίου. Οι ζυγοί 1 και 2 ανήκουν στους πίνακες έκτακτης ανάγκης.

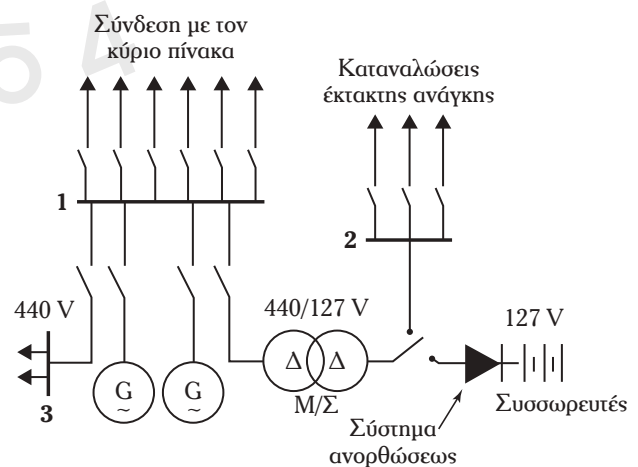
Οι ζυγοί 1 του πίνακα έκτακτης ανάγκης τροφοδοτούνται απ' τον κύριο πίνακα της εγκαταστάσεως. Οι ζυγοί 2 του πίνακα έκτακτης ανάγκης τροφοδοτούν τους καταναλωτές έκτακτης ανάγκης (π.χ. λειτουργία φωτισμού έκτακτης ανάγκης, των alarms, των υδατοστεγών θυρών καθώς και άλλων λειτουργιών που είναι αναγκαίες για τη διατήρηση της ασφαλούς λειτουργίας του πλοίου) (σχ. 3.5β).



NEA: Νιζελογεννήτρια έκτακτης ανάγκης

Σχ. 3.5α

Δίκτυο διανομής έκτακτης ανάγκης.



Σχ. 3.5β

Σύστημα έκτακτης ανάγκης ενός τυπικού στροβιλοκίνητου εμπορικού πλοίου.

Ο υποπίνακας 3 είναι εκείνος ο οποίος εξασφαλίζει την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τη ξηρά.

Στα επιβατηγά πλοία οι κανονισμοί απαιτούν η πηγή έκτακτης ανάγκης να είναι, συνήθως, μια ντιζελογεννήτρια η οποία να έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει για περισσότερες από 36 ώρες (ενώ στα εμπορικά πλοία για 18 ώρες). Επιπρόσθετα πρέπει να υπάρχει ένας συσσωρευτής, ο οποίος θα ενεργοποιεί τον φωτισμό έκτακτης ανάγκης στην περίπτωση γενικής διακοπής του ηλεκτρικού ρεύματος (black out).

3.6 Ηλεκτροδότηση ελλιμενισμένων πλοίων.

Σύμφωνα με την Δ.Σ. SOLAS, για τα πλοία χωρητικότητας μεγαλύτερης από 500 GRT, θα πρέπει να διατίθεται λήψη ρεύματος από την ξηρά.

Το σύστημα λήψης ρεύματος τοποθετείται στο κύριο κατάστρωμα και συνδέεται με τον κύριο ηλεκτρικό πίνακα του πλοίου. Η λήψη ρεύματος από την ξηρά γίνεται όταν οι γεννήτριες ισχύος είναι εκτός λειτουργίας.

Στο σχήμα 3.6α δίδεται σχηματικά μια διάταξη για την τροφοδοσία με ηλεκτρική ενέργεια από την ξηρά. Αυτή η διάταξη περιλαμβάνει έναν τριπολικό Α/Δ με μαγνητοθερμικό ρελέ στις τρεις φάσεις, τρία αμπερόμετρα τα οποία συνδέονται μέσω μετασχηματιστών εντάσεως (Μ/Σ Ε δηλ. οι οποίοι υποβιβάζουν το ρεύμα γραμμής σε ένα επίπεδο να μετρείται από τα αμπερόμετρα), ένα βολτόμετρο και μια συσκευή για τον έλεγχο διαδοχής των φάσεων.

Η συσκευή για τον έλεγχο της διαδοχής των φάσεων είναι απαραίτητη για την πραγματοποίηση της

σωστής συνδεσμολογίας των τριών φάσεων, ώστε να στρέφονται κανονικά οι κινητήρες.

Η διάταξη χρησιμοποιείται και για τον έλεγχο των μονώσεων των φάσεων R, S, T. Όταν κλείνουμε τον διακόπτη Μ και οι λυχνίες ακτινοβολούν, έντονα με την ίδια ένταση, τότε δεν υπάρχει πρόβλημα στην μόνωση των αντιστοίχων φάσεων. Όταν όμως ένας λαμπτήρας ακτινοβολεί με λιγότερη ένταση σε σχέση με τους υπόλοιπους, τότε πρέπει να προσέξουμε τη μόνωση της αντίστοιχης φάσεως. Σε σειρά με τους λαμπτήρες συνδέονται κατάλληλες αντιστάσεις (R), για τον έλεγχο της εντάσεως του ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο διαρρέει τους λαμπτήρες.

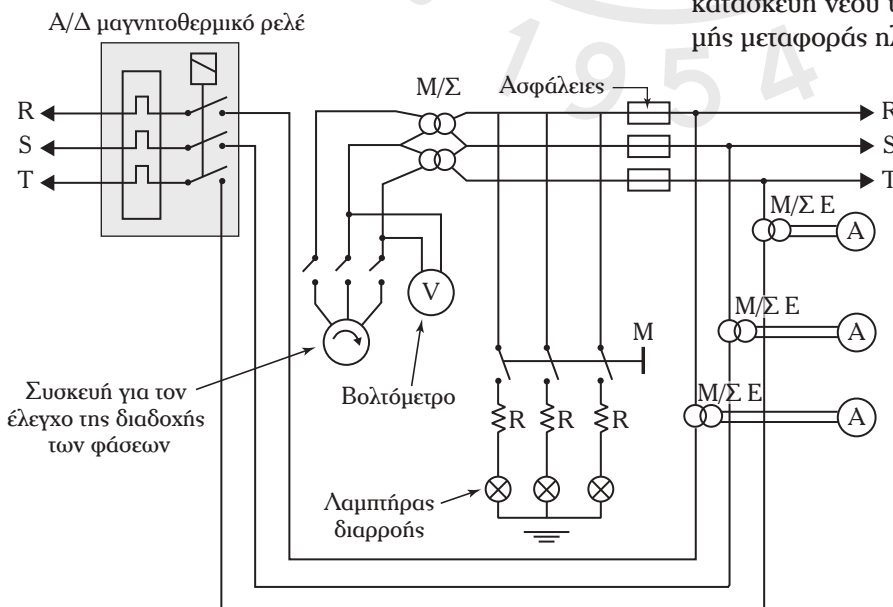
Η ηλεκτροδότηση των ελλιμενισμένων πλοίων έχει τεράστια σημασία για τους ακόλουθους λόγους:

1) Αν ένα κρουαζιερόπλοιο παραμείνει δέκα ώρες σε ένα λιμάνι, οι μηχανές ντίζελ καταναλώνουν 20 μετρικούς τόνους καύσιμου και παράγουν 60 μετρικούς τόνους CO₂. Αυτό ισοδυναμεί με τις ετήσιες εκπομπές αερίων 25, μέσων, αυτοκινήτων. Οι εκπομπές αυτές εξαλείφονται αν η ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου τροφοδοτηθεί απ' την ξηρά.

2) Η εκπομπή ρύπου SO₂ και NO_x, από το μηχανοστάσιο, περιορίζεται με την παροχή ηλεκτρικής ισχύος από την ξηρά.

3) Η παραγωγή θορύβων και δονήσεων χαμηλών συχνοτήτων περιορίζεται αισθητά με την παροχή ηλεκτρικής ισχύος απ' την ξηρά.

Σήμερα, τα λιμάνια διαθέτουν κατάλληλες εγκαταστάσεις για ισχύες της τάξεως των 2 με 3 MW. Η κατανάλωση όμως των πλοίων μπορεί να φτάσει στα 10 MW, οπότε οι υπάρχουσες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις των λιμανιών πρέπει να αναβαθμιστούν (π.χ. κατασκευή νέου υποσταθμού ή μίας επί πλέον γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας).



Σχ. 3.6α

Διάταξη για την τροφοδοσία με ηλεκτρική ενέργεια από την ξηρά (όπου Μ/Σ Ε είναι μετασχηματιστές εντάσεως).

Ο υποσταθμός, ο οποίος θα περιλαμβάνει και τον μετατροπέα συχνότητας μπορεί να είναι σε απόσταση μέχρι και 10 km από το λιμάνι, ενώ στην προβλήτα θα βρίσκεται ένα κοντέινερ, το οποίο θα περιέχει τον μετασχηματιστή απομονώσεως και τις διασυνδέσεις με το πλοίο, το διακοπικό υλικό Χ.Τ./Μ.Τ. με αυτόματο γειωτή και τον εξοπλισμό ελέγχου και προστασίας για τους χρήστες.

Η πρώτη ηλεκτρική σύνδεση πλοίου-ξηράς έχει εγκατασταθεί με μεγάλη επιτυχία στο Guthenberg στη Σουηδία, από το 2000.

Στο σχήμα 3.6β δίδεται μια πρόταση για την ηλεκτροδότηση ελλιμενισμένων πλοίων. Πάνω στο πλοίο τοποθετείται ένα πλήρες σύστημα ισχύος το οποίο συνδέεται με την ξηρά και ενσωματώνεται απόλυτα στο ηλεκτρικό σύστημα και στο σύστημα αυτοματισμού του πλοίου.

3.7 Όργανα ενδείξεως και ελέγχου των κυρίων ηλεκτρικών πινάκων.

Οι κύριοι ηλεκτρικοί πίνακες περιλαμβάνουν τα όργανα που είναι απαραίτητα για τον έλεγχο και τη μέτρηση των παραμέτρων της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία διανέμεται στους διάφορους καταναλωτές. Γενικά, για κάθε σύγχρονη γεννήτρια (σχ. 3.7α), η οποία σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου παράγει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια προβλέπονται τα ακόλουθα όργανα μετρήσεως και ελέγχου:

- 1) Ένα βολτόμετρο (V) με μεταγωγικό διακόπτη.
- 2) Τρία αμπερόμετρα (A), ένα για κάθε φάση για

τον έλεγχο και την ισορροπία των ρευμάτων.

3) Ένα συχνόμετρο για έλεγχο της ταχύτητας (H_z).

4) Ένα συνημιτόμετρο ($\cos\phi$) για την μέτρηση του συντελεστή ισχύος.

5) Ένα διπλό βατόμετρο (W) σε συνδεσμολογία Αρον για τον έλεγχο της πραγματικής ισχύος.

6) Ένα βολτόμετρο (V_ϕ) και ένα αμπερόμετρο (A_ϕ) για τον έλεγχο της διεγέρσεως.

Ένας κύριος ηλεκτρικός πίνακας μπορεί να περιλαμβάνει και άλλα βοηθητικά όργανα, όπως όργανα σημάσεως ή προστασίας των τροφοδοτικών γραμμών της γεννήτριας (π.χ. συγχρονοσκόπιο και λυχνίες συγχρονισμού).

Στο σχήμα 3.7β δίδεται ένας κύριος ηλεκτρικός πίνακας, ο οποίος αποτελείται από ένα σύστημα ζυγών και τρεις μονάδες ηλεκτροπαραγωγών ζευγών με τα αντίστοιχα όργανα ελέγχου και μετρήσεως.

Στον κύριο πίνακα διακρίνουμε τα εξής όργανα: V: βολτόμετρο διπλής διεγέρσεως, H_z : συχνόμετρο ζυγών, $H_z^{(ev)}$: συχνόμετρο εναλλακτήρα, V_ϕ : βολτόμετρο διεγέρσεως, A_ϕ : αμπερόμετρο διεγέρσεως, V_Z : βολτόμετρο ζυγών, Δf: διακόπτης διεγέρσεως, ΡΤ: ρυθμιστής τάσεως, W: βατόμετρο και $\cos\phi$: συνημιτόμετρο.

3.8 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών πινάκων και βαθμοί προστασίας για το περιβλημά ενός ηλεκτρικού πίνακα Χ.Τ..

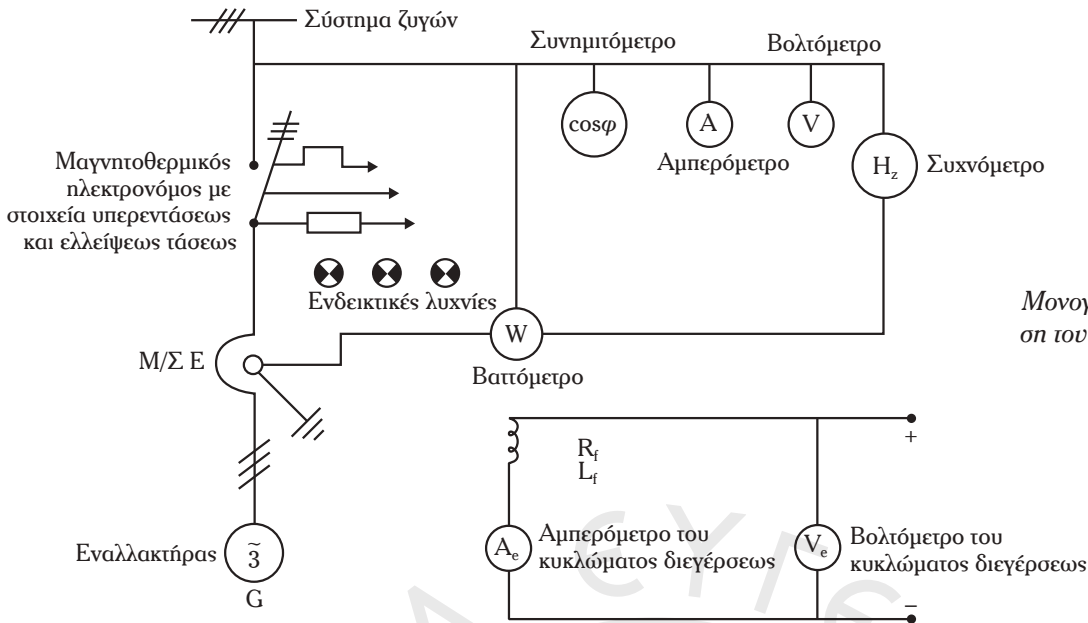
Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού πίνακα είναι τα ακόλουθα:

- 1) Η **ονομαστική τάση** (V_n), που είναι η μεγαλύτερη



Σχ. 3.6β

Ηλεκτροδότηση ελλιμενισμένων πλοίων.



Σχ. 3.7α
Μονογραμμική παράσταση του πίνακα σύγχρονης γεννήτριας.

τερη τιμή της εναλλασσόμενης ημιτονοειδούς τάσεως (ενεργός τιμή) ή της συνεχούς τάσεως, η οποία προβλέπεται απ' τον κατασκευαστή και είναι απαραίτητη για την τροφοδότηση του κύριου κυκλώματος του πίνακα. Για τριφασικά κυκλώματα αυτή η τάση αντιστοιχεί στην πολική τάση (τάση μεταξύ των φάσεων).

2) Η **ονομαστική τάση λειτουργίας** (V_z) ενός κυκλώματος του πίνακα, που είναι η ονομαστική τιμή της τάσεως ενός κυκλώματος του πίνακα, όπου μαζί με την ονομαστική τιμή του ρεύματος καθορίζει την κανονική λειτουργία του πίνακα. Για τριφασικά κυκλώματα η τάση V_e αντιστοιχεί στην πολική τάση (τάση μεταξύ των φάσεων). Ένας ηλεκτρικός πίνακας περιλαμβάνει ένα κύριο ηλεκτρικό κύκλωμα, με μια αντίστοιχη ονομαστική τάση και ένα ή περισσότερα βοηθητικά κυκλώματα, στα οποία αντιστοιχούν συγκεκριμένες τιμές ονομαστικών τάσεων. Ο κατασκευαστής υποχρεούται να προδιαγράψει τα όρια των τάσεων για κανονική λειτουργία του πίνακα.

3) Η **ονομαστική τάση μόνωσης** (V_i) ενός κυκλώματος του πίνακα, που είναι η τιμή της τάσεως η οποία χρησιμοποιείται στο πείραμα της διηλεκτρικής αντοχής και μήκους ερπυσιμού. Η τάση V_i δεν πρέπει να υπερβαίνει την ονομαστική τάση λειτουργίας στην μόνιμη κατάσταση και στην μεταβατική το 110% της τιμής της. Για τριφασικά κυκλώματα δίδεται σε πολική τιμή.

4) Η **ονομαστική κρουστική τάση αντοχής** (V_{imp}) ενός κυκλώματος του πίνακα, που είναι η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσεως, τυποποιημένης τιμής και πολικότητας, η οποία υποβάλλεται σε έναν ηλεκτρικό πίνακα χωρίς να δημιουργηθούν σφάλματα,

κάτω από καθορισμένες συνθήκες, και τηρουμένων των αποστάσεων (διάκενα) ασφαλείας μεταξύ των αγωγίμων στοιχείων.

5) Το **ονομαστικό ρεύμα** (I_{nA}). Η χαρακτηριστική τιμή του ονομαστικού ρεύματος ενός πίνακα εισήχθη από το πρότυπο IEC EN 61439 και δίδει τη μεγαλύτερη τιμή του ρεύματος στην οποία αντέχει

--	--	--

Σχ. 3.7β

Κύριος πίνακας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου, χαμηλής τάσεως (Χ.Τ.), ο οποίος αποτελείται από ένα σύστημα ζυγών και τρεις μονάδες ηλεκτροπαραγωγών ζευγών με τα αντίστοιχα όργανα ελέγχου και μετρήσεως.

ο πίνακας. Σε κάθε περίπτωση, η διαμόρφωση της ονομαστικής τιμής του ρεύματος γίνεται λαμβάνοντας υπόψη και τα όρια υπερθερμάνσεως, τα οποία προβλέπονται από το ίδιο πρότυπο.

6) Το **ονομαστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως μικρής διάρκειας** (I_{cw}). Είναι η ενεργός τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (δίδεται από τον κατασκευαστή) στην οποία αντέχει ο ηλεκτρικός πίνακας χωρίς να καταστραφεί. Για έναν πίνακα δίδονται διάφορες τιμές του I_{cw} για αντίστοιχες, διάφορες, χρονικές διάρκειες (π.χ. 0,2 s, 1 s, 3 s).

7) Το **εξαριτημένο ρεύμα βραχυκυκλώσεως** (I_{cc}). Εκφράζει την τιμή ενός ενδεχομένου ρεύματος βραχυκυκλώσεως στην οποία μπορεί να αντέξει ένα κύκλωμα που προστατεύεται από διατάξεις ή συσκευές οι οποίες υποδεικνύονται από τον κατασκευαστή.

8) Ο **ονομαστικός συντελεστής ταυτοχρονισμού** (σ), η τιμή του οποίου δίδεται από τον κατασκευαστή του ηλεκτρικού πίνακα και αφορά στο πλήθος των κυκλωμάτων, οπότε και φορτίων, τα οποία αναχωρούν από τον πίνακα και φορτίζονται ταυτόχρονα και συνεχώς, ενώ λαμβάνονται υπόψη και οι θερμικές αλληλεπιδράσεις. Ο συντελεστής σ ορίζεται:

α) Για μία ομάδα κυκλωμάτων.

β) Για όλο τον πίνακα.

Ο ονομαστικός συντελεστής ταυτοχρονισμού ορίζεται ως εξής:

$$\sigma = \frac{\sum I_b}{\sum I_n}$$

όπου: I_n το ονομαστικό ρεύμα των κυκλωμάτων και I_b το ρεύμα του κάθε κυκλώματος αναχωρήσεως από τον πίνακα.

Ο συντελεστής ταυτοχρονισμού για διάφορους τύπους φορτίων, σύμφωνα με το πρότυπο CEI EN 61439-2, δίδεται στον πίνακα 3.8.1.

9) Η **ονομαστική συχνότητα** (f_{ov}), που δίδεται από τον κατασκευαστή και εκφράζει τη συχνότητα για την οποία έχει σχεδιαστεί ο πίνακας, ώστε να λειτουργήσει κανονικά. Λαμβάνεται υπόψη μια απόκλιση $\pm 2\%$ από την ονομαστική της τιμή.

-Βαθμοί προστασίας για το περίβλημα ενός ηλεκτρικού πίνακα Χ.Τ..

Οι βαθμοί προστασίας για το περίβλημα ηλεκτρικών πινάκων Χ.Τ. είναι οι ακόλουθοι:

1) Ο **βαθμός προστασίας IP**, ο οποίος αποτελείται από δύο χαρακτηριστικά ψηφία και ένα προαιρετικό γράμμα το οποίο ακολουθεί και περιγράφεται από το πρότυπο IEC 60529.

Το **πρώτο** ψηφίο, από 0 μέχρι 6, παρέχει προστα-

Πίνακας 3.8.1
Συντελεστής RDF για διάφορους
τύπους φορτίων.

Τύπος φορτίου	σ
Πλήθος κυκλωμάτων διανομής από 2 μέχρι 3.	0,9
Πλήθος κυκλωμάτων διανομής από 4 μέχρι και 5.	0,8
Πλήθος κυκλωμάτων διανομής από 6 μέχρι και 9.	0,7
Πλήθος κυκλωμάτων διανομής από 10 και πάνω.	0,6
Κινητήρες < 100 kW	0,8
Κινητήρες > 100 kW	1

σία από την διείσδυση στερεών σωματιδίων.

Το **δεύτερο** ψηφίο, από 0 μέχρι 8, παρέχει προστασία από την διείσδυση υγρών.

Οι δυνατοί βαθμοί προστασίας οι οποίοι δηλώνονται με βάση το πρώτο ψηφίο είναι οι ακόλουθοι:

α) **IP1X**: Τα υπάρχοντα ανοίγματα στο περίβλημα δεν επιτρέπουν την είσοδο σφαιριδίου με διάμετρο 50 mm. Δηλαδή παρέχεται προστασία στην είσοδο ενός ανθρώπινου χεριού χωρίς να παρέχεται προστασία στην είσοδο των δακτύλων.

β) **IP2X**: Τα υπάρχοντα ανοίγματα δεν επιτρέπουν την είσοδο σφαιριδίου με διάμετρο 12,5 mm. Δηλαδή παρέχεται προστασία στην είσοδο ανθρωπίνων δακτύλων.

γ) **IP3X**: Τα υπάρχοντα ανοίγματα στο περίβλημα δεν επιτρέπουν την είσοδο ράβδου ή σφαιριδίου με διάμετρο 2,5 mm.

δ) **IP4X**: Τα υπάρχοντα ανοίγματα δεν επιτρέπουν την είσοδο ράβδου ή σφαιριδίου με διάμετρο 1 mm.

ε) **IP5X**: Αυτός και ο επόμενος βαθμός προστασίας αφορά στην προστασία έναντι εισόδου σκόνης. Επιτρέπει την είσοδο μικροποσότητας σκόνης μόνο σε σημεία, στα οποία η ύπαρξή της δεν αποδεικνύεται επικίνδυνη.

στ) **IP6X**: Δεν επιτρέπεται η είσοδος καμίας μικροποσότητας σκόνης.

Οι διάφοροι βαθμοί προστασίας με βάση το δεύτερο χαρακτηριστικό ψηφίο του IP είναι οι εξής:

α) **IPX1**: Δηλώνει προστασία έναντι κατακόρυφης πτώσεως νερού.

β) **IPX2**: Δηλώνει προστασία έναντι κατακόρυφης πτώσεως νερού και πτώσεως νερού με γωνία μέχρι και 15° ως προς την κατακόρυφο με ροή μεγαλύτερη από την προηγούμενη.

γ) **IPX3:** Δηλώνει προστασία έναντι της βροχής. Η μέγιστη γωνία προστασίας ως προς την κατακόρυφο γι' αυτόν τον βαθμό ορίζεται στις 60°.

δ) **IPX4:** Δηλώνει προστασία έναντι έντονου ισχυρής βροχής ή έντονου ψεκασμού. Πρέπει να παρέχεται προστασία στην είσοδο νερού προς όλες τις κατευθύνσεις.

ε) **IPX5:** Δηλώνει προστασία έναντι έντονου ψεκασμού υπό πίεση.

στ) **IPX6:** Δηλώνει προστασία έναντι έντονου ψεκασμού υπό πίεση σε συνθήκες δριμύτερες από την προηγούμενη περίπτωση.

ζ) **IPX7** και **IPX8:** Δηλώνει προστασία έναντι προσωρινής ή μόνιμης βυθίσεως στο νερό.

Με το γράμμα μετά τα δύο ψηφία, οι βαθμοί προστασίας διαμορφώνονται ως εξής:

α) **IPXXB:** Επιτρέπεται η είσοδος στο εσωτερικό του περιβλήματος σώματος με διάμετρο μεγαλύτερη από 12,5 mm, αλλά κατά τον έλεγχο με το ομοίωμα ανθρώπινου δακτύλου δεν εισέρχεται τμήμα μεγαλύτερο από 80 mm.

β) **IPXXC:** Επιτρέπεται η είσοδος σωμάτων με διάμετρο μεγαλύτερη από 2,5 mm, αλλά μία ράβδος ίδιας διαμέτρου και μήκους 100 mm δεν επιτρέπεται να προσεγγίζει επικίνδυνα σημεία.

γ) **IPXXD:** Ισχύουν τα ίδια με την προηγούμενη περίπτωση με τη διαφορά ότι η διάμετρος των σωμάτων είναι 1 mm.

2) Ο **βαθμός προστασίας ΙΚ**, ο οποίος καθορίζεται από το πρότυπο IEC 50102 και χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο διαβαθμίσεων (από 00–10) που σχετίζονται με την προστασία έναντι μηχανικών κρούσεων.

Στον πίνακα 3.8.2 δίδεται η εξάρτηση μεταξύ του βαθμού ΙΚ και της ενέργειας αντοχής κρούσεως.

3.9 Χρήση των μετασχηματιστών στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων.

Οι Μ/Σ χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων για την σύνδεση ηλεκτρικών κυκλωμάτων της δευτερεύουσας διανομής με τα ηλεκτρικά κυκλώματα της κύριας διανομής. Οι Μ/Σ ελαττώνουν την τιμή της τάσεως παραγωγής σε μία κατάλληλη τιμή για την τροφοδοσία των καταναλωτών κινήσεως και φωτισμού. Οι Μ/Σ είναι, γενικά, αερόψυκτοι, τοποθετούνται σε περίβλημα από φύλλα χάλυβα και βρίσκονται, συχνά, δίπλα στον κύριο πίνακα. Εναλλακτικά, μπορούν να τοποθετηθούν εντός του κύριου Πίνακα, οπότε δεν απαιτείται σχε-

Πίνακας 3.8.2
Εξάρτηση μεταξύ βαθμού ΙΚ και ενέργειας αντοχής κρούσεως.

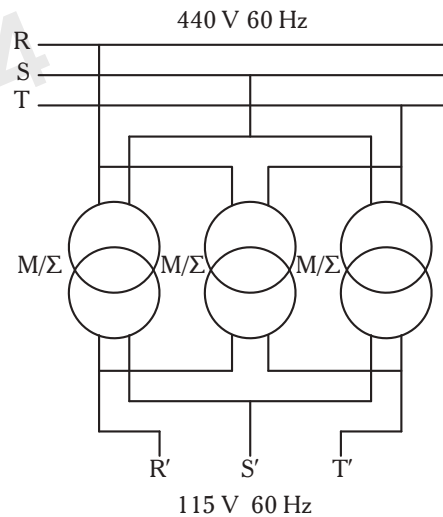
Βαθμός ΙΚ	Ενέργεια καταπονήσεως σε Joule
00	Καμμία προστασία
01	0,14
02	0,2
03	0,35
04	0,5
05	0,7
06	1
07	2
08	5
09	10
10	20

τικό περίβλημα. Η ύπαρξη του Μ/Σ αποτελεί πλεονέκτημα για την ηλεκτρική εγκατάσταση του πλοίου στην περίπτωση βραχυκυκλώματος.

Πράγματι, η σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ περιορίζει αισθητά το ρεύμα σφάλματος (βραχυκυκλώσεως), το οποίο παράγεται από ένα βραχυκύκλωμα στα δευτερεύοντα τυλίγματα.

Οι Μ/Σ των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων των πλοίων είναι τριφασικοί ή συστήματα τριών μονοφασικών Μ/Σ που σχηματίζουν τριφασικές συνδέσεις.

Στα σχήματα 3.9α και 3.9β δίδεται συνδεσμο-



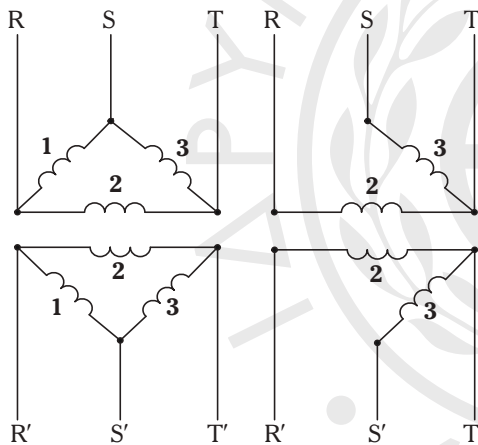
Σχ. 3.9α

Σύνδεση τριών μονοφασικών Μ/Σ σε τρίγωνο.

λογία τριών μονοφασικών Μ/Σ με τα πρωτεύοντα και τα δευτερεύοντα τυλίγματα συνδεσμοποιημένα σε τρίγωνο. Το σύστημα τριών μονοφασικών Μ/Σ συνδεμένο σε τρίγωνο (Δ - Δ), μπορεί να λειτουργήσει σε περίπτωση που επισκευάζεται ο ένας από τους τρεις Μ/Σ και σαν σύστημα δύο Μ/Σ συνδεμένων σε ανοικτό τρίγωνο (V-V) (σχ. 3.9β).

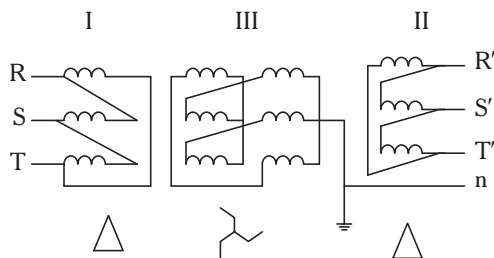
Όταν το δίκτυο διανομής είναι τεσσάρων αγωγών, δηλαδή με ουδέτερο αγωγό, ο τριφασικός Μ/Σ, εκτός από το πρωτεύον και το δευτερεύον τυλίγμα, περιλαμβάνει ένα τρίτο τυλίγμα μέσω του οποίου υλοποιείται ο ουδέτερος κόμβος. Στη συνδεσμολογία τρίγωνο-τρίγωνο (Δ - Δ) δεν είναι δυνατή η σύνδεση του ουδέτερου αγωγού στο δευτερεύον. Το τρίτο τυλίγμα είναι συνδεσμολογίας τεθλασμένου αστέρα και υλοποιεί τον ουδέτερο κόμβο, στον οποίο συνδέεται ο ουδέτερος αγωγός (σχ. 3.9γ).

Στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων υπάρχει μεγάλος αριθμός, μικρής ισχύος, μονοφασικών Μ/Σ για την τροφοδοσία των κυκλωμάτων ελέγχου και



Σχ. 3.9β

Σύστημα Μ/Σ σε σύνδεση ανοικτού τριγώνου (V-V).



Σχ. 3.9γ

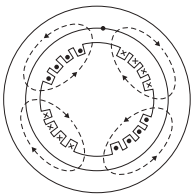
Δημιουργία ουδέτερου κόμβου σε συνδεσμολογία (Δ - Δ) με την υλοποίηση τρίτου τυλίγματος συνδεσμολογίας τεθλασμένου αστέρα.

σημάνσεως, Μ/Σ μετρήσεως και ειδικό Μ/Σ, καθώς και ΑΜ/Σ, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για το ξεκίνημα των τριφασικών ασυγχρόνων κινητήρων.

Οι Μ/Σ, ως γνωστόν, είναι στατά στοιχεία (δηλ. δεν περιλαμβάνουν περιστρεφόμενα μέρη) του ηλεκτρικού εξοπλισμού μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου, συνήθως πολύ αξιόπιστα και χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα. Ωστόσο, όπως και όλες οι ηλεκτρικές συσκευές, οι Μ/Σ πρέπει να υποβάλλονται στους κατάλληλους ελέγχους συντηρήσεως. Σε τακτά, προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα οι Μ/Σ πρέπει να αποσυνδέονται, να αφαιρούνται τα καπάκια τους και όλη η συσσωρευμένη σκόνη να απομακρύνεται με ηλεκτρική σκούπα ή με κατάλληλα πινέλα. Οι περιελίξεις τους πρέπει να επιθεωρούνται για τυχόν ζημιές. Οι τιμές των αντιστάσεων των περιελίξεων πρέπει να μετρούνται και να συγκρίνονται μεταξύ τους. Αν υπάρχουν διαφορές στις τιμές μετρήσεώς τους, ενδεχομένως θα δείχνουν τυχόν βλάβες στις περιελίξεις. Θα πρέπει να μετρείται η αντίσταση μόνωσης όλων των τυλιγμάτων, ως προς την γάστρα του πλοίου, αλλά και μεταξύ των φάσεών τους. Η αιτία οποιασδήποτε χαμηλής τιμής της αντιστάσεως μόνωσης πρέπει να διερευνηθεί και στην συνέχεια να διορθωθεί.

3.10 Ερωτήσεις.

- 1) Πώς ορίζεται το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου;
- 2) Ποια είναι τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μιας εγκαταστάσεως πλοίου;
- 3) Με ποιον τρόπο γίνεται η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας;
- 4) Τι είναι τα συστήματα κύριας και δευτερεύουσας διανομής μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου;
- 5) Ποιες είναι οι μορφές των δικτύων στη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας;
- 6) Ποια είναι τα κατασκευαστικά στοιχεία ενός κύριου ηλεκτρικού πίνακα μιας εγκαταστάσεως πλοίου;
- 7) Ποια είναι τα μέρη ενός πίνακα έκτακτης ανάγκης μιας εγκαταστάσεως πλοίου;
- 8) Πώς γίνεται η ηλεκτροδότηση των ελλιμενισμένων πλοίων;
- 9) Ποια είναι τα κύρια όργανα ενδείξεως και ελέγχου ενός κύριου ηλεκτρικού πίνακα μιας εγκαταστάσεως πλοίου;
- 10) Ποιοι τύποι Μ/Σ χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων;



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΕΩΣ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ (ΕΡ)

4.1 Εισαγωγή.

Στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων οι τριφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες και σπανιότερα οι σύγχρονοι κινητήρες αποτελούν τις καταναλώσεις κινήσεως με ΕΡ.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες, ανάλογα με τη γεωμετρία του ηλεκτρικού κυκλώματος του δρομέα κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, στους **κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα** και στους **κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα**. Οι ασύγχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται στην περίπτωση κατά την οποία δεν απαιτείται σταθερός αριθμός στροφών και είναι επιτρεπτή μικρή αυξομείωση της ταχύτητας περιστροφής τους σε μεταβολές του φορτίου. Χρησιμοποιούνται κυρίως για κίνηση των αντλιών και των συμπιεστών.

Οι σύγχρονοι κινητήρες οι οποίοι έχουν όμοια κατασκευή με τις σύγχρονες γεννήτριες, περιστρέφονται σύγχρονα με τη συχνότητα του δικτύου, στο οποίο είναι συνδεδεμένοι και παρουσιάζουν σταθερό αριθμό στροφών. Στις μέσες τάσεως ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων, οι σύγχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπρόωση και στην διόρθωση του συντελεστή ισχύος. Οι ασύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές.

4.2 Δομή του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.

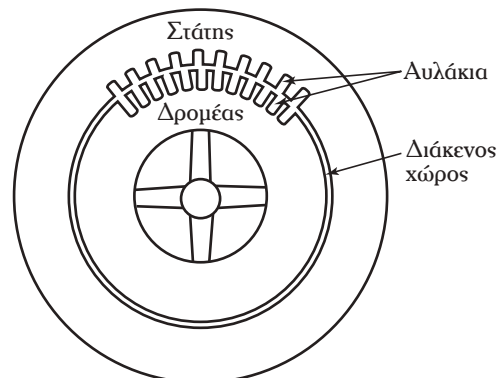
Ο ασύγχρονος κινητήρας είναι μία περιστρεφόμενη μηχανή, η ταχύτητα περιστροφής της οποίας είναι διαφορετική από την ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου (ταχύτητα συγχρονισμού), που αναπτύσσεται στον διάκενο χώρο της (σχ. 4.2α). Ο ασυγχρονισμός μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής και του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου της, είναι ο λόγος για τον οποίο ονομάζονται **ασύγχρονοι**. Ονομάζονται επίσης και **επαγωγικοί** γιατί στο στρεφόμενο μέρος τους επάγονται ρεύματα, τα οποία είναι απαραίτητα για τη λειτουργία τους.

Η πιο διαδεδομένη μορφή ασύγχρονου κινητήρα είναι ο πολυφασικού τύπου και κυρίως ο τριφασικού. Ο μονοφασικός κινητήρας χρησιμοποιείται σε ειδικές βιομηχανικές εφαρμογές, στο πεδίο των μικρών ισχύων.

– Κατασκευή ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα μηχανής.

Ο τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας αποτελείται από ένα ακίνητο μέρος, τον **στάτη** και ένα περιστρεφόμενο, τον **δρομέα** (σχ. 4.2α).

Ο πυρήνας του **στάτη** αποτελείται από ένα σύνολο ελασμάτων σιδήρου-πυριτίου (Fe-Si). Στο εσωτερικό του στάτη διαμορφώνονται κατάλληλα αυλάκια, μέσα στα οποία τοποθετούνται τα τυλίγματα (μονοφασικά, διφασικά, τριφασικά). Τα τυλίγματα τροφοδοτούνται από το δίκτυο με ένα συμμετρικό σύστημα τάσεων, οπότε δημιουργείται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο επάγει ρεύματα στα κυκλώματα του δρομέα. Τα αυλάκια του στάτη διαμορφώνονται κατά το μισό κλειστά, ενώ του δρομέα κατά το μισό κλειστά ή τελείως κλειστά. Ο διάκενος χώρος (διάκενο) μεταξύ στάτη και δρομέα είναι της τάξεως των 2–2,5 mm για τους κινητήρες μικρής ισχύος και μπορεί να είναι 20 mm για τους



Σχ. 4.2α

Σχηματική παράσταση ασύγχρονου κινητήρα.

κινητήρες μεγάλης ισχύος. Στο σχήμα 4.2β δίδονται διάφοροι τύποι αυλακιών για τον στάτη και για τον δρομέα.

Γενικά, το διάκενο έχει ομοιόμορφο πάχος και είναι πολύ μικρό, προκειμένου να περιορίζεται το ρεύμα μαγνητίσεως και η ροή σκεδάσεως αντίστοιχα. Στην καλύτερη περίπτωση τα αυλάκια πρέπει να είναι κλειστά, αλλά αυτό σημαίνει δύσκολη τοποθέτηση των τυλιγμάτων μέσα σ' αυτά. Όσο μικραίνει το άνοιγμα ενός αυλακιού, τόσο μικρότερη γίνεται η μαγνητική σκέδαση.

Στον στάτη συναντάμε, μερικές φορές, ανοικτά αυλάκια. Αυτό συμβαίνει όταν πρόκειται για κινητήρα υψηλών τάσεων. Τότε τα τυλίγματα απαιτούν ενισχυμένη μόνωση, οπότε προκατασκευάζονται και τοποθετούνται έτοιμα στα αυλάκια.

Η απλούστερη μορφή αυλακιού είναι η τελείως ανοικτή, η οποία όμως παρουσιάζει τα εξής **μειονεκτήματα**:

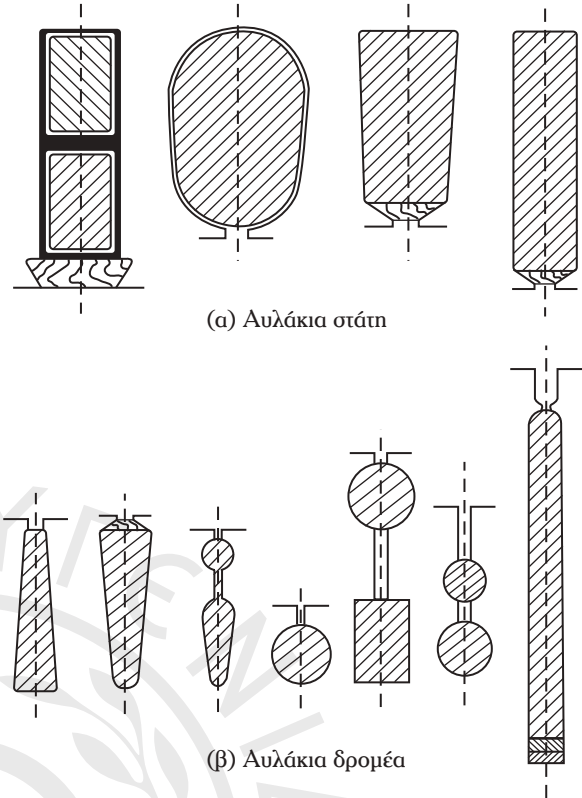
1) Για σταθερό διάκενο, μεγαλώνει το ρεύμα μαγνητίσεως, όσο μεγαλώνει το στόμιο του αυλακιού. Γι' αυτό χρησιμοποιείται ο τύπος αυτός στην περίπτωση ειδικών ηλεκτροτεχνικών αναγκών (π.χ. υψηλές τάσεις).

2) Προκαλούνται διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται μεγάλες απώλειες πυρήνα στον δρομέα, και επί πλέον δημιουργούνται ανεπιθύμητες ανώτερες αρμονικές στην ηλεκτρομαγνητική ροπή.

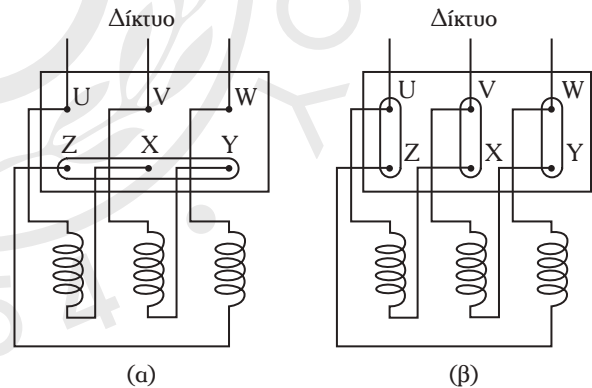
Για τον τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα το ηλεκτρικό κύκλωμα του στάτη αποτελείται από τρία τυλίγματα (φάσεις) τα οποία συνδέονται σε αστέρα ή σε τρίγωνο (σχ. 4.2γ).

Το περιστρεφόμενο μέρος της μηχανής, δηλαδή ο **δρομέας** έχει κυλινδρική μορφή. Ο πυρήνας του αποτελείται από σύνολο ελασμάτων σιδήρου-πυριτίου, για την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω δινορρευμάτων. Στο εξωτερικό μέρος, ο δρομέας φέρει κατάλληλο αριθμό αυλακιών, μέσα στα οποία τοποθετούνται οι αγωγοί του ηλεκτρικού κυκλώματός του (επαγωγικό τύμπανο). Ο αριθμός των αυλακιών του δρομέα είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο αριθμό αυλακιών του στάτη. Αυτό συμβαίνει για να αποφεύγεται ή για να μειώνεται αισθητά ο καλούμενος μαγνητικός θόρυβος. Άλλος τρόπος περιορισμού του μαγνητικού θορύβου είναι να κατασκευαστούν τα αυλάκια του δρομέα με μια μικρή κλίση ως προς τον άξονά του.

Ανάλογα με τη γεωμετρία του ηλεκτρικού κυ-



Σχ. 4.2β
Τύποι αυλακιών.



Σχ. 4.2γ
Τρόποι συνδέσεως των 3 φάσεων του στάτη ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα. (α) Σύνδεση σε αστέρα. (β) Σύνδεση σε τρίγωνο.

κλώματος του δρομέα, υπάρχουν οι εξής τρεις τύποι ασυγχρόνων κινητήρων:

1) Ασύγχρονος κινητήρας τύπου κλωβού (σχ. 4.2δ).

Ο δρομέας αυτού του κινητήρα αποτελείται από ράβδους αλουμινίου ή χαλκού κατά τη διεύθυνση της γενέτειρας ή με κάποια λοξότητα οι οποίες βρα-

κυκλωθούν στα δύο άκρα με δακτυλίδια βραχυκυκλώσεως από το ίδιο υλικό [σχ. 4.2ε(β)].

Το τύλιγμα του δρομέα [σχ. 4.2ε(β)] σχηματίζει ένα κλωβί, γι' αυτό ο ασύγχρονος κινητήρας αυτού του είδους ονομάζεται **ασύγχρονος κινητήρας με δρομέα κλωβού** ή **με βραχυκυκλωμένο δρομέα**.

Μέσα στις αυλακώσεις του πυρήνα του δρομέα τοποθετούνται αγωγοί (ράβδοι χαλκού, ορείχαλκου ή αλουμινίου για κινητήρες μικρής ισχύος), οι οποίοι διαμορφώνουν το επαγωγικό τύμπανό του.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα είναι απλοί στην κατασκευή και συντήρηση, οικονομικοί και έχουν μεγάλο βαθμό αποδόσεως.

Υπάρχουν και ασύγχρονοι κινητήρες με δύο κλωβούς, οι οποίοι κατασκευάζονται με δύο ομόκεντρους κλωβούς. Ο ένας κλωβός παρουσιάζει μεγάλη ωμική αντίσταση, μικρή αυτεπαγωγή και τοποθετείται κοντά στον διάκενο χώρο. Ο άλλος κλωβός παρουσιάζει μικρή ωμική αντίσταση, μεγάλη αυτεπαγωγή και τοποθετείται στον εσωτερικό χώρο του κινητήρα.

2) Ασύγχρονος κινητήρας με δακτυλίδια [σχ. 4.2ε(α)].

Ο δρομέας αυτού του κινητήρα φέρει αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετείται τριφασικό τύλιγμα όμοιο με το τύλιγμα του στάτη. Το τριφασικό τύλιγμα του δρομέα καταλήγει σε τρία δακτυλίδια μονωμένα και συναρμολογημένα στον άξονα του κινητήρα. Οι ακροδέκτες του δρομέα συνδέονται με εξωτερικά κυκλώματα μέσω ψηκτρών από άνθρακα που ολισθαίνουν στην επιφάνεια των δακτυλιδιών [σχ. 4.2ε(β)].

Μέσω των ψηκτρών γίνεται η σύνδεση συστήματος αντιστάσεων για κάθε φάση του τυλίγματος του δρομέα, για την ομαλή εκκίνηση του κινητήρα.

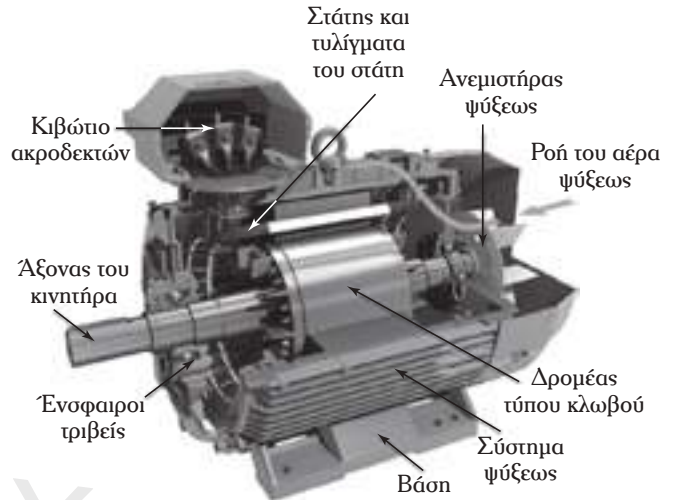
3) Ασύγχρονοι κινητήρες με δρομέα χωρίς αυλάκια.

Οι δρομείς αυτών των κινητήρων κατασκευάζονται από συμπαγή σίδηρο όπου επάγονται δινορρέυματα, τα οποία μαζί με το μαγνητικό πεδίο προκαλούν χρήσιμη ροπή. Ασύγχρονες μηχανές με δρομείς τέτοιου είδους χρησιμοποιούνται στην περίπτωση κατά την οποία απαιτείται μεγάλος αριθμός στροφών.

4.3 Γενικές αρχές λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα.

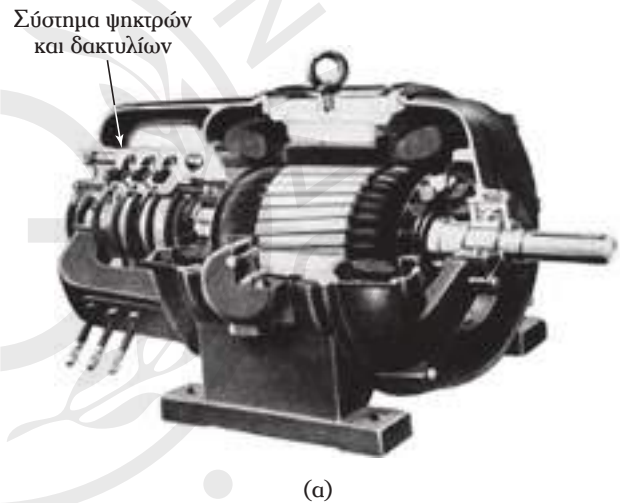
Γενικά, η λειτουργία του ασύγχρονου κινητήρα βασίζεται:

1) Στη δημιουργία ενός στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

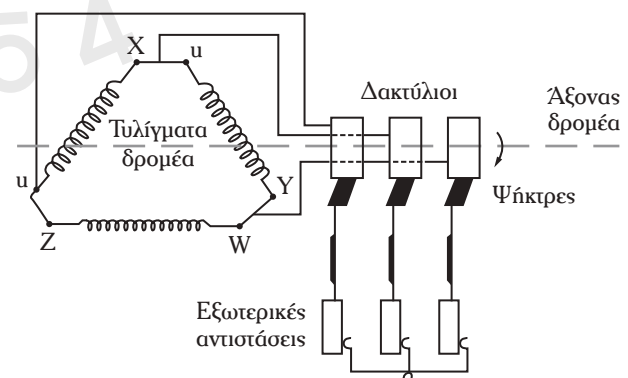


Σχ. 4.2δ

Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας τύπου κλωβού.



(α)



(β)

Σχ. 4.2ε

(α) Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας με δακτυλίδια,
(β) δρομέας ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια.

2) Στη θεωρία του M/Σ , και

3) στην προσπάθεια ευθυγραμμίσεως μεταξύ των αξόνων των αντιστοίχων μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα.

Αν τροφοδοτηθούν τα τυλίγματα του στάτη ενός ασύγχρονου κινητήρα με ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα ρευμάτων, τότε παράγεται **στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο**, το οποίο επάγει τάσεις στα τυλίγματα του δρομέα. Στα κυκλώματα του δρομέα ρέουν ρεύματα, οπότε προκύπτει η μαγνητική ροή του δρομέα Φ_f . Οι μαγνητικοί άξονες των πεδίων του στάτη και του δρομέα προσπαθούν να ευθυγραμμιστούν, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται ροπή.

Στο σχήμα 4.3α δίδονται τα διανύσματα της μαγνητικής ροής του πεδίου του στάτη Φ_s , της μαγνητικής ροής του πεδίου του δρομέα Φ_f και το διάνυσμα της συνισταμένης μαγνητικής ροής Φ_R , το οποίο προκύπτει από τη διανυσματική σύνθεση των διανυσμάτων Φ_s και Φ_f .

Η μαθηματική έκφραση της ροπής T , η οποία προκύπτει από την αλληλεπίδραση των δύο μαγνητικών πεδίων είναι:

$$T = K\Phi_f\Phi_s n \mu \delta_2 \quad (4.1)$$

Εφόσον $\delta_1 + \delta_2 = 90^\circ$,

$$\text{τότε} \quad T = K\Phi_f\Phi_s \text{ συν} \delta_1 \quad (4.2)$$

όπου η σταθερά αναλογίας K είναι μία συνάρτηση των φυσικών παραμέτρων της μηχανής, και ο παράγοντας $\Phi_s \text{ συν} \delta_1$ είναι η κάθετη συνιστώσα της μαγνητικής ροής του στάτη ως προς τη μαγνητική ροή του δρομέα.

Από την τριγωνομετρία είναι γνωστό ότι:

$$\Phi_s \text{ συν} \delta_1 = \Phi_R \text{ συν} (\delta_1 + \delta_3) \quad (4.3)$$

$$\text{και} \quad \Phi_R \text{ συν} (\delta_1 + \delta_3) = \Phi_R n \mu \delta \quad (4.4)$$

όπου δ είναι η φασική γωνία μεταξύ του συνισταμένου μαγνητικού πεδίου και του πεδίου του δρομέα. Η γωνία δ είναι γνωστή ως γωνία ροπής ή γωνία ισχύος. Από τις εξισώσεις 4.2, 4.3 και 4.4 προκύπτει:

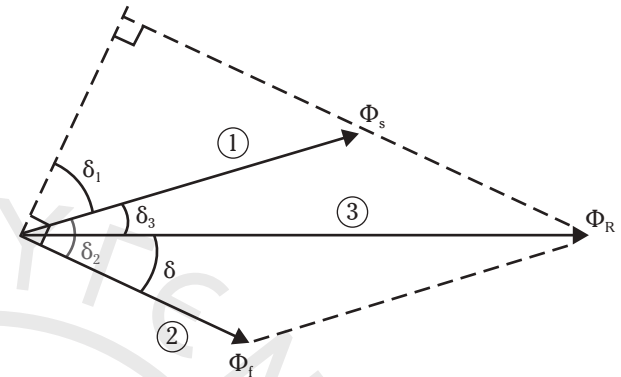
$$T = K\Phi_f\Phi_R n \mu \delta \quad (4.5)$$

4.3.1 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Στην παράγραφο αυτή θα αναλυθεί η δημιουργία του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου από τα τυλίγματα του στάτη μιας τριφασικής ασύγχρονης μηχανής και θα παρουσιαστεί το μαθηματικό μοντέλο που δίδει το πλάτος και την ταχύτητα περιστροφής του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

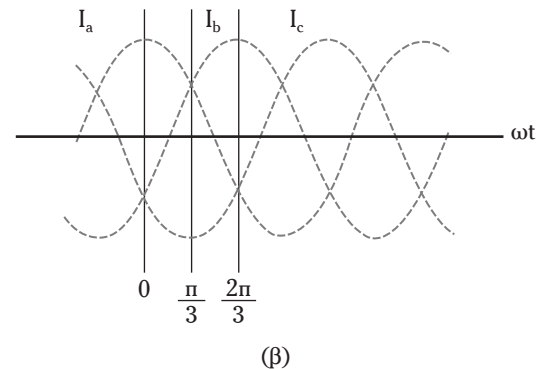
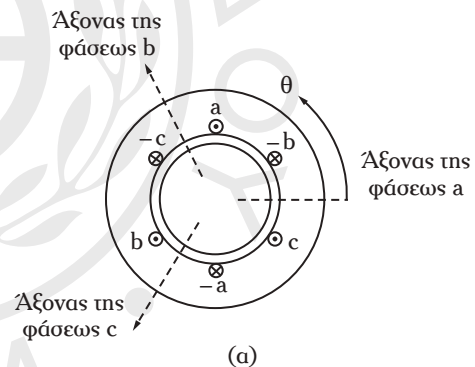
Στο σχήμα 4.3β(α) δίδεται μια διπολική τριφασική μηχανή. Τα τυλίγματα του στάτη τροφοδοτούνται με ένα τριφασικό, συμμετρικό σύστημα ρευμάτων [σχ. 4.3β(β)]. Κάτω από αυτές τις συνθήκες τα στιγμιαία ρεύματα των φάσεων είναι:

$$i_a(t) = I_o \text{ συν} \omega t$$



Σχ. 4.3α

Μαγνητικές ροές του στάτη και του δρομέα ασύγχρονου κινητήρα διαν είναι ακίνητες.



Σχ. 4.3β

(α) Διπολική τριφασική μηχανή,
(β) στιγμιαίες τιμές των ρευμάτων του στάτη.

$$i_b(t) = I_o \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (4.6)$$

$$i_c(t) = I_o \sin(\omega t - 240^\circ).$$

Στο διάκενο της μηχανής κατανέμονται τρία στάσιμα κύματα Μαγνητογερτικής Δυνάμεως (ΜΕΔ) τα οποία διαφέρουν φυσικά μεταξύ τους κατά 120° :

$$F_a = F_o \sin \omega t \sin \theta$$

$$F_b = F_o \sin(\omega t - 120^\circ) \sin(\theta - 120^\circ) \quad (4.7)$$

$$F_c = F_o \sin(\omega t - 240^\circ) \sin(\theta - 240^\circ).$$

Το συνισταμένο κύμα ΜΕΔ θα προκύψει από την πρόσθεση των τριών συνιστωσών κυμάτων:

$$F = F_a + F_b + F_c$$

$$\text{ή } F(\theta, t) = F_o [\sin \omega t \sin \theta + \sin(\omega t - 120^\circ) \sin(\theta - 120^\circ) + \sin(\omega t - 240^\circ) \sin(\theta - 240^\circ)].$$

Η πρόσθεση γίνεται με βάση την ανάλυση του γινομένου:

$$\eta \mu \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\eta \mu(\alpha + \beta) + \eta \mu(\alpha - \beta)]$$

οπότε προκύπτει:

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} F_o \sin(\theta - \omega t). \quad (4.8)$$

Το κύμα της συνισταμένης ΜΕΔ (εξ. 4.8) είναι ημιτονοειδής συνάρτηση της γωνίας χώρου θ , έχει σταθερό πλάτος και γωνία φάσεως χώρου ωt , η οποία είναι γραμμική συνάρτηση του χρόνου. Η γωνία ωt παρέχει περιστροφή ολόκληρου του κύματος ΜΕΔ στο διάκενο με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω .

4.3.2 Μηχανικά και ηλεκτρικά ακτίνια.

Στο σχήμα 4.3γ(α), δίδεται μια στοιχειώδη τετραπολική τριφασική ασύγχρονη μηχανή. Αν ξεκινήσουμε από το σημείο Α και διανύσουμε το μήκος της περιφέρειας του στάτι (2π μηχανικά ακτίνια) με κατεύθυνση αντίθετη των δεικτών του ρολογιού θα συναντήσουμε μαγνητικά πεδία με τις εξής πολικότητες: $N_1 S_1 - N_2 S_2 - N_3 S_3 - N_4 S_4$.

Αυτό αντιστοιχεί σε δύο πλήρεις ηλεκτρικούς κύκλους (4π ηλεκτρικά ακτίνια) όπως δίδεται στο σχήμα 4.3γ(β).

Για μια τετραπολική μηχανή, μια πλήρης μηχανική περιστροφή αντιστοιχεί σε δύο πλήρεις κύκλους του μαγνητικού πεδίου. Για μια Ρ-πολική μηχανή ισχύει:

$$\theta = \frac{P}{2} \theta_m \quad (4.9)$$

όπου: θ και θ_m είναι τα ηλεκτρικά και μηχανικά ακτίνια αντίστοιχα.

Η κυκλική συχνότητα ω (rad/s) των ρευμάτων του στάτι συνδέεται με την ταχύτητα περιστροφής του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου σε μηχανικά ακτίνια ανά δευτερόλεπτο ως εξής:

$$\omega_m = \frac{2}{P} \omega (= 2\pi f) = 4\pi \frac{f}{P} \text{ μηχανικά ακτίνια / s.} \quad (4.10)$$

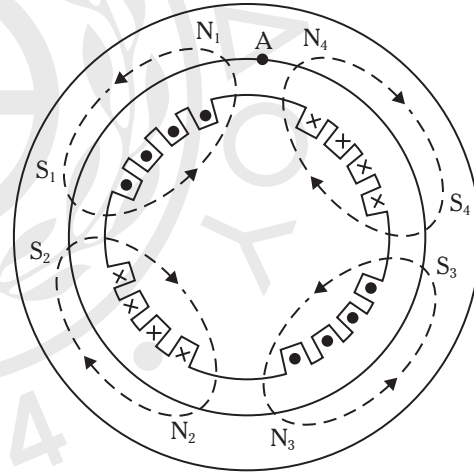
Εφόσον κάθε πλήρης περιστροφή αντιστοιχεί σε 2π μηχανικά ακτίνια, η ταχύτητα σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο είναι:

$$n_s = 2 \frac{f}{P} \text{ c/s.} \quad (4.11)$$

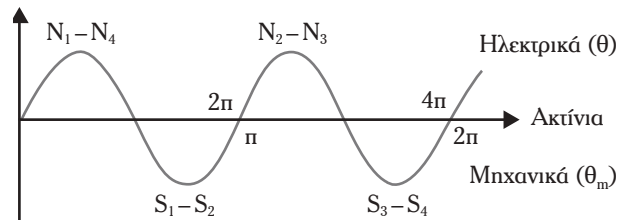
Η ταχύτητα περιστροφής ανά λεπτό είναι:

$$n_s = \frac{120f}{P} \text{ ΣΑΛ} \quad (4.12)$$

όπου n_s , είναι η σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.



(α)



(β)

Σχ. 4.3γ

(α) Στοιχειώδης τετραπολική μηχανή. (β) Χωρική κατανομή του μαγνητικού πεδίου και σχέση μεταξύ μηχανικών (θ_m) και ηλεκτρικών ακτινίων (θ).

4.3.3 Επαγόμενες τάσεις – Η έννοια της ολίσθησης.

Τροφοδοτούμε τα τυλίγματα του στάτη, ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια, με ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων, σταθερής συχνότητας. Θεωρούμε το τυλίγμα του δρομέα βραχυκυκλωμένο και ο δρομέας είναι ακίνητος.

Τα ρεύματα του στάτη, αποτελούν ένα ισορροπημένο σύστημα και για λόγους συμμετρίας, καθορίζουν στο διάκενο ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, του οποίου η ταχύτητα περιστροφής (σύγχρονη ταχύτητα) συνδέεται με τη συχνότητα και τον αριθμό των πόλων ως εξής:

$$n_s = \frac{120f_1}{P} \quad (4.13)$$

όπου: f_1 είναι η συχνότητα της τάσεως δικτύου και P ο αριθμός των μαγνητικών πόλων.

Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει στους αγωγούς του στάτη και του δρομέα ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις (ΗΕΔ), οι τιμές των οποίων δίδονται ως εξής:

$$E_1 = K_1 f_1 \Phi_R N_1 \quad (4.14)$$

$$E_2 = K_2 f_2 \Phi_R N_2 \quad (\text{δρομέας ακίνητος})$$

όπου E_1 είναι η επαγόμενη ΗΕΔ σε κάθε φάση του στάτη, η οποία αποτελείται από N_1 ενεργούς αγωγούς. Με $K_1 = 2K_{f1}K_{a1}$ συμβολίζουμε τον συντελεστή τυλίγματος του στάτη, Φ_R είναι η κύρια ροή η οποία «σαρώνει» κάθε φάση του στάτη και του δρομέα και E_2 είναι η ΗΕΔ, η οποία επάγεται σε κάθε φάση του δρομέα και αποτελείται από N_2 ενεργούς αγωγούς. $K_2 = 2K_{f2}K_{a2}$ (γνωστό και ως συντελεστής του K_{app}) είναι ο συντελεστής τυλίγματος, ο οποίος μπορεί να είναι αριθμητικά διαφορετικός από τον συντελεστή τυλίγματος K_1 του στάτη. Όταν ο δρομέας είναι ακίνητος η συχνότητα των απαγομένων ΗΕΔ είναι ίδια με εκείνη του δικτύου.

Παρατηρούμε ότι, όπως στους Μ/Σ, ο λόγος E_1/E_2 καθορίζει τον λόγο μετασχηματισμού K_n του κινητήρα:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{K_1 N_1}{K_2 N_2} = K_n \quad (4.15)$$

Υποθέτουμε ότι ο δρομέας στρέφεται με σταθερή μηχανική ταχύτητα n , κατά την φορά του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, έτσι ώστε $0 < n < n_s$. Ο δρομέας τότε «βλέπει» το στρεφόμενο πεδίο, όχι στην σύγχρονη ταχύτητα n_s , αλλά στην ταχύτητα ολίσθησης $n_s - n$. Ο λόγος μεταξύ της ταχύτητας ολίσθησης και της σύγχρονης ταχύτητας ονομάζεται **ολίσθηση s** :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4.16)$$

Η ολίσθηση εκφράζει το κλάσμα της περιστροφής, το οποίο ο δρομέας χάνει για κάθε πλήρη κύκλο περιστροφής του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Από την εξίσωση 4.16, η ολίσθηση χαρακτηρίζει τη σχετική ταχύτητα μεταξύ του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και του δρομέα μιας ασύγχρονης μηχανής όχι μόνο στη λειτουργία της σαν κινητήρας, αλλά και όταν λειτουργεί σαν γεννήτρια και σαν πέδη (σχ. 4.38).

$\infty - \leftarrow$	0	1	$\rightarrow + \infty$
Γεννήτρια	Κινητήρας	Πέδη	$s = n_s - n/n_s$

Σχ. 4.38

Λειτουργία της επαγωγικής μηχανής σαν γεννήτρια, σαν κινητήρας και σαν πέδη για $s < 0$, $0 < s < 1$ και $s > 1$ αντίστοιχα.

Στη λειτουργία της γεννήτριας είναι $n > n_s$, ενώ η ολίσθηση s γίνεται αρνητική.

Στη λειτουργία της πέδης είναι $n < 0$ (ο δρομέας στρέφεται αντίθετα προς το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο) γι' αυτό η ολίσθηση s παίρνει τιμές μεγαλύτερες του 1. Στη λειτουργία του κινητήρα η ταχύτητα n , παίρνει τιμές μεταξύ 0 και n_s και η ολίσθηση s παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1.

Η ολίσθηση s χαρακτηρίζει την σχετική ταχύτητα του δρομέα ως προς το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτή η σχετική ταχύτητα προκαλεί στον δρομέα τάσεις εξ επαγωγής συχνότητας f_2 (συχνότητα ολίσθησης), η οποία είναι διαφορετική απ' την συχνότητα f_1 του δικτύου.

Η συχνότητα f_2 εξαρτάται απ' την ταχύτητα ολίσθησης μεταξύ του στρεφόμενου πεδίου και του δρομέα ως εξής:

$$f_2 = \frac{(n_s - n)P}{120} \quad (4.17)$$

Πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με n_s την εξίσωση 4.17 προκύπτει:

$$f_2 = \frac{(n_s - n)}{n_s} \cdot \frac{n_s P}{120} = s f_1 \quad (4.18)$$

Η συχνότητα f_2 των ΗΕΔ εξ επαγωγής στον δρομέα συνδέεται με τη συχνότητα f_1 του δικτύου με μια απλή σχέση, η οποία μας επιτρέπει να εκφράσουμε την επαγόμενη τάση σε κάθε φάση του δρομέα ως εξής:

$$E_{2s} = K_2 \Phi_R f_2 N_2 = K_2 \Phi_R s f_1 N_2 = s E_2 \quad (4.19)$$

όπου: E_{2s} η επαγόμενη ΗΕΔ στον δρομέα στην ολί-

σθηση s , ενώ E_2 η επαγόμενη ΗΕΔ στον δρομέα όταν η ολίσθηση $s = 1$ (ο δρομέας είναι ακίνητος).

4.3.4 Θεμελιώδεις εξισώσεις.

Έστω ότι ο ασύγχρονος κινητήρας με δακτυλίδια, στη διάρκεια λειτουργίας του, έχει τα τυλίγματα του δρομέα βραχυκυκλωμένα (σχ. 4.3ε), στα οποία όμως ρέουν ρεύματα που οφείλονται στις ΗΕΔ του δρομέα.

Η μελέτη του ασύγχρονου κινητήρα δεν διαφέρει πολύ από την αντίστοιχη του Μ/Σ. Θεωρούμε ότι ο κινητήρας έχει μόνο συμμετρικά τριφασικά τυλίγματα, τα οποία τροφοδοτούνται με συμμετρικές τριφασικές τάσεις.

Αυτή η παραδοχή μάς οδηγεί να αναφερόμαστε στο ανά φάση ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του κινητήρα (σχ. 4.3στ).

1) Ηλεκτρικό κύκλωμα του στάτη.

Κάθε φάση του στάτη παρουσιάζει μια πραγματική αντίσταση R_1 και μια αντίδραση σκεδάσεως X_1 . Στη φάση αυτή επάγεται μια τάση E_1 η οποία οφείλεται στη κύρια ροή Φ_R . Αυτή η τάση ενεργεί σαν αντι-ΗΕΔ ως προς την τάση ακροδεκτών V_1 .

Η **θεμελιώδης εξίσωση του ηλεκτρικού κύκλωματος του στάτη** είναι:

$$V_1 = E_1 + I_1(R_1 + jX_1) \quad (4.20)$$

όπου I_1 το ρεύμα στην κάθε φάση του στάτη όταν ο κινητήρας λειτουργεί με φορτίο.

2) Ηλεκτρικό κύκλωμα του δρομέα.

Κάθε φάση του δρομέα παρουσιάζει μια πραγματική αντίσταση R_2 και μια αυτεπαγωγή σκεδάσεως L_2 . Η τελευταία καθορίζει, όταν στο τυλίγμα ρέει το ρεύμα δρομέα I_2 , μια άεργο πώση τάσεως η οποία οφείλεται στην αντίδραση:

$$X_{2s} = 2\pi f_2 L_2 \quad (4.21)$$

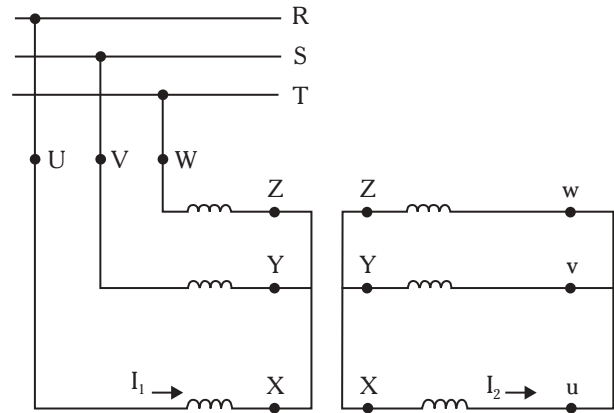
της οποίας η τιμή είναι συνάρτηση της συχνότητας f_2 των ρευμάτων του δρομέα και συνεπώς της ολισθήσεως s .

Όταν ο δρομέας είναι ακίνητος, η αντίδραση σκεδάσεως της φάσεως του δρομέα είναι:

$$X_2 = 2\pi f_1 L_2. \quad (4.22)$$

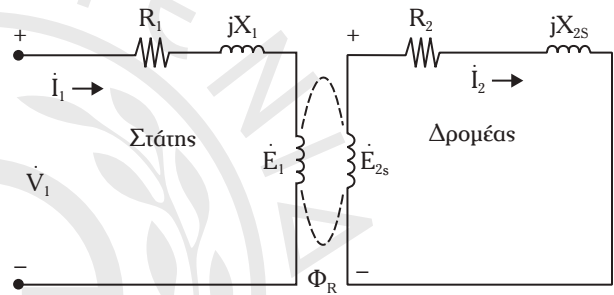
Όταν ο δρομέας στρέφεται με ταχύτητα n ως προς τη σύγχρονη ταχύτητα n_s , τότε η αντίδραση σκεδάσεως της κάθε φάσεως του δρομέα είναι:

$$X_{2s} = 2\pi s f_1 L_2 = sX_2.$$



Σχ. 4.3ε

Σχηματική παράσταση τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα.



Φ_R : Κύρια μαγνητική ροή.

R_1, R_2 : ωμικές αντιστάσεις/φάση του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα.

E_1 : αντι-ΗΕΔ/φάση που επάγεται σε κάθε φάση του στάτη από το σιρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

X_1 : ανά φάση αντίδραση σκεδάσεως του στάτη.

E_{2s} : επαγόμενη τάση από το σιρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σε κάθε φάση του δρομέα στη συχνότητα f_2 .

X_{2s} : αντίδραση σκεδάσεως/φάση του δρομέα στη συχνότητα f_2 .

Σχ. 4.3στ

Μονοφασικό κύκλωμα του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα.

Η αντίδραση σκεδάσεως της κάθε φάσεως του δρομέα είναι συνάρτηση της ολισθήσεως. Η **θεμελιώδης εξίσωση τάσεων/φάσεως του ηλεκτρικού κυκλώματος του δρομέα** είναι:

$$E_{2s} = (R_2 + jX_{2s})I_2 \quad (4.23)$$

$$\text{ή} \quad sE_2 = (R_2 + jX_2)I_2. \quad (4.24)$$

3) Μαγνητικό κύκλωμα.

Η κύρια ροή Φ_R η οποία εμπλέκει τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα του ασύγχρονου κινητήρα, όταν λειτουργεί με φορτίο, είναι αποτέλεσμα της ταυ-

τόχρονος δράσεως των ΜΕΔ του στάτη F_1 και του δρομέα F_2 . Ισχύει, αμελώντας τις ροές σκεδάσεως (**Νόμος του Hopkinson**):

$$1,35K_{a1}N_1I_1 - 1,35K_{a2}N_2I_2 = \bar{\Phi} \sum \bar{R} = 1,35K_{a1}I_{\phi} \quad (4.25)$$

Για την ισορροπία των ΜΕΔ ισχύει η ακόλουθη εξίσωση γνωστή και ως **εξίσωση των ΜΕΔ**:

$$F_1 + F_2 = F_{\phi} \\ K_1N_1I_1 - K_2N_2I_2 = K_1N_1I_{\phi} \quad (4.26)$$

όπου I_{ϕ} είναι το ρεύμα διεγέρσεως, δηλαδή το ρεύμα το οποίο όταν ρέει αποκλειστικά στα τυλίγματα του στάτη, προκαλεί τα ίδια μαγνητικά αποτελέσματα που προκαλούν συγχρόνως το ρεύμα του στάτη και του δρομέα.

Για τα K_1 και K_2 ισχύουν:

$$K_1 = 4,44K_{a1} \quad \text{και} \quad K_2 = 4,44K_{a2}.$$

Αρχικά η εξίσωση 4.26 φαίνεται ότι δεν είναι σωστή, επειδή περιέχει μεγέθη με διαφορετική συχνότητα. Το ρεύμα I_2 έχει διαφορετική συχνότητα από τα ρεύματα I_1 και I_{ϕ} . Για να κατανοήσουμε τη σημασία της εξίσωσης 4.26, πρέπει να δούμε το αποτέλεσμα της δράσεως του ρεύματος φορτίου I_2 στη λειτουργία του κινητήρα.

Τα τριφασικά ρεύματα, όταν διαρρέουν τα τυλίγματα του δρομέα παράγουν ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο ως προς τον δρομέα. Αυτό το μαγνητικό πεδίο στρέφεται, **ως προς τον δρομέα**, με ταχύτητα η οποία αντιστοιχεί στη συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα, δηλαδή στρέφεται με ταχύτητα $n_s - n$ ΣΑΛ. Ο δρομέας στρέφεται, **ως προς τον στάτη**, με ταχύτητα n ΣΑΛ, γι' αυτό το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο οφείλεται στα ρεύματα του δρομέα θα στρέφεται, **ως προς τον στάτη**, με ταχύτητα $(n_s - n) + n$ ΣΑΛ, δηλαδή με τη σύγχρονη ταχύτητα.

Οπότε προκύπτει ότι το μαγνητικό πεδίο του δρομέα στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, με την οποία στρέφεται το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Στην εξίσωση 4.26 οι ΜΕΔ στρέφονται με τη σύγχρονη ταχύτητα μεταξύ τους και με την κύρια μαγνητική ροή (αν και τα ρεύματα έχουν διαφορετική συχνότητα) και γι' αυτό μπορούν να συντεθούν διανυσματικά.

- Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Ένας 8-πολικός εναλλακτήρας έχει ταχύτητα

750 ΣΑΛ και τροφοδοτεί έναν 10-πολικό επαγωγικό κινητήρα. Ποια είναι η πραγματική ταχύτητα του κινητήρα όταν η ολίσθηση είναι 3%;

Λύση.

Η σύγχρονη ταχύτητα του εναλλακτήρα είναι:

$$n_s = 750 \text{ ΣΑΛ.}$$

Η συχνότητα είναι:

$$f = \frac{n_s P}{120} = \frac{8 \cdot 750}{120} = 50 \text{ Hz.}$$

Επειδή η συχνότητα τροφοδοτίσεως του κινητήρα είναι 50 Hz, η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα είναι:

$$n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \cdot 50}{10} = 600 \text{ ΣΑΛ.}$$

Η ολίσθηση είναι: $s = 3\%$

$$\acute{\eta} \quad s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad \acute{\eta} \quad 3 = \frac{600 - n}{600} \cdot 100$$

$$\acute{\eta} \quad n = 600 - \frac{3 \cdot 600}{100} = 600 - 18 = 582 \text{ ΣΑΛ.}$$

Άσκηση 2.

Ένας 6-πολικός στα 50 Hz, επαγωγικός κινητήρας στρέφεται με 450 ΣΑΛ. Να υπολογίσετε τη συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα και την ολίσθηση.

Λύση.

Η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα είναι:

$$n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \cdot 50}{6} = \frac{3.000}{6} = 500 \text{ ΣΑΛ.}$$

Η ταχύτητα ολίσθησεως είναι:

$$n_s - n = 500 - 450 = 50 \text{ ΣΑΛ.}$$

Η ολίσθηση είναι:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} 100 = \frac{500 - 450}{500} 100 = 10\%.$$

Η συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα είναι:

$$f_2 = sf_1 = 10 \frac{50}{100} = 5 \text{ c/s.}$$

Άσκηση 3.

Ένας επαγωγικός 10-πολικός κινητήρας, στρέφεται στους 50 c/s. Αν η ταχύτητα περιστροφής του

όταν λειτουργεί στο πλήρες φορτίο είναι 550 ΣΑΛ, να υπολογίσετε την ολίσθηση.

Λύση.

Η σύγχρονη ταχύτητα είναι:

$$n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \cdot 50}{10} = 600 \text{ ΣΑΛ.}$$

Η ταχύτητα ολίσθησης είναι:

$$n_s - n = 600 - 550 = 50 \text{ ΣΑΛ.}$$

Η ολίσθηση είναι:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} 100 = \frac{600 - 550}{600} 100 = 8,3\%.$$

4.4 Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα στη λειτουργία με φορτίο.

Από τις τρεις θεμελιώδεις εξισώσεις 4.20, 4.24 και 4.26 προκύπτει ότι υπάρχει αναλογία μεταξύ του ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια και των Μ/Σ.

Όταν ο δρομέας είναι ακίνητος ($s = 1$) οι δύο τύποι μηχανών (Μ/Σ και ασύγχρονος κινητήρας) παρουσιάζουν τέλεια αναλογία. Η παρουσία του διάκενου στους τριφασικούς ασύγχρονους κινητήρες απαιτεί υψηλό ρεύμα μαγνήτισης, με αποτέλεσμα οι αντιδράσεις μαγνήτισης να έχουν μεγάλες τιμές.

Η λειτουργία ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με φορτίο, μπορεί να περιγραφεί μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος όμοιου με εκείνου του Μ/Σ. Το ισοδύναμο κύκλωμα σχεδιάζεται με μεγέθη του δρομέα (δευτερεύον) ανηγμένα στον στάτη (πρωτεύον).

Διαιρώντας την εξίσωση 4.24 με την ολίσθηση s , προκύπτει:

$$E_2 = \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) I_2. \quad (4.27)$$

Πολλαπλασιάζοντας την εξίσωση 4.27 με τον λόγο μετασχηματισμού $K_n = \frac{K_1 N_1}{K_2 N_2}$ προκύπτει:

$$\frac{K_1 N_1}{K_2 N_2} \cdot E_2 = \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \cdot \left(\frac{K_1 N_1}{K_2 N_2} \right)^2 \cdot \frac{K_2 N_2}{K_1 N_1} \cdot I_2 \quad (4.28)$$

όπου: $\frac{K_1 N_1}{K_2 N_2} \cdot E_2$ είναι η ΗΕΔ E_1 του στάτη,

ενώ $\frac{R_2}{s} \cdot \left(\frac{K_1 N_1}{K_2 N_2} \right)^2$, $\left(\frac{K_1 N_1}{K_2 N_2} \right)^2 \cdot X_2$ είναι η αντίσταση

και η αντίδραση σκεδάσεως, αντίστοιχα, του δρομέα ανηγμένες στον στάτη.

$$\text{Είναι:} \quad \frac{R_2}{s} \cdot \left(\frac{K_1 N_1}{K_2 N_2} \right)^2 = \frac{R_{2r}}{s} \quad (4.29)$$

$$\left(\frac{K_1 N_1}{K_2 N_2} \right)^2 X_2 = X_{2r}. \quad (4.30)$$

Ο όρος $\frac{K_2 N_2}{K_1 N_1} \cdot I_2$ εκφράζει το ρεύμα του δρομέα ανηγμένο στον στάτη:

$$\frac{K_2 N_2}{K_1 N_1} \cdot I_2 = I_{2r}. \quad (4.31)$$

Η εξίσωση 4.28 γίνεται:

$$E_1 = \left(\frac{R_{2r}}{s} + jX_{2r} \right) \cdot I_{2r}. \quad (4.32)$$

Η εξίσωση 4.32 εκφράζει τον **Δεύτερο Νόμο του Kirchhoff** στον βρόχο του δρομέα του ισοδύναμου κυκλώματος του σχήματος 4.4α(α). Στο σχήμα 4.4α(β), δίδεται το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση του ασύγχρονου κινητήρα ανηγμένο στον στάτη.

Η εξίσωση των ρευμάτων στον κόμβο Α είναι:

$$I_1 - \frac{K_2 N_2}{K_1 N_1} \cdot I_2 = I_\phi \quad (4.33)$$

$$\text{ή} \quad I_1 - I_{2r} = I_\phi. \quad (4.34)$$

Στο σχήμα 4.4α(α) το κύκλωμα μεταξύ των σημείων Α και Β ονομάζεται **κύκλωμα διεγέρσεως**. Η R_c εκπροσωπεί τις απώλειες πυρήνα, ενώ ο έλεγχος της αέργου ισχύος γίνεται μέσω της αντιδράσεως μαγνήτισης X_m . Το ρεύμα διεγέρσεως I_ϕ αποτελείται από δύο συνιστώσες: το ρεύμα απωλειών πυρήνα I_c και το ρεύμα μαγνήτισης I_m , το οποίο είναι υπεύθυνο για την παραγωγή της κύριας μαγνητικής ροής Φ_R .

4.4.1 Ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.4α(α) χρησιμοποιείται για να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια. Υπολογίζονται οι τάσεις, τα ρεύματα, οι απώλειες ισχύος και οι ροπές οι οποίες συνδέονται με τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας της μηχανής.

Ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο ισχύ (ισχύς εισόδου):

$$P_{in} = 3V_1 I_1 \cos\phi_1 \quad (4.35)$$

όπου: V_1 και I_1 είναι οι ενεργές τιμές της τάσεως και του ρεύματος της μίας φάσεως και Φ_1 η διαφορά φάσεως ρεύματος (I_1) και τάσεως (V_1).

Ένα μέρος της P_{in} μετατρέπεται σε θερμότητα στα τυλίγματα του στάτη:

$$P_{cust} = 3I_1^2 R_1. \quad (4.36)$$

Το υπόλοιπο μέρος της ισχύος μεταφέρεται στον δρομέα μέσω του διάκενου:

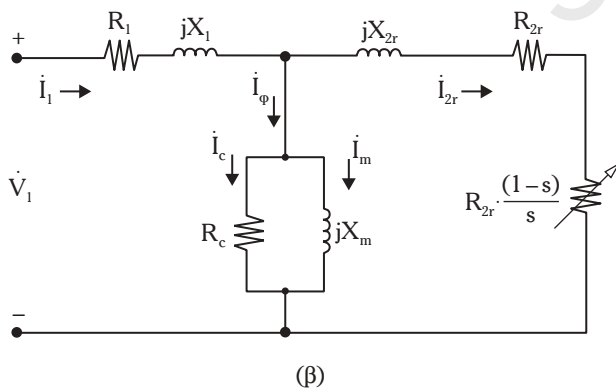
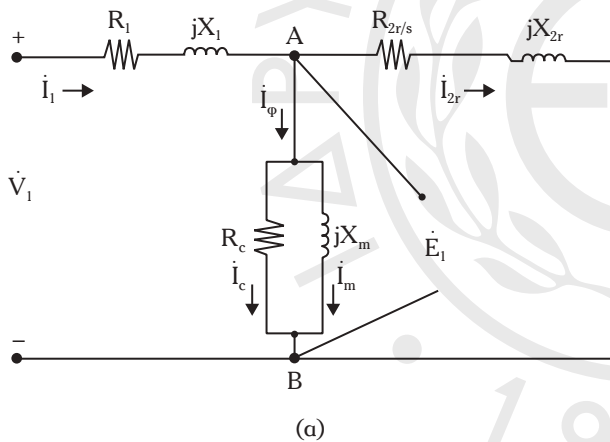
$$P_g = P_{in} - (P_{cust} + P_c) \quad (4.37)$$

όπου: P_c οι απώλειες πυρήνα του στάτη και P_g η ισχύς του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου (ή η ηλεκτρομαγνητική ισχύς).

Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς P_g εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_g = 3I_{2r}^2 \left(\frac{R_{2r}}{s} \right). \quad (4.38)$$

Από την εξίσωση 4.38 προκύπτει ότι οι απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων του δρομέα είναι:



Σχ. 4.4α

(α), (β) Πλήρη ισοδύναμα κυκλώματα μιας φάσεως ασύγχρονου κινητήρα ανηγμένα στον στάτη.

$$P_{cur} = 3I_{2r}^2 R_{2r} = sP_g. \quad (4.39)$$

Η αντίσταση $\frac{R_{2r}}{s}$ διαιρείται σε δύο αντιστάσεις. Η μία αντίσταση R_{2r} εκπροσωπεί τις απώλειες χαλκού του δρομέα, ενώ η $\frac{1-s}{s}R_{2r}$ εκφράζει τον ενεργειακό μετασχηματισμό, ο οποίος γίνεται στον δρομέα. Το ισοδύναμο κύκλωμα με τις δύο αντιστάσεις στον δρομέα δίδεται στο σχήμα 4.4α(β). Είναι:

$$\frac{R_{2r}}{s} = R_{2r} + \frac{R_{2r}}{s} - R_{2r} = R_{2r} + \frac{1-s}{s}R_{2r}. \quad (4.40)$$

Πολλαπλασιάζοντας την εξίσωση 4.40 με τον όρο I_{2r}^2 , προκύπτει:

$$R_{2r}I_{2r}^2 + \frac{1-s}{s}I_{2r}^2 = R_{2r}I_{2r}^2 + \frac{1-s}{s}R_{2r}I_{2r}^2. \quad (4.41)$$

Ο πρώτος όρος της εξισώσεως 4.41, εκφράζει τις απώλειες χαλκού της μιας φάσεως του δρομέα, ενώ ο δεύτερος εκφράζει την εσωτερική αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύ (P_d). Η χρήσιμη μηχανική ισχύς προκύπτει αν από την εσωτερική ισχύ αφαιρεθούν οι απώλειες ισχύος λόγω τριβών και ανεμισμού P_l :

$$P_{out} = P_d - P_l \quad (4.42)$$

όπου: P_d , είναι η εσωτερική μηχανική ισχύς και P_l , οι απώλειες ισχύος λόγω τριβών και ανεμισμού.

Η εσωτερική ροπή (ή ηλεκτρομαγνητική ροπή) που αναπτύσσεται στον δρομέα της μηχανής είναι:

$$T = T_d = \frac{P_g}{\omega} \quad (4.43)$$

όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα σε μηχανικά ακτίνια ανά δευτερόλεπτο του δρομέα.

$$\text{Είναι:} \quad \omega = \omega_s (1-s) \quad (4.44)$$

όπου ω_s είναι η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα σε μηχανικά ακτίνια ανά δευτερόλεπτο.

Η εξίσωση 4.43 με βάση την εξίσωση 4.44 γίνεται:

$$T_d \omega_s (1-s) = P_g = 3I_{2r}^2 R_{2r} \frac{(1-s)}{s}$$

$$\text{και} \quad T = T_d = \frac{P_d}{\omega_s}. \quad (4.45)$$

Η ωφέλιμη ροπή στον άξονα της μηχανής είναι:

$$T_{out} \equiv T_{αξ} = \frac{P_{out}}{\omega} = \frac{P_{out}}{(1-s)\omega_s}. \quad (4.46)$$

Στο σχήμα 4.4β, δίδεται το διάγραμμα ροής ισχύος τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα.

Στην περίπτωση του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια οι απώλειες στις ψήκτρες είναι μικρές και συνήθως αμελούνται στο ενεργειακό ισοζύγιο του κινητήρα.

4.4.2 Διανυσματικό διάγραμμα ασύγχρονου κινητήρα.

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.4α(α) προκύπτει το διανυσματικό διάγραμμα του ασύγχρονου κινητήρα. Στο σχήμα 4.4γ(α) δίδεται το διανυσματικό διάγραμμα του στάτη, ενώ στο σχήμα 4.4γ(β) δίδεται το διανυσματικό διάγραμμα του δρομέα, χωριστά, για λόγους ευκρίνειας.

Το ρεύμα διεγέρσεως I_ϕ έχει δύο συνιστώσες, το ρεύμα απωλειών πυρήνα I_c , σε φάση με την αντι-ΗΕΔ E_1 και το ρεύμα μαγνήτισης I_m , σε φάση με τη συνισταμένη μαγνητική ροή Φ_R . Η \dot{E}_1 η οποία επάγεται στον στάτη προηγείται της μαγνητικής ροής Φ_R κατά 90° . Η ίδια αντι-ΗΕΔ κατά φάση και μέτρο επάγεται στο δρομέα, γιατί αναφερόμαστε στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.4α(α).

4.4.3 Καθορισμός της αναπτυσσόμενης ροπής T του ασύγχρονου κινητήρα – Μελέτη της συναρτήσεως $T = f(s)$.

Στο ισοδύναμο, ανά φάση, μονοφασικό κύκλωμα του ασύγχρονου κινητήρα [σχ. 4.4α(α)] η αντίσταση $\frac{R_{2r}}{s}$ εκπροσωπεί την ισχύ του στρεφόμενου πεδίου. Για τον τριφασικό ασύγχρονου κινητήρα η ισχύς του στρεφόμενου πεδίου είναι:

$$P_g = 3I_{2r}^2 \frac{R_{2r}}{s} (1-s). \quad (4.47)$$

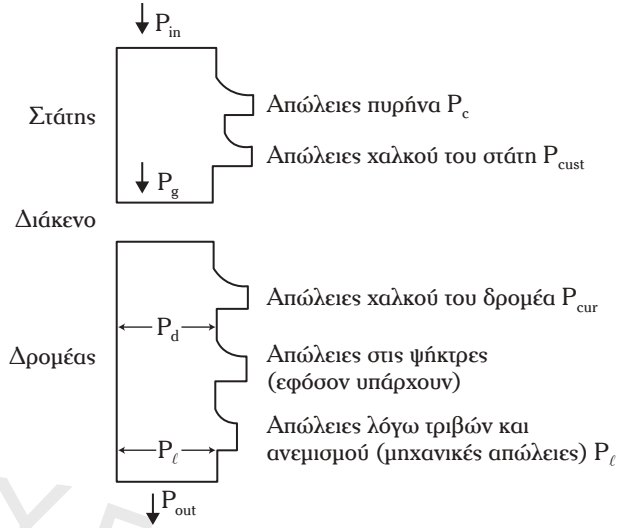
Η ροπή η οποία αναπτύσσεται στον δρομέα της μηχανής είναι:

$$T = \frac{P_g}{\omega} = \frac{3I_{2r}^2 \cdot \frac{R_{2r}}{s} (1-s)}{\omega_s (1-s)}. \quad (4.48)$$

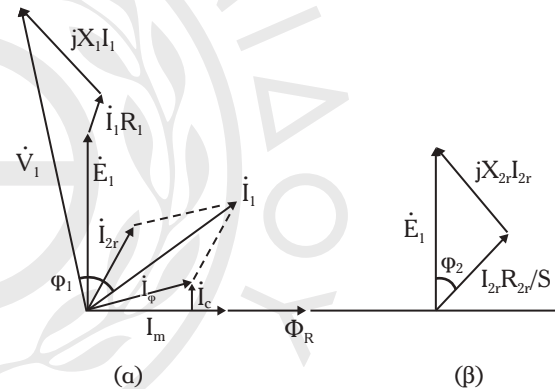
Αν οριστεί το ρεύμα I_{2r} , τότε ορίζεται η ισχύς του στρεφόμενου πεδίου και η ροπή που αναπτύσσεται στον δρομέα της μηχανής.

Για τον ορισμό του ρεύματος I_{2r} χρησιμοποιείται το προσεγγιστικό ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.4δ, που προκύπτει από το κύκλωμα του σχήματος 4.4α(α), κάνοντας τις εξής παραδοχές:

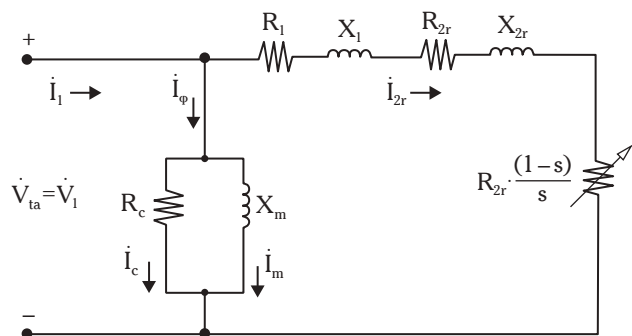
- 1) Δεχόμαστε ότι οι απώλειες λόγω τριβών και



Σχ. 4.4β
Διάγραμμα ροής ισχύος σε τριφασικό ασύγχρονου κινητήρα.



Σχ. 4.4γ
Διανυσματικά διαγράμματα ασύγχρονου κινητήρα (α) του στάτη, (β) του δρομέα.



Σχ. 4.4δ
Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα.

ανεμισμού συνδυάζονται με τις απώλειες πυρήνα, ώστε ολόκληρες οι απώλειες λόγω περιστροφής να αντιπροσωπεύονται μέσω της R_c του παράλληλου κλάδου.

2) Μετατοπίζεται ο παράλληλος κλάδος στους ακροδέκτες του κινητήρα.

Αυτή η μετατόπιση αντισταθμίζεται, κατά προσέγγιση, αν αφαιρεθεί από την επιβαλλόμενη τάση V_1 η πώση τάσεως που προκαλείται από το ρεύμα κενού φορτίου στην σύνθετη αντίσταση του στάτη.

Χρησιμοποιείται η διορθωμένη τάση των ακροδεκτών:

$$|V_{ta}| = |V_1| - |I_\phi| \cdot \sqrt{(R_1^2 + X_1^2)}. \quad (4.49)$$

Η αριθμητική τιμή αντί της διανυσματικής αφαιρέσεως στην περίπτωση αυτή δίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Πολλές φορές θεωρείται, προσεγγιστικά, ότι η διορθωμένη τάση V_{ta} συμπίπτει με την τάση του δικτύου V_1 .

Από το απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.48 προκύπτει:

$$I_{2r} = \frac{V_{ta} \equiv V_1}{\left(R_1 + \frac{R_{2r}}{s}\right) + j(X_1 + X_{2r})}. \quad (4.50)$$

Το μέτρο της εξίσωσης 4.50 είναι:

$$I_{2r} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{2r}}{s}\right)^2 + (X_1 + X_{2r})^2}}. \quad (4.51)$$

Η εξίσωση 4.48, με βάση την εξίσωση 4.51, γίνεται:

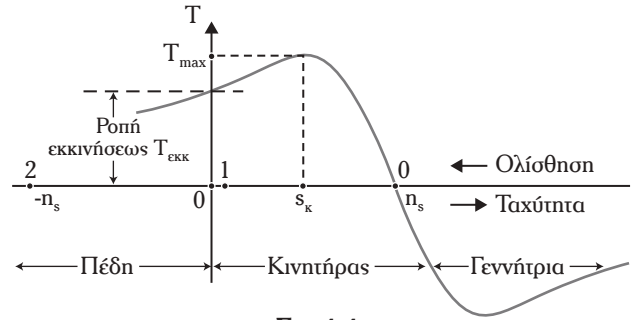
$$T = \frac{3V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{R_{2r}}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_{2r}}{s}\right)^2 + (X_1 + X_{2r})^2}. \quad (4.52)$$

Από την εξίσωση 4.52 προκύπτει ότι η ροπή που αναπτύσσεται στο δρομέα του ασύγχρονου κινητήρα εξαρτάται απ' την συχνότητα f της τάσεως του δικτύου, την τάση του δικτύου και την ολίσθηση s .

Στο σχήμα 4.4ε δίδεται η γραφική παράσταση της ροπής σε συνάρτηση με την ολίσθηση s μιας ασύγχρονης μηχανής.

Η ασύγχρονη μηχανή για $0 \leq s \leq 1$ λειτουργεί σαν κινητήρας. Στη μέγιστη ροπή T_{max} αντιστοιχεί η ολίσθηση s_k .

Από τη γραφική παράσταση του σχήματος 4.4ε, στη λειτουργία του κινητήρα διακρίνουμε δύο χαρα-



Σχ. 4.4ε

Γραφική παράσταση της συνάρτησεως $T=f(s)$.

κτηριστικά μεγέθη: Τη μέγιστη ροπή T_{max} και τη ροπή εκκινήσεως $T_{εκκ}$. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η μέγιστη ροπή, η ροπή εκκινήσεως και δίδεται η γραφική παράσταση της συνάρτησεως $\frac{T}{T_{max}} = f(s)$, για $R_1=0$.

1) Μέγιστη ροπή (T_{max}) ασύγχρονου κινητήρα.

Θέτοντας $K_y = \frac{3V_1^2}{\omega_s}$ και $x_o = x_1 + x_2$ στην εξίσωση 4.52, προκύπτει:

$$T = K_y \cdot \frac{\frac{R_{2r}}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_{2r}}{s}\right)^2 + x_o^2}. \quad (4.53)$$

Μηδενίζοντας την πρώτη παράγωγο της εξίσωσης 4.53 προκύπτει:

$$\frac{dT}{d\left(\frac{R_{2r}}{s}\right)} = 0 \quad (4.54)$$

$$R_1^2 + x_o^2 = \left(\frac{R_{2r}}{s}\right)^2. \quad (4.55)$$

Από την εξίσωση 4.55 προκύπτει η ολίσθηση s_k η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή:

$$s_k = \frac{R_{2r}}{\sqrt{R_1^2 + x_o^2}}. \quad (4.56)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή της R_{2r} από την εξίσωση 4.56 στην εξίσωση 4.53, προκύπτει η μέγιστη ροπή:

$$T_{max} = K_y \cdot \frac{1}{2\left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_o^2}\right)}. \quad (4.57)$$

Αν $R_1=0$, τότε η εξίσωση 4.56 γίνεται:

$$s_k = \frac{R_{2r}}{x_o} \quad (4.58)$$

και η εξίσωση 4.57 γίνεται:

$$T_{\max} = K_y \cdot \frac{1}{2x_o} = \frac{3V_1^2}{2\omega_s x_o} \quad (4.59)$$

Από την εξίσωση 4.57 προκύπτει ότι η T_{\max} ενός ασύγχρονου κινητήρα δεν εξαρτάται απ' την αντίσταση R_{2r} και την ολίσθηση s . Η T_{\max} εξαρτάται από το τετράγωνο της τάσεως V_1 (μέσω της σταθεράς K_y) και από τη συχνότητα f_1 του δικτύου.

2) Ροπή εκκίνησης ($T_{\text{εκκ}}$) ασύγχρονου κινητήρα.

Η εξίσωση 4.53 για $s = 1$ γίνεται:

$$T = K_y \cdot \frac{R_{2r}}{(R_1 + R_{2r})^2 + x_o^2} \quad (4.60)$$

Η μέγιστη ροπή εκκίνησης επιτυγχάνεται όταν:

$$\frac{dT_{\text{εκκ}}}{dR_{2r}} = 0, \quad (4.61)$$

$$\text{απ' όπου προκύπτει: } R_{2r} = \sqrt{R_1^2 + x_o^2}. \quad (4.62)$$

Η εξίσωση 4.62 αποτελεί την συνθήκη μέγιστης ροπής εκκίνησης. Ο παρανομαστής της εξίσωσης 4.60 είναι:

$$(R_1 + R_{2r})^2 + x_o^2 = R_1^2 + R_{2r}^2 + 2R_1R_{2r} + x_o^2 = (R_1^2 + x_o^2) + R_{2r}^2 + 2R_1R_{2r} = 2R_{2r}^2 + 2R_1R_{2r} \quad (4.63)$$

οπότε η εξίσωση 4.60, με βάση την 4.63 γίνεται:

$$\begin{aligned} T_{\text{εκκ. max}} &= K_y \cdot \frac{1}{2(R_1 + R_{2r})} = \\ &= K_y \cdot \frac{1}{2(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_o^2})}. \end{aligned} \quad (4.64)$$

3) Γραφική παράσταση της συναρτήσεως

$\frac{T}{T_{\max}} = f(s)$ για $R_1 = 0$. Τύπος του Kloss.

Η καμπύλη της ροπής $T = f(s)$ καθορίζεται από τα στοιχεία του κινητήρα που δίδονται στους καταλόγους των ηλεκτρικών ασύγχρονων μηχανών. Τα στοιχεία αυτά είναι η **ονομαστική ροπή** και η **ονομαστική ολίσθηση**.

Για τον καθορισμό της καμπύλης $T = f(s)$, εργαζόμαστε ως εξής:

$$\text{Αν είναι: } \frac{T}{K_y} = \frac{\frac{R_{2r}}{s}}{\left(\frac{R_{2r}}{s}\right)^2 + x_o^2} \quad (4.65)$$

τότε η ολίσθηση η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή για $R_1 = 0$ είναι:

$$s_k = \frac{R_{2r}}{x_o} \quad (4.66)$$

$$\text{και } x_o = \frac{R_{2r}}{s_k} \quad (4.67)$$

$$\text{Ισχύει: } \frac{T_{\max}}{K_y} = \frac{1}{2x_o} \quad (4.68)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις 4.65 και 4.68 προκύπτει:

$$\frac{T}{T_{\max}} = \frac{\frac{R_{2r}}{s}}{\left(\frac{R_{2r}}{s}\right)^2 + x_o^2} \cdot \frac{2x_o}{1} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (4.69)$$

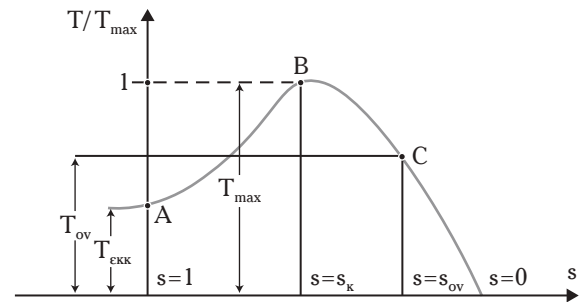
Η εξίσωση 4.69 αποτελεί τον γνωστό **Τύπο του Kloss**. Την εξίσωση 4.69 εφαρμόζουμε για $T = T_{\text{ov}}$, οπότε υπολογίζουμε την ολίσθηση s_k εφόσον η T_{\max} είναι γνωστή από πληροφορίες οι οποίες υπάρχουν στους καταλόγους των ηλεκτρικών ασύγχρονων μηχανών. Στη συνέχεια εφαρμόζουμε για δεύτερη φορά την εξίσωση 4.69 για τυχαία τιμή της ολίσθησεως s και βρίσκουμε μια τιμή της ροπής T .

Από την παραπάνω μελέτη της συναρτήσεως $T = f(s)$ κατασκευάζουμε την αντίστοιχη καμπύλη, η οποία δίδεται στο σχήμα 4.4στ.

Ο κατερχόμενος κλάδος του σχήματος 4.4στ, είναι ο κλάδος ευσταθούς λειτουργίας, ενώ ο ανερχόμενος κλάδος είναι ο κλάδος ασταθούς λειτουργίας. Ο λόγος:

$$\frac{T}{T_{\max}} = f(s)$$

είναι το μέτρο υπερφορτώσεως του ασύγχρονου κινητήρα.



Σχ. 4.4στ
Γραφική παράσταση της συναρτήσεως $\frac{T}{T_{\max}} = f(s)$.

4.5 Επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων του ασύγχρονου κινητήρα στη λειτουργία του.

Από την εξίσωση 4.52 προκύπτει ότι η ροπή είναι συνάρτηση των εξής παραμέτρων:

$$T = f(s, R_{2r}, R_1, x_o = x_1 + x_{2r}, \omega_s). \quad (4.70)$$

Στην προηγούμενη παράγραφο μελετήσαμε την επίδραση της μεταβολής της ολισθήσεως s και της ταχύτητας περιστροφής n , στην ροπή. Στην παράγραφο αυτή θα μελετηθεί η επίδραση των υπολοίπων παραμέτρων στην ροπή.

4.5.1 Επίδραση της μεταβολής της R_{2r} .

Θεωρήστε ότι η συνολική αντίσταση R_{2r} μεταβάλλεται από 0 μέχρι R_{2rmax} και ∞ (όταν οι δακτύλιοι είναι ανοικτοί). Η μεταβολή της R_{2r} πραγματοποιείται σε κινητήρες με δακτυλίδια. Η μεταβολή της R_{2r} στους κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα πραγματοποιείται με ειδικούς τρόπους, οι οποίοι θα εξετασθούν παρακάτω (παράγρ. 4.7).

Αν υποθέσουμε ότι η R_{2r} αυξάνεται, τότε συμβαίνουν τα εξής:

- 1) Το ρεύμα I_{2r} του δρομέα ελαττώνεται γιατί αυξάνεται η συνολική σύνθετη αντίσταση του δρομέα.
- 2) Η μέγιστη ροπή είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τη μεταβολή της R_{2r} :

$$T_{max} = \frac{K_y}{2(R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_o^2})}. \quad (4.71)$$

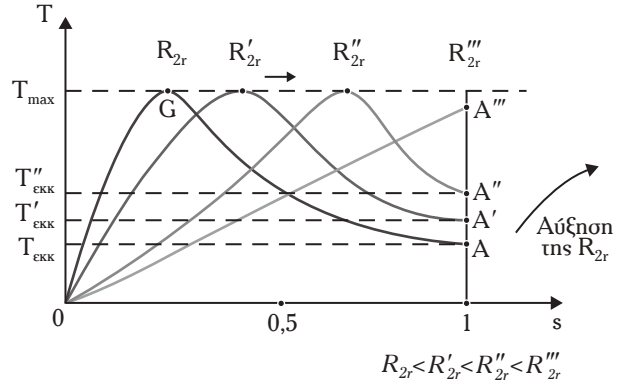
- 3) Η ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή:

$$s_k = \frac{R_{2r}}{\sqrt{R_1^2 + x_o^2}} \quad (4.72)$$

αυξάνεται ανάλογα με την R_{2r} . Όταν διπλασιάζεται η R_{2r} διπλασιάζεται και η s_k . Αυτό σημαίνει ότι το σημείο G (s_k, T_{max}) μετακινείται στο σχήμα 4.5, προς τα δεξιά (προς μεγαλύτερες τιμές της s).

Για $s_k = 1$, το σημείο G συμπίπτει με το σημείο A''' το οποίο αντιστοιχεί στη ροπή εκκινήσεως. Γι' αυτήν την τιμή της ολισθήσεως η μέγιστη ροπή συμπίπτει με τη ροπή εκκινήσεως.

Όταν $R_{2r} > \sqrt{R_1^2 + x_o^2}$, τότε $s_k > 1$ και η καμπύλη $T = f(s)$ θα τέμνει την ευθεία $s = 1$ σ' ένα σημείο με τον ανερχόμενο κλάδο της, πριν φθάσει στη μέγιστη τιμή του T . Στην περίπτωση αυτή η ροπή μειώνεται για οποιαδήποτε επί πλέον αύξηση της R_{2r} .



Σχ. 4.5

Οικογένεια καμπυλών $T = f(s)$ με παράμετρο R_{2r} .

Από τις καμπύλες του σχήματος 4.5 προκύπτει ότι για $T_{ov} = \text{σταθ.}$ η s_{ov} αυξάνεται. Η ονομαστική ταχύτητα n_{ov} ελαττώνεται όσο αυξάνεται η $R_{oλ}$. Η μηχανική ισχύς ($P_{in} \cong T \cdot n_{ov}$) ελαττώνεται όσο αυξάνεται η R_{2r} .

4.5.2 Επίδραση της μεταβολής των $R_1, x_o = x_1 + x_{2r}$.

Από την εξίσωση:

$$|i_{2r}| = \frac{|\dot{V}_1|}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{2r}}{s}\right)^2 + (x_1 + x_{2r})^2}} \quad (4.73)$$

που είναι γνωστή και ως **εξίσωση του μέτρου του ρεύματος** προκύπτει ότι η αύξηση των παραμέτρων $R_1, x_1 + x_{2r}$ συνεπάγεται ελάττωση του ρεύματος του δρομέα.

Από την εξίσωση:

$$T = \frac{3V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{1}{(R_1 + R_{2r})^2 + (x_1 + x_{2r})^2} \quad (4.74)$$

προκύπτει ότι η αύξηση των παραμέτρων R_1, x_o συνεπάγεται μείωση της ροπής T .

Αύξηση της παραμέτρου R_1 πραγματοποιείται με την πρόσθεση σε σειρά ωμικών αντιστάσεων μεταξύ δικτύου και κινητήρα. Η παράμετρος X_1 αυξάνεται αν προστεθούν σε σειρά πηνία μεταξύ δικτύου και κινητήρα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σπάνια.

Η παράμετρος X_1 μπορεί να αυξηθεί κατασκευάζοντας τον κινητήρα με μεγάλο διάκενο κατά την εκκίνησή του και μικρό διάκενο, όταν πάρει τον ονομαστικό αριθμό στροφών του. Αυτό επιτυγχάνεται με δρομέα και στάτη κωνικής μορφής, ο οποίος μετατοπίζεται αξονικά μέσα στον στάτη. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε κινητήρες ανυψωτικών μηχανών.

4.5.3 Επίδραση της μεταβολής της συχνότητας της τάσεως του δικτύου.

Είναι γνωστό ότι:

1) Οι **αντιδράσεις**:

$$x = \omega L = 2\pi fL, \quad x = 2\pi f_1 L_n,$$

$$x_1 = 2\pi f_1 L_{11}, \quad x_{2r} = 2\pi f_1 L_{2r}.$$

2) Ο **σύγχρονος αριθμός στροφών**:

$$n_s = \frac{120f_1}{P} \quad \text{και}$$

3) η **ταχύτητα περιστροφής του δρομέα**:

$$n = n_s(1-s) = \frac{120f_1}{P}(1-s)$$

εξαρτώνται από την συχνότητα της τάσεως του δικτύου.

Από την εξίσωση:

$$I_{2r} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{2r}}{s}\right)^2 + [2\pi f_1(L_{11} + L_{2r})]^2}}$$

προκύπτει μεταβολή του ρεύματος I_{2r} όταν μεταβάλλεται η συχνότητα f_1 .

Για μικρές μεταβολές της f_1 , της τάξεως του 30% υποθέτουμε ότι:

$$I_{2r}^2 \propto \frac{1}{f_1} \quad (4.75)$$

χωρίς να έχει μεγάλη σημασία το λάθος το οποίο γίνεται. Τότε ισχύει:

$$T \propto \frac{1}{f_1^2} \quad (4.76)$$

και

$$P_{\text{out}} \propto \frac{1}{f_1}. \quad (4.77)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι όταν η συχνότητα f_1 της τάσεως του δικτύου μεταβάλλεται (π.χ. αυξάνεται), τότε το ρεύμα I_{2r} , η ροπή T και η ισχύς P_{out} ελαττώνονται αντίστοιχα.

4.5.4 Επίδραση της μεταβολής της τάσεως του δικτύου V_1 .

Από την εξίσωση του μέτρου του ρεύματος (εξ. 4.73) προκύπτει ότι:

$$|I_{2r}| \propto |V_1|.$$

Από την εξίσωση 4.74 προκύπτει: $T \propto V_1^2$.

Αν υποθεθεί ότι R_1 , R_{2r} , x_σ , n_s , και s παραμένουν σταθερά, τότε ελαττώνοντας την τάση του δικτύου συμβαίνει:

1) Να ελαττώνεται αναλογικά το ρεύμα I_{2r} , και

2) να ελαττώνεται πολύ περισσότερο η ροπή T και η ηλεκτρομαγνητική ισχύς¹.

Η μέθοδος ελαττώσεως της τάσεως εφαρμόζεται για την εκκίνηση των ασύγχρονων κινητήρων με βραχυκυκλωμένο δρομέα.

– Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Η μέγιστη ροπή ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα είναι διπλάσια της ροπής πλήρους φορτίου, ενώ η ροπή εκκίνησης είναι ίση με τη ροπή πλήρους φορτίου. Να υπολογίσετε την ολίσθηση στο πλήρες φορτίο του κινητήρα και την ολίσθηση, στην οποία αντιστοιχεί η μέγιστη ροπή.

Λύση.

Ισχύει: $T_{\text{max}} = 2T_{\text{π.φ.}}$

$$T_{\text{εκκ}} = T_{\text{π.φ.}}$$

Οπότε προκύπτει: $\frac{T_{\text{εκκ}}}{T_{\text{max}}} = 0,5$.

Σε έναν κινητήρα ΣΡ η ροπή η οποία ασκείται στον δρομέα είναι ανάλογη του ρεύματος τυμπάνου και της μαγνητικής ροής ανά πόλο: $T = \Phi I_a$. Ανάλογα σε έναν ασύγχρονο κινητήρα, η αναπτυσσόμενη ροπή είναι ανάλογη της παραγόμενης ανά πόλο μαγνητικής ροής του στάτη, του ρεύματος τυμπάνου και του συντελεστή ισχύος του κινητήρα. Η αναπτυσσόμενη ροπή στον ασύγχρονο κινητήρα οφείλεται στην αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα και εξαρτάται απ' το πλάτος αυτών των μαγνητικών πεδίων και της φασικής τους σχέσεως. Οπότε η ροπή του ασύγχρονου κινητήρα είναι:

$$T = K\Phi I_a \quad (1)$$

όπου K μία σταθερά.

Η ανά φάση επαγόμενη ΗΕΔ του δρομέα E_2 είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής Φ του στάτη και

¹ Από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.4α(α), όταν ελαττώνεται η τάση V_1 ελαττώνεται η E_1 , οπότε ελαττώνεται το I_c και I_m .

του συντελεστή ισχύος $\text{συν}\varphi_2$ του δρομέα:

$$T = KE_2 I_2 \text{συν}\varphi_2. \quad (2)$$

Η ανά φάση επαγόμενη ΗΕΔ του δρομέα είναι:

$$E_{2s} = sE_2. \quad (3)$$

Το ανά φάση ρεύμα του δρομέα είναι:

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}}. \quad (4)$$

Ο συντελεστής ισχύος είναι:

$$\text{συν}\varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}}. \quad (5)$$

Η αναπτυσσόμενη ροπή είναι:

$$T = KE_2 s \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}} \cdot \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}}. \quad (6)$$

Απ' την εξίσωση 6 προκύπτει:

$$T = \frac{KsE_2^2 R_2}{R_2^2 + s^2 X_2^2}. \quad (7)$$

Διαιρώντας με s^2 προκύπτει:

$$T = \frac{K \frac{R_2}{s} E_2^2}{\frac{R_2^2}{s^2} + X_2^2}. \quad (8)$$

Η ροπή εκκινήσεως, για $s = 1$, από την εξίσωση 8 είναι:

$$T_{\text{εκκ}} = \frac{KE_2^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2}. \quad (9)$$

Παραγωγίζοντας την εξίσωση 8 ως προς R_2/s και εξισώνοντας με το μηδέν παίρνουμε:

$$T_{\text{max}} = \frac{KE_2^2}{2X_2} \quad (\text{συνθήκη μέγιστης ροπής}). \quad (10)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις 9 και 10 έχουμε:

$$\frac{T_{\text{εκκ}}}{T_{\text{max}}} = \frac{2\lambda}{\lambda^2 + 1}$$

όπου λ , είναι ο λόγος της ωμικής αντιστάσεως ανά φάση του δρομέα και της αντιδράσεως σκεδάσεως ανά φάση, όταν ο δρομέας είναι ακίνητος.

$$\text{Έχομε:} \quad 0,5 = \frac{2\lambda}{\lambda^2 + 1},$$

οπότε προκύπτει η ακόλουθη δευτεροβάθμια εξίσωση:

$$\lambda^2 - 4\lambda + 1 = 0.$$

Η παραδεκτή λύση είναι: $2 - \sqrt{3}$.

Διαιρώντας κατά μέλη τη ροπή πλήρους φορτίου προς την μέγιστη ροπή, έχουμε:

$$\frac{T_{\text{π.φ.}}}{T_{\text{max}}} = \frac{2\lambda s}{\lambda^2 + s^2} \quad \acute{\eta} \quad \frac{1}{2} = \frac{2(2 - \sqrt{3})s_{\text{π.φ.}}}{(2 - \sqrt{3})^2 + (s_{\text{π.φ.}})^2}.$$

Η παραδεκτή λύση είναι: 0,07.

Η ολίσθηση στη μέγιστη ροπή είναι:

$$s_{\text{max}} = \frac{R_2}{X_2} = \lambda = 2 - \sqrt{3} = 0,268.$$

Άσκηση 2.

Η ωμική αντίσταση του δρομέα ανά φάση και η αντίδραση σκεδάσεως ανά φάση με ακίνητο δρομέα είναι $0,02 \Omega$ και $0,16 \Omega$ αντίστοιχα. Όταν ο κινητήρας τροφοδοτείται με την κανονική τάση, η ολίσθηση στο πλήρες φορτίο είναι 4%. Να υπολογίσετε την επί τοις εκατό μείωση της τάσεως του στάτη, έτσι ώστε να αναπτυχθεί ροπή πλήρους φορτίου στο μισό της ταχύτητας περιστροφής πλήρους φορτίου. Να υπολογίσετε τον συντελεστή ισχύος.

Λύση.

Έστω n_s η σύγχρονη ταχύτητα.

Η ολίσθηση στο πλήρες φορτίο (π.φ.):

$$s_{\text{π.φ.}} = 0,04.$$

Η ταχύτητα περιστροφής στο πλήρες φορτίο είναι:

$$n_{\text{π.φ.}} = n_s (1 - s_{\text{π.φ.}}) = n_s (1 - 0,04) = 0,96n_s.$$

Το μισό της ταχύτητας πλήρους φορτίου είναι:

$$\frac{1}{2} n_{\text{π.φ.}} = \frac{1}{2} 0,96n_s = 0,48n_s,$$

οπότε η ολίσθηση s_1 στο μισό της ταχύτητας πλήρους φορτίου γίνεται:

$$s_1 = \frac{n_s - 0,48n_s}{n_s} = 0,52.$$

Η ροπή αναπτύσσεται στον δρομέα, όταν ο κινητήρας περιστρέφεται με ολίσθηση s :

$$T = \frac{K_s E_2^2 R_2}{R_2^2 + s^2 X_2^2}$$

Η ροπή πλήρους φορτίου όταν ο στάτης τροφοδοτείται με την κανονική τάση V είναι:

$$T_{n.φ.} = \frac{K_1 s_{n.φ.} V^2 R_2}{R_2^2 + s_{n.φ.}^2 X_2^2} = \frac{K_1 0,04 \cdot 0,02 V^2}{(0,02)^2 + (0,02)^2 \cdot (0,16)^2}$$

Έστω η τάση τροφοδοσίας του στάτη είναι x φορές της κανονικής τάσεως τροφοδοσίας για να μας δώσει τη ροπή πλήρους φορτίου στο μισό της ταχύτητας πλήρους φορτίου. Όταν η ολίσθηση είναι $s_1 = 0,52$ και η τάση είναι xV , η οποία τροφοδοτεί τον στάτη, τότε η ροπή είναι:

$$T_1 = \frac{K_1 s_1 R_2 (xV)^2}{R_2^2 + s_1^2 X_2^2} = \frac{K_1 \cdot 0,52 \cdot 0,04 \cdot x^2 V^2}{(0,04)^2 + (0,52)^2 \cdot (0,16)^2}$$

Ισχύει από τα παραπάνω ότι: $T_1 = T_{n.φ.}$

$$\text{Οπότε έχουμε: } \frac{K_1 \cdot 0,52 \cdot 0,04 \cdot x^2 V^2}{(0,04)^2 + (0,52)^2 \cdot (0,16)^2} = \frac{K_1 0,04 \cdot 0,02 V^2}{(0,02)^2 + (0,02)^2 \cdot (0,16)^2}$$

$$\text{ή } x^2 = \frac{0,04}{0,52} \cdot \frac{(0,04)^2 + (0,52 \cdot 0,16)^2}{(0,04)^2 + (0,04 \cdot 0,16)^2} = 0,600$$

$$\text{ή } x = 0,775.$$

Η επί τοις εκατό μείωση της τάσεως τροφοδοσίας του στάτη είναι:

$$\frac{V_1 - V_2}{V} 100 = \frac{V - 0,775V}{V} 100 = 22,5\%.$$

Ο συντελεστής ισχύος είναι:

$$\begin{aligned} \text{συν}\varphi_2 &= \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + s^2 X_2^2}} = \\ &= \frac{0,02}{\sqrt{(0,02)^2 + (0,52 \cdot 0,16)^2}} = 0,236. \end{aligned}$$

Άσκηση 3.

Δίδεται τριφασικός, 8-πολικός, 50 Hz ασύγχρο-

νος κινητήρας. Η ωμική αντίσταση ανά φάση και η αντίδραση σκεδάσεως ανά φάση του δρομέα είναι $0,03 \Omega$ και $0,8 \Omega$ αντίστοιχα. Για ποια ταχύτητα περιστροφής έχουμε τη μέγιστη ροπή του κινητήρα; Ποια είναι η τιμή της ωμικής αντιστάσεως, η οποία πρέπει να συνδεθεί σε σειρά σε κάθε φάση του δρομέα, ώστε η ροπή εκκινήσεως να είναι το μισό της μέγιστης ροπής;

Λύση.

Η συνθήκη μέγιστης ροπής είναι: $R_2 = sX_2$

$$\text{οπότε η ολίσθηση γίνεται: } s = \frac{R_2}{X_2} = \frac{0,03}{0,8} = 0,04,$$

ενώ η σύγχρονη ταχύτητα είναι:

$$n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \cdot 50}{8} = 750 \text{ ΣΑΛ.}$$

Η ολίσθηση του κινητήρα, όμως, είναι:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Λύνοντας ως προς n έχουμε:

$$n = n_s (1 - s) = 750 (1 - 0,04) = 720 \text{ ΣΑΛ.}$$

Είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή.

Έστω ότι R_x η αντίσταση, η οποία πρέπει να συνδεθεί σε κάθε φάση του δρομέα.

$$\text{Είναι: } \lambda = \frac{0,03 + R_x}{0,8},$$

$$\text{οπότε ισχύει: } \frac{T_{\text{εκκ}}}{T_{\text{max}}} = \frac{2\lambda}{\lambda^2 + 1} = \frac{1}{2}.$$

$$\text{ή } \lambda^2 - 4\lambda + 1 = 0,$$

με παραδεκτή ρίζα: $0,268$.

Οπότε η τιμή της αντιστάσεως που πρέπει να συνδεθεί σε σειρά με κάθε φάση του δρομέα έχει τιμή:

$$R_x = \lambda \cdot 0,8 - 0,03 = 0,268 \cdot 0,8 - 0,03 = 0,1844 \Omega.$$

Άσκηση 4.

Δίδεται τριφασικός, 8-πολικός, 380 V, 50 Hz, ασύγχρονος κινητήρας. Η συχνότητα των επαγομένων τάσεων στα ηλεκτρικά κυκλώματα του

δρομέα είναι 2 Hz. Να υπολογίσετε την ταχύτητα και την επί τοις εκατό ολίσθηση του κινητήρα. Να υπολογίσετε τις απώλειες χαλκού ανά φάση του δρομέα, εάν η ισχύς εισόδου του δρομέα στο πλήρες φορτίο είναι 120 kW.

Λύση.

Η συχνότητα των τάσεων του στάτη και τάσεων του δρομέα είναι, αντίστοιχα:

$$f_1 = 50 \text{ Hz}, f_2 = 2 \text{ Hz},$$

οπότε η ολίσθηση είναι:

$$s = \frac{f_2}{f_1} \cdot 100 = \frac{2}{50} \cdot 100 = 4\%.$$

Η ισχύς εισόδου του δρομέα P_{inr} είναι 120 kW.

Οι απώλειες χαλκού του δρομέα είναι:

$$P_{\text{cur}} = s \cdot P_{\text{inr}} = 0,04 \cdot 120 = 4,8 \text{ kW}.$$

Οι απώλειες χαλκού ανά φάση του δρομέα είναι:

$$\frac{4,8}{3} = 1,6 \text{ kW}.$$

Άσκηση 5.

Η ισχύς εισόδου του δρομέα ενός τριφασικού, 50 Hz, 4-πολικού ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια είναι 50 kW, ενώ η ταχύτητα περιστροφής του είναι 1.000 ΣΑΛ. Η ωμική αντίσταση ανά φάση του δρομέα είναι 0,20 Ω. Να υπολογίσετε το ανά φάση ρεύμα του δρομέα.

Λύση.

Η ισχύς εισόδου του δρομέα είναι: 50 kW.

Η σύγχρονη ταχύτητα είναι:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} = \frac{120 \cdot 50}{4} = 1.500 \text{ ΣΑΛ}.$$

Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι:

$$n = 1.000 \text{ ΣΑΛ}.$$

Η ολίσθηση είναι:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1.500 - 1.000}{1.500} = 0,33.$$

Συνολικές απώλειες χαλκού του δρομέα = $s \cdot$ ισχύς εισόδου του δρομέα = $0,33 \cdot 50.000 = 16.500 \text{ W}$.

Οι απώλειες ανά φάση χαλκού δρομέα P_{cur} είναι:

$$\frac{16.500}{3} = 5.500 \text{ W}.$$

Το ρεύμα ανά φάση του δρομέα είναι:

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_{\text{cur}}/\text{φάση}}{R_2/\text{φάση}}} = \sqrt{\frac{5.500}{0,20}} = 165,83 \text{ A}.$$

Άσκηση 6.

Δίδεται τριφασικός, 400 V, 50 Hz, 4-πολικός ασύγχρονος κινητήρας, του οποίου η ισχύς εισόδου στον δρομέα είναι 100 kW. Η συχνότητα των επαγομένων τάσεων στο δρομέα είναι 1,8 Hz. Να υπολογίσετε:

- 1) Την ολίσθηση.
- 2) Την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.
- 3) Την αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύ του κινητήρα.
- 4) Τις απώλειες χαλκού του δρομέα και
- 5) την τιμή ανά φάση της ωμικής αντιτάσεως του δρομέα όταν το ρεύμα των τυλιγμάτων του δρομέα είναι 60 A.

Λύση.

1) Έχομε: $f_1 = 50 \text{ Hz}$ και $f_2 = 1,8 \text{ Hz}$, οπότε η ολίσθηση του κινητήρα είναι:

$$s = \frac{f_2}{f_1} \cdot 100 = \frac{1,8}{50} \cdot 100 = 3,6\%.$$

2) Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι:

$$\begin{aligned} n &= n_s \cdot (1-s) = \frac{120 \cdot f_1}{P} \cdot (1-s) = \\ &= \frac{120 \cdot 50}{4} (1-0,036) = 1.446 \text{ ΣΑΛ}. \end{aligned}$$

3) Η αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς είναι:

$$P_d = (1-s) \cdot P_{\text{inr}} = (1-0,036) \cdot 100 = 96,4 \text{ kW},$$

όπου: P_d είναι η αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς και P_{inr} η ισχύς εισόδου στον δρομέα του κινητήρα.

4) Οι απώλειες χαλκού του δρομέα είναι:

$$P_{\text{cur}} = s \cdot P_{\text{inr}} = 0,036 \cdot 100 = 3,6 \text{ kW}.$$

Οι απώλειες χαλκού του δρομέα ανά φάση είναι: $3,6/3 = 1,2 \text{ kW}$.

5) Η ωμική αντίσταση ανά φάση του δρομέα είναι:

$$R_2 = \frac{1.200}{I_2^2} = \frac{1.200}{60^2} = 0,33 \Omega.$$

Άσκηση 7.

Δίδεται τριφασικός, 440 V, 50 Hz, 1.000 ΣΑΛ, τετραπολικός ασύγχρονος κινητήρας, του οποίου η αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς είναι 25 HP συμπεριλαμβανομένων και των μηχανικών απωλειών. Ο κινητήρας περιστρέφεται με 1.490 ΣΑΛ, ενώ ο συντελεστής ισχύος είναι 0,87. Να υπολογίσετε:

- 1) Την ολίσθηση.
- 2) Τις απώλειες χαλκού του δρομέα.
- 3) Την ισχύ εισόδου του κινητήρα εάν οι απώλειες του στάτη είναι 1.400 W.
- 4) Το ρεύμα γραμμής και
- 5) τη συχνότητα των επαγομένων τάσεων του δρομέα.

Λύση.

1) Η σύγχρονη ταχύτητα είναι:

$$n_s = \frac{120 \cdot f_1}{P} = \frac{120 \cdot 50}{4} = 1.500 \text{ ΣΑΛ.}$$

Η ολίσθηση του κινητήρα είναι:

$$s = \frac{1.500 - 1.490}{1.500} \cdot 100 = 0,66\%.$$

2) Η αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς είναι:

$$P_d = 20 \text{ HP} = 20 \cdot 746 = 14.920 \text{ W.}$$

Η ισχύς εισόδου του δρομέα είναι:

$$P_{\text{inr}} = \frac{P_d}{1-s} = \frac{14.920}{0,99} = 15.071 \text{ W.}$$

Οι απώλειες χαλκού του δρομέα είναι:

$$P_{\text{cur}} = 15.071 \cdot 0,66\% = 100,47 \text{ W.}$$

3) Η ισχύς εισόδου του κινητήρα P_{in} είναι:

$$P_{\text{in}} = \text{Ισχύς εισόδου στο δρομέα} + \text{απώλειες του στάτη} = 15.071 + 1.400 = 16.471 \text{ W.}$$

4) Το ρεύμα γραμμής είναι:

$$I_L = \frac{P_{\text{in}}}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot \text{συνφ}} = \frac{16.471}{593,736} = 27,74 \text{ A.}$$

5) Η συχνότητα των επαγομένων τάσεων στον δρομέα είναι:

$$f_2 = sf_1 = 0,66\% \cdot 50 = 0,33 \text{ Hz.}$$

4.6 Πειραματικός προσδιορισμός των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος του ασύγχρονου κινητήρα.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος ενός ασύγχρονου κινητήρα γίνονται οι ακόλουθες δοκιμές (πειράματα):

4.6.1 Δοκιμή χωρίς φορτίο.

Σε αυτήν τη δοκιμή ο κινητήρας περιστρέφεται χωρίς φορτίο στην ονομαστική τάση και συχνότητα. Η επιβαλλόμενη τάση, το ρεύμα και η ισχύς εισόδου μετρώνται από το βολτόμετρο (V), το αμπερόμετρο (A) και τα βατόμετρα (W_1 , W_2), η συνδεσμολογία των οποίων δίδεται στο σχήμα 4.6α.

Για την δοκιμή χωρίς φορτίο ισχύουν τα εξής:

Ισχύς εισόδου = P_0 (τριφασική).

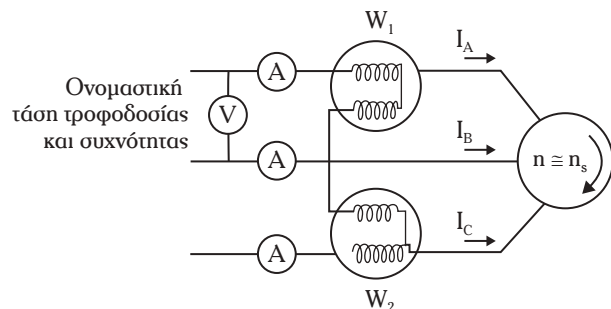
Ρεύμα εισόδου = I_0

(μέση τιμή της ενδείξεως των αμπερομέτρων).

Τάση εισόδου = V_0 (πολική τάση).

Η ισχύς εισόδου P_0 , χωρίς φορτίο καλύπτει τις απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού, τις απώλειες πυρήνα και χαλκού, οι οποίες αντιστοιχούν στο ρεύμα κενού φορτίου.

Οι απώλειες χαλκού και πυρήνα του δρομέα στην κατάσταση χωρίς φορτίο είναι αμελητέες. Οι απώλειες χαλκού στον στάτη δεν είναι αμελητέες γιατί το ρεύμα I_0 είναι 30-40% του ονομαστικού ρεύματος.



Σχ. 4.6α

Συνδεσμολογία των οργάνων μέτρησης στη δοκιμή χωρίς φορτίο ενός ασύγχρονου κινητήρα.

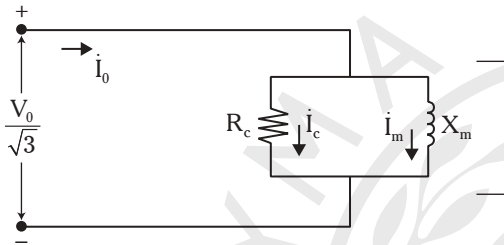
Εάν: P_ℓ = απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού,
 P_c = απώλειες πυρήνα του στάτη,
 P_{cust} = απώλειες χαλκού στο στάτη,

τότε ισχύει: $P_0 = P_c + P_\ell + P_{cust}$. (4.78)

Εάν είναι γνωστή η αντίσταση R_1 της κάθε φάσεως του στάτη, τότε:

$$P_{cust} = 3R_1 I_0^2. \quad (4.79)$$

Στο σχήμα 4.6β δίδεται το ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση, το οποίο αντιστοιχεί στις συνθήκες λειτουργίας κενού φορτίου ενός ασύγχρονου κινητήρα. Επειδή η σύνθετη αντίσταση του στάτη είναι μικρή, μπορεί να αμεληθεί.



Σχ. 4.6β

Ισοδύναμο κύκλωμα ενός ασύγχρονου κινητήρα στη λειτουργία χωρίς φορτίο.

Για έναν τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα με συνδεδεμένες τις φάσεις του στάτη σε αστέρα (Y) ισχύει:

$$Z_0 = \frac{V_0}{\sqrt{3}I_0} \quad (4.80)$$

και $R_c = \frac{P_0}{3I_0^2}$ (4.81)

και $X_m = \sqrt{Z_0^2 - R_c^2}$. (4.82)

4.6.2 Δοκιμή με ακινητοποιημένο δρομέα.

Η δοκιμή με ακίνητο δρομέα πραγματοποιείται με ελαττωμένη τάση, ενώ ο δρομέας ακινητοποιείται μηχανικά. Η δοκιμή αυτή αντιστοιχεί με τη δοκιμή βραχυκυκλώσεως του Μ/Σ. Στο σχήμα 4.6γ δίδεται η συνδεσμολογία των οργάνων μετρήσεως στη δοκιμή με ακίνητο δρομέα.

Τροφοδοτούμε τον κινητήρα με μειωμένη τάση (15-30% της ονομαστικής τάσεως) στην τιμή $\frac{V_{sc}}{\sqrt{3}}$, έτσι ώστε στον στάτη να ρέει το ονομαστικό ρεύμα.

Από τις ενδείξεις των αμπερομέτρων προκύπτει η μέση τιμή τους:

$$I_{sc} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}. \quad (4.83)$$

Ισχύει $I_{sc} = I_{ov}$.

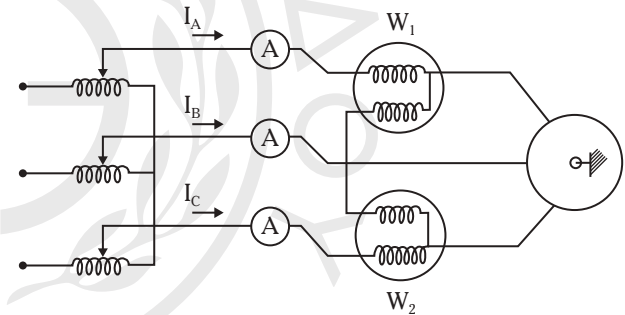
Αθροίζοντας τις ενδείξεις των δύο βολτομέτρων προκύπτει η ισχύς βραχυκυκλώσεως:

$$P_{sc} = 3V_{sc} I_{ov} \cos\phi_{sc}. \quad (4.84)$$

Από την εξίσωση 4.84 έχουμε:

$$\cos\phi_{sc} = \frac{P_{sc}}{3V_{sc} I_{ov}}$$

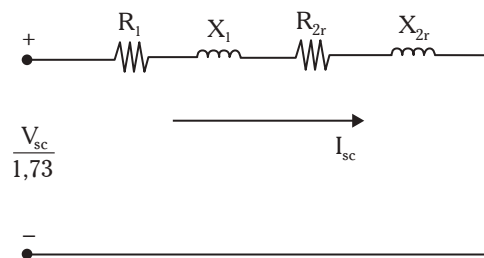
Στη δοκιμή με ακίνητο δρομέα είναι $s = 1$, οπότε $R_{2r} \cdot \left(\frac{1}{s} - 1\right) = 0$. Το ισοδύναμο κύκλωμα στην περίπτωση κατά την οποία ο δρομέας είναι ακίνητος παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6δ.



$$i_{sc} = i_{ov} \quad I_{sc} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}$$

Σχ. 4.6γ

Συνδεσμολογία οργάνων για τη δοκιμή με ακίνητο δρομέα ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα.



Σχ. 4.6δ

Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα στη δοκιμή με ακίνητο δρομέα.

4.7 Εκκίνηση των τριφασικών ασύγχρονων κινητήρων.

Στη διάρκεια της εκκινήσεως ο ασύγχρονος κινητήρας πρέπει να αναπτύξει ικανή εσωτερική ροπή, ώστε να υπερνικήσει τις ροπές λόγω τριβών και ανεμισμού και να επιταχυνθεί με σκοπό να φτάσει στην τελική του ταχύτητα.

Στην περίπτωση κατά την οποία ο κινητήρας εκκινείται με πλήρες φορτίο, η διαδικασία της εκκινήσεως γίνεται δυσκολότερη γιατί η εσωτερική ροπή και το ρεύμα εκκινήσεως είναι μεγαλύτερα των αντιστοιχών ονομαστικών μεγεθών. Τελικά, πρέπει να γνωρίζουμε αν ο κινητήρας εκκινείται εν κενώ ή με πλήρες φορτίο.

Τα κύρια προβλήματα της εκκινήσεως των κινητήρων είναι η αναπτυσσόμενη ροπή και το ρεύμα εκκινήσεως.

Στις πρακτικές εφαρμογές επιθυμούμε ο κινητήρας να αναπτύσσει μεγάλη ροπή εκκινήσεως και το ρεύμα στον στάτη να μην υπερβαίνει ορισμένα όρια. Πράγματι, οι υψηλές τιμές του ρεύματος εκκινήσεως αναπτύσσουν συγγραμμές πτώσεις τάσεως στο δίκτυο (διακυμάνσεις εντάσεως φωτισμού των λαμπτήρων πυρακτώσεως), που ονομάζονται **βυθίσεις τάσεως**.

Στη διάρκεια της εκκινήσεως η ολίσθηση του κινητήρα είναι ίση με τη μονάδα ($s = 1$). Τότε η αντίσταση φορτίου στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.4α(β) είναι:

$$R_{2r} \left(\frac{1-s}{s} \right) = 0, \text{ επειδή } s=1. \quad (4.85)$$

Αυτό σημαίνει ότι βρισκόμαστε στις συνθήκες δοκιμής του κινητήρα με ακίνητο δρομέα. Ο κινητήρας απορροφά ρεύμα εκκινήσεως 4–8 φορές του ονομαστικού ρεύματος. Σε αυτές τις συνθήκες αμελούμε το ρεύμα διεγέρσεως, στον κλάδο διεγέρσεως, οπότε έχουμε το απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.7α.

Η ροπή εκκινήσεως είναι:

$$T_{\text{εκκ}} = \frac{3}{\omega_s} I_{\text{εκκ}}^2 R_{2r}. \quad (4.86)$$

Υποθέτουμε ότι προσεγγιστικά ισχύει:

$$I_{\text{π.φ.}} \cong I_{2\text{π.φ.}} \quad (4.87)$$

και ακόμη, αμελούμε στις συνθήκες πλήρους φορτίου το ρεύμα μαγνητίσεως. Τότε έχουμε:

$$\text{Ροπή πλήρους φορτίου: } T_{\text{π.φ.}} = \frac{3}{\omega_s} I_{\text{π.φ.}}^2 \frac{R_{2r}}{s_{\text{π.φ.}}} \quad (4.88)$$

όπου $s_{\text{π.φ.}}$ είναι η ολίσθηση πλήρους φορτίου (2-8%).

Η ροπή εκκινήσεως σε συνάρτηση με τη ροπή πλήρους φορτίου είναι:

$$\frac{T_{\text{εκκ}}}{T_{\text{π.φ.}}} = \left(\frac{I_{\text{εκκ}}}{I_{\text{π.φ.}}} \right)^2 s_{\text{π.φ.}}. \quad (4.89)$$

4.7.1 Κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα – Απευθείας εκκίνηση.

Ο απλούστερος τρόπος εκκινήσεως ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα, με βραχυκυκλωμένο δρομέα, είναι η **απευθείας εκκίνηση**, δηλαδή η εκκίνηση μέσω ενός απλού τριπολικού διακόπτη. Στην απευθείας εκκίνηση των τριφασικών ασύγχρονων κινητήρων με βραχυκυκλωμένο δρομέα (σχ. 4.7α), ισχύει:

$$I_{\text{εκ}} = I_{\text{sc}} = \frac{V_1}{Z_{\text{sc}}}. \quad (4.90)$$

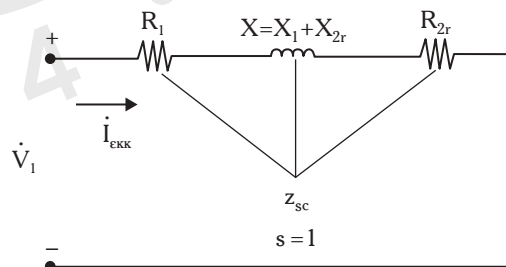
Το ρεύμα εκκινήσεως $I_{\text{εκκ}}$ συμπίπτει με το ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{sc} . Εάν υποθέσουμε ότι:

$$I_{\text{sc}} = 6I_{\text{π.φ.}} \text{ και } s_{\text{π.φ.}} = 0,04,$$

$$\text{τότε } \frac{T_{\text{εκκ}}}{T_{\text{π.φ.}}} = 36 \cdot 0,04 = 1,44$$

$$\text{και } T_{\text{εκκ}} = 1,44 \cdot T_{\text{π.φ.}} \quad (4.91)$$

Η ροπή εκκινήσεως είναι 1,44 φορές την ροπή πλήρους φορτίου. Εφόσον το ρεύμα εκκινήσεως είναι 6 φορές μεγαλύτερο του ρεύματος πλήρους φορτίου, ο κινητήρας αναπτύσσει ροπή εκκινήσεως, μόνο, 1,44 φορές από εκείνη, η οποία αντιστοιχεί στο πλήρες φορτίο.



Σχ. 4.7α

Απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα για τις συνθήκες εκκινήσεως.

4.7.2 Εκκίνηση με αντιστάσεις στον στάτη.

Στο σχήμα 4.7β δίδεται η διάταξη των τριών αντιστάσεων που συνδέονται σε σειρά με τα αντίστοιχα τυλίγματα του στάτη. Προοδευτικά, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κινητήρα, αφαιρούμε τις αντιστάσεις

μέχρι ο κινητήρας να αποκτήσει τον ονομαστικό αριθμό στροφών, οπότε το σύστημα αντιστάσεων τίθεται εκτός.

Υπολογίζουμε την τιμή της αντιστάσεως R ανά φάση, η οποία απαιτείται να συνδεθεί σε σειρά με τα τυλίγματα του στάτη, ώστε το ρεύμα εκκινήσεως $I_{\text{εκκ}}$ να μην ξεπερνά μια ορισμένη τιμή. Για το ρεύμα εκκινήσεως ισχύει:

$$I_{\text{εκκ}} = \frac{V_1}{\sqrt{(R + R_1)^2 + X_1^2}}. \quad (4.92)$$

Λύνοντας ως προς R , έχουμε:

$$R = \sqrt{\left(\frac{V_1}{I_{\text{εκκ}}}\right)^2 - X_1^2 - R_1}. \quad (4.93)$$

Απ' την εξίσωση 4.52 η ροπή T είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της τάσεως του δικτύου, V_1 . Εάν η τάση δικτύου στους ακροδέκτες του κινητήρα μειωθεί στο μισό, το ρεύμα εκκινήσεως μειώνεται στο μισό, ενώ η ροπή μειώνεται στο $1/4$ της τιμής η οποία αντιστοιχεί στην ροπή πλήρους φορτίου.

Με τη συνδεσμολογία του σχήματος 4.7β, η επιβαλλόμενη τάση ανά φάση στον κινητήρα μειώνεται κατά λόγο α . Τότε ισχύει:

$$I_{\text{εκκ}} = \alpha I_{\text{sc}} \quad (4.94)$$

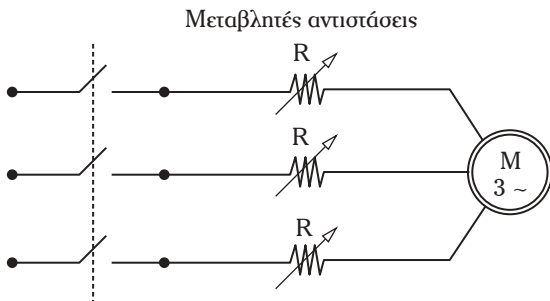
$$\text{και} \quad T_{\text{εκκ}} = \alpha^2 T. \quad (4.95)$$

Η εξίσωση 4.91 με βάση τις εξισώσεις 4.94 και 4.95 γίνεται:

$$\frac{T_{\text{εκκ}}}{T_{\text{π.φ.}}} = \alpha^2 \left(\frac{I_{\text{sc}}}{I_{\text{π.φ.}}}\right)^2 s_{\text{π.φ.}} \quad (4.96)$$

$$\text{ή} \quad T = T_{\text{π.φ.}} \cdot \alpha^2 \left(\frac{I_{\text{sc}}}{I_{\text{π.φ.}}}\right)^2 s_{\text{π.φ.}} = \alpha^2, \quad (4.97)$$

ροπή την οποία έχουμε στην απευθείας εκκίνηση κινητήρα.



Σχ. 4.7β

Εκκίνηση ασύγχρονου κινητήρα με σύνδεση αντιστάσεων στα τυλίγματα του στάτη.

– Λυμένη άσκηση.

Ένας μικρός τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας έχει $I_{\text{sc}} = 5I_{\text{π.φ}}$ και ολίσθηση 5%. Να υπολογίσετε τη ροπή εκκινήσεως $T_{\text{εκκ}}$ και το ρεύμα εκκινήσεως $I_{\text{εκκ}}$ αν το σύστημα αντιστάσεων εκκινήσεως, το οποίο χρησιμοποιείται μειώνει την τάση τροφοδοσίας στο 60% της κανονικής.

Λύση.

Το ρεύμα εκκινήσεως είναι:

$$I_{\text{εκκ}} = 0,6I_{\text{sc}} = 0,6 \cdot 5I_{\text{π.φ.}} = 3I_{\text{π.φ.}}$$

Η ροπή εκκινήσεως είναι:

$$T_{\text{εκκ}} = T_{\text{π.φ.}} \left(\frac{I_{\text{εκκ}}}{I_{\text{π.φ.}}}\right)^2$$

$$s_{\text{π.φ.}} = T_{\text{π.φ.}} \cdot 3^2 \cdot 0,05 = 0,45 T_{\text{π.φ.}}$$

Τελικά, η αναπτυσσόμενη ροπή εκκινήσεως είναι μικρή. Η μέθοδος εκκινήσεως με αντιστάσεις είναι κατάλληλη μόνο για κινητήρες μικρής ισχύος, όπου δεν μας ενδιαφέρει το μέγεθος της ροπής εκκινήσεως.

4.7.3 Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή.

Είναι γνωστό ότι μειώνοντας την τάση στους ακροδέκτες του κινητήρα, μειώνεται το ρεύμα εκκινήσεως. Συνδέοντας έναν αυτομετασχηματιστή (ΑΜ/Σ) μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δικτύου (σχ. 4.7γ) έχουμε μείωση της τάσεως τροφοδοσίας του κινητήρα.

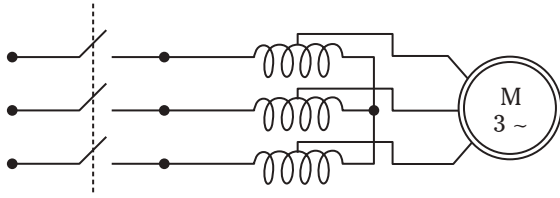
Το μειονέκτημα αυτού του τρόπου εκκινήσεως είναι ότι παρεμβάλλεται μια άλλη ηλεκτρική μηχανή (ο ΑΜ/Σ), η οποία έχει κόστος, χρησιμοποιείται για σύντομο χρονικό διάστημα και με απώλειες ισχύος. Αυτός ο εκκινητής δεν μπορεί να χρησιμοποιείται σε κινητήρες με συχνές εκκινήσεις.

Θεωρούμε ότι στον στάτη ρέει ρεύμα εκκινήσεως 5 φορές του ρεύματος πλήρους φορτίου. Το ρεύμα εκκινήσεως είναι:

$$I_{\text{εκκ}} = 5I_{\text{π.φ.}} = \frac{V}{\sqrt{3}}/Z, \quad (4.98)$$

όπου: $V/\sqrt{3}$ είναι η φασική τάση και Z είναι η σύνθετη αντίσταση του στάτη ανά φάση.

Υποθέτουμε ότι συνδέουμε τον ΑΜ/Σ μεταξύ του δικτύου τροφοδοτήσεως και των τυλιγμάτων του στάτη του κινητήρα. Αν K είναι ο λόγος μετασχημα-



Αυτομετασχηματιστής

Σχ. 4.7γ

Εκκίνηση κινητήρα
με αυτομετασχηματιστή με ενδιάμεσες λήψεις.

πισμού του ΑΜ/Σ, τότε η φασική τάση με την οποία τροφοδοτείται ο κινητήρας είναι $KV/\sqrt{3}$.

Αν I_B το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα, τότε:

$$I_B = \frac{KV}{\sqrt{3}}/Z = K5I_{π.φ.} \quad (4.99)$$

Το ρεύμα το οποίο παρέχει ο ΑΜ/Σ στον κινητήρα είναι:

$$I_A = K \cdot I_B = K \cdot K \cdot 5 \cdot I_{π.φ.} = K^2 \cdot 5 \cdot I_{π.φ.} \quad (4.100)$$

Αν αμελήσουμε το ρεύμα μαγνητίσεως του ΑΜ/Σ, τότε

$$I_A = K^2 \cdot 5 \cdot I_{εκκ.} \quad (4.101)$$

Το φασικό ρεύμα του κινητήρα μειώνεται μόνο K φορές ως προς το ρεύμα κατά την απευθείας εκκίνηση (γιατί το K είναι μικρότερο από τη μονάδα), ενώ το ρεύμα γραμμής μειώνεται κατά K^2 ως προς το ρεύμα, το οποίο έχουμε στην περίπτωση της απευθείας εκκίνησης.

Επειδή η ροπή είναι ανάλογη της τάσεως τροφοδοσίας του κινητήρα, η ροπή στην απευθείας εκκίνηση του είναι:

$$T_A \propto \left(\frac{V}{\sqrt{3}}\right)^2$$

Όταν χρησιμοποιούμε ΑΜ/Σ, τότε η ροπή είναι:

$$T_B \propto \left(\frac{KV}{\sqrt{3}}\right)^2 = K^2 T_A.$$

Ροπή με ΑΜ/Σ = K^2 · ροπή στην απευθείας εκκίνηση.

Επί πλέον, η φασική τάση του κινητήρα στην περίπτωση της απευθείας εκκίνησης είναι $V/\sqrt{3}$, ενώ το ρεύμα εκκίνησης είναι $I_{εκκ.}$. Όταν χρησιμοποιούμε ΑΜ/Σ εκκίνησης, η φασική τάση του κινητήρα είναι $KV/\sqrt{3}$ και $I_B = K \cdot I_{εκκ.}$. Όταν χρησιμοποιούμε ΑΜ/Σ η ροπή του κινητήρα T_B είναι $K^2 T_A$. Τώρα ισχύει:

$$T_{εκκ.} \propto I_B^2 \quad (\text{όταν } s = 1),$$

ενώ η ροπή του πλήρους φορτίου είναι: $T_{π.φ.} \propto \frac{I_{π.φ.}^2}{s_{π.φ.}}$.

Διαιρώντας κατά μέλη την ροπή εκκίνησης, όταν χρησιμοποιούμε ΑΜ/Σ με την ροπή πλήρους φορτίου, έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{T_{εκκ.}}{T_{π.φ.}} &= \left(\frac{I_B}{I_{π.φ.}}\right)^2 s_{π.φ.} = \left(\frac{KI_{εκκ.}}{I_{π.φ.}}\right)^2 s_{π.φ.} = \\ &= K^2 \left(\frac{I_{εκκ.}}{I_{π.φ.}}\right)^2 s_{π.φ.} = K^2 \alpha^2 s_{π.φ.} \end{aligned}$$

(επειδή $I_B = KI_{εκκ.}$). Όπου $\alpha = \frac{I_{εκκ.}}{I_{π.φ.}}$.

– Λυμένη άσκηση.

Ένας τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας έχει $I_{sc} = 5I_{π.φ.}$. Να υπολογίσετε τη ροπή εκκίνησης ως ποσοστό επί τοις εκατό της ροπής πλήρους φορτίου αν ο κινητήρας εκκινείται:

- 1) Απευθείας.
 - 2) Με αντιστάσεις στο κύκλωμα του στάτη.
 - 3) Με ΑΜ/Σ.
- Δίδεται $s_{π.φ.} = 4\%$.

Λύση.

Έχομε: $I_{sc} = 5I_{π.φ.}$ και $s_{π.φ.} = 4\%$.

1) Η ροπή εκκίνησης $T_{εκκ.}$ στην απευθείας εκκίνηση είναι:

$$T_{εκκ.} = \left(\frac{I_{sc}}{I_{π.φ.}}\right)^2 s_{π.φ.} T_{π.φ.} = 5^2 \cdot 0,04 \cdot T_{π.φ.} = T_{π.φ.}$$

2) Η ροπή εκκίνησης με αντιστάσεις στον στάτη είναι:

$$\begin{aligned} T_{εκκ.} &= \left(\frac{I_{sc}}{I_{π.φ.}}\right)^2 s_{π.φ.} T_{π.φ.} = \\ &= (2,5)^2 \cdot 0,04 \cdot T_{π.φ.} = 25\% \text{ της } T_{π.φ.} \end{aligned}$$

3) Το ρεύμα γραμμής με το οποίο τροφοδοτείται ο κινητήρας είναι: $K^2 I_{sc} = 2,5I_{π.φ.}$ ή ο λόγος μετασχηματισμού είναι:

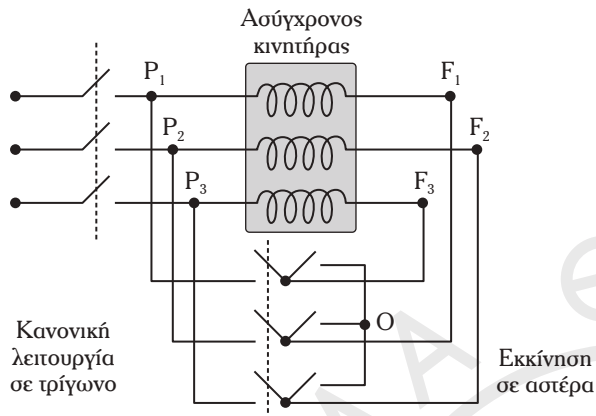
$$K = \sqrt{\frac{2,5I_{π.φ.}}{I_{sc}}} = \sqrt{\frac{2,5I_{π.φ.}}{5I_{π.φ.}}} = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Η ροπή εκκίνησης με ΑΜ/Σ εκκίνησης είναι:

$$\begin{aligned} T_{εκκ.} &= \left(\frac{I_{sc}}{I_{π.φ.}}\right)^2 s_{π.φ.} T_{π.φ.} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 5^2 \cdot 0,04 \cdot T_{π.φ.} = \\ &= 50\% \text{ της } T_{π.φ.} \end{aligned}$$

4.7.4 Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα-τρίγωνο (Y/Δ).

Αυτή η μέθοδος εκκινήσεως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7δ. Χρησιμοποιείται ευρύτητα στους κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα και μοιάζει με τη μέθοδο εκκινήσεως με ΑΜ/Σ.



Σχ. 4.7δ

Σχηματική διάταξη εκκινήσεως με διακόπτη αστέρα-τρίγωνο.

Ο κινητήρας κατασκευάζεται για να λειτουργήσει με τις φάσεις του στάτη συνδεδεμένες σε τρίγωνο, ενώ εκκινείται με τις φάσεις συνδεδεμένες σε αστέρα. Γι' αυτό χρησιμοποιούμε τον διακόπτη Y/Δ. Στην αρχή της εκκινήσεως ο διακόπτης Y/Δ συνδέει τις φάσεις του στάτη σε αστέρα, ενώ στο τέλος της εκκινήσεως έχουμε σύνδεση των φάσεων σε τρίγωνο.

Αν V_1 είναι η πολική τάση του δικτύου και Z η σύνθετη αντίσταση ανά φάση του κινητήρα, τότε:

1) Όταν ο διακόπτης συνδέει τις φάσεις του κινητήρα σε αστέρα, τότε έχουμε:

$$I_{\text{εκκ.φασικό},Y} = I_{\text{εκκ.γραμμής},Y} = \frac{V_Y}{Z} = \frac{V_1}{\sqrt{3}}/Z. \quad (4.102)$$

2) Όταν ο διακόπτης συνδέει τις φάσεις του κινητήρα σε τρίγωνο, τότε έχουμε:

$$I_{\text{εκκ.φασικό},\Delta} = \frac{V_{\Delta}}{Z} = \frac{V_1}{Z} \quad (4.103)$$

$$\text{οπότε: } I_{\text{εκκ.γραμμής},\Delta} = \sqrt{3}I_{\text{εκκ.φασικό},\Delta} = \frac{\sqrt{3}V_1}{Z}. \quad (4.104)$$

Διαιρώντας τις εξισώσεις 4.102 και 4.104 κατά μέλη, έχουμε:

$$\frac{I_{\text{εκκ.γραμμής},Y}}{I_{\text{εκκ.γραμμής},\Delta}} = \frac{1}{3}. \quad (4.105)$$

Το ρεύμα γραμμής (εκκινήσεως) όταν τα τυλίγματα του στάτη είναι συνδεδεμένα σε αστέρα είναι το $1/3$ του αντίστοιχου ρεύματος όταν τα τυλίγματα του στάτη είναι συνδεδεμένα σε τρίγωνο.

Για τις αντίστοιχες ροπές εκκινήσεως σε αστέρα και τρίγωνο έχουμε:

$$T_{\text{εκκ.},Y} \propto V_{1Y}^2 = \frac{V_1^2}{3} \quad (4.106)$$

$$T_{\text{εκκ.},\Delta} \propto V_{1\Delta}^2 = V_1^2. \quad (4.107)$$

Στην περίπτωση, κατά την οποία τα τυλίγματα του στάτη είναι συνδεδεμένα σε αστέρα, η ροπή εκκινήσεως είναι το $1/3$ εκείνης της ροπής που ο κινητήρας αναπτύσσει όταν τα τυλίγματα του στάτη είναι συνδεδεμένα σε τρίγωνο.

- Λυμένη άσκηση.

Να υπολογίσετε τον λόγο μεταξύ του ρεύματος εκκινήσεως και του ρεύματος πλήρους φορτίου για έναν 7,46 kW, 400 V, τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα που εκκινείται με διακόπτη Y/Δ. Δίδεται ότι η απόδοση πλήρους φορτίου είναι $\eta_{\text{π.φ.}} = 0,87$, ο συντελεστής ισχύος πλήρους φορτίου είναι $\cos\phi_{\text{π.φ.}} = 0,85$ και το ρεύμα βραχυκυκλώσεως: $I_{\text{sc}} = 15 \text{ A}$ στα 100 V.

Λύση.

Ο κινητήρας απορροφά το ονομαστικό του ρεύμα (σύνδεση σε τρίγωνο):

$$I_{\text{π.φ.}} = \frac{7,46 \cdot 1.000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,85 \cdot 0,87} = 14,56 \text{ A.}$$

Η τάση όμως είναι 100 V και η τιμή του $I_{\text{sc,γραμμής}}$ είναι 15 A. Το ρεύμα $I_{\text{sc,γραμμής}}$ με την κανονική

τάση 400 V είναι $15 \cdot \frac{400}{100} = 60 \text{ A}$ και το ρεύμα

$$I_{\text{sc,γραμμής}} = \frac{60}{\sqrt{3}} \text{ ή } 20\sqrt{3} \text{ A.}$$

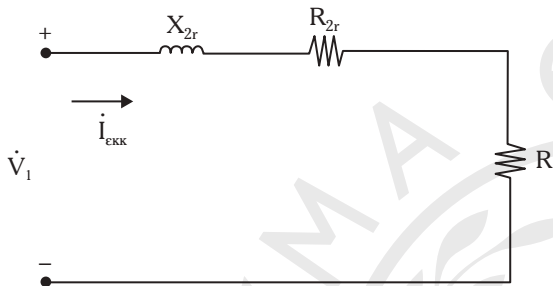
Το ρεύμα $I_{\text{εκκ.φασικό},Y}$ είναι $\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 20\sqrt{3} = 20 \text{ A.}$

Εφόσον ο κινητήρας στη διάρκεια της εκκινήσεως είναι συνδεδεμένος σε αστέρα, το $I_{\text{εκκ.γραμμής},Y}$

είναι 20 A και $\frac{I_{\text{εκκ.},Y}}{I_{\text{π.φ.},Y}} = \frac{20}{14,56} = 1,374.$

4.7.5 Εκκίνηση ασυγχρόνων κινητήρων με δακτυλίδια.

Η εκκίνηση των τριφασικών ασυγχρόνων κινητήρων με δακτυλίδια γίνεται τοποθετώντας ένα σύστημα αντιστάσεων σε σειρά με το κύκλωμα του δρομέα. Με αυτήν τη μέθοδο μειώνουμε το ρεύμα εκκινήσεως και αυξάνουμε τη ροπή εκκινήσεως. Στο σχήμα 4.7ε, δίδεται το κυκλωματικό μοντέλο του κινητήρα (ο κλάδος διεγέρσεως παραλείπεται) με την εξωτερική αντίσταση R , η οποία προστίθεται στο κύκλωμα του δρομέα. Εδώ, αμελούμε τη σύνθετη αντίσταση του στάτη.



Σχ. 4.7ε

Εκκίνηση με εξωτερική αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με το κύκλωμα του δρομέα.

Το ρεύμα εκκινήσεως είναι:

$$I_{εκκ} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_{2r} + R)^2 + X_{2r}^2}} \quad (4.108)$$

Η ροπή εκκινήσεως $T_{εκκ}$ είναι:

$$T_{εκκ} = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{V_1^2 (R_{2r} + R)}{(R_{2r} + R)^2 + X_{2r}^2} \quad (4.109)$$

Η μέγιστη ροπή εκκινήσεως είναι όταν:

$$R_{2r} + R = X_{2r} \quad (4.110)$$

και συμπίπτει με τη ροπή ανατροπής.

Ρυθμίζοντας το σύστημα των εξωτερικών αντιστάσεων, είναι δυνατό να έχουμε ρεύμα εκκινήσεως και ροπή εκκινήσεως σε επιθυμητά επίπεδα.

- Λυμένη άσκηση.

Τα κυκλώματα του δρομέα ενός ασύγχρονου κινητήρα χαρακτηρίζονται από $R_{2r} = 0,015 \Omega$ και $X_{2r} = 0,15 \Omega$. Γνωρίζοντας ότι η ολίσθηση στο ονομαστικό φορτίο είναι 2,3%, να υπολογίσετε την τιμή της εξωτερικής αντιστάσεως R , που πρέπει να προσθέσουμε σε κάθε φάση του δρομέα, ώστε η

ροπή εκκινήσεως $T_{εκκ}$ να είναι 20% μεγαλύτερη από την ροπή πλήρους φορτίου (ονομαστική) $T_{π.φ.}$.

Λύση.

Γνωρίζουμε ότι ισχύει:

$$T = K_y \cdot \frac{R_{2r}}{\frac{R_{2r}^2}{s} + sX_{2r}} \quad \text{για } R_1 = 0 \text{ και } X_1 = 0.$$

Η ροπή πλήρους φορτίου είναι:

$$\begin{aligned} T &= K_y \frac{R_{2r}}{\frac{R_{2r}^2}{s_{π.φ.}} + s_{π.φ.} X_{2r}^2} = \\ &= K_y \frac{15 \cdot 10^{-3}}{\frac{15^2 \cdot 10^{-6}}{0,032} + 0,032 \cdot 150^2 \cdot 10^{-6}} = 1,935 K_y, \end{aligned}$$

ενώ η ροπή εκκινήσεως με R' τη συνολική αντίσταση ανά φάση ($R' = R_{2r} + R$) είναι:

$$T'_{εκκ} = K_y \frac{R'}{(R')^2 + X_{2r}^2}.$$

Όμως πρέπει $T_{εκκ} = 1,20 \cdot T_{π.φ.}$, δηλαδή:

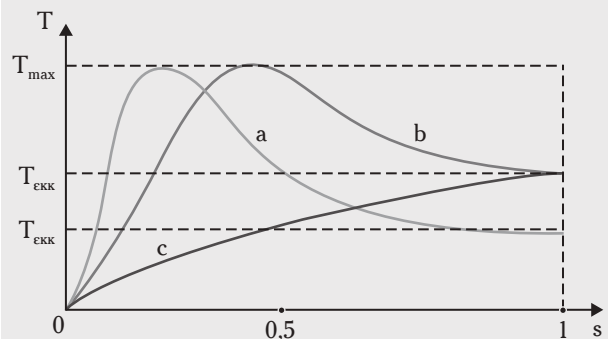
$$K_y \frac{R'}{(R')^2 + X_{2r}^2} = 1,20 \cdot 1,935 K_y$$

$$\text{ή} \quad 2,32 (R')^2 - R' + 0,0523 = 0.$$

Λύνοντας ως προς R' έχουμε:

$$\begin{aligned} R' &= \frac{1 \pm \sqrt{1 - 0,486}}{4,64} = \frac{1 \pm 0,716}{4,64} = \\ &= 0,37 \Omega \text{ και } 0,0612 \Omega. \end{aligned}$$

Η μεγαλύτερη τιμή αντιστοιχεί στην καμπύλη c στην οποία αντιστοιχεί η ροπή εκκινήσεως $T_{εκκ}$ (σχ. 4.7στ) και η οποία δίδεται στη γραφική παρά-



Σχ. 4.7στ

Γραφική παράσταση της συνάρτησεως $T = f(s)$.

σταση της συναρτήσεως $T=f(s)$, γι' αυτό αυτήν την τιμή την απορρίπτουμε. Τότε είναι:

$$R = R' - R_{2r} - 0,0612 - 0,015 = 0,0462 \Omega.$$

4.7.6 Κατηγορίες ασύγχρονων κινητήρων με βραχυκυκλωμένο δρομέα.

Ο κατασκευαστής των ασύγχρονων κινητήρων μπορεί να μεταβάλλει τόσο την αντίσταση, όσο και την αντίδραση των αγωγών του δρομέα αλλάζοντας το μέγεθός τους, τη μορφή τους και το βάθος των αυλακιών. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε μια σημαντική περιοχή ροπών εκκινήσεως και ρευμάτων εκκινήσεως. Επιθυμούμε το ρεύμα εκκινήσεως να κρατηθεί όσο το δυνατό χαμηλότερο, ενώ η αναπτυσσόμενη ροπή εκκινήσεως να είναι η προδιαγεγραμμένη.

Ο Σύλλογος των Αμερικανών Κατασκευαστών (NEMA) έχει ταξινομήσει τους ασύγχρονους κινητήρες με τύλιγμα κλωβού σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά εκκινήσεως στις εξής τέσσερις κατηγορίες:

1) Ασύγχρονοι Κινητήρες Κατηγορίας A.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες με τύλιγμα κλωβού της κατηγορίας αυτής έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- 1) Κανονική ροπή εκκινήσεως.
- 2) Κανονικό ρεύμα εκκινήσεως, και
- 3) χαμηλή ολίσθηση.

Οι κινητήρες αυτής της κατηγορίας έχουν απλό κλωβό χαμηλής αντιστάσεως και καλή συμπεριφορά λειτουργίας σε βάρος της εκκινήσεως. Η μέγιστη ροπή (ροπή ανατροπής) είναι υψηλή (πάνω από 200%) και συμβαίνει σε χαμηλή ολίσθηση (< 20%). Το ρεύμα εκκινήσεως είναι υψηλό 500–800% του ρεύματος πλήρους φορτίου κι αυτό είναι το κύριο μειονέκτημα της κατασκευής αυτής.

Ο κινητήρας της κατηγορίας A είναι η βασική κατασκευή για μεγέθη κάτω από 7,5 και πάνω από 200 HP. Χρησιμοποιείται για ηλεκτροκίνηση, ουσιαστικά, σταθερού αριθμού στροφών, όπου οι απαιτήσεις σε ροπή εκκινήσεως δεν είναι σοβαρές όπως σε ανεμιστήρες, αντλίες και εργαλειομηχανές.

2) Ασύγχρονοι Κινητήρες Κατηγορίας B.

Τα χαρακτηριστικά αυτής της κατηγορίας είναι:

- 1) Η κανονική ροπή εκκινήσεως.
- 2) Το χαμηλό ρεύμα εκκινήσεως, και
- 3) η χαμηλή ολίσθηση.

Ο κινητήρας της κατηγορίας B διαφέρει από τον κινητήρα της κατηγορίας A κατά το ρεύμα εκκινή-

σεως, που είναι 75% του ρεύματος εκκινήσεως της κατηγορίας A. Οι κινητήρες της κατηγορίας B κατασκευάζονται για ισχύ μεταξύ 7,5 HP και 200 HP. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ανάλογες των κινητήρων της κατηγορίας A.

3) Ασύγχρονοι Κινητήρες Κατηγορίας C.

Τα χαρακτηριστικά αυτής της κατηγορίας είναι:

- 1) Η υψηλή ροπή εκκινήσεως, και
- 2) το χαμηλό ρεύμα εκκινήσεως.

Οι κινητήρες της κατηγορίας αυτής έχουν δρομέα με διπλό κλωβό με υψηλότερη αντίσταση από τις κατηγορίες A και B. Ως αποτέλεσμα έχουμε υψηλότερη ροπή εκκινήσεως με χαμηλό ρεύμα εκκινήσεως, αλλά η απόδοση στην κανονική λειτουργία είναι χαμηλότερη και η ολίσθηση υψηλότερη από τις κατηγορίες A και B. Βρίσκουν εφαρμογές σε συμπιεστές και μεταφορικές ταινίες. Η ισχύς για τη κατηγορία C είναι από 10 HP έως 300 HP.

4) Ασύγχρονοι Κινητήρες Κατηγορίας D.

Τα χαρακτηριστικά αυτής της κατηγορίας είναι:

- 1) Η υψηλή ροπή εκκινήσεως, και
- 2) η υψηλή ολίσθηση.

Οι δρομείς των κινητήρων αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν κλωβό υψηλής αντιστάσεως από ορείχαλκο. Αναπτύσσουν πολύ μεγάλη ροπή εκκινήσεως με χαμηλό ρεύμα εκκινήσεως. Λειτουργούν με μεγάλη ολίσθηση στο πλήρες φορτίο (7–11%) και συνεπώς έχουν χαμηλή απόδοση λειτουργίας. Η κύρια εφαρμογή τους συνίσταται στα εναλλασσόμενα φορτία, τα οποία απαιτούν υψηλή επιτάχυνση και επίσης στα φορτία κρούσεων, όπως οι διαφόρων τύπων κρουστικές πρέσες. Χρησιμοποιούνται σε ισχύ από 50 έως μερικές εκατοντάδες HP.

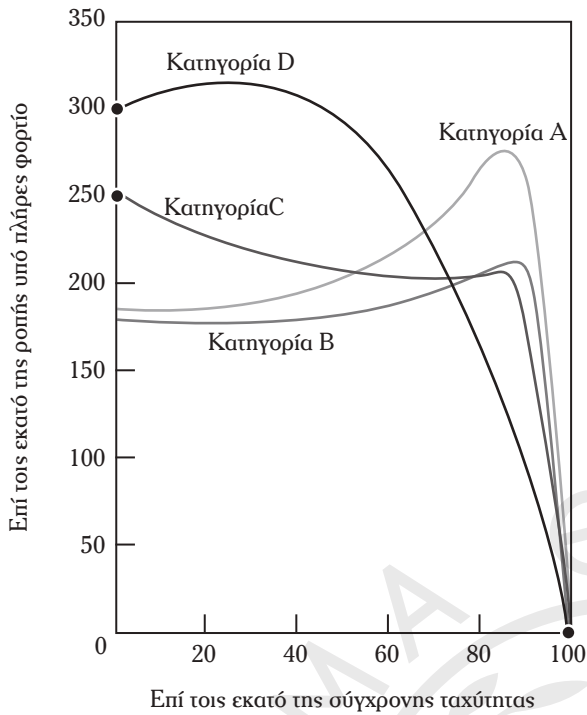
Στο σχήμα 4.7ζ δίδονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες των τεσσάρων κατηγοριών κινητήρων επαγωγής με κλωβό.

4.8 Ασύγχρονοι κινητήρες διπλού κλωβού.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα έχουν το μειονέκτημα ότι απορροφούν μεγάλο ρεύμα κατά την εκκίνησή τους, αναπτύσσοντας ταυτόχρονα μέτρια ροπή εκκινήσεως.

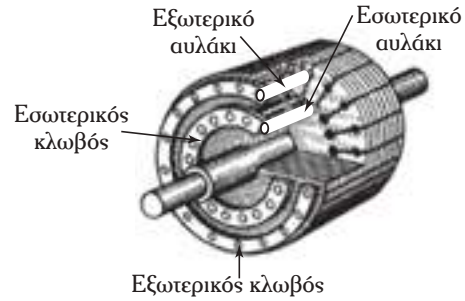
Αυτά τα μειονεκτήματα ξεπεράστηκαν με την κατασκευή (το 1894 από τον Boucherot) των ασύγχρονων κινητήρων με διπλό κλωβό.

Ο κινητήρας αυτός έχει δρομέα με δύο κλωβούς. Έναν εξωτερικό (στην περιφέρεια του δρομέα) και έναν εσωτερικό. Κάθε κλωβός έχει τους δικούς του



Σχ. 4.7ζ

Κατηγορίες A, B, C, D κινητήρων επαγωγής με κλωβό.



Σχ. 4.8α

Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας με διπλό κλωβό.

δακτύλιους βραχυκυκλώσεως (σχ. 4.8α).

Τα αυλάκια του εξωτερικού κλωβού, «α» [σχ. 4.8β(α)] έχουν μεγάλη ωμική αντίσταση και μικρή αντίδραση σκεδάσεως [πρακτικά η ροή σκεδάσεως αναπτύσσεται όλη στον διάκενο χώρου του κινητήρα, σχ. 4.8β(β)].

Τα αυλάκια του εσωτερικού κλωβού «β», έχουν μεγάλη ωμική αντίσταση και μεγάλη αντίδραση σκεδάσεως [η ροή σκεδάσεως αναπτύσσεται περισσότερο στο σιδηρομαγνητικό υλικό του δρομέα, σχ. 4.8β(β)].

Το ανά φάση ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με διπλό κλωβό, δίδεται στο σχήμα 4.8γ. Το ισοδύναμο κύκλωμα του δρομέα αποτελείται από δύο κλάδους.

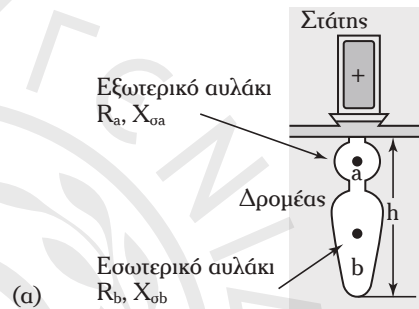
Κατά την εκκίνηση αυτού του κινητήρα υπερτερεί η αντίδραση σκεδάσεως X. Στη λειτουργία με ονομαστικό φορτίο (η ολίσθηση τείνει στο μηδέν) υπερτερεί η ωμική αντίσταση R. Ισχύει το ακόλουθο διάγραμμα:

Για $s=1$ έχουμε: $\begin{cases} X_{ob} \gg R_b \\ X_{oa} \gg R_a/S \end{cases} \rightarrow X_{ob} \gg X_{ob} \rightarrow I_a \gg I_b$

Μεγάλη τιμή της ροπής εκκινήσεως ← Υψηλές απώλειες χαλκού ←

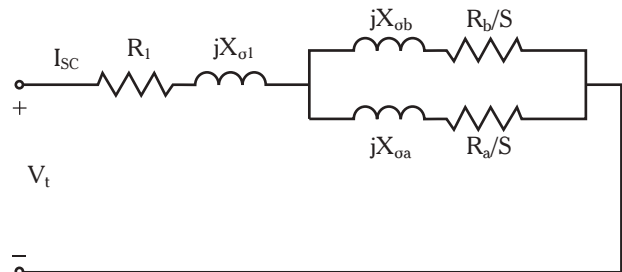
Όταν $s \rightarrow 0$ τότε: $\begin{cases} X_{ob} \ll R_b \\ X_{oa} \ll R_a/S \end{cases} \rightarrow R_b < R_a \rightarrow I_b > I_a$

Μειωμένες απώλειες χαλκού δρομέα όταν ο κινητήρας λειτουργεί στο ονομαστικό φορτίο ←



Σχ. 4.8β

α) Ωμική αντίσταση και αντίδραση σκεδάσεως του εξωτερικού και εσωτερικού αυλακίου του δρομέα διπλού κλωβού, και β) καινομή ροής σκεδάσεως στον δρομέα διπλού κλωβού ασύγχρονου κινητήρα.



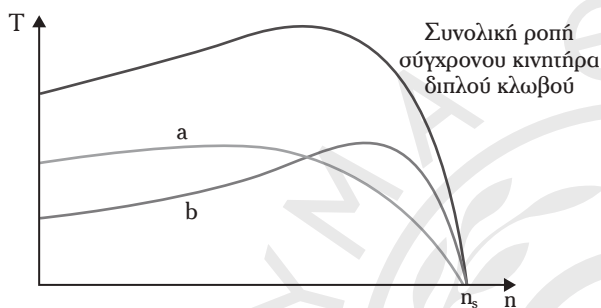
Σχ. 4.8γ

Ανά φάση ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με διπλό κλωβό.

Κατά την εκκίνηση του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με διπλό κλωβό, το ρεύμα κατανέμεται περισσότερο στον εξωτερικό κλωβό «α».

Στην ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα, το ρεύμα κατανέμεται στον εσωτερικό κλωβό «β». Οπότε εκμεταλλευόμαστε τις καλές ιδιότητες του εξωτερικού κλωβού κατά την εκκίνηση του κινητήρα και τις καλές ιδιότητες του εσωτερικού κλωβού στην κανονική κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα.

Η χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα με διπλό κλωβό αποτελείται από το άθροισμα των ροπών οι οποίες αναπτύσσονται στους δύο κλωβούς «α» και «β» (σχ. 4.8δ).



Σχ. 4.8δ

Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας περιστροφής ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με διπλό κλωβό.

Ο ασύγχρονος κινητήρας με διπλό κλωβό χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις κατά τις οποίες απαιτούνται συχνές εκκινήσεις και διακοπές των μηχανικών φορτίων που συνδέονται σε αυτόν τον κινητήρα.

4.8.1 Ασύγχρονος κινητήρας βαθέων αυλακιών.

Στους κινητήρες βαθέων αυλακιών (σχ. 4.8ε) η επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος του δρομέα αυξάνεται με το βάθος των αυλακιών του δρομέα.

Κατά την εκκίνηση, η σύνθετη αντίσταση είναι μεγαλύτερη στο μέρος της ράβδου η οποία βρίσκεται στο βάθος του αυλακιού, οπότε το ρεύμα συσσωρεύεται προς την περιφέρεια όπου παρουσιάζεται μεγαλύτερη ωμική αντίσταση, λόγω χρήσεως μικρότερης διατομής, και μικρότερη επαγωγική αντίδραση. Με αυτό τον τρόπο αναπτύσσεται ικανοποιητική ροπή με μικρό ρεύμα εκκινήσεως. Στην κανονική λειτουργία



Σχ. 4.8ε
Δρομέας βαθέων αυλακιών.

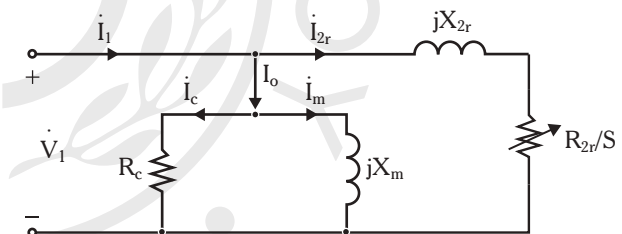
του κινητήρα το ρεύμα μετατοπίζεται προς το εσωτερικό των ράβδων και εξασφαλίζεται λειτουργία του κινητήρα με καλό βαθμό αποδόσεως.

Οι δρομείς βαθέων αυλακιών ονομάζονται και **δρομείς μετατοπίσεως ρεύματος**. Εξαιτίας της απλούστερης κατασκευής του σε σχέση με τους κινητήρες διπλού κλωβού χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε απευθείας εκκίνηση για ισχύ μέχρι και μερικές εκατοτοντάδες kW.

4.9 Κυκλικό διάγραμμα του ασύγχρονου κινητήρα.

4.9.1 Εισαγωγή.

Το κυκλικό διάγραμμα, γενικά των ασυγχρόνων μηχανών, έχει μεγάλη σημασία, γιατί μέσω αυτού παίρνουμε πληροφορίες για τη γενικότερη λειτουργική τους συμπεριφορά. Το κυκλικό διάγραμμα είναι ο γεωμετρικός τόπος των ρευμάτων, της ασύγχρονης μηχανής, σε συνάρτηση με την ολίσθηση της μηχανής, υποθέτοντας ότι η τάση ακροδεκτών (τάση δικτύου) και η συχνότητα της τάσεως του δικτύου είναι σταθερά μεγέθη. Για την κατασκευή του διαγράμματος χρησιμοποιούμε το απλοστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.9α.



Σχ. 4.9α

Απλοστευμένο ισοδύναμο, μονοφασικό κύκλωμα χρήσιμο για την κατασκευή του κυκλικού διαγράμματος.

Θεωρούμε ένα ορθοκανονικό σύστημα αξόνων y, x . Τοποθετούμε την τάση ακροδεκτών V_1 στον άξονα των τεταγμένων. Αποδεικνύεται ότι όταν η ολίσθηση μεταβάλλεται, το πέρας του διανύσματος I_{2r} διαγράφει μια περιφέρεια κύκλου (σχ. 4.9β), η οποία εφάπτεται στην αρχή, O , των αξόνων y, x και η διάμετρος συμπίπτει με τον άξονα των τεταγμένων (άξονας x).

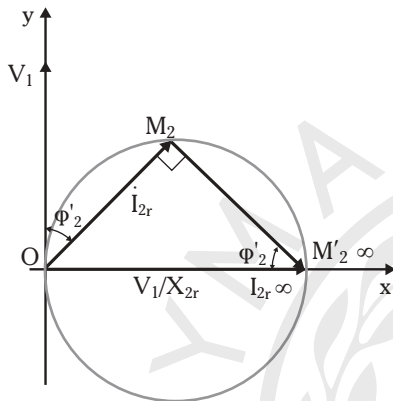
Η απόδειξη είναι απλή. Το μέτρο του ρεύματος I_{2r} είναι :

$$I_{2r} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R_{2r}}{s}\right)^2 + X_{2r}^2}} \quad (4.111)$$

ενώ
$$\epsilon\phi\phi'_2 = s \frac{X_{2r}}{R_{2r}} \quad (4.112)$$

Παρατηρούμε ότι:

1) Για $s = 0$, το ρεύμα του δρομέα είναι μηδενικό και η φασική απόκλιση ως προς την τάση (άξονας των τεταγμένων) είναι μηδενική (ο δρομέας περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα περιστροφής και στην ίδια φορά με το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο). Οπότε η αρχή των αξόνων O (σχ. 4.9β) είναι ένα σημείο του διαγράμματος και η εφαπτόμενη στο σημείο αυτό είναι ο άξονας των τεταγμένων.



Σχ. 4.9β

Γεωμετρικός τόπος του σημείου M_2 όταν μεταβάλλεται η ολίσθηση s .

2) Για $s = \infty$, (ο δρομέας περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα, άπειρη, με φορά αντίθετη του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου) το ρεύμα I_{2r} είναι:

$$I_{2r} = \frac{V_1}{X_{2r}} \quad \text{και} \quad \phi'_2 = 90^\circ, \quad \text{επειδή} \quad \epsilon\phi\phi'_2 = \infty.$$

Αυτό δικαιολογεί τη θέση του σημείου $M'_{2\infty}$ στο σχήμα 4.9β το οποίο δίδει το μέτρο της διαμέτρου του κυκλικού διαγράμματος.

3) Για οποιαδήποτε τιμή s της ολίσθησής εχομε:

$$I_{2r} = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R_{2r}}{s}\right)^2 + X_{2r}^2}} = \frac{V_1}{X_{2r}} \cdot \frac{X_{2r}}{\sqrt{\left(\frac{R_{2r}}{s}\right)^2 + X_{2r}^2}} \quad (4.113)$$

όπου
$$\frac{X_{2r}}{\sqrt{\left(\frac{R_{2r}}{s}\right)^2 + X_{2r}^2}} = \eta\mu\phi'_2. \quad (4.114)$$

Η εξίσωση 4.113, γνωρίζοντας ότι ισχύει $\frac{V_1}{X_{2r}} = I_{2r\infty}$, γράφεται:

$$I_{2r} = I_{2r\infty} \eta\mu\phi'_2. \quad (4.115)$$

Από την εξίσωση 4.115 προκύπτει ότι το ρεύμα του δρομέα είναι μία κάθετος του ορθογωνίου τριγώνου $OM_2M'_{2\infty}$, στο σημείο M_2 .

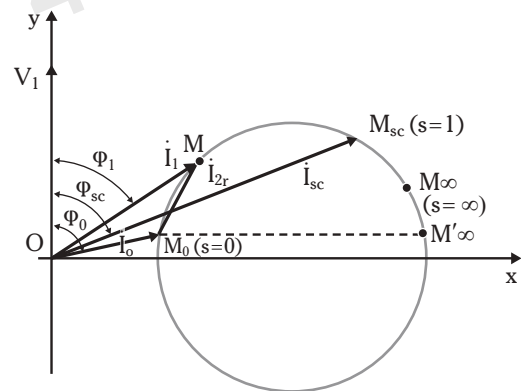
Τελικά, αποδείχθηκε ότι όταν η ολίσθηση s μεταβάλλεται, το σημείο M_2 , πέρας του διανύσματος I_{2r} , διαγράφει περιφέρεια κύκλου γιατί στο σημείο M_2 η γωνία είναι πάντοτε 90° και το τμήμα $\overline{OM'_{2\infty}}$ έχει σταθερή τιμή.

Για να κατασκευαστεί το κυκλικό διάγραμμα του ρεύματος του στάτη I_1 πρέπει να λάβομε υπόψη ότι ισχύει:

$$I_1 = I_0 + I_{2r}. \quad (4.116)$$

Το διάνυσμα I_0 έχει πλάτος και όρισμα σταθερά γιατί η σύνθετη αντίσταση του παράλληλου κλάδου έχει τοποθετηθεί μεταξύ των ακροδεκτών του ισοδύναμου κυκλώματος του κινητήρα (σχ. 4.9α), οπότε κατασκευάζομε το κυκλικό διάγραμμα του ρεύματος του στάτη I_1 , μετατοπίζοντας το κυκλικό διάγραμμα του ρεύματος του δρομέα I_{2r} ως προς την αρχή των αξόνων O (σχ. 4.9γ). Ο γεωμετρικός τόπος του πέρατος του διανύσματος I_1 είναι μια περιφέρεια κύκλου.

Από το σχήμα 4.9γ, για $s = 0$ (ο δρομέας περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα) έχομε $I_1 \equiv I_0$, οπότε ορίζεται το σημείο M_0 του κυκλικού διαγράμματος. Αυξάνοντας το φορτίο του κινητήρα, αυξάνεται η ολίσθηση, οπότε αυξάνεται η ένταση του ρεύματος του στάτη ενώ μειώνεται, ταυτόχρονα, η φασική απόκλισή του (σημείο M , σχ. 4.9γ). Στη συνέχεια, αν εφαρμοστεί πέδη στον κινητήρα μέχρι να ακινητοποιηθεί, η ολίσθηση γίνεται ίση με τη μονάδα και το ρεύμα του στάτη και η φασική απόκλιση ϕ_{sc} παίρνουν με-



Σχ. 4.9γ

Κυκλικό διάγραμμα του ρεύματος του στάτη μιας τριφασικής ασύγχρονης μηχανής.

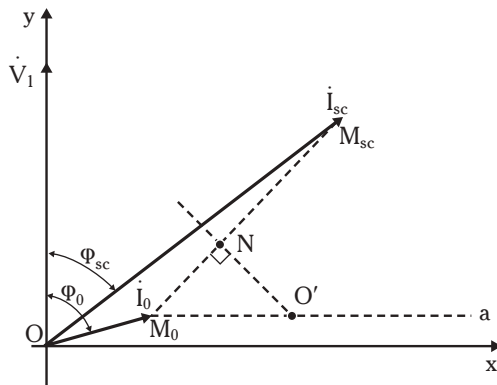
γάλες τιμές (οι τιμές του ρεύματος του στάτη γίνονται ίσες με το ρεύμα βραχυκυκλώσεως, I_{sc}). Σε αυτήν την περίπτωση ο κινητήρας λειτουργεί στην κατάσταση βραχυκυκλώσεως.

Στο σχήμα 4.9γ, το τόξο M_0M_{sc} του κυκλικού διαγράμματος αντιστοιχεί στη λειτουργία της ασύγχρονης μηχανής ως ασύγχρονος κινητήρας, ενώ το τόξο $M_{sc}(s=1)M'_\infty(s=\infty)$ αντιστοιχεί στη λειτουργία του κινητήρα ως πέδη γιατί η ολίσθηση είναι μεγαλύτερη της μονάδας. Το υπόλοιπο μέρος του κυκλικού διαγράμματος (σχ. 4.9γ) αντιστοιχεί στη λειτουργία της ασύγχρονης μηχανής ως ασύγχρονη γεννήτρια.

Η κατασκευή του κυκλικού διαγράμματος του σχήματος 4.9γ έγινε με την προϋπόθεση ότι αμελήσαμε τις ωμικο-επαγωγικές πτώσεις τάσεως στον στάτη. Στην πράξη αυτό δεν ισχύει, γι' αυτό το κυκλικό διάγραμμα προκύπτει με διαφορετικές διαστάσεις. Για παράδειγμα το σημείο που αντιστοιχεί στην ολίσθηση $s = \infty$ δεν τοποθετείται στο σημείο M'_∞ αλλά στο σημείο M_∞ γιατί πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τις απώλειες χαλκού του στάτη. Γι' αυτό, το κυκλικό διάγραμμα του σχήματος 4.9γ θεωρείται απλοποιημένο κυκλικό διάγραμμα.

4.9.2 Πρακτική κατασκευή του κυκλικού διαγράμματος.

Για να κατασκευάσουμε το κυκλικό διάγραμμα της ασύγχρονης μηχανής και ιδιαίτερα του ασύγχρονου κινητήρα (σχ. 4.9δ), είναι ανάγκη να γνωρίζουμε τρία σημεία: το κέντρο O' και δύο σημεία του διαγράμματος. Αυτά τα σημεία είναι: το M_0 , το οποίο αντιστοιχεί στη λειτουργία εν κενώ του κινητήρα ($s = 0$) και το M_{sc} , το οποίο αντιστοιχεί στη λειτουργία του κινητήρα με ακίνητο δρομέα ($s = 1$). Από τη δοκιμή εν κενώ, όταν ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση και συχνότητα (μεγέθη με βάση τα οποία



Σχ. 4.9δ

Κατασκευή του κέντρου O' του κυκλικού διαγράμματος.

κατασκευάζουμε το κυκλικό διάγραμμα), παίρνομε:

- 1) την τιμή του ρεύματος διεγέρσεως I_o ,
- 2) την τιμή της γωνίας ϕ_o από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\text{συν}\phi_o = \frac{P_o}{3V_1I_o} \quad (4.117)$$

όπου P_o είναι η ισχύς την οποία δίδουν τα δύο βατόμετρα (σχ. 4.6α) και $V_1 = \frac{V_o}{\sqrt{3}}$ είναι η φασική τάση την οποία δίδει το βολτόμετρο της πειραματικής διάταξης του σχήματος 4.6α.

Από τη δοκιμή με ακίνητο δρομέα (σχ. 4.6γ) παίρνομε:

- 1) Το ρεύμα I_{sc} και
- 2) τη γωνία ϕ_{sc} :

$$\text{συν}\phi_{sc} = \frac{P_{sc}}{3V_{sc}I_{ov}} \quad (4.118)$$

όπου I_{ov} το ονομαστικό ρεύμα το οποίο ρέει στον κινητήρα κατά τη δοκιμή με ακίνητο δρομέα.

Το κέντρο (O') του κυκλικού διαγράμματος προσδιορίζεται από την κατασκευή η οποία δίδεται στο σχήμα 4.9δ.

Τοποθετούμε τα διανύσματα I_o και I_{sc} με φασική απόκλιση ως προς τον άξονα των τεταγμένων ϕ_o και ϕ_{sc} , αντίστοιχα. Φέρουμε τη μεσοκάθετο στο ευθύγραμμο τμήμα M_0M_{sc} , η οποία τέμνει την ευθεία M_0 α στο σημείο O' , που είναι το κέντρο του κυκλικού διαγράμματος.

4.9.3 Χρησιμότητα του πραγματικού κυκλικού διαγράμματος ασύγχρονου κινητήρα.

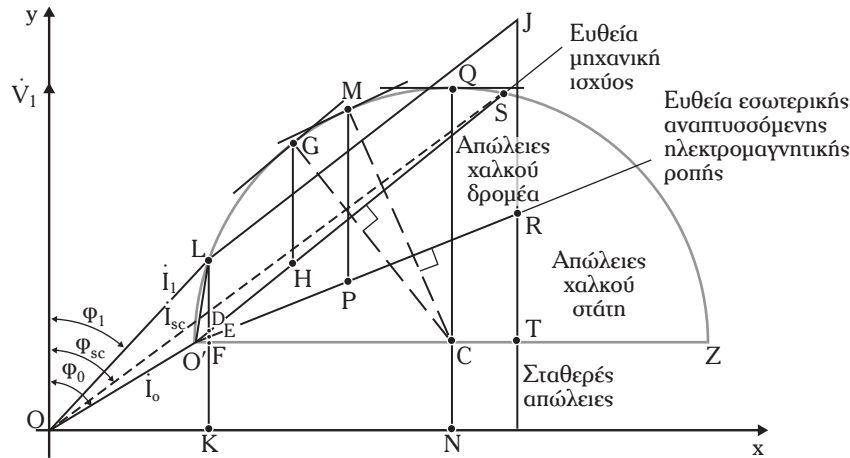
Το κυκλικό διάγραμμα (σχ. 4.9ε) του ασύγχρονου κινητήρα, κυρίως, εκφράζει τη μεταβολή του ρεύματος του στάτη με τη μεταβολή του φορτίου.

Χρησιμοποιείται για να καθορίζεται κυρίως:

- 1) Το ρεύμα του στάτη στη λειτουργία του κινητήρα στο πλήρες φορτίο.
- 2) Τον συντελεστή ισχύος του κινητήρα στο πλήρες φορτίο.
- 3) Την ολίσθηση του κινητήρα στο πλήρες φορτίο.
- 4) Την απόδοση στο πλήρες φορτίο.
- 5) Τη ροπή στο πλήρες φορτίο.
- 6) Τη ροπή εκκινήσεως.
- 7) Τη μέγιστη ροπή εξόδου του κινητήρα, και
- 8) τη μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή του κινητήρα.

– Διαδικασία χαράξεως του κυκλικού διαγράμματος του σχήματος 4.9ε.

- 1) Θεωρούμε ένα ορθοκανονικό σύστημα αξόνων



Σχ. 4.9ε

Κυκλικό διάγραμμα ασύγχρονου κινητήρα.

νων Oxy . Τοποθετούμε στον άξονα των y τη φασική τάση V_1 , τροφοδοσίας του κινητήρα.

2) Χαράσσουμε το διάνυσμα του ρεύματος στη λειτουργία χωρίς φορτίο I_0 (ευθύγραμμο τμήμα OO') με φασική απόκλιση φ_0 ως προς το διάνυσμα της τάσεως V_1 .

3) Χαράσσουμε την ευθεία $O'Z$ παράλληλη στον άξονα των τεταγμένων.

4) Χαράσσουμε το διάνυσμα του ρεύματος βραχυκυκλώσεως, I_{sc} (ευθύγραμμο τμήμα OS) με φασική απόκλιση φ_{sc} ως προς τον άξονα των τεταγμένων.

5) Ενώνουμε τα σημεία O' και S . Η ευθεία η οποία διέρχεται από τα σημεία O' και S ονομάζεται ευθεία μηχανικής ισχύος (ισχύς εξόδου του κινητήρα).

6) Χαράσσουμε τη μεσοκάθετο στο ευθύγραμμο τμήμα $O'S$ η οποία τέμνει την $O'Z$ στο σημείο C το οποίο είναι το κέντρο του κυκλικού διαγράμματος. Με κέντρο το σημείο C και ακτίνα CO' γράφουμε ημιπεριφέρεια κύκλου η οποία περνάει από τα σημεία O' και S .

7) Από το σημείο S φέρομε κάθετο στον άξονα των τεταγμένων. Το ευθύγραμμο τμήμα ST εκφράζει τις συνολικές απώλειες χαλκού του ασύγχρονου κινητήρα. Το ευθύγραμμο τμήμα RT εκφράζει τις απώλειες χαλκού του στάτη.

8) Συνδέομε τα σημεία O' και R . Η ευθεία η οποία διέρχεται από αυτά τα σημεία ονομάζεται ευθεία αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Το ευθύγραμμο τμήμα εκφράζει τις απώλειες χαλκού του δρομέα του κινητήρα.

9) Προεκτείνομε το ευθύγραμμο τμήμα ST μέχρι το σημείο J . Χαράσσουμε την παράλληλο προς την ευθεία της εσωτερικά αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής, η οποία τέμνει το κυκλικό διάγραμ-

μα στο σημείο L . Συνδέομε τα σημεία O και L . Το ευθύγραμμο τμήμα OL εκφράζει το διάνυσμα του ρεύματος I_1 το οποίο απορροφά ο στάτης του ασύγχρονου κινητήρα.

10) Από το σημείο L φέρομε κάθετο στο σημείο K του άξονα των τεταγμένων. Το ευθύγραμμο τμήμα LD είναι ανάλογο της μηχανικής ισχύος εξόδου του ασύγχρονου κινητήρα. Το ευθύγραμμο τμήμα DF είναι ανάλογο των απωλειών Joule του στάτη και του δρομέα του κινητήρα.

Το ευθύγραμμο τμήμα DK είναι ανάλογο των συνολικών απωλειών του κινητήρα, ενώ το ευθύγραμμο τμήμα FK είναι ανάλογο των σταθερών απωλειών του κινητήρα (κυρίως απωλειών πυρίνα). Το ευθύγραμμο τμήμα LE είναι ανάλογο της εσωτερικά αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής του ασύγχρονου κινητήρα.

Ο συντελεστής ισχύος στο πλήρες φορτίο είναι το $\cos \varphi_1$. Η απόδοση του κινητήρα στο πλήρες φορτίο: LD/LE .

4.9.4 Παρατηρήσεις.

Για να κατασκευαστεί το κυκλικό διάγραμμα απαιτείται να γνωρίζομε την κλίμακα των ρευμάτων, από την οποία εξαρτώνται οι κλίμακες της ισχύος και ροπής αντίστοιχα. Η κλίμακα της ισχύος προκύπτει αν πολλαπλασιάσομε την κλίμακα των ρευμάτων επί $3V_1$. Για παράδειγμα αν η τάση ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα είναι 380 και το ρεύμα 10 A αντιστοιχεί σε 1 cm, προκύπτει ότι 1 cm εκφράζει και την ισχύ:

$$\frac{3 \times 380 \times 10}{\sqrt{3}} = 6.600 \text{ W.}$$

Για να έχομε τη κλίμακα των ροπών, αν P' είναι τα

ζευγάρια των πόλων του κινητήρα και f_1 η συχνότητα της τάσεως του δικτύου, πολλαπλασιάζουμε την κλίμακα των ρευμάτων επί $3P'V_1/2\pi f_1$. Για τον παραπάνω κινητήρα, υποθέτοντας ότι έχει 6 πόλους και λειτουργεί στην συχνότητα 50 Hz, έχουμε: $1 \text{ cm} = 62 \text{ Nt-m}$.

- Λυμένη άσκηση.

Σε έναν τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα 400 V, 5 HP συνδεσμολογία τυλιγμάτων στάτη σε Δ , έγιναν οι παρακάτω δοκιμές με τα αντίστοιχα αποτελέσματα μετρήσεων.

Δοκιμή εν κενώ: 400 V, 3 A, $\cos\phi_0 = 0,2$.

Δοκιμή με ακίνητο δρομέα: 200 V, 12 A, $\cos\phi_{sc} = 0,4$.

Να κατασκευαστεί το κυκλικό διάγραμμα του κινητήρα. Από το κυκλικό διάγραμμα να υπολογίσετε:

- 1) το ρεύμα πλήρους φορτίου,
- 2) τον συντελεστή ισχύος πλήρους φορτίου, και
- 3) την ροπή εκκινήσεως σε συνάρτηση με τη ροπή πλήρους φορτίου στην κανονική τάση λειτουργίας του κινητήρα.

Θεωρούμε ότι ισχύει $P_{\text{cst}} = P_{\text{cur}}$.

Λύση.

Το ρεύμα κενού φορτίου είναι $I_0 = 3 \text{ A}$ και $\cos\phi_0 = 0,2$. Οπότε έχουμε: $\phi_0 = \cos^{-1}0,2 = 78^\circ 28'$.

Το ρεύμα I_{sc} στην πράξη υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{I_{sc}}{I_{\text{lov}}} = \frac{V_1}{V_{sc}}$$

$$\text{Έτσι έχουμε: } I_{sc} = I_{\text{lov}} \frac{V_1}{V_{sc}}$$

$$\text{ή } I_{sc} = 12 \times \frac{400}{200} = 24 \text{ A.}$$

Επίσης $\cos\phi_{sc} = 0,4$ και $\phi_{sc} = \cos^{-1}0,4 = 66^\circ 25'$.

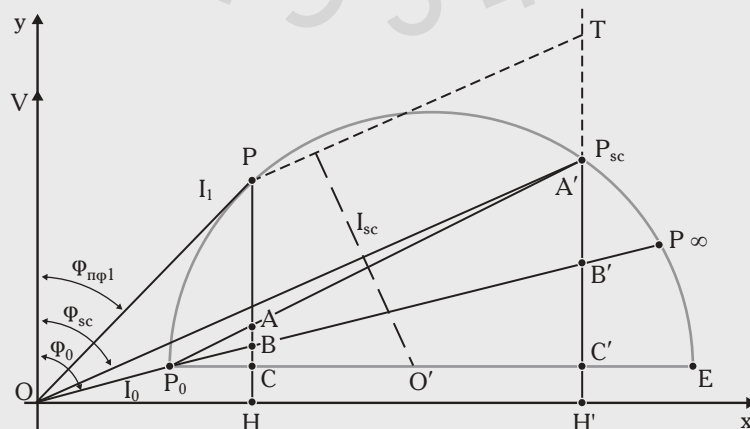
Παίρνουμε σαν κλίμακα ρευμάτων τα 2 A/cm.

Φέρομε την ευθεία OV κάθετη στην ευθεία Ox , η οποία αντιστοιχεί στην τάση εισόδου του κινητήρα (σχ. 4.9στ). Το ευθύγραμμο τμήμα $\overline{OP_0}$ χαράσσεται σε καθυστέρηση ως προς το διάνυσμα \overline{OV} κατά τη γωνία $78^\circ 28'$ και εκφράζει το ρεύμα διεγέρσεως I_0 . Το διάνυσμα $\overline{OP'_{sc}}$ χαράσσεται σε καθυστέρηση ως προς το διάνυσμα \overline{OV} κατά τη γωνία $66^\circ 25'$ και εκφράζει το ρεύμα I_{sc} , όταν ο κινητήρας τροφοδοτείται, με την κανονική του τάση. Συνδέομε το σημείο P_{sc} με το σημείο P_0 και χαράζομε την ευθεία OE παράλληλη προς την ευθεία Ox . Φέρομε τη μεσοκάθετο στο ευθύγραμμο τμήμα $\overline{P_0P'_{sc}}$ που τέμνει την P_0E στο σημείο O' που είναι και το κέντρο του κυκλικού διαγράμματος.

Για να ορίσουμε την κλίμακα της πραγματικής ισχύος φέρομε την κάθετο $A'H'$ στον άξονα των τετμημένων. Το ευθύγραμμο τμήμα $A'H'$ εκφράζει την συνολική ισχύ εισόδου στην κατάσταση βραχυκυκλώσεως ή όταν ο δρομέας του ασύγχρονου κινητήρα είναι ακινητοποιημένος.

Ισχύς εισόδου στην κατάσταση βραχυκυκλώσεως του ασύγχρονου κινητήρα:

$$P_{sc} = \sqrt{3}VI_{sc}\cos\phi_{sc} = \sqrt{3} \times 400 \times 24 \times 0,4 = 6.650 \text{ W.}$$



Σχ. 4.9στ

Η κλίμακα πραγματικής ισχύος είναι:

$$\frac{6.650}{4,8} = 1.385 \text{ W/cm.}$$

Το ευθύγραμμο τμήμα $A'C'$ εκφράζει τις απώλειες χαλκού του στάτη και του δρομέα. Το σημείο B' είναι το μέσον του ευθυγράμμου τμήματος $A'C'$ (υπόθεση ότι οι απώλειες χαλκού του στάτη ισούνται με τις απώλειες χαλκού του δρομέα).

Η ισχύς εξόδου του ασύγχρονου κινητήρα είναι $5 \text{ HP} = 5 \times 746 = 3.730 \text{ W}$. Οπότε στο κυκλικό διάγραμμα παρουσιάζεται με ευθύγραμμο τμήμα $3.730/1.385 = 2,6 \text{ cm}$.

Προεκτείνουμε τώρα το ευθύγραμμο τμήμα $A'H'$ μέχρι το σημείο T έτσι, ώστε $A'T = 2,6 \text{ cm}$. Από το σημείο T φέρουμε την παράλληλο TP στην ευθεία της αναπτυσσόμενης ισχύος του κινητήρα P_0A' , η οποία κόβει το κυκλικό διάγραμμα στο σημείο P . Συνδέουμε το σημείο P με το σημείο O του διαγράμματος. Στη συνέχεια φέρουμε την κάθετο PH στον άξονα των τετημημένων.

Από το κυκλικό διάγραμμα έχουμε:

1) Ρεύμα γραμμής πλήρους φορτίου:

$$OP = 3,4 \text{ (cm)} \times 2 = 6,8 \text{ A.}$$

2) Συντελεστής ισχύος πλήρους φορτίου:

$$\text{συνφ}_{\text{πφ1}} = \frac{HP}{OP} = \frac{2,8}{3,4} = 0,815.$$

3) Ροπή πλήρους φορτίου $T_{\text{πφ}} = BP$. Ροπή εκκίνησης $T_{\text{εκκ}} = A'B'$. Οπότε είναι:

$$\frac{T_{\text{εκκ}}}{T_{\text{πφ}}} = \frac{A'B'}{BP}$$

$$\text{ή } T_{\text{εκκ}} = \frac{A'B'}{BP} \cdot T_{\text{πφ}} = \frac{2,1}{2,25} \cdot T_{\text{πφ}} = 0,933 T_{\text{πφ}}.$$

4.10 Ρύθμιση στροφών των ασυγχρόνων κινητήρων.

Γενικά, ο ασύγχρονος κινητήρας είναι κινητήρας σταθερών στροφών όταν συνδέεται στο δίκτυο σταθερής τάσεως και συχνότητας. Ο ονομαστικός αριθμός στροφών είναι πολύ κοντά στον σύγχρονο αριθμό στροφών. Αν η ροπή φορτίου αυξάνεται, η πώση του αριθμού στροφών είναι πολύ μικρή.

Υπάρχουν βιομηχανικές εφαρμογές, οι οποίες απαιτούν από τους ασύγχρονους κινητήρες να έχουν ορισμένο αριθμό στροφών ή έναν συνεχώς μεταβαλ-

λόμενο αριθμό στροφών. Κινητήρες ΣP χρησιμοποιούνται, παραδοσιακά, σε κινητήρια συστήματα όπου απαιτείται συνεχής μεταβολή του αριθμού στροφών. Οι κινητήρες ΣP , οι οποίοι είναι αρκετά διαδεδομένοι, απαιτούν συχνή συντήρηση λόγω της υπάρξεως του συλλέκτη και των ψηκτρών και αποφεύγουμε να τους χρησιμοποιούμε σε επικίνδυνο, από ηλεκτρολογικής απόψεως, περιβάλλον. Οι ασύγχρονοι κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα είναι ανθεκτικοί, δεν έχουν συλλέκτη και βρίσκουν εφαρμογή στα πεδία υψηλών ταχυτήτων.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του ασύγχρονου κινητήρα που είναι η απλότητα και η διάρκεια ζωής τους δεν μπορούμε να τα επωφεληθούμε εύκολα όταν επιθυμούμε τον έλεγχο της ταχύτητας. Η ρύθμιση ταχύτητας του ασύγχρονου κινητήρα είναι δύσκολη και, συνεπώς, δαπανηρή. Έχουν βρεθεί πολλές μέθοδοι ρυθμίσεως ταχύτητας, κάθε μία από τις οποίες έχει και τα μειονεκτήματά της. Γενικά οι μέθοδοι ρυθμίσεως ταχύτητας των ασυγχρόνων κινητήρων διαιρούνται στην κατηγορία των μεθόδων **χωρίς απώλειες** και σ' εκείνες με **απώλειες**.

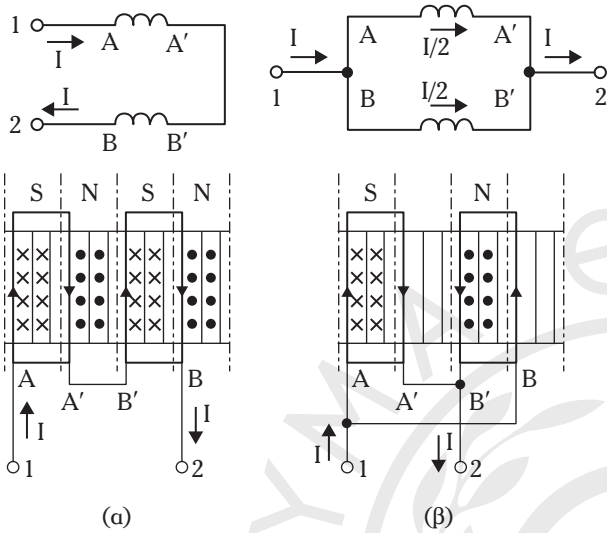
4.10.1 Μεταβολή του αριθμού των μαγνητικών πόλων.

Σύμφωνα με την εξίσωση $n_s = 120f/P$, όπου n_s η σύγχρονη ταχύτητα, f η συχνότητα των τάσεων και ρευμάτων του δικτύου και P ο αριθμός των μαγνητικών πόλων, μπορούμε να επηρεάσουμε τη σύγχρονη ταχύτητα και συνεπώς την ταχύτητα του κινητήρα, αν μεταβάλλουμε τον αριθμό των πόλων P . Το τύλιγμα του στάτη μπορεί να κατασκευαστεί έτσι, ώστε με απλές μεταβολές στις συνδέσεις των πηνίων να μεταβάλλεται, αντίστοιχα, ο αριθμός των μαγνητικών πόλων στον λόγο 2:1. Μπορούμε να επιλέγουμε τη μία ή την άλλη από τις δύο σύγχρονες ταχύτητες. Αυτό ισχύει στην περίπτωση του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα τύπου κλωβού. Πράγματι, αυτός ο τύπος του ασύγχρονου κινητήρα παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι ενώ δεν έχει φυσικούς μαγνητικούς πόλους, στον δρομέα παράγεται μαγνητικό πεδίο, το οποίο έχει τον ίδιο αριθμό μαγνητικών πόλων με τον αριθμό των μαγνητικών πόλων του πεδίου του στάτη.

Στην περίπτωση του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια υπάρχει μία πολυπλοκότητα, αφού θα πρέπει να μεταβάλλεται και ο αριθμός των μαγνητικών πόλων του τυλίγματος του δρομέα.

Άρα με δύο ανεξάρτητα τυλίγματα στον στάτη, μπορούμε να έχουμε τέσσερις διαφορετικές σύγχρονες ταχύτητες.

Ένας τύπος συνδεσμολογίας τυλιγμάτων, ο οποίος χρησιμοποιείται, συνήθως, είναι του Dahlander στον οποίο κάθε φάση αποτελείται από δύο πηνία που μπορούν να συνδεθούν σε σειρά (χαμηλή ταχύτητα) ή παράλληλα (υψηλή ταχύτητα). Στο σχήμα 4.10α, αναφερόμαστε σε μία φάση τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα, ο οποίος έχει 12 αυλάκια στον στάτη.



Σχ. 4.10α

Συνδεσμολογία των πηνίων των φάσεων ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με 12 αυλάκια στον στάτη.

Η συνδεσμολογία των πηνίων του σχήματος 4.10α(α) είναι σειράς, οπότε παίρνουμε 4 πόλους (χαμηλή ταχύτητα), ενώ η συνδεσμολογία του σχήματος 4.10α(β) είναι παράλληλη, από την οποία παίρνουμε 2 πόλους (υψηλή ταχύτητα).

Μεταβάλλοντας τη συνδεσμολογία των πηνίων μεταβάλλεται, εκτός από την ταχύτητα περιστροφής του περιστρεφόμενου πεδίου, και το φαινόμενο της επαγωγής στο διάκενο της μηχανής, με αποτέλε-

σμα να έχουμε διαφορετικές χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας. Στο σχήμα 4.10β, δίδονται διάφορες συνδεσμολογίες των πηνίων, υψηλής ταχύτητας, για τρεις τριφασικούς ασύγχρονους κινητήρες, οι οποίοι έχουν τις ίδιες χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας.

Η συνδεσμολογία του σχήματος 4.10β(α) δίδει μέγιστη ροπή, περίπου ίδια για όλες τις ταχύτητες. Αυτή η συνδεσμολογία ονομάζεται **σταθερής ροπής**.

Η συνδεσμολογία του σχήματος 4.10β(β), προσδιορίζει μία ροπή, περίπου διπλάσια στη μικρότερη ταχύτητα. Αυτή η συνδεσμολογία ονομάζεται **σταθερής ισχύος**.

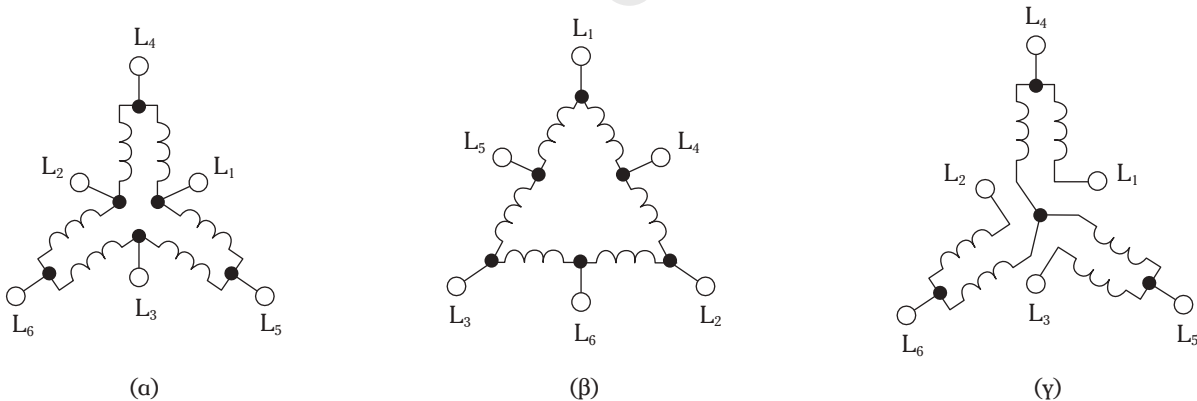
Η συνδεσμολογία του σχήματος 4.10β(γ), προσδιορίζει μια μέγιστη ροπή αρκετά μειωμένη στη μικρή ταχύτητα. Αυτή η συνδεσμολογία ονομάζεται **μέγιστης ροπής**.

Στο σχήμα 4.10γ, δίδονται οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας των τριών κινητήρων για συνδεσμολογίες των πηνίων των φάσεων του στάτη (σχ. 4.10β).

4.10.2 Μεταβολή της τάσεως του στάτη.

Η ροπή ενός ασύγχρονου κινητήρα είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσεως του στάτη. Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας δεν αλλάζει μορφή, αλλά γίνεται πιο μικρή (σχ. 4.10δ).

Μεταβάλλοντας την τάση, το σημείο λειτουργίας [σημείο τομής της χαρακτηριστικής $T = f(n)$ και της ανθιστάμενης ροπής] μετατοπίζεται προς τα αριστερά δηλαδή προς μικρότερη ταχύτητα. Όταν όμως η ολίσθηση παίρνει μεγάλες τιμές μεγαλώνουν και οι απώλειες του δρομέα σχετικά με την αποδιδόμενη μηχανική ισχύ. Αυτή η μέθοδος ρυθμίσεως συνοδεύεται από απώλειες, γι' αυτό δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για μεγάλο φάσμα. Αυτή η μέθοδος ρυθμίσεως έχει πρακτική αξία μέχρι 20% κάτω από



Σχ. 4.10β

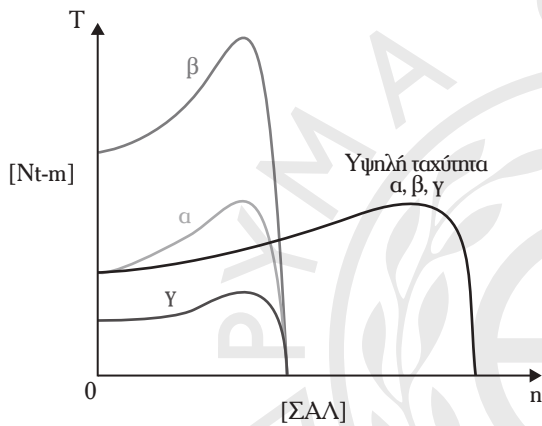
Συνδέσεις πηνίων του στάτη, τριών ασύγχρονων κινητήρων με ίδιες χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας.

τον σύγχρονο αριθμό στροφών. Η ρύθμιση ταχύτητας πραγματοποιείται με το απλό κύκλωμα που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.10ε.

Σε κάθε φάση συνδέομε δύο **αντιπαράλληλα θυρίστορ** και καθυστερώντας τους παλμούς ενόσωσε σε κάθε θυρίστορ παίρνομε ένα μέρος από την ημιτονοειδή τάση του δικτύου. Έτσι ρυθμίζομε την πρώτη αρμονική κάθε φασικής τάσεως του κινητήρα.

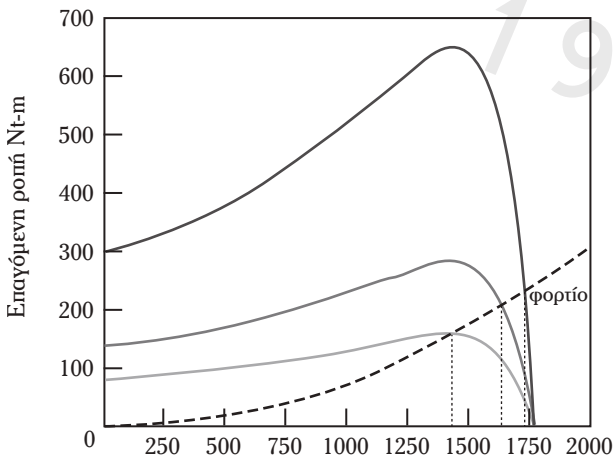
4.10.3 Μεταβολή της συχνότητας.

Από την εξίσωση $n_s = 120f/P$, αλλάζοντας τη συχνότητα f μπορούμε, χωρίς απώλειες, να ρυθμίσομε την ταχύτητα του στρεφόμενου πεδίου και συνεπώς την ταχύτητα του δρομέα. Μεταβολή όμως της συ-



Σχ. 4.10γ

Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας των τριών ασυγχρόνων κινητήρων για διάφορες συνδεομολογίες των πηνίων των φάσεων του σιάτη.



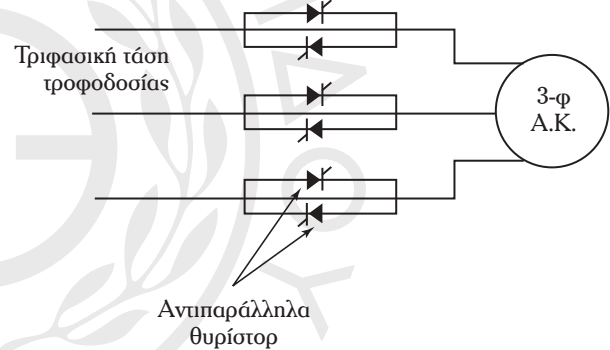
Σχ. 4.10δ

Χαρακτηριστικές T-n για διαφορετικές τιμές της τάσεως του σιάτη.

χνότητας για μια δεδομένη τιμή της τάσεως δικτύου, παράγει αποτελέσματα, πολλές φορές μη επιθυμητά. Για παράδειγμα αν αυξηθεί η συχνότητα f , μειώνεται η μέγιστη τιμή της ροπής και η αντίστοιχη τιμή της ροπής εκκινήσεως. Αν αντίθετα μειώσομε τη συχνότητα f_1 , αυξάνεται η κύρια ροπή και μαζί με αυτήν η μέγιστη μαγνητική επαγωγή στα μαγνητικά κυκλώματα με αύξηση του κορεσμού κ.λπ..

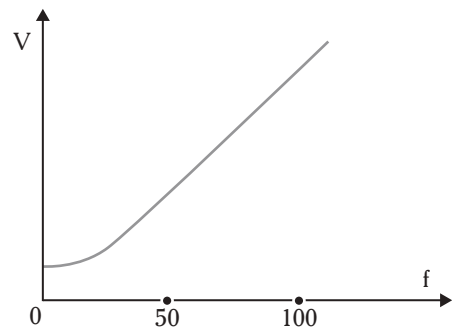
Αν θέλομε η χαρακτηριστική $T = f(n)$ να διατηρεί τη μορφή της και η ροπή ανατροπής να παραμένει σταθερή, πρέπει με τη μεταβολή της συχνότητας να μεταβάλλομε και το πλάτος της τάσεως, ώστε ο λόγος V_1/f να διατηρείται σταθερός. Διατηρώντας αυτόν τον λόγο σταθερό, διατηρούμε σταθερό το μαγνητικό πεδίο του διακένου, η χαρακτηριστική $T = f(n)$ διατηρεί τη μορφή της και η ροπή ανατροπής παραμένει σταθερή. Η μεταβολή της τάσεως με τη συχνότητα φαίνεται στο σχήμα 4.10στ.

Στη διάταξη για τη ρύθμιση της τάσεως και της



Σχ. 4.10ε

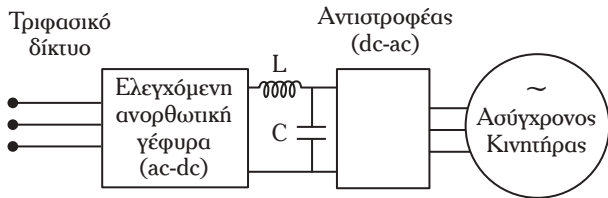
Μετατροπές με αντιπαράλληλα θυρίστορ για τη ρύθμιση της τάσεως.



Σχ. 4.10στ

Απαιτούμενη μεταβολή στην τάση αλλάζοντας τη συχνότητα, ώστε να διατηρείται σταθερό το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο.

συχνότητας του σχήματος 4.10ζ, η τάση τροφοδοσίας ανορθώνεται και στη συνέχεια, μέσω ενός αντιστροφέα, μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη τάση μεταβλητής συχνότητας και πλάτους. Η χαρακτηριστική $T = f(n)$ για μεταβλητή συχνότητα δίδεται στο σχήμα 4.10η.



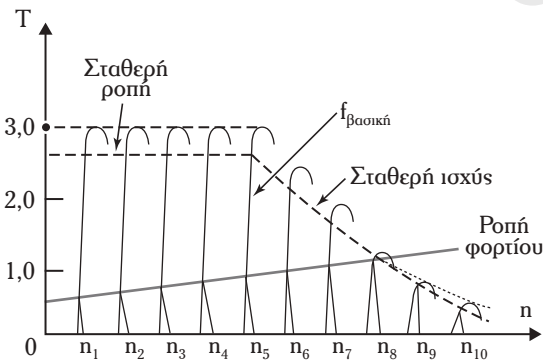
Σχ. 4.10ζ

Μειωτροπέας για τη ρύθμιση της συχνότητας και της τάσεως, όπου L ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου και C η χωρητικότητα του πυκνωτή.

Για μια ορισμένη τιμή της συχνότητας, την $f_{\text{βασική}}$, η τάση στον στάτη του κινητήρα είναι η μεγαλύτερη την οποία μπορούμε να πάρουμε από τον αντιστροφέα. Πριν από τη συχνότητα $f_{\text{βασική}}$, το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής διατηρείται σταθερό, όταν μεταβάλλεται η τάση με τη συχνότητα, ενώ έχουμε την ίδια τιμή της μέγιστης ροπής.

Πέρα από την τιμή της $f_{\text{βασική}}$, εφόσον η τάση δεν μπορεί να αυξηθεί περισσότερο με τη συχνότητα, το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο ελαττώνεται, οπότε ελαττώνεται και η μέγιστη ροπή. Η λειτουργία με σταθερή ισχύ είναι δυναμική στην περιοχή όπου το μαγνητικό πεδίο είναι εξασθενημένο. Στο σχήμα 4.10η, οι τιμές των ταχυτήτων λειτουργίας n_1, \dots, n_{10} , βρίσκονται κοντά στις αντίστοιχες τιμές των συγχρόνων ταχυτήτων. Σ' αυτήν τη μέθοδο ρύθμισης ταχύτητας, η ολίσθηση λειτουργίας είναι χαμηλή και η απόδοση μεγάλη.

Για τη ρύθμιση της ταχύτητας του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί



Σχ. 4.10η

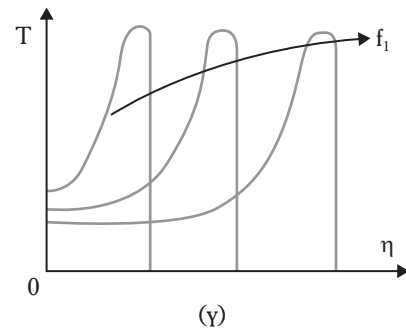
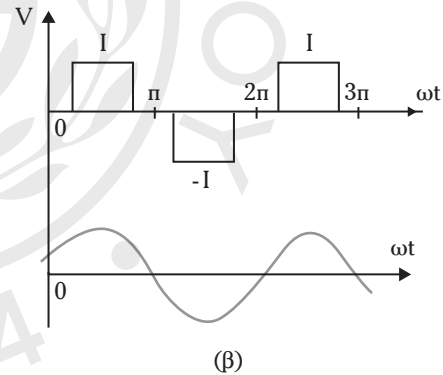
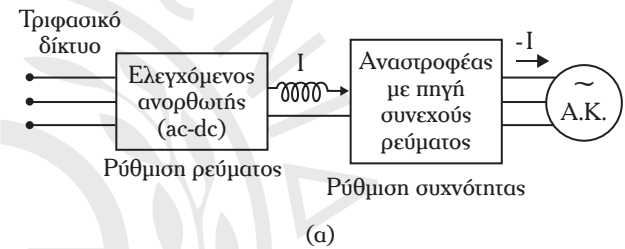
Χαρακτηριστική $T = f(n)$ ενός ασύγχρονου κινητήρα με μεταβολή τάσεως και συχνότητας.

έναν αντιστροφέα με πηγή συνεχούς ρεύματος [σχ. 4.10θ(α)]. Το πλάτος του ρεύματος ελέγχεται από τον ανορθωτή. Το επαγωγικό φίλτρο χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση του ρεύματος. Η κυματομορφή του ρεύματος του κινητήρα είναι σχεδόν τετραγωνική και έχει πλάτος 120° . Η τάση στον στάτη του κινητήρα είναι ημιτονοειδής [σχ. 4.10θ(β)].

Χαρακτηριστική $T = f(n)$ του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα, ο οποίος τροφοδοτείται από έναν αντιστροφέα με πηγή συνεχούς ρεύματος δίδεται στο σχήμα 4.10θ(γ). Αυτές οι χαρακτηριστικές έχουν απότομη κλίση κοντά στην τιμή της σύγχρονης ταχύτητας.

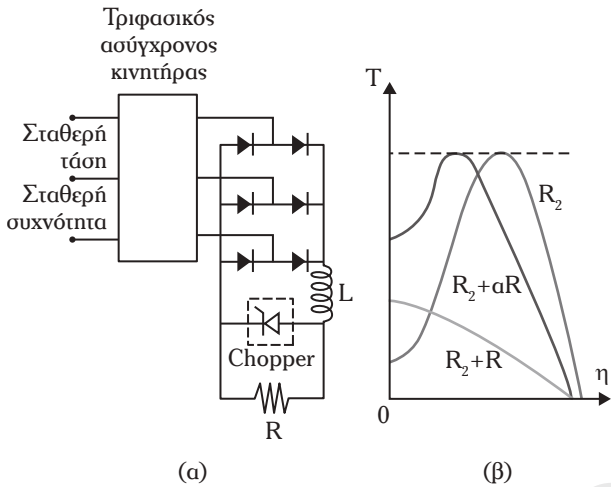
4.10.4 Ρύθμιση στροφών ενός ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα.

Συνδέοντας ένα σύστημα αντιστάσεων στα κυκλώματα του δρομέα μπορούμε να ρυθμίζουμε τις



Σχ. 4.10θ

Ρύθμιση ταχύτητας ενός ασύγχρονου κινητήρα μέσω ενός αντιστροφέα με πηγή συνεχούς ρεύματος και οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές.



Σχ. 4.10ι

(α) Σύστημα ρυθμίσεως των στροφών του ασύγχρονου κινητήρα. (β) Χαρακτηριστικές $T = f(s)$ για διάφορες τιμές της αντιστάσεως.

στροφές του ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια. Η ροπή ανατροπής παραμένει αμετάβλητη, ενώ μεταβάλλεται η ταχύτητα ανατροπής. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για ρύθμιση ταχύτητας, στην περιοχή $0 < s < 0,5$, γιατί μεγαλώνοντας την ολίσθηση μεγαλώνουν και οι απώλειες στις ωμικές αντιστάσεις.

Μια μέθοδος, την οποία χρησιμοποιούμε για τη ρύθμιση των αντιστάσεων δίδεται στο σχήμα 4.10ι. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ανορθωτική γέφυρα στον δρομέα, ηλεκτρονικό διακόπτη (chopper) και ωμική αντίσταση.

Όταν η αντίσταση R είναι διαρκώς βραχυκυκλωμένη, (όταν το chopper είναι διαρκώς «αναμμένο») τότε παίρνομε τα φυσικά χαρακτηριστικά της μηχανής. Όταν το chopper είναι «σβηστό» τότε παίρνομε την οριακή καμπύλη. Μεταξύ των δύο αυτών καμπυ-

λών μπορούμε να πάρομε όλες τις ενδιάμεσες καμπύλες μεταβάλλοντας συνεχώς τον συντελεστή

$$\alpha = \frac{T_{OFF}}{T_{ON} + T_{OFF}},$$

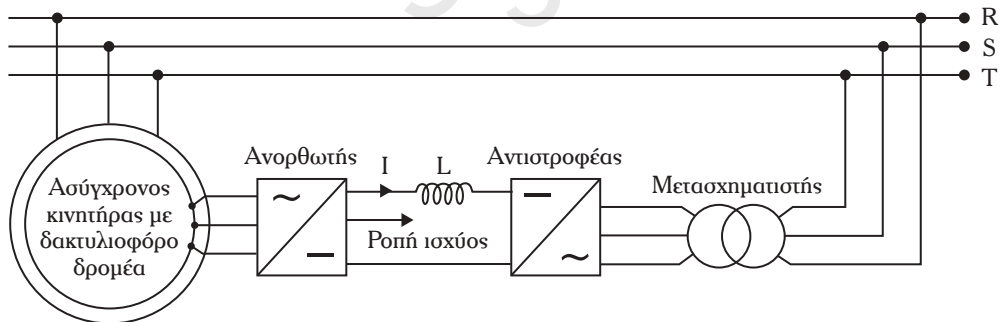
ο οποίος εκφράζει τον χρόνο «σβέσεως» του chopper προς το άθροισμα των χρόνων εναύσεως και σβέσεως, από μηδέν έως ένα. Ανορθώνοντας το ρεύμα του δρομέα και μεταβάλλοντας τη μέση τιμή της αντιστάσεως R μπορούμε γρήγορα και συνεχώς να ρυθμίσομε τον αριθμό στροφών εντός μιας περιοχής, που ορίζεται από το μέγεθος της αντιστάσεως. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για μικρής ισχύος μηχανές, γιατί στην αντίσταση R έχομε κατανάλωση ισχύος. Όταν πρόκειται να ρυθμίσομε την ταχύτητα μεγάλων μηχανών χρησιμοποιούμε το σύστημα Kramer² (σχ. 4.10ια).

Η ενέργεια ολίσθησεως επιστρέφει μέσω του αντιστροφέα (μετατροπέα) στο δίκτυο. Με τον μετατροπέα αυτόν επιβάλλομε στον δρομέα μία τάση, οπότε ρυθμίζεται η ολίσθηση σύμφωνα με την εξίσωση $E_{2s} = sE_2$.

4.11 Προστασία ασυγχρόνων κινητήρων.

Σύμφωνα με πρόσφατες στατιστικές μελέτες, οι βλάβες στους ασύγχρονους κινητήρες οφείλονται 40% σε βραχυκυκλώματα, 35% σε υπερφορτίσεις, 12% σε μηχανικές αιτίες, 8% σε διάφορες αιτίες και 5% σε γήρανση των μονωτικών υλικών.

Τρεις στις τέσσερις βλάβες προκαλούν την εμφάνιση υπερεντάσεων, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται υπερθερμάνσεις οι οποίες καταστρέφουν τους κινητήρες. Έχει εκτιμηθεί ότι το 30% των πυρκαγιών



Σχ. 4.10ια

Σύστημα Kramer για τη ρύθμιση ταχύτητας του κινητήρα.

² Σύστημα, το οποίο αποτελείται από έξι διόδους, οι οποίες συνδέονται μέσω αυτεπαγωγής, με έξι θυρίστρος. Το σύστημα ελέγχει την ταχύτητα των στροφών ενός δακτυλιοφόρου κινητήρα, με έγχυση τάσεως στα τυλίγματα του δρομέα.

πλεκτρικής προελεύσεως προέρχονται απ' τους κινητήρες. Οι κανονισμοί επιβάλλουν συγκεκριμένες διατάξεις προστασίας των κινητήρων από υπερεντάσεις.

Σ' αυτήν την ενότητα, θα αναφερθούμε, στα συστήματα προστασίας των ασύγχρονων κινητήρων με βραχυκυκλωμένο δρομέα, οι οποίοι βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων.

4.11.1 Εκκίνηση του ασύγχρονου κινητήρα και προστασία από υπερφόρτιση.

Όταν ο δρομέας ενός ασύγχρονου κινητήρα είναι ακινητοποιημένος, το δίκτυο «αντιλαμβάνεται» αυτή την κατάσταση ως ένα ισχυρό επαγωγικό φορτίο. Αν τροφοδοτηθεί από το δίκτυο με την ονομαστική του τάση, απορροφά ρεύμα εκκινήσεως $I_{εκκ}$ 5 μέχρι 8 φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα I_{ov} λειτουργίας του.

Όταν ο δρομέας εκκινείται, το ρεύμα $I_{εκκ}$ μειώνεται, αρχικά με αργό ρυθμό και στη συνέχεια απότομα μέχρι να αποκτήσει μια τιμή η οποία αντιστοιχεί στις συνθήκες λειτουργίας με φορτίο, γενικά, όχι μεγαλύτερη από την τιμή του ονομαστικού ρεύματος. Στο σχήμα 4.11α, δίδεται η χαρακτηριστική εκκινήσεως ενός ασύγχρονου κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα.

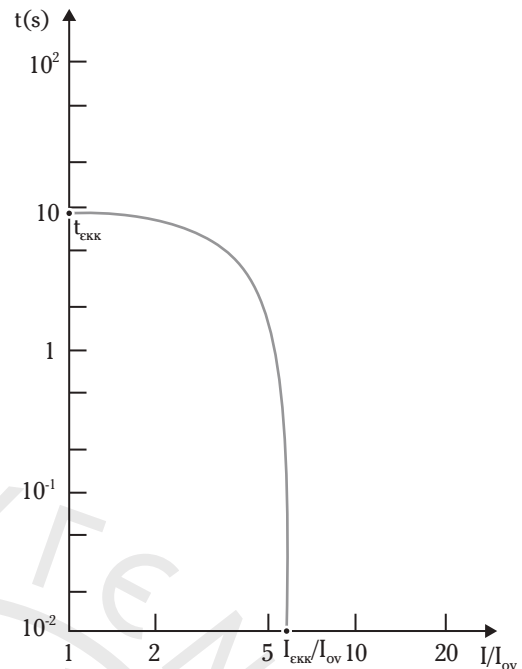
Ο χρόνος εκκινήσεως $t_{εκκ}$ μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την ανθιστάμενη ροπή στον άξονα του κινητήρα. Όταν ο χρόνος εκκινήσεως είναι μεγάλος, τότε η εκκίνηση του κινητήρα είναι κακή (σχ. 4.11β).

Μια διάταξη προστασίας για υπερφορτίσεις πρέπει να διευκολύνει την ομαλή εκκίνηση του κινητήρα. Ο κινητήρας εκκινείται ομαλά όταν οι χαρακτηριστικές εκκινήσεως του κινητήρα και της προστατευτικής διατάξεως δεν τέμνονται (σχ. 4.11γ).

Πράγματι, στα σχήματα 4.11γ–4.11ε διακρίνουμε ότι η μια χαρακτηριστική καμπύλη δίδει την τιμή του ρεύματος, που απορροφά ο κινητήρας για κάθε χρονική στιγμή, ενώ η άλλη χαρακτηριστική δίδει τον ελάχιστο χρόνο για τον οποίο ένα σταθερό ρεύμα πρέπει να κυκλοφορήσει, ώστε η διάταξη προστασίας να ενεργοποιηθεί.

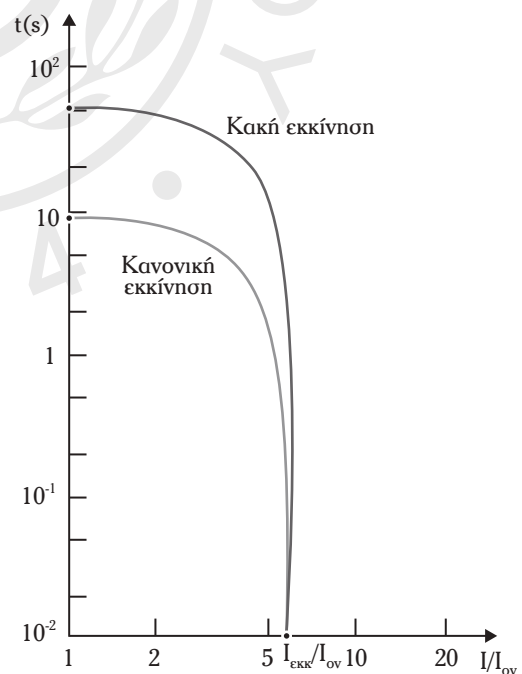
Για παράδειγμα, αν ο κινητήρας απορροφά για όλο το χρόνο εκκινήσεως $t_{εκκ}$, το ρεύμα $I_{εκκ}$, η εκκίνησή του είναι δυνατή όταν το σημείο $(I_{εκκ}/I_{ov}, t_{εκκ})$ τοποθετείται κάτω από την χαρακτηριστική της προστατευτικής διατάξεως (σχ. 4.11δ).

Αυτή η συνθήκη είναι ικανή αλλά όχι αναγκαία για την συμβατότητα μεταξύ της χαρακτηριστικής εκκινήσεως του κινητήρα και της αντίστοιχης της διατάξεως προστασίας από υπερφορτίσεις. Στην πράξη



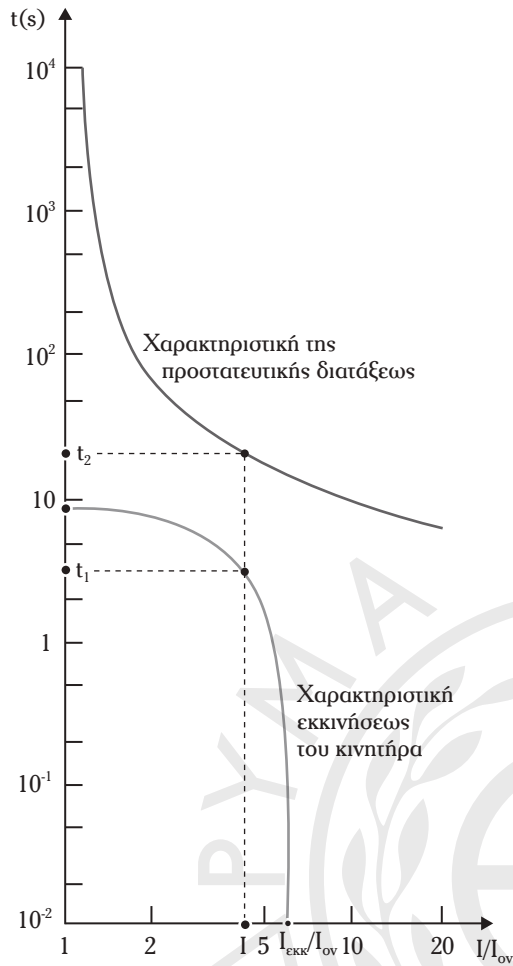
Σχ. 4.11α

Χαρακτηριστική εκκινήσεως ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα.



Σχ. 4.11β

Όταν ο χρόνος εκκινήσεως ($t_{εκκ}$) είναι μεγάλος η εκκίνηση είναι κακή.



Σχ. 4.11γ

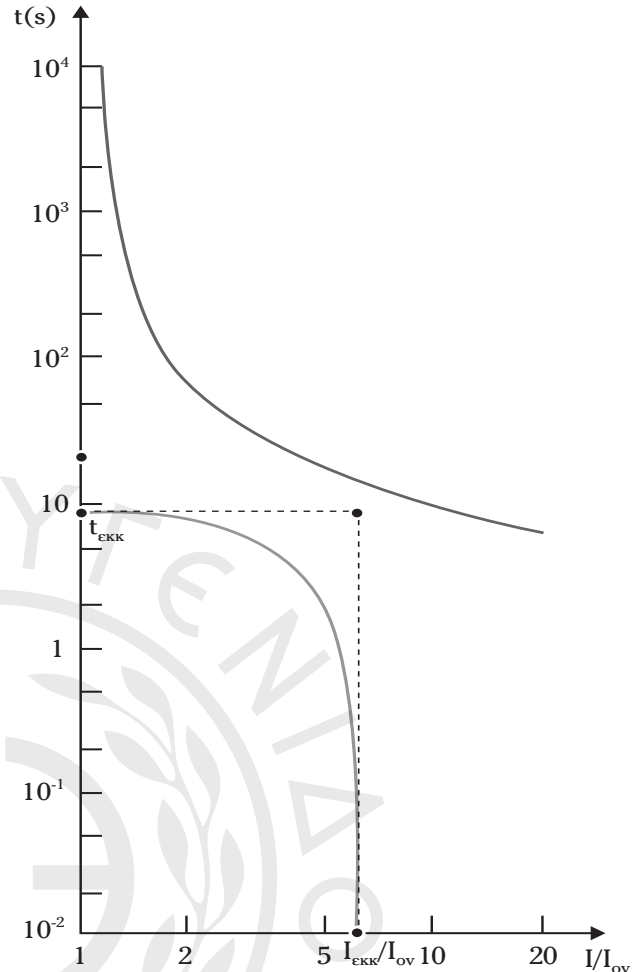
Στον χρόνο t ο κινητήρας απορροφά ρεύμα εντάσεως I . Η διάταξη προστασίας ενεργοποιείται όταν το ρεύμα I ρέει μόνιμα για τον χρόνο t^2 .

είναι αναγκαίο να αναφερόμαστε όχι στην στιγμιαία τιμή του ρεύματος $I_{ΕΚΚ}$, αλλά σε μία σταθερή τιμή του ρεύματος $I_{ΕΚΚ}^*$, η οποία κυκλοφορεί για όλο το χρόνο εκκινήσεως, έχει τα ίδια θερμικά αποτελέσματα με το $I_{ΕΚΚ}$ και πρέπει να είναι:

$$\left(I_{ΕΚΚ}^*\right)^2 t_{ΕΚΚ} = \int_0^{t_{ΕΚΚ}} I^2 dt. \quad (4.111)$$

Συνθήκη ικανή και αναγκαία, ώστε η προστατευτική διάταξη να επιτρέπει την εκκίνηση του κινητήρα, είναι το σημείο $(I_{ΕΚΚ}^*/I_{0V}, t_{ΕΚΚ})$ να τοποθετείται κάτω από τη χαρακτηριστική της προστατευτικής διατάξεως (σχ. 4.11ε).

Όταν η εκκίνηση του κινητήρα γίνεται με μειωμένη τάση τροφοδοσίας, το ρεύμα εκκινήσεως $I_{ΕΚΚ}$ μειώνεται, αλλά αυξάνεται ο χρόνος εκκινήσεως (σχ. 4.11στ).



Σχ. 4.11δ

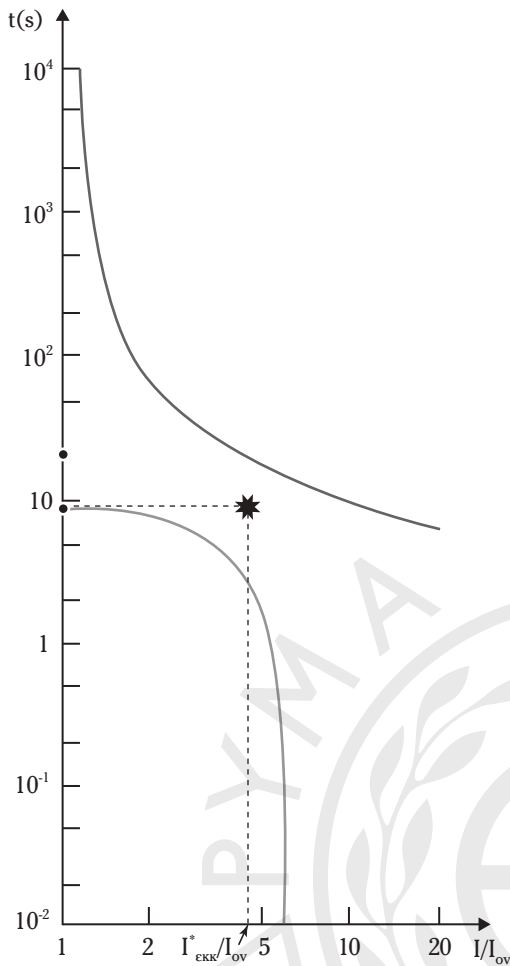
Όταν το σημείο $(I_{ΕΚΚ}^*/I_{0V}, t_{ΕΚΚ})$ τοποθετείται κάτω από την χαρακτηριστική της διατάξεως προστασίας τότε η διάταξη δεν ενεργοποιείται κατά τη διάρκεια της εκκινήσεως του κινητήρα.

4.11.2 Διατάξεις προστασίας του κινητήρα από υπερφορτίσεις.

Για την προστασία των κινητήρων από υπερφορτίσεις χρησιμοποιούνται θερμικοί ηλεκτρονόμοι, με κατάλληλες χαρακτηριστικές ενεργοποιήσεως, ώστε να εγγυώνται την κανονική εκκίνησή τους.

Όταν ο θερμικός ηλεκτρονόμος διαρρέεται από ρεύμα ίσο με το ονομαστικό (I_{0V}) του κινητήρα, δεν ενεργοποιείται. Ξεκινώντας όμως από την εν ψυχρώ κατάσταση, μέσα σε δύο ώρες για τιμές του ρεύματος $1,05 \cdot I_{0V}$ ο κινητήρας ενεργοποιείται.

Στην κατάσταση εν θερμώ, ο θερμικός ηλεκτρονόμος, ενεργοποιείται σίγουρα, μέσα σε δύο ώρες για τιμές του ρεύματος $1,2 \cdot I_{0V}$, όταν τροφοδοτείται στις τρεις φάσεις του και για τιμές του ρεύματος $1,32 \cdot I_{0V}$ όταν τροφοδοτείται μόνο στις δύο φάσεις.



Σχ. 4.11ε

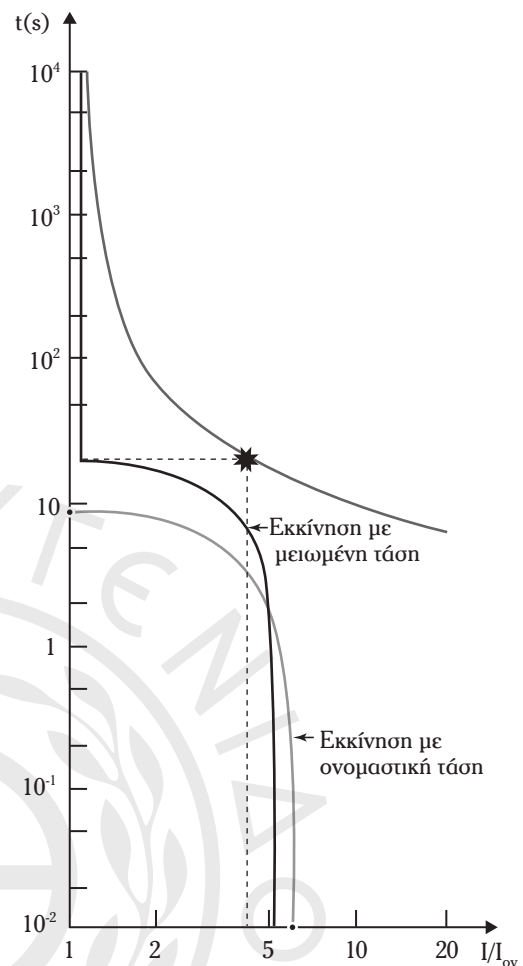
Συνθήκη ικανή και αναγκαία ώστε η διάταξη προστασίας να διευκολύνει την εκκίνηση του κινητήρα: η χαρακτηριστική της να είναι πάνω από το σημείο $(I_{\epsilon\kappa\kappa}^*/I_{ov}^*, t_{\epsilon\kappa\kappa})$.

Η χαρακτηριστική καμπύλη ενεργοποίησης του θερμικού ηλεκτρονόμου εξαρτάται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Συνήθως αναφερόμαστε στην θερμοκρασία των 200°C. Όταν ο θερμικός ηλεκτρονόμος τοποθετείται σε χώρους πιο ζεστούς από τους αντίστοιχους του κινητήρα, για παράδειγμα μέσα σε ηλεκτρικούς πίνακες, τότε προκαλούνται ανεπιθύμητες ενεργοποιήσεις του. Όταν τοποθετηθεί σε ψυχρούς χώρους από τους αντίστοιχους της τοποθέτησής του κινητήρα, τότε ενεργοποιείται με καθυστέρηση χρόνου.

Οι ασφάλειες δεν προστατεύουν τον ασύγχρονο κινητήρα από υπερφορτίσεις (σχ. 4.11ζ).

Μία ασφάλεια με ρεύμα λειτουργίας ίσο με το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα ενεργοποιείται για ρεύματα μεγαλύτερα από το $1,6 I_{ov}$, ενώ δεν επιτρέπει



Σχ. 4.11στ

Η χαρακτηριστική ενεργοποίησης ενός θερμικού ηλεκτρονόμου (HN) πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να επιτρέπει την εκκίνηση του κινητήρα με μειωμένη τάση τροφοδοσίας του.

την κανονική εκκίνησή του. Μια ασφάλεια με ρεύμα λειτουργίας μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα, επιτρέπει την εκκίνησή του αλλά δεν εγγυάται την προστασία του από υπερφορτίσεις.

4.11.3 Διατάξεις προστασίας του κινητήρα από βραχυκυκλώματα.

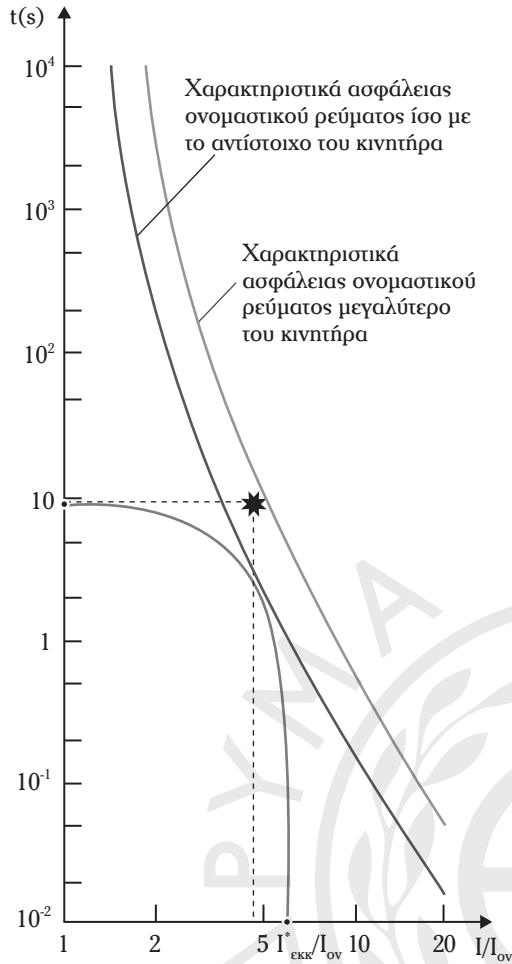
Η προστασία ενός τριφασικού ασύγχρονο κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα από βραχυκυκλώματα γίνεται με τους ακόλουθους τρόπους:

1) Συνδέοντας έναν θερμικό ηλεκτρονόμο με έναν μαγνητικό HN.

2) Τοποθετώντας ασφάλειες τύπου aM³ πριν από τον εκκινητή.

Ο πρώτος τρόπος αντιστοιχεί στον κλασικό διακόπτη ισχύος με χαρακτηριστική τέτοια, ώστε να

³ Οι ασφάλειες τύπου aM προστατεύουν κινητήρες.



Σχ. 4.11ζ

Οι ασφάλειες δεν προστατεύουν τον ασύγχρονο κινητήρα από υπερφορτίσεις: Ασφάλεια με ονομαστικό ρεύμα ίσο με το αντίστοιχο του κινητήρα δεν επιτρέπει την εκκίνησή του, ενώ ασφάλεια με ονομαστικό ρεύμα μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του κινητήρα επιτρέπει την εκκίνησή του, αλλά δεν τον προστατεύει.

προστατεύει τον κινητήρα και συγχρόνως να διευκολύνει την ομαλή εκκίνηση (σχ. 4.11n).

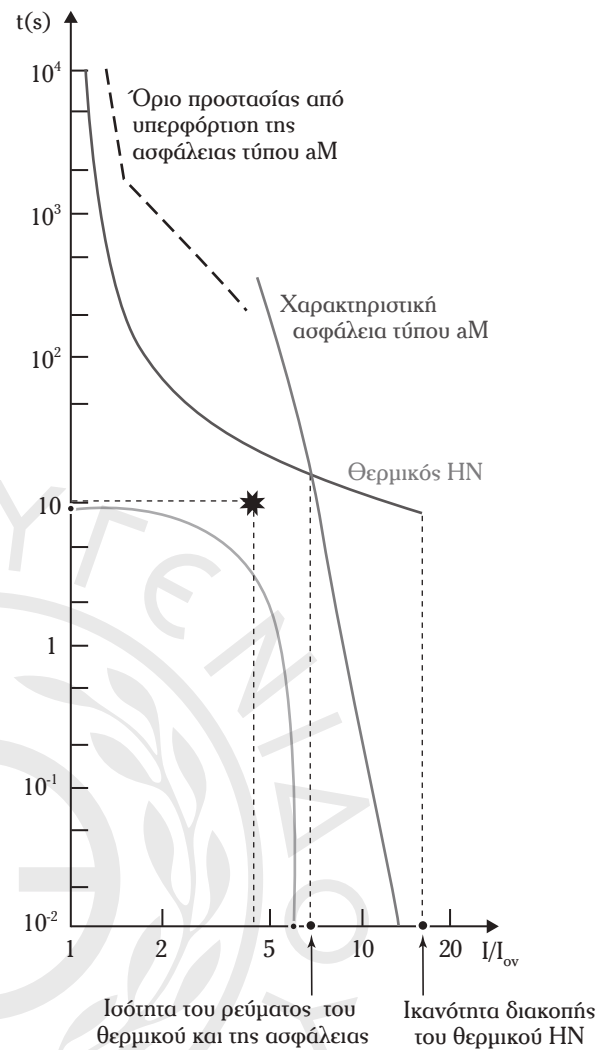
Ο θερμικός ηλεκτρονόμος είναι διαφορετικός από εκείνον ενός κλασικού αυτόματου διακόπτη, ο οποίος προστατεύει τους αγωγούς, ενώ το κατώφλι ενεργοποίησης του μαγνητικού στοιχείου είναι γύρω στο 10 έως 11 I_{ov}^2 .

Στο σχήμα 4.11n δίδεται η συνδυασμένη λειτουργία ενός θερμικού ΗΝ και μίας ασφάλειας τύπου aM.

4.12 Σύγχρονοι κινητήρες.

4.12.1 Γενικά.

Τα κατασκευαστικά στοιχεία ενός σύγχρονου κι-



Σχ. 4.11n

Συνδυασμός ασφαλείας τύπου aM και θερμικού ΗΝ για την προστασία του κινητήρα από υπερφόρτιση και βραχυκύκλωμα.

νητήρα είναι ίδια με τα αντίστοιχα μιας σύγχρονης γεννήτριας.

Βασική ιδιότητα του σύγχρονου κινητήρα είναι να παρέχει εκτός της μηχανικής ισχύος και άεργο ισχύ. Οπότε ο σύγχρονος κινητήρας μπορεί να οδηγήσει ένα μηχανικό φορτίο και συγχρόνως να βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος της εγκατάστασής στην οποία είναι συνδεδεμένος.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των σύγχρονων κινητήρων είναι ότι:

1) Οι μαγνητικοί του πόλοι διεγείρονται με συνεχές ρεύμα (ΣΡ), και ότι

2) ο δρομέας περιστρέφεται με τον σύγχρονο αριθμό στροφών του μαγνητικού πεδίου του στάτη, γεγονός που δημιουργεί δυσκολίες στην εκκίνηση του κινητήρα.

4.12.2 Τρόποι εκκινήσεως του σύγχρονου κινητήρα.

Έστω ότι τροφοδοτούμε τον σύγχρονο κινητήρα με τριφασικό σύστημα τάσεων και ρευμάτων, ενώ το κύκλωμα διεγέρσεώς του διαρρέεται με ΣΡ, χωρίς να περιστρέφεται ο δρομέας. Τότε στην μισή περίοδο του ρεύματος αναπτύσσεται ροπή στρέψεως ίση και αντίθετη απ' τη ροπή της άλλης μισής περιόδου. Λόγω της αδράνειας ο δρομέας δεν θα περιστραφεί.

Ο σύγχρονος κινητήρας δεν μπορεί να ξεκινήσει μόνος του, οπότε ακολουθούνται οι εξής εναλλακτικοί τρόποι εκκινήσεως:

1) Με βοηθητικό κινητήρα.

Χρησιμοποιείται συνήθως ένας μικρός ασύγχρονος κινητήρας, ο οποίος συνδέεται με συμπλέκτη στον άξονα του σύγχρονου κινητήρα με σκοπό να τον φέρει στην σύγχρονη ταχύτητα.

Η εκκίνηση του βοηθητικού κινητήρα γίνεται χωρίς φορτίο στον άξονα του σύγχρονου κινητήρα και η σύνδεση του συστήματος διεγέρσεως γίνεται όταν αποκτήσει την σύγχρονη ταχύτητα.

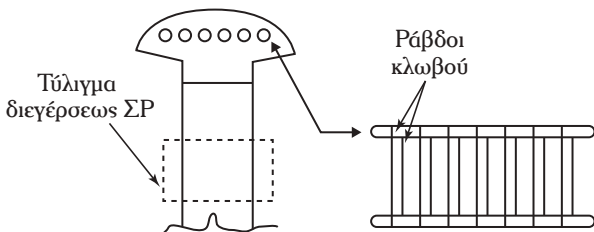
Τελικά, ο σύγχρονος κινητήρας με την βοήθεια του ασύγχρονου κινητήρα εκκινείται σαν σύγχρονη γεννήτρια, η οποία συνδέεται κατάλληλα στο δίκτυο όταν ικανοποιούνται οι συνθήκες παραλληλισμού.

Στην συνέχεια αποσυνπλέκομε την σύνδεση του βοηθητικού κινητήρα και η μηχανή λειτουργεί σαν σύγχρονος κινητήρας.

Άλλος τρόπος εκκινήσεως είναι να χρησιμοποιούμε σαν βοηθητικό κινητήρα έναν κινητήρα ΣΡ όταν υπάρχει διαθέσιμο δίκτυο συνεχούς ρεύματος.

2) Εκκίνηση σύγχρονου κινητήρα σαν ασύγχρονου κινητήρα.

Αν στα αυλάκια των πελμάτων των μαγνητικών πόλων του σύγχρονου κινητήρα τοποθετηθούν τυλίγματα κλωβού (σχ. 4.12α), τότε ο σύγχρονος κινητήρας ξεκινά σαν ασύγχρονος κινητήρας.



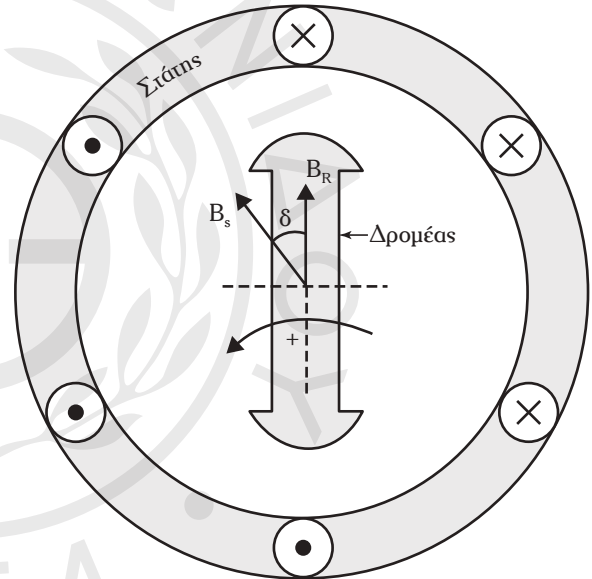
Σχ. 4.12α

Τύλιγμα κλωβού στα πέλαμα των μαγνητικών πόλων του σύγχρονου κινητήρα.

Ο σύγχρονος κινητήρας με την βοήθεια των τυλιγμάτων κλωβού ξεκινά σαν ασύγχρονος κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα και όταν αποκτήσει ταχύτητα λίγο μικρότερη της αντίστοιχης σύγχρονης, τότε συνδέεται η διεγερση συνεχούς ρεύματος, με την οποία επιτυγχάνεται επιτάχυνση στην σύγχρονη ταχύτητα με μικρές ή μεγάλες ταλαντώσεις (αυτοσυχρονισμός).

4.12.3 Αρχή λειτουργίας του σύγχρονου κινητήρα.

Στο σχήμα 4.12β δίδεται ένας διπολικός σύγχρονος κινητήρας. Το ρεύμα διεγέρσεως δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο του δρομέα B_R . Ο στάτης τροφοδοτείται από ένα τριφασικό σύστημα τάσεων και ρευμάτων οπότε παράγεται, στο εσωτερικό του κινητήρα ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο B_S .



Σχ. 4.12β

Διπολικός σύγχρονος κινητήρας.

Τα μαγνητικά πεδία B_R και B_S τείνουν να ευθυγραμμιστούν. Η ευθυγράμμιση όμως δεν γίνεται γιατί ο στάτης συντηρεί την γωνία ισχύος δ , η οποία όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μεγαλύτερη ροπή εφαρμόζεται στον δρομέα. Αυτό εξηγεί την αρχή λειτουργίας του σύγχρονου κινητήρα.

4.12.4 Λειτουργικές καταστάσεις των συγχρόνων κινητήρων.

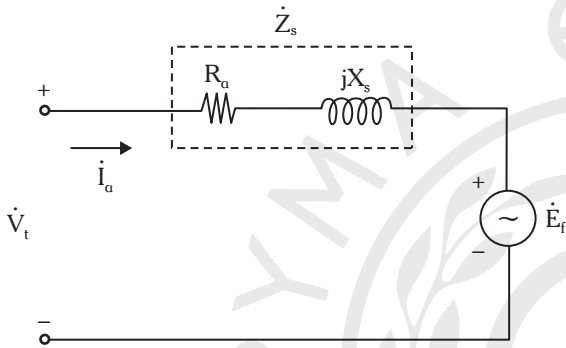
Ο σύγχρονος κινητήρας έχει την ίδια κατασκευαστική δομή με τη σύγχρονη γεννήτρια. Για να μελετηθεί η συμπεριφορά των συγχρόνων κινητήρων

απαιτούνται (όπως στις σύγχρονες γεννήτριες) οι ανά φάση εξισώσεις λειτουργίας των οι οποίες προκύπτουν απ' τη μελέτη των ανά φάση ισοδύναμο κυκλωμάτων του. Αναλυτικότερα:

1) Ισοδύναμο κύκλωμα.

Το ανά φάση ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός σύγχρονου κινητήρα είναι ανάλογο με το αντίστοιχο της σύγχρονης γεννήτριας. Η διαφορά βρίσκεται στη φορά της ροπής και της ισχύος. Ο σύγχρονος κινητήρας απορροφά ισχύ από το δίκτυο και το ρεύμα έχει αντίθετη φορά από εκείνη της σύγχρονης γεννήτριας.

Στο σχήμα 4.12γ δίδεται το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του σύγχρονου κινητήρα.



Σχ. 4.12γ

Ανά φάση ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα.

Στο κύκλωμα του σχήματος 4.12γ η E_f είναι η αντι-ΗΕΔ/φάση, R_a είναι η ωμική αντίσταση του ανά φάση τυλίγματος τύμπανου και X_s η σύγχρονη αντίδραση ανά φάση του τυλίγματος τύμπανου. Ισχύει η ακόλουθη εξίσωση των τάσεων:

$$V_t = E_f + I_a(R_a + jX_s) = E_f + I_a Z_s. \quad (4.112)$$

2) Από τη λειτουργία χωρίς φορτίο της σύγχρονης μηχανής στη λειτουργία κινητήρα.

Η λειτουργία της σύγχρονης μηχανής σαν κινητήρας αρχίζει με τον παραλληλισμό της στο δίκτυο. Σε αυτήν την κατάσταση η μηχανή λειτουργεί χωρίς φορτίο με την αντι-ΗΕΔ E_f , να είναι ίση κατά μέτρο με την τάση δικτύου V_t . Στο σχήμα 4.12δ(α), δίδεται η σχέση μεταξύ E_f και V_t της σύγχρονης μηχανής στην λειτουργία χωρίς φορτίο.

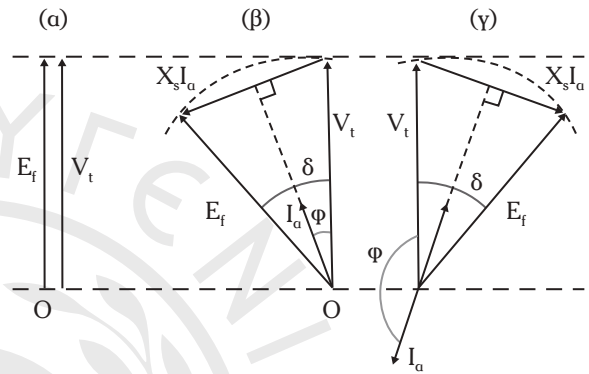
Η χάραξη των διανυσματικών διαγραμμάτων του σχήματος 4.12δ έγινε αμελώντας την ωμική αντίσταση R_a ανά φάση της σύγχρονης μηχανής.

Αν εφαρμοστεί κατάλληλη κινητήρια ροπή στον άξονα της σύγχρονης μηχανής δημιουργείται γωνία ισχύος δ με το διάνυσμα E_f να προηγείται του διανύ-

σματος της τάσεως V_t , όποτε λειτουργεί σαν σύγχρονη γεννήτρια [σχ. 4.12δ(β)]. Η γεννήτρια παρέχει ρεύμα I_a , γιατί το $\sin\phi$ είναι θετικό.

Αν στον άξονα της μηχανής εφαρμοστεί μια πέδη, τότε ο δρομέας υφίσταται καθυστέρηση σε σχέση με τη θέση, την οποία έχει στη λειτουργία χωρίς φορτίο και η γωνία δ γίνεται γωνία καθυστέρησης της E_f ως προς την τάση V_t [σχ. 4.12δ(γ)].

Σε αυτήν την κατάσταση η μηχανή απορροφά ρεύμα I_a , απ' το δίκτυο γιατί το $\sin\phi$ είναι αρνητικό.



Σχ. 4.12δ

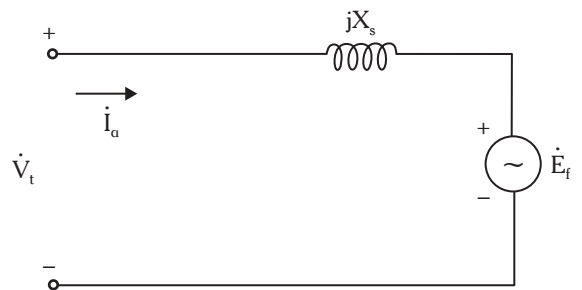
(α) Λειτουργία χωρίς φορτίο, (β) λειτουργία γεννήτριας, (γ) λειτουργία κινητήρα.

3) Λειτουργία με σταθερό φορτίο και μεταβλλόμενο ρεύμα διεγέρσεως.

Η λειτουργία του σύγχρονου κινητήρα στη μόνιμη κατάσταση εξαρτάται από δυο μεταβλητές ανεξάρτητες μεταξύ τους:

- 1) Την συνιστάμενη ροπή (φορτίο) στον άξονα του κινητήρα και
- 2) την αντι-ΗΕΔ E_f , η οποία ρυθμίζεται μεταβάλλοντας το ρεύμα διεγέρσεως.

Αμελώντας την ωμική αντίσταση R_a ανά φάση, το ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα του σύγχρονου κινητήρα δίδεται στο σχήμα 4.12ε.



Σχ. 4.12ε

Απλοποιημένο ισοδύναμο/φάση ηλεκτρικό κύκλωμα ενός σύγχρονου κινητήρα.

Η εξίσωση τάσεων-ρευμάτων του κυκλώματος του σχήματος 4.12ε είναι:

$$V_t = E_f + I_a jX_s \quad (4.113)$$

Η τάση δικτύου V_t είναι σταθερή όπως και η ισχύς εξόδου του κινητήρα είναι σταθερή (η ισχύς εξόδου του κινητήρα μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται η ροπή στον άξονά του). Μεταβάλλοντας το ρεύμα διεγέρσεως μεταβάλλεται η αντι-ΗΕΔ E_f . Στο σχήμα 4.12στ δίδονται οι μεταβολές της τάσεως διεγέρσεως E_f , ενός σύγχρονου κινητήρα.

Στο σχήμα 4.12στ το ευθύγραμμο τμήμα $\overline{B\Gamma}$ εκφράζει τόσο την ενεργό ισχύ που ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο ($P = 3V_t I_a \cos\phi$), όσο και εκείνη που μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ: $3E_f I_a \cos\phi$.

Το ευθύγραμμο τμήμα $\overline{O\Gamma}$ εκφράζει την άεργο ισχύ $Q = 3V_t I_a \sin\phi$, την οποία απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο.

Όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η R_a ανά φάση, το ευθύγραμμο τμήμα $B\Gamma$ εκφράζει την ηλεκτρομαγνητική ροπή (η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής είναι σταθερή), η οποία ισούται με την ανθιστάμενη ροπή που εφαρμόζεται στον άξονα της μηχανής.

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί με σταθερό φορτίο, πρέπει το ευθύγραμμο τμήμα $B\Gamma$ να είναι σταθερό. Οπότε, όταν μεταβάλλεται το ρεύμα διεγέρσεως, το διάνυσμα E_f κινείται στην ευθεία t , προσαρμόζοντας αντίστοιχα την φασική του απόκλιση και το μέτρο

του. Για τον ίδιο λόγο, η συνιστώσα του ρεύματος τύμπανου σε φάση με την τάση V_t , $I_a \cos\phi$, θα είναι σταθερή γιατί σταθερή είναι η ενεργός ισχύς που απορροφά ο κινητήρας, οπότε το άκρο του διανύσματος I_a κινείται στην ευθεία ϵ_2 .

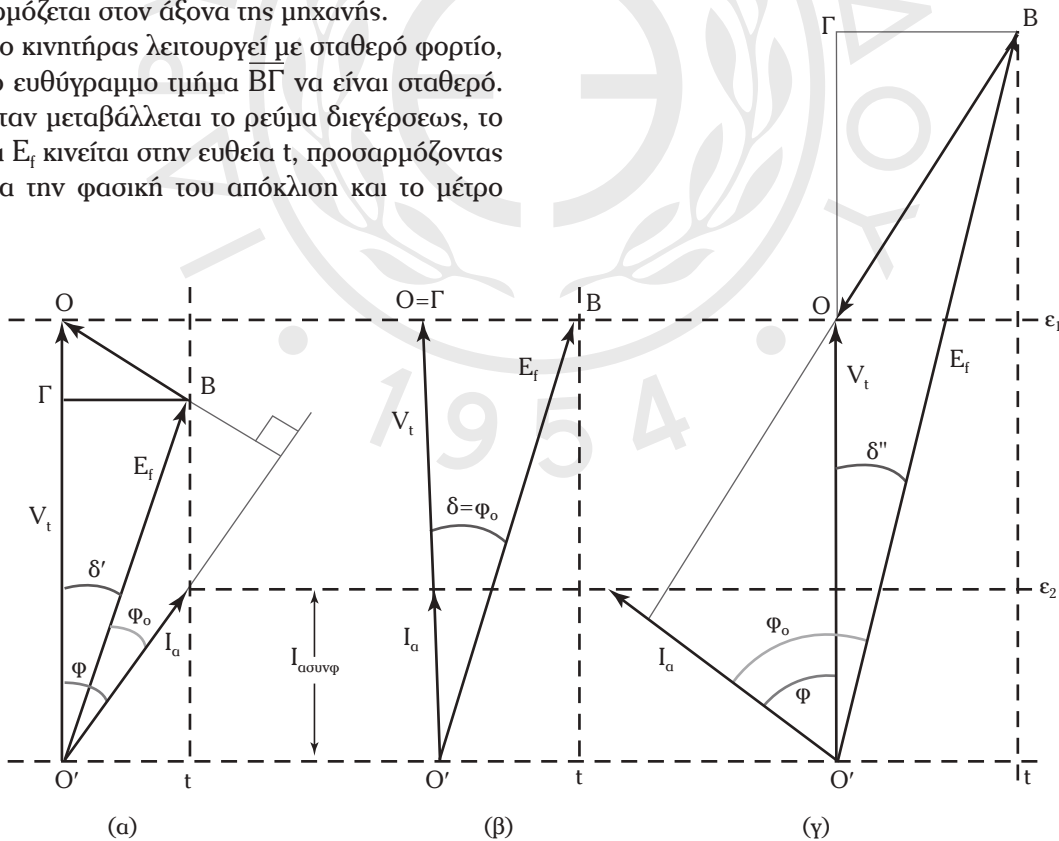
Το άκρο του διανύσματος V_t κινείται στην ευθεία ϵ_1 , γιατί η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα θεωρείται σταθερή.

Στο σχήμα 4.12στ παρατηρούμε ότι το ρεύμα I_a παίρνει τις θέσεις στην ευθεία ϵ_2 , έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες:

$$I_a \cos\phi = \text{σταθ.} \quad \text{και} \quad V_t = E_f + I_a jX_s .$$

Όταν αυξάνεται το ρεύμα διεγέρσεως, για δεδομένη ενεργό ισχύ, μειώνεται η γωνία ισχύος $\delta'' < \delta < \delta'$ και αυξάνεται η ευστάθεια του κινητήρα. Αντίθετα, αν σε έναν σύγχρονο κινητήρα, ο οποίος λειτουργεί με φορτίο, μειωθεί το ρεύμα διεγέρσεως η γωνία ισχύος θα αυξηθεί και θα μειωθούν τα διαστήματα ευστάθειάς του.

Από το σχήμα 4.12στ(α) όταν η E_f παίρνει μικρές τιμές, το ρεύμα τύμπανου I_a είναι επαγωγικό. Για το



Σχ. 4.12στ

Μεταβολή της τάσεως διεγέρσεως για (α) επαγωγική, (β) ωμική, (γ) χωρητική συμπεριφορά ενός σύγχρονου κινητήρα.

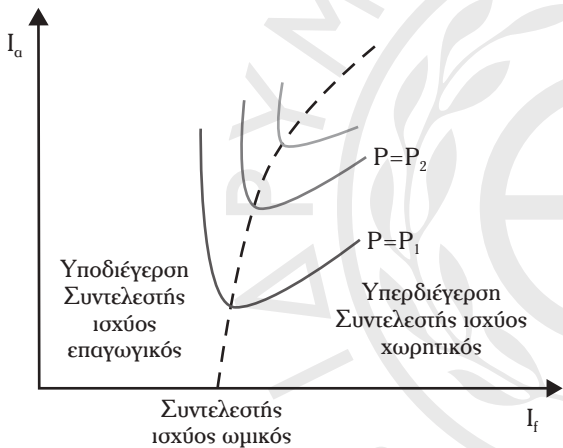
δίκτυο, ο κινητήρας είναι επαγωγικό φορτίο και καταναλώνει άεργο ισχύ (λειτουργία του κινητήρα σε υποδιέγερση).

Όταν το ρεύμα διεγέρσεως αυξάνεται, σε κάποια στιγμή το ρεύμα I_a ευθυγραμμίζεται με την τάση V_t [σχ. 4.12στ(β)] και ο κινητήρας λειτουργεί σαν ωμικό φορτίο.

Όταν το ρεύμα διεγέρσεως αυξάνεται αρκετά, το ρεύμα τυμπάνου γίνεται χωρητικό [σχ. 4.12στ(γ)] και ο κινητήρας συμπεριφέρεται σαν χωρητικό φορτίο και παρέχει άεργο ισχύ στο δίκτυο (λειτουργία κινητήρα σε υπερδιέγερση).

Στο σχήμα 4.12ζ δίδονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες «V» του σύγχρονου κινητήρα για διάφορα ποσά καταναλώσεως ενεργού ισχύος.

Με το ρεύμα διεγέρσεως ρυθμίζεται η άεργος ισχύς του κινητήρα και γίνεται η διόρθωση του συντελεστή ισχύος της εγκαταστάσεως.



Σχ. 4.12ζ

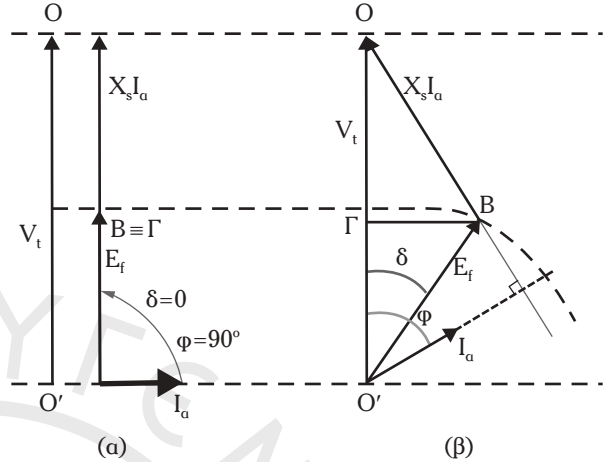
Καμπύλες «V» ενός σύγχρονου κινητήρα.

4) Λειτουργία ενός σύγχρονου κινητήρα, με μεταβαλλόμενο φορτίο και σταθερή διέγερση.

Όταν είναι σταθερό το ρεύμα διεγέρσεως, διατηρείται σταθερή η αντι-ΗΕΔ E_f . Όταν μεταβάλλεται το φορτίο στον άξονα του κινητήρα μεταβάλλεται και η γωνία ισχύος δ και το άκρο του διανύσματος E_f διαγράφει τόξο περιφέρειας με κέντρο το σημείο O' (σχ. 4.12n).

Η γωνία ισχύος δ παίρνει τιμές από $\delta = 0^\circ$ (μηδενικό φορτίο, ο κινητήρας απορροφά μόνο άεργο ισχύ) μέχρι $\delta = 90^\circ$. Όταν η γωνία ισχύος είναι 90° ο κινητήρας λειτουργεί στο όριο της ευστάθειας γιατί μία επί πλέον φόρτισή του τον μετατρέπει σε γεννήτρια.

Το διάγραμμα του σχήματος 4.12n(α) δίδει τη λειτουργία του κινητήρα χωρίς φορτίο (δεν υπάρχει φορτίο στον άξονά του), ο οποίος απορροφά το ρεύμα I_a , από το δίκτυο.



Σχ. 4.12n

(α) Λειτουργία του σύγχρονου κινητήρα χωρίς φορτίο, (β) λειτουργία σε κατάσταση υπερδιεγέρσεως.

Το διάγραμμα του σχήματος 4.12n(β) δίδει τη λειτουργία του κινητήρα με φορτίο όταν απορροφά ενεργό ισχύ ανάλογη του ευθυγράμμου τμήματος $B\Gamma$:

$$P_{in} = 3 \cdot \frac{V_t E_f}{X_s} \cdot \eta \mu \delta = 3 V_t I_a \cos \phi \quad [w] \quad (4.114)$$

η οποία ισούται με την ισχύ εξόδου (αν δεν λαμβάνονται υπόψη οι μηχανικές απώλειες)

$$P_{out} = T_{αξ} \omega$$

όπου: $T_{αξ}$, η ροπή στον άξονα του κινητήρα σε N-m, και ω , η γωνιακή ταχύτητα του άξονα σε rad/s.

Ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο επαγωγική ισχύ (υποδιεγερμένη μηχανή) ανάλογη του ευθυγράμμου τμήματος $\overline{O\Gamma}$:

$$Q = 3 V_t I_a \eta \mu \phi \quad [VAR].$$

4.12.5 Ισχύς, ροπή, απόδοση του σύγχρονου κινητήρα.

Στο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ανά φάση του σχήματος 4.12ε, αν λάβομε υπόψη την ωμική R_a /φάση, η εξίσωση τάσεων και ρευμάτων γίνεται:

$$V_t = E_f + I_a (R_a + jX_s), \quad (4.115)$$

στην οποία αντιστοιχεί το διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 4.120.

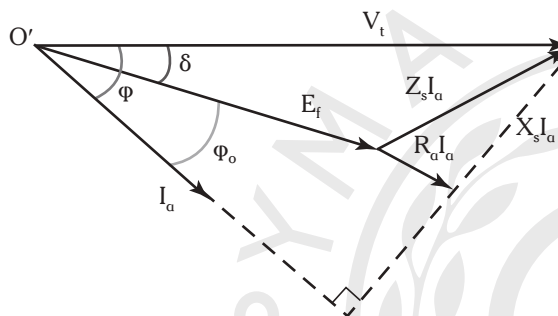
Από το σχήμα αυτό έχουμε:

$$V_t \cos \varphi = E_f \cos \varphi_o + R_a I_a \quad (4.116)$$

Πολλαπλασιάζοντας με $3I_a$ το πρώτο και δεύτερο μέρος της εξίσωσης 4.116 έχουμε:

$$3V_t I_a \cos \varphi = 3E_f I_a \cos \varphi_o + 3R_a I_a^2 \quad (4.117)$$

Το πρώτο μέρος της εξίσωσης 4.117 εκφράζει την ισχύ την οποία απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο. Το δεύτερο μέρος εκφράζει την ισχύ, η οποία μετατρέπεται σε μηχανική και το τρίτο μέρος τις απώλειες χαλκού (φαινόμενο joule $I_a^2 R_a$).



Σχ. 4.120

Διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων της εξίσωσης 4.115.

Η αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ισχύς του κινητήρα είναι:

$$T_e = \frac{3V_t I_a \cos \varphi_o}{\omega} = 3 \cdot \frac{V_t I_a \cos \varphi - R_a I_a^2}{\omega} \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (4.118)$$

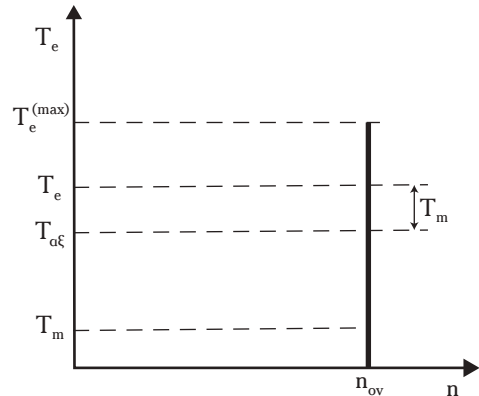
όπου: $\omega = 2\pi \frac{n}{60}$ σε rad/s και n είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα σε ΣΑΛ.

Παρατηρούμε ότι, για μια δεδομένη απορροφημένη ποσότητα ενεργής ισχύος, η αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e είναι μέγιστη για $\cos \varphi = 1$, γιατί το ρεύμα I_a είναι ελάχιστο.

Η απόδοση του σύγχρονου κινητήρα είναι:

$$\eta = \frac{3V_t I_a \cos \varphi - \sum P_a}{3V_t I_a \cos \varphi} = 1 - \frac{\sum P_a}{3V_t I_a \cos \varphi} \quad (4.119)$$

όπου $\sum P_a$ το σύνολο των απωλειών του σύγχρονου κινητήρα.



$T_e^{(max)}$: μέγιστη αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή στον κινητήρα, χωρίς να χάσει την ευσιθάθειά του.

T_e : αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή όταν ο κινητήρας λειτουργεί στον ονομαστικό αριθμό στροφών n_{ov} .

T_m : ροπή τριβών και ανεμομοού (μηχανική ροπή).

$T_{αξ}$: ροπή στον άξονα του κινητήρα.

Σχ. 4.121

Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας ενός σύγχρονου κινητήρα.

Στο σχήμα 4.121 δίδεται η γραφική παράσταση της **χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας**.

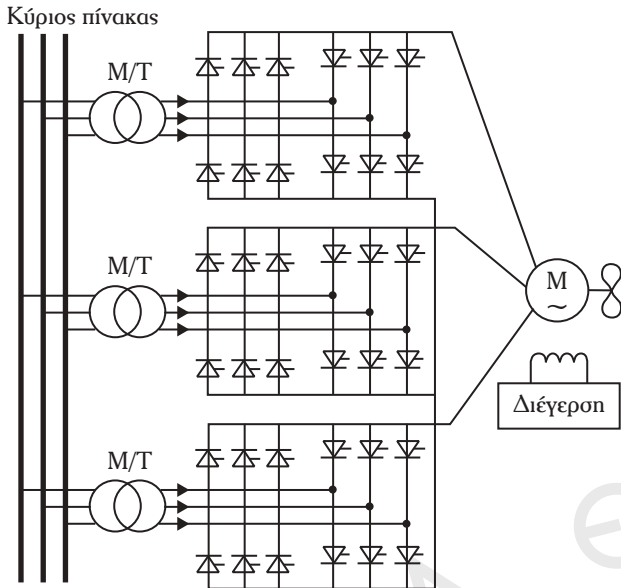
4.12.6 Έλεγχος ταχύτητας του σύγχρονου κινητήρα.

Οι σύγχρονοι κινητήρες είναι ηλεκτρικές μηχανές σταθερής ταχύτητας. Η ταχύτητα περιστροφής τους είναι ευθέως ανάλογη της συχνότητας της τάσεως του δικτύου και αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των μαγνητικών πόλων. Ο έλεγχος της ταχύτητας των συγχρόνων κινητήρων γίνεται με τη μεταβολή της συχνότητας της τάσεως του δικτύου. Γι' αυτό χρησιμοποιούνται, συνήθως, ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος που ονομάζονται **κυκλομετατροπείς**.

Οι κυκλομετατροπείς μετατρέπουν την απευθείας εναλλασσόμενη ισχύ μίας αρχικής συχνότητας σε εναλλασσόμενη ισχύ επιθυμητής συχνότητας, χωρίς να απαιτείται η ενδιάμεση μετατροπή σε D.C..

Στο σχήμα 4.121α δίδεται 6-παλμικός μετατροπέας, ο οποίος τροφοδοτεί σύγχρονο κινητήρα που ενεργοποιεί τον ελικοφόρο άξονα έλικας. Η διέγερση δίδεται με μια γέφυρα Graetz με θυρίστορ η οποία τροφοδοτείται από τον κύριο πίνακα.

Συνήθως η ενεργοποίηση του ελικοφόρου άξονα σε εμπορικό πλοίο γίνεται με σύγχρονο κινητήρα και ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του πραγματοποιείται με κυκλομετατροπέα 6 παλμών.



Σχ. 4.12ια
6-παλμικός μετατροπέας.

Για τη μείωση των αρμονικών ρεύματος χρησιμοποιείται ο 12-παλμικός μετατροπέας (σχ. 4.12ιβ).

Στο σχήμα 4.12ιβ δίδονται πραγματικά αριθμητικά δεδομένα, για σύστημα ηλεκτρικής προώσεως, καθώς και το μονογραμμικό δίκτυο διεγέρσεως του σύγχρονου κινητήρα.

Ο σύγχρονος κινητήρας αποτελείται από διπλό τριφασικό τύλιγμα συνδέσεως σε αστέρα.

- Συστήματα κυκλομετατροπέων και σύγχρονος κινητήρας.

Στο σχήμα 4.12ιγ παρουσιάζεται σύστημα κυ-

κλομετατροπέων, οι οποίοι συνδέονται με σύγχρονο κινητήρα σε εγκατάσταση ηλεκτρικής προώσεως.

Το σύστημα του κυκλομετατροπέα περιλαμβάνει:

1) Ένα σύστημα ανορθώσεως με θυρίστορ το οποίο παρέχει σταθερό συνεχές ρεύμα.

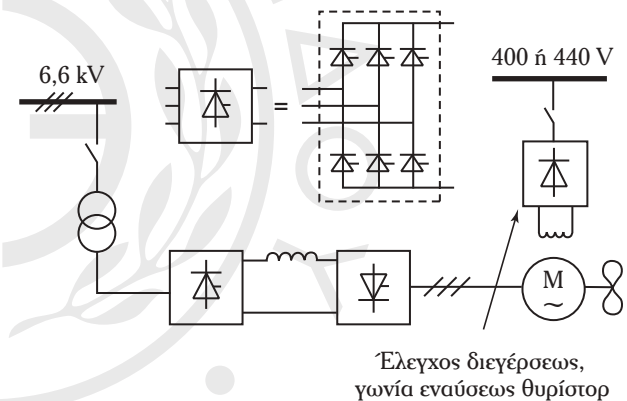
2) Αντιστροφή με θυρίστορ, ο οποίος τροφοδοτείται από το σύστημα συνεχών ρευμάτων, και στη συνέχεια τροφοδοτεί τον σύγχρονο κινητήρα.

3) Στατό σύστημα διεγέρσεως.

Η αυτεπαγωγή του κυκλώματος του κυκλομετατροπέα εξασφαλίζει την κυκλοφορία σταθερού ρεύματος.

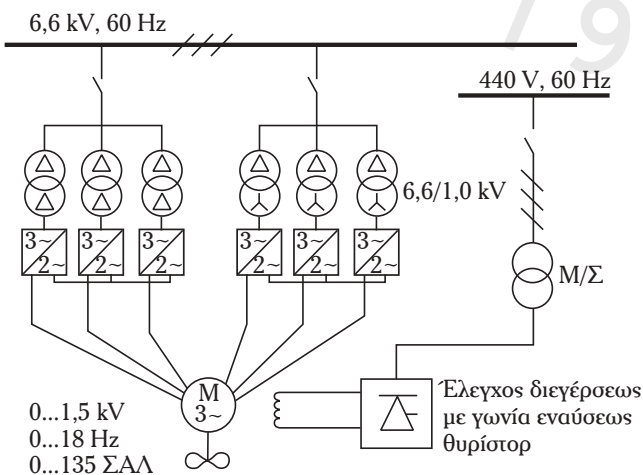
Τα ρεύματα στον σύγχρονο κινητήρα έχουν μια ψευδοτραπεζοειδή μορφή (σχ. 4.12ιδ).

Η κατάσταση αγωγής των φάσεων R, S, T του σύγχρονου κινητήρα αλλάζει κάθε $\frac{1}{6}$ της περιόδου. Αυτό σημαίνει ότι η ΜΕΔ, των ρευμάτων των τυλιγμάτων του στάτη μεταβάλλεται «παλμικά». Κάθε «παλμός» απέχει χρονικό διάστημα: $T/6 = 1/6f$ (σχ. 4.12ιε).



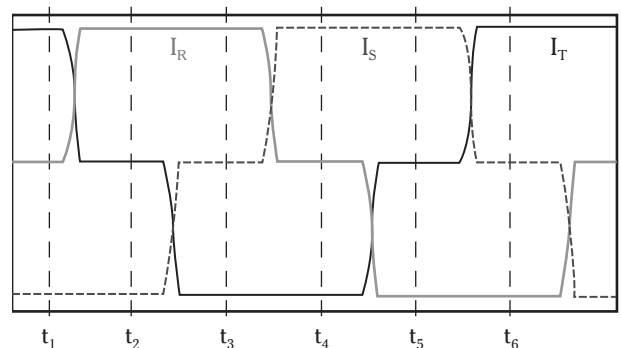
Σχ. 4.12ιγ

Σύστημα κυκλομετατροπέων και σύγχρονος κινητήρας.



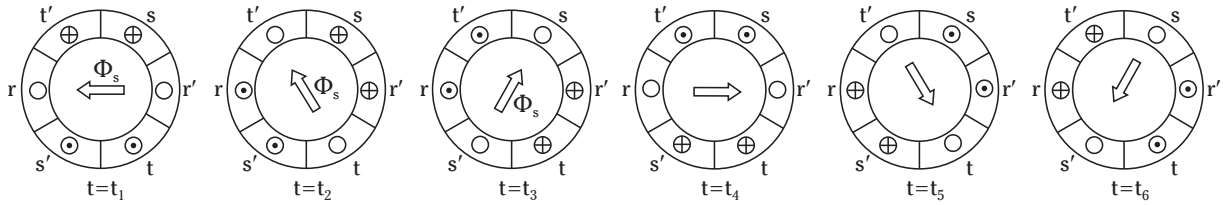
Σχ. 4.12ιβ

Κυκλομετατροπέας 12 παλμών.



Σχ. 4.12ιδ

Ρεύματα εξόδου του κυκλομετατροπέα.



Σχ. 4.12ιε

Παλμική μεταβολή της ΜΕΔ του επαγωγικού τυμπάνου του σύγχρονου κινητήρα.

Αυτή η μεταβολή της ΜΕΔ, οπότε και της μαγνητικής ροής αντιδράσεως τυμπάνου Φ_{ar} , προκαλεί ταλαντώσεις στην αναπτυσσόμενη ροπή του κινητήρα. Η αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα δίδεται:

$$T_e = K\Phi_f\Phi_{ar} \eta \mu\delta \quad (4.120)$$

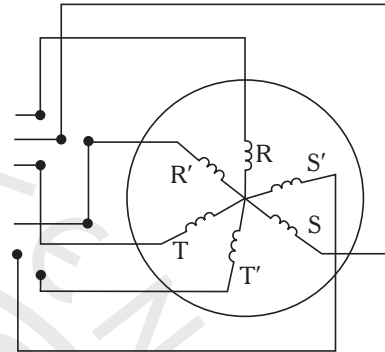
όπου: Φ_f και Φ_{ar} είναι η μαγνητική ροή διεγέρσεως και η μαγνητική ροή αντιδράσεως τυμπάνου, αντίστοιχα, και δ η γωνία μεταξύ των Φ_f και Φ_{ar} .

Κατά τη λειτουργία του σύγχρονου κινητήρα η μαγνητική ροή Φ_f περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα, ενώ η μαγνητική ροή Φ_{ar} μεταβάλλεται «παλμικά», με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ταλαντώσεις στην αναπτυσσόμενη ροπή του κινητήρα. Οι ταλαντώσεις μειώνονται σημαντικά, χρησιμοποιώντας διπλό τριφασικό τύλιγμα στον στάτη του κινητήρα συνδέσεως σε αστέρα (σχ. 4.12ιστ).

Τα δύο τριφασικά τυλίγματα κατασκευάζονται κατά τέτοιον τρόπο, ώστε μεταξύ των ομοίων φάσεων να δημιουργείται φασική απόκλιση μεταξύ των ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων 30° . Πράγματι, ο αριθμός των θέσεων του μαγνητικού πεδίου του στάτη σε κάθε περίοδο από 6 γίνονται 12.

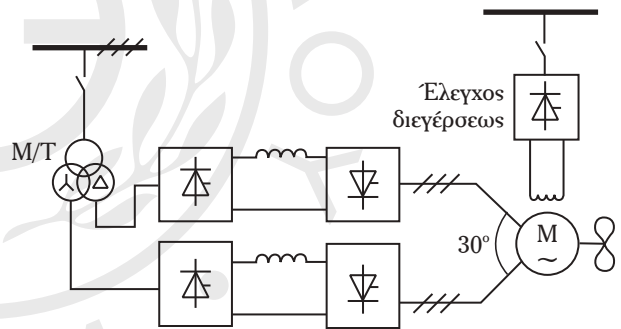
Στο σχήμα 4.12ιζ δίδεται ένα σύστημα 12-παλμικού κυκλομετατροπέα με σύγχρονο κινητήρα, ο οποίος διαθέτει διπλό τριφασικό τύλιγμα στον στάτη για τη μείωση των αρμονικών των ρευμάτων που προέρχονται από τον κύριο πίνακα.

Όταν η έλικα είναι ακινητοποιημένη, το σύστημα κυκλομετατροπέα του σχήματος 4.12ιζ, δεν ενεργοποιείται γιατί δεν είναι καθορισμένες οι χρονικές στιγμές εναύσεως των θυρίστορ. Είναι αναγκαίο, για τον έλεγχο του κινητήρα στις χαμηλές ταχύτητες, να υπάρχει ένα σύστημα, το οποίο θα δείχνει τη θέση του δρομέα του κινητήρα, οπότε τη θέση την οποία πρέπει να παίρνει το μαγνητικό πεδίο του στάτη από αυτές αντίστοιχα (σχ. 4.12ιε). Στη συνέχεια είναι αναγκαίο να υπάρχει ένα σύστημα σβέσεως των θυρίστορ, τα οποία δεν πρέπει να σβήνουν από την τάση του κινητήρα στις χαμηλές ταχύτητες.



Σχ. 4.12ιστ

Διπλό τριφασικό τύλιγμα του στάτη του σύγχρονου κινητήρα.



Σχ. 4.12ιζ

Σύστημα ηλεκτρικής προώσεως με κυκλομετατροπέα και σύγχρονο κινητήρα με διπλό τριφασικό τύλιγμα στον στάτη.

– Λυμένες ασκήσεις στους σύγχρονους κινητήρες.

Άσκηση 1.

Δίδεται τριφασικός, 187 kVA, 2.300 V, 47 A, 50 Hz, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, 187,5 ΣΑΛ σύγχρονος κινητήρας, ο οποίος έχει $R_a = 1,5 \Omega/\text{φάση}$ και $X_s = 20 \Omega/\text{φάση}$. Να υπολογίσετε την εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ισχύ

(P_d), όταν ο κινητήρας λειτουργεί με το ονομαστικό ρεύμα και συντελεστή ισχύος 0,8 χωρ..

Λύση.

Η πολική τάση (τάση γραμμής) είναι 2.300 V.

Το ρεύμα γραμμής είναι 47 A.

Ο συντελεστής ισχύος είναι $\cos\varphi = 0,8$ χωρ..

Η ισχύς εισόδου του κινητήρα είναι:

$$P_{in} = \sqrt{3} V_n I_a \cos\varphi = \\ = \sqrt{3} \cdot 2.300 \cdot 47 \cdot 0,8 = 149,78 \text{ kW.}$$

Οι απώλειες χαλκού του κινητήρα είναι:

$$P_{cust} = 3I_a^2 R_a = 3 \cdot (47)^2 \cdot 1,5 = 9,94 \text{ kW}$$

όπου: I_a είναι το ανά φάση ρεύμα τυμπάνου και R_a η ανά φάση ωμική αντίσταση τυμπάνου, αντίστοιχα, του σύγχρονου κινητήρα.

Η εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ισχύς P_d είναι:

$$P_d = P_{in} - P_{cust} = 149,78 - 9,94 = 139,84 \text{ kW.}$$

Άσκηση 2.

Δίδεται μονοφασικός, σύγχρονος κινητήρας 500 V, με ισχύ εξόδου 7,46 kW και συντελεστή ισχύος 0,9 επαγ.. Η ωμική αντίσταση της φάσεως είναι 0,8 Ω. Οι απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού είναι 500 W. Να υπολογίσετε το ρεύμα τυμπάνου και την απόδοση του κινητήρα.

Λύση.

Έστω I_a το ρεύμα, το οποίο απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο.

Η ισχύς εισόδου P_{in} του κινητήρα, είναι:

$$P_{in} = V_t I_a \cos\varphi = 500 \cdot I_a \cdot 0,9 = 450 \cdot I_a \text{ W.}$$

Η ισχύς εξόδου P_{out} είναι $P_{out} = P_{in} - P_\ell$

$$\text{ή } 7.460 = 450 I_a - 500 - 0,8 I_a^2 - 450 I_a + 7.960 = 0$$

$$\text{ή } \frac{450 \pm \sqrt{(450)^2 - 4 \times 0,8 \times 7.960}}{2 \times 0,8} = 18,3 \text{ A}$$

όπου: $P_\ell = 500 \text{ W}$ είναι οι απώλειες λόγω τριβών.

Η ισχύς εισόδου του κινητήρα είναι

$$P_{in} = 500 \times 18,3 \times 0,9 = 8,235 \text{ W.}$$

Η απόδοση του κινητήρα είναι:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{7.460}{8.235} \times 100 = 90,58\%.$$

Άσκηση 3.

Δίδεται τριφασικός κινητήρας, 6.000 V, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, ο οποίος απορροφά ονομαστικό ρεύμα 65 A με συντελεστή ισχύος 0,8 χωρ.. Να υπολογίσετε την πολική αντι-ΗΕΔ, την απόδοση και την ισχύ εξόδου της μηχανής, αν οι απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού είναι 30 kW.

Δίδεται: $R_a = 2 \Omega/\text{φάση}$ και $X_s = 20 \Omega/\text{φάση}$.

Λύση.

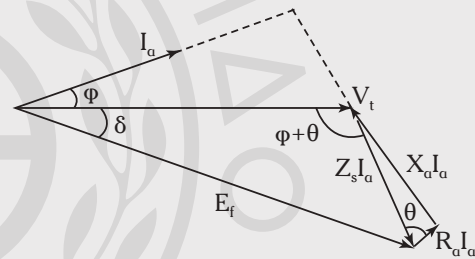
Η τάση τροφοδοσίας ανά φάση, του κινητήρα είναι:

$$V_t = \frac{6.600}{\sqrt{3}} \approx 3.468 \text{ V.}$$

Το ρεύμα τυμπάνου είναι $I_a = 65 \text{ A}$.

Ο συντελεστής ισχύος είναι 0,8 χωρ., οπότε: $\varphi = 36,87^\circ$.

Το διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων του κινητήρα είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 4.12m.



Σχ. 4.12m

Ισχύει:

$$I_a Z_s = I_a \sqrt{R_a^2 + X_s^2} = 65 \sqrt{1^2 + (15)^2} = 977 \text{ V.}$$

Η γωνία θ είναι:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_a} = \tan^{-1} \frac{20}{2} = 84,29^\circ.$$

Η αντι-ΗΕΔ είναι:

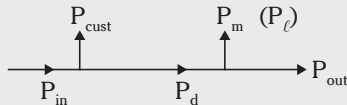
$$(E_f)^2 = V_t^2 + (I_a Z_s)^2 - 2 V_t (I_a Z_s) \cos(\varphi + \theta) = \\ = (3.468)^2 + (977)^2 - 2 \cdot 3.468 \cdot 977 \cdot \cos(121,16^\circ)$$

$$\text{ή } E_f = 4.060,52 \text{ V.}$$

Η πολική αντι-ΗΕΔ είναι:

$$\sqrt{3} \cdot 4.060,52 = 7.033,02 \text{ V.}$$

Το διάγραμμα ροής ισχύος του σύγχρονου κινητήρα δίδεται στο σχήμα 4.12iθ.



Σχ. 4.12ιθ

Η ισχύς εισόδου του κινητήρα είναι:

$$P_{in} = 3V_t I_a \cos\varphi = 3 \cdot 3.468 \cdot 65 \cdot 0,80 = 541.008 \text{ W.}$$

Οι απώλειες χαλκού είναι:

$$P_{cust} = 3I_a^2 R_a = 3 \cdot (65)^2 \cdot 2 = 25.350 \text{ W.}$$

Οι μηχανικές απώλειες P_m ή οι απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού P_ℓ του κινητήρα είναι:

$$P_m = P_\ell = 30.000 \text{ W.}$$

Η ισχύς εξόδου του κινητήρα είναι:

$$P_{out} = P_{in} - P_{cust} - P_\ell = 541.008 - (25.350 + 30.000) = 485.658 \text{ W.}$$

Η απόδοση του κινητήρα είναι:

$$\frac{485.658}{541.008} \cdot 100 = 89,77\%.$$

Άσκηση 4.

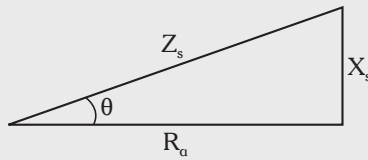
Δίδεται τριφασικός, 2.000 V, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, σύγχρονος κινητήρας, ο οποίος έχει: $R_a = 0,2 \Omega/\text{φάση}$ και $X_s = 2,2 \Omega/\text{φάση}$. Η ισχύς εισόδου είναι 800 kW, στην ονομαστική τάση. Η αντι-ΗΕΔ είναι 2.500 V. Να υπολογίσετε το ρεύμα γραμμής που απορροφά ο κινητήρας και ο αντίστοιχος συντελεστής ισχύος.

Λύση.

Η τάση ανά φάση τροφοδοσίας του κινητήρα είναι: $V_t = \frac{2.000}{\sqrt{3}} \approx 1.155 \text{ V.}$

Η αντι-ΗΕΔ ανά φάση είναι: $\frac{2.500}{\sqrt{3}} \approx 1.443 \text{ V.}$

Η γωνία θ (σχ. 4.12κ) είναι:



Σχ. 4.12κ

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2,2}{0,2} = 84,80^\circ.$$

Η αντι-ΗΕΔ είναι μεγαλύτερη απ' την τάση τροφοδοσίας, οπότε η συμπεριφορά του κινητήρα είναι χωρητική. Αν I_a είναι το ρεύμα ανά φάση, που απορροφά ο κινητήρας, τότε η βατική συνιστώσα $I_a \cos\varphi$ είναι σε φάση με την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, ενώ σε αντί-φάση είναι η άεργος συνιστώσα $I_a \eta\mu\varphi$. Το ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας γράφεται: $I_a \cos\varphi + jI_a \eta\mu\varphi$.

Η ισχύς εισόδου του κινητήρα είναι:

$$P_{in} = 3V_t I_a \cos\varphi.$$

Λύνοντας ως προς $I_a \cos\varphi$ προκύπτει:

$$I_a \cos\varphi = \frac{P_m}{3V_t} = \frac{800.000}{3 \cdot 1.155} = 231 \text{ A.}$$

Η πτώση τάσεως στη σύγχρονη σύνθετη αντίσταση είναι:

$$I_a Z_s = (I_a \cos\varphi + jI_a \eta\mu\varphi) \cdot (0,2 + j2,2) = (231 + I_a \eta\mu\varphi) \cdot (0,2 + j2,2)$$

$$\text{ή } (46,2 - 2,2I_a \cos\varphi) + j(508,2 + 0,2I_a \eta\mu\varphi).$$

Το διάγραμμα τάσεων ρευμάτων του κινητήρα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12κα.

Από το ορθογώνιο τρίγωνο ΑΒΓ έχομε:

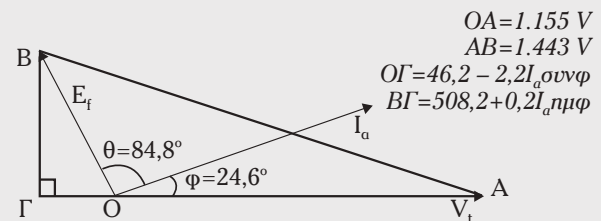
$$(AB)^2 = (BG)^2 + (AG)^2 = (BG)^2 + [(AO) + (OG)]^2$$

$$\text{ή } (1.443)^2 = (508,2 + 0,2I_a \cos\varphi)^2 + (1.155 + 46,2I_a \eta\mu\varphi)^2$$

$$\text{και } I_a \eta\mu\varphi = 106 \text{ A.}$$

Το ρεύμα γραμμής είναι:

$$\sqrt{(I_a \cos\varphi)^2 + (I_a \eta\mu\varphi)^2} = \sqrt{(231)^2 + (106)^2} = 254,15 \text{ A.}$$



Σχ. 4.12κα

Ο συντελεστής ισχύος είναι:

$$I_a \text{ συνφ} = \frac{I_a \text{ συνφ}}{I_a} = \frac{231}{254,15} = 0,909 \text{ χωρ.}$$

Άσκηση 5.

Δίδεται τριφασικός, 6.600 V, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, σύγχρονος κινητήρας ο οποίος έχει $X_s = 20 \Omega$. Για μια δεδομένη φόρτιση, η ισχύς εισόδου είναι 915 kW στην ονομαστική τάση και η αντι-ΗΕΔ είναι 8.942 V. Να υπολογίσετε το ρεύμα γραμμής του κινητήρα και τον αντίστοιχο συντελεστή ισχύος του.

Λύση.

Η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα ανά φάση είναι:

$$\frac{6.600}{\sqrt{3}} \approx 3.810 \text{ V.}$$

Η αντι-ΗΕΔ ανά φάση είναι: $\frac{8.942}{\sqrt{3}} \approx 5.163 \text{ V.}$

Η αντι-ΗΕΔ είναι μεγαλύτερη απ' την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, οπότε η φόρτισή του είναι χωρητική.

Η ισχύς εισόδου είναι: $P_{in} = 3V_t I_a \text{ συνφ}$

$$\text{και } I_a \text{ συνφ} = \frac{P_{in}}{3V_t} = \frac{915.000}{3 \times 3.810} = 80 \text{ A.}$$

Το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων του κινητήρα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12κβ.

Η πώση τάσεως στη σύγχρονη αντίδραση είναι $I_a X_s = 20I_a$.

Από το ορθογώνιο τρίγωνο ΑΒΓ έχουμε:

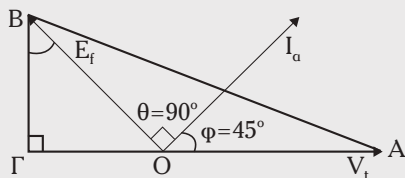
$$(AB)^2 = (BG)^2 + (AG)^2$$

$$\text{ή } (5.163)^2 = (I_a Z_s \text{ συνφ})^2 + (AG)^2$$

$$\text{ή } (AG)^2 = (5.163)^2 - (20I_a \text{ συνφ})^2$$

$$\text{ή } (AG)^2 = (5.163)^2 - (20 \times 80)^2 \text{ ή } AG = 4.910 \text{ V.}$$

$$\text{Είναι: } OG = AG - AO = 4.910 - 3.810 = 1.100 \text{ V.}$$



Σχ. 4.12κβ

$$\begin{aligned} \text{Ισχύει: } I_a Z_s &= \sqrt{(BG)^2 + (OG)^2} = \\ &= \sqrt{(1.600)^2 + (1.100)^2} = 1.942 \text{ V.} \end{aligned}$$

Το ρεύμα γραμμής είναι:

$$I_a = \frac{I_a Z_s}{Z_s} = \frac{1.942}{20} = 97,1 \text{ A.}$$

Ο συντελεστής ισχύος είναι:

$$\text{συνφ} = \frac{I_a \text{ συνφ}}{I_a} = \frac{80}{97,1} = 0,8239 \text{ χωρ.}$$

Άσκηση 6.

Δίδεται τριφασικός, 2.500 V, 4-πολικός, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, σύγχρονος κινητήρας ο οποίος περιστρέφεται με 1.500 ΣΑΛ. Το ρεύμα διεγέρσεως είναι σταθερό και η αντι-ΗΕΔ είναι 2.500 V. Ο κινητήρας έχει $X_s = 3 \Omega/\text{φάση}$. Να υπολογίσετε την ισχύ εισόδου του τυμπάνου, τον αντίστοιχο συντελεστή ισχύος και την αναπτυσσόμενη ροπή στον κινητήρα για ρεύμα τυμπάνου 250 A.

Λύση.

Η τάση τροφοδοσίας ανά φάση είναι:

$$\frac{2.500}{\sqrt{3}} = 1.443 \text{ V.}$$

Η αντι-ΗΕΔ ανά φάση είναι: $\frac{2.500}{\sqrt{3}} = 1.443 \text{ V.}$

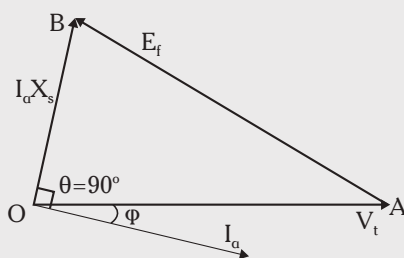
Το ρεύμα τυμπάνου είναι: 250 A.

Η σύγχρονη αντίδραση είναι: $X_s = 3 \Omega$.

Η γωνία είναι $\theta = 90^\circ$.

Η πώση τάσεως είναι: $X_s I_a = 250 \cdot 3 = 750 \text{ V.}$

Το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων του κινητήρα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12κγ.



Σχ. 4.12κγ

Από το τρίγωνο AOB έχουμε:

$$(AB)^2 = (AO)^2 + (BO)^2 - 2(AO)(BO) \text{ συν}(90^\circ - \phi)$$

$$\text{ή } (1.443)^2 = (1.443)^2 + (750)^2 - 2 \cdot 1.443 \cdot 750 \cdot \text{ημφ}$$

$$\eta \quad \eta \mu \phi = \frac{(750)^2}{2 \cdot 1.443 \cdot 750} = 0,2598$$

$$\eta \quad \phi = \eta \mu^{-1} 0,2598 = 15^\circ \text{ επαγ.}$$

Ο συντελεστής ισχύος είναι $\cos 15^\circ = 0,965$.

Η ισχύς εισόδου είναι:

$$P_{in} = \sqrt{3} V_n I_Y \cos \phi = \\ = \sqrt{3} \cdot 2.500 \cdot 250 \cdot 0,965 = 1.045,300 \text{ W.}$$

Ο σύγχρονος αριθμός στροφών είναι:

$$n_s = 1.500 \text{ ΣΑΛ.}$$

Η αναπτυσσόμενη ροπή είναι:

$$T_e = \frac{P_{in} - P_{c\text{ust}}}{\frac{2\pi n_s}{60}} = \frac{1.045,300}{\frac{2\pi \cdot 1.500}{60}} = 6.655 \text{ N-m.}$$

Άσκηση 7.

Δίδεται τριφασικός, 12 HP, 400 V, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, σύγχρονος κινητήρας ο οποίος έχει: $Z_s = (0,25 + j2,7) \Omega/\text{φάση}$. Να βρεθεί η γωνία ισχύος δ και η αντι-ΗΕΔ του κινητήρα στη λειτουργία με πλήρες φορτίο, με συντελεστή ισχύος 0,855 χωρ.. Η απόδοση του κινητήρα είναι 89%.

Λύση.

Η ισχύς εξόδου του κινητήρα είναι:

$$P_{out} = 12 \cdot 746 = 8.952 \text{ W.}$$

Η ισχύς εισόδου του κινητήρα είναι:

$$P_{in} = \frac{8.952}{0,89} = 10.058 \text{ W.}$$

Το ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας είναι:

$$I_Y \equiv I_a \frac{P_{in}}{\sqrt{3} V_n \cos \phi} = \frac{10.058}{1,73 \cdot 400 \cdot 0,855} \approx 17 \text{ A.}$$

Η σύγχρονη σύνθετη αντίσταση ανά φάση είναι:

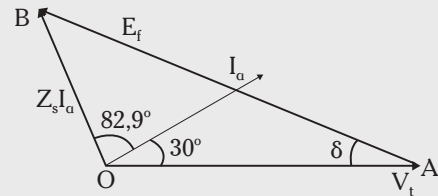
$$Z_s = \sqrt{(0,25)^2 + (2,7)^2} = 2,71 \Omega.$$

$$\text{Η γωνία } \theta \text{ είναι: } \theta = \tan^{-1} \frac{2,7}{0,25} = 84,71^\circ.$$

$$\text{Η γωνία } \phi \text{ είναι: } \phi = \cos^{-1} 0,855 = 31,24^\circ.$$

Η τάση τροφοδοσίας ανά φάση του κινητήρα είναι:

$$\frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V.}$$



Σχ. 4.12κδ

Το διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων του κινητήρα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12κδ.

Η πώση τάσεως είναι:

$$OB = Z_s I_a = 2,71 \cdot 17 = 46 \text{ V.}$$

Από το τρίγωνο OAB έχουμε:

$$(AB)^2 = (AO)^2 + (OB)^2 - 2(AO)(OB) \cos(\theta + \phi)$$

$$\eta \quad (AB)^2 = (231)^2 + (46)^2 - 2 \cdot (231) \cdot (46) \cdot \cos(84,71^\circ + 31,24^\circ) = 64.776,59 \text{ V}$$

$$\eta \quad AB = 254,51 \text{ V.}$$

Η πολική τάση διεγέρσεως είναι:

$$1,73 \cdot 254,51 = 441 \text{ V.}$$

$$\text{Ισχύει: } \frac{I_a Z_s}{\eta \mu \delta} = \frac{E_f}{\eta \mu(\phi + \theta)} \text{ και}$$

$$\eta \mu \delta = \frac{I_a Z_s \cdot \eta \mu(\theta + \phi)}{E_f} = \frac{46 \cdot \eta \mu 15,95}{254,51} = 0,1625$$

$$\delta = \sin^{-1} 0,1625 = 9,35^\circ.$$

Άσκηση 8.

Δίδεται τριφασικός, 400 V, 12 HP σύγχρονος κινητήρας, ο οποίος έχει $X_s = 12 \Omega/\text{φάση}$. Να υπολογίσετε το ελάχιστο ρεύμα και την αντίστοιχη αντι-ΗΕΔ στην κατάσταση πλήρους φορτίου. Η απόδοση του κινητήρα είναι 89%.

Λύση.

Η ισχύς εξόδου του κινητήρα είναι:

$$P_{out} = 12 \cdot 746 = 8.952 \text{ W.}$$

Η ισχύς εισόδου του κινητήρα είναι:

$$P_{in} = \sqrt{3} V_n I_Y (\equiv I_a) \cos \phi.$$

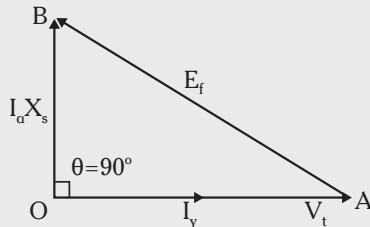
Λύνοντας ως προς $I_a \cos \phi$ έχουμε:

$$I_a \cos \phi = \frac{P_{in}}{\sqrt{3} V_n} = \frac{10.058}{1,73 \cdot 400} = 14,53 \text{ A.}$$

Το I_a είναι ελάχιστο όταν ο συντελεστής ισχύος

ισούται με τη μονάδα, οπότε: $I_a^{(\min)} = 14,53 \text{ A}$.

Το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων ρευμάτων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12κε.



Σχ. 4.12κε

Η πτώση τάσεως είναι:

$$OB \equiv I_a X_s = 14,53 \cdot 12 = 174,36 \text{ V.}$$

Η φασική τερματική τάση είναι:

$$V_t = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V.}$$

Από το τρίγωνο AOB η αντι-ΗΕΔ είναι:

$$\begin{aligned} AB &= \sqrt{(OA)^2 + (OB)^2} = \\ &= \sqrt{(231)^2 + (174,36)^2} = 289,42 \text{ V.} \end{aligned}$$

Άσκηση 9.

Δίδεται τριφασικός, 3.200 V, 50 Hz, με 8-πολική σύνδεση φάσεων σε αστέρα, σύγχρονος κινητήρας ο οποίος έχει $R_a = 0,4 \Omega/\text{φάση}$ και $X_s = 6 \Omega/\text{φάση}$. Όταν ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο το ρεύμα διεγέρσεως ρυθμίζεται έτσι, ώστε η αντι-ΗΕΔ να είναι ίση και σε αντίφαση με την τερματική τάση. Για ορισμένη ροπή φορτίου, ο δρομέας καθυστερεί κατά 4 μηχανικές μοίρες. Να υπολογίσετε το ρεύμα τυμπάνου και τον συντελεστή ισχύος του κινητήρα.

Λύση.

Η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα ανά φάση είναι:

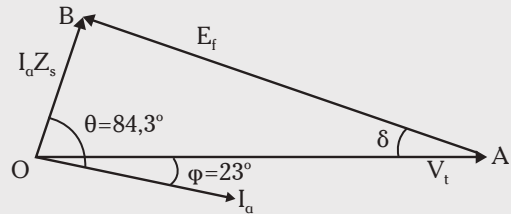
$$V_t = \frac{3.200}{\sqrt{3}} = 1.849,71 \text{ V.}$$

Η αντι-ΗΕΔ/φάση είναι: $V_t = 1.849,71 \text{ V}$.

Η γωνία ισχύος είναι:

$$\delta = \frac{P}{2} \cdot 4 = \frac{8}{2} \cdot 4 = 16^\circ.$$

Το διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων του κινητήρα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12κστ.



Σχ. 4.12κστ

Από το τρίγωνο OAB έχουμε:

$$(OB)^2 = (OA)^2 + (AB)^2 - 2(OA)(AB) \cos \delta$$

$$(OB)^2 = (1.849,71)^2 + (1.849,71)^2 - 2 \cdot (1.849,71) \cdot (1.849,71) \cdot \cos 16^\circ$$

$$(OB)^2 = 265.080,565 \text{ V}$$

$$(OB) \equiv I_a Z_s \approx 515 \text{ V.}$$

Η σύγχρονη σύνθετη αντίσταση είναι:

$$Z_s = \sqrt{(0,4)^2 + (6)^2} \approx 6 \Omega.$$

Το ρεύμα εισόδου του κινητήρα είναι:

$$I_a = \frac{(OB)}{Z_s} = \frac{515}{6} = 85,83 \text{ A.}$$

Από το τρίγωνο AOB έχουμε:

$$\frac{AB}{\sin \angle AOB} = \frac{OB}{\sin \angle OAB}$$

$$\frac{1.849,71}{\sin(\theta - \phi)} = \frac{515}{\sin 16^\circ}$$

$$\sin(\theta - \phi) = \frac{1.849,71 \cdot \sin 16^\circ}{515} = 0,98$$

$$\theta - \phi = \sin^{-1} 0,98 = 78,52^\circ.$$

Απ' το διανυσματικό διάγραμμα έχουμε:

$$\theta = \epsilon \phi^{-1} \frac{X_s}{R_a} = \epsilon \phi^{-1} \frac{6}{0,4} = 86,18^\circ$$

οπότε $\phi = \theta - 78,52^\circ = 86,18^\circ - 78,52^\circ = 7,66^\circ$.

Ο συντελεστής ισχύος είναι: $\cos 7,66^\circ = 0,99$ επαγ..

Άσκηση 10.

Δίδεται τριφασικός, 400 V, 6-πολικός, 50 Hz, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, σύγχρονος κινητήρας

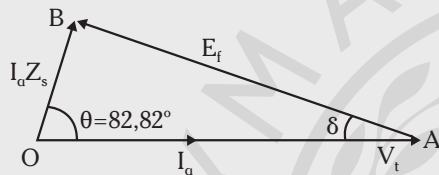
ρας, ο οποίος έχει $R_a = 0,4 \Omega/\text{φάση}$ και $Z_s = 5 \Omega/\text{φάση}$. Ο κινητήρας απορροφά ρεύμα 16 A με συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα για δεδομένο ρεύμα διεγέρσεως. Αν η ροπή φορτίου αυξηθεί, ο κινητήρας απορροφά 62 A για το ίδιο ρεύμα διεγέρσεως. Να υπολογίσετε την εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα και τον αντίστοιχο συντελεστή ισχύος.

Λύση.

Η τάση τροφοδοσίας ανά φάση του κινητήρα είναι:

$$V_t = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V}.$$

Το διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων του κινητήρα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12κζ.



Σχ. 4.12κζ

Η σύγχρονη αντίδραση X_s , είναι:

$$X_s = \sqrt{(5)^2 + (0,4)^2} = 4,98 \Omega.$$

Η γωνία θ είναι:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{R_a}{Z_s} = \cos^{-1} \frac{0,4}{5} = \cos^{-1} 0,08 = 85,41^\circ.$$

Η πώση τάσεως $Z_s I_a$ είναι $16 \cdot 5 = 80 \text{ V}$.

Η αντι-ΗΕΔ ανά φάση είναι:

$$(E_f)^2 = V_t^2 + (Z_s I_a)^2 - 2V_t (Z_s I_a) \cos \theta = (231)^2 + (80)^2 - 2 \cdot 231 \cdot 80 \cdot \cos 85,41^\circ = 56.803,28 \text{ V}$$

και $E_f = 238,33 \text{ V}$.

Έστω ότι το ρεύμα εισόδου του κινητήρα είναι 62 A . Η αντι-ΗΕΔ είναι $238,33 \text{ V}$, γιατί το ρεύμα διεγέρσεως είναι το ίδιο.

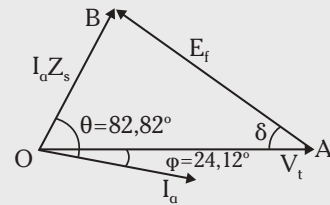
Η πώση τάσεως είναι $Z_s I_a = 62 \cdot 5 = 310 \text{ V}$.

Το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12κν.

Από το τρίγωνο OAB έχουμε:

$$(AB)^2 = (OA)^2 + (OB)^2 - 2(OA)(OB) \cos \angle AOB$$

$$(238,33)^2 = (231)^2 + (310)^2 - 2(231)(310) \cos \angle AOB$$



Σχ. 4.12κν

είναι: $\angle AOB = 49,75^\circ$.

Η γωνία ϕ είναι:

$$\phi = \theta - \angle AOB = 85,41^\circ - 49,75^\circ = 35,66^\circ.$$

Ο συντελεστής ισχύος είναι:

$$\cos 35,66^\circ = 0,81 \text{ επαγ.}$$

Η ισχύς εισόδου του κινητήρα όταν το ρεύμα εισόδου είναι 62 A είναι:

$$P_{in} = \sqrt{3} V_t I_a \cos \phi =$$

$$= \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 62 \cdot 0,81 = 34.752,24 \text{ W}.$$

Οι απώλειες χαλκού του στάτη είναι:

$$P_{cst} = 3 I_a^2 R_a = 3 \cdot (62)^2 \cdot 0,4 = 4.612,8 \text{ W}.$$

Η εσωτερική αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς είναι:

$$P_d = 34.752,24 - 4.612,8 = 30.139,44 \text{ W}.$$

Η σύγχρονη ταχύτητα είναι:

$$n_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \cdot 50}{6} = 1.000 \text{ ΣΑΛ}.$$

Η εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ισχύς είναι:

$$T_e = \frac{P_d}{\omega_s} = \frac{30.139,44}{2 \cdot 3,14 \cdot 1.000} = 288 \text{ N-m}.$$

Άσκηση 11.

Δίδεται τριφασικός σύγχρονος κινητήρας, 550 V , με ηλεκτρικό κύκλωμα 50 Hz , το οποίο τροφοδοτείται με 18 A , με συντελεστή ισχύος $0,8 \text{ επαγ.}$. Χρησιμοποιούμε σύγχρονο κινητήρα για να διορθωθεί ο συντελεστής ισχύος ίσος με την μονάδα. Να υπολογίσετε τα kVA εισόδου του κινητήρα και τον συντελεστή ισχύος όταν οδηγεί μηχανικό φορτίο 12 HP . Ο κινητήρας έχει απόδοση 87% ($1 \text{ HP} = 746 \text{ W}$).

Λύση.

Η άεργος ισχύς, την οποία απορροφά το ηλεκτρικό κύκλωμα είναι:

$$\begin{aligned} \text{kVAR} &= \sqrt{3} V_n I_Y \eta \mu \phi = \\ &= 1,73 \cdot 550 \cdot 18 \cdot 0,6 = 10.276,2 \end{aligned}$$

ή $10,276 \text{ kVAR}$.

Η ισχύς εισόδου του κινητήρα είναι:

$$P_{\text{in}} = \frac{P_{\text{out}}}{\eta} = \frac{8.952}{0,87} = 10,289 \text{ kW}.$$

1 HP = 746 W, οπότε 12 HP = 8.952 W.

Ο συντελεστής ισχύος θα γίνει ίσος με τη μονάδα όταν η άεργος ισχύς (χωρ.), που απορροφά ο κινητήρας γίνεται ίση με την άεργο ισχύ (επαγ.) που απορροφά το ηλεκτρικό κύκλωμα.

Η άεργος ισχύς του κινητήρα είναι:

$$10,276 \text{ kVAR (χωρ.)}$$

Η πραγματική ισχύς την οποία απορροφά ο σύγχρονος κινητήρας είναι 10,289 kW.

Η φαινόμενη ισχύς εισόδου του σύγχρονου κινητήρα είναι:

$$\begin{aligned} \text{kVA} &= \sqrt{(\text{kVAR})^2 + (\text{kW})^2} = \\ &= \sqrt{(10,276)^2 + (10,289)^2} = 14,541. \end{aligned}$$

Ο συντελεστής ισχύος του κινητήρα είναι:

$$\text{συνφ} = \frac{\text{kW}}{\text{kVA}} = \frac{10,289}{14,541} = 0,70 \text{ χωρ.}$$

Άσκηση 12.

Σύγχρονη γεννήτρια τροφοδοτεί με 870 kW φορτίο μια εγκατάσταση, με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ.. Χρησιμοποιούμε έναν υπερδιεγερμένο σύγχρονο κινητήρα για να διορθώσουμε τον συντελεστή ισχύος της γεννήτριας στη μονάδα. Με αμετάβλητο ρεύμα τυμπάνου ποια είναι η ισχύς με την οποία η γεννήτρια πρέπει να τροφοδοτήσει τον σύγχρονο κινητήρα και ποια είναι η μηχανική ισχύς σε HP στον άξονα του κινητήρα όταν έχει απόδοση 89%; Ποιος είναι ο συντελεστής ισχύος του σύγχρονου κινητήρα; Δίδεται 1 HP = 746 W.

Λύση.

Διακρίνομε δύο περιπτώσεις:

1) Πριν τη σύνδεση του σύγχρονου κινητήρα:

Η παρεχόμενη ισχύς στο φορτίο της γεννήτριας είναι: $\text{kW}_1 = 870 \text{ kW}$.

Ο συντελεστής ισχύος είναι $\text{συνφ}_1 = 0,8$.

$$\text{Ισχύει ότι: } \eta \mu \phi_1 = \sqrt{1 - (\text{συνφ}_1)^2} = 0,6.$$

Η φαινόμενη ισχύς που παρέχεται απ' την γεννήτρια είναι:

$$\text{kVA}_1 = \frac{\text{kW}_1}{\text{συνφ}_1} = \frac{870}{0,8} = 10,875.$$

Η άεργος ισχύς του φορτίου είναι:

$$\text{kVAR} = \text{kVA} \cdot \eta \mu \phi_1 = 10,875 \cdot 0,6 = 6,525.$$

2) Μετά τη σύνδεση του σύγχρονου κινητήρα:

Ο συντελεστής ισχύος της γεννήτριας είναι $\text{συνφ}_2 = 1$.

Τα παρεχόμενα από τη γεννήτρια kVA είναι:

$$\text{kVA}_1 = \text{kVA}_2 = 10,875.$$

Το ρεύμα τυμπάνου θεωρείται αμετάβλητο.

Η παρεχόμενη πραγματική ισχύς στο φορτίο απ' τη γεννήτρια είναι:

$$\text{kW}_2 = \text{kVA}_2 \cdot \text{συνφ}_2 = 10,875 \cdot 1 = 10,875 \text{ kW}.$$

Ο σύγχρονος κινητήρας απορροφά ισχύ:

$$\text{kW}_2 - \text{kVA}_1 = 10,875 - 870 = 217,5 \text{ kW}.$$

Ο σύγχρονος κινητήρας απορροφά χωρητικά kVAR όσα και το φορτίο πριν τη σύνδεση του κινητήρα.

Τα kVA τα οποία απορροφά ο σύγχρονος κινητήρας είναι:

$$\sqrt{(6,525)^2 + (217,5)^2} = 652,862.$$

Ο συντελεστής ισχύος του σύγχρονου κινητήρα είναι:

$$\frac{\text{kW}}{\text{kVA}} = \frac{217,5}{652,862} = 0,33.$$

Η μηχανική ισχύς στον άξονα του κινητήρα είναι:

$$\frac{P_{\text{in}} \text{ σε kW} \cdot \text{απόδοση}}{0,746} = \frac{169,65}{0,746} = 227 \text{ HP}.$$

Άσκηση 13.

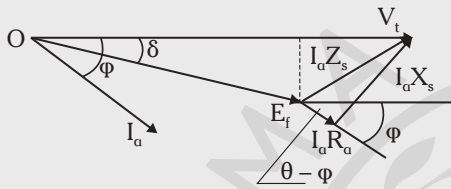
Δίδεται τριφασικός, 100 HP, 2.000 V, με σύν-

δεση φάσεων σε αστέρα, σύγχρονος κινητήρας ο οποίος έχει σύγχρονη σύνθετη αντίσταση ανά φάση $Z_s = 0,2 + j1,6\Omega$ και απόδοση 95%. Όταν λειτουργεί στο ονομαστικό του φορτίο να υπολογίσετε:

- 1) Τη φασική αντι-ΗΕΔ, και
- 2) την αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύ, όταν:
 - α) ο συντελεστής ισχύος είναι 0,8 επαγ., και
 - β) ο συντελεστής ισχύος είναι 0,8 χωρ..

Λύση.

1) Για επαγωγικό συντελεστή ισχύος, το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων του κινητήρα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12κθ.



Σχ. 4.12κθ

Η μιγαδική σχέση μεταξύ των μεγεθών του διανυσματικού διαγράμματος του σχήματος αυτού είναι:

$$E_f = V_t - Z_s I_a \cos(\theta - \varphi) + jZ_s I_a \sin(\theta - \varphi).$$

Η φασική τερματική τάση του κινητήρα είναι:

$$V_t = \frac{2.000}{\sqrt{3}} = 1.156 \text{ V/φάση.}$$

Ο κινητήρας απορροφά ρεύμα: $I_a = \frac{P_{in}}{\sqrt{3}V_n \cos\varphi}$,

αλλά η ισχύς εισόδου του κινητήρα είναι:

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{100 \cdot 746}{0,95} = 78.526 \text{ W.}$$

$$\text{Οπότε: } I_a = \frac{78.526}{\sqrt{3} \cdot 2.000 \cdot 0,8} = 23 \text{ A.}$$

Η σύγχρονη σύνθετη αντίσταση ανά φάση είναι:

$$Z_s = \sqrt{(0,2)^2 + (1,6)^2} = 1,61 \Omega/\text{φάση.}$$

$$\text{Εύρεση του } \theta = \tan^{-1} \frac{1,6}{0,2} = 82,87^\circ.$$

$$\text{Εύρεση του } Z_s I_a = 1,6 \cdot 23 = 37 \text{ V.}$$

Με βάση τα παραπάνω η E_f είναι:

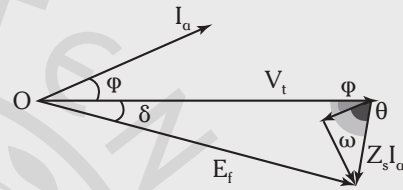
$$E_f = 1.156 - 37 \cos(82,87^\circ - 36,87^\circ) + j37 \sin(82,87^\circ - 36,87^\circ) = 1.130 + j26,61$$

$$\text{ή } E_f = 1.130,31 \angle 1,35^\circ \text{ V.}$$

1) Η αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς είναι:

$$P_d = P_{in} - P_{c\text{ust}} = 78.526 - 3I_a^2 R_a = 8.526 - 3 \cdot (23)^2 \cdot 0,2 = 78.209 \text{ W.}$$

2) Όταν όμως ο συντελεστής ισχύος είναι χωρητικός, τότε ισχύει το διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.12λ.



Σχ. 4.12λ

1) Υπολογισμός της φασικής αντι-ΗΕΔ.

Επειδή $\cos\varphi$ και φορτίο παραμένει το ίδιο, το ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας είναι 23 A. Η πώση τάσεως στη σύγχρονη σύνθετη αντίσταση είναι 37 V και η γωνία ισχύος είναι $1,35^\circ$.

Από το τρίγωνο του διανυσματικού διαγράμματος έχουμε:

$$E_f = \sqrt{V_t^2 + (Z_s I_a)^2 - 2V_t (Z_s I_a) \cos\omega}.$$

$$\text{Είναι: } \omega = \varphi + \theta = 36,87^\circ + 82,87^\circ = 120^\circ$$

$$\cos 120^\circ = -0,5$$

$$\text{και } E_f = \sqrt{(1.156)^2 + (37)^2 + 2(1.156)(37)0,5} = \sqrt{1.380.477} = 1.175 \text{ V.}$$

2) Υπολογισμός της αναπτυσσόμενης μηχανικής ισχύος.

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί με συντελεστή ισχύος χωρητικό, η αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς είναι ίδια (78.209 W), όπως όταν λειτουργεί με συντελεστή ισχύος επαγωγικό.

4.12.7 Έλεγχος – Συντήρηση – Βλάβες κινητών εναλλασσόμενου ρεύματος.

Στην παράγραφο αυτή αναφέρονται συγκεντρωτι-

κά τα κύρια στοιχεία ελέγχου και συντηρήσεως καθώς και οι πιθανές βλάβες των κινητήρων ΕΡ.

1) Έλεγχος.

α) Έλεγχος των κινητήρων ΕΡ όταν είναι εκτός λειτουργίας.

– Κατάσταση ακροδεκτών.

Μια λαθεμένη συνδεσμολογία των ακροδεκτών του κυκλώματος διεγέρσεως και των βοηθητικών πόλων της διεγέρτριας, όπου χρησιμοποιείται σε μηχανές ΕΡ, προκαλεί μεγάλες ανωμαλίες.

Στις ασύγχρονες μηχανές αλλάζει η φορά περιστροφής του περιστρεφόμενου πεδίου με την αλλαγή της ακολουθίας των φάσεων.

– Κατάσταση των αντιστάσεων.

Ελέγχουμε την καλή κατάσταση των τυλιγμάτων μετρώντας τις αντιστάσεις των κινητήρων, με σκοπό να εντοπιστούν κακές συνδέσεις, βραχυκυκλώματα, διακοπή σπειρών και λαθεμένες συνδεσμολογίες.

– Κατάσταση των μονώσεων.

Η διάρκεια ζωής ενός κινητήρα εξαρτάται, κυρίως, από την κατάσταση των μονώσεων των διαφόρων τυλιγμάτων. Πριν από την πρώτη λειτουργία του κινητήρα πρέπει να γίνει έλεγχος της μονώσεως μεταξύ των τυλιγμάτων, καθώς και μεταξύ των τυλιγμάτων και της γάστρας του πλοίου. Στην περίπτωση κατά την οποία υπάρχει υγρασία στα τυλιγμάτα, πρέπει να γίνει στέγνωμα των μονώσεων. Οι μονώσεις στεγνώνουν με τη βοήθεια εξωτερικών πηγών θερμότητας ή με την κυκλοφορία ρευμάτων συνεχών ή εναλλασσομένων στα πηνία των τυλιγμάτων, οπότε αναπτύσσεται θερμότητα σύμφωνα με το φαινόμενο Joule.

– Κατάσταση εδράνων τριβών.

Κυρίως ελέγχεται η στάθμη του λαδιού, οι διαφορές λαδιού και γράσου, καθώς και η καλή κατάσταση των λιπαντικών.

β) Έλεγχος των κινητήρων ΕΡ στη λειτουργία χωρίς φορτίο.

– Έλεγχος εδράνων.

Όταν οι κινητήρες εκκινούνται για πρώτη φορά, πρέπει να γίνεται έλεγχος καλής λειτουργίας. Τα έδρανα πρέπει να έχουν κανονική θερμοκρασία (450°C). Μια πιθανή αύξηση της θερμοκρασίας των εδράνων προκύπτει από κακή τοποθέτησή τους ή κακή λίπανση.

– Καλή περιστροφική κίνηση.

Κατά τη λειτουργία των κινητήρων πρέπει να υπάρχει καλή περιστροφική κίνηση. Μία ανώμαλη περιστροφική κίνηση μπορεί να προέρθει από κακή

ζυγοστάθμιση του δρομέα, εσφαλμένη στήριξη τους, ανομοιόμορφο διάκενο, καθώς και από βραχυκυκλώματα στον στάτη ή στον δρομέα.

– Λειτουργία χωρίς φορτίο.

Στη λειτουργία χωρίς φορτίο των κινητήρων πρέπει να παίρνομε τις σχετικές καμπύλες τάσεων, ρευμάτων και στροφών, καθώς επίσης να γίνεται έλεγχος της πολικότητας των συνδέσεων.

γ) Έλεγχος των κινητήρων ΕΡ στη λειτουργία με φορτίο.

Όταν οι κινητήρες λειτουργούν με φορτίο, πρέπει να γίνεται έλεγχος της απορροφούμενης και αποδιδόμενης ισχύος. Στις μεγάλες μηχανές με συστήματα ψύξεως, πρέπει να γίνεται έλεγχος των ποσοτήτων του αέρα για την απαγωγή της θερμότητας και των πτερύγων του ανεμιστήρα. Πρέπει να γίνεται έλεγχος της περιστροφής των κινητήρων, καθώς και των πιθανών δονήσεων που μπορεί να προέρχονται, κυρίως στις ασύγχρονες μηχανές, από διακοπή μιας φάσεως ή από άνισες αντιστάσεις φάσεων.

δ) Έλεγχος του συλλέκτη.

Ο συλλέκτης αποτελεί ένα από τα σημαντικά κατασκευαστικά στοιχεία των κινητήρων (όπου χρησιμοποιείται), καθώς πρέπει να εξασφαλίζει την καλή μεταγωγή του ρεύματος. Ο συλλέκτης πρέπει να έχει μια ομαλή και στιλπνή επιφάνεια. Συγχρόνως πρέπει να γίνεται έλεγχος των ψηκτρών. Οι ψηκτρες πρέπει να έχουν πίεση (την ορίζει ο κατασκευαστής) συνήθως 180-200 P/cm², για ψηκτρες, κυρίως, από άνθρακα. Πρέπει να γίνεται έλεγχος της θέσεώς τους.

Στις μηχανές, στις οποίες υπάρχουν δακτυλίδια πρέπει να γίνεται έλεγχος των μονώσεων και συνδεσμολογιών των αγωγών με τα δακτυλίδια.

2) Συντήρηση.

Με τον όρο *συντήρηση* εννοούμε τις απαραίτητες εργασίες, οι οποίες απαιτούνται για να εξασφαλίσουν την καλή λειτουργία των κινητήρων. Στις τεχνικές προδιαγραφές προτείνονται, απ' τον κατασκευαστή προγράμματα συντηρήσεως, τα οποία πρέπει να γίνονται κάθε εβδομάδα, κάθε μήνα και κάθε χρόνο.

Η καθαριότητα των κινητήρων, η λίπανση των εδράνων, ο έλεγχος των ψηκτρών και ο έλεγχος του συλλέκτη και των δακτυλιδιών αποτελούν τα κύρια σημεία συντηρήσεως των κινητήρων ΕΡ.

3) Βλάβες των κινητήρων ΕΡ.

Οι πιθανές αιτίες βλαβών, που μπορούν να εντο-

πιστούν στους κινητήρες ΕΡ είναι οι ακόλουθες:

- α) Διακοπή κυκλωμάτων περιελίξεων.
- β) Διακοπή των τυλιγμάτων εκκινήσεως.
- γ) Υπερφόρτιση των κινητήρων.
- δ) Διακοπή των κυκλωμάτων τροφοδοτίσεως των κινητήρων.
- ε) Διακοπή μίας ή δύο φάσεων.
- στ) Ακάθαρτος συλλέκτης.
- ζ) Φθαρμένες ψήκτρες και ακατάλληλη πίεση των ελατηρίων των ψηκτρών.
- η) Βραχυκύκλωμα στο ηλεκτρικό κύκλωμα του δρομέα.
- θ) Κακή λίπανση των εδράνων.
- ι) Το μονωτικό υλικό των ψηκτρών (μίκρα) προεξέχει από τους τομείς του συλλέκτη.

4.13 Προτεινόμενες ασκήσεις.

A) Ασύγχρονοι κινητήρες.

Άσκηση 1.

Ένας 16-πολικός ασύγχρονος κινητήρας περιστρέφεται με 400 ΣΑΛ και συχνότητα 50 Hz. Να υπολογίσετε την συχνότητα του ρεύματος στα τυλίγματα του δρομέα και την ολίσθηση.

Άσκηση 2.

Αν η ΗΕΔ ανά φάση του δρομέα ενός 8-πολικού ασύγχρονου κινητήρα έχει συχνότητα 1,5 Hz και η αντίστοιχη, ανά φάση, του στάτη έχει συχνότητα 50 Hz. Ποια είναι η ταχύτητα περιστροφής και ολισθήσεως του κινητήρα;

Άσκηση 3.

Να υπολογίσετε τον αριθμό των πόλων, την ολίσθηση και τη συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα 4 kW, όταν λειτουργεί:

- 1) Στα 220 V, 50 Hz στις 1.440 ΣΑΛ, και
- 2) στα 125 V, 30 Hz στις 3.750 ΣΑΛ.

Άσκηση 4.

Δίδεται 6-πολικός, τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας με συχνότητα 50 Hz. Η ωμική αντίσταση ανά φάση και η αντίδραση ανά φάση του δρομέα είναι: $R_{2r} = 0,01 \Omega$ και $X_{2r} = 0,1 \Omega$. Να υπολογίσετε την ταχύτητα του κινητήρα στην μέγιστη ροπή.

Άσκηση 5.

Οι φάσεις του δρομέα ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα είναι συνδεδεμένες σε αστέρα. Όταν

ο δρομέας είναι ακίνητος, η επαγόμενη τάση ανά φάση είναι 110 V. Η ωμική αντίσταση και η αντίδραση σκεδάσεως ανά φάση του δρομέα είναι 0,2 Ω και 1,1 Ω . Να υπολογίσετε:

- 1) Το ρεύμα και τον αντίστοιχο συντελεστή ισχύος του δρομέα όταν είναι ακινητοποιημένος.
- 2) Το ρεύμα του δρομέα όταν ο κινητήρας λειτουργεί με ολίσθηση 0,05, και
- 3) τις απώλειες χαλκού και την ισχύ εξόδου στο ερώτημα (2).

Άσκηση 6.

Δίδεται τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας 80 kW, 50 Hz. Οι απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού, πυρήνα και χαλκού του στάτη είναι 800 W, 3.000 W και 2.500 W αντίστοιχα. Ο κινητήρας περιστρέφεται με 1.400 ΣΑΛ. Να υπολογίσετε την ολίσθηση και την απόδοση του κινητήρα.

Άσκηση 7.

Δίδεται τριφασικός, 4-πολικός, 220 V, 50 Hz, 20 HP ασύγχρονος κινητήρας με σύνδεση φάσεων σε αστέρα. Ο κινητήρας έχει: $R_1 = 0,112 \Omega/\text{φάση}$, $R_2 = 0,087 \Omega/\text{φάση}$, $X_1 = 0,374 \Omega/\text{φάση}$, $X_2 = 0,132 \Omega/\text{φάση}$, $R_c = 170 \Omega$, $X_m = 75 \Omega$. Οι απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού ισούνται με τις απώλειες του πυρήνα του στάτη. Αν η ολίσθηση είναι 4%, να υπολογίσετε το ρεύμα, το οποίο απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο και τον αντίστοιχο συντελεστή ισχύος.

Άσκηση 8.

Δίδεται τριφασικός, 6-πολικός, 400/220 V, 50 Hz ισχύος 3 kW ασύγχρονος κινητήρας με σύνδεση φάσεων τριγώνου και αστέρα (Δ -Y). Κατά την διάρκεια της δοκιμής με ακινητοποιημένο δρομέα ο κινητήρας απορροφά απ' το δίκτυο 25 A με συντελεστή ισχύος 0,4. Να υπολογίσετε την ωμική αντίσταση/φάση του στάτη και του δρομέα, όταν η αναπτυσσόμενη ροπή σ' αυτές τις συνθήκες λειτουργίας είναι 25 N-m.

Άσκηση 9.

Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας, 10 HP, 208 V, 60 Hz, 4-πολικός, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα παρέχει την ονομαστική του ισχύ με ολίσθηση 5%. Να υπολογίσετε:

- 1) Τη σύγχρονη ταχύτητα.
- 2) Την ταχύτητα του δρομέα, στο ονομαστικό φορτίο.
- 3) Τη συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα στο ονομαστικό φορτίο, και

4) την ταχύτητα του στρεφόμενου πεδίου του δρομέα:

- α) ως προς τον δρομέα,
- β) ως προς τον στάτη,
- γ) ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη.

Άσκηση 10.

Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας, 4-πολικός, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα λειτουργεί με τάση 380 V, 50 Hz και ολίσθηση 2%. Οι παράμετροι του ανά φάση ισοδυναμίου κυκλώματος ανηγμένες στον στάτη είναι:

$$R_1 = 0,29 \Omega, \quad X_1 = 0,5 \Omega, \\ X_m = 13,25 \Omega, \quad R_{2r} = 0,14 \Omega, \quad X_{2r} = 0,21 \Omega.$$

Να υπολογίσετε:

- 1) Την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.
- 2) Το ρεύμα, το οποίο απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο, και
- 3) τον συντελεστή ισχύος και την ισχύ στην είσοδο του κινητήρα.

Άσκηση 11.

Ένας μικρός τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας έχει ρεύμα βραχυκυκλώσεως 5 φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα πλήρους φορτίου, ενώ η ολίσθηση πλήρους φορτίου είναι 5%. Να υπολογίσετε τη ροπή εκκινήσεως και το ρεύμα εκκινήσεως όταν χρησιμοποιείται εκκινήσιμη αντιστάσεων, οπότε η τάση τροφοδοσίας μειώνεται στα 60% της κανονικής τάσεως.

Άσκηση 12.

Να υπολογίσετε τον λόγο του ρεύματος εκκινήσεως προς το ρεύμα πλήρους φορτίου για έναν τριφασικό, 750 kW, 440 V, ασύγχρονο κινητήρα όταν εκκινείται με διακόπτη αστέρα-τρίγωνο, ενώ η απόδοσή του στο πλήρες φορτίο είναι 0,87, ο συντελεστής ισχύος είναι 0,85 επαγ., και το ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι 15 A στα 100 Ω.

Άσκηση 13.

Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα έχει ρεύμα βραχυκυκλώσεως 5 φορές μεγαλύτερο απ' το ρεύμα πλήρους φορτίου. Να υπολογίσετε την ροπή εκκινήσεως σαν ποσοστό επί τοις εκατό της ροπής πλήρους φορτίου όταν ο κινητήρας εκκινείται:

- 1) Απευθείας από το δίκτυο.
- 2) Με διακόπτη αστέρα-τρίγωνο.
- 3) Με AM/Σ και
- 4) με αντιστάσεις στον στάτη.

B) Σύγχρονοι κινητήρες.

Άσκηση 1.

Δίδεται τριφασικός, 2-πολικός σύγχρονος κινητήρας 1.000 HP, 6.600 V, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, 50 Hz, ο οποίος έχει σύγχρονη σύνθετη αντίσταση ανά φάση $Z_s = 0,3 + j5 \Omega$, $\cos\phi = 0,8$ χωρ., $\eta_{ov} = 95\%$.

Να υπολογίσετε:

- 1) Την ανά φάση αντι-ΗΕΔ.
- 2) Τη γωνία ισχύος.
- 3) Την αναπτυσσόμενη εσωτερική μηχανική ισχύ, και
- 4) τη ροπή στον άξονα του κινητήρα.

Άσκηση 2.

8-πολικός, 3.000 V, 50 Hz, τριφασικός, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, σύγχρονος κινητήρας έχει ανά φάση αντίσταση τυμπάνου $0,4 \Omega$ και σύγχρονη αντίδραση ανά φάση 4Ω . Στη λειτουργία χωρίς φορτίο το ρεύμα διεγέρσεως ρυθμίζεται έτσι, ώστε αριθμητικά η αντι-ΗΕΔ ανά φάση να συμπίπτει με την τερματική τάση ανά φάση. Όταν εφαρμόζεται κάποιο φορτίο στον άξονά του, ο δρομέας καθυστερεί κατά 3 μηχανικές μοίρες. Να υπολογίσετε το ρεύμα τυμπάνου και τον συντελεστή ισχύος του κινητήρα.

Άσκηση 3.

Ένας τριφασικός κινητήρας, 2.000 V, 50 Hz, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα έχει σύγχρονη αντίδραση ανά-φάση 10Ω . Όταν παρέχει σε φορτίο 150 HP η απόδοσή του είναι 85% και η γωνία ισχύος 12° . Να υπολογίσετε την πολική αντι-ΗΕΔ και το ρεύμα γραμμής του κινητήρα.

Άσκηση 4.

Δίδεται τριφασικός, 440 V, 50 Hz, 6-πολικός, με σύνδεση φάσεων σε τρίγωνο, σύγχρονος κινητήρας, ο οποίος έχει σύνθετη σύγχρονη αντίσταση ανά φάση $Z_s = 0,3 + j3 \Omega$. Ο κινητήρας απορροφά ρεύμα 16 A με συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα για ένα ορισμένο ρεύμα διεγέρσεως. Όταν η ροπή στον άξονα του κινητήρα αυξηθεί, τότε απορροφά ρεύμα 30 A, ενώ το ρεύμα διεγέρσεως παραμένει αμετάβλητο. Να υπολογίσετε την εσωτερική αναπτυσσόμενη ροπή στον δρομέα της μηχανής και τον νέο συντελεστή ισχύος.

Άσκηση 5.

Το ρεύμα διεγέρσεως ενός τριφασικού, 440 V, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, ρυθμίζεται έτσι, ώστε

η αντι-ΗΕΔ ανά φάση να είναι 550 V. Η σύγχρονη σύνθετη αντίσταση ανά φάση είναι: $Z_s = 0,4 + j5 \Omega$ ανά φάση. Εάν το άθροισμα των απωλειών λόγω τριβών και ανεμισμού (μηχανικές απώλειες) είναι 1.100 W, να υπολογίσετε την ισχύ εξόδου, το ρεύμα γραμμής, τον συντελεστή ισχύος και την απόδοση για τη μέγιστη ισχύ εξόδου του κινητήρα.

Άσκηση 6.

Μία σύγχρονη γεννήτρια με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ. τροφοδοτεί με 870 kW, έναν σύγχρονο κινητήρα, ο οποίος λειτουργεί με συντελεστή ισχύος ωμικό. Με αμετάβλητο ρεύμα τυμπάνου με πόση ισχύ πρέπει η σύγχρονη γεννήτρια να τροφοδοτήσει τον σύγχρονο κινητήρα και πόση ισχύ πρέπει να αναπτύξει ο κινητήρας, ώστε να λειτουργεί με απόδοση 95%; Να βρείτε τον συντελεστή ισχύος του κινητήρα.

Άσκηση 7.

Ένα φορτίο 5.000 kW, τροφοδοτείται με τάση 1.200 V και συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ.. Συνδέεται, τώρα, ένας σύγχρονος κινητήρας 1.250 HP, με αποτέλεσμα ο συντελεστής ισχύος να αυξηθεί στο 0,96 επαγ. Να υπολογίσετε τα kVA του κινητήρα και του συντελεστή ισχύος, στον οποίο πρέπει να λειτουργεί με απόδοση 85%.

Άσκηση 8.

Σύγχρονος κινητήρας, 200 kVA, τριφασικός, 2.200 V, 50 A, 50 Hz, 1.900 ΣΑΛ, με σύνδεση φάσεων σε τρίγωνο έχει ωμική αντίσταση τυμπάνου ανά φάση και σύγχρονη αντίδραση ανά φάση 1Ω και 18Ω ανά φάση αντίστοιχα. Να υπολογίσετε την εσωτερική αναπτυσσόμενη ισχύ του κινητήρα στο ονομαστικό ρεύμα και με συντελεστή ισχύος 0,8 χωρ..

Άσκηση 9.

Σύγχρονος κινητήρας, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, τροφοδοτείται με σταθερή τάση, ενώ η διέγερση διατηρείται σταθερή. Η σύγχρονη αντίδραση ανά φάση είναι 10Ω . Όταν λειτουργεί με συντελεστή ισχύος 0,8 χωρ. απορροφά απ' το δίκτυο 850 kW. Ποιος είναι ο νέος συντελεστής του κινητήρα όταν η ισχύς εισόδου του αυξάνεται στα 1.500 kW, ενώ η διέγερση διατηρείται σταθερή;

Άσκηση 10.

Ένας τριφασικός σύγχρονος κινητήρας, 1.100 kW, 3,3 kV, 24-πολικός, 50 Hz, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα έχει σύγχρονη αντίδραση ανά φάση 4Ω .

Ο κινητήρας τροφοδοτείται από μία σύγχρονη γεννήτρια με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: 2.500 kVA, 3,3 kV, 50 Hz, 2-πολική, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα. Η γεννήτρια αυτή έχει σύγχρονη αντίδραση/φάση 5Ω . Να υπολογίσετε την E_f του κινητήρα και της γεννήτριας όταν το σύστημα λειτουργεί στην ονομαστική τάση και με συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα, ενώ ο κινητήρας παρέχει την ονομαστική ισχύ του. Το ρεύμα διεγέρσεως στις δύο μηχανές παραμένει αμετάβλητο, ενώ το φορτίο του κινητήρα αυξάνεται διαδοχικά. Να υπολογίσετε τη μέγιστη ισχύ την οποία παρέχει ο κινητήρας.

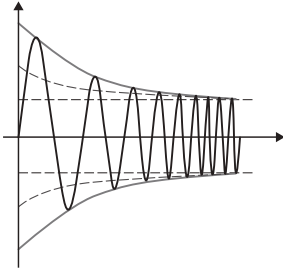
4.14 Ερωτήσεις.

A) Ασύγχρονοι κινητήρες.

- 1) Σε ποια αρχή λειτουργίας βασίζεται ο ασύγχρονος κινητήρας;
- 2) Σε ποιες κατηγορίες κατατάσσονται οι κινητήρες ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα;
- 3) Τι είναι ολίσθηση και τι εκφράζει;
- 4) Πώς επηρεάζει η ολίσθηση την απαγόμενη τάση, το επαγόμενο ρεύμα και τη συχνότητα στον δρομέα ενός ασύγχρονου κινητήρα;
- 5) Πώς επηρεάζουν τη λειτουργία ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα: η μεταβολή της ολίσθησης, η μεταβολή της ωμικής αντιστάσεως του δρομέα και η μεταβολή της αντιδράσεως του δρομέα;
- 6) Πώς καθορίζονται οι παράμετροι ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα;
- 7) Με ποιους τρόπους εκκινείται ένας τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα;
- 8) Με ποιους τρόπους ρυθμίζεται η ταχύτητα περιστροφής του ασύγχρονου κινητήρα;

B) Σύγχρονοι κινητήρες.

- 1) Ποια είναι η αρχή λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα;
- 2) Ποιοι είναι οι τρόποι εκκινήσεως του ασύγχρονου κινητήρα;
- 3) Ποια είναι η σημασία της γωνίας ισχύος για έναν ασύγχρονο κινητήρα; Για ποια τιμή της γωνίας ισχύος έχουμε τη μέγιστη ροή;
- 4) Ποια είναι η σημασία των καμπυλών «V» για έναν ασύγχρονο κινητήρα;
- 5) Πώς μπορεί να λειτουργήσει ο ασύγχρονος κινητήρας ως πυκνωτής; Κάτω από ποιες συνθήκες; Δώστε το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή.

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ενός εμπορικού πλοίου έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- 1) Τοποθετείται σε μικρό χώρο/μονάδα ισχύος.
- 2) Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με ηλεκτρικό δίκτυο μικρού μήκους (της τάξεως των 40 και 1.000 m).
- 3) Το τριφασικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής είναι χωρίς ουδέτερο αγωγό, με ουδέτερο κόμβο μωμένο (δίκτυο γειώσεως αγείωτο).
- 4) Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς κατά το μεγαλύτερο μέρος καταναλώνεται από τα συστήματα κίνησης. Στην ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου περιλαμβάνονται και μη γραμμικά φορτία των συστημάτων πλοηγείσεως και άλλων αντιστοιχίων ηλεκτρονικών φορτίων.
- 5) Η χρήση των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, με εφαρμογή κυρίως στην ηλεκτρική πρόωση, προκαλεί μεγάλα προβλήματα στην ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος.

Σε εμπορικό πλοίο απαιτείται καλή και αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος με ονομαστικά μεγέθη παραγόμενης τάσεως και συχνότητας. Το εμπορικό πλοίο συνήθως, λειτουργεί σε ιδιαίτερες και συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες, οπότε απαιτείται συνεχής ροή ηλεκτρικής ενέργειας.

Μια συνιστώσα του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω προκλήσεως βραχυκυκλώματος (σφάλματος). Στη μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ισχύος ο όρος «βραχυκύκλωμα» συνήθως συμπίπτει με την έννοια του σφάλματος, το οποίο εμφανίζεται με την μορφή ηλεκτρικού τόξου μεταξύ των φάσεων και της γάστρας του πλοίου.

Για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως σε ηλεκτρικό σύστημα ισχύος εμπορικού πλοίου διευκολύνει να εισαχθούν τα ανά μονάδα per unit-p.u. μεγέθη των ηλεκτρικών ποσοτήτων του αντιστοιχίου ηλεκτρικού συστήματος, όπως εξηγείται στη συνέχεια.

5.2 Μεγέθη ανά μονάδα (p.u.).

Οι υπολογισμοί σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ισχύος, το οποίο περιλαμβάνει γεννήτριες, Μ/Σ, ηλεκτρικά δίκτυα διανομής και κινητήρες είναι πολύπλοκοι. Ένας απλός τρόπος υπολογισμών είναι να μεταφέρουμε όλα τα στοιχεία, τα οποία συνθέτουν ένα ηλεκτρικό δίκτυο σε κοινό επίπεδο τάσεως.

Αν θεωρηθεί ένα σύνολο **βασικών μεγεθών** (base quantities) για κάθε επίπεδο τάσεως σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ισχύος, οπότε κάθε ηλεκτρική ποσότητα εκφράζεται ως κλασματικό μέρος του αντίστοιχου βασικού μεγέθους, τότε προκύπτει μια νέα μέθοδος αναλύσεως, η οποία χρησιμοποιεί το ανά μονάδα (p.u.) σύστημα μετρήσεων.

Στο ανά μονάδα (p.u.) σύστημα, κάθε ποσότητα εκφράζεται σε συνάρτηση του αντίστοιχου βασικού μεγέθους της:

$$\text{ποσότητα p.u.} = \frac{\text{πραγματική τιμή της ποσότητας}}{\text{βασική τιμή της ποσότητας}}$$

Για να οριστεί πλήρως ένα ανά μονάδα (p.u.) σύστημα, απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερα βασικά μεγέθη:

- 1) Η τάση (V),
- 2) το ρεύμα (A),
- 3) η φαινομενική ισχύς (VA) και
- 4) η σύνθετη αντίσταση (ή σύνθετη αγωγιμότητα) (Ω). Ισχύει:

$$\text{βασικό ρεύμα} = \frac{\text{βασική φαινομένη ισχύς}}{\text{βασική τάση}} [A]$$

βασική σύνθετη αντίσταση =

$$= \frac{\text{βασική τάση}}{\text{βασικό ρεύμα}} = \frac{(\text{βασική τάση})^2}{\text{βασική φαινομένη ισχύς}} \text{ σε αυτών την τάση}$$

$$\text{ανά μονάδα τάση (p.u.)} = \frac{\text{πραγματική τάση}}{\text{βασική τάση}} [p.u.]$$

ανά μονάδα ρεύμα (p.u.) = $\frac{\text{πραγματικό ρεύμα}}{\text{βασικό ρεύμα}} [\text{p.u.}]$

ανά μονάδα σύνθετη αντίσταση (p.u.) = $\frac{\text{πραγματική σύνθετη αντίσταση}}{\text{βασική σύνθετη αντίσταση}} [\text{p.u.}]$.

Η p.u. σύνθετη αντίσταση μιας γεννήτριας ή Μ/Σ έχει ως βασικές τιμές τις ονομαστικές τιμές της γεννήτριας ή του Μ/Σ. Αυτή η p.u. σύνθετη αντίσταση μπορεί να μεταφερθεί σε νέα βάση ως εξής:

$$(Z_{\text{p.u.}})_{\text{new}} = (Z_{\text{p.u.}})_{\text{old}} \times \frac{(VA)_{\text{new}} \times (kV)_{\text{old}}^2}{(VA)_{\text{old}} \times (kV)_{\text{new}}^2}. \quad (5.1)$$

– Λυμένη άσκηση.

Τριφασικός Μ/Σ 50 MVA, 11 kV/33 kV έχει μια αντίδραση ανηγμένη στο πρωτεύον 0,244 Ω. Ποια είναι η ανά μονάδα αντίδραση στην πλευρά του πρωτεύοντος; Ποια είναι η ανά μονάδα αντίδραση ανηγμένη στο δευτερεύον;

Λύση.

Έστω 50 MVA είναι η βασική φαινόμενη ισχύς ($P_{\text{φB}}$) και $V_B = 11 \text{ kV}$, η βασική τάση του πρωτεύοντος. Ισχύει:

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} = \frac{(11 \times 10^3)^2}{50 \times 10^6} = \frac{11^2 \times 10^6}{50 \times 10^6} = 2,42 \Omega.$$

Εδώ η σύνθετη αντίσταση βάσεως ισούται με την αντίδραση βάσεως $Z_B = X_B$. Όμως, ισχύει:

$$X_{\text{p.u.}} = \frac{X}{X_B} = \frac{0,244}{2,42} = 0,10 \text{ p.u.}$$

Μεταφέροντας την αντίδραση 0,244 Ω στο δευτερεύον, παίρνουμε την αντίδραση

$$X_2 = 0,244 \times K^2 \Omega$$

όπου K , ο λόγος μετασχηματισμού. Σ' αυτήν την περίπτωση είναι $K = 3$.

Οπότε είναι: $X_2 = 0,244 \times 3^2 = 2,196 \Omega$.

Στην πλευρά του δευτερεύοντος παίρνουμε σαν τάση βάσεως τα 33 kV, για την ίδια βασική φαινόμενη ισχύ:

$$Z_B = \frac{V_B^2}{P_{\text{φB}}} = \frac{33^2 \times 10^6}{50 \times 10^6} = 21,78 \Omega.$$

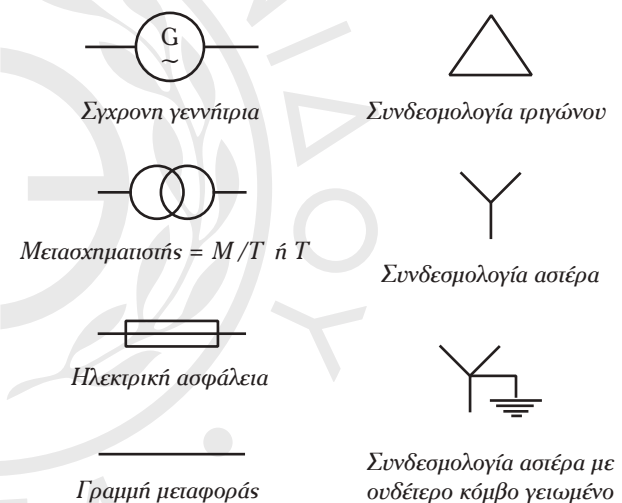
Η σύνθετη αντίσταση βάσεως ισούται με την αντίδραση βάσεως $Z_B = X_B$, οπότε έχουμε:

$$X_{2\text{p.u.}} = \frac{2,196}{21,78} = 0,10 \text{ p.u.}$$

5.3 Παρουσίαση συστήματος ηλεκτρικής ισχύος ενός εμπορικού πλοίου.

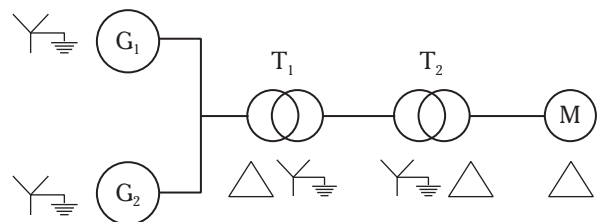
Στο σχήμα 5.3α παρουσιάζονται τα ηλεκτρολογικά σύμβολα των στοιχείων, τα οποία συναντώνται σε ένα ηλεκτρικό σύστημα ισχύος εμπορικού πλοίου.

Στο σχήμα 5.3β παρουσιάζεται το μονογραμμικό διάγραμμα (on-line diagrams) ενός συστήματος ηλεκτρικής ισχύος, το οποίο αποτελείται από δύο σύγχρονες γεννήτριες (G_1, G_2), δύο Μ/Σ (T_1, T_2) και έναν σύγχρονο κινητήρα (M).



Σχ. 5.3α

Σύμβολα που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικό σύστημα ισχύος εμπορικού πλοίου.



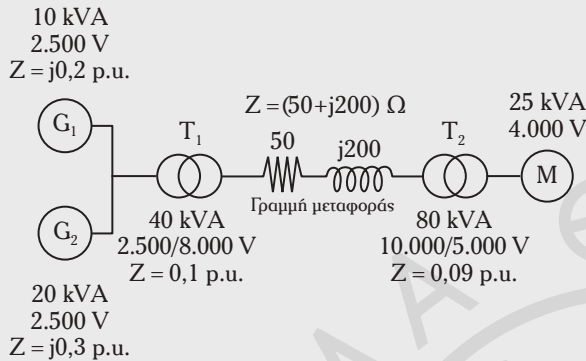
Σχ. 5.3β

Μονογραμμικό διάγραμμα ενός συστήματος ηλεκτρικής ισχύος.

- Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Στο σχήμα 5.3γ δίδεται ένα μονογραμμικό διάγραμμα ενός συστήματος ηλεκτρικής ισχύος. Να σχεδιαστεί το διάγραμμα ανά μονάδα (p.u.) των συνθέτων αντιστάσεων του αντίστοιχου ηλεκτρικού συστήματος ισχύος.



Σχ. 5.3γ

Λύση.

Επιλέγουμε, αυθαίρετα, ως φαινόμενη ισχύ βάρους τα 50 kVA:

$$\text{kVA}_{b,\text{new}} = 50 \text{ kVA.}$$

Επιλέγουμε ως βασική τάση σε kV τα 2,5 kV:

$$\text{kV}_{b,\text{new}} = 2.500 \text{ V} = 2,5 \text{ kV.}$$

Στη συνέχεια απολογίζουμε την p.u. σύνθετη αντίσταση των γεννητριών, των Μ/Σ και της γραμμής μεταφοράς, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5.1).

Γεννήτρια G_1 : Για την εξίσωση (5.1) έχουμε:

$$Z_{p.u.,\text{old}} = 0,2, \quad \text{kVA}_{b,\text{old}} = 10, \quad \text{kVA}_{b,\text{new}} = 50 \\ \text{kV}_{b,\text{old}} = 2,5, \quad \text{kV}_{b,\text{new}} = 2,5.$$

Τότε η εξίσωση (5.1) γίνεται:

$$Z_{p.u.,\text{new}} = Z_{p.u.,\text{old}} \times \left(\frac{\text{kV}_{b,\text{old}}}{\text{kV}_{b,\text{new}}} \right)^2 \times \left(\frac{\text{kVA}_{b,\text{new}}}{\text{kVA}_{b,\text{old}}} \right)$$

$$\hat{n} \quad Z_{p.u.,\text{new}} = j0,2 \times \left(\frac{2,5}{2,5} \right)^2 \times \left(\frac{50}{10} \right) = j1,0 \text{ p.u..}$$

Γεννήτρια G_2 : Για την εξίσωση (5.1) έχουμε:

$$Z_{p.u.,\text{old}} = 0,3, \quad \text{kVA}_{b,\text{old}} = 20, \quad \text{kVA}_{b,\text{new}} = 50 \\ \text{kV}_{b,\text{old}} = 2,5, \quad \text{kV}_{b,\text{new}} = 2,5.$$

Η p.u. αντίδραση της γεννήτριας G_2 , σύμφωνα με την εξίσωση (5.1), είναι:

$$Z_{p.u.,\text{new}} = j0,3 \times \left(\frac{2,5}{2,5} \right)^2 \times \left(\frac{50}{20} \right) = j0,75 \text{ p.u..}$$

Μ/Σ T_1 : Για την εξίσωση (1) έχουμε:

$$Z_{p.u.,\text{old}} = 0,1, \quad \text{kVA}_{b,\text{old}} = 40, \quad \text{kVA}_{b,\text{new}} = 50 \\ \text{kV}_{b,\text{old}} = 2,5, \quad \text{kV}_{b,\text{new}} = 2,5.$$

Η p.u. σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ T_1 , σύμφωνα με την εξίσωση (5.1), είναι:

$$Z_{p.u.,\text{new}} = j0,1 \times \left(\frac{2,5}{2,5} \right)^2 \times \left(\frac{50}{40} \right) = j0,125 \text{ p.u..}$$

Γραμμή μεταφοράς $Z = (50 + j200) \Omega$. Είναι:

$$\text{p.u. } Z = \frac{\text{Πραγματική τιμή} \\ \text{σύνθετης αντιστάσεως σε } \Omega}{\text{Βασική σύνθετη αντίσταση σε } \Omega}.$$

Πραγματική τιμή σύνθετης αντιστάσεως:

$$(50 + j200) \Omega.$$

Ισχύει:

Βασική τάση V, στην πλευρά της Υψηλής τάσεως του Μ/Σ T_1 , ισούται με τη βασική τάση, V, στην πλευρά της Χαμηλής τάσεως του T_1 επί το πηλίκο $\frac{\text{Τιμή Υ.Τ.}}{\text{Τιμή Χ.Τ.}}$:

Βασική τάση, V, στην πλευρά Υ.Τ.

$$\text{του Μ/Σ } T_1 = 2.500 \times \frac{8.000}{2.500} = 8.000 \text{ V.}$$

Οπότε είναι: $V_{b,\text{new}} = 8.000 \text{ V}$. Τότε η βασική σύνθετη αντίσταση είναι:

$$\frac{(V_{b,\text{new}})^2}{VA_{b,\text{new}}} = \frac{(8.000)^2}{50.000} = 1.280.$$

Η p.u. σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς είναι:

$$Z_{p.u.} = \frac{\text{Πραγματική τιμή σύνθετης αντιστάσεως}}{\text{Βασική τιμή σύνθετης αντιστάσεως}} = \\ = \frac{50 + j200}{1.280} = 0,039 + j0,156 \text{ p.u..}$$

Μ/Σ T_2 : Για την εξίσωση (5.1) έχουμε:

$$Z_{p.u.,old} = 0,09, \quad kVA_{b,old} = 80, \quad kVA_{b,new} = 50$$

$$kV_{b,old} = 10, \quad kV_{b,new} = 2,5.$$

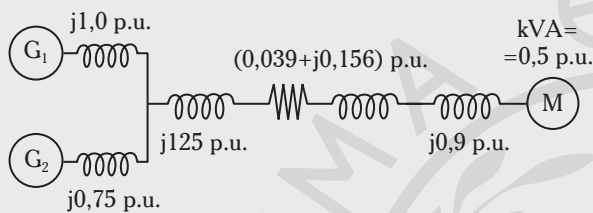
Σύμφωνα με την εξίσωση (5.1) η ανά μονάδα σύνθετη αντίσταση (p.u.) του Μ/Σ T_2 είναι:

$$Z_{p.u.,new} = j0,09 \times \left(\frac{10}{2,5}\right)^2 \times \left(\frac{50}{80}\right) = j0,9 \text{ p.u.}$$

Κινητήρας M: Για τον κινητήρα έχομε:

$$kVA_{p.u.} = \frac{25}{50} = 0,5 \text{ p.u.}$$

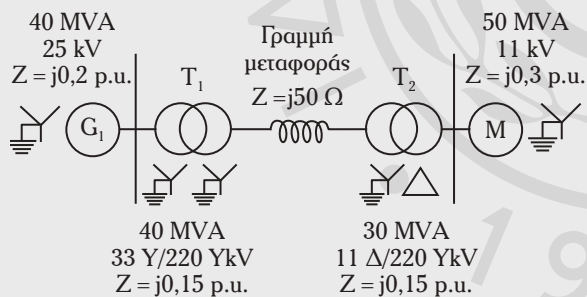
Αυτές οι τιμές παράγουν το ακόλουθο διάγραμμα η συνθέτων αντιστάσεων p.u. (σχ. 5.38).



Σχ. 5.38

Άσκηση 2.

Σχεδιάστε το διάγραμμα p.u. συνθέτων αντιστάσεων του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος του σχήματος 5.3ε.



Σχ. 5.3ε

Λύση.

Έστω τα βασικά μεγέθη: Φαινόμενη ισχύς και τάση, αντίστοιχα, είναι:

$$MVA_{b,new} = 100 \text{ MVA}, \quad kV_{b,new} = 220 \text{ kV}.$$

Γεννήτρια G_1 : Η p.u. σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας G_1 είναι:

$$Z_{p.u.,new} = Z_{p.u.,old} \times \left(\frac{kV_{b,old}}{kV_{b,new}}\right)^2 \times \left(\frac{MVA_{b,new}}{MVA_{b,old}}\right).$$

Είναι:

$$Z_{p.u.,old} = 0,2, \quad MVA_{b,old} = 40, \quad MVA_{b,new} = 100$$

$$kV_{b,old} = 25, \quad kV_{b,new} = 33.$$

Οπότε:

$$Z_{p.u.,new} = j0,2 \times \left(\frac{25}{33}\right)^2 \times \left(\frac{100}{40}\right) = j0,281 \text{ p.u.}$$

Μ/Σ T_1 : Η ανά μονάδα (p.u.) σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ T_1 είναι:

$$Z_{p.u.,new} = Z_{p.u.,old} \times \left(\frac{kV_{b,old}}{kV_{b,new}}\right)^2 \times \left(\frac{MVA_{b,new}}{MVA_{b,old}}\right).$$

Είναι:

$$Z_{p.u.,old} = 0,15, \quad MVA_{b,old} = 40,$$

$$MVA_{b,new} = 100, \quad kV_{b,old} = 33.$$

Βασική τάση, kV, στην πλευρά της Χ.Τ. του Μ/Σ T_1 = Βασική τάση, kV, στην πλευρά Υψηλής

$$\text{τάσεως} \times \frac{\text{Τιμή Χ.Τ.}}{\text{Τιμή Υ.Τ.}} = 220 \times \frac{33}{220} = 33 \text{ kV}.$$

Οπότε είναι: $kV_{b,new} = 33 \text{ kV}$.

Έχομε:

$$Z_{p.u.,new} = j0,15 \times \left(\frac{33}{33}\right)^2 \times \left(\frac{100}{40}\right) = j0,375 \text{ p.u.}$$

Γραμμή μεταφοράς: $Z = j50 \Omega$.

Η p.u. σύνθετη αντίσταση είναι:

$$Z_{p.u.} = \frac{\text{Πραγματική τιμή}}{\text{Βασική τιμή}}.$$

Η πραγματική τιμή είναι $j50 \Omega$.

Η βασική σύνθετη αντίσταση είναι:

$$\frac{kV_{b,new}}{MVA_{b,new}} = \frac{(220)^2}{100} = 484.$$

Οπότε η p.u. σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς είναι:

$$Z_{p.u.} = \frac{j50}{484} = j0,1033 \text{ p.u.}$$

Μ/Σ T_2 : Η ανά μονάδα (p.u.) σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ T_2 , δίδεται ως εξής:

$$Z_{p.u.,new} = Z_{p.u.,old} \times \left(\frac{kV_{b,old}}{kV_{b,new}}\right)^2 \times \left(\frac{MVA_{b,new}}{MVA_{b,old}}\right).$$

Είναι: $Z_{p.u.,old} = 0,15$, $MVA_{b,old} = 30$,
 $MVA_{b,new} = 100$, $kV_{b,old} = 11$.

Υπολογισμός της βασικής τάσεως: $kV_{b,new}$:

Η βασική τάση, kV , στην πλευρά της Χ.Τ. του
 Μ/Σ T_2 = Βασική τάση, kV , στην πλευρά Υ.Τ. του

$$T_2 \times \frac{\text{Τιμή Χ.Τ.}}{\text{Τιμή Υ.Τ.}} = 220 \times \frac{11}{220} = 11 \text{ kV.}$$

Η βασική τάση: $kV_{b,new}$ είναι 11 kV .

Οπότε η ανά μονάδα (p.u.) σύνθετη αντίσταση
 του Μ/Σ T_2 είναι:

$$Z_{p.u.,new} = j0,15 \times \left(\frac{11}{11}\right)^2 \times \left(\frac{100}{30}\right) = j0,5 \text{ p.u..}$$

Κινητήρας M: Η p.u. σύνθετη αντίσταση του
 κινητήρα M είναι:

$$Z_{p.u.,new} = Z_{p.u.,old} \times \left(\frac{kV_{b,old}}{kV_{b,new}}\right)^2 \times \left(\frac{MVA_{b,new}}{MVA_{b,old}}\right).$$

Είναι:

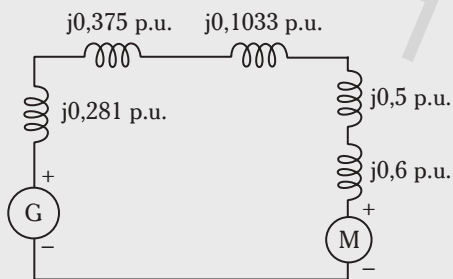
$$Z_{p.u.,old} = 0,3, \quad MVA_{b,old} = 50, \quad MVA_{b,new} = 100,$$

$$kV_{b,old} = 11, \quad kV_{b,new} = 11 \text{ kV.}$$

Η p.u. σύνθετη αντίσταση του κινητήρα είναι:

$$Z_{p.u.,new} = j0,3 \times \left(\frac{11}{11}\right)^2 \times \left(\frac{100}{50}\right) = j0,6 \text{ p.u..}$$

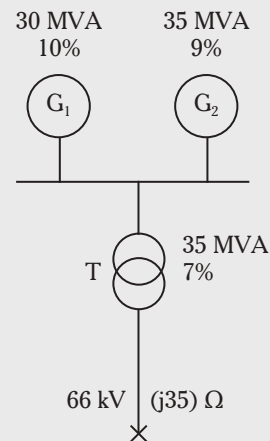
Αυτές οι τιμές παράγουν το διάγραμμα συνθέ-
 των αντιστάσεων του σχήματος 5.3στ.



Σχ. 5.3στ

Άσκηση 3.

Σχεδιάστε το διάγραμμα των αντιδράσεων, εκ-
 φράζοντας όλες τις τιμές επί τοις εκατό για το ακό-
 λουθο σύστημα ηλεκτρικής ισχύος (σχ. 5.3ζ).



Σχ. 5.3ζ

Λύση.

Αν επιλέγουμε ως βάση τα 85 MVA, τότε ισχύει:
 Γεννήτρια G_1 :

$$X_s \% = 10 \times \frac{85}{30} \cong 28\%$$

Γεννήτρια G_2 :

$$X_s \% = 9 \times \frac{85}{35} = 17\%$$

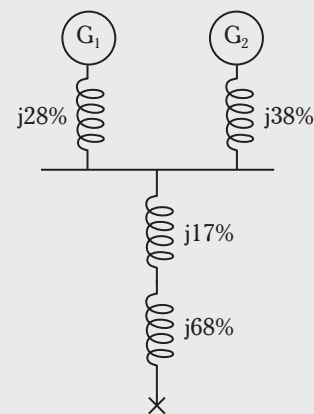
Μ/Σ T:

$$X_s \% = 7 \times \frac{85}{35} = 17\%$$

Γραμμή μεταφοράς:

$$X_s \% = j35 \times \frac{85 \times 10^6}{(66 \times 10^3)^2} \times 100 \cong j68\%$$

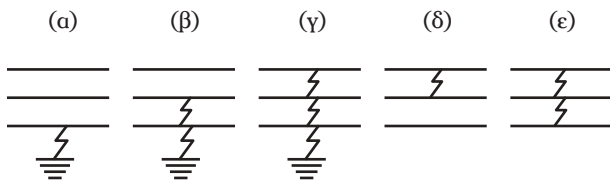
Το διάγραμμα τελικά, είναι αυτό που παρουσι-
 άζεται στο σχήμα 5.3η.



Σχ. 5.3η

5.4 Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκυκλώσεως σε σύστημα ηλεκτρικής ισχύος.

Στο σχήμα 5.4α, δίδονται διάφοροι τύποι βραχυκυκλωμάτων, τα οποία μπορούν να συμβούν σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ισχύος τριών φάσεων.



Σχ. 5.4α

Διάφοροι τύποι βραχυκυκλωμάτων σ' ένα τριφασικό σύστημα ηλεκτρικής ισχύος. (α) Βραχυκύκλωμα μεταξύ μίας φάσεως και γης, (β) βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων και γης, (γ) βραχυκύκλωμα μεταξύ τριών φάσεων και γης, (δ) βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων, (ε) βραχυκύκλωμα μεταξύ τριών φάσεων.

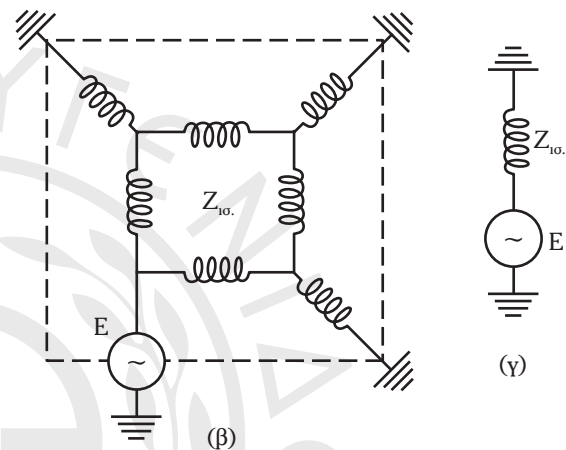
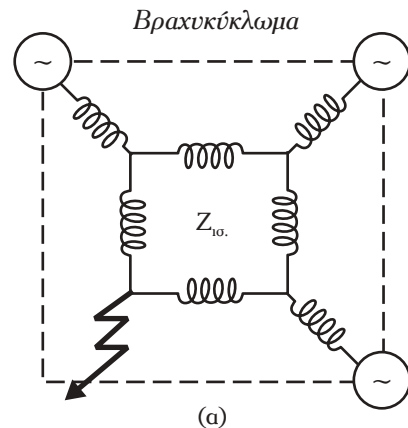
Στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω ενός τριφασικού δικτύου χωρίς ουδέτερο αγωγό και με αγείωτο ουδέτερο κόμβο. Το μεγαλύτερο ρεύμα βραχυκυκλώσεως εμφανίζεται στην περίπτωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος. Οι τάσεις του τριφασικού συστήματος είναι συμμετρικές και τα φορτία ισορροπημένα. Στη συνέχεια δίδονται τρεις μέθοδοι υπολογισμού των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ισχύος.

1) Πρώτη Μέθοδος: Αρχή της ισοδύναμης γεννήτριας.

Σύμφωνα μ' αυτήν την μέθοδο, ένα σύστημα ηλεκτρικής ισχύος το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο πραγματικών γεννητριών αντικαθίσταται με μία γεννήτρια η οποία έχει:

- 1) Τους ακροδέκτες της στο σημείο βραχυκυκλώσεως (σφάλματος) [σχ. 5.4β(α)].
- 2) Μία ΗΕΔ E ίση με την τάση στους ακροδέκτες του σημείου σφάλματος που θα είχαμε αν σ' αυτό το σημείο δεν πέρναγε κανένα ρεύμα [σχ. 5.4β(β)].
- 3) Μία εσωτερική σύνθετη αντίσταση ίση με την σύνθετη αντίσταση που μετράμε από το σημείο απ' το οποίο συνέβη το βραχυκύκλωμα [σχ. 5.4β(γ)].

Πρακτικά από ένα σύστημα του σχήματος 5.4β(α) περνάμε στο σχήμα 5.4β(γ), όπου $Z_{\text{ισ}}$ είναι η εσωτερική ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση την οποία μετράμε από το σημείο του σφάλματος.



Σχ. 5.4β

Μέθοδος ισοδύναμης γεννήτριας για τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκυκλώσεως. (α) Εμφάνιση βραχυκυκλώματος (σφάλμα) σε ένα σύστημα γεννητριών. (β) Τοποθέτηση μιας πηγής με ΗΕΔ E στους ακροδέκτες του σημείου σφάλματος που θα είχαμε αν σ' αυτό το σημείο δεν περνούσε κανένα ρεύμα. (γ) Αντικατάσταση του συστήματος ισχύος, το οποίο αποιλείται από ένα σύνολο γεννητριών, στο σημείο σφάλματος από μια πηγή τάσεως με ΗΕΔ E σε σειρά με εσωτερική σύνθετη αντίσταση που μετράμε από το σημείο σφάλματος.

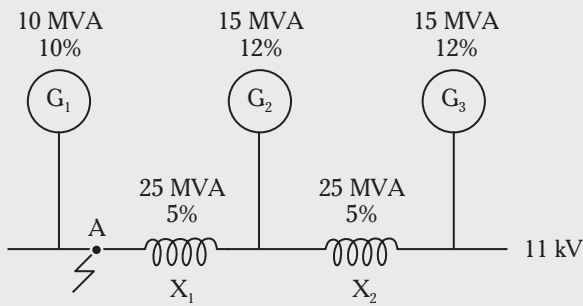
– Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Στο σημείο Α του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος του σχήματος 5.4γ συμβαίνει ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα. Να υπολογιστεί το ρεύμα βραχυκυκλώσεως σε αυτό το σημείο. Οι αντιδράσεις δίδονται επί τοις εκατό.

Λύση.

Για τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο Α ακολουθούμε τα εξής βήματα:



Σχ. 5.4γ

Βήμα 1: Επιλέγουμε ως ισχύ βάσεως $P_{\text{φον}}$ το άθροισμα των ισχύων των αντιστοίχων γεννητριών:

$$P_{\text{φον}} = \sum P_{\text{φG}}$$

ή $P_{\text{φον}} = 10 + 15 + 15 = 40 \text{ MVA.}$

Ως τάση βάσεως επιλέγουμε την τάση του 11 kV.

Βήμα 2: Υπολογίζουμε τις αντιδράσεις των γεννητριών, τις X_1 και X_2 , σε σχέση με το βασικό μέγεθος ισχύος $P_{\text{φον}}$. Ισχύει:

$$X_s^G (\text{p.u.}) = X\% \times \frac{P_{\text{φον}}}{P_{\text{φονG}_i}}, \text{ για } i = G_1, G_2, G_3.$$

Για τις ακόλουθες γεννήτριες ισχύουν:

Γεννήτρια G_1 : $X_s^{G1} (\text{p.u.}) = 0,1 \times \frac{40}{10} = 0,4 \text{ p.u.}$

Γεννήτρια G_2 : $X_s^{G2} (\text{p.u.}) = 0,12 \times \frac{40}{15} = 0,32 \text{ p.u.}$

Γεννήτρια G_3 : $X_s^{G3} (\text{p.u.}) = 0,12 \times \frac{40}{15} = 0,32 \text{ p.u.}$

Για τις αντιδράσεις X_1 και X_2 ισχύουν:

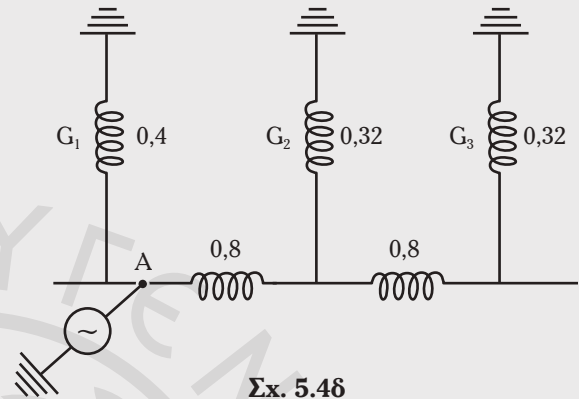
Για την X_1 : $X_1 (\text{p.u.}) = 0,5 \times \frac{40}{25} = 0,8 \text{ p.u.}$

Για την X_2 : $X_2 (\text{p.u.}) = 0,5 \times \frac{40}{25} = 0,8 \text{ p.u.}$

Βήμα 3: Αρχή της ισοδύναμης γεννήτριας, υπολογισμός της συνολικής αντιδράσεως του συστήματος. Για τον υπολογισμό της συνολικής αντιδράσεως του συστήματος την οποία «βλέπουμε» απ' το σημείο του σφάλματος είναι αναγκαίο να μην λάβουμε υπόψη τις τάσεις (γεννήτριες) του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος, γειώνοντας όλες τις γεννήτριες.

Σημείωση: Επειδή όλες οι σύνθειες αντιστάσεις είναι αμιγώς επαγωγικές τελικά για τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο σημείο A δεν είναι αναγκαία η παρουσία της φανταστικής μονάδας j.

Οπότε το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος γίνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4δ.



Σχ. 5.4δ

Έχομε τους μετασχηματισμούς που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.4ε.

$$\left(\frac{1}{0,4} + \frac{1}{1,048} \right)^{-1} = 0,289.$$

Βήμα 4: Υπολογισμός του ρεύματος βραχυκυκλώσεως.

Το τριφασικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{sc} (p.u.), ανά μονάδα υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{sc} (\text{p.u.}) = \frac{E (\text{p.u.})}{X_{\text{ολ}} (\text{p.u.})}$$

όπου E (p.u.), είναι η τάση χωρίς φορτίο της ισοδύναμης γεννήτριας.

Έχομε: $I_{sc} (\text{p.u.}) = \frac{1}{0,289} = 3,460.$

Το πραγματικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{sc} , δίδεται ως εξής:

$$I_{sc} = I_{sc} (\text{p.u.}) I_{ov}$$

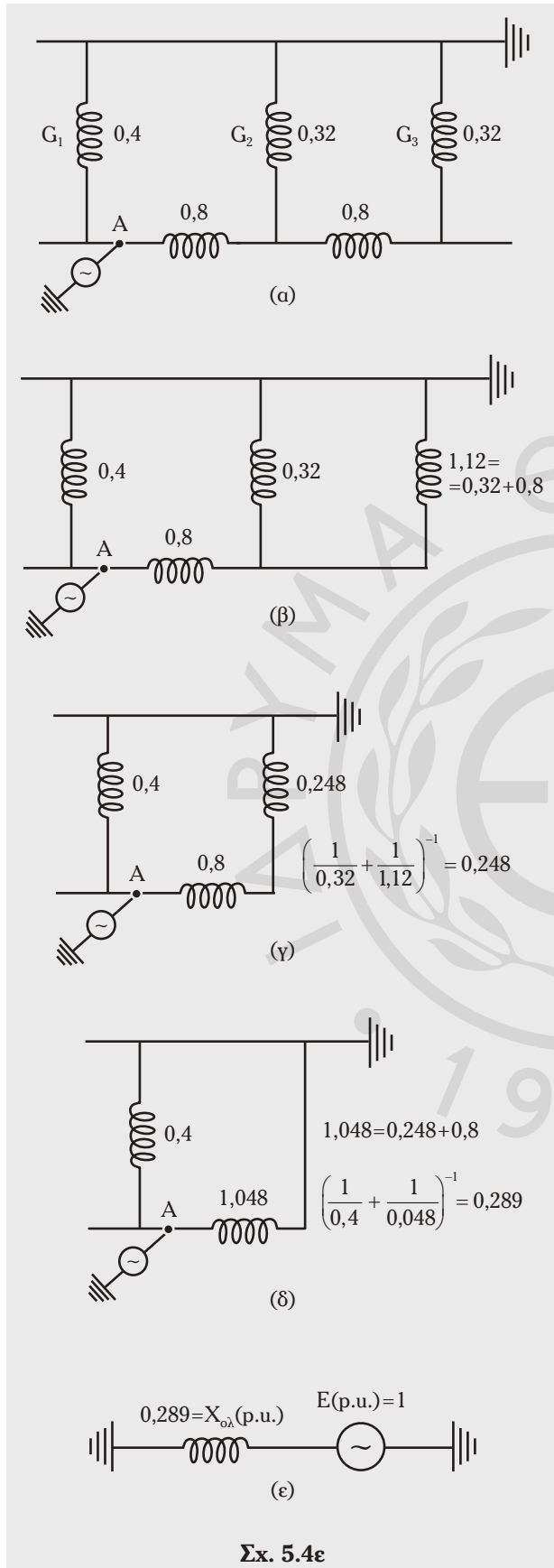
όπου I_{ov} το ονομαστικό ρεύμα που υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$I_{ov} = \frac{P_{\phi}}{\sqrt{3} V_{ov}}$$

όπου V_{ov} η ονομαστική τάση του ζυγού.

Για το ρεύμα βραχυκυκλώσεως ισχύει:

$$I_{sc} = 3.460 \cdot \frac{40 \cdot 10^6}{11 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{3}} = 7.273 \text{ A.}$$

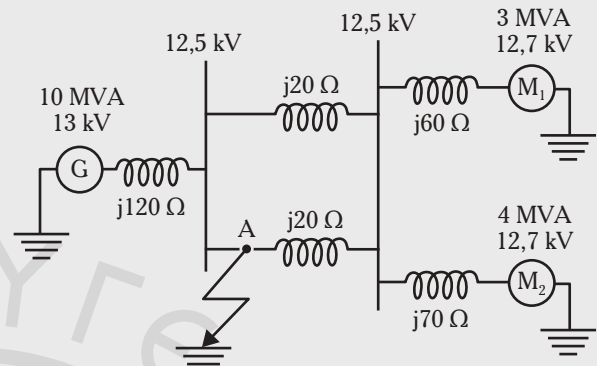


Σχ. 5.4ε

Άσκηση 2.

Για το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος του σχήματος 5.4στ στο σημείο A συμβαίνει ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη.

Να υπολογίσετε το ρεύμα βραχυκυκλώσεως στο σημείο A.



Σχ. 5.4στ

Λύση.

Επιλέγουμε βασική τιμή ισχύος τα 10 MVA και βασική τιμή τάσεως τα 12,5 kV.

Το βασικό ρεύμα είναι: $\frac{10 \times 10^6}{12,5 \times 10^3} = 800 \text{ A.}$

Η βασική σύνθετη αντίσταση είναι:

$$\frac{(12,5 \times 10^3)^2}{10 \times 10^6} = 15,625 \Omega.$$

Για τον υπολογισμό των ανά μονάδα (p.u.) αντιδράσεων διαιρούμε τις αντιδράσεις του συστήματος με την τιμή 15,625 Ω.

Για τη γεννήτρια G₁ ισχύει:

$$X_s(\text{p.u.}) = \frac{j120}{15,625} = j7,68 \text{ p.u.}$$

Για τον κινητήρα M₁ ισχύει:

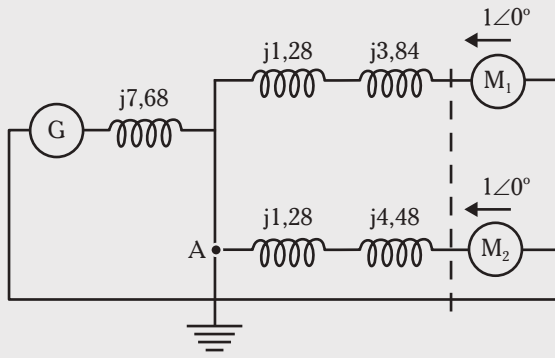
$$X_1(\text{p.u.}) = \frac{j60}{15,625} = j3,84 \text{ p.u.}$$

Για τον κινητήρα M₂ ισχύει:

$$X_2(\text{p.u.}) = \frac{j70}{15,625} = j4,48 \text{ p.u..}$$

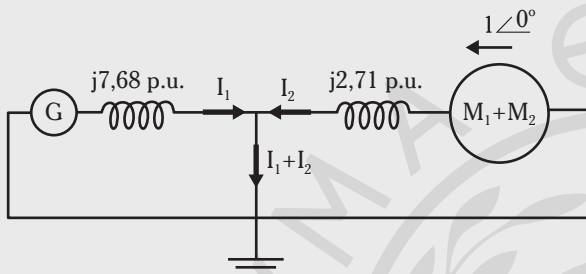
Αν η ΗΕΔ της γεννήτριας ισούται με την τάση 12,5 kV και η αντι-ΗΕΔ των κινητήρων είναι ίση με την τάση 12,5 kV, τότε οι ανά μονάδες τιμές των τάσεων της G₁ και M₁, M₂ είναι ίσες με 1.

Το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος μετασχηματίζεται ως εξής (σχ. 5.4ζ):



Σχ. 5.4ζ

Τελικά έχομε (σχ. 5.4n):



Σχ. 5.4n

Από το κύκλωμα έχομε: $I_1 = \frac{1}{j7,68} = -j0,13 \text{ p.u.}$,

$$I_2 = \frac{1}{j2,71} = -j0,369 \text{ p.u.}$$

$$I_1 + I_2 = -j(0,13 + 0,369) = -j0,499 \text{ p.u.}$$

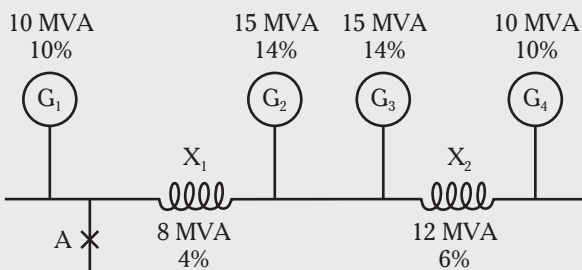
Το πραγματικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι:

$$-j0,499 \times 800 = -j399,2 \text{ A.}$$

Άσκηση 3.

Έχομε το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος του σχήματος 5.4θ.

Στο σημείο A συμβαίνει ένα τριφασικό βραχυ-



Σχ. 5.4θ

κύκλωμα. Να υπολογίσετε τα MVA βραχυκυκλώματος στο σημείο A.

Λύση.

Επιλέγομε ως βασική τιμή ισχύος το άθροισμα των φαινομένων ισχύων των γεννητριών:

$$P_\phi = \sum G_i$$

ή $P_{\phi n} = 10 + 15 + 15 + 10 = 50 \text{ MVA.}$

Οι ανά μονάδα (p.u.) τιμές των αντιδράσεων αναφερόμενες στη βασική τιμή των 50 MVA είναι:

$$G_1: X_s^{G1} (\text{p.u.}) = \frac{50}{10} \times 0,1 = 0,5 \text{ p.u.}$$

$$G_2: X_s^{G2} (\text{p.u.}) = \frac{50}{15} \times 0,14 = 0,466 \text{ p.u.}$$

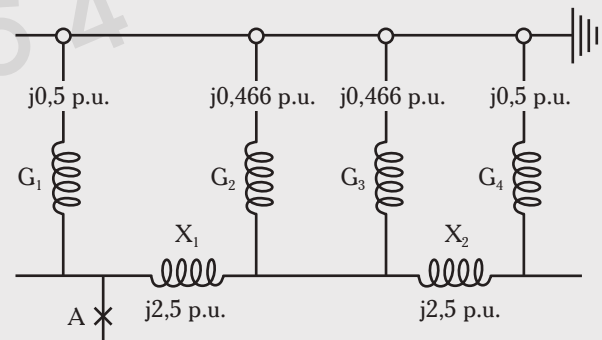
$$G_3: X_s^{G3} (\text{p.u.}) = \frac{50}{15} \times 0,14 = 0,466 \text{ p.u.}$$

$$G_4: X_s^{G4} (\text{p.u.}) = \frac{50}{10} \times 0,1 = 0,5 \text{ p.u.}$$

$$X_1 (\text{p.u.}) = \frac{50}{8} \times 0,4 = 2,5 \text{ p.u.}$$

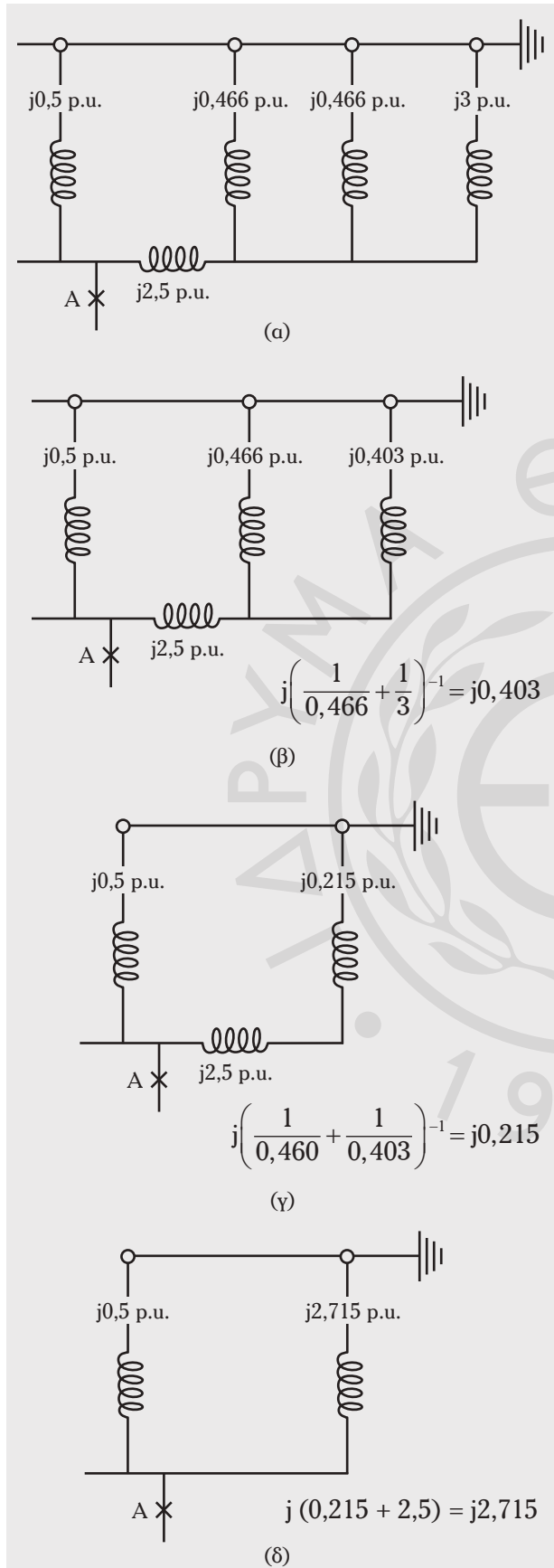
$$X_2 (\text{p.u.}) = \frac{50}{12} \times 0,6 = 2,5 \text{ p.u.}$$

Το ηλεκτρικό σύστημα ισχύος γίνεται όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.4ι.



Σχ. 5.4ι

Αναλύοντας το παραπάνω ηλεκτρικό σύστημα ισχύος προκύπτουν τα σχήματα 5.4ια.



$$j\left(\frac{1}{0,5} + \frac{1}{2,715}\right)^{-1} = j0,422 \text{ p.u.}$$

(ε)

Σχ. 5.4α

$$\begin{aligned} \text{MVA βραχυκυκλώματος} &= \\ &= \frac{50 \times 10^3}{0,422} = 118,48 \text{ MVA} \end{aligned}$$

2) Δεύτερη Μέθοδος: Υπολογισμός ρεύματος βραχυκυκλώσεως ανά φάση.

Όταν συμβεί ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου, οι τάσεις είναι συμμετρικές και τα φορτία είναι ισορροπημένα. Οπότε ο υπολογισμός του ρεύματος βραχυκυκλώσεως γίνεται στη μία φάση, διότι στις υπόλοιπες δύο έχει την ίδια τιμή. Όταν εμφανίζεται βραχυκύκλωμα σε σημείο μιας ηλεκτρικής γραμμής, τότε για τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο αντίστοιχο σημείο θεωρούμε ισοδύναμο κύκλωμα, το οποίο αποτελείται από μια ιδανική γεννήτρια σε σειρά με μια σύνθετη σύγχρονη ανά φάση αντίσταση της γεννήτριας και την σύνθετη αντίσταση της ηλεκτρικής γραμμής, στην οποία εμφανίζεται το σφάλμα.

Όταν έχουμε N_G όμοιες γεννήτριες σε παράλληλη λειτουργία, τότε το ισοδύναμο κύκλωμα αποτελείται από μια γεννήτρια η οποία έχει την ίδια τάση διεγέρσεως των αντιστοίχων γεννητριών και παρέχει, N_G φορές το ονομαστικό ρεύμα κάθε γεννήτριας σε σειρά με σύγχρονη σύνθετη αντίσταση $1/N_G$ φορές της σύγχρονης σύνθετης αντιστάσεως κάθε γεννήτριας.

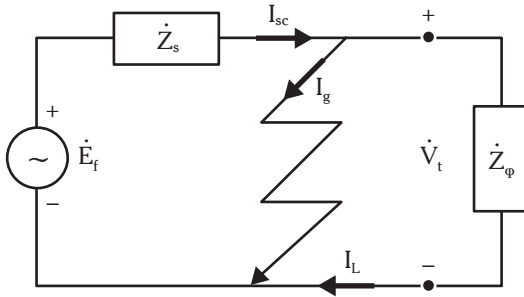
Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) σε ένα σημείο της ηλεκτρικής γραμμής ισούται με το άθροισμα του ρεύματος σφάλματος (I_g) και του ρεύματος γραμμής (I_L) πριν το σφάλμα (σχ. 5.4β).

$$\text{Ισχύει:} \quad I_{sc} = I_g + I_L. \quad (5.2)$$

Τα ρεύματα εκφράζονται στις ενεργές τους τιμές.

Επειδή αναφερόμαστε στο τριφασικό βραχυκύκλωμα, το ρεύμα πριν το βραχυκύκλωμα ισούται με το ονομαστικό ρεύμα γραμμής.

Το ρεύμα σφάλματος είναι το ρεύμα το οποίο κυκλοφορεί μεταξύ των σημείων που βρίσκονται σε επαφή λόγω βραχυκυκλώσεως.



Σχ. 5.41β

Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_{sc}) ισούται με το άθροισμα του ρεύματος σφάλματος (I_g) και του ρεύματος γραμμής (I_L) πριν την εμφάνιση του σφάλματος.

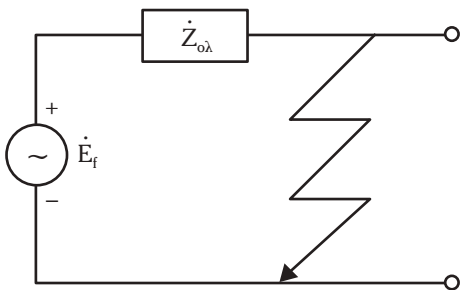
α) Υπολογισμός του ρεύματος σφάλματος.

Το ρεύμα σφάλματος είναι ο λόγος μεταξύ της τάσεως στο μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα (σχ. 5.41γ) και της συνολικής σύνθετης αντιστάσεως μεταξύ της ιδανικής πηγής τάσεως και του σημείου, στο οποίο εμφανίζεται το σφάλμα.

Η εφαρμοζόμενη τάση είναι η ΗΕΔ E_f , που παρέχεται από τη γεννήτρια πριν το σφάλμα. Η συνολική σύνθετη αντίσταση ισούται με το άθροισμα της εσωτερικής σύνθετης αντιστάσεως της γεννήτριας και της σύνθετης αντιστάσεως της γραμμής μέχρι το σημείο του σφάλματος.

Για χάρη απλότητας οι ωμικές αντιστάσεις των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου, αμελούνται. Οπότε το τριφασικό βραχυκύκλωμα συνίσταται κυρίως από άεργο ισχύ. Πράγματι, το ρεύμα βραχυκυκλώσεως έχει συντελεστή ισχύος ο οποίος φτάνει μέχρι την τιμή 0,3, για σφάλματα προς το μέρος των καταναλωτών και 0,1 για σφάλματα προς το μέρος των γεννητριών.

Για τον υπολογισμό του ρεύματος σφάλματος λαμβάνομε υπόψη τις ανά μονάδα (p.u.) σύνθετες αντιστάσεις. Η ανά μονάδα (p.u.) σύνθετη αντίσταση ισούται με το πηλίκο της πτώσεως τάσεως, η οποία προκαλείται στην σύνθετη αντίσταση όταν αυτή διαρ-



Σχ. 5.41γ

Υπολογισμός του ρεύματος σφάλματος.

ρέεται από ένα ρεύμα αναφοράς, το οποίο αντιστοιχεί σε μία τάση αναφοράς. Αυτό το πηλίκο είναι ένας καθαρός αριθμός. Στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων το ρεύμα αναφοράς και η τάση αναφοράς αντιστοιχούν: στο **ονομαστικό ρεύμα** και στην **ονομαστική τάση** της γεννήτριας.

Αν αμελήσουμε τις ωμικές αντιστάσεις των ηλεκτρικών κυκλωμάτων σε μία ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου, τότε X_{ol} (σχ. 5.41γ) είναι η συνολική αντίδραση των αντιστοίχων κυκλωμάτων σε Ω. Τότε η ανά μονάδα (p.u.) αντίδραση είναι:

$$X(p.u.) = \frac{X_{ol} I_{ov}}{E_f} \quad (5.3)$$

όπου: I_{ov} το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας και E_f , η ανά φάση τάση διεγέρσεως της γεννήτριας.

Αν είναι γνωστό το ονομαστικό ρεύμα I_{ov} , της γεννήτριας και η ανά μονάδα αντίδραση του ισοδύναμου κυκλώματος της γεννήτριας, τότε το ρεύμα σφάλματος είναι:

$$I_g = \frac{E_f}{X_{ol}} \quad (5.4)$$

Η εξίσωση 5.4 με βάση την εξίσωση 5.3 γίνεται:

$$I_g = \frac{E_f}{X_{(p.u.)} \cdot \frac{E_f}{I_{ov}}} = \frac{E_f}{X_{(p.u.)} \cdot E_f} \cdot I_{ov} = \frac{I_{ov}}{X_{(p.u.)}} \quad (5.5)$$

Οπότε το ρεύμα βραχυκυκλώσεως, I_{sc} , σε ένα σημείο του ηλεκτρικού κυκλώματος (σχ. 5.41β) είναι:

$$I_{sc} = \frac{I_{ov}}{X_{(p.u.)}} + I_L \quad (5.6)$$

όπου I_{ov} το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας και I_L το ρεύμα γραμμής στο σημείο σφάλματος.

β) Συμπεριφορά της σύγχρονης γεννήτριας πλοίου στην περίπτωση του συμμετρικού βραχυκυκλώματος.

Οι γεννήτριες αποτελούν τις κύριες πηγές τροφοδοτήσεως των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως. Όταν σε μια γεννήτρια που λειτουργεί κανονικά, συμβεί ένα βραχυκύκλωμα, το ρεύμα το οποίο παρέχει η γεννήτρια αυξάνεται στιγμιαία σε μια μέγιστη τιμή για να μειωθεί στη συνέχεια στην τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως στη μόνιμη κατάσταση. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην καθυστέρηση προσαρμογής της αντιδράσεως τυμπάνου στη νέα συνθήκη λειτουργίας.

Το φαινόμενο αυτό (σχ. 5.4ιδ) αναλύεται στις ακόλουθες περιόδους:

1) Στην **υπομεταβατική περίοδο**, η οποία διαρκεί 2–3 περιόδους (0,04–0,06 s). Σε αυτήν την περίοδο το ρεύμα μειώνεται απότομα και η γεννήτρια παρουσιάζει μια αντίδραση πολύ μικρή η οποία ονομάζεται **υπομεταβατική αντίδραση**:

$$X'' = \frac{E_f \sqrt{2}}{I_m''} \quad (5.7)$$

2) Στην **μεταβατική περίοδο**, που διαρκεί περισσότερο από 1 s. Σε αυτήν την περίοδο το ρεύμα μειώνεται αργά και η γεννήτρια παρουσιάζει μια εσωτερική αντίδραση, η οποία ονομάζεται **μεταβατική αντίδραση**:

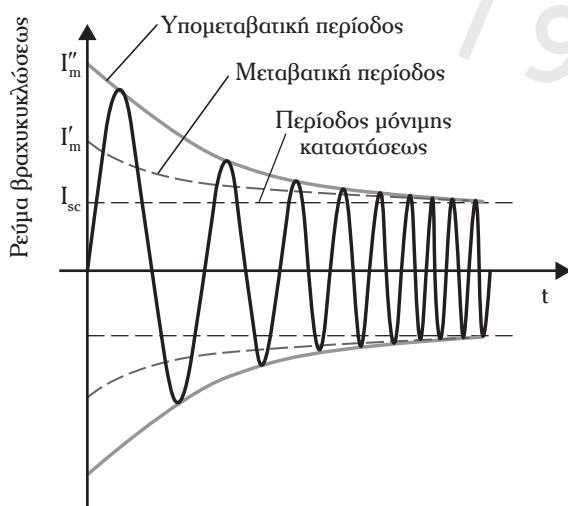
$$X' = \frac{E_f \sqrt{2}}{I_m'} \quad (5.8)$$

3) Στην **περίοδο μόνιμης καταστάσεως**, η οποία είναι απεριόριστη χρονικής διάρκειας. Σε αυτήν την περίοδο το ρεύμα είναι σταθερό και η γεννήτρια παρουσιάζει μια εσωτερική αντίδραση, η οποία ισούται με τη σύγχρονη αντίδραση μηχανής, X_s :

$$X_s = \frac{E_f}{I_{sc}} \quad (5.9)$$

Στο σχήμα 5.4ιδ το I_m'' είναι η μέγιστη τιμή του αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως στην υπομεταβατική περίοδο, το I_m' είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος στη μεταβατική περίοδο και το I_{sc} είναι η τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως στη μόνιμη κατάσταση.

Στον πίνακα 5.4 δίδονται οι ενδεικτικές τιμές των διαφόρων τύπων αντιδράσεων, ανά μονάδα, μίας γεννήτριας στην κατάσταση βραχυκυκλώσεως.



Σχ. 5.4ιδ

Συμμετρικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως γεννήτριας πλοίου.

Πίνακας 5.4
Ενδεικτικές τιμές ανά μονάδα
των αντιδράσεων μιας σύγχρονης γεννήτριας
πλοίων στην κατάσταση βραχυκυκλώσεως.

Αντιδράσεις ανά μονάδα (p.u.)	Ισχύες		
	Μέχρι 500 kVA	Από 500 έως 1.000 kVA	Πάνω από 1.000 kVA
X'' (p.u.)	0,10-0,14	0,12-0,18	0,14-0,18
X' (p.u.)	0,20-0,22	0,20-0,25	0,22-0,30
X_s (p.u.)	1,15-1,30	1,15-1,50	1,20-1,60

Απ' τα μεγέθη του οχήματος προκύπτει ότι το ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι μεταβαλλόμενο. Αρχικά παρουσιάζει μία μέγιστη τιμή, γιατί η σύγχρονη συνθετη αντίσταση της γεννήτριας είναι μικρή (συμπίπτει με την υπομεταβατική αντίδραση) και στην συνέχεια ελαττώνεται γιατί η σύγχρονη αντίδραση αυξάνεται και παίρνει την τιμή που αντιστοιχεί στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Οι αυτόματι διακόπτες δεν ενεργοποιούνται στην υπομεταβατική περίοδο (πολύ μεγάλη η τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως), η οποία διαρκεί χιλιοστά του δευτερολέπτου αλλά, ενεργοποιούνται στην μεταβατική περίοδο, όπου το ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι μειωμένο.

Στη μελέτη των βραχυκυκλωμάτων μιας γεννήτριας πλοίου, εισάγεται ο συντελεστής βραχυκυκλώσεως K_{sc} , ο οποίος ισούται με το αντίστροφο της ανά μονάδα (p.u.) σύγχρονης αντιδράσεως και εκφράζει τελικά, τη συμπεριφορά της γεννήτριας πλοίου στην κατάσταση βραχυκυκλώσεως. Οπότε το ρεύμα I_{sc} , δίδεται ως εξής:

$$I_{sc} = K_{sc} I_{ov} + I_L \quad (5.10)$$

– Λυμένη άσκηση.

Δίδεται τριφασική, 1.000 kVA, 440 V, 60 Hz, σύγχρονη γεννήτρια, της οποίας οι ανά μονάδα (p.u.) αντιδράσεις είναι:

- 1) Υπομεταβατική περίοδος: X'' (p.u.) = 0,14
- 2) Μεταβατική περίοδος: X' (p.u.) = 0,22
- 3) Μόνιμη κατάσταση: X_s (p.u.) = 1,40.

Στους ακροδέκτες της γεννήτριας συμβαίνει

ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα. Να βρεθεί το ρεύμα βραχυκυκλώσεως, στην περίοδο της μόνιμης καταστάσεως.

Λύση.

Το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας όπως είναι γνωστό, δίδεται ως εξής:

$$I_{ov} = \frac{1.000}{440\sqrt{3}} = 1,3 \text{ kA.}$$

Στην υπομεταβατική περίοδο, το ρεύμα βραχυκυκλώσεως παίρνει την τιμή:

$$I''_{sc} = \frac{I_{ov}}{X''(p.u.)} + I_L = 10,58 \text{ kA.}$$

Σ' αυτήν την περίπτωση είναι: $I_L = I_{ov}$.

Στην περίοδο της μόνιμης καταστάσεως, το ρεύμα βραχυκυκλώσεως παίρνει την τιμή:

$$I_{sc} = \frac{I_{ov}}{X_s(p.u.)} + I_{ov} = 2,2 \text{ kA.}$$

Ο συντελεστής βραχυκυκλώσεως K_{sc} είναι:

$$K_{sc} = \frac{1}{X_s(p.u.)} = \frac{1}{1,40} = 0,71.$$

Αξιοσημείωτη παρατήρηση: Στην περίπτωση N_G γεννητριών σε παράλληλη σύνδεση, το ρεύμα βραχυκυκλώσεως στους ζυγούς του κυρίου πίνακα υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{SC} = \frac{N_G I_{ov}}{X} + N_G I_{ov},$$

$$\frac{N_G}{N_G}$$

όπου X η συνολική αντίδραση κάθε γεννήτριας και του δικτύου, το οποίο συνδέει τις γεννήτριες με τον κύριο πίνακα του πλοίου.

Για να περιοριστεί το ρεύμα βραχυκυκλώσεως τοποθετούμε ένα πνίο περιορισμού ρεύματος βραχυκυκλώσεως σε σειρά σε μια γεννήτρια ή σε μια ομάδα γεννητριών, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα.

Οι περιοριστές ρεύματος βραχυκυκλώσεως είναι πνία αέρος. Η αντίδρασή τους υπολογίζεται έτσι, ώστε όταν διαρρέονται απ' το ονομαστικό ρεύμα να παρουσιάζουν αμελητέα πώση τάσεως. Στην περίπτωση όμως του βραχυκυκλώματος η πώση τάσεως είναι μεγάλη. Οι περιοριστές ρεύματος συναντώνται σε εγκαταστάσεις πλοίων με μικρό ονομαστικό ρεύμα και μεγάλο προβλεπόμενο ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

3) Τρίτη Μέθοδος: Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκυκλώσεως μέσω του συντελεστή μ .

Στο σχήμα 5.41ε δίδονται οι συνιστώσες του ρεύματος βραχυκυκλώσεως, που αναπτύσσεται για τριφασικό σφάλμα στους ακροδέκτες γεννήτριας πλοίου.

Όταν εμφανίζεται το τριφασικό βραχυκύκλωμα, το ρεύμα βραχυκυκλώσεως παίρνει μεγάλες τιμές (16–20 φορές το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας). Στη συνέχεια στη μεταβατική περίοδο (διάρκειας 1 s), το ρεύμα βραχυκυκλώσεως παίρνει μη συμμετρική μορφή (μη συμμετρικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως), μειώνεται και ισούται με το άθροισμα της συμμετρικής συνιστώσας και της συνεχούς συνιστώσας (σχ. 5.41ε).

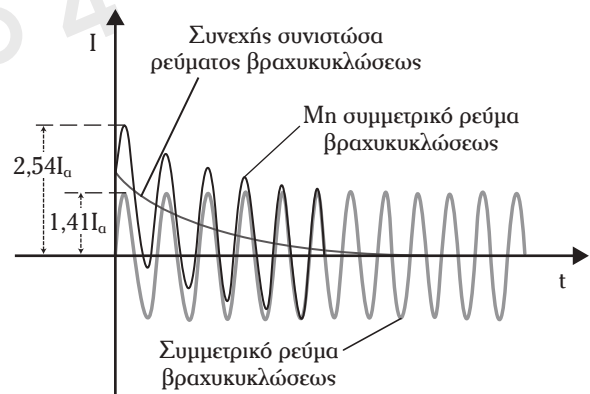
Όταν δεν εμφανίζεται η συνεχής συνιστώσα (περίοδος μόνιμης καταστάσεως λειτουργίας) το ρεύμα βραχυκυκλώσεως μειώνεται και αντιστοιχεί στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Με τη μέθοδο του συντελεστή μ , ο υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως είναι απαραίτητος για να καθοριστεί η ικανότητα διακοπής των διακοπών και η σχεδίαση των διατάξεων μίας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως σε συνάρτηση των θερμικών και ηλεκτροδυναμικών διαταραχών, οι οποίες εμφανίζονται όταν συμβαίνει βραχυκύκλωμα.

Ο υπολογισμός της μέγιστης τιμής του αρχικού συμμετρικού ρεύματος βραχυκυκλώματος (I_{ap}^{sc}) είναι απαραίτητος για να καθοριστούν οι μέγιστες ηλεκτροδυναμικές διαταραχές.

Ο υπολογισμός του (I_{ap}^{sc}) γίνεται ως εξής:

1) Υπολογίζεται η συνολική σύνθετη αντίσταση, κάθε φάσεως, στην οποία συμβαίνει το βραχυκύκλωμα.



Σχ. 5.41ε

Συνιστώσες του ρεύματος βραχυκυκλώσεως και η μεταβολή τους στον χρόνο t , στην περίπτωση τριφασικού σφάλματος στους ακροδέκτες μιας γεννήτριας πλοίου.

2) Η συνολική σύνθετη αντίσταση ισούται με το άθροισμα της σύγχρονης σύνθετης αντιστάσεως (ανά φάση) της γεννήτριας πλοίου του Μ/Σ και των αγωγών του δικτύου.

Στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων, συνήθως η ωμική αντίσταση είναι αμελητέα, οπότε η συνολική σύνθετη αντίσταση συμπίπτει με τη συνολική αντίδραση X .

Σε αυτήν την μέθοδο, για τον υπολογισμό των αντιδράσεων ισχύουν τα ακόλουθα:

1) Η σύγχρονη αντίδραση, X_s των γεννητριών δίδεται ως εξής:

$$X_s = \frac{V_{ov}}{I_{ov}\sqrt{3}} \cdot \frac{V_{sc}}{100} = \frac{V_{sc} \cdot V_{ov}^2}{P_{\phi ov} \cdot 100} \text{ } \Omega/\text{φάση.} \quad (5.11)$$

2) Η αντίδραση, X_T , των Μ/Σ δίδεται ως εξής:

$$X_T = \frac{V_{ov}}{I_{ov}\sqrt{3}} \cdot \frac{V_{\Delta}}{100} = \frac{V_{\Delta} \cdot V_{ov}^2}{P_{\phi ov} \cdot 100} \text{ } \Omega/\text{φάση.} \quad (5.12)$$

3) Η αντίδραση κάθε φάσεως X_L δίδεται ως εξής:

$$X_L = \omega L \quad (5.13)$$

όπου: $P_{\phi ov}$ η φαινομενική ονομαστική ισχύς σε kVA, V_{ov} η ονομαστική τάση των γεννητριών πλοίου, I_{ov} τα ονομαστικά ρεύματα των γεννητριών ή των Μ/Σ, V_{sc} η τάση βραχυκυκλώσεως επί τοις εκατό και V_{Δ} η τάση βραχυκυκλώσεως των Μ/Σ επί τοις εκατό.

Η συνολική αντίδραση είναι:

$$X = X_s + X_T + X_L. \quad (5.14)$$

Η ενεργός τιμή του αρχικού ρεύματος (I_{ap}^{sc}) της συμμετρικής συνιστώσας βραχυκυκλώσεως δίδεται ως εξής:

$$I_{ap}^{sc} = \frac{V_{ov}}{X\sqrt{3}}, \quad (5.15)$$

το οποίο πολλαπλασιαζόμενο με έναν εμπειρικό συντελεστή (1,1), γίνεται:

$$I_{ap}^{sc} = 1,1 \cdot \frac{V_{ov}}{X\sqrt{3}}. \quad (5.16)$$

Όταν υπολογιστεί η ενεργός τιμή του αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως, το πλάτος (μέγιστη τιμή) του υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{ap,max}^{sc} = 1,8 \cdot I_{ap}^{sc} \sqrt{2} \quad (5.17)$$

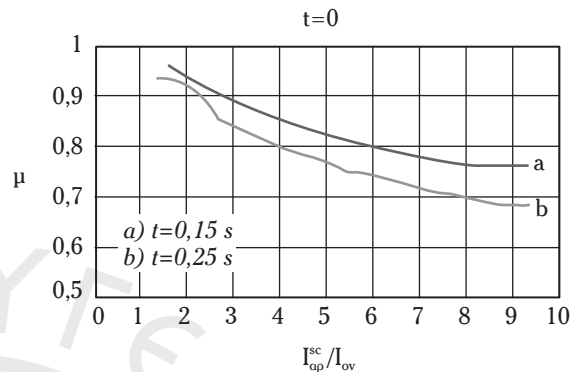
όπου 1,8, είναι ένας εμπειρικός συντελεστής.

Οι διακόπτες διακόπτουν το ρεύμα βραχυκυκλώσεως στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Οπότε αυτό το ρεύμα διακοπής I_r , που καθορίζει την ικανότητα διακοπής των διακοπών δίδεται:

$$I_r = \mu \cdot I_{ap}^{sc}. \quad (5.18)$$

Ο συντελεστής μ υπολογίζεται από το γράφημα του σχήματος 5.4ιστ.



Σχ. 5.4ιστ

Υπολογισμός του συντελεστή μ , όταν είναι γνωστό το I_r .

Τα διαγράμματα α και β είναι για 0,15 s, και 0,25 s αντίστοιχα απομανδαλώσεως διακόπτη.

Όταν είναι γνωστό το ρεύμα διακοπής I_r , τότε καθορίζεται η ισχύς ικανότητας διακοπής ($P_{I\Delta}$) των τριπολικών διακοπών:

$$P_{I\Delta} = \sqrt{3} V I_r. \quad (5.19)$$

- Λυμένη άσκηση.

Δύο σύγχρονες γεννήτριες συνδέονται σε ένα κύριο πίνακα και λειτουργούν παράλληλα. Από τους ζυγούς του κύριου πίνακα αναχωρούν τέσσερις ηλεκτρικές γραμμές (α, β, γ, δ) (σχ. 5.4ιζ). Να υπολογιστεί η ισχύς ικανότητας διακοπής του κάθε διακόπτη της αντίστοιχης γραμμής.

Λύση.

Η σύγχρονη αντίδραση X_s κάθε γεννήτριας είναι:

Γεννήτρια G_1 :

$$\begin{aligned} X_s^{(1)} &= \frac{V_{ov}^2 u_{1sc}}{P_{\phi 1ov} \times 100} = \\ &= \frac{(6,6 \times 10^3)^2 \times 12}{14.000.000 \times 100} = 0,37 \text{ } \Omega/\text{φάση.} \end{aligned}$$

Γεννήτρια G₂:

$$X_s^{(2)} = \frac{V_{ov}^2 u_{2sc}}{P_{\phi 2ov} \times 100} = \frac{(6,6 \times 10^3)^2 \times 12}{16.000.000 \times 100} = 0,32 \Omega/\text{φάση}.$$

Η ισοδύναμη αντίδραση, $X_s^{(ολ)}$, των δύο γεννητριών είναι:

$$X_s^{(ολ)} = \frac{X_s^{(1)} X_s^{(2)}}{X_s^{(1)} + X_s^{(2)}} = \frac{0,37 \times 0,32}{0,37 + 0,32} = 0,17 \Omega/\text{φάση}.$$

Υπολογίζουμε το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{ap}^{sc} για ένα σφάλμα το οποίο συμβαίνει στο σημείο A της γραμμής δ:

$$I_{ap}^{sc} = \frac{1,1 \cdot V_{ov}}{\sqrt{3} \cdot X_s^{(ολ)}} = \frac{1,1 \cdot 6.600}{\sqrt{3} \cdot 0,17} = 24.685 \text{ A}.$$

Η μέγιστη τιμή του αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως είναι:

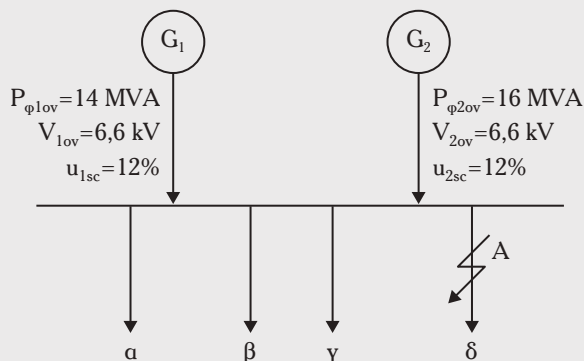
$$I_{ap,max} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{ap}^{sc} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 24.685 = 62.650 \text{ A}.$$

Το ονομαστικό ρεύμα, το οποίο παρέχουν οι δύο παραλληλισμένες γεννήτριες είναι:

$$I_{ov} = \frac{P_{\phi 1ov} + P_{\phi 2ov}}{\sqrt{3} V_{ov}} = 2.627 \text{ A}, \text{ οπότε έχουμε:}$$

$$\frac{I_{ap}^{sc}}{I_{ov}} = \frac{24.685}{2.627} = 9,39 \text{ A}.$$

Αν ο χρόνος απομανδαλώσεως του διακόπτη είναι $t = 0,25$, τότε από την καμπύλη του σχήματος 5.4ιζ ο συντελεστής μ είναι 0,63. Έχουμε :



Σχ. 5.4ιζ

$$I_r = \mu I_{ap}^{sc} = 0,63 \cdot 24.685 = 15.050 \text{ A}.$$

Η αντίστοιχη ισχύς ικανότητας διακοπής του διακόπτη είναι:

$$P_{1\Delta} = I_r \sqrt{3} V_{ov} = 15.050 \cdot 1,73 \cdot 6.600 = 172.000 \text{ kVA}.$$

5.4.1 Ερωτήσεις.

1) Ποια είναι τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος ισχύος μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου;

2) Τι εννοούμε με τον όρο «σφάλμα» σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ισχύος;

3) Ποιος ο ρόλος των ανά μονάδα (p.u.) μεγεθών;

4) Σε τι χρησιμοποιεί το μονογραμμικό διάγραμμα (on line diagram) ενός συστήματος ηλεκτρικής ισχύος;

5) Πόσων ειδών βραχυκυκλώματα μπορούν να συμβούν σε ένα τριφασικό δίκτυο και ποιο είναι το πιο επικίνδυνο για το ηλεκτρικό δίκτυο;

6) Με ποιους τρόπους υπολογίζονται τα ρεύματα βραχυκυκλώσεως σε συστήματα ηλεκτρικής ισχύος μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου;

7) Πώς συμπεριφέρεται μια γεννήτρια πλοίου σε ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα;

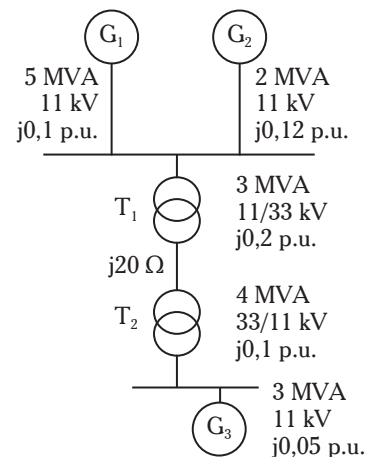
8) Τι είναι οι περιοριστές ρεύματος και πώς λειτουργούν;

9) Σε ποια περίοδο εξέλιξης ενός συμμετρικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως σε μια γεννήτρια πλοίου το ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι μεγάλο και γιατί;

10) Σε ποια περίοδο εξέλιξης ενός συμμετρικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως σε μια γεννήτρια πλοίου ενεργοποιούνται οι αυτόματοι διακόπτες;

5.4.2 Θέματα εργασιών.

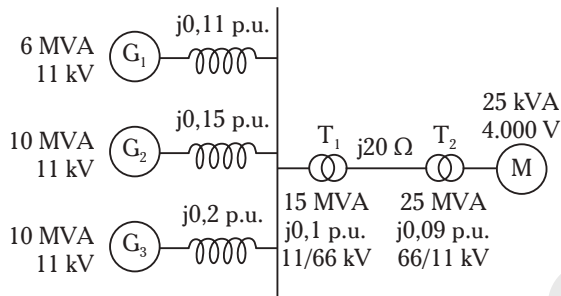
1) Για το ακόλουθο σύστημα ηλεκτρικής ισχύος (σχ. 5.4ιη) να σχεδιάσετε το διάγραμμα αντιδράσε-



Σχ. 5.4ιη

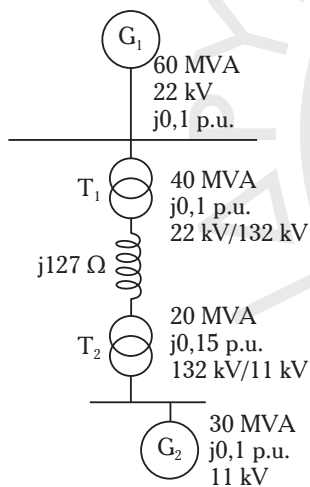
ων εκφράζοντας όλες τις τιμές σε τιμές ανά μονάδα (p.u.).

2) Για το ακόλουθο σύστημα ηλεκτρικής ισχύος (σχ 5.4ιθ) να σχεδιάσετε το διάγραμμα αντιδράσεων εκφράζοντας όλες τις τιμές σε τιμές ανά μονάδα (p.u.).



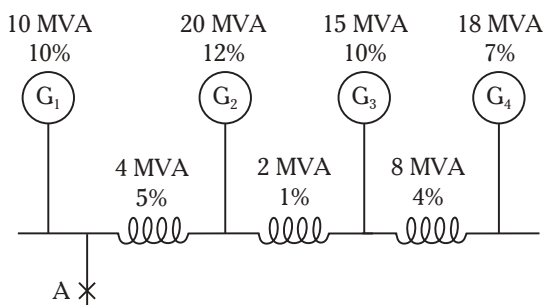
Σχ. 5.4ιθ

3) Για το ακόλουθο σύστημα ηλεκτρικής ισχύος (σχ. 5.4κ) να σχεδιάσετε το διάγραμμα αντιδράσεων εκφράζοντας όλες τις τιμές σε τιμές ανά μονάδα (p.u.).



Σχ. 5.4κ

4) Στο σχήμα 5.4κα δίδεται ένα σύστημα ηλεκτρικής ισχύος. Στο σημείο A συμβαίνει ένα βραχυκύκλωμα. Να υπολογίσετε το ρεύμα βραχυκυκλώσεως και την ισχύ βραχυκυκλώσεως σε MVA. Οι αντιδράσεις είναι όλες επί τοις εκατό.



Σχ. 5.4κα

σεως και την ισχύ βραχυκυκλώσεως σε MVA. Οι αντιδράσεις είναι όλες επί τοις εκατό.

5.5 Μέτρα προστασίας για βραχυκυκλώματα.

5.5.1 Εισαγωγή – Ορολογία.

Τα μέτρα προστασίας για τα βραχυκυκλώματα είναι εκείνα που εξασφαλίζουν τη διακοπή των ηλεκτρικών κυκλωμάτων όταν εντοπίζουν τα ρεύματα βραχυκυκλώσεως.

Οι αυτόματοι διακόπτες και οι ασφάλειες είναι τα κύρια στοιχεία των μέτρων προστασίας για τα βραχυκυκλώματα. Οι αυτόματοι διακόπτες συνδυάζονται αποτελεσματικά με θερμικά στοιχεία και ηλεκτρονόμους (HN).

Η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Commission – IEC) έχει εκδώσει τους κανονισμούς IEC 61363 για βραχυκυκλώματα σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων.

Σε τεχνικά κείμενα, κανονισμούς, πρότυπα και προδιαγραφές δίδονται οι ακόλουθοι ορισμοί των διαφόρων τεχνικών όρων:

1) **Ονομαστικές τιμές**, χαρακτηρίζονται οι τιμές που έχουν σχέση με τα αναγραφόμενα τεχνικά χαρακτηριστικά στην πινακίδα του κατασκευαστή των διατάξεων και των συσκευών.

2) **Ονομαστική τάση**, δηλαδή η μεγαλύτερη δυνατή τάση λειτουργίας μίας συσκευής, μιας διατάξεως ή ενός δικτύου, την οποία δίδει ο κατασκευαστής.

3) **Ονομαστική ικανότητα (kVA)**, ονομάζεται η ισχύς με βάση την οποία έχει κατασκευαστεί μια διάταξη ή μία συσκευή.

4) **Ονομαστικό ρεύμα**, χαρακτηρίζεται το μεγαλύτερο, δυνατό ρεύμα που ρέει σε μια διάταξη ή συσκευή στην κανονική τους λειτουργία.

5) **Επιτρεπόμενη φόρτιση ενός αγωγού**, δηλαδή το μεγαλύτερο ρεύμα σε Ampere (A), το οποίο διαρρέει αυτόν τον αγωγό, με δεδομένες συνθήκες περιβάλλοντος, χωρίς η θερμοκρασία του να ξεπερνά μια καθορισμένη τιμή για την οποία προκαλείται βλάβη στον αγωγό ή στην μόνωσή του.

6) **Υπερένταση**, που αναφέρεται στο ρεύμα εκείνο του οποίου η τιμή υπερβαίνει το 200%, τουλάχιστον, της αντίστοιχης ονομαστικής του τιμής.

7) **Υπερφόρτιση**, που αναφέρεται στο ρεύμα εκείνο του οποίου η τιμή υπερβαίνει το 20% της αντίστοιχης ονομαστικής του τιμής. Είναι η κατάσταση η οποία διαμορφώνεται σε ένα κύκλωμα όταν σ' αυτό κυκλοφορούν ρεύματα μεγαλύτερα από εκείνα τα οποία προβλέπονται.

5.5.2 Διακόπτες.

Οι διακόπτες έχουν την δυνατότητα να συνδέουν και να αποσυνδέουν τμήμα ή τμήματα ενός ηλεκτρικού δικτύου όταν δέχονται μια μηχανική ή μια ηλεκτρική εντολή. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στους **διακόπτες κυκλωμάτων ενέργειας** και στους **διακόπτες βοηθητικών κυκλωμάτων**.

1) Οι **διακόπτες κυκλωμάτων ενέργειας** συνίστανται στους:

α) **Αποζεύκτες**, οι οποίοι ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν κυκλώματα χωρίς φορτίο (σχ. 5.5α).



Σχ. 5.5α
Οικογένεια αποζευκτών.

β) **Διακόπτες ισχύος** (ή **αυτόματοι διακόπτες**), οι οποίοι ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν κυκλώματα σε συνθήκες σφαλμάτων (βραχυκυκλώματα) (σχ. 5.5β).

γ) **Διακόπτες φορτίου**, οι οποίοι ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν κυκλώματα με μηχανική ή ηλεκτρική εντολή σε συνθήκες λειτουργίας με ονομαστικά φορτία (σχ. 5.5γ).

δ) **Διακόπτες εκκινητές κινητήρων**, οι οποίοι είναι διακόπτες φορτίου κατασκευασμένοι να λειτουργούν σε ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας των κινητήρων (εκκίνηση, αλλαγή φοράς περιστροφής), όπου το ρεύμα είναι πολλαπλάσιο από το ονομαστικό (σχ. 5.5δ).

2) **Διακόπτες βοηθητικών κυκλωμάτων** οι οποίοι διαθέτουν πολλά ζευγάρια επαφών (ενεργοποιούνται ή απενεργοποιούνται με μηχανική ή ηλεκτρική εντολή) και χρησιμοποιούνται κυρίως σε αυτοματισμούς (σχ. 5.5ε).



Σχ. 5.5β
Διακόπτης ισχύος.



Σχ. 5.5γ
Διακόπτες φορτίου.



Σχ. 5.5δ
Διακόπτες ομαλής εκκινήσεως κινητήρων.



Σχ. 5.5ε
Διακόπτης βοηθητικών κυκλωμάτων.

Οι διακόπτες που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων, τόσο σαν διατάξεις προστασίας των ηλεκτρικών δικτύων όσο και σαν όργανα χειρισμού των ηλεκτρικών συνδέσεων είναι οι διακόπτες ισχύος ή αυτόματοι διακόπτες.

Οι διακόπτες ισχύος συνήθως αποτελούνται από:

1) Τον θάλαμο σβέσεως του ηλεκτρικού τόξου (σχ. 5.5στ).

2) Το θερμικό στοιχείο/φάση για τη προστασία από υπερφορτίσεις (σχ. 5.5ζ).

3) Το ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο για προστασία από βραχυκυκλώματα (σχ. 5.5η) και

4) το σύστημα προστασίας από έλλειψη τάσεως και τις βοηθητικές επαφές.

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των διακοπών είναι τα ακόλουθα:

1) Η **ονομαστική τάση**, δηλαδή η μεγαλύτερη τάση λειτουργίας των διακοπών.

2) Το **ονομαστικό ρεύμα**, δηλαδή το μεγαλύτερο ρεύμα το οποίο περνάει από τις επαφές του διακόπτη χωρίς να προκαλεί την βλάβη τους.

3) Η **ικανότητα διακοπής**, δηλαδή η μεγαλύτερη τιμή ρεύματος το οποίο διακόπτει ο διακόπτης και

4) ο **ολικός χρόνος λειτουργίας**, δηλαδή το άθροισμα των ακολούθων χρόνων:

α) **Χρόνος αποκολλήσεως επαφών** ονομάζεται ο χρόνος, που μεσολαβεί από την στιγμή απελευθερώσεως του μηχανισμού αποκολλήσεως των επαφών, μέχρι την στιγμή την οποία παύουν να εφάπτονται οι επαφές μεταξύ τους.

β) **Χρόνος χειρισμών** ονομάζεται ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της στιγμής ενεργοποίησης του διακόπτη π.χ. πίεση κομβίου χειρισμού κ.λπ., και της στιγμής απελευθερώσεως του μηχανισμού αποκολλήσεως των επαφών.

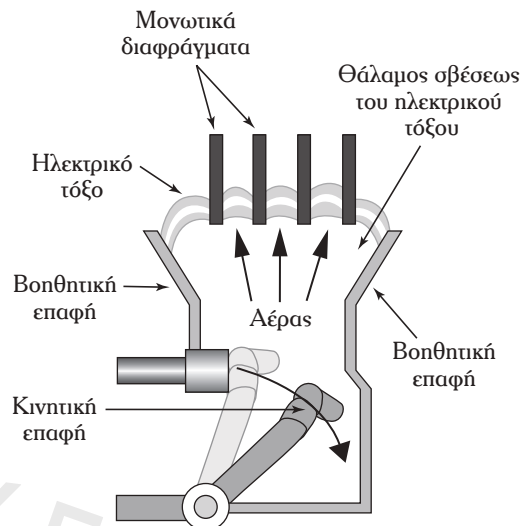
γ) **Χρόνος αποκοπής** είναι ο χρόνος διακοπής του κυκλώματος. Είναι το χρονικό διάστημα από την στιγμή, κατά την οποία οι επαφές αρχίζουν να αποχωρίζονται μέχρι να φτάσουν στο τέλος της διαδρομής τους.

Συνήθως οι διακόπτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων είναι χαμηλής τάσεως και μεγάλης τιμής εντάσεως του ηλεκτρικού ρεύματος.

Οι διακόπτες ισχύος προστατεύουν το ηλεκτρικό δίκτυο από υπερθέρμανση λόγω υπερφορτίσεων και υπερεντάσεων.

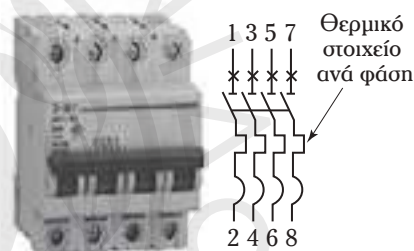
5.5.3 Ηλεκτρονόμοι (HN).

Ο **ηλεκτρονόμος** (ρελέ) είναι μια ηλεκτρομηχα-



Σχ. 5.5στ

Θάλαμος σβέσεως του ηλεκτρικού τόξου.



Σχ. 5.5ζ

Διακόπτης ισχύος με θερμικό στοιχείο.



Σχ. 5.5η

Ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο για προστασία από βραχυκυκλώματα.

νική διάταξη που προκαλεί το άνοιγμα ή το κλείσιμο των επαφών του όταν το πηνίο του διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

Οι HN, ανάλογα με την τεχνολογία του κατασκευαστή, διακρίνονται σε **ηλεκτρομαγνητικούς**, **ψηφιακούς**, και **ηλεκτρονικούς**.

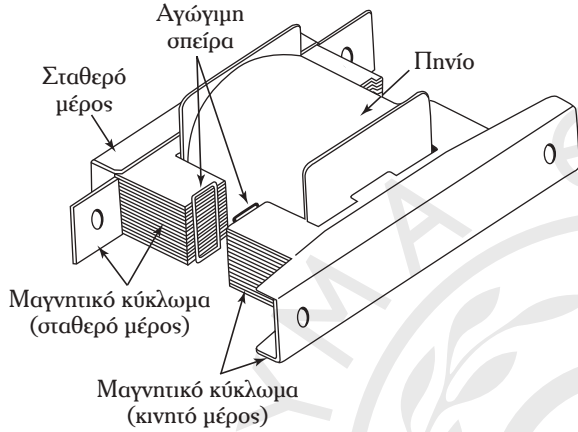
1) Ηλεκτρομαγνητικοί πλεκτρονόμοι.

α) Δομή ηλεκτρομαγνητικών πλεκτρονόμων.

Η **δομή** ενός ηλεκτρομαγνητικού ΗΝ δίδεται στο σχήμα 5.50.

Γενικά, τη γεωμετρία ενός ΗΝ αποτελούν το **μαγνητικό κύκλωμα**, το **πννίο**, και οι **επαφές**.

Στο σχήμα 5.50, το σιδηρομαγνητικό υλικό είναι ελασματοποιημένο για την ελαχιστοποίηση των δινορρευμάτων.



Σχ. 5.50

Δομή ενός ηλεκτρομαγνητικού πλεκτρονόμου.

Κατά την λειτουργία του ΗΝ, ιδιαίτερη σημασία έχει η χρονική στιγμή κατά την οποία το ΕΡ μηδενίζεται. Στο σημείο αυτό, το κινητό μέρος τείνει να απομακρυνθεί, με αποτέλεσμα οι επαφές του να «τρεμοπαίζουν».

Για να μην συμβαίνει αυτό, τοποθετείται στο μαγνητικό κύκλωμα του ΗΝ μια αγωγίμη σπείρα, στην οποία ρέει το ρεύμα με φασική απόκλιση ως προς το ρεύμα του πννίου, με αποτέλεσμα το κινητό μέρος να μην απομακρύνεται όταν το ρεύμα στιγμιαία μηδενίζεται.

Όταν το πννίο διαρρέεται από ΕΡ, η σύνθετη αντίσταση του πννίου είναι:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \tag{5.20}$$

Ισχύει: $X_L = 2\pi fL$ (5.21)

όπου R (εξ. 5.19) και L είναι, αντίστοιχα, η ωμική αντίσταση και η αυτεπαγωγή του πννίου. Η τιμή της αυτεπαγωγής είναι διαφορετική, ανάλογα με το αν ο ΗΝ είναι σε κατάσταση ηρεμίας ή λειτουργίας.

Η αυτεπαγωγή του πννίου ορίζεται απ' την εξίσωση:

$$L = \frac{N^2}{R_m} \tag{5.22}$$

όπου: N είναι ο αριθμός σπειρών του πννίου και R_m η μαγνητική αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος. Όταν ο ΗΝ είναι σε κατάσταση ηρεμίας ο διάκενος χώρος στο μαγνητικό κύκλωμα είναι μεγάλος, οπότε η μαγνητική αντίσταση είναι μεγάλη και η αυτεπαγωγή πολύ μικρή.

Στο πννίο του ΗΝ αντιστοιχούν δυο ρεύματα:

Το ρεύμα έλξεως: $I_a = \frac{V}{Z_1}$ (5.23)

και το ρεύμα συγκρατήσεως: $I_n = \frac{V}{Z_2}$ (5.24)

όπου: Z_1 και Z_2 είναι οι σύνθετες αντιστάσεις του πννίου στην κατάσταση ηρεμίας και στην κατάσταση λειτουργίας αντίστοιχα.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το ηλεκτρικό κύκλωμα του ΗΝ είναι επαγωγικό και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις, εκτός από την πραγματική ισχύ, έχουμε και την φαινομένη ισχύ, που εκφράζεται απ' το γινόμενο $V I_a$ κατά την έλξη και $V I_n$ κατά την συγκράτηση.

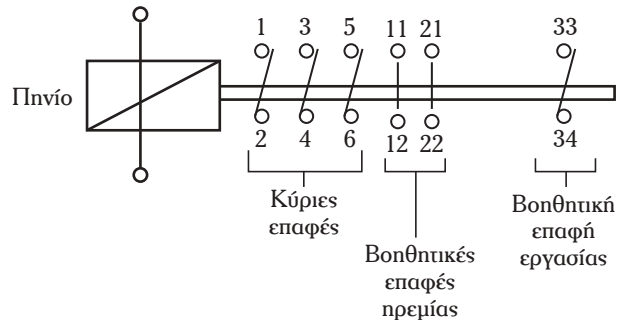
Αυτή η ισχύς εκφράζεται σε VA, ενώ διαφέρει από ΗΝ σε ΗΝ ανάλογα με τη γεωμετρία του. Ο συντελεστής ισχύος των ΗΝ είναι της τάξεως του 0,2-0,3 επαγ..

β) Επαφές του ηλεκτρομαγνητικού ΗΝ.

Ένας ΗΝ, εκτός από τις κύριες επαφές, μπορεί να έχει ένα πλήθος βοηθητικών επαφών (σχ. 5.51).

Ανάλογα με την ηλεκτρική λειτουργία των βοηθητικών επαφών διακρίνομε:

α) **Βοηθητικές επαφές ηρεμίας**, που συμβολίζονται με NC (Normally Closed). Είναι κλειστές όταν ο ΗΝ βρίσκεται στην κατάσταση ηρεμίας, ενώ ανοίγουν όταν ο ΗΝ διεγείρεται.



Σχ. 5.51

Ηλεκτρονόμος με τρεις κύριες επαφές, δύο βοηθητικές επαφές ηρεμίας και μια βοηθητική επαφή εργασίας.

β) **Βοηθητικές επαφές εργασιών**, που συμβολίζονται με NO (Normally Open). Είναι ανοιχτές όταν ο ΗΝ βρίσκεται στην κατάσταση ηρεμίας και κλειστές όταν ο ΗΝ διεγείρεται.

Οι βοηθητικές επαφές κατασκευάζονται για λίγα αμπέρ (2–6) και χρησιμοποιούνται για να ενεργοποιούν ή να απενεργοποιούν πλήθος βοηθητικών κυκλωμάτων.

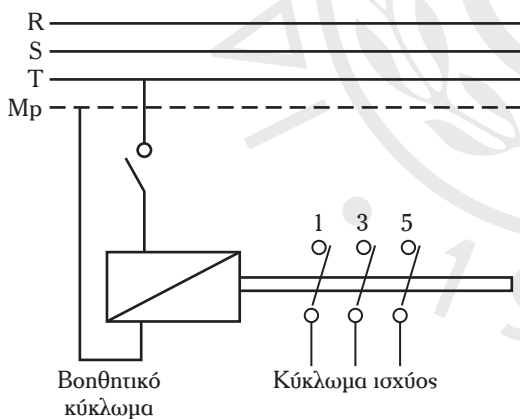
γ) Ηλεκτρικό κύκλωμα των ηλεκτρομαγνητικών ΗΝ.

Το ηλεκτρικό κύκλωμα ενός ΗΝ αποτελείται από δυο μέρη (σχ. 5.51α).

α) Το **βοηθητικό κύκλωμα** ή **κύκλωμα αυτοματισμών**, που είναι το κύκλωμα το οποίο τροφοδοτεί το πηνίο. Το βοηθητικό κύκλωμα είναι ηλεκτρικά ανεξάρτητο από το κύκλωμα ισχύος. Στο βοηθητικό κύκλωμα συνδέονται οι επαφές των οργάνων έλεγχου και χειρισμών.

β) Το **κύκλωμα ισχύος**, που είναι το κύκλωμα των κυρίων επαφών, στις οποίες συνδέονται τα φορτία. Υπάρχουν τρεις κύριες επαφές και η τάση λειτουργίας του κυκλώματος ισχύος είναι συνήθως 380 V.

Το πηνίο του ΗΝ κατασκευάζεται για τάσεις: 380 V, 220 V, 110 V, 42 V, 24 V, και 12 V. Η τάση αυτή μπορεί να είναι συνεχής ή εναλλασσόμενη.



Σχ. 5.51α

Ηλεκτρικό κύκλωμα ηλεκτρονόμου.

δ) Εφαρμογές των ηλεκτρομαγνητικών ΗΝ.

Οι ΗΝ διακρίνονται ανάλογα με το μέγεθός τους σε ΗΝ ισχύος και σε βοηθητικούς ΗΝ (< 1 kW).

Ανάλογα με το φορτίο διακρίνονται σε ΗΝ κινητήρων, Μ/Σ συγκολλήσεως, αντιστάσεων, πυκνωτών και γενικών φορτίων.

Οι ΗΝ Χ.Τ. βρίσκονται στο εμπόριο σε τυποποιημένα μεγέθη μέχρι και 325 kW.

Οι ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούνται σε:

α) **Τηλεχειρισμούς**, μέσω των οποίων πραγματοποιούνται χειρισμοί διατάξεων, κινητήρων κ.λπ., από μακρινή απόσταση.

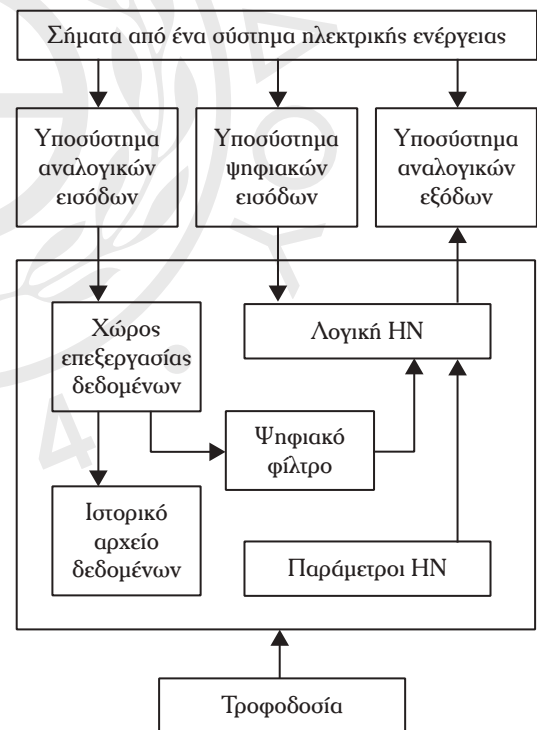
β) **Αυτοματισμούς**, για τους οποίους αποτελούν το βασικό στοιχείο υλοποίησης των αυτοματισμών.

γ) Δυσμενή φορτία: Λόγω της μεγάλης ταχύτητας συνδέσεως και αποσυνδέσεως οι ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούνται για την σύνδεση με δυσμενή φορτία, π.χ. πυκνωτών.

2) Ψηφιακοί ΗΝ.

Οι ψηφιακοί ή αριθμητικοί ΗΝ είναι η τελευταία εξέλιξη στην τεχνική των ΗΝ. Έχουν μεγάλες δυνατότητες όσον αφορά στην ακρίβεια και στην αξιοπιστία λειτουργίας τους. Επίσης, συνδυάζονται, με μεγάλη επιτυχία και με άλλες μονάδες ελέγχου.

Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στη δειγματοληψία αναλογικών σημάτων και, στη συνέχεια, στην ψηφιακή τους επεξεργασία. Τα κύρια στοιχεία ενός ψηφιακού ΗΝ δίδονται στο σχήμα 5.51β.



Σχ. 5.51β

Κύρια στοιχεία ενός ψηφιακού ηλεκτρονόμου.

3) Ηλεκτρονικοί ηλεκτρονόμοι.

Οι βασικές λειτουργίες των ΗΝ, οι οποίες υλοποιούνται με τους ηλεκτρομαγνητικούς επιτυχάνο-

νται με τη χρήση των ηλεκτρονικών ΗΝ. Η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρονικών ΗΝ στηρίζεται στην επεξεργασία αναλογικών σημάτων με ηλεκτρονικά κυκλώματα. Οι ηλεκτρονικοί ΗΝ έχουν τα ακόλουθα **πλεονεκτήματα** έναντι των ηλεκτρομαγνητικών:

- α) Πολύ μικρότερη κατανάλωση ισχύος.
- β) Μεγαλύτερη ταχύτητα λειτουργίας και ακρίβεια.
- γ) Δεν απαιτούν συντήρηση.

Οι ηλεκτρονικοί ΗΝ χρησιμοποιούν θυρίστορς (SCR) ή TRIAC για τον έλεγχο φορτίων στο ΕΡ και διπολικά τρανζίστορ ή MOSFET για τον έλεγχο φορτίων στο ΣΡ.

Μία απ' τις πιο σημαντικές εφαρμογές των ηλεκτρομαγνητικών ΗΝ, που συναντάμε, συνήθως, στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις εμπορικών πλοίων είναι ο **αυτόματος διακόπτης αστέρα-τρίγωνο** (Y-Δ), ο οποίος χρησιμοποιείται για την εκκίνηση ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα.

Το ρεύμα εκκίνησης αυτών των κινητήρων είναι από 4 έως και 8 φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα κανονικής λειτουργίας τους. Η απευθείας εκκίνησή τους σε συνδεσμολογία φάσεων τους σε τρίγωνο, που είναι η συνδεσμολογία λειτουργίας τους, δημιουργεί προβλήματα στο ηλεκτρικό δίκτυο (πτώση τάσεως). Για να περιοριστεί το ρεύμα εκκίνησης αυτών των κινητήρων χρησιμοποιείται ο **αυτόματος διακόπτης αστέρα-τρίγωνο** (Y-Δ). Χρησιμοποιείται, συνήθως, σε κινητήρες ισχύος πάνω από τρεις ίππους (περίπου 2 kW). Στο σχήμα 5.51γ(α) δίδεται το πολυγραμμικό σχέδιο (λεπτομερής απεικόνιση της συνδεσμολογίας) και στο σχήμα 5.51γ(β), το λειτουργικό σχέδιο (ηλεκτρικό κύκλωμα ροής ρεύματος) ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα, που εκκινείται με αυτόματο διακόπτη αστέρα-τρίγωνο (Y-Δ).

Ο αυτόματος διακόπτης Y-Δ αποτελείται (σχ. 5.51γ):

- 1) Από έναν τριπολικό ασφαλοδιακόπτη [τριπολικός διακόπτης φορτίου ϕ_1 , τρεις ασφάλειες τήξεως (F_1) κατηγορίας aM και μία ασφάλεια τήξεως gL (F_2) για την προστασία του κινητήρα από βραχυκυκλώματα] (περισσότερα για τις ασφάλειες βλ. παράγρ. 5.5.5).

- 2) Από τρεις ΗΝ ισχύος (K1M, K2M, K3M).

- 3) Από ένα θερμικό F_3 .

- 4) Από ένα χρονικό (K1T) με καθυστέρηση στην ενεργοποίηση της επαφής (delay on).

- 5) Από ένα κομβίο (μπουτόν) START (για την

εκκίνηση του κινητήρα) και ένα κομβίο STOP (για την απενεργοποίησή του).

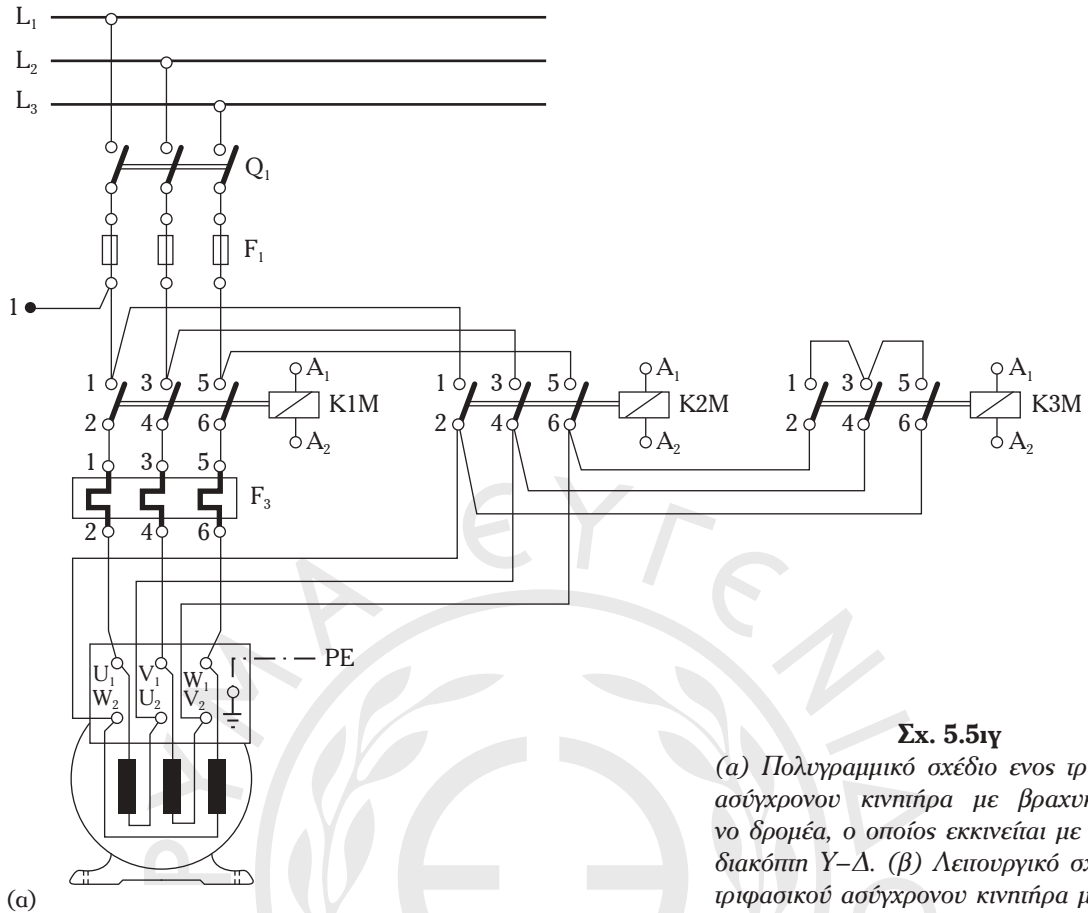
Στην περίπτωση κατά την οποία απαιτείται οπτική ένδειξη στον ηλεκτρικό πίνακα του αυτόματου διακόπτη, προκειμένου να πληροφορούμαστε για την κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα, ο αυτόματος διακόπτης Y-Δ περιλαμβάνει δύο ενδεικτικές λυχνίες. Η μία ενδεικτική λυχνία (h_1) ανάβει όταν ο κινητήρας λειτουργεί. Η άλλη ενδεικτική λυχνία (h_2) ανάβει όταν διακοπεί η λειτουργία του κινητήρα με ενεργοποίηση του θερμικού F_3 .

α) Συνδεσμολογία και λειτουργία του αυτόματου διακόπτη Y-Δ.

Ένας αυτόματος διακόπτης Y-Δ [σχ. 5.51γ(α)] αποτελείται από έναν τριπολικό διακόπτη φορτίου (Q_1), από τρεις ασφάλειες τήξεως (F_1) και από τα θερμικά στοιχεία (F_3) τα οποία χρησιμεύουν για να προστατεύουν τον κινητήρα από υπερφόρτιση ή διακοπή μιας φάσεως. Επίσης, αποτελείται από τρεις ΗΝ ισχύος (K1M, K2M, K3M) και ένα χρονικό (K1T) [σχ. 5.51γ(β)], το οποίο χρησιμεύει για να αποκόψει την τροφοδότηση του ΗΝ K3M, με αποτέλεσμα μέσω του συνδυασμού της συνδεσμολογίας να οπλίσει τον ΗΝ K2M. Αυτή η μετάζευξη γίνεται μετά από ορισμένο χρόνο που ρυθμίζουμε πάνω στον ρυθμιστή του χρονικού. Τα κομβία START (S_1) και STOP (S_2) [σχ. 5.51γ(β)], χρησιμεύουν για το ξεκίνημα και το σταμάτημα, αντίστοιχα, του κινητήρα. Όταν θέλουμε να έχουμε οπτική ένδειξη στον ηλεκτρικό πίνακα του αυτόματου διακόπτη για την κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα, ο αυτόματος διακόπτης Y-Δ περιλαμβάνει δύο ενδεικτικές λυχνίες. Η ενδεικτική λυχνία h_1 [σχ. 5.51γ(β)], ανάβει όταν λειτουργεί ο κινητήρας. Η ενδεικτική λυχνία h_2 [σχ. 5.51γ(β)], ανάβει όταν διακοπεί η λειτουργία του κινητήρα.

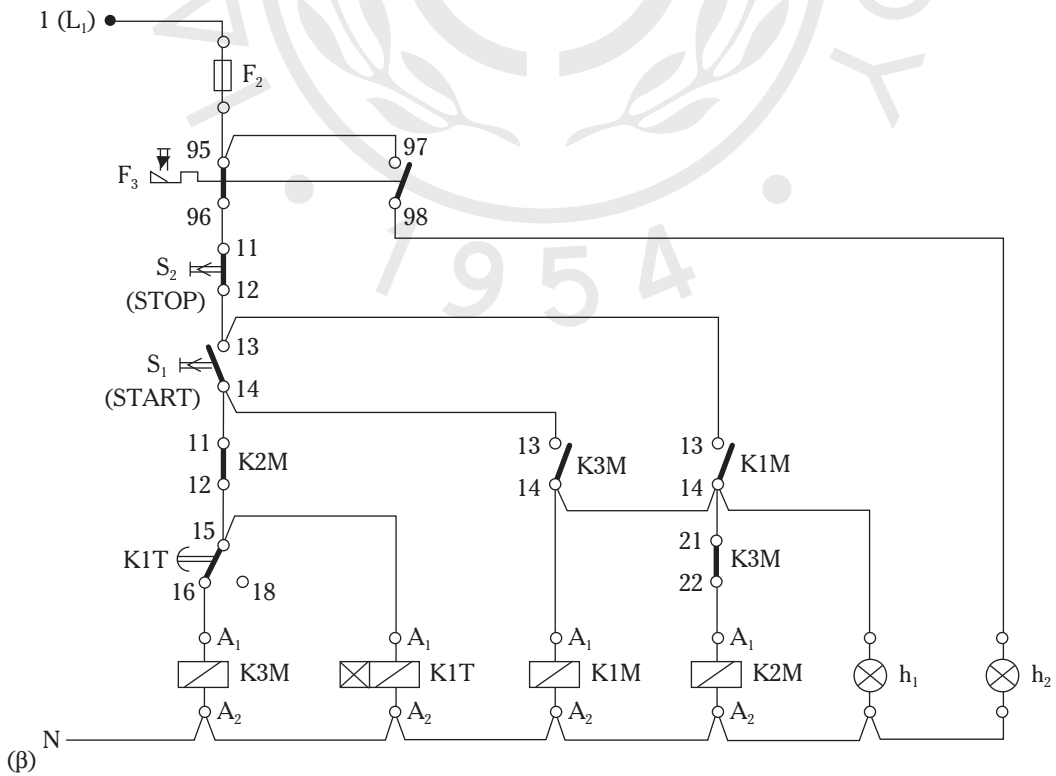
β) Συνδεσμολογία και επεξήγηση της λειτουργίας του αυτόματου διακόπτη Y-Δ.

Στο κύκλωμα ισχύος του σχήματος 5.51γ(α) οι τρεις φάσεις L_1 , L_2 και L_3 του δικτύου συνδέονται στον διακόπτη φορτίου Q_1 , στη συνέχεια στις ασφάλειες τήξεως F_1 και καταλήγουν στις κύριες επαφές των ΗΝ K1M και K2M. Ο ΗΝ K1M συνδέει τους ακροδέκτες U_1 , V_1 και W_1 των τυλιγμάτων του κινητήρα, μέσω του θερμικού F_3 , με τις τρεις φάσεις του δικτύου L_1 , L_2 και L_3 . Ο ΗΝ K2M ονομάζεται **ΗΝ τριγώνου** και συνδέει τους ακροδέκτες W_2 , U_2 και V_2 των τυλιγμάτων του κινητήρα με τις τρεις φάσεις του δικτύου L_1 , L_2 και L_3 . Ο ΗΝ K3M ονομάζεται



Σχ. 5.51γ

(α) Πολυγραμμικό σχέδιο ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα, ο οποίος εκκινείται με αυτόματη διακόπτη Υ-Δ. (β) Λειτουργικό σχέδιο του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με βραχυκλωμένο δρομέα.



HN αστέρα και γεφυρώνει τα άκρα U_2 , V_2 και W_2 των τυλιγμάτων του κινητήρα συνδέοντας τα τυλίγματα σε αστέρα.

Κατά την εκκίνηση του κινητήρα, ο HN K3M είναι ο πρώτος που ενεργοποιείται συνδέοντας τα τυλίγματα του κινητήρα σε αστέρα. Παραμένει ενεργοποιημένος μόνο στη διάρκεια συνδέσεως των τυλιγμάτων του κινητήρα σε αστέρα.

Ο HN K1M είναι αυτός που ενεργοποιείται στη συνέχεια και μέσω του θερμικού F_3 , στο κύκλωμα ισχύος συνδέει τους ακροδέκτες U_1 , V_1 και W_1 των τυλιγμάτων του κινητήρα με τις φάσεις L_1 , L_2 και L_3 του δικτύου. Οπότε ο κινητήρας ξεκινά σε συνδεσμολογία σε αστέρα. Ο HN K1M παραμένει ενεργοποιημένος μέχρι να σταματήσει η λειτουργία του κινητήρα.

Όταν ο κινητήρας αναπτύξει τον ονομαστικό αριθμό στροφών απενεργοποιείται ο HN K3M, οπότε παύει να υπάρχει το γεφύρωμα των άκρων U_2 , V_2 και W_2 των τυλιγμάτων του κινητήρα. Στη συνέχεια ενεργοποιείται ο HN K2M. Τότε, τα άκρα W_2 , U_2 και V_2 των τυλιγμάτων του κινητήρα τροφοδοτούνται, αντίστοιχα, με τις φάσεις L_1 , L_2 και L_3 του δικτύου. Στην κατάσταση αυτή, οι ακροδέκτες U_1 , W_2 των τυλιγμάτων του κινητήρα τροφοδοτούνται από την φάση L_1 του δικτύου μέσω των HN K1M και K2M και του θερμικού F_3 . Οι ακροδέκτες U_1 και W_2 τώρα είναι γεφυρωμένοι. Οι ακροδέκτες V_1 , U_2 των τυλιγμάτων του κινητήρα τροφοδοτούνται από την φάση L_2 του δικτύου μέσω των HN K1M και K2M και του θερμικού F_3 , οπότε γεφυρώνονται. Οι ακροδέκτες W_1 , V_2 των τυλιγμάτων του κινητήρα τροφοδοτούνται από την φάση L_3 του δικτύου μέσω των HN K1M και K2M και του θερμικού F_3 , οπότε και αυτοί είναι γεφυρωμένοι. Τα τυλίγματα του κινητήρα τώρα, είναι συνδεδεμένα σε τρίγωνο.

Οι HN K2M και K3M δεν πρέπει να ενεργοποιούνται ταυτόχρονα, γιατί προκαλείται βραχυκύκλωμα μεταξύ των τριών φάσεων του δικτύου στη θέση των ακροδεκτών 1, 3, 5 του HN K3M. Οπότε πρέπει να υπάρχει ηλεκτρική μανδάλωση των HN K2M και K3M στο κύκλωμα (βοηθητικό κύκλωμα) του αυτόματου διακόπτη Υ-Δ. Η ηλεκτρική μανδάλωση επιτυγχάνεται με την τροφοδότηση του πηνίου του ενός HN μέσω βοηθητικής επαφής ηρεμίας του άλλου HN.

γ) **Εξήγηση του λειτουργικού κυκλώματος της συνδεσμολογίας του κινητήρα (σχ. 5.51γ).**

Για να ξεκινήσει ο κινητήρας¹, κλείνομε τον διακόπτη Q_1 και πιέζομε το κομβίο S_1 (START). Οπότε, ενεργοποιείται ο HN K3M γιατί το πηνίο του HN K3M τροφοδοτείται από το κλειστό κύκλωμα:

Φάση $L_1 \rightarrow$ διακόπτης φορτίου $Q_1 \rightarrow$ ασφάλεια τήξεως $F_1 \rightarrow F_2 \rightarrow$ επαφή 95–96 του θερμικού $F_3 \rightarrow$ κομβίο STOP \rightarrow κομβίο START \rightarrow επαφή 11–12 του HN K2M (κλειστή γιατί ο HN K2M είναι σε ηρεμία) \rightarrow επαφή 15–16 του χρονικού K1T (κλειστή γιατί το χρονικό είναι σε ηρεμία) \rightarrow πηνίο του HN K3M \rightarrow ουδέτερος N.

Συγχρόνως τροφοδοτείται το κύκλωμα λειτουργίας A_1-A_2 του χρονικού K1T και αρχίζει η μέτρηση του χρόνου. Όταν ενεργοποιείται ο HN K3M, στο κύκλωμα ισχύος γεφυρώνονται τα άκρα U_2 , V_2 και W_2 των ακροδεκτών του κινητήρα, ο οποίος τώρα λειτουργεί σε σύνδεση σε αστέρα. Επίσης στο βοηθητικό κύκλωμα ανοίγει η επαφή 21–22 του HN K3M και κλείνει η επαφή του 13–14. Όταν ανοίγει η επαφή 21–22 του HN K3M αποκλείεται η ενεργοποίηση του HN του τριγώνου K2M όσο χρόνο είναι ενεργοποιημένος ο HN K3M (επαφή ηλεκτρικής μανδάλωσης του HN K2M). Όταν κλείνει η επαφή 13–14 του HN K3M ενεργοποιείται ο HN K1M, γιατί το πηνίο του τροφοδοτείται από το κλειστό κύκλωμα:

$L_1 \rightarrow Q_1 \rightarrow F_1 \rightarrow F_2 \rightarrow$ επαφή 95–96 του θερμικού $F_3 \rightarrow$ STOP \rightarrow START \rightarrow επαφή 13–14 του HN K3M (κλειστή) \rightarrow πηνίο του HN K1M \rightarrow ουδέτερος N.

Όταν ενεργοποιείται ο HN K1M, στο βοηθητικό κύκλωμα κλείνει η επαφή του 13–14. Ο κινητήρας τώρα ξεκινά σε συνδεσμολογία σε αστέρα.

Όταν αφήσομε το κομβίο START ο HN K1M παραμένει ενεργοποιημένος, γιατί το πηνίο του εξακολουθεί να τροφοδοτείται από το κλειστό κύκλωμα:

$L_1 \rightarrow Q_1 \rightarrow F_1 \rightarrow F_2 \rightarrow$ επαφή 95–96 του θερμικού $F_3 \rightarrow$ STOP \rightarrow επαφή 13–14 του HN K1M \rightarrow πηνίο του HN K1M \rightarrow ουδέτερος N.

Η επαφή 13–14 του HN K1M είναι η επαφή αυτουσυγκρατήσεώς του. Επίσης, ο HN K3M παραμένει ενεργοποιημένος γιατί το πηνίο του εξακολουθεί να τροφοδοτείται απ' το κλειστό κύκλωμα:

¹ Για την προστασία του κινητήρα από βραχυκύκλωμα προβλέπεται μια ασφάλεια τήξεως F_2 [σχ. 5.51γ(β)].

$L_1 \rightarrow Q_1 \rightarrow F_1 \rightarrow F_2 \rightarrow$ επαφή 95–96 του θερμικού $F_3 \rightarrow STOP \rightarrow$ επαφή 13–14 του ΗΝ Κ1Μ (κλειστή) \rightarrow επαφή 13–14 του ΗΝ Κ3Μ (κλειστή) \rightarrow επαφή 11–12 του ΗΝ Κ2Μ (κλειστή) \rightarrow επαφή 15–16 του χρονικού Κ1Τ (κλειστή) \rightarrow πηνίο του ΗΝ Κ3Μ \rightarrow ουδέτερος Ν.

Όταν αφήνουμε το κομβίο START, ο κινητήρας συνεχίζει να λειτουργεί σε συνδεσμολογία σε αστέρα (οι ΗΝ Κ1Μ και Κ3Μ παραμένουν ενεργοποιημένοι). Το χρονικό Κ1Τ εξακολουθεί να τροφοδοτείται και συνεχίζει να μετρά τον χρόνο. Με την ενεργοποίηση του ΗΝ Κ1Μ ενεργοποιείται και η ενδεικτική λυχνία h_1 , που συνδέεται παράλληλα με το πηνίο του και έχουμε φωτεινή ένδειξη ότι ο κινητήρας λειτουργεί.

Όταν περάσει ο χρόνος στον οποίο είχε ρυθμιστεί το χρονικό, η επαφή του 15–16/18 έρχεται στη θέση ενεργοποίησης 15–18. Λόγω της νέας θέσεως της επαφής του Κ1Τ διακόπεται η τροφοδοσία του πηνίου του ΗΝ Κ3Μ, οπότε απενεργοποιείται. Με την απενεργοποίηση του ΗΝ Κ3Μ, παύει να υπάρχει το γεφύρωμα των άκρων W_2 , U_2 και V_2 των τυλιγμάτων του κινητήρα. Στο βοηθητικό κύκλωμα κλείνει η επαφή 21–22 του ΗΝ Κ3Μ και ενεργοποιείται ο ΗΝ τριγώνου Κ2Μ. Με την ενεργοποίηση του ΗΝ Κ2Μ στο κύκλωμα ισχύος οι ακροδέκτες W_2 , U_2 και V_2 των τυλιγμάτων του κινητήρα τροφοδοτούνται, αντίστοιχα, από τις φάσεις L_1 , L_2 και L_3 του δικτύου. Ο ΗΝ Κ1Μ εξακολουθεί να είναι ενεργοποιημένος ενώ οι ακροδέκτες U_1 , V_1 και W_1 των τυλιγμάτων του κινητήρα εξακολουθούν να τροφοδοτούνται από τις φάσεις L_1 , L_2 και L_3 του δικτύου. Ο κινητήρας συνεχίζει την λειτουργία του, τώρα σε σύνδεση των φάσεών του σε τρίγωνο.

Όταν απενεργοποιείται ο ΗΝ Κ3Μ, ανοίγει η επαφή του 13–14 και παύει να τροφοδοτείται το κύκλωμα του χρονικού Κ1Τ. Το χρονικό έρχεται στην κατάσταση ηρεμίας και η επαφή του 15–16/18 επανέρχεται στη θέση ηρεμίας 15–16. Η νέα θέση της επαφής του χρονικού δεν έχει κανένα αποτέλεσμα για το κύκλωμα γιατί στη θέση της επαφής αυτής δεν υπάρχει τώρα τάση.

Για να σταματήσουμε την λειτουργία τον κινητήρα πιέζουμε το κομβίο S_2 (STOP), οπότε απενεργοποιούνται οι ΗΝ Κ1Μ και Κ2Μ και διακόπεται η τροφοδοσία των τυλιγμάτων του κινητήρα από το δίκτυο. Όταν πιέσουμε το κομβίο STOP διακόπεται και η τροφοδοσία και στην ενδεικτική λυχνία h_1 , η οποία απενεργοποιείται.

Αν κατά την διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα αυτός υπερφορτιστεί, τότε ενεργοποιείται το θερμι-

κό F_3 . Η επαφή 95–96 ανοίγει και η επαφή 97–98 κλείνει. Όταν αλλάζει θέση η επαφή 95–96 απενεργοποιούνται οι ΗΝ που ήταν ενεργοποιημένοι. Τα τυλιγμάτων του κινητήρα δεν τροφοδοτούνται και αυτός σταματά. Απενεργοποιείται η ενδεικτική λυχνία h_1 . Μέσω της επαφής 97–98 του θερμικού, τροφοδοτείται τώρα η ενδεικτική λυχνία h_2 η οποία δείχνει την υπερφόρτιση του κινητήρα.

5.5.4 Θερμικά.

Τα **θερμικά** είναι διατάξεις που προστατεύουν τους κινητήρες από υπερφορτίσεις, ενώ δεν προστατεύουν από βραχυκύκλωμα.

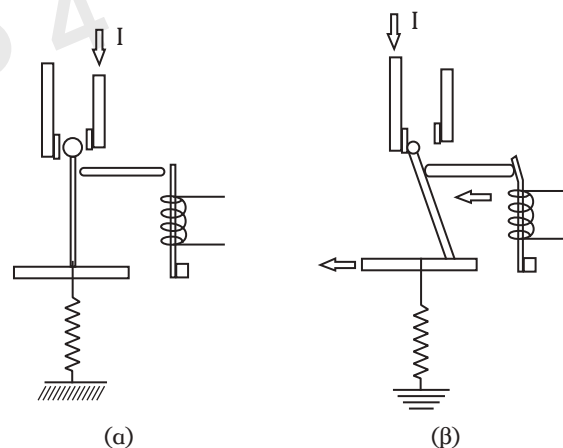
1) Δομή και λειτουργία των θερμικών διατάξεων.

Οι θερμικές διατάξεις αποτελούνται από δύο ή περισσότερα διμεταλλικά στοιχεία, μέσω των οποίων περνούν οι γραμμές τροφοδοτήσεως των κινητήρων (σχ. 5.5ιδ).

Όταν από την φάση περνάει ρεύμα 20% μεγαλύτερο του αντίστοιχου ονομαστικού, τότε το διμεταλλικό στοιχείο κάμπτεται [σχ. 5.5ιδ(β)], με αποτέλεσμα να κινηθεί ένας μικρός άξονας, ο οποίος με τη σειρά του προκαλεί αποσύνδεση του κυκλώματος τροφοδοτήσεως.

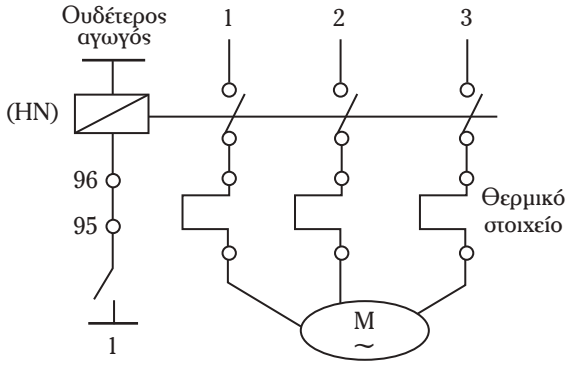
Στην περίπτωση ενός τριφασικού κινητήρα, αν περάσει ένα ρεύμα υπερφορτίσεως από μία φάση του, τότε το θερμικό ανοίγει την επαφή 95–96 (σχ. 5.5ιε). Η επαφή αυτή συνδέεται στο βοηθητικό κύκλωμα του ηλεκτρονόμου (ΗΝ), ο οποίος ελέγχει την λειτουργία του κινητήρα.

Η υπερφόρτιση της φάσεως 1 ενεργοποιεί το θερμικό, οπότε η επαφή 95–96 ανοίγει, με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται το πηνίο του ΗΝ και στη



Σχ. 5.5ιδ

Θερμικές διατάξεις. (α) Κατάσταση ηρεμίας, (β) Ενεργοποίηση της θερμικής διατάξεως.



Σχ. 5.5ιε

Λειτουργία θερμικού σε τριφασικό κινητήρα.

συνέχεια να διακόπτεται το κύκλωμα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας του κινητήρα.

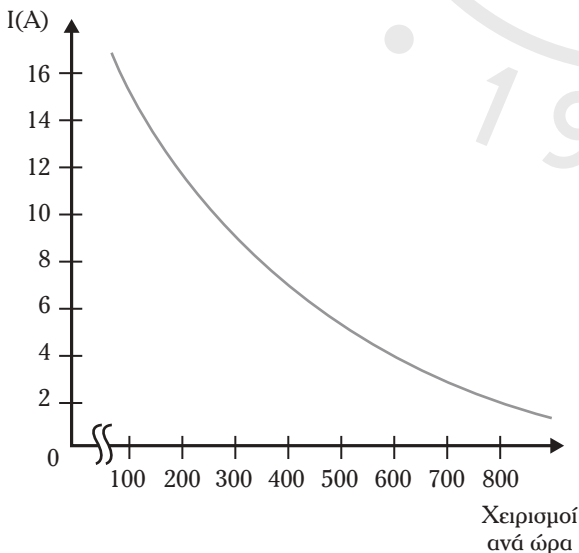
2) Ρύθμιση θερμικού.

Τα θερμικά ρυθμίζονται έτσι, ώστε να αντιδρούν όταν ο κινητήρας ή η συσκευή την οποία προστατεύουν, υπερθερμαίνεται. Οι περιοχές ρυθμίσεως των θερμικών διαφέρουν, ανάλογα με τον κατασκευαστή.

Ενδεικτικά οι περιοχές ρυθμίσεως των θερμικών είναι: 1–2 A, 2–4 A, 4–8 A, 8–15 A, 15–25 A, 20–30 A, 25–40 A, 30–50 A, 40–60 A, κ.λπ..

Η ονομαστική ένταση του ρεύματος, το οποίο απορροφά ένας κινητήρας είναι απαραίτητο να βρίσκεται μέσα στις περιοχές ρυθμίσεως του θερμικού.

Το θερμικό συνοδεύεται από έναν πίνακα στον οποίο δίδεται μια καμπύλη εντάσεως ρεύματος σε σχέση με τους χειρισμούς ανά ώρα (σχ. 5.5ιστ).



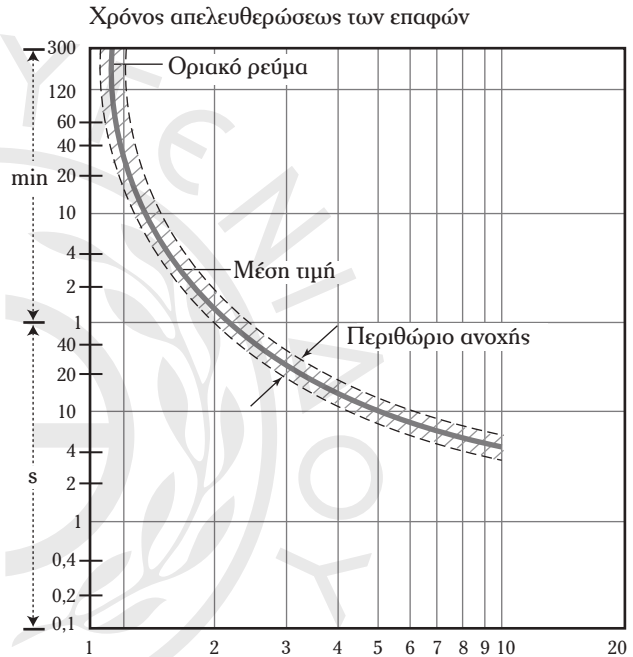
Σχ. 5.5ιστ

Καμπύλη ρυθμίσεως θερμικού, ανάλογα με τον αριθμό χειρισμών.

3) Καμπύλες αντιδράσεως θερμικών.

Είναι ενδιαφέρον να γνωρίζουμε τη χαρακτηριστική καμπύλη αντιδράσεως των θερμικών. Σε θερμή κατάσταση οι κανονισμοί VDE περιγράφουν ότι, όταν ένα κύκλωμα υπερφορτίζεται 1,5 φορές του ονομαστικού φορτίου μπορεί να παραμείνει σε αυτήν την κατάσταση, το πολύ 2 min. Οι μέσες τιμές των καμπυλών αντιδράσεως σε θερμή κατάσταση είναι κάτω από τις αντίστοιχες τιμές των καμπυλών σε ψυχρή κατάσταση (σχ. 5.5ιζ).

Για ένα ρεύμα πενταπλάσιο του ονομαστικού, ο χρόνος αντιδράσεως είναι 10 s.



Σχ. 5.5ιζ

Περιοχή ανοχής των καμπυλών αντιδράσεως και η Μέση Τιμή της καμπύλης αντιδράσεως ενός θερμικού.

5.5.5 Ασφάλειες.

Οι ασφάλειες τήξεως χρησιμοποιούνται για την διακοπή ρευμάτων υπερφορτίσεως και βραχυκυκλώσεως και τοποθετούνται:

- 1) Στην αρχή κάθε ηλεκτρικής γραμμής.
- 2) Σε διακλάδωση αγωγών με μικρότερη διατομή και
- 3) σε κεντρικές διακλαδώσεις ή σε διακλαδώσεις στις οποίες τοποθετούνται διακόπτες.

Η λειτουργία των ασφαλειών τήξεως στηρίζεται στον νόμο του Joule. Ένας αγωγός μικρού μήκους (τηκτό) και μικρής διατομής, όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα αντέχει μέχρι ορισμένη τιμή του ρεύματος. Όταν αυξάνεται το ρεύμα πέρα από το «όριο

αντοχής του τηκτού», τότε ο αγωγός τήκεται από υπερθέρμανση. Το τηκτό είναι χάλκινος ή αργυρός αγωγός σύρματος ή ταινία τοποθετημένη σε σκόνη χαλαζία, η οποία χρησιμοποιείται για τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου, που αναπτύσσεται όταν τήκεται το τηκτό.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των ασφαλειών τήξεως, με βάση τα οποία επιλέγονται είναι:

- 1) Η ονομαστική τάση λειτουργίας.
- 2) Η ονομαστική ισχύς διακοπής ή ρεύμα διακοπής.
- 3) Οι χαρακτηριστικές χρόνου-ρεύματος.

1) Χρόνος λειτουργίας και κριτήρια επιλογής των ασφαλειών.

Στο σχήμα 5.5in, δίδεται η χαρακτηριστική χρόνου-ρεύματος διακοπής μιας ασφαλείας τήξεως, για μια τιμή της τάσεως, στην οποία αναπτύσσεται βραχυκυκλώμα με την εμφάνιση ηλεκτρικού τόξου, στο τμήμα του δικτύου όπου τοποθετείται.

Για υψηλές τιμές ρεύματος το τηκτό στοιχείο της ασφαλείας τήκεται τόσο γρήγορα, ώστε η κορυφή I_p του αναμενόμενου ρεύματος βραχυκυκλώσεως δεν συμβαίνει ποτέ. Αυτό το ρεύμα περιορίζεται από το ρεύμα διελεύσεως I_c (σχ. 5.5in).

Στο παραπάνω σχήμα διακρίνουμε τους ακόλουθους χρόνους λειτουργίας μιας ασφαλείας τήξεως: t_s είναι ο χρόνος, ο οποίος αντιστοιχεί στην έναρξη του βραχυκυκλώματος μέχρι την τήξη του τηκτού της ασφαλείας και t_L είναι ο χρόνος εξαλείψεως του ηλεκτρικού τόξου.

Οι ασφάλειες τήξεως αντέχουν σε στιγμιαίες υπερτάσεις, όπως εκείνες οι οποίες εμφανίζονται κατά την εκκίνηση των κινητήρων, αλλά διακόπτουν ρεύματα βραχυκυκλώσεως, τα οποία είναι πιο ισχυρά από αυτές τις στιγμιαίες υπερτάσεις.

Υπάρχουν οι ακόλουθοι τύποι ασφαλειών τήξεως.

α) Ασφάλειες τύπου D.

Ονομάζονται και Diazed-ασφάλειες (σχ. 5.5iθ) και έχουν ικανότητα μέγιστου ρεύματος διακοπής 50 kA. Οι ασφάλειες τύπου D αποτελούνται από μία βάση, ένα κάλυμμα για την προστασία έναντι επαφής με ηλεκτροφόρα μέρη, μία μήτρα, ένα φυσίγγιο ασφαλείας και ένα πώμα (βιδωτό καπάκι).

β) Ασφάλειες τύπου D0.

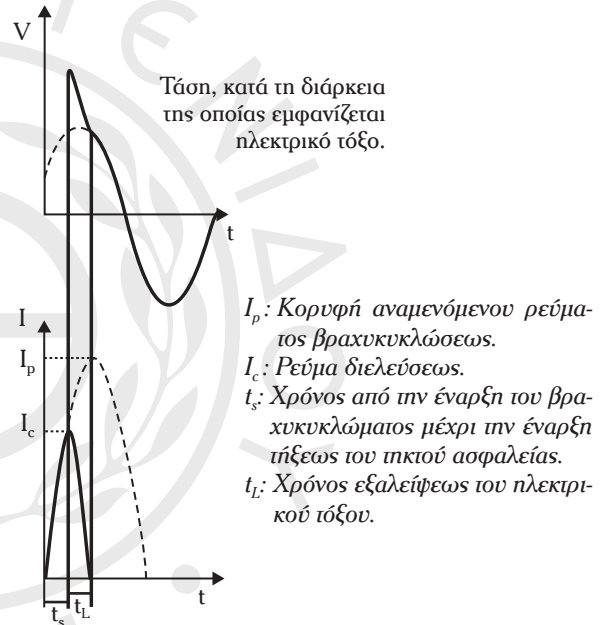
Στον πίνακα του σχήματος 5.5k δίδονται τα διάφορα μεγέθη και τα αντίστοιχα ρεύματα των ασφαλειών τύπου D0 και παρουσιάζονται αντίστοιχοι τύποι ασφαλειών.

γ) Μαχαιρωτές ασφάλειες τύπου NH (Nieder-spannung-Hochleistungssicherungen) ή HRC (High Rupture Capacity).

Οι μαχαιρωτές ασφάλειες τύπου NH βρίσκονται μέσα σε πορσελάνη και απαντώνται σε επτά μεγέθη (NH00, NH0, NH1, NH2, NH3, NH4 και NH4a) με διαφορετικές περιοχές ρευμάτων (6-100, 6-160, 125-400, 315-630, 500-1000 και 500-1.250 A αντίστοιχα).

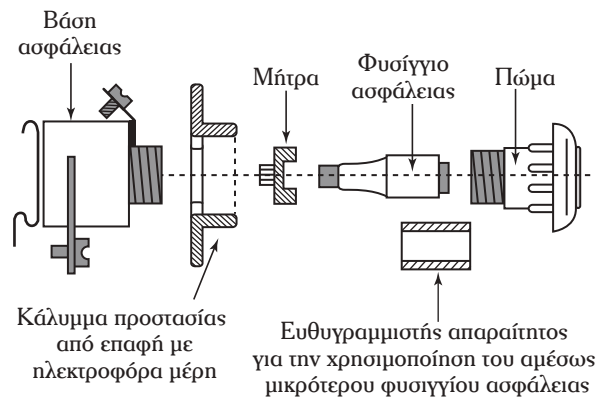
Το τηκτό των ασφαλειών τύπου NH αποτελείται από ταινίες (σχ. 5.5κα) και έχει στο μέσο μια μαλακή συγκόλληση (κασσιτεροκόλληση) η οποία λιώνει στην περίπτωση υπερφορτίσεως.

Οι ασφάλειες τύπου NH έχουν τις ακόλουθες χαρακτηριστικές ιδιότητες:



Σχ. 5.5in

Χαρακτηριστική χρόνου-ρεύματος μιας ασφαλείας τήξεως.



Σχ. 5.5iθ

Μέρη ασφαλείας τύπου D.

α) Μειώνεται η αντίστασή τους στην κανονική λειτουργία τους και αυξάνεται η ικανότητα αποζεύξεως.

β) Αναπτύσσουν μεγάλη αντίσταση στο κύκλωμα μετά την τήξη τους και μέχρι τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου από τη σκόνη χαλαζία.

γ) Περιορίζουν αισθητά το ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

δ) Μικροασφάλειες τύπου G.

Οι μικροασφάλειες τύπου G βρίσκονται μέσα σε γυάλινο κυλινδρικό σωλήνα (σχ. 5.5κβ) και υπάρχουν σε τέσσερα μεγέθη.

Τα τμητά αυτών των ασφαλειών βρίσκονται μέσα σε γυάλινο σωλήνα και μπορεί να υπάρχει και σκόνη χαλαζία. Οι ασφάλειες τύπου G προστατεύουν συσκευές μικρής ισχύος.

2) Κατηγορίες λειτουργίας των ασφαλειών.

Οι ασφάλειες τήξεως χαρακτηρίζονται με δύο γράμματα. Το πρώτο δηλώνει την περιοχή των ρευμάτων, οπότε εξασφαλίζεται προστασία από το μέσο αποζεύξεως και είναι g ή a. Η σημασία τους είναι η ακόλουθη:

α) g: πλήρης προστασία σε όλη την περιοχή των ρευμάτων, και

β) a: μερική προστασία, μόνο στην περιοχή υψηλών ρευμάτων (π.χ. για κινητήρες οι οποίοι έχουν υψηλά ρεύματα εκκινήσεως).

Το δεύτερο γράμμα χαρακτηρίζει το αντικείμενο που προστατεύει και είναι ένα από τα ακόλουθα γράμματα:

G: γενική χρήση,

L: ηλεκτρικές γραμμές, καλώδια,

M: θερμικά (π.χ. κινητήρες),

Tr: M/Σ και

R: προστασία ημιαγωγών.

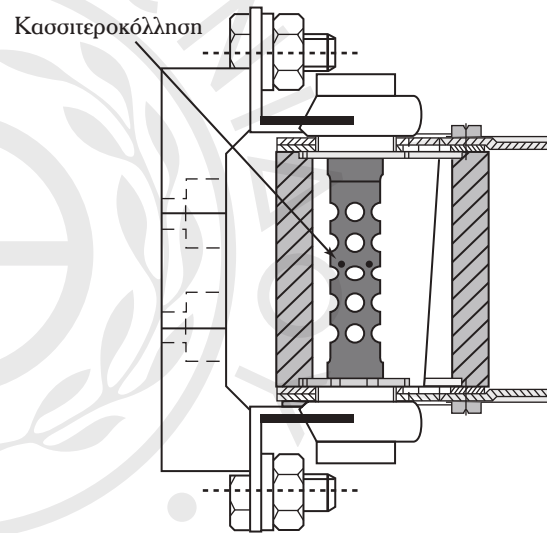
Μερικές κατηγορίες λειτουργιών των ασφαλειών είναι:

gG: πλήρης προστασία στη γενική χρήση,

gL: πλήρης προστασία ηλεκτρικών γραμμών,

aM: μερική προστασία για υψηλά ρεύματα για κινητήρες.

Στο γράφημα του σχήματος 5.5κγ δίδονται οι κατηγορίες λειτουργίας των ασφαλειών με τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου-περιοχής ρευμάτων (οι περιοχές ρευμάτων δίδονται σαν κλάσμα του ρεύματος λειτουργίας του ως προς το ονομαστικό ρεύμα: I/I_{ov}).



Σχ. 5.5κα

Μαχαιρωτή ασφάλεια τύπου NH.

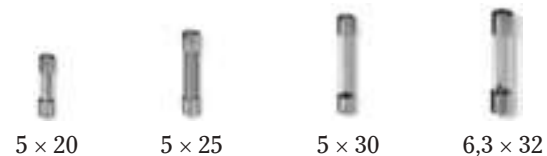
Μέγεθος	Ονομαστικό ρεύμα
D01	2A – 16A
D02	20A – 63A
D03	80A – 100A



Σχ. 5.5κ

Τα μεγέθη και τα αντίστοιχα ονομαστικά ρεύματα των ασφαλειών τύπου D0.

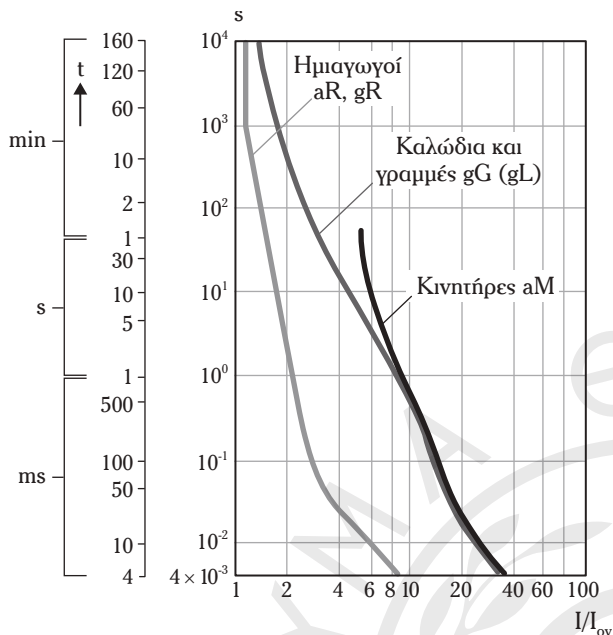
Διάμετρος × μήκος (mm)	Ονομαστικό ρεύμα
5 × 20	20mA – 6,3A
5 × 25	32mA – 6,3A
5 × 30	32mA – 6,3A
6,3 × 32	50mA – 16A



Σχ. 5.5κβ

Μικροασφάλειες τύπου G.

Οι ασφάλειες γραμμών (gL) εξασφαλίζουν την προστασία των ηλεκτρικών γραμμών, τόσο στην κατάσταση υπερφορτίσεως, όσο και στην κατάσταση βραχυκυκλώσεως.



1^ο γράμμα

a: Μερική προστασία
g: Πλήρης προστασία

2^ο γράμμα

gL: Προστασία γραμμών και καλωδίων
M: Προστασία κινητήρων
R: Προστασία ημιαγωγών

Σχ. 5.5κγ

Κατηγορίες λειτουργίας των ασφαλειών και χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου-περιοχής ρευμάτων.

3) Χαρακτηριστικές χρόνου-ρεύματος των ασφαλειών τήξεως.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου-ρεύματος δίδουν τον πραγματικό χρόνο διακοπής, ο οποίος απαιτεί η ασφάλεια τήξεως να αποζεύξει το κύκλωμα στην ορισμένη τιμή της εντάσεως του ρεύματος.

Στα σχήματα 5.5κδ–5.5κστ δίδονται οι τυπικές καμπύλες χρόνου διακοπής-ρεύματος και περιορισμού ρεύματος ασφαλειών τύπου D, D0 και NH, κατηγορία χρήσεως gL/gG.

– Λυμένη άσκηση.

Δίδεται υποπίνακας φωτισμού-ρευματοδοτών σε δίκτυο τάσεως 380 V/220 V. Για την προστασία από υπερφορτίσεις και βραχυκυκλώματα γραμμής τροφοδοτήσεως υποπίνακα προβλέπονται ασφάλειες τήξεως τύπου Neozed ονομαστικής εντάσεως 63 A και κατηγορίας gL. Να βρεθεί ο χρόνος διακοπής της ασφάλειας σε συνθήκες βραχυκυ-

κλώσεως και υπερφορτίσεως. Η ενεργός τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (I_{eff}) είναι 2 kA και το ρεύμα υπερφορτίσεως 200 A.

Λύση.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου διακοπής-ρεύματος των ασφαλειών μεταφέρονται στο σχήμα 5.5κζ (βλ. σελ. 174), όπου παίρνομε τους ζητούμενους χρόνους διακοπής.

α) Χρόνος διακοπής ρεύματος βραχυκυκλώσεως: 2,5 ms.

β) Χρόνος διακοπής ρεύματος υπερφορτίσεως: 23 s.

4) Σύγκριση μεταξύ ασφαλειών τήξεως και αυτομάτων διακοπών.

Μια σύγκριση μεταξύ ασφαλειών τήξεως και αυτομάτων διακοπών μας οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία καθορίζουν το πεδίο εφαρμογής αυτών των διατάξεων.

Τα **πλεονεκτήματα** των ασφαλειών τήξεως είναι:

1) Το χαμηλό κόστος και ο περιορισμένος χώρος τοποθετήσεώς τους.

2) Ότι η ικανότητα διακοπής, για συγκεκριμένη κατηγορία εγκαταστάσεως, είναι απεριόριστη και ότι

3) η ασφαλής παρέμβαση στην περίπτωση βραχυκυκλώματος, ενώ ο αυτόματος διακόπτης δεν εγγυάται αυτήν την παρέμβαση αν δεν έχει προβλεφθεί στη διάρκεια της συντηρήσεώς του.

Τα **μειονεκτήματα** των ασφαλειών τήξεως είναι ότι:

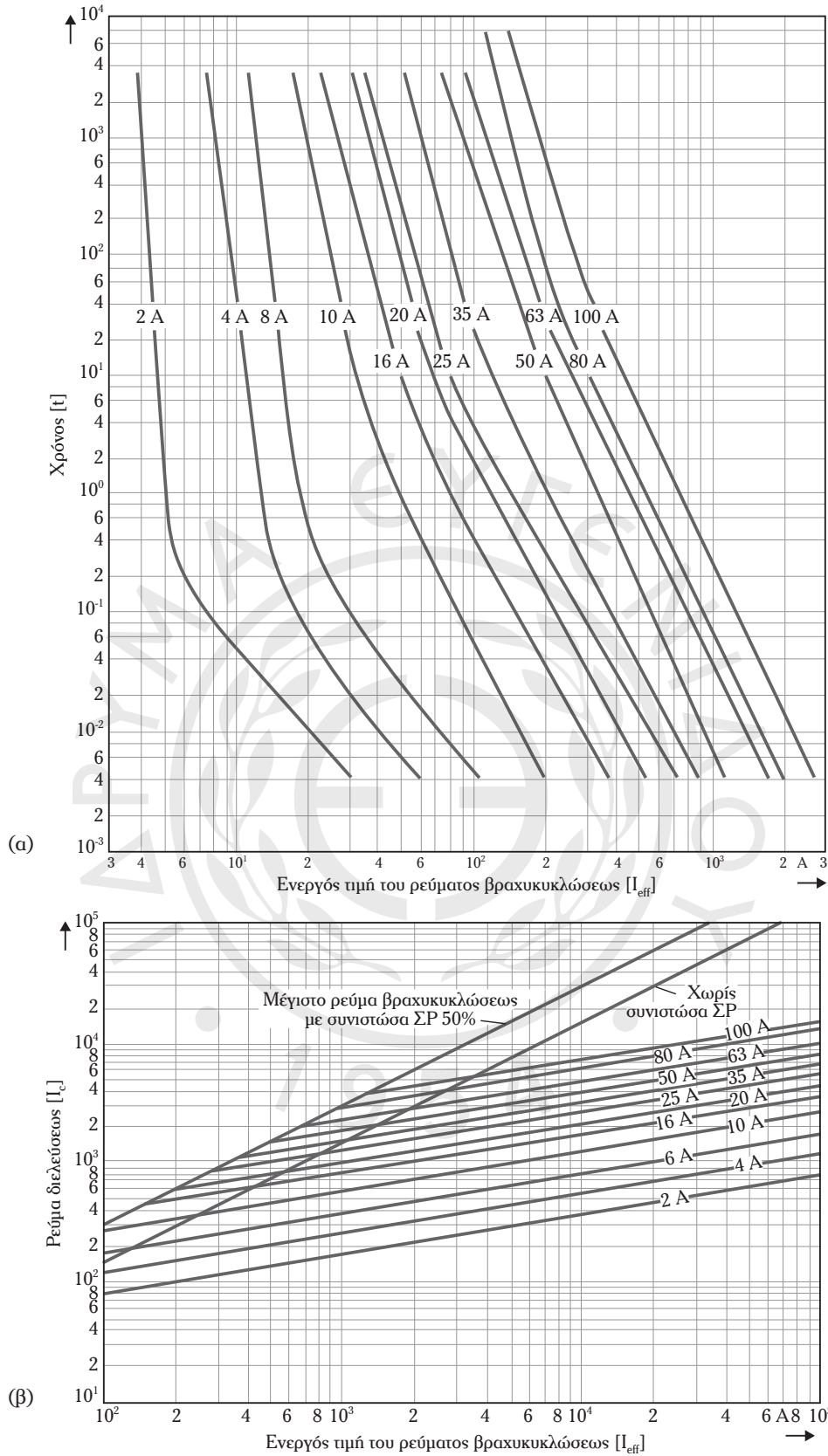
1) Στη διάρκεια λειτουργίας της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πρέπει να έχουμε στη διάθεσή μας επί πλέον ασφάλειες τήξεως για να εξασφαλίζομε την τοποθέτησή τους στην περίπτωση σφάλματος. Αντίθετα μετά το σφάλμα, ο αυτόματος διακόπτης παραμένει κλειστός.

2) Στο τριφασικό κύκλωμα μπορεί να υποστεί βλάβη μία ασφάλεια τήξεως όταν συμβεί μονοφασικό σφάλμα. Το κύκλωμα, όμως τροφοδοτείται από τις δύο άλλες φάσεις. Αυτή η κατάσταση είναι επικίνδυνη όταν είναι συνδεδεμένος τριφασικός κινητήρας, γιατί υπερφορτίζονται οι δύο φάσεις του.

3) Στα μονοφασικά κυκλώματα απαιτείται μεγάλη προσοχή στην τοποθέτηση των ασφαλειών τήξεως, που τοποθετούνται μόνο στη φάση.

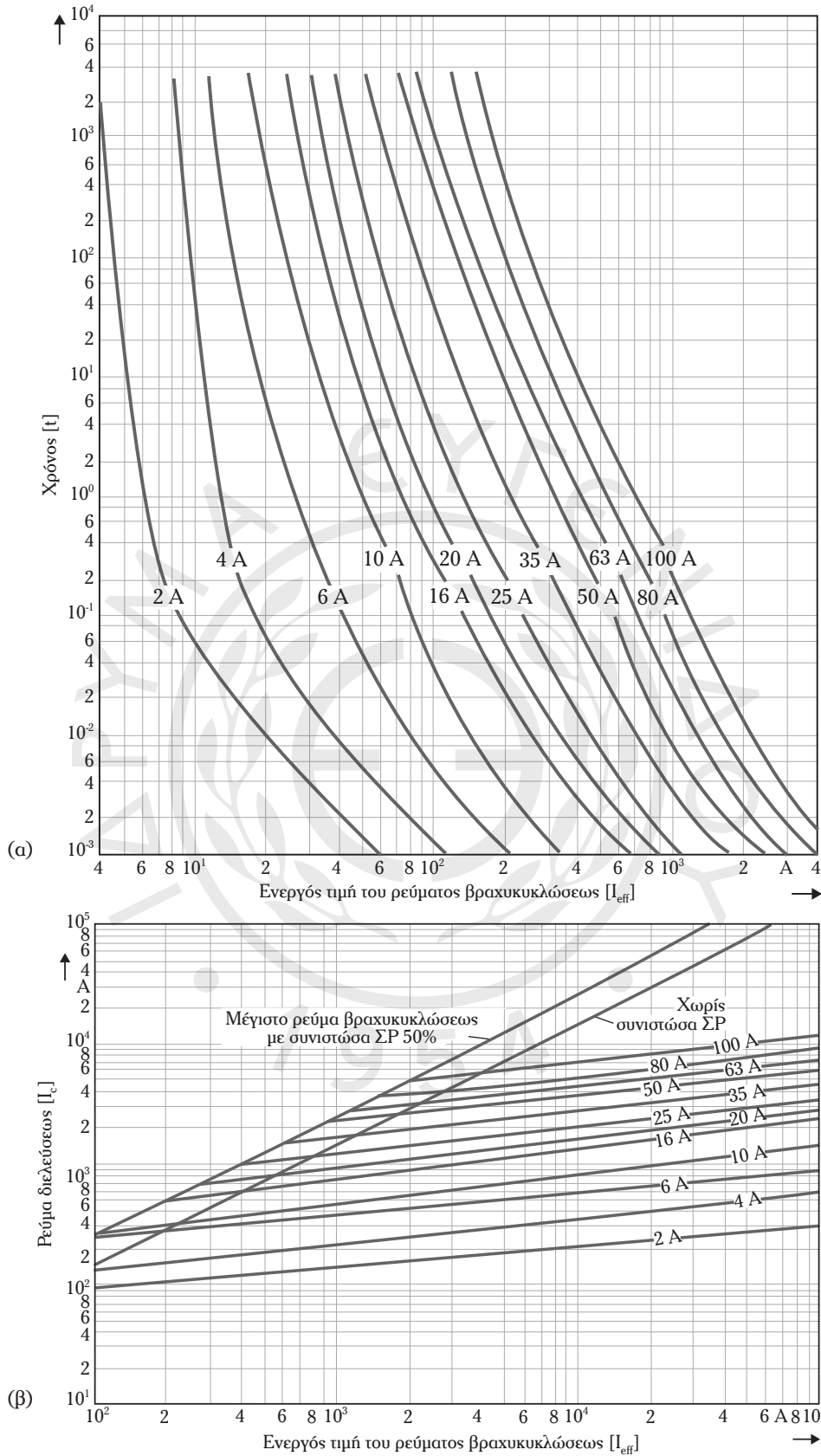
4) Οι ασφάλειες τήξεως καλύπτουν συγκεκριμένου τύπου ανωμαλίες σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση, οπότε ο αυτόματος διακόπτης πλεονεκτεί.

Τα τυποποιημένα μεγέθη ασφαλειών τήξεως είναι: 6, 10, 16, 20, 25, 35, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 224, 250 και 315 A.



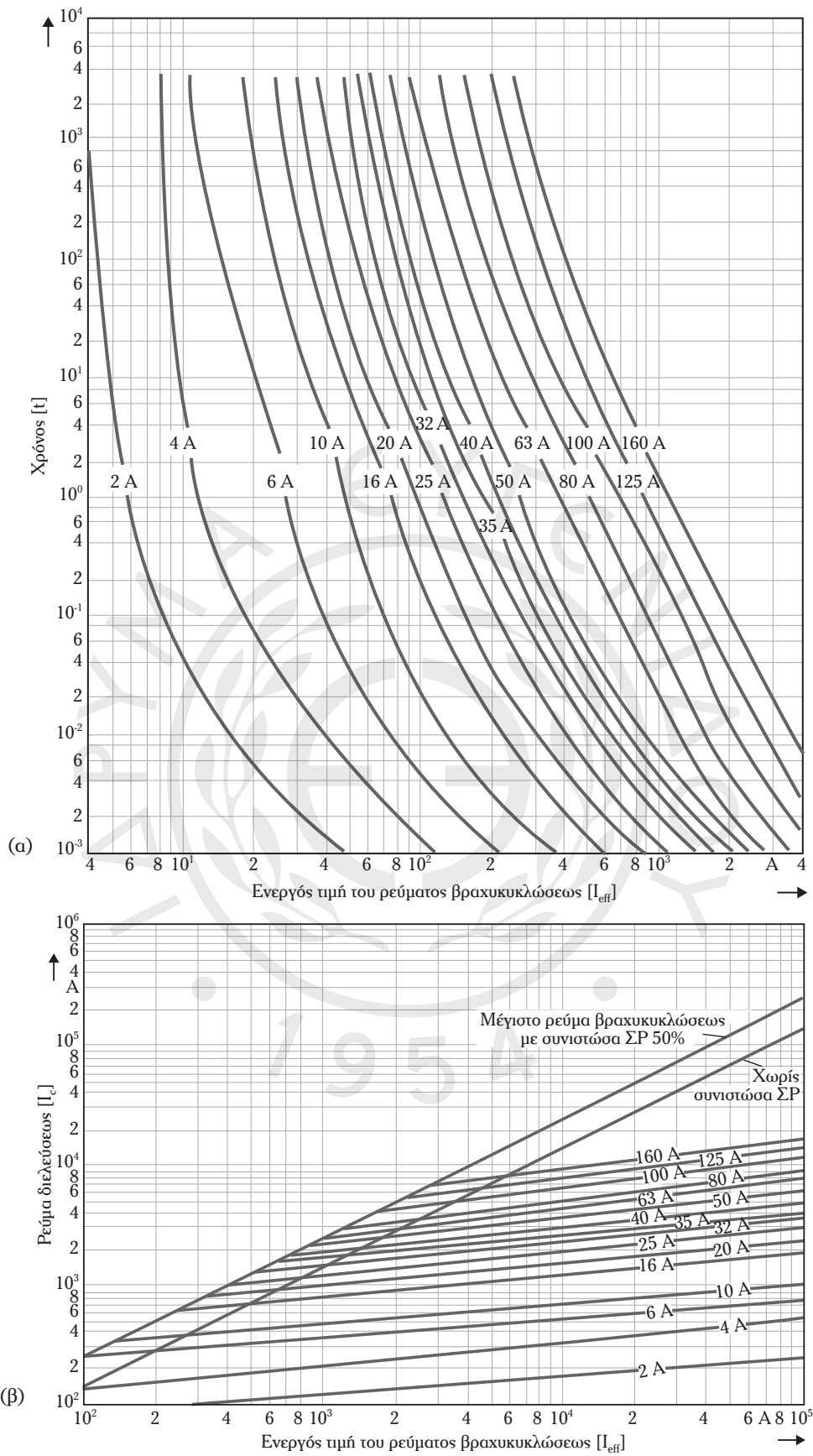
Σχ. 5.5κδ

Ασφάλειες τήξεως κατασκευαστή τύπου DIAZED AC/DC 500 (V), 2-100 (A) κατηγορία χρήσεως gL/gG.
 (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου διακοπής-ρεύματος. (β) Καμπύλες περιορισμού ρεύματος
 (χαρακτηριστική χρόνου διακοπής-ρεύματος-ενεργός τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{eff}).



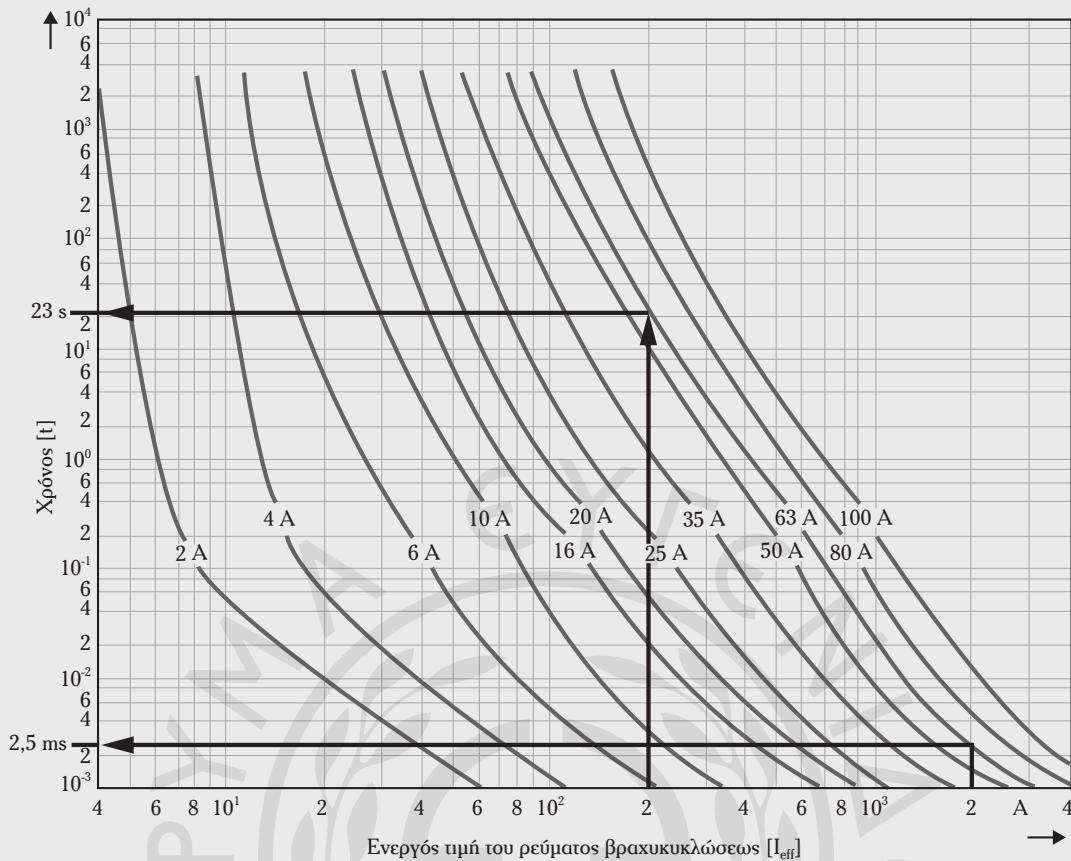
Σχ. 5.5κε

Ασφάλειες τήξεως κατασκευαστή τύπου NEOZED AC 400 V/DC 250 (V), 2-100 (A), κατηγορία χρήσεως gL/gG. (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου διακοπής-ρεύματος. (β) Καμπύλες περιορισμού ρεύματος.



Σχ. 5.5κσι

Αοφάλειες τήξεως κατασκευαστή τύπου NH (LV HRC) AC 500 V/ DC 250 (V), 2-160 (A), κατηγορία χρήσεως gL/gG. (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου διακοπής-ρεύματος. (β) Καμπύλες περιορισμού ρεύματος.



Σχ. 5.5κζ

Χρόνοι διακοπής σε συνθήκες βραχυκυκλώσεως και υπερφορτίσεως.

5.6 Συνεργασία ασφαλιστικών διατάξεων και οργάνων διακοπής ρευμάτων βραχυκυκλώσεως.

5.6.1 Συνδυασμός ασφαλειών και αυτόματου διακόπτη.

Στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων είναι απαραίτητο να υπάρχει επιλεκτικότητα ως προς τη λειτουργία των μέσων προστασίας.

Στο σχήμα 5.6α, δίδεται τμήμα ηλεκτρικού δικτύου, στο οποίο υπάρχουν δυο ασφάλειες και ένας αυτόματος διακόπτης.

Στο σημείο Α συμβαίνει ένα σφάλμα. Στη θέση αυτή είναι απαραίτητο να λειτουργήσει η προστασία (γ) και όχι οι προστατευτικές διατάξεις (β) και (α).

Λειτουργώντας η διάταξη (γ) θα απομονωθεί μόνον το τμήμα του δικτύου, στο οποίο συνέβη το σφάλμα.

Στο σχήμα 5.6β δίδεται το διάγραμμα χρόνου-ρεύματος των διατάξεων προστασίας του δικτύου του σχήματος 5.6α.

Προκειμένου να λειτουργήσει η διάταξη προστασίας (γ) θα πρέπει οι χρόνοι διεγέρσεως για το ρεύμα σφάλματος (I) στη θέση Α να μικραίνουν απ' τον πίνακα τροφοδοσίας προς το σφάλμα. Πρέπει να ισχύει:

$$t_a > t_b > t_\gamma$$

για το δίκτυο του σχήματος 5.6α. Με βάση το διάγραμμα του σχεδίου έχουμε τα ακόλουθα:

- 1) Όταν είναι $I < I_1$ ισχύει ότι $t_a > t_\gamma > t_b$, οπότε δεν υπάρχει συνεργασία των διατάξεων προστασίας.
- 2) Όταν είναι $I_1 < I < I_2$ ισχύει $t_a > t_\gamma > t_b$, οπότε υπάρχει συνεργασία των διατάξεων προστασίας.
- 3) Όταν είναι $I_2 < I < I_3$ ισχύει $t_a > t_\gamma > t_b$.
- 4) Όταν είναι $I_3 < I < I_4$ ισχύει $t_a > t_b > t_\gamma$, οπότε υπάρχει συνεργασία των διατάξεων προστασίας.
- 5) Όταν είναι $I > I_4$ ισχύει $t_b > t_a > t_\gamma$.

5.6.2 Αντιμετώπιση των υπερτάσεων με συνδυασμό ασφαλειών και αυτόματου διακόπτη.

Οι προστατευτικές διατάξεις, οι οποίες αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά τις υπερτάσεις στο πεδίο χαμη-

λών τάσεων, συνδυάζουν αυτόματο διακόπτη (περιλαμβάνει θερμικό και ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο) και ασφάλειες τήξεως.

Κάθε προστατευτική διάταξη προσφέρει πλεονεκτήματα, όταν:

- 1) Είναι αναγκαίες οι προστασίες για ρεύματα βραχυκυκλώσεως.
- 2) Συμβαίνουν συχνά βραχυκυκλώματα.
- 3) Πρέπει να συνδέονται στο δίκτυο, χωρίς κίνδυνο,

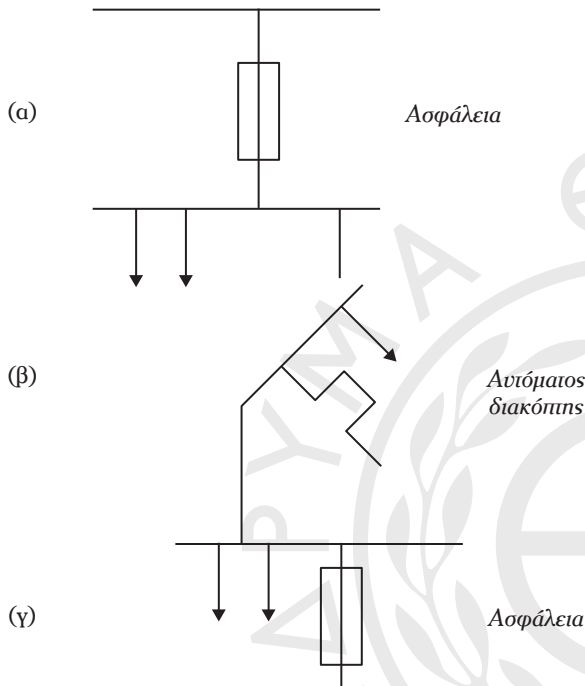
νο, κινητήρες, πυκνωτές και άλλα φορτία τα οποία απορροφούν ρεύμα εκκινήσεως μεγάλης τιμής.

4) Είναι αναγκαίος ο χειρισμός αποσυνδέσεως στην περίπτωση της πώσεως τάσεως στο δίκτυο.

5) Η θέση χειρισμού και η αποσύνδεση του διακόπτη πρέπει να χρησιμοποιηθούν για το βοηθητικό κύκλωμα.

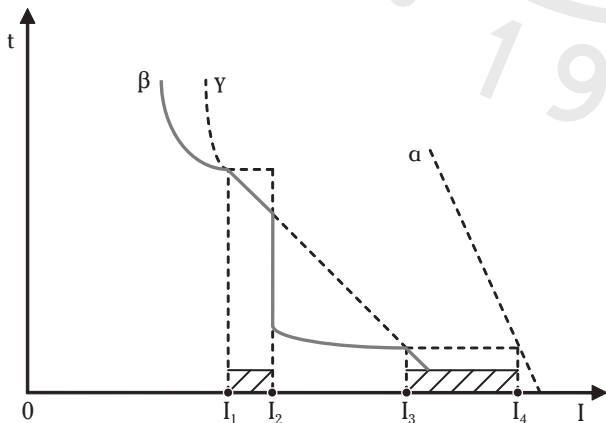
Για την αποδοτικότερη και συντονισμένη λειτουργία του συνδυασμού αυτόματου διακόπτη και ασφάλειας τήξεως (η ασφάλεια τοποθετείται πριν τον διακόπτη) είναι απαραίτητο οι χαρακτηριστικές χρόνου-ρεύματος της ασφάλειας τήξεως να ικανοποιούν τις ακόλουθες συνθήκες:

1) Η χαρακτηριστική καμπύλη χρόνου-τήξεως να τοποθετείται πιο πάνω (1) (σχ. 5.6γ) απ' την καμπύλη



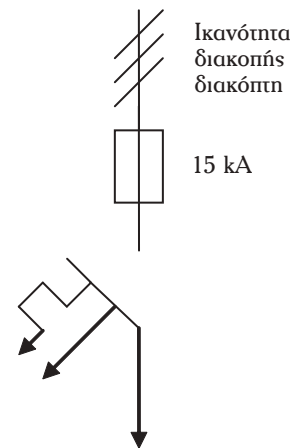
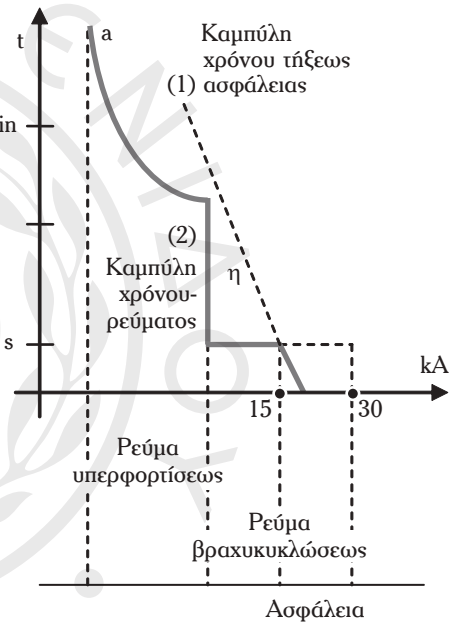
Σχ. 5.6α

Τμήμα ηλεκτρικού δικτύου εγκαταστάσεως.



Σχ. 5.6β

Διάγραμμα χρόνου-ρεύματος των διατάξεων προστασίας. (α) και (γ) είναι η χαρακτηριστική καμπύλη των ασφαλειών α και γ αντίστοιχα και (β) είναι η χαρακτηριστική καμπύλη της διατάξεως β.



Σχ. 5.6γ

Συνδυασμός αυτόματου διακόπτη και ασφάλειας τήξεως.

χρόνου-ρεύματος του αυτόματου διακόπτη.

2) Η χαρακτηριστική καμπύλη χρόνου-τήξεως κοντά στην τιμή του ρεύματος, η οποία αντιστοιχεί στην ικανότητα διακοπής του διακόπτη (2) (σχ. 5.6γ) να τοποθετείται πιο κάτω από την καθυστερήση ανοίγματος του αυτόματου διακόπτη.

Η καθυστερήση ανοίγματος του διακόπτη (ο χρόνος ο οποίος περνάει από το άνοιγμα των επαφών) κυμαίνεται από 2–20 ms, σε συνάρτηση με τον τύπο του διακόπτη. Είναι δυνατή η σύγκριση των καμπυλών της ασφάλειας και του θερμικού στοιχείου γιατί και οι δύο αυτές καμπύλες επηρεάζονται από την θερμότητα, η οποία παράγεται απ' το ρεύμα. Δεν είναι μονοσήμαντη, όμως η σύγκριση μεταξύ των καμπυλών της ασφάλειας και του μαγνητικού στοιχείου του αυτόματου διακόπτη. Καθώς η καμπύλη της ασφάλειας επηρεάζεται απ' την θερμότητα, η οποία παράγεται από το ρεύμα, η επέμβαση του μαγνητικού στοιχείου εξαρτάται από τη στιγμιαία τιμή του ρεύματος και από τον χρόνο. Αν και στην περίπτωση των βραχυκυκλωμάτων η τήξη της ασφάλειας και το άνοιγμα των επαφών του αυτόματου διακόπτη προκαλούνται από δύο διαφορετικές φυσικές διαδικασίες, είναι ανάγκη, στην πράξη, να ισχύει η συνθήκη 2.

5.7 Ερωτήσεις.

1) Ποιες διατάξεις χρησιμοποιούνται για την προστασία των ηλεκτρικών δικτύων αλλά και των φορτίων σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου;

2) Τι εννοούμε με τον όρο ονομαστική ικανότητα μιας προστατευτικής διατάξεως;

3) Τι ονομάζουμε σφάλμα και τι υπερφόρτιση;

4) Ποιες είναι οι βασικές κατηγορίες διακοπών;

5) Ποια είναι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των αυτομάτων διακοπών;

6) Τι είναι οι *HN* και ποιες οι κατηγορίες τους;

7) Ποια είναι η δομή ενός *HN*;

8) Ποιος είναι ο ρόλος των βοηθητικών επαφών ενός *HN*;

9) Ποιες οι βασικές εφαρμογές των *HN*;

10) Τι είναι τα θερμικά;

11) Ποια η δομή και λειτουργία των θερμικών;

12) Πώς ρυθμίζεται ένα θερμικό;

13) Ποιος είναι ο ρόλος των ασφαλειών τήξεως;

14) Πώς επιλέγονται οι ασφάλειες τήξεως;

15) Ποιοι οι βασικοί τύποι των ασφαλειών τήξεως;

16) Τι εννοούμε με τα σύμβολα: *gLaM*;

17) Για ποιον λόγο συνδυάζεται η ασφάλεια τήξεως με αυτόματο διακόπτη σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση;

5.8 Προτεινόμενες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα τάσεως 220/380 V, ισχύος 10 HP με συντελεστή ισχύος επαγ. 0,8, βαθμό αποδόσεως 0,9 τροφοδοτείται από δίκτυο τάσεως 220/380 V. Ο κινητήρας ενεργοποιεί ένα μηχανικό φορτίο. Ο πίνακας τροφοδοσίας του κινητήρα περιλαμβάνει ως προστατευτικές διατάξεις την ασφάλεια τήξεως και τον αυτόματο διακόπτη.

1) Να σχεδιάσετε το μονογραμμικό σχέδιο της συνδεσμολογίας.

2) Να υπολογίσετε την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος του κινητήρα.

3) Να υπολογίσετε την ικανότητα διακοπής της ασφάλειας τήξεως.

4) Να υπολογίσετε την ικανότητα διακοπής του διακόπτη.

Άσκηση 2.

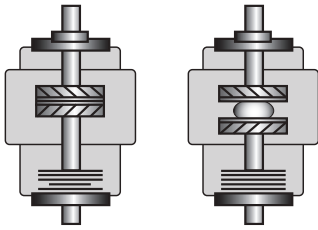
Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα, 15 HP, τροφοδοτείται με τριφασική γραμμή 50 m. Ο κινητήρας έχει συντελεστή ισχύος επαγ. 0,8 και βαθμό αποδόσεως 0,9. Να σχεδιάσετε το μονογραμμικό διάγραμμα της συνδεσμολογίας στην περίπτωση κατά την οποία οι προστατευτικές διατάξεις είναι οι ασφάλειες τήξεως και ο αυτόματος διακόπτης.

Να υπολογίσετε:

1) Το ρεύμα γραμμής, το οποίο απορροφά ο κινητήρας για δίκτυο τάσεως 220/380 V.

2) Την διατομή της ηλεκτρικής γραμμής, αν η επιτρεπόμενη πτώση τάσεως είναι 3%.

3) Τις ασφάλειες και τον αυτόματο διακόπτη.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ

6.1 Εισαγωγή.

Στην πρακτική των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων τα συστήματα τάσεων πάνω από 1 kV ανήκουν στην κατηγορία των δικτύων Μέσης Τάσεως (Μ.Τ.).

Η εγκατάσταση διατάξεων μεγάλης ισχύος, σε ένα πλοίο, είναι ο σημαντικότερος λόγος αναπτύξεως των δικτύων Μ.Τ..

Ενεργοβόρες διατάξεις εγκαθίστανται:

- 1) Σε μεγάλης χωρητικότητας πλοία τα οποία μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια (Ε/Κ).
- 2) Σε πλοία τα οποία μεταφέρουν αέριο.
- 3) Σε πλοία στα οποία έχομε ηλεκτρική πρόωση.

Τα συστήματα παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με Μ.Τ. απαιτούν επίπεδο τάσεως της τάξεως των 11 kV όταν η συνολική ισχύς των συγχρόνων γεννητριών είναι μεγαλύτερη των 20 MW και υπάρχουν εγκατεστημένοι κινητήρες συνολικής ισχύος 400 kW.

Όταν η συνολική ισχύς των συγχρόνων γεννητριών είναι μεταξύ των 10 MW και 20 MW και η υπάρχουσα εγκατεστημένη ισχύς των κινητήρων είναι 300 kW, το επίπεδο τάσεως είναι 6,6 kV.

6.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσεως δικτύων Μέσης Τάσεως (Μ.Τ.).

Τα πλεονεκτήματα της χρήσεως δικτύων Μ.Τ. προκύπτουν από τη σχέση, η οποία συνδέει το ρεύμα και την τάση (Νόμος του Ωμ). Γνωρίζομε ότι η ισχύς ισούται με το γινόμενο της τάσεως επί την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Για μια δεδομένη ισχύ, έχομε λοιπόν:

$$600 \text{ kW} = 600.000 \text{ W} = \begin{cases} 600 \text{ V} \times 1.000 \text{ A} \\ 1.000 \text{ V} \times 6.000 \text{ A} \\ 10.000 \text{ V} \times 60 \text{ A} \end{cases}$$

Όταν αυξάνεται η τάση, μειώνεται η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, άρα και η διατομή των αγωγών, άρα και το βάρος τους.

Τα **πλεονεκτήματα** λοιπόν της χρήσεως δικτύου Μ.Τ. σε εγκαταστάσεις πλοίων είναι:

- 1) Η μείωση του μεγέθους των γεννητριών, κινητήρων, καλωδίων.
- 2) Η εξοικονόμηση χώρου και βάρους.
- 3) Οι σχετικά εύκολες εγκαταστάσεις.
- 4) Η μείωση του κόστους εγκαταστάσεως.
- 5) Οι λιγότερες απώλειες, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται με μεγαλύτερη αποδοτικότητα η παραγόμενη ισχύς και
- 6) η μείωση των επιπέδων βραχυκυκλώσεως στον βαθμό κατά τον οποίο ορίζονται κατάλληλα οι ηλεκτρικές συσκευές στην ηλεκτρική εγκατάσταση.

Τα **μειονεκτήματα** είναι τα ακόλουθα:

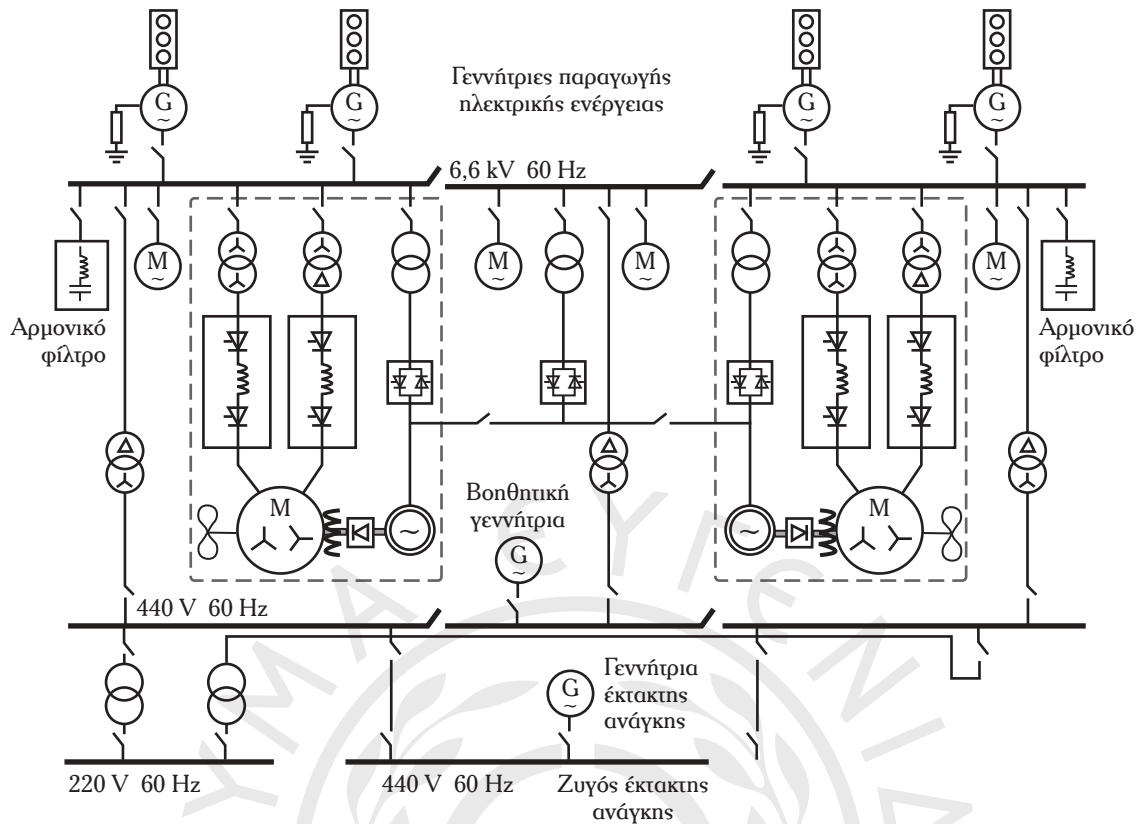
- 1) Οι υψηλές μονωτικές ιδιότητες των μονωτικών υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται στα καλώδια και τις ηλεκτρικές συσκευές της εγκαταστάσεως.
- 2) Η μεγάλη επικινδυνότητα για το τεχνικό προσωπικό, γι' αυτόν τον λόγο απαιτούνται ενισχυμένα μέτρα ασφαλείας.

6.3 Τυπικά δίκτυα Μέσης Τάσεως.

Στο σχήμα 6.3α δίδεται το μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με Μ.Τ..

Το ηλεκτρικό δίκτυο Μ.Τ. αποτελείται από το κέντρο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο τοποθετούνται οι γεννήτριες Μ.Τ.. Στο δίκτυο τοποθετούνται φίλτρα καταστολής αρμονικών.

Στην περίπτωση ενός κρουαζιερόπλοιου η ισχύς κάθε γεννήτριας είναι, συνήθως, 10 MW ή μεγαλύτερη και η παραγόμενη τάση είναι 6,6 kV, 11 kV ή 60 Hz. Οι κύριοι καταναλωτές είναι δύο σύγχρονοι κινητήρες που ενεργοποιούν τις έλικες του πλοίου. Κάθε κινητήρας τροφοδοτείται με ισχύ, περίπου, 12 MW, στην κανονική τους λειτουργία. Ο στάτης κάθε κινητήρα αποτελείται από δύο τυλίγματα, καθένα από τα οποία τροφοδοτείται ξεχωριστά από τον πίνακα Μ.Τ. μέσω Μ/Σ και μετατροπέων συχνότητας. Από τους ζυγούς 440 V, 60 Hz, του συστήματος μέσω



Σχ. 6.3α

Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας Μ.Τ..

Μ/Σ υποβιβαστών τάσεως τροφοδοτούνται οι ζυγοί 220 V, 60 Hz, στους οποίους συνδέονται καταναλώσεις τάσεως 220 V και συχνότητας 60 Hz. Στο δίκτυο υπάρχει ζυγός έκτακτης ανάγκης στον οποίο συνδέεται η γεννήτρια έκτακτης ανάγκης.

Στο σχήμα 6.3β δίδεται το μονογραμμικό διάγραμμα ενός δικτύου πλοίου μεταφοράς Ε/Κ.

Η ηλεκτρική εγκατάσταση του πλοίου αποτελείται από δύο νιζελογεννήτριες 1.250 kVA και δύο στροβιλογεννήτριες 3.750 kVA.

Οι ζυγοί Μ.Τ. είναι 3,3 kV, 50 Hz, τριφασικοί (3-φ).

Μέσω τριών Μ/Σ (σύνδεση των πρωτεύοντων σε τρίγωνο και των δευτερευόντων σε αστέρα) τροφοδοτούνται οι ζυγοί Χαμηλής Τάσεως (Χ.Τ.) 415 V, 50 Hz.

Γενικά, τα επίπεδα τάσεως στις εγκαταστάσεις Χ.Τ., πριν κάποια χρόνια, ήταν της τάξεως των 440 V. Λόγω της αύξησής της χωρητικότητας των πλοίων, οπότε και της απαιτήσεως μεγάλων ποσοτήτων ισχύος, καθώς και της δυσκολίας διαχειρίσεως των ονομαστικών ρευμάτων και των αντιστοίχων τιμών των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως, τα επίπεδα τάσεως διαμορφώνονται στα 690 V και σε σπάνιες περιπτώσεις στα 1.000 V.

Στο σχήμα 6.3γ δίδεται το μονογραμμικό διάγραμ-

μα μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου Μ.Τ., η οποία αποτελείται από τέσσερις γεννήτριες, τον κύριο πίνακα, τους Μ/Σ με δύο δευτερεύοντα τυλίγματα, τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος και τους σύγχρονους κινητήρες.

Οι γεννήτριες Μ.Τ. αποτελούν το κέντρο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κύριοι καταναλωτές είναι δυο σύγχρονοι κινητήρες, οι οποίοι στρέφουν τους ελικοφόρους άξονες του πλοίου.

6.4 Δομή ηλεκτρικών δικτύων Μ.Τ..

Τα ηλεκτρικά δίκτυα Μ.Τ. ως προς τη δομή τους διακρίνονται σε:

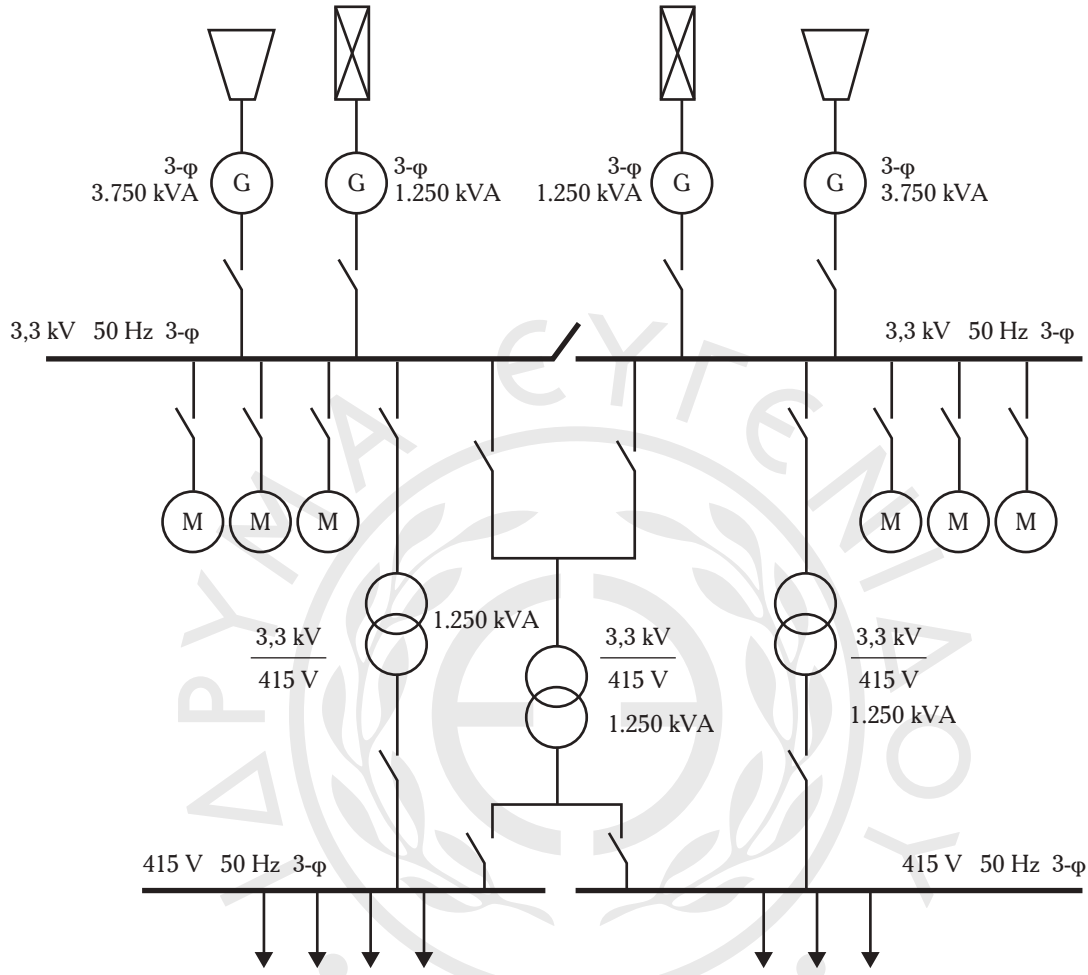
- 1) Απλού ακτινικού τύπου.
- 2) Διπλής παράλληλης συνδέσεως.
- 3) Τύπου κεραίας (antenna).
- 4) Σύνθετο δίκτυο διπλών ζυγών.

Η δομή του δικτύου μιας ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου πρέπει να ικανοποιεί τα εξής κριτήρια:

- 1) Να αξιοποιούνται όλες οι πηγές ισχύος.
- 2) Να υπάρχει η δυνατότητα διακρίσεως των διαφόρων διαμερισμάτων που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ισχύ.

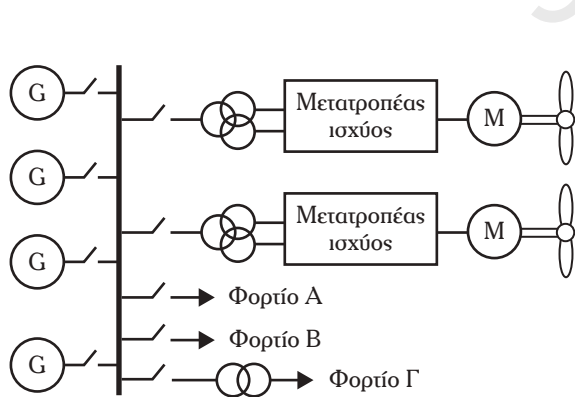
- 3) Να τροφοδοτείται κάθε διαμέρισμα από δύο πηγές ισχύος.
- 4) Να εξασφαλίζεται η ολική ηλεκτρική προστασία του δικτύου. Αναλυτικότερα:

α) Το δίκτυο Μ.Τ. απλού ακτινικού τύπου του σχήματος 6.4α αποτελείται αποκλειστικά από έναν κύριο πίνακα, από τον οποίο τροφοδοτούνται, κυρίως μέσω Μ/Σ, καταναλώσεις χαμηλής τάσεως (Χ.Τ.). Το μει-



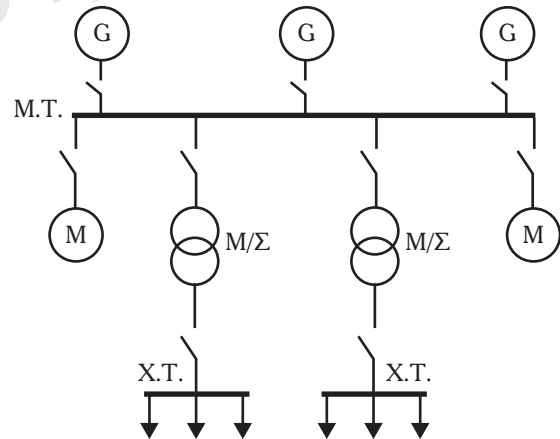
Σχ. 6.3β

Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου πλοίου μεταφοράς Ε/Κ.



Σχ. 6.3γ

Σύστημα ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου, με ηλεκτρική πρόωση.

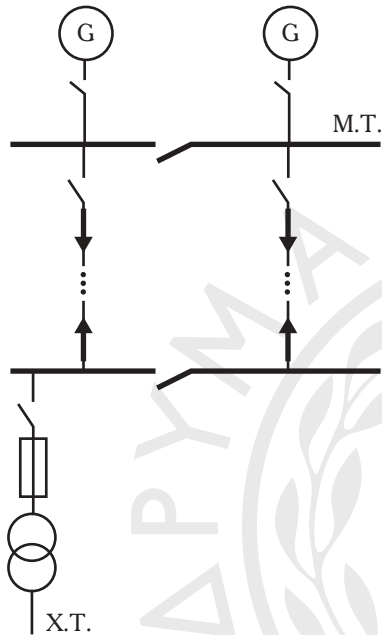


Σχ. 6.4α

Δίκτυο Μ.Τ. απλού ακτινικού τύπου.

ονέκτημα του δικτύου απλού ακτινικού τύπου είναι ότι αν συμβεί μια βλάβη στον κύριο πίνακα, τότε αμφισβητείται η αξιοπιστία των ηλεκτρικών υπηρεσιών του πλοίου.

β) Στο σχήμα 6.4β δίδεται ένα διπλό δίκτυο τύπου antenna, το οποίο εξασφαλίζει τη συνέχεια λειτουργίας στην ηλεκτρική εγκατάσταση του πλοίου στην περίπτωση σφάλματος σε τμήμα του δικτύου ή στην περίπτωση συντηρήσεως κάποιων τμημάτων του ηλεκτρικού δικτύου.

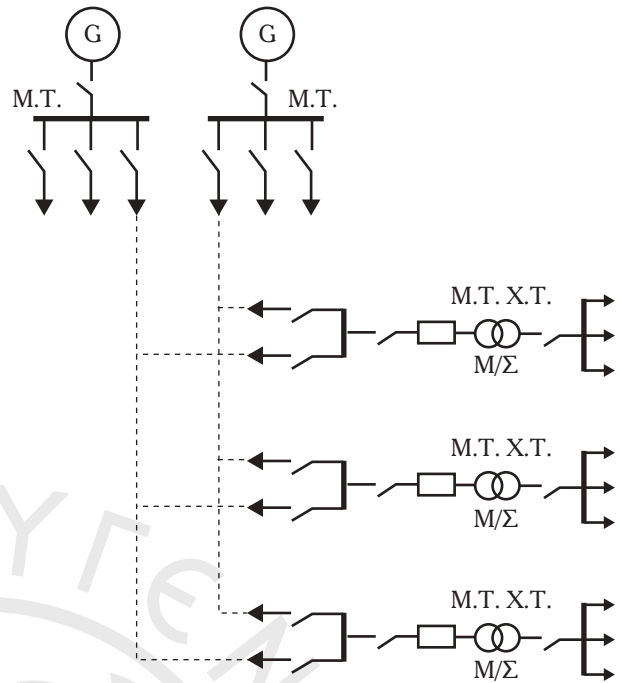


Σχ. 6.4β
Δίκτυο M.T. τύπου antenna.

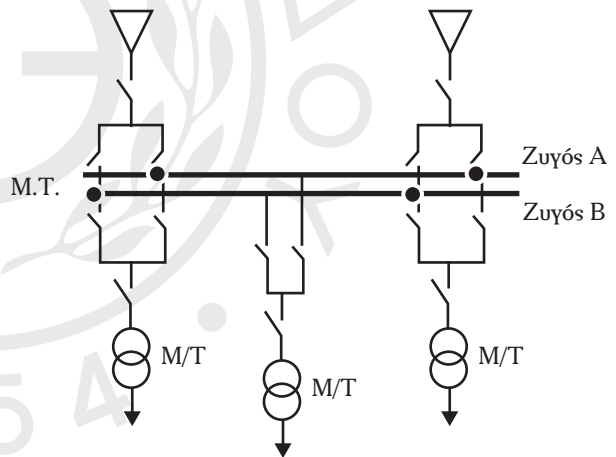
Οι ζυγοί του δικτύου διπλής παράλληλης συνδέσεως του σχήματος 6.4γ ανήκουν στον κύριο πίνακα και συνδέονται κατάλληλα μεταξύ τους. Το δίκτυο διπλής παράλληλης συνδέσεως ενισχύει τη συνέχεια λειτουργίας, γιατί στην περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο που τροφοδοτείται από έναν ζυγό υπάρχει η δυνατότητα τροφοδοτήσεως από το δίκτυο τροφοδοσίας του άλλου ζυγού με κατάλληλη παράλληλη σύνδεσή του.

Ένα άλλο δίκτυο, το οποίο εξασφαλίζει τη συνέχεια λειτουργίας και εγγυάται την αξιοπιστία της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως πλοίου δίδεται στο σχήμα 6.4δ.

Το δίκτυο αυτό αποτελείται από κύριο πίνακα M.T. ο οποίος περιλαμβάνει δύο συστήματα ζυγών. Όταν συμβεί μια διακοπή ή ένα σφάλμα στην κύρια γραμμή τροφοδοσίας δεν διακόπτεται η συνέχεια λειτουργίας της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως λόγω των συστημάτων διπλού ζυγού.



Σχ. 6.4γ
Δίκτυο διπλής παράλληλης συνδέσεως.



Σχ. 6.4δ
Σύνθετο δίκτυο διπλών ζυγών ακτινικού τύπου.

6.5 Ασφάλειες, διακόπτες, ηλεκτρικά καλώδια και πίνακες σε εγκαταστάσεις M.T. ενός πλοίου.

6.5.1 Ασφάλειες M.T..

Οι ασφάλειες M.T. προστατεύουν κυκλώματα M.T. όταν σε αυτά εκδηλώνονται βραχυκυκλώματα αλλά και υπερφορτίσεις που διαρκούν αρκετή ώρα.

Οι ασφάλειες M.T. διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

1) Στις **ασφάλειες εκτονώσεως** (κανονισμοί IEC 282-2), και

2) στις **ασφάλειες σκόνης** [κανονισμοί IEC 282-1 και (DIN) VDE 670].

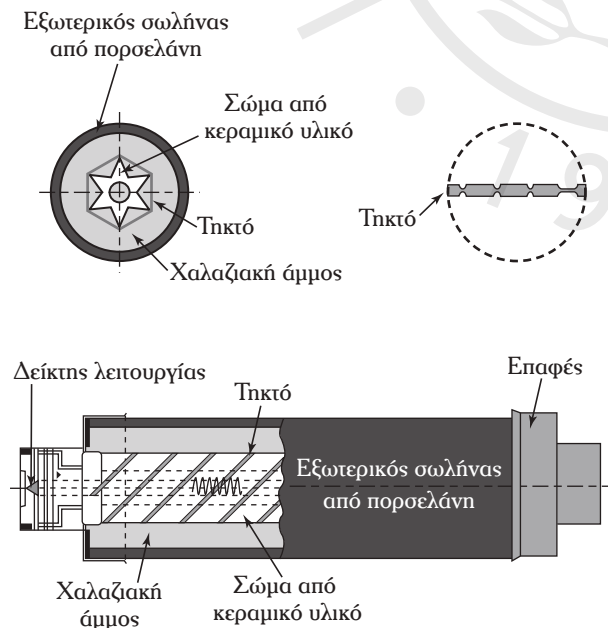
Οι ασφάλειες εκτονώσεως (σχ. 6.5α) χρησιμοποιούνται μόνο από τη ΔΕΗ, σε υπαίθριες εγκαταστάσεις και ασφαλίζουν διακλαδώσεις δικτύων Μ.Τ..



Σχ. 6.5α

Ασφάλεια εκτονώσεως σε κατάσταση λειτουργίας.

Οι ασφάλειες σκόνης (σχ. 6.5β) έχουν ένα σώμα από κεραμικό υλικό, πάνω στο οποίο είναι τυλιγμένος (σε μορφή σπείρας) ο αγωγός και το τηκτό, το οποίο μπορεί να είναι κράμα αργύρου για να έχετε τη μικρότερη δυνατή αντίσταση. Ο τυλιγμένος αγω-



Σχ. 6.5β

Μέρη μιας ασφάλειας σκόνης.

γός βρίσκεται σε χαλαζιακή άμμο. Το εξωτερικό περιβλήμα είναι από πορσελάνη.

Όταν το ρεύμα πάρει τιμές μεγαλύτερες από μία κρίσιμη τιμή, τότε ο αγωγός τήκεται σε ένα ή περισσότερα σημεία, ώστε η εκλυόμενη ενέργεια από το αναπτυσσόμενο ηλεκτρικό τόξο απορροφάται από τη χαλαζιακή άμμο, η οποία λιώνει και μετατρέπεται σε πορσελάνη.

Οι ασφάλειες σκόνης έχουν την δυνατότητα να περιορίζουν το ρεύμα βραχυκυκλώσεως, γι' αυτό ονομάζονται και **Ασφάλειες Υψηλής Ικανότητας Διακοπής** (High Rupturing Capacity – HRC).

Οι ασφάλειες HRC διαθέτουν έναν δείκτη λειτουργίας, που συγκρατείται με ελατήριο. Όταν η ασφάλεια λειτουργήσει, το ελατήριο απελευθερώνεται και ο δείκτης εξέρχεται απ' το σώμα της ασφάλειας.

Η λειτουργία του δείκτη είναι διπλή. Πρώτον δείχνει ότι η ασφάλεια έχει λειτουργήσει, οπότε πρέπει να αντικατασταθεί, και δεύτερον χτυπά με δύναμη την άκρη ενός πλαστικού μοχλού, ο οποίος με τη βοήθεια ενός μηχανισμού δίδει εντολή αποζεύξεως του διακόπτη φορτίου.

Στις ασφάλειες Μ.Τ., γενικά, υπάρχει μία πινακίδα στην οποία είναι καταγεγραμμένος ο τύπος της ασφάλειας και τα ονομαστικά της στοιχεία.

Υπάρχουν δύο τύποι ασφαλειών: ο τύπος CEF που χρησιμοποιείται για προστασία μιας εγκαταστάσεως Μ.Τ. σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο (π.χ. προστασία Μ/Σ) και ο τύπος CMF που χρησιμοποιείται για την προστασία των κινητήρων.

Η ονομαστική τάση (V_n) είναι η μέγιστη πολιτική τάση του δικτύου στην οποία μπορεί να λειτουργήσει συνεχώς η ασφάλεια.

Το ονομαστικό ρεύμα (I_n) είναι το ρεύμα το οποίο διαρρέει συνεχώς την ασφάλεια χωρίς να λιώνει το τηκτό.

Το ελάχιστο ρεύμα διακοπής (I_3) είναι το ελάχιστο ρεύμα το οποίο προκαλεί την τήξη και διακοπή της ασφάλειας. Η τιμή του I_3 είναι 3 έως 5 φορές το ονομαστικό ρεύμα (I_n).

Το μέγιστο ρεύμα διακοπής (I_1) είναι το ρεύμα σφάλματος το οποίο μπορεί να διακόψει η ασφάλεια. Αυτή η τιμή είναι υψηλή και περιλαμβάνεται μεταξύ 20 kA και 36 kA.

Για να διακοπεί το ρεύμα, δεν είναι αναγκαίο να λιώσει το τηκτό της ασφάλειας. Αν το ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι μικρότερο του I_3 η ασφάλεια τήκεται αλλά δεν διακόπτεται απαραίτητα και το ρεύμα.

Γι' αυτόν τον λόγο πρέπει να αποφεύγεται η λειτουργία της ασφάλειας μεταξύ I_n και I_3 (σχ. 6.5γ).

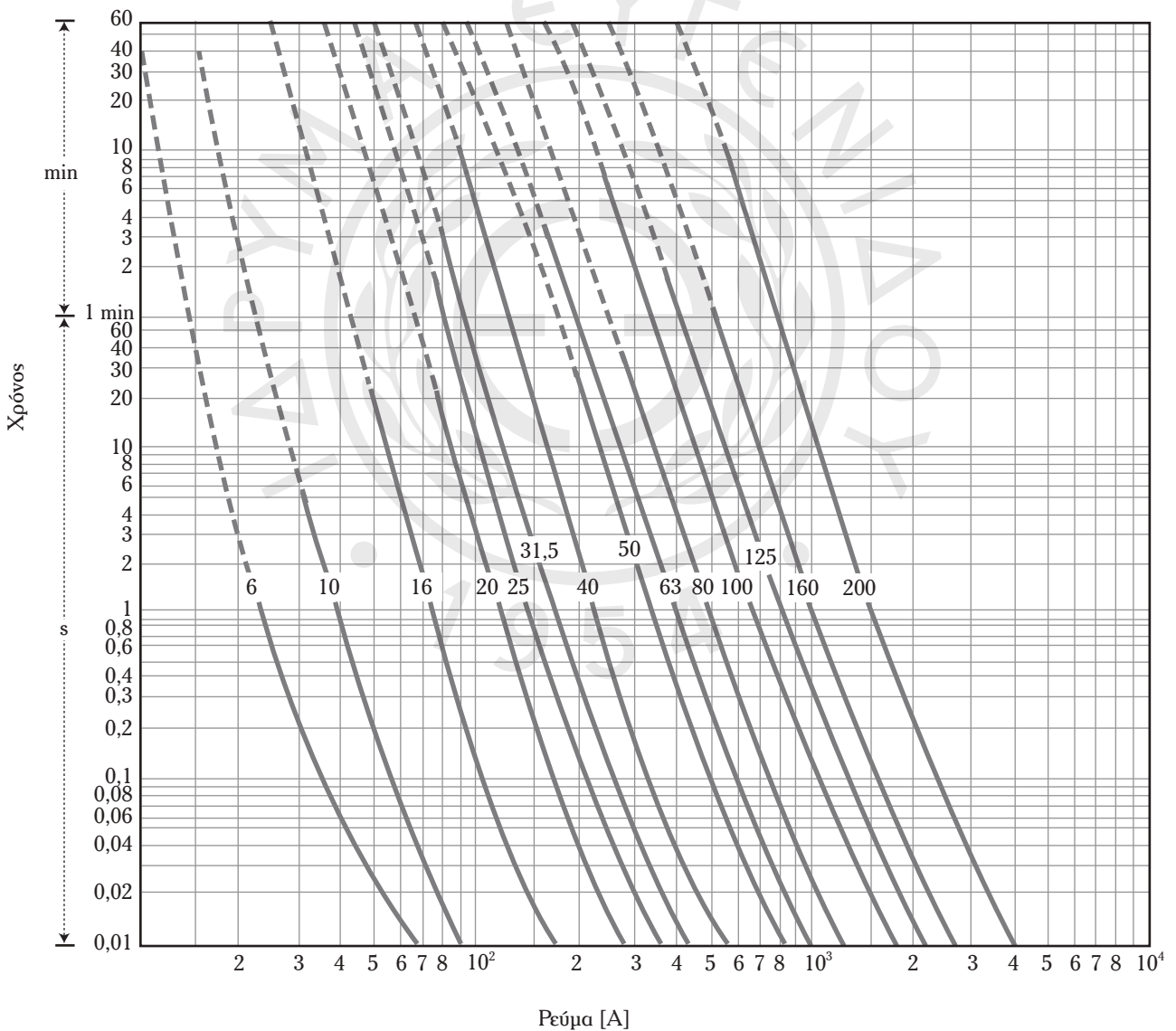
1) Χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου τήξεως-ρεύματος των ασφαλειών HRC.

Προκειμένου να γίνει σωστή επιλογή της ασφάλειας, που θα χρησιμοποιηθεί σε δίκτυα Μ.Τ., είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τον χρόνο τον οποίο χρειάζεται η ασφάλεια για να διακόψει το ρεύμα βραχυκυκλώσεως. Στο σχήμα 6.5δ, δίδονται οι βασικές καμπύλες οι οποίες δίδουν τον χρόνο τήξεως σε συνάρτηση με το ρεύμα.

Οι δύο άξονες χρόνος και ρεύμα είναι βαθμονομημένοι λογαριθμικά για να περιοριστεί η έκταση του διαγράμματος. Το αριστερό τμήμα κάθε χαρακτηριστικής καμπύλης



Σχ. 6.5γ
Ορισμός των ρευμάτων λειτουργίας μιας ασφάλειας HRC.



Σχ. 6.5δ
Χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου τήξεως σε συνάρτηση με το ρεύμα σε ασφάλεια σκόνης.

είναι με διακεκομμένη γραμμή και δείχνει την περιοχή στην οποία πρέπει να αποφεύγεται η λειτουργία της ασφάλειας.

2) Χαρακτηριστικές περιορισμού του αναμενόμενου ρεύματος βραχυκυκλώσεως (I_k).

Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά των ασφαλειών HRC είναι η δυνατότητα τους να περιορίζουν το ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_k (prospective short circuit current).

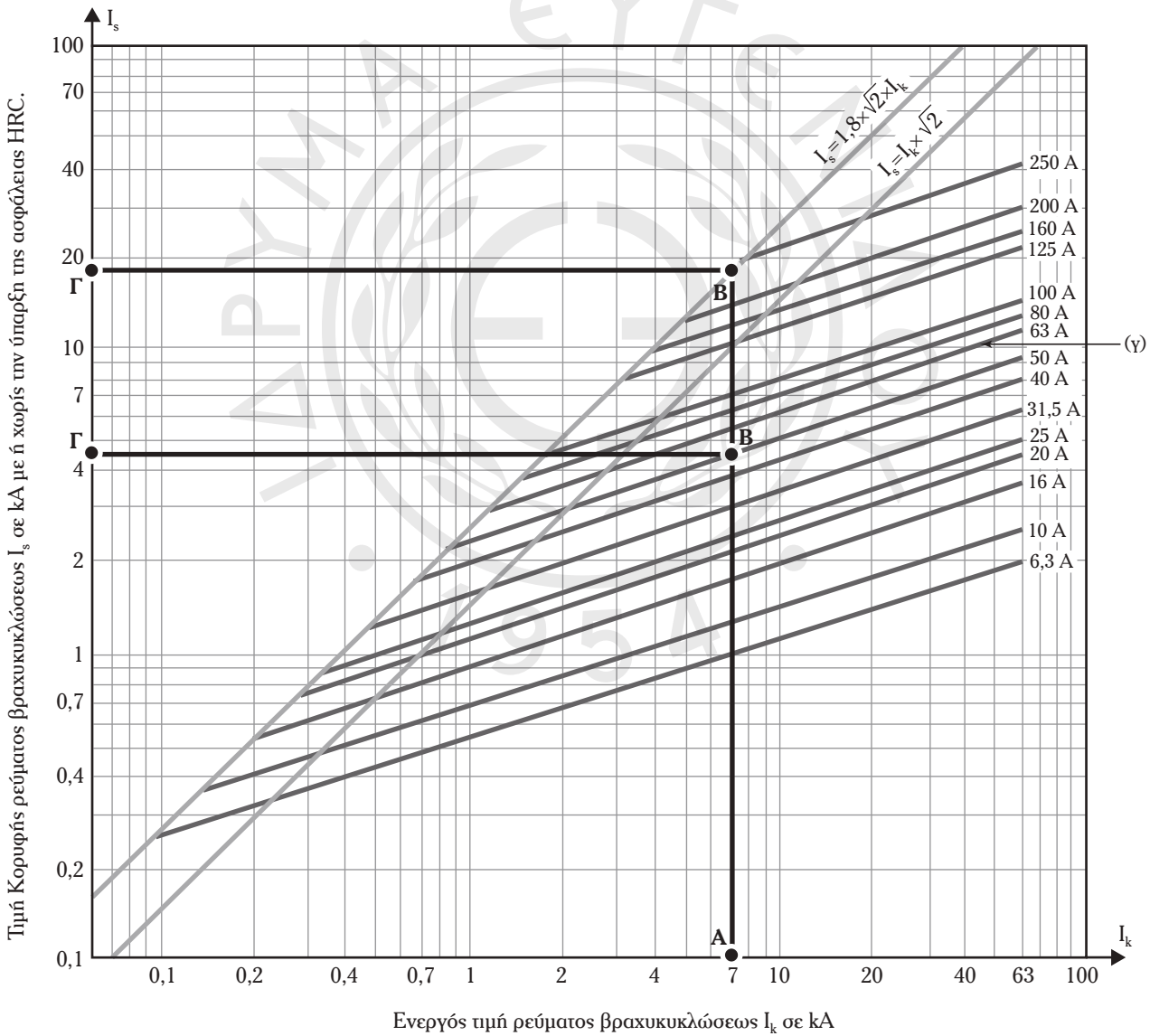
Στο σχήμα 6.5ε δίδονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες οι οποίες περιορίζουν το ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

Ο οριζόντιος άξονας του διαγράμματος του σχή-

ματος 6.5ε, είναι βαθμονομημένος σε kA και δίδει την ενεργό τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως (I_k). Ο κάθετος άξονας είναι και αυτός βαθμονομημένος σε kA και δίδει την Τιμή Κορυφής (Peak Value) του ρεύματος βραχυκυκλώσεως με ή χωρίς την ύπαρξη της ασφάλειας HRC.

- Λυμένη άσκηση.

Ένας Μ/Σ ονομαστικής φαινομένης ισχύος 630 kVA προστατεύεται από βραχυκύκλωμα με ασφάλειες HRC ονομαστικού ρεύματος $I_{ov} = 50$ A. Η ενεργός τιμή του αναμενόμενου ρεύματος βραχυκυκλώσεως είναι $I_k = 7$ kA. Να βρείτε:



Σχ. 6.5ε
Χαρακτηριστικές καμπύλες περιορισμού του ρεύματος βραχυκυκλώσεως.

- 1) την κορυφή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_s , και
- 2) την τιμή κορυφής του ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_s , αν δεν υπήρχε ασφάλεια.

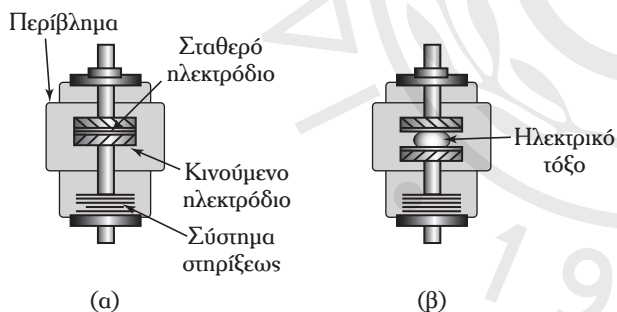
Λύση.

Φέρομε κάθετο στο σημείο Α (σχ. 6.5ε) που αντιστοιχεί στην τιμή $I_k = 7 \text{ kA}$, η οποία κόβει την πλάγια γραμμή (γ) της ασφάλειας 50 A στο σημείο Β. Από το σημείο Β φέρομε οριζόντια ευθεία η οποία τέμνει τον άξονα I_s στο σημείο Γ, το οποίο αντιστοιχεί στην τιμή 4,5 kA. Στην περίπτωση κατά την οποία δεν υπήρχε ασφάλεια, η κορυφή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως θα ήταν $I_s = 18 \text{ kA}$.

Η ασφάλεια HRC περιόρισε το ρεύμα I_s από 18 kA σε 4,5 kA δηλαδή τέσσερις φορές. Οπότε ο εξοπλισμός Μ.Τ. καταπονείται τέσσερις φορές λιγότερο.

6.5.2 Διακόπτες Μ.Τ..

Στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων Μ.Τ. δεν χρησιμοποιούνται πλέον διακόπτες αέρος (τύπου DIARC). Συνήθως, χρησιμοποιούνται οι διακόπτες κενού (σχ. 6.5στ) και οι διακόπτες εξαφθοριούχου θείου SF6 (σχ. 6.5ζ).



Σχ. 6.5στ

Διακόπτες κενού όταν είναι (α) κλειστός και (β) στη φάση αποκολλήσεως των επαφών του.

1) Αυτόματοι διακόπτες κενού.

Οι διακόπτες κενού χρησιμοποιούν σαν μονωτικό υλικό το κενό, δηλαδή την έλλειψη οποιουδήποτε αερίου.

Στον χώρο σβέσεως του ηλεκτρικού τόξου δημιουργείται κενό της τάξεως 10^{-3} Pa .

Το απόλυτο κενό είναι το τέλει μονωτικό. Αυτοί οι διακόπτες χαρακτηρίζονται από ικανότητα διακοπής υψηλής συχνότητας και πολύ υψηλό ρυθμό



Σχ. 6.5ζ

Αυτόματος διακόπτης εξαφθοριούχου θείου SF6.

αποκαταστάσεως της διηλεκτρικής αντοχής μετά τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου.

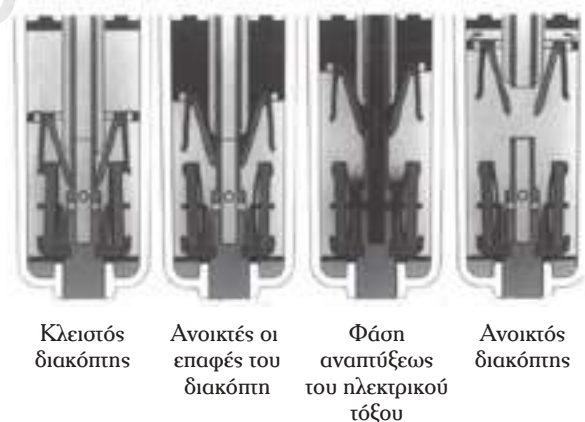
2) Αυτόματοι διακόπτες εξαφθοριούχου θείου SF6.

Το εξαφθοριούχο θείο είναι αδρανές αέριο το οποίο προσβάλλει τα μεταλλικά, πλαστικά και συνθετικά εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται ένας διακόπτης Μ.Τ..

Το SF6 έχει μεγάλο οικονομικό κόστος γι' αυτό δεν αφήνεται ελεύθερο στην ατμόσφαιρα αλλά διατηρείται σε κλειστό κύκλωμα, οπότε κάνει αθόρυβη τη λειτουργία του διακόπτη.

Με το εξαφθοριούχο θείο το σβήσιμο του τόξου γίνεται ταχύτερα, ενώ ο διακόπτης είναι λιγότερο ογκώδης από τον αντίστοιχο διακόπτη αέρος.

Στο σχήμα 6.5η δίδονται οι φάσεις λειτουργίας ενός διακόπτη SF6.



Κλειστός διακόπτης

Ανοικτές οι επαφές του διακόπτη

Φάση αναπτύξεως του ηλεκτρικού τόξου

Ανοικτός διακόπτης

Σχ. 6.5η

Φάσεις λειτουργίας του διακόπτη SF6.

6.5.3 Καλώδια Μ.Τ..

Τα καλώδια τα οποία χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις Μ.Τ. διακρίνονται σε **μονοπολικά** και **τριπολικά** (πίν. 6.5.1). Το μονωτικό υλικό και το πάχος του καθορίζουν την ηλεκτρική αντοχή του καλωδίου, αλλά και την επιτρεπόμενη τιμή του ρεύματος φόρτισης του αγωγού, γιατί αυτή είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας στην οποία αντέχει το μονωτικό.

Τα μονωτικά υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στη Μ.Τ. είναι κυρίως το Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), το Αιθυλενίουχο προπυλαινίουχο ελαστικό (EPR) και το Δικτυωμένο πολυαιθυλένιο (XLPE). Γενικά, στη Μ.Τ. χρησιμοποιείται το πολυαιθυλένιο γιατί έχει χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες και είναι μηχανικά και χημικά ανθεκτικό. Η θερμοκρασιακή του αντο-

χή είναι αξιόλογη. Επιτρέπονται θερμοκρασίες μέχρι 70°C συνεχώς. Το δικτυωμένο πολυαιθυλένιο έχει καλύτερη συμπεριφορά στη διαρκή θερμοκρασιακή καταπόνηση. Αντέχει μέχρι 90°C συνεχώς.

Στον πίνακα 6.5.1 δίδονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός τυπικού καλωδίου Μ.Τ. ναυτικού τύπου.

Στον πίνακα 6.5.2 δίδονται τα στοιχεία επιλογής και παραγγελίας ενός τυπικού καλωδίου Μ.Τ. ναυτικού τύπου.

Τα καλώδια γενικά, στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων καταπονούνται μηχανικά (το πλοίο μπορεί να πάρει απότομες κλίσεις κ.λπ.) οπότε πρέπει να έχουν κατάλληλη μηχανική ενίσχυση. Συνήθως για καλώδια μόνιμης εγκαταστάσεως επιτυγχάνεται μηχανική ενίσχυση με καλύβδινες ταινίες.

Πίνακας 6.5.1
Τεχνικά χαρακτηριστικά ενός καλωδίου Μ.Τ. ναυτικού τύπου.

Όνομασία του καλωδίου	SIENOPYR-FR
Είδος αγωγού (Κανονισμός IEC 60092-350)	Χαλκός
Εσωτερική μόνωση	Πολυμερές παράγωγο
Κύρια μόνωση (Κανονισμός IEC 60092-354)	Ελαστικό αιθυλενίου-προπυλενίου (EPR)
Εξωτερική μόνωση	Ελαστικό οξικού βινυλαιθυλίου (EVA)

Πίνακας 6.5.2
Δεδομένα επιλογής και παραγγελίας ενός καλωδίου Μ.Τ. ναυτικού τύπου.

Διατομή και αριθμός αγωγών (mm ²)	Χαρακτηριστικός αριθμός παραγγελίας	Εξωτερική διάμετρος (max) (mm)	Ακτίνα καμπυλότητας (mm)	Καθαρό βάρος (kg/km)	Χωρητικότητα (μF/km)	Αντεπαγωγή (mH/km)	Φόρτιση σε Ampere (A)
MMGCGCH							
1×35	5BG3 905	25,5	383,0	1.180	0,300	0,285	145
1×50	5BG3 906	27,0	405,0	1.320	0,330	0,275	180
1×70	5BG3 907	28,5	428,0	1.580	0,380	0,260	225

(συνεχίζεται)

Διατομή και αριθμός αγωγών (mm ²)	Χαρακτηριστικός αριθμός παραγγελίας	Εξωτερική διάμετρος (max) (mm)	Ακτίνα καμπυλότητας (mm)	Καθαρό βάρος (kg/km)	Χωρητικότητα (μF/km)	Αυτεπαγωγή (mH/km)	Φόρτιση σε Ampere (A)
1×95	5BG3 908	31,0	465,0	1.930	0,420	0,250	275
1×120	5BG3 910	32,0	480,0	2.160	0,460	0,245	320
1×150	5BG3 911	33,5	503,0	2.570	0,500	0,235	365
1×185	5BG3 912	36,0	540,0	3.020	0,550	0,230	415
1×240	5BG3 913	39,0	585,0	3.750	0,610	0,220	490
1×300	5BG3 914	41,0	615,0	4.370	0,670	0,215	560
MMGCECH							
3×25	5BG3 917	45,0	675,0	3.390	0,275	0,300	—
3×35	5BG3 915	48,0	720,0	3.850	0,300	0,285	102
3×50	5BG3 916	50,0	750,0	4.360	0,330	0,275	126
3×70	5BG3 900	56,0	840,0	5.400	0,380	0,260	158
3×95	5BG3 901	60,0	900,0	6.600	0,420	0,250	193
3×120	5BG3 902	63,0	945,0	7.600	0,460	0,245	224
3×150	5BG3 903	67,0	1.005,0	—	0,500	0,235	256

6.5.4 Πίνακες Μ.Τ..

Μια εγκατάσταση Μ.Τ. γίνεται αποκλειστικά σε κλειστούς χώρους. Κατά την υλοποίηση της εγκατάστασης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:

1) Πρέπει να φαίνονται από τον εξωτερικό χώρο οι ορατές επαφές των αποζευκτών και να γίνονται χειρισμοί απ' έξω χωρίς να κινδυνεύει η ζωή των χειριστών.

2) Όταν δημιουργείται ένα σφάλμα (βραχυκύκλωμα) το ηλεκτρικό τόξο πρέπει να περιορίζεται και να μην προκαλεί ζημιές σε γειτονικές συσκευές.

3) Στην περίπτωση εμφάνισης σφάλματος πρέπει να υπάρχει δυνατότητα διαφυγής των αερίων.

Σημαντικό στοιχείο μιας εγκατάστασης Μ.Τ. είναι ο πίνακας Μ.Τ., ο οποίος για τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων κατασκευάζεται με βάση τον κανονισμό IEC 62271-200.

Κάθε πίνακας Μ.Τ. αποτελείται από ένα ορισμένο αριθμό πεδίων με έναν αντίστοιχο αριθμό διαμερισμάτων.

Πεδία: Είναι κλειστές κατασκευές και περιλαμβάνουν τις συσκευές του κύριου ηλεκτρικού κυκλώματος (είναι το ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο συνδέει τις γεννήτριες πλοίων με τον πίνακα Μ.Τ.).

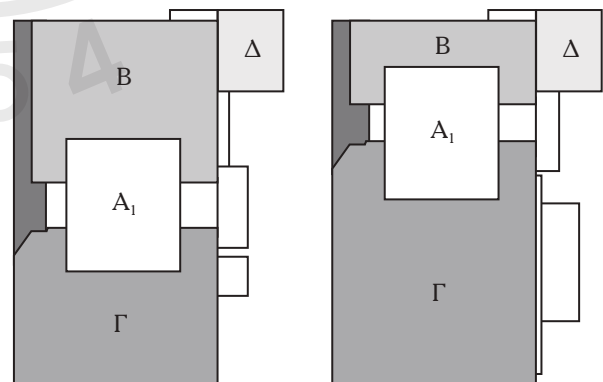
Διαμερίσματα: είναι ένα μέρος ενός πεδίου το οποίον περιλαμβάνει μέρη του κυρίου κυκλώματος.

Στο σχήμα 6.50, δίδονται μερικά παραδείγματα πινάκων Μ.Τ. οι οποίοι περιλαμβάνουν διάφορα διαμερίσματα του εξοπλισμού τους.

Ο κανονισμός IEC 62271-200 καθορίζει τα πεδία ενός πίνακα Μ.Τ. με τα ακόλουθα κριτήρια:

1) Συνέχεια λειτουργίας στην περίπτωση συντηρήσεως των συσκευών τις οποίες περιλαμβάνουν τα πεδία.

2) Αναγκαιότητα ή όχι να δρομολογείται συντήρηση στα πεδία.



A₁: Αποζεύκτης - διακόπτης/διακόπτης

B: Κυψέλη ζυγών

Γ: Κυψέλη αναχωρήσεως - αφίξεως καλωδίων/διακόπτης

Δ: Κυψέλη Χαμηλής Τάσεως (Χ.Τ.)

Σχ. 6.50

Διάφοροι πίνακες Μ.Τ. (κανονισμός IEC 62271-200).

3) Μείωση του κινδύνου χειρισμών και του κόστους συντηρήσεως.

Ο κανονισμός IEC 62271-200 εισάγει την παράμετρο «απώλεια της συνέχειας λειτουργίας» LSC (Loss of service continuity) με βάση την οποία κατηγοριοποιούνται τα πεδία των πινάκων Μ.Τ.:

1) **LSC1:** Είναι τα πεδία ενός πίνακα Μ.Τ. (σχ. 6.5ι) τα οποία περιλαμβάνουν ένα ή περισσότερα διαμερίσματα. Όταν ένα διαμέρισμα είναι εκτός λειτουργίας, για λόγους συντηρήσεως, τότε ο πίνακας Μ.Τ. πρέπει να είναι εκτός λειτουργίας.

Οι αποζεύκτες και γειωτές είναι διακόπτες οι οποίοι ανοίγουν ένα κύκλωμα υπό ελάχιστο φορτίων και υπό ελάχιστη τάση.

2) **LSC2:** Είναι τα πεδία ενός πίνακα Μ.Τ. (σχ. 6.5ια) για τα οποία όταν η λειτουργία των διαμερισμάτων αναχωρήσεως-αφίξεως των καλωδίων ισχύος έχει διακοπεί, τουλάχιστον ένας ζυγός είναι υπό τάση και όλα τα υπόλοιπα πεδία του πίνακα λει-

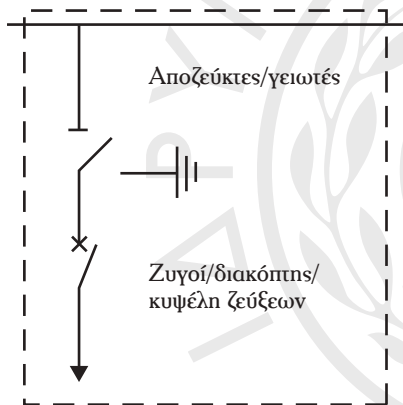
τουργούν κανονικά. Η κατηγορία LSC2 δεν πρέπει να περιλαμβάνει άλλα διαμερίσματα εκτός από τα διαμερίσματα ηλεκτρικών συνδέσεων των καλωδίων ισχύος ζεύξεως και τα διαμερίσματα ζυγών.

Όταν ο πίνακας Μ.Τ. περιλαμβάνει περισσότερα διαμερίσματα τότε οι κατηγορίες LSC2 διακρίνονται στις κατηγορίες LSC2A και LSC2B.

1) **LSC2A:** Στο σχήμα 6.5ιβ, δίδεται η κατηγορία πεδίων LSC2A ενός πίνακα Μ.Τ.

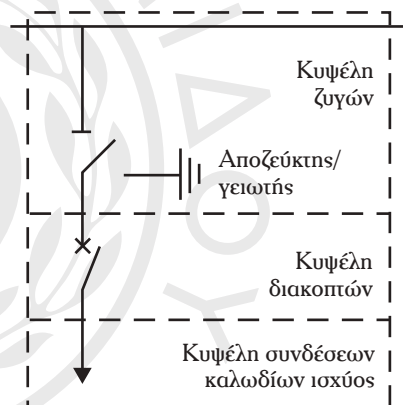
Ο πίνακας Μ.Τ. της κατηγορίας των πεδίων LSC2A περιλαμβάνει περισσότερα διαμερίσματα απ' τον αντίστοιχο πίνακα Μ.Τ. της κατηγορίας πεδίων LSC2. Όταν συντηρείται ένα διαμέρισμα, ο πίνακας Μ.Τ. πρέπει να είναι εκτός λειτουργίας με εξαίρεση το διαμέρισμα των ζυγών το οποίο πρέπει να λειτουργεί κανονικά.

2) **LSC2B:** Στο σχήμα 6.5ιγ, δίδεται η κατηγορία πεδίων LSC2B, ενός πίνακα Μ.Τ..



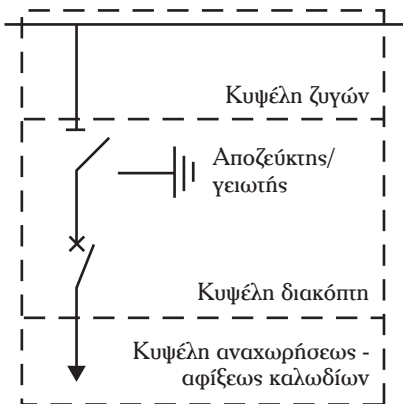
Σχ. 6.5ι

Λειτουργική μονάδα κατηγορίας LSC1.



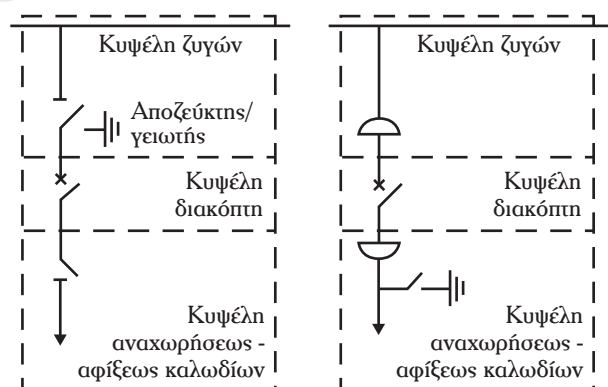
Σχ. 6.5ιβ

Λειτουργική μονάδα κατηγορίας LSC2A.



Σχ. 6.5ια

Λειτουργική μονάδα κατηγορίας LSC2.



Σχ. 6.5ιγ

Λειτουργική μονάδα κατηγορίας LSC2B.

Ο ηλεκτρικός πίνακας Μ.Τ. ο οποίος περιλαμβάνει πεδία της κατηγορίας LSC2B έχει περισσότερα διαμερίσματα από τον πίνακα Μ.Τ. ο οποίος περιλαμβάνει πεδία της κατηγορίας LSC2. Όταν συντηρείται ένα διαμέρισμα, τα αντίστοιχα διαμερίσματα ζυγών και των ηλεκτρικών συνδέσεων των καλωδίων ισχύος είναι υπό τάση.

Στο σχήμα 6.5ιδ, δίδεται ένας πίνακας Μ.Τ. που αποτελείται από πέντε πεδία όλων των κατηγοριών LSC οι οποίες εγγυώνται έναν ορισμένο βαθμό συνέχειας λειτουργίας του πίνακα Μ.Τ..

Στο σχήμα 6.5ιδ, μπορούμε να συντηρήσουμε τον Μ/Σ (δεύτερο πεδίο), ενώ τα υπόλοιπα πεδία να λειτουργούν κανονικά.

Ο κανονισμός IEC 62271-200 καθορίζει τις ακόλουθες κατασκευαστικές λεπτομέρειες για τους πίνακες Μ.Τ.:

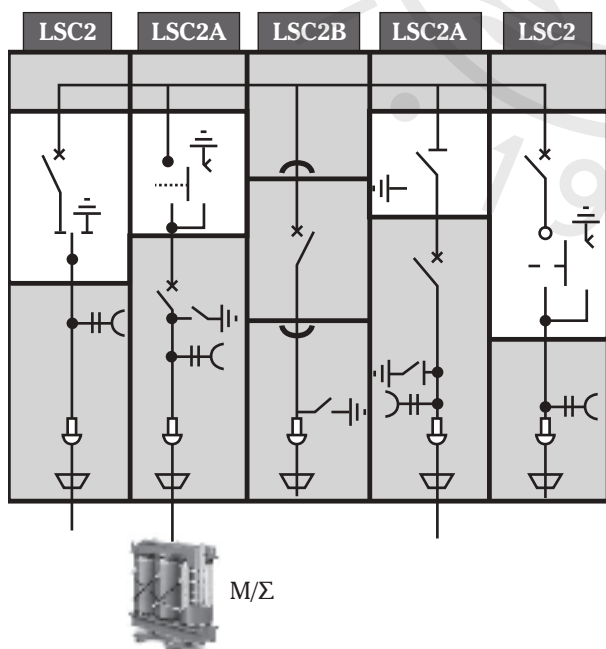
1) **Partition Metallic PM:** τα διαμερίσματα κατασκευάζονται με μεταλλικό υλικό.

2) **Partition Insulation PI:** τα διαμερίσματα επενδύονται με μονωτικό υλικό.

3) **Internal Arc Classification IAC AFLR.**

Ο τύπος του πίνακα Μ.Τ. ο οποίος χρησιμοποιείται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων Μ.Τ. σύμφωνα με τον κανονισμό IEC 622271-200, είναι LSC2B PM IAC FLR.

Οι πίνακες Μ.Τ. των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων ασφαλιζονται κατασκευαστικά κατά τέτοιο



Σχ. 6.5ιδ

Πέντε λειτουργικές μονάδες με βάση την παράμετρο LSC.

τρόπο, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος για τους χειριστές της εγκατάστασης.

Για τον βαθμό προστασίας IP, των ηλεκτρικών πινάκων Μ.Τ., ισχύουν αυτά τα οποία αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.8 για τους πίνακες Χ.Τ..

Επιπρόσθετα ισχύουν τα ακόλουθα:

1) Στους πίνακες μεταλλικής κατασκευής οι βαθμοί προστασίας για το περίβλημα και για τις διαμερίσεις (χωρίσματα) πρέπει να δηλώνονται ξεχωριστά.

2) Στους πίνακες τύπου πεδίου δεν είναι απαραίτητο να αναγράφεται ο βαθμός προστασίας του περιβλήματος.

3) Στα κυκλώματα ισχύος των διαμερισμάτων τα οποία χρησιμοποιούν για μόνωση αέριο δεν είναι απαραίτητο να αναγράφεται ο βαθμός προστασίας.

6.6 Κίνδυνοι στη Μ.Τ..

Η επαφή με την ηλεκτρική τάση είναι γενικά επικίνδυνη. Στα επίπεδα Μέσης Τάσεως (Μ.Τ. >1 kV) η ηλεκτροπληξία είναι θανατηφόρος. Όσο αυξάνονται οι τιμές της τάσεως, τόσο μειώνεται η τιμή της αντιστάσεως του ανθρώπινου σώματος.

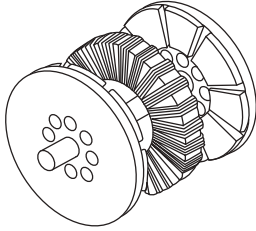
Το προσωπικό, το οποίο εργάζεται σε χώρους Μ.Τ., σε ένα πλοίο, πρέπει να είναι κατάλληλα εκπαιδευμένο και να διαθέτει σχετική πιστοποίηση. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται:

- 1) Κατάλληλος ρουχισμός.
- 2) Κατάλληλα υποδήματα.
- 3) Προστατευτικό κράνος.
- 4) Προστατευτικά μέσα για τα μάτια.

Η πρόσβαση σε χώρους Μ.Τ. πρέπει να είναι αυστηρά ελεγχόμενη και να έχουν γίνει όλες οι απαιτούμενες διαδικασίες απομονώσεως με αντίστοιχες δοκιμές σε ρευματοφόρους αγωγούς και γειώσεις πριν την έναρξη εργασιών.

6.7 Ερωτήσεις.

- 1) Ποιες εγκαταστάσεις χαρακτηρίζονται ως εγκαταστάσεις Μ.Τ.;
- 2) Ποια είναι τα επίπεδα τάσεως, τα οποία χρησιμοποιούνται στη Μ.Τ.;
- 3) Για ποιες ποσότητες ηλεκτρικής ισχύος χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα επίπεδα Μ.Τ.;
- 4) Ποια είναι τα πλεονεκτήματα και ποια τα μειονεκτήματα μιας εγκατάστασεως Μ.Τ.;
- 5) Ποιοι είναι οι τύποι των δικτύων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις Μ.Τ.;
- 6) Τι είδους διακόπτες χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις Μ.Τ.;



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ

7.1 Εισαγωγή.

Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια και ηλεκτρικές μηχανές για την πρόωση των πλοίων ονομάζεται **ηλεκτροπρόωση**. Η ηλεκτροπρόωση χρησιμοποιείται σε κρουαζιερόπλοια, μεγάλα ρυμουλκά, φορτηγά, παγοθραυστικά και σε πολεμικά πλοία. Η ισχύς μιας εγκατάστασης ηλεκτροπρώσεως κυμαίνεται από 5.000 μέχρι 20.000 HP.

Τα είδη της ηλεκτροπρώσεως χαρακτηρίζονται από το είδος της ηλεκτρικής ενέργειας και από τους τύπους των χρησιμοποιούμενων κινητηρίων μηχανών. Η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται με τη μορφή του ΣΡ ή του ΕΡ. Οι κινητήριες μηχανές μπορεί να είναι ατμοστρόβιλοι, μηχανές νίζελ ή αεριοστρόβιλοι.

Για την παραγωγή ΣΡ χρησιμοποιούνται γεννήτριες ΣΡ, ενώ για την περιστροφή του ελικοφόρου άξονα κινητήρες ΣΡ με ανεξάρτητη διέγερση. Για την παραγωγή ΕΡ χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες, ενώ για την ηλεκτρική πρόωση σύγχρονοι και επαγωγικοί κινητήρες. Με τη σύγχρονη τεχνολογία και τη χρησιμοποίηση των ηλεκτρονικών ισχύος σχεδιάζονται εγκαταστάσεις, που χρησιμοποιούν αντιστροφείς, μετατροπείς συχνότητας και ηλεκτρικές μηχανές με διέγερση, η οποία προέρχεται από μόνιμους μαγνήτες. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η επίδοση και η απόδοση της εγκατάστασης πρόωσης.

Στο σχήμα 7.1 δίδεται σχηματικά, μία απλή διάταξη ηλεκτρικής πρόωσης.

Η κίνηση της έλικας, πραγματοποιείται με ηλεκτρικό κινητήρα συνδεδεμένο στον ελικοφόρο άξονα απευθείας ή μέσω μειωτήρα στροφών. Προβλέπεται η εγκατάσταση ορισμένου αριθμού κινητηρίων μη-

χανών-γεννητριών, ώστε να προσφέρεται εφεδρεία και εναλλακτικές λύσεις στην περίπτωση βλάβης χωρίς να υποβαθμίζεται η ικανότητα πρόωσης της εγκατάστασης.

Σε κάθε συγκρότημα πρόωσης προβλέπονται έως τέσσερις ηλεκτρικοί κινητήρες, οι οποίοι συνδέονται στον ελικοφόρο άξονα της έλικας. Όταν χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρικοί κινητήρες και περισσότεροι, η σύνδεσή τους με τον ελικοφόρο άξονα πραγματοποιείται με μειωτήρες στροφών. Όταν χρησιμοποιείται ένας ή δύο ηλεκτρικοί κινητήρες η σύνδεσή τους με τον ελικοφόρο άξονα πραγματοποιείται απευθείας. Οι κινητήριες μηχανές, ιδιαίτερα οι στρόβιλοι είναι ταχύστροφες μηχανές και λειτουργούν με ταχύτητες των 3.000 ΣΑΛ περίπου. Οι μηχανές νίζελ λειτουργούν με ταχύτητες περίπου 1.000 ΣΑΛ.

Για να λειτουργεί, όμως, αποδοτικά η έλικα πρέπει να περιστρέφεται αργά, μέχρι τις 500 ΣΑΛ και με μεγάλη ροπή. Για την προσαρμογή των κινητηρίων μηχανών στον ελικοφόρο άξονα απαιτείται μειωτήρας στροφών, ο οποίος αυξάνει τη ροπή. Η ηλεκτροπρόωση, όμως, προσφέρει και τη δυνατότητα χρησιμοποίησης βραδυστρόφων κινητήρων, μεγάλης ροπής, απευθείας συνδεδεμένους στον ελικοφόρο άξονα, καταργώντας τη χρήση του μειωτήρα.

Τα κύρια **πλεονεκτήματα** της ηλεκτροπρώσεως είναι τα ακόλουθα:

- 1) Η εξοικονόμηση ωφέλιμου χώρου.
- 2) Η μείωση της εγκατεστημένης ισχύος.
- 3) Η μείωση του κόστους λειτουργίας και συντηρήσεως.
- 4) Η μείωση θορύβων και κραδασμών.
- 5) Η μεγάλη δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής της έλικας και της ταχύτητας του πλοίου.
- 6) Η αυξημένη αξιοπιστία και αυξημένη ασφάλεια.
- 7) Η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και ειδικά του NO_x , γιατί ένας μεσόστροφος κινητήρας νίζελ λειτουργεί με σταθερές στροφές στις σύγχρονες εγκαταστάσεις ηλεκτρικής πρόωσης.



Σχ. 7.1

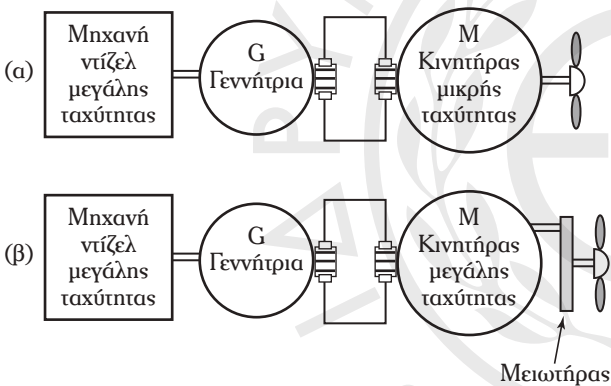
Σχηματική παρουσίαση διατάξεως ηλεκτρικής πρόωσης.

Τα **μειονεκτήματα** της ηλεκτροπρώσεως είναι:

- 1) Το μεγάλο κόστος επενδύσεως και
- 2) οι μεγαλύτερες απώλειες στο σύστημα μεταδόσεως κινήσεως σε σχέση με το αντίστοιχο μηχανικό σύστημα. Σε μία εγκατάσταση ντίζελ-ηλεκτρικής προώσεως το σύστημα μεταδόσεως προκαλεί απώλειες 7–8% στις ηλεκτρικές γεννήτριες, 2% στους Μ/Σ και στους μετατροπείς συχνότητας και 2–3% στους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως. Οπότε ο συνολικός βαθμός αποδόσεως είναι μεγαλύτερος στις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής προώσεως όταν κάθε μηχανή λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα περιστροφής και για μεγάλο χρονικό διάστημα.

7.2 Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων στην ηλεκτρική πρόωση.

Στην ηλεκτρική πρόωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξής δύο τύποι ηλεκτρικών κινητήρων (σχ. 7.2α):



Σχ. 7.2α

Σύνδεση κινητήρα προώσεως:
(α) Απευθείας, (β) με μειωτήρα στροφών.

1) Οι **βραδύστροφοι κινητήρες μεγάλης ροπής**, που συνδέονται απευθείας με τον ελικοφόρο άξονα [σχ. 7.2α(α)]. Για δεδομένη ισχύ, το μέγεθος μιας ηλεκτρικής μηχανής αυξάνει, όταν αυξάνεται η ροπή της κατ' επέκταση ο βραδύστροφος είναι μεγαλύτερος από έναν ταχύστροφο κινητήρα ίδιας ισχύος.

2) Οι **πολύστροφοι κινητήρες** [σχ. 7.2α(β)], που συνδέονται με τον ελικοφόρο άξονα με μειωτήρα στροφών.

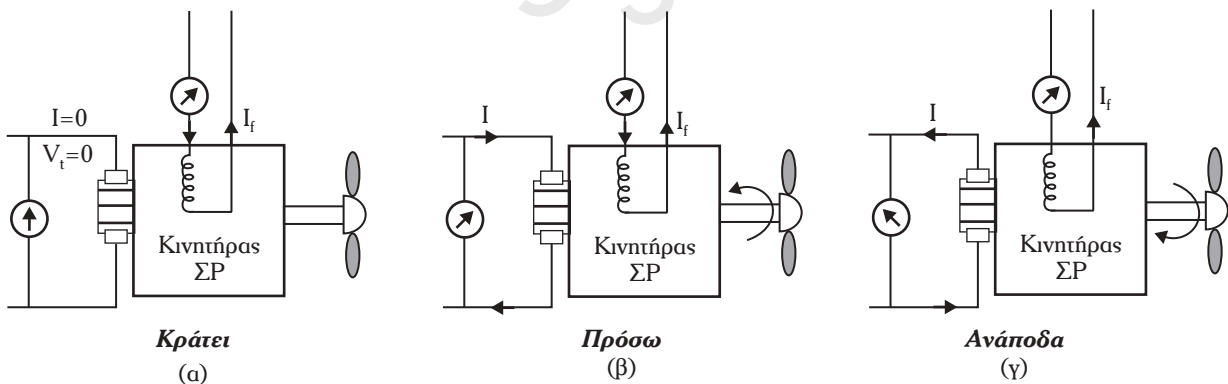
Η ηλεκτρική πρόωση είναι ευέλικτη γιατί ο χειρισμός των ηλεκτρικών μηχανών γίνεται εύκολα και ταχύτερα, συγκριτικά με τον χειρισμό των μηχανών ντίζελ και των στροβίλων.

Στην περίπτωση της ηλεκτρικής προώσεως όταν εκτελείται «κράτει» ή «ανάποδα» δεν σταματά η κινητήρια μηχανή. Όταν μηδενιστεί η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, τότε γίνεται κράτηση της έλικας. Αντιστρέφεται η φορά περιστροφής όταν αντιστραφεί η τάση τροφοδοτήσεως του κινητήρα ΣΡ ή όταν συνδεθούν αντίθετα δύο από τις τρεις φάσεις στους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (σχ. 7.2β). Και στις δύο περιπτώσεις κατά την κίνηση «πρόσω» ή κατά την «ανάποδα» του πλοίου δίδεται εξίσου μεγάλη ισχύ. Σε όλες τις λειτουργικές καταστάσεις του κινητήρα (κράτει, πρόσω, ανάποδα) το τύλιγμα διεγέρσεως του διαρρέεται από ρεύμα διεγέρσεως ίδιας τιμής (I_f).

Στο σχήμα 7.2γ δίδεται η κράτηση (α), η περιστροφή ενός κινητήρα ΕΡ κατά την ορθή φορά (β), και κατά την αντίστροφη (γ). Η διαφορά (γ) και (β) συνίσταται στην εναλλαγή δύο φάσεων (B με C).

Όταν το πλοίο κινείται ομαλά, οι απαιτήσεις ισχύος, ροπής και ταχύτητας περιστροφής της έλικας είναι σταθερές.

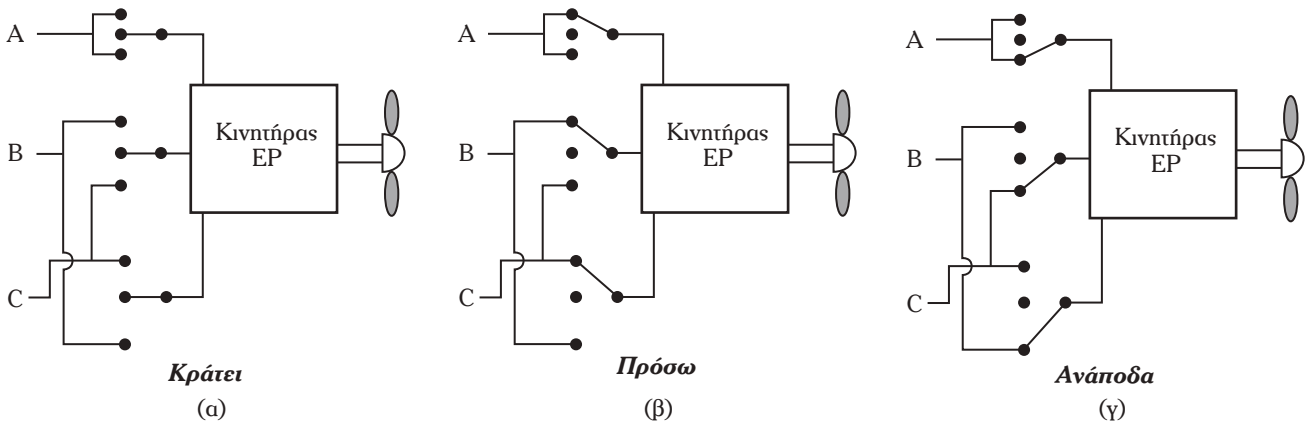
Η ταχύτητα του πλοίου, η ροπή του κινητήρα προώσεως και η απαιτούμενη ισχύς ενός συγκροτήματος



I_f : ρεύμα διεγέρσεως ίδιας τιμής στις αντίστοιχες λειτουργικές καταστάσεις του κινητήρα

Σχ. 7.2β

(α) Κράτηση του κινητήρα, (β) περιστροφή του κινητήρα ΣΡ κατά την ορθή φορά και (γ) κατά την αντίστροφη φορά.



Σχ. 7.2γ

(α) Η κράτηση, (β) η περιστροφή του κινητήρα κατά την ορθή (πρόσω) και (γ) αναστροφή φορά (ανάποδα).

προώσεως, δίδονται από τις εξισώσεις 7.1, 7.2 και 7.3. Η ταχύτητα (v) του πλοίου είναι (κατά προσέγγιση) ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής (n) του ελικοφόρου άξονα:

$$v = K_1 n \text{ (σε κόμβους)}. \quad (7.1)$$

Η ροπή T του κινητήρα προώσεως είναι:

$$T = K_2 n^2 \text{ (N-m)}. \quad (7.2)$$

Η ισχύς του κινητήρα προώσεως είναι:

$$P = 2\pi K_2 \frac{n^3}{60} \text{ (kW)}. \quad (7.3)$$

Οι σταθερές K_1 και K_2 εξαρτώνται από:

- 1) Τη ζύγιση.
- 2) Την κατάσταση του πλοίου και της έλικας από πλευράς επικαθίσωσης θαλασσίων οργανισμών.
- 3) Τον άνεμο.
- 4) Την κατάσταση της θάλασσας.
- 5) Το φορτίο του πλοίου, και
- 6) το βύθισμα του πλοίου κ.λπ..

Τα είδη της ηλεκτρικής προώσεως κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες:

- 1) Ηλεκτρική πρόωση με ΣΡ.
- 2) Ηλεκτρική πρόωση με ΕΡ.

7.3 Ηλεκτρική πρόωση με συνεχές ρεύμα.

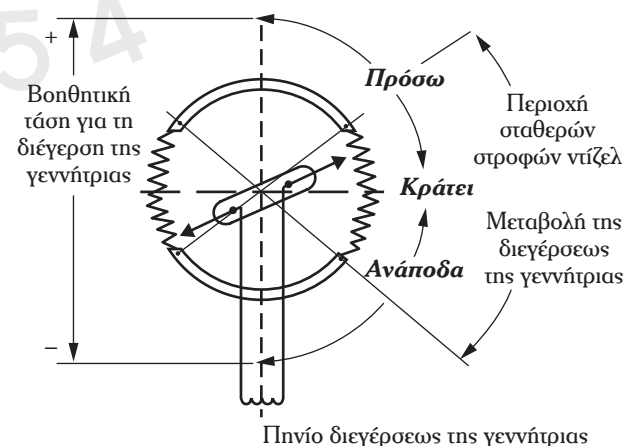
7.3.1 Εισαγωγή.

Η ηλεκτρική πρόωση με ΣΡ είναι η πιο ευέλικτη μέθοδος προώσεως. Το συγκρότημα ηλεκτρικής προώσεως με ΣΡ περιλαμβάνει, συνήθως, μηχανή ντίζελ και γεννήτρια ΣΡ με ανεξάρτητη διέγερση σε διάταξη Ward-Leonard.

Η επιλογή της μηχανής ντίζελ βασίζεται στον μεγα-

λύτερο συντελεστή αποδόσεως. Η αναγκαία ισχύς της προώσεως ρυθμίζεται από τις ηλεκτρικές μηχανές του συγκροτήματος προώσεως. Οι χρησιμοποιούμενες μηχανές ντίζελ κυμαίνονται από μία, σε μικρά συγκροτήματα προώσεως έως τέσσερις σε αντίστοιχα μεγάλα. Η ισχύς τους κυμαίνεται από 200–1.700 HP με 500–1.000 ΣΑΛ αντίστοιχα. Οι μηχανές ντίζελ έχουν δυνατότητα λειτουργίας με μειωμένες στροφές μέχρι 50% του μέγιστου αριθμού στροφών. Οι γεννήτριες ΣΡ συνδέονται απευθείας στις μηχανές ντίζελ. Επιλέγονται γεννήτριες ΣΡ, συνήθως ξένης διεγέρσεως, ώστε η παραγόμενη τάση να καλύπτει μεγάλη περιοχή ρυθμίσεως, τόσο στην ορθή όσο και στην αναστροφή πολικότητας. Τόσο η πολικότητα της παραγόμενης τάσεως, όσο και η τιμή της ρυθμίζεται από την αντίσταση διεγέρσεως, η οποία δίδεται στο σχήμα 7.3α.

Η ισχύς κάθε γεννήτριας κυμαίνεται από 150 έως 1.200 kW με παραγόμενες τάσεις από 220 μέχρι και



Σχ. 7.3α

Η αντίσταση διεγέρσεως της γεννήτριας (γέφυρα Wheatstone).

1.000 V. Ο αριθμός των κινητήρων, οι οποίοι περιλαμβάνονται σε ένα συγκρότημα προώσεως κυμαίνεται από ένας μέχρι τέσσερεις, ανάλογα με την ισχύ προώσεως.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας προώσεως είναι κινητήρας ΣΡ με ανεξάρτητη διέγερση. Η ισχύς κάθε κινητήρα κυμαίνεται από 150 έως και 1.500 kW, ενώ η ταχύτητα περιστροφής τους από 1.000 έως 1.500 ΣΑΛ. Όταν ο κινητήρας συνδέεται απευθείας στον ελικοφόρο άξονα είναι διπλού επαγωγικού τυμπάνου με μέγιστη ταχύτητα μεταξύ 100 και 600 ΣΑΛ και ισχύ από 500 έως και 10.000 kW.

7.3.2 Μια απλή διάταξη προώσεως με ΣΡ.

Προκειμένου να απλουστεύσουμε τη διαδικασία, στο σχήμα 7.3β δίδεται η διάταξη προώσεως με ένα ζεύγος ντιζελογεννήτριας ΣΡ και έναν κινητήρα ΣΡ, συνδεδεμένο στον ελικοφόρο άξονα χωρίς μειωτήρα στροφών.

Η τάση V_t που παράγεται απ' τη γεννήτρια δίδεται από την εξίσωση:

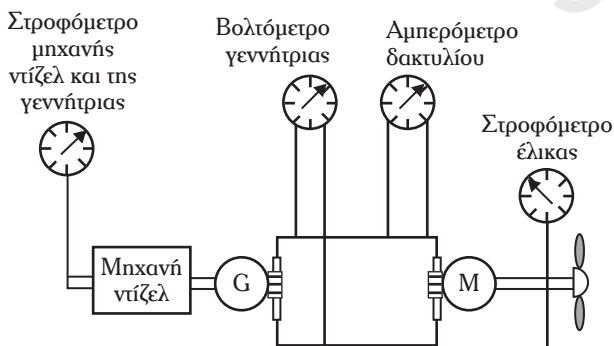
$$V_t = K\Phi n \quad (7.4)$$

όπου: K είναι η σταθερά εξαρτώμενη απ' την κατασκευή της γεννήτριας, Φ η ολική μαγνητική ροή ανά πόλο της γεννήτριας ελεγχόμενη από το ρεύμα διεγέρσεως και n είναι η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας, η οποία καθορίζεται από την ταχύτητα της μηχανής ντίζελ.

Η ροπή, η οποία απαιτείται για να περιστραφεί η γεννήτρια δίδεται από την εξίσωση:

$$T = K\Phi I_a \quad (7.5)$$

όπου I_a το ρεύμα που παρέχει η γεννήτρια στον κινητήρα προώσεως.



Σχ. 7.3β

Διάταξη προώσεως με ένα ζεύγος ντιζελογεννήτριας ΣΡ και έναν κινητήρα συνδεδεμένο στον ελικοφόρο άξονα. Δίδονται και τα όργανα μετρήσεως της διατάξεως προώσεως.

Αντίστοιχα, για τον κινητήρα, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n_m δίδεται απ' την εξίσωση:

$$n_m = \frac{V_t}{K_m \Phi_m} \quad (7.6)$$

όπου: K_m , η σταθερά εξαρτώμενη από την κατασκευή του κινητήρα, και Φ_m η ολική μαγνητική ροή ανά πόλο του κινητήρα, ελεγχόμενη από το ρεύμα διεγέρσεως του κινητήρα.

Το ρεύμα, το οποίο ζητάει ο κινητήρας από τη γεννήτρια δίδεται από την εξίσωση:

$$I_m = I_a = \frac{T_m}{K_m \Phi_m} \quad (7.7)$$

όπου T_m η ροπή την οποία ασκεί ο κινητήρας στον ελικοφόρο άξονα.

Η ροπή T_m είναι ίδια με την ροπή T , η οποία προκύπτει από την εξίσωση 7.2, όταν δεν μεσολαβεί μειωτήρας στροφών. Όταν μεσολαβεί μειωτήρας, τότε η ροπή πολλαπλασιάζεται με το λόγο υποβιβασμού του μειωτήρα.

Από την εξίσωση 7.6, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, μπορεί να μεταβληθεί από την τάση V_t και τη μαγνητική ροή Φ_m . Η ρύθμιση των στροφών του κινητήρα στην ευρεία περιοχή των ταχυτήτων, δεν γίνεται μεταβάλλοντας τη μαγνητική ροή Φ_m , για τους ακόλουθους λόγους:

1) Η περιοχή ρυθμίσεως των στροφών είναι μικρή. Αντιστοιχεί περίπου στο 50% της μέγιστης τιμής των στροφών.

2) Με αύξηση του ρεύματος διεγέρσεως, αυξάνεται η μαγνητική ροή Φ_m και μειώνονται οι στρόφες του κινητήρα. Στο τύλιγμα διεγέρσεως όμως, αναπτύσσεται μεγάλη ισχύς, ενώ, συγχρόνως, η ψύξη του από τον ανεμισμό του κινητήρα είναι μικρή.

3) Με μείωση του ρεύματος διεγέρσεως, ο κινητήρας βρίσκεται σε υψηλές στρόφες. Με μειωμένη μαγνητική ροή Φ_m ο κινητήρας φορτίζεται με μεγάλη ροπή T_m από τον ελικοφόρο άξονα. Το ρεύμα I_m του κινητήρα, με βάση την εξίσωση 7.7, γίνεται μεγάλο. Ο κινητήρας, τότε, αντιμετωπίζει προβλήματα μεταγωγής στον ουδέτερο άξονα και σπινθηρισμών.

Για τους λόγους αυτούς προτιμάται το ρεύμα διεγέρσεως και η μαγνητική ροή του κινητήρα να παραμένουν σταθερά. Η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής (στρόφες) του κινητήρα, καθώς και η αλλαγή της φοράς περιστροφής του, στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται μεταβάλλοντας την τάση V_t της γεννήτριας.

Η τιμή της τάσεως V_t της γεννήτριας είναι ανάλο-

γη της τιμής της ολικής μαγνητικής ροής ανά πόλο και της ταχύτητας περιστροφής της. Η μαγνητική ροή της γεννήτριας εξαρτάται απ' το ρεύμα διεγέρσεως της γεννήτριας και ρυθμίζεται μέσω του ροοστάτη διεγέρσεως, που είναι διατεταγμένη σε γέφυρα Wheatstone (σχ. 7.3α). Η διάταξη αυτή επιτρέπει την ομαλή μετάβαση από την ορθή στην αντίστροφη τροφοδότηση της διεγέρσεως, καθώς και την μηδενική διέγερση, χωρίς διακοπή και επανασύνδεση του κυκλώματος διεγέρσεως. Η ταχύτητα περιστροφής τη γεννήτριας εξαρτάται απ' τον έλεγχο του καυσίμου που γίνεται από τον ρυθμιστή στροφών (Governor) της κινητήριας μηχανής ντίζελ. Η τάση και το ρεύμα διεγέρσεως της γεννήτριας και του κινητήρα, οι στροφές της κινητήριας μηχανής ντίζελ, καθώς και η τάση και το ρεύμα της γεννήτριας και του κινητήρα μετρώνται με στροφόμετρα, βολτόμετρα και αμπερόμετρα αντίστοιχα, τα οποία βρίσκονται στον πίνακα προώσεως (σχ. 7.3β).

7.3.3 Αρχές ηλεκτρικής προώσεως με ΣΡ.

Όταν το συγκρότημα προώσεως είναι σε ετοιμότητα (stand-by), η μηχανή ντίζελ λειτουργεί με τη χαμηλότερη δυνατή ταχύτητα. Το ρεύμα διεγέρσεως της γεννήτριας έχει μηδενική τιμή γιατί ο δρομέας της ρυθμιστικής αντιστάσεως διεγέρσεως βρίσκεται στη θέση «κράτει», όπου η γέφυρα Wheatstone ισορροπεί. Η τάση V_t της γεννήτριας είναι μηδενική. Ο κινητήρας τροφοδοτείται μόνο με ρεύμα διεγέρσεως και δεν περιστρέφεται.

1) Λειτουργία του κινητήρα προώσεως στη μέγιστη ισχύ του.

Στις χαμηλές στροφές της έλικας η μηχανή ντίζελ διατηρεί σταθερές τις ελάχιστες στροφές της. Έστω, τώρα, ότι στη γεννήτρια, μέσω της ρυθμιστικής αντιστάσεως, αυξάνομε το ρεύμα διεγέρσεως, οπότε αναπτύσσεται η τάση V_t . Ο κινητήρας τότε αρχίζει να περιστρέφεται με ταχύτητα που αντιστοιχεί στην τάση V_t και προκύπτει από την εξίσωση 7.6. Το ρεύμα I_m του κινητήρα, που θα ζητηθεί από τη γεννήτρια προσδιορίζεται από τη ροπή T_m του κινητήρα, από την εξίσωση 7.7. Η ροπή T του ελικοφόρου άξονα, είναι ίδια με αυτήν του κινητήρα γιατί δεν μεσολαβεί μειωτήρας, και προκύπτει από την εξίσωση 7.2. Το ρεύμα I_m του κινητήρα διερχόμενο από τη γεννήτρια αναπτύσσει ροπή T , που τείνει να επιβραδύνει τη μηχανή ντίζελ. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η αύξηση της ροπής T της γεννήτριας, χωρίς να μειωθούν οι στροφές της μηχανής ντίζελ, συγχρόνως με την αύξηση της διεγέρσεως

της γεννήτριας, από το ίδιο χειριστήριο, αυξάνεται και η παροχή καυσίμου στη μηχανή ντίζελ.

Η χαμηλή ταχύτητα της μηχανής ντίζελ διατηρείται σταθερή, όσο η τάση V_t μπορεί να ρυθμίζεται με τη διέγερση της γεννήτριας. Όταν η γεννήτρια αποκτήσει τη μέγιστη τιμή της διεγέρσεως, η περαιτέρω αύξηση της τάσεως V_t επιτυγχάνεται με αύξηση των στροφών της μηχανής ντίζελ, διατηρώντας τη μέγιστη διέγερση. Το χειριστήριο ρυθμίσεως της τάσεως της γεννήτριας τότε, κινεί τους δρομείς της ρυθμιστικής αντιστάσεως στις αγωγίμες ταινίες, αντί των αντιστάσεων, διατηρώντας τη διέγερση της γεννήτριας μέγιστη, ενώ συγχρόνως αυξάνει την παροχή καυσίμου στη μηχανή ντίζελ μέχρι τη μέγιστη τιμή. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η λειτουργία του κινητήρα μέχρι τη μέγιστη ισχύ του.

Συμπληρωματική ρύθμιση της μέγιστης ισχύος της εγκαταστάσεως προώσεως είναι δυνατή, ρυθμίζοντας περαιτέρω το ρεύμα διεγέρσεως του κινητήρα. Η υδροδυναμική αντίσταση του πλοίου, η οποία εκφράζεται με τον συντελεστή K_2 των εξισώσεων 7.2 και 7.3, μεταβάλλεται από τις συνθήκες πλου. Εάν η υδροδυναμική αντίσταση είναι μεγάλη, είναι δυνατό να γίνεται υπέρβαση του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος του κινητήρα για τις στροφές του κινητήρα που αντιστοιχούν στη μέγιστη τάση V_t λειτουργίας της γεννήτριας. Τότε οι στροφές του κινητήρα μπορούν να μειωθούν, αυξάνοντας λίγο το ρεύμα διεγέρσεως του κινητήρα. Αντίστοιχα, εάν το ρεύμα είναι μικρότερο του μέγιστου επιτρεπόμενου, μπορεί οι στροφές του κινητήρα να αυξηθούν, μειώνοντας λίγο τη διέγερση του κινητήρα.

2) Μείωση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα προώσεως.

Η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα προώσεως μειώνεται, μειώνοντας τη διέγερση και την ταχύτητα της γεννήτριας. Ο χειρισμός μείωσης της τάσεως τροφοδοσίας του κινητήρα προώσεως γίνεται σχετικά αργά. Όταν η τάση τροφοδοτήσεως του κινητήρα αυξάνεται πολύ, ο κινητήρας δεν προλαβαίνει να μειώσει πολύ την αντι-ΗΕΔ, οπότε μετατρέπεται σε γεννήτρια. Το ρεύμα του κινητήρα αποκτά αντίστροφη διεύθυνση και η γεννήτρια τείνει να στρέψει και να επιταχύνει την κινητήρια μηχανή ντίζελ.

Ο κινητήρας προώσεως περιστρέφεται αντίστροφα, αντιστρέφοντας την πολικότητα της τάσεως V_t της γεννήτριας. Με το χειριστήριο ταχύτητας αντιστρέφεται η πολικότητα της τάσεως, χωρίς να αντιστραφεί η φορά περιστροφής της κινητήριας μηχανής με την

κίνηση του χειριστηρίου ανάποδα απ' τη θέση ισορροπίας της γέφυρας Wheatstone.

Οι δρομείς της ρυθμιστικής αντιστάσεως διεγέρσεως αποκτούν αντίθετο δυναμικό και το ρεύμα διεγέρσεως της γεννήτριας αντίθετη πολικότητα. Στο σχήμα 7.3γ δίδονται οι μεταβολές της ταχύτητας της κινητήριας μηχανής ντζελ και της διεγέρσεως της γεννήτριας σε συνάρτηση με την ταχύτητα του κινητήρα.

7.3.4 Συστήματα προώσεως με κινητήρες ΣΡ.

1) Συστήματα προώσεως με κινητήρες ΣΡ διπλού δρομέα.

Στο σχήμα 7.3δ δίδεται η σχηματική παράσταση ενός συστήματος προώσεως το οποίο περιλαμβάνει δυο ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη (μηχανές ντζελ και γεννήτριες ΣΡ) και ένα σύστημα ηλεκτρικής προώσεως με γεννήτριες (g_1, g_2) και κινητήρες ΣΡ (M_1, M_2) σε σύνδεση σειράς, κινητήρα προώσεως διπλού δρομέα, το οποίο ισοδυναμεί με δυο ομοαξονικούς κινητήρες ΣΡ με ίδια διεγέρση και τη δυνατότητα συνδέσεως των επαγωγικών τυμπάνων σε σειρά ή παράλληλα.

Το σύστημα διεγέρσεως των γεννητριών ΣΡ G_1 και G_2 είναι ένα ανεξάρτητο σύστημα το οποίο αποτελείται από τις γεννήτριες ΣΡ με παράλληλη διεγέρση g_1 και g_2 .

Στο σχήμα 7.3ε δίδεται γραφικά η σχέση ροπής-ταχύτητας του κινητήρα προώσεως του σχήματος 7.3δ για τις αντίστοιχες περιοχές ταχυτήτων και η ανθιστάμενη ροπή T_r , η οποία μετά την εκκίνησή της αυξάνεται με το τετράγωνο της ταχύτητας.

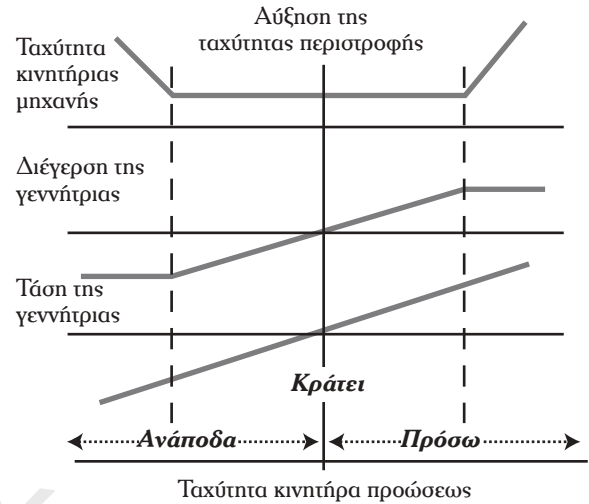
Οπότε για το προωστήριο σύστημα του σχήματος 7.3δ με βάση την γραφική παράσταση του σχήματος 7.3ε διακρίνομε τρεις περιοχές ταχύτητας:

α) **Περιοχή χαμηλών ταχυτήτων n_x :** Στην περίπτωση αυτή οι γεννήτριες ΣΡ συνδέονται παράλληλα και τροφοδοτούν τα επαγωγικά τύμπανα του κινητήρα προώσεως, τα οποία συνδέονται σε σειρά, με αποτέλεσμα η συνολική τάση τυμπάνου να είναι $V_t/2$.

β) **Περιοχή μέσων ταχυτήτων n_μ :** Στην περίπτωση αυτή οι γεννήτριες συνδέονται σε σειρά και τροφοδοτούν τα επαγωγικά τύμπανα του κινητήρα προώσεως, τα οποία συνδέονται σε σειρά, με αποτέλεσμα η συνολική τάση τυμπάνου να είναι V_t .

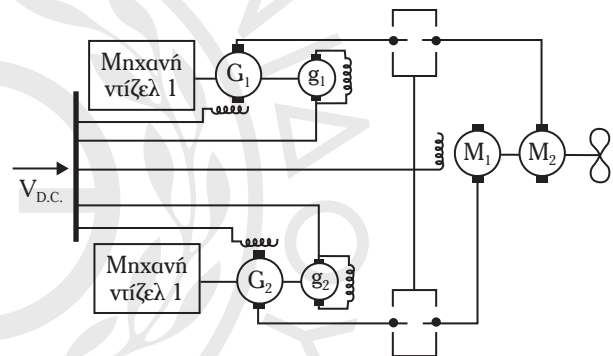
γ) **Περιοχή υψηλών ταχυτήτων n_y :** Στην περίπτωση αυτή οι γεννήτριες ΣΡ συνδέονται σε σειρά και τροφοδοτούν τα επαγωγικά τύμπανα του κινητήρα προώσεως, τα οποία συνδέονται παράλληλα, με αποτέλεσμα η συνολική τάση τυμπάνων να είναι $2V_t$.

Για κάθε περιοχή ταχύτητας είναι δυνατό να μετα-



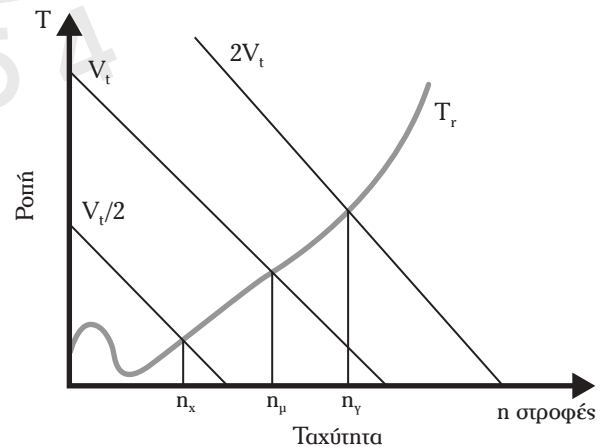
Σχ. 7.3γ

Μεταβολή της ταχύτητας της κινητήριας μηχανής και της διεγέρσεως γεννήτριας σε συνάρτηση με την ταχύτητα του κινητήρα προώσεως.



Σχ. 7.3δ

Σύστημα προώσεως με κινητήρες ΣΡ διπλού δρομέα.



Σχ. 7.3ε

Γραφική παράσταση της σχέσεως ροπής-ταχύτητας, για διάφορες περιοχές ταχυτήτων ενός συστήματος προώσεως με κινητήρες ΣΡ διπλού δρομέα.

βληθεί ακόμα περισσότερο η ροπή, ενεργώντας στη διέγερση του κινητήρα προώσεως. Με αυτόν τον τρόπο ρυθμίζεται και το ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας προώσεως, το οποίο διατηρείται στην τιμή που αντιστοιχεί η μέγιστη απόδοση των γεννητριών ΣΡ.

Υπάρχει, όμως, η δυνατότητα να τροφοδοτηθούν τα επαγωγικά τύμπανα του κινητήρα προώσεως, σε σειρά ή παράλληλη σύνδεση, με μια γεννήτρια ή να τροφοδοτηθεί ένα επαγωγικό τύμπανο με μια ή δυο γεννήτριες ΣΡ, όταν ένα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ή ένα επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα προώσεως είναι έκτος λειτουργίας.

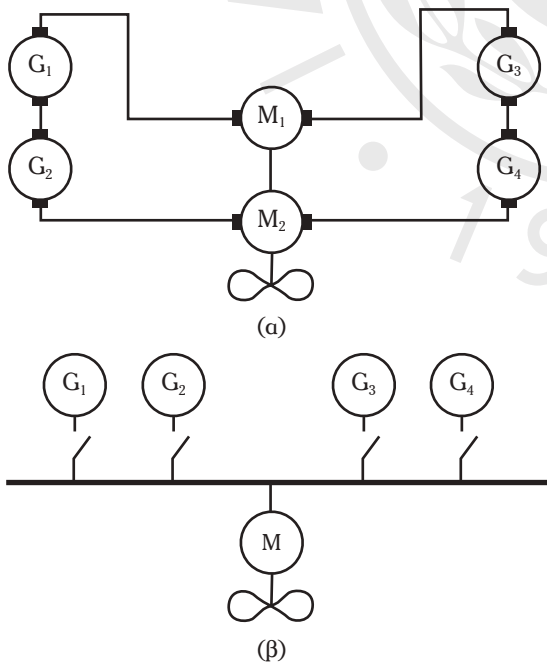
2) Σύστημα προώσεως με τέσσερις γεννήτριες ΣΡ και δύο κινητήρες ΣΡ.

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από δύο έως τέσσερα ζεύγη κινητηρίων μηχανών-γεννητριών, οι γεννήτριες των οποίων συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα.

Στο σχήμα 7.3στ δίδονται τέσσερις γεννήτριες ΣΡ συνδεδεμένες σε σειρά [σχ. 7.3στ(α)], οι οποίες τροφοδοτούν δύο κινητήρες προώσεως, και συνδεδεμένες παράλληλα [σχ. 7.3στ(β)].

α) Σύνδεση γεννητριών ΣΡ σε σειρά.

Το σύστημα συνδεσμολογίας των γεννητριών σε σειρά προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα, οπότε χρη-



Σχ. 7.3στ

Σύστημα ηλεκτρικής προώσεως (α) με γεννήτριες συνδεδεμένες σε σειρά και (β) με γεννήτριες σε παράλληλη σύνδεση.

σιμοποιείται σε μεγαλύτερη έκταση από το σύστημα παράλληλης συνδεσμολογίας.

Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της συνδεσμολογίας είναι ότι η κατανομή του φορτίου μεταξύ των μηχανών είναι ικανοποιητική, ανεξάρτητα από τις μικρές μεταβολές της ταχύτητας των μηχανών και των τάσεων των γεννητριών, γιατί το φορτίο κατανέμεται ανάλογα με την ταχύτητα και την τάση.

Ένα άλλο πλεονέκτημα του συστήματος συνδεσμολογίας σε σειρά είναι ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την πλήρη μηχανική ισχύ, ακόμα και όταν διαθέτουμε λιγότερο από το 100% της ονομαστικής της τιμής, ελαττώνοντας τη διέγερση του κινητήρα μέχρι μιας οριακής τιμής.

Με το σύστημα συνδεσμολογίας σε σειρά μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλήρως η διαθέσιμη μηχανική ισχύς.

β) Σύνδεση γεννητριών παράλληλα.

Η χρησιμοποίηση του συστήματος παράλληλης συνδεσμολογίας απαιτεί οι γεννήτριες ΣΡ να έχουν τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά, ακριβές σύστημα ρυθμίσεως της ταχύτητας των κινητηρίων μηχανών και ακριβές σύστημα ελέγχου της τάσεως των γεννητριών ώστε να εξασφαλιστεί η ισοκατανομή του φορτίου μεταξύ των διαφόρων μηχανών.

Αν διατίθεται λιγότερο από 100% της ονομαστικής μηχανικής ισχύος, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλήρως η διαθέσιμη μηχανική ισχύς χωρίς να ξεπεραστεί η ονομαστική τιμή του ρεύματος τυμπάνου της γεννήτριας ή η ονομαστική τιμή του ρεύματος διεγέρσεως του κινητήρα.

Το σύστημα παράλληλης συνδεσμολογίας χρησιμοποιείται, συνήθως όταν ο λόγος του αριθμού των γεννητριών ως προς τον αριθμό των κινητήρων είναι μεγάλος και όταν διατίθενται σχετικά μεγάλες ισχύες στους άξονες των μηχανών.

Στην περίπτωση αυτή, για ένα σύστημα συνδεσμολογίας, σε σειρά το ρεύμα θα είχε αρκετά μεγάλη τιμή, ώστε να απαιτούνται μεγάλες γεννήτριες.

Η χρήση τέτοιων μηχανών δεν είναι επιθυμητή λόγω των μεγάλων προβλημάτων τα οποία συναντάμε στον συλλέκτη και λόγω σχεδιαστικών περιορισμών της εγκαταστάσεως.

3) Σύστημα ηλεκτρικής προώσεως με γεννήτρια ΣΡ και κινητήρα ΣΡ μεγάλης ισχύος.

Όταν η γεννήτρια και ο κινητήρας προώσεως είναι μεγάλης ισχύος, τότε και το ρεύμα διεγέρσεως

των ρυθμιστικών αντιστάσεων είναι σχετικά μεγάλο, οπότε αναπτύσσονται μεγάλα θερμικά φαινόμενα. Για αυτό στην πράξη, χρησιμοποιείται η ακόλουθη διάταξη προώσεως του σχήματος 7.3ζ.

Στο σχήμα αυτό χρησιμοποιούνται δύο διεγέρτριες μεγάλης ισχύος, οι οποίες παρέχουν το απαιτούμενο ηλεκτρικό ρεύμα διεγέρσεως στη γεννήτρια και στον κινητήρα προώσεως. Ο τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας, ενεργοποιεί τις διεγέρτριες: γεννήτρια και κινητήρα προώσεως και μια γεννήτρια σταθερής τάσεως, η οποία τροφοδοτεί τα τυλίγματα διεγέρσεως της γεννήτριας και του κινητήρα προώσεως μέσω των ρυθμιστικών αντιστάσεων.

7.4 Ηλεκτρική πρόωση με εναλλασσόμενο ρεύμα (EP).

7.4.1 Εισαγωγή.

Στην ηλεκτρική πρόωση με EP, οι γεννήτριες που συνδέονται με κινητήριες μηχανές, τροφοδοτούν τους κινητήρες προώσεως, μέσω ενός ηλεκτρικού συστήματος το οποίο περιλαμβάνει τον κύριο πίνακα, τους Μ/Σ και τους μετατροπείς ισχύος.

Η ραγδαία ανάπτυξη των συστημάτων ηλεκτρικής προώσεως επιβάλλει να γνωρίζουμε τους ακόλουθους επιστημονικούς όρους οι οποίοι χρησιμοποιούνται στη διεθνή βιβλιογραφία:

1) **Πλήρης Ηλεκτροπρόωση** (Full Electric Propulsion – FEP) ονομάζεται η εγκατάσταση προώσεως στην οποία το πλοίο κινείται αποκλειστικά με ηλεκτρικούς κινητήρες.

2) **Ολοκληρωμένη Πλήρης Ηλεκτροπρόωση** (Integrated Full Electric Propulsion – IFEP), ονομάζεται η ηλεκτρική εγκατάσταση προώσεως στην οποία τα ζεύγη κινητηρίων μηχανών-γεννητριών τροφοδοτούν τόσο τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως όσο και τα υπόλοιπα φορτία.

3) **Πλήρως Εξηλεκτρισμένο Πλοίο** (All Electric Ship – AES) ονομάζεται το πλοίο που, εκτός του ότι διαθέτει πλήρη εγκατάσταση ηλεκτρικής προώσεως, έχει όλα του τα υποσυστήματα εξηλεκτρισμένα.

4) **Ηλεκτρικό Δίκτυο Προώσεως Πλοίου** (Propulsion Network) ονομάζεται το δίκτυο της ηλεκτρικής εγκατάστασης το οποίο τροφοδοτεί αποκλειστικά την εγκατάσταση ηλεκτρικής προώσεως.

Μια από τις σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων είναι η εφαρμογή των αζιμουθιακών προωστήρων (POD).

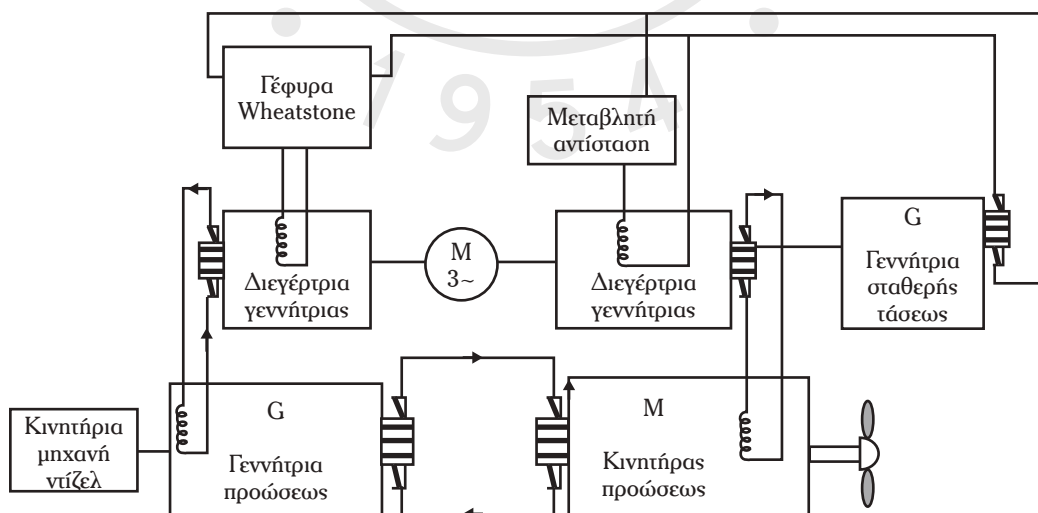
7.4.2 Ηλεκτρικοί κινητήρες προώσεως.

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες προώσεως είναι ασύγχρονοι κινητήρες ή σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες και κινητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούν υπεραγωγία υλικά.

Οι **ασύγχρονοι κινητήρες** διαθέτουν μια στερεά δομή και παρέχουν μεγάλες ποσότητες ισχύος.

Οι **σύγχρονοι κινητήρες** έχουν βαθμό αποδόσεως 96–98%, μεγαλύτερο κατά 3–4% από τον βαθμό αποδόσεως των αντιστοίχων ασυγχρόνων κινητήρων.

Στους **σύγχρονους κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες**, τα τυλίγματα διεγέρσεως στον δρομέα έχουν



Σχ. 7.3ζ

Διάταξη διεγερτριών ενός συγκροτήματος ηλεκτρικής προώσεως, το οποίο αποτελείται από γεννήτρια ΣΡ και κινητήρα ΣΡ μεγάλης ισχύος.

αντικατασταθεί από μόνιμους μαγνήτες. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα ροής. Σε αυτές τις μηχανές δεν υπάρχει ανάγκη παροχής συνεχούς ρεύματος, οπότε αυξάνεται η απόδοσή τους (απόδοση η οποία υπερβαίνει το 98%). Υψηλή απόδοση σημαίνει μείωση του μεγέθους του κινητήρα, μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και μικρότερη ροπή αδράνειας.

Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι κράματα σμαμαρίου-κοβαλτίου (Sm-Co) και νεοδύμιου-σιδήρου-βορείου (NdFeB), τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση της τάξεως του 1,2 Tesla και διατηρούν σταθερή τη μαγνήτισή τους για μεγάλες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στις ηλεκτρικές μηχανές.

Ανάλογα με την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής υπάρχουν οι ακόλουθοι δύο διαφορετικοί τύποι συγχρόνων κινητήρων.

1) Σύγχρονος κινητήρας αξονικής ροής.

Ο κινητήρας αυτός κατασκευάζεται από έναν κυλινδρικό δρομέα μόνιμων μαγνητών, ο οποίος περιστρέφεται στο εσωτερικό ενός κυλινδρικού στάτη. Οι μόνιμοι μαγνήτες προσανατολίζονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η μαγνητική ροή να κατευθύνεται παράλληλα προς τον άξονα της μηχανής. Στο σχήμα 7.4α(α) δίδεται ο σύγχρονος κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες αξονικής ροής, ενώ στο σχήμα 7.4α(β) δίδεται ο δρομέας κινητήρα αξονικής ροής.

Ο κινητήρας δίδει μεγάλες τιμές πυκνότητας ισχύος και αντίστοιχα τιμές ροπών. Οι τιμές τη πυκνότητας ισχύος διπλασιάζονται. Διπλασιάζοντας τον αριθμό των διακένων για δεδομένο όγκο (μηχανή με δύο ομοαξονικούς στάτες), ο σύγχρονος κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες είναι πιο ελαφρύς από τον συμβατικό σύγχρονο κινητήρα με τυλίγματα διεγέρσεως.

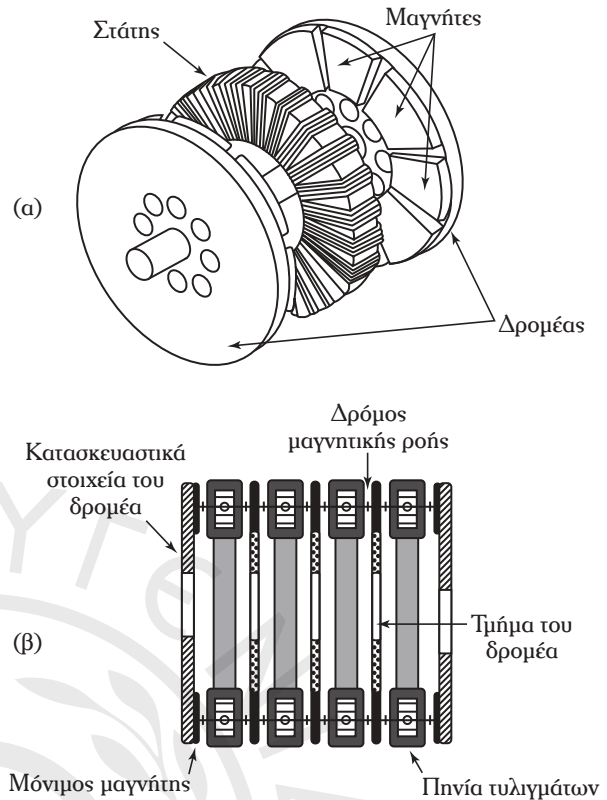
2) Σύγχρονος κινητήρας ακτινικής ροής.

Σε αυτούς τους κινητήρες [σχ. 7.4β(α)] το διάλυμα της πυκνότητας μαγνητικής ροής έχει κάθετη κατεύθυνση στον δρομέα της μηχανής [σχ. 7.4β(β)] και διέρχεται από το διάκενο ακτινικά στο τύλιγμα του στάτη για να κλείσει το μαγνητικό κύκλωμα.

Το κοινό χαρακτηριστικό των κινητήρων ακτινικής και αξονικής ροής είναι το δισκοειδές τους σχήμα, το οποίο επιτρέπει την κατασκευή κινητήρων μεγάλου αριθμού μαγνητικών πόλων για εφαρμογές μεγάλης ισχύος και χαμηλών στροφών.

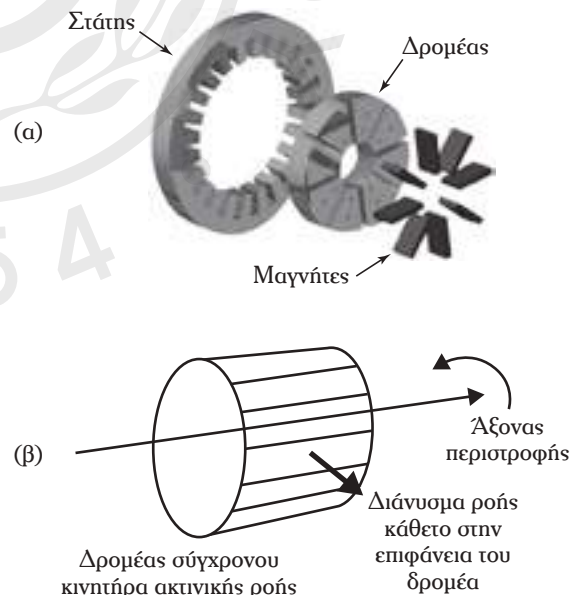
7.4.3 Χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής πρόωσης με εναλλασόμενο ρεύμα.

Στην ηλεκτρική πρόωση με ΕΡ ο λόγος μεταδόσε-



Σχ. 7.4α

(α) Σύγχρονος κινητήρας, με μόνιμους μαγνήτες, αξονικής ροής και (β) δρομέας του κινητήρα.



Σχ. 7.4β

(α) Σύγχρονος κινητήρας, με μόνιμους μαγνήτες ακτινικής ροής και (β) κατεύθυνση του διαλύματος πυκνότητας μαγνητικής ροής στον δρομέα σύγχρονου κινητήρα, με μόνιμους μαγνήτες ακτινικής ροής.

ως από την κινητήρια μηχανή στον ελικοφόρο άξονα είναι σταθερός, ενώ ο ελικοφόρος άξονας αλλάζει ταχύτητα περιστροφής όταν μεταβάλλεται η ταχύτητα της κινητήριας μηχανής.

Όταν λειτουργεί το σύστημα προώσεως και οι σύγχρονες γεννήτριες είναι με τυλίγματα διεγέρσεως, το ρεύμα διεγέρσεως διατηρείται σταθερό και η παραγόμενη τάση της γεννήτριας είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής των τυλιγμάτων διεγέρσεως και της ταχύτητας περιστροφής της. Ο λόγος της τάσεως ακροδεκτών της γεννήτριας προς την ταχύτητα περιστροφής διατηρείται σταθερός όταν αυξάνεται η ταχύτητα του πλοίου και η αντίστοιχη της γεννήτριας.

Η ροπή του σύγχρονου κινητήρα προώσεως είναι ανάλογη της τάσεως τροφοδοσίας του μαγνητικού πεδίου διεγέρσεως και της ταχύτητας περιστροφής του. Το ρεύμα διεγέρσεως του κινητήρα διατηρείται σταθερό, όπως και στην περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας.

Η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα προώσεως είναι ανάλογη της ταχύτητάς του. Ο κινητήρας αναπτύσσει ηλεκτρομαγνητική ροπή, η οποία είναι ανάλογη του τετράγωνου της ταχύτητας περιστροφής του.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή συμβαδίζει με την υδροδυναμική ροπή της έλικας, που είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας.

Όταν η ηλεκτρική πρόωση λειτουργεί, οι τιμές των ρευμάτων διεγέρσεως στη σύγχρονη γεννήτρια και στον σύγχρονο κινητήρα είναι τέτοιες, ώστε να εξασφαλίζουν την απαιτούμενη υδροδυναμική ροπή του ελικοφόρου άξονα. Σε διαφορετική περίπτωση μπορεί να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ροπή προώσεως αλλά αναπτύσσονται στο δίκτυο άεργα ρεύματα, τα οποία αυξάνουν το φαινόμενο Joule στις ηλεκτρικές μηχανές. Η αλλαγή της φοράς περιστροφής του σύγχρονου κινητήρα γίνεται αντιστρέφοντας δύο από τις τρεις φάσεις του.

7.5 Μετατροπείς.

7.5.1 Γενικά.

Στα εμπορικά πλοία η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από τριφασικές γεννήτριες σταθερής τάσεως και συχνότητας.

Ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής των ηλεκτρικών κινητήρων προώσεως απαιτεί μια μεταβαλλόμενη τάση από διατάξεις ΣΡ, ενώ απαιτεί μεταβαλλόμενη τάση και συχνότητα από διατάξεις ΕΡ.

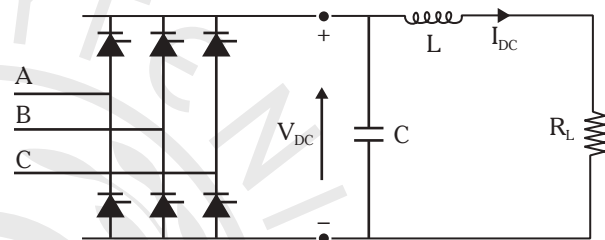
Η εναλλασσόμενη ημιτονοειδής τάση του ηλεκτρικού δικτύου πρέπει να έχει τη δυνατότητα να μετα-

τρέπεται, από ελεγχόμενο σύστημα ανορθώσεως, σε συνεχή τάση (ΕΡ→ΣΡ) ή, από ελεγχόμενους αντιστροφείς, να μετατρέπεται από συνεχή σε εναλλασσόμενη τάση (ΣΡ→ΕΡ), ανάλογα με τις ανάγκες των κινητήρων προώσεως.

Με τα ηλεκτρονικά ισχύος (δίοδοι, θυρίστορ, τρανζίστορ κ.λπ.) μετατρέπομε συνεχή τάση μιας τιμής σε μια άλλη τιμή αντίστοιχα, όπως και συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη και το αντίστροφο.

Τα κυκλώματα τα οποία υλοποιούν αυτές τις μετατροπές ονομάζονται **μετατροπείς τάσεως**.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η διαδικασία ανορθώσεως σε έναν μετατροπέα πλήρους κύματος, στον οποίο κάθε θυρίστορ άγει για 120° (σχ. 7.5α).



Σχ. 7.5α

Κύκλωμα τριφασικού μετατροπέα πλήρους κύματος.

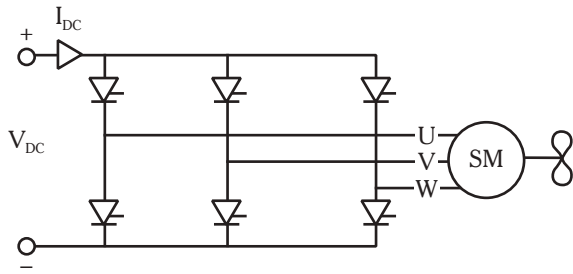
Ο μετατροπέας του σχήματος 7.5α λειτουργεί κανονικά όταν δυο θυρίστορ άγουν συγχρόνως. Οι πύλες των δύο αυτών θυρίστορ συνδέονται μεταξύ τους, οπότε γίνεται η έναρξη λειτουργίας του μετατροπέα.

Κάθε θυρίστορ δέχεται δύο παλμοδοτήσεις οι οποίες απέχουν 60° , ενώ το δεύτερο σήμα δεν επηρεάζει το θυρίστορ το οποίο το λαμβάνει, όταν η λειτουργία έχει, πλήρως, ξεκινήσει και η διαδοχή στην αγωγή έχει αποκατασταθεί. Ο μετατροπέας του παραπάνω σχήματος είναι πλήρως ελεγχόμενος, έξι παλμών.

Το κύκλωμα του μετατροπέα περιλαμβάνει ένα πηνίο (αυτεπαγωγής L) για την εξομάλυνση του ρεύματος I_{DC} και έναν πυκνωτή (χωρητικότητας C) για την εξομάλυνση της τάσεως V_{DC} .

Στο σχήμα 7.5β δίδεται ένα κύκλωμα τριφασικού αντιστροφέα. Μια συνεχής τάση μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη.

Στην έξοδο του αντιστροφέα διατίθεται ένα τριφασικό σύστημα εναλλασσομένων ημιτονοειδών ρευμάτων ορισμένης συχνότητας, τα οποία τροφοδοτούν τις τρεις φάσεις του στάτη του σύγχρονου κινητήρα. Το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη αλληλεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο του δρομέα, με αποτέλεσμα να εφαρμόζεται ροπή στον άξονα του κινητήρα.



Σχ. 7.5β

Τριφασικός μετατροπέας ο οποίος τροφοδοτεί έναν τριφασικό σύγχρονο κινητήρα (SM).

7.5.2 Τύποι μετατροπέων.

Οι κυριότεροι τύποι μετατροπέων που οδηγούν κινητήρες είναι:

1) Ο μετατροπέας EP σε ΣΡ.

Οι μετατροπείς αυτοί EP → ΣΡ, μετατρέπουν το EP σε ΣΡ και οδηγούν κινητήρες ΣΡ (σχ. 7.5γ).

Ο μετατροπέας EP → ΣΡ (III) τροφοδοτείται από ένα τριφασικό δίκτυο τάσεων. Περιλαμβάνει δύο μετατροπείς διαφορετικών ισχύων:

Τον μετατροπέα (II), που ελέγχει το ρεύμα διεγέρσεως του κινητήρα και τον μετατροπέα (I), που ελέγχει το ρεύμα τυμπάνου I_a , του κινητήρα.

Η κινητήρια ροπή T είναι $T \propto \Phi I_a$, ενώ η ταχύτητα περιστροφής n , του κινητήρα είναι:

$$n \propto \frac{V_a}{\Phi}.$$

Η φορά περιστροφής του κινητήρα αλλάζει αν η φορά του ρεύματος διεγέρσεως ή η φορά του ρεύματος τυμπάνου αλλάξουν.

Αυτού του είδους οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής προώσεως ωκεανογραφικών πλοίων, σε πλοία για την πόντιση υποβρυχίων καλωδίων και σε διάφορους τύπους θαλασσίων εξέδρων (πλατφόρμων).

2) Αντιστροφέας EP σε ΣΡ και σε EP (PWM inverter).

Οι μετατροπείς αυτοί EP → ΣΡ → EP, που είναι οι Μετατροπείς Διαμορφώσεως Εύρους Παλμού (Pulse Width Modulated inverters – PWM) και οδηγούν ασύγχρονους κινητήρες.

Ο αντιστροφέας PWM οδηγεί επαγωγικούς κινητήρες, ενώ χρησιμοποιεί τρανζίστορ, θυρίστορ ή GTO θυρίστορ ή Διπολικό Τρανζίστορ Απομονωμένης Πύλης και εξαρτάται από την ισχύ λειτουργίας

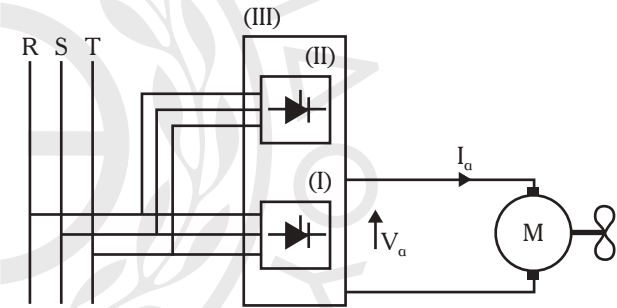
τους και από την τάση τροφοδοσίας τους. Στο σχήμα 7.5δ, δίδονται οι τυπικές διατάξεις του PWM.

Ένα τριφασικό σύστημα εναλλασσομένων τάσεων (σχ. 7.5δ) ανορθώνεται (I) σε συνεχή τάση. Στη συνέχεια, η συνεχής τάση κατανέμεται σε μεταβαλλόμενες, αλλά σταθερού επιπέδου παλμικές τάσεις στην είσοδο του ελεγχόμενου αντιστροφέα (II). Αυτή η διαδικασία ονομάζεται **Διαμόρφωση Εύρους Παλμού** (Pulse Width Modulation – PWM).

Μεταβάλλοντας το πλάτος και την πολικότητα των παλμικών τάσεων της συνεχούς τάσεως δημιουργείται στην έξοδο του μετατροπέα μια μέση τιμή εναλλασσόμενου ρεύματος μεταβαλλόμενης συχνότητας σε διάστημα 0,5 – 120 Hz.

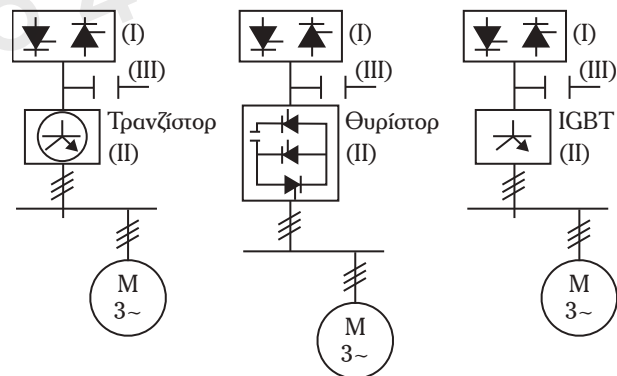
Λόγω του ρόλου εξομαλύνσεως, που έχει η επαγωγική φύση του κινητήρα, τα ρεύματα στις φάσεις του κινητήρα είναι σχεδόν ημιτονοειδή.

Ανάλογα με την φορά των ρευμάτων στις φάσεις του κινητήρα δημιουργείται κατάλληλο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, ενώ η ταχύτητα του κινητήρα



Σχ. 7.5γ

Μετατροπέας EP → ΣΡ, ο οποίος οδηγεί κινητήρα προώσεως ΣΡ.



Σχ. 7.5δ

Αντιστροφέας PWM.

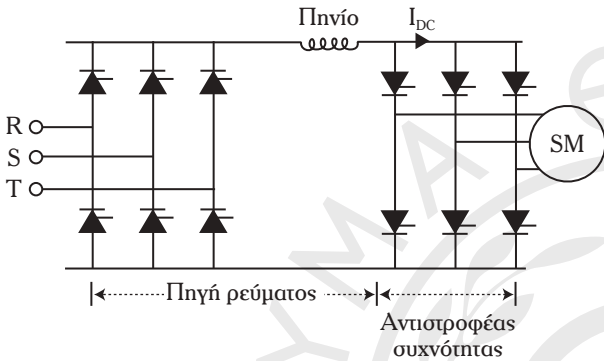
(I) Ανορθωτικό σύστημα. (II) Τρανζίστορ ή θυρίστορ ή IGBT. (III) Χωρητική σύνδεση μεταξύ (I) και (II).

διαμορφώνεται ανάλογα με τη συχνότητα εξόδου του αντιστροφέα PWM.

Για ισχύ μέχρι 8 MW χρησιμοποιούνται συστήματα PWM. Για μεγαλύτερη ισχύ πάνω από 40 MW χρησιμοποιούνται συγχρομετατροπείς ή κυκλομετατροπείς.

3) Συγχρομετατροπείς EP σε ΣΡ και σε EP.

Οι μετατροπείς EP → ΣΡ → EP (συγχρομετατροπείς) οδηγούν σύγχρονους κινητήρες και χρησιμοποιούνται με μεγάλη επιτυχία στις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής προώσεως (σχ. 7.5ε).



Σχ. 7.5ε
Συγχρομετατροπείς.

Ο συγχρομετατροπείς αποτελείται από έναν τριφασικό μετατροπέα πλήρους κύματος και έναν τριφασικό αντιστροφέα.

Μεταξύ των δύο, αυτών, μετατροπέων υπάρχει ένα DC-link (σύνδεση συνεχούς ρεύματος) μέσω ενός πνιού το οποίο διατηρεί το ρεύμα σταθερό· έτσι ο τριφασικός μετατροπείς με το DC-link λειτουργεί ως πηγή σταθερού ρεύματος.

Ο αντιστροφάς ελέγχει την συχνότητα εισόδου, άρα και την ταχύτητα περιστροφής του σύγχρονου κινητήρα.

Η θεμελιώδης διάταξη μετατροπής της συχνότητας είναι γέφυρα 6 παλμών.

4) Κυκλομετατροπείς.

Οι μετατροπείς EP → EP (κυκλομετατροπείς) οι οποίοι οδηγούν σύγχρονους κινητήρες.

Οι κυκλομετατροπείς είναι διατάξεις, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται μετατροπή από μια μορφή EP, δεδομένου πλάτους και συχνότητας, σε άλλη μορφή EP διαφορετικού πλάτους και συχνότητας. Όταν χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής προώσεως, υλοποιείται υποβιβασμός συχνότητας από 50/60 Hz σε 2/3 Hz.

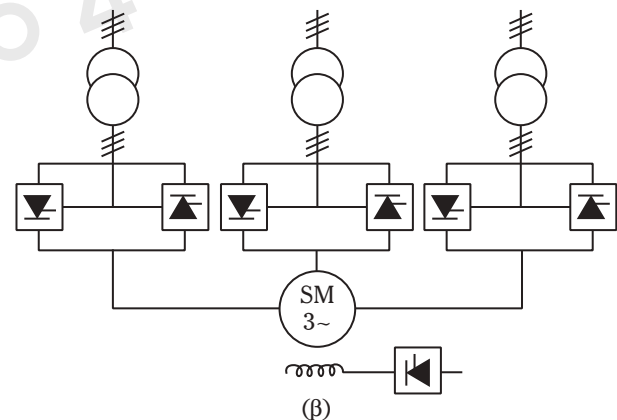
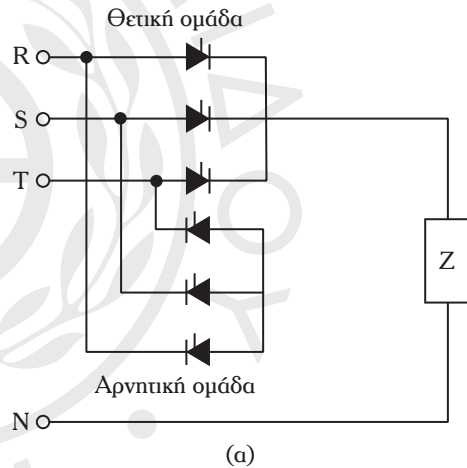
Στο σχήμα 7.5στ δίδονται τα κυκλώματα για μια

φάση ενός κυκλομετατροπέα τριών παλμών.

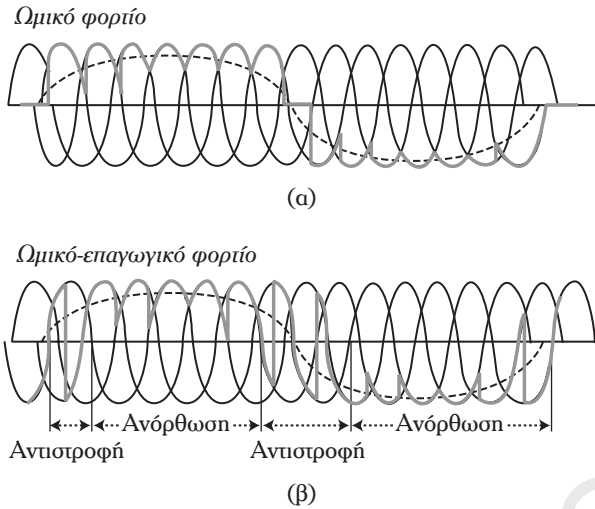
Ο κυκλομετατροπείς του σχήματος 7.5στ(α) αποτελείται από δυο ομάδες θυρίστορ: τη θετική και την αρνητική. Η θετική ομάδα ανορθώνει, ενώ η αρνητική ομάδα αντιστρέφει κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Δεν πρέπει να άγουν συγχρόνως οι δυο ομάδες, γιατί προκαλείται βραχυκύκλωμα στην πηγή τάσεως. Αυξάνοντας τον αριθμό παλμών στον κυκλομετατροπέα η κυματομορφή της τάσεως εξόδου προσεγγίζει την ημιτονοειδή μορφή.

Στο σχήμα 7.5ζ δίδονται οι κυματομορφές της τάσεως εξόδου του κυκλομετατροπέα τριών παλμών στην περίπτωση κατά την οποία το φορτίο Z είναι ωμικό και στην περίπτωση κατά την οποία το φορτίο Z είναι ωμικό-επαγωγικό.

Οι κυκλομετατροπείς χρησιμοποιούνται σε συστήματα μεγάλης ισχύος, εκεί όπου απαιτείται μεταβλητή συχνότητα χαμηλότερη απ' την συχνότητα της πηγής τροφοδοσίας.



Σχ. 7.5στ
Κυκλώματα για μια φάση κυκλομετατροπέα τριών παλμών.



Σχ. 7.5z

Τάση εξόδου κυκλομετατροπέα τριών παλμών
(α) όταν το φορτίο είναι ωμικό, (β) όταν το
φορτίο είναι ωμικό-επαγωγικό.

7.6 Τυπικά συστήματα ηλεκτρικής προώσεως με εναλλασσόμενο ρεύμα (EP).

Στο σχήμα 7.6α δίδεται η σχηματική παράσταση ενός συστήματος ηλεκτρικής προώσεως με EP. Το σύστημα αυτό αποτελείται από μια ή περισσότερες κινητήριες μηχανές, απευθείας συνδεδεμένες ή μέσω μειωτήρων στροφών με σύγχρονες γεννήτριες, ένα σύγχρονο κινητήρα, απευθείας συνδεδεμένο με κάθε έλικα, τον ηλεκτρικό πίνακα προώσεως και ένα σύστημα ελέγχου προώσεως και διεγέρσεως.

Η ηλεκτρική πρόωση με EP χρησιμοποιείται σε πλοία τα οποία περιλαμβάνουν μεγάλες ηλεκτρικές καταναλώσεις, όπως επιβατηγά και φορτηγά πλοία και μπορούν να κατανέμουν την ηλεκτρική ισχύ μεταξύ προώσεως και της ηλεκτρικής εγκαταστάσεως.

Στην ηλεκτρική πρόωση με EP οι κινητήριες μηχανές είναι ατμοστρόβιλοι ή μηχανές ντίζελ. Όταν χρησιμοποιούνται μηχανές ντίζελ οι γεννήτριες είναι με έκτυπους πόλους, ενώ όταν οι κινητήριες μηχανές είναι στρόβιλοι τότε οι γεννήτριες είναι κυλινδρικού δρομέα.

Αρχικά ως κινητήρες προώσεως χρησιμοποιήθηκαν ασύγχρονοι κινητήρες, λόγω της απλότητας κατασκευής και λειτουργίας τους. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονοι κινητήρες, οι οποίοι επιτρέπουν τη λειτουργία της εγκαταστάσεως με συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα.

Τα συστήματα ηλεκτρικής προώσεως στο EP διακρίνονται κυρίως στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

1) Σύστημα προώσεως για έλικες μεταβλητού βήματος (Controllable and Reversible Pitch Propeller – CRP).

2) Σύστημα προώσεως για έλικες σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propeller – FPP).

3) Αξιμουθιακό προωστήριο σύστημα (POD).

1) Σύστημα ηλεκτρικής προώσεως EP για έλικες μεταβλητού βήματος (CRP).

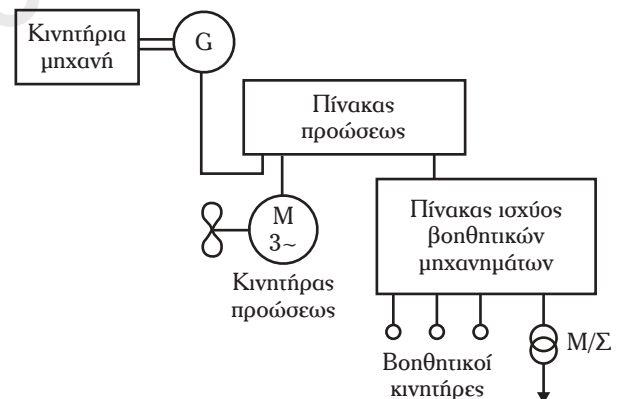
Το σύστημα προώσεως με έλικα μεταβλητού βήματος προτείνεται σε εμπορικά πλοία όπου οικονομικοί λόγοι υποχρεώνουν τη διάθεση μεγάλου συστήματος ισχύος για να καλύπτει ανάγκες ισχύος προώσεως, ενός συνόλου βοηθητικών μηχανημάτων και άλλες λειτουργικές ανάγκες του πλοίου.

Στο σχήμα 7.6β δίδεται το ηλεκτρικό διάγραμμα μιας εγκαταστάσεως ηλεκτρικής προώσεως EP για έλικα μεταβλητού βήματος (CRP).

Στο σχήμα διακρίνονται η κύρια γεννήτρια προώσεως, μια βοηθητική γεννήτρια η οποία παρέχει ισχύ για ηλεκτρικές λειτουργικές ανάγκες του πλοίου και οι κινητήρες αντλιών φορτίου. Σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης, η βοηθητική γεννήτρια έκτακτης ανάγκης παρέχει ισχύ σε διάφορα ηλεκτρικά φορτία της εγκαταστάσεως και ισχύ στο σύστημα διεγέρσεως του κινητήρα προώσεως.

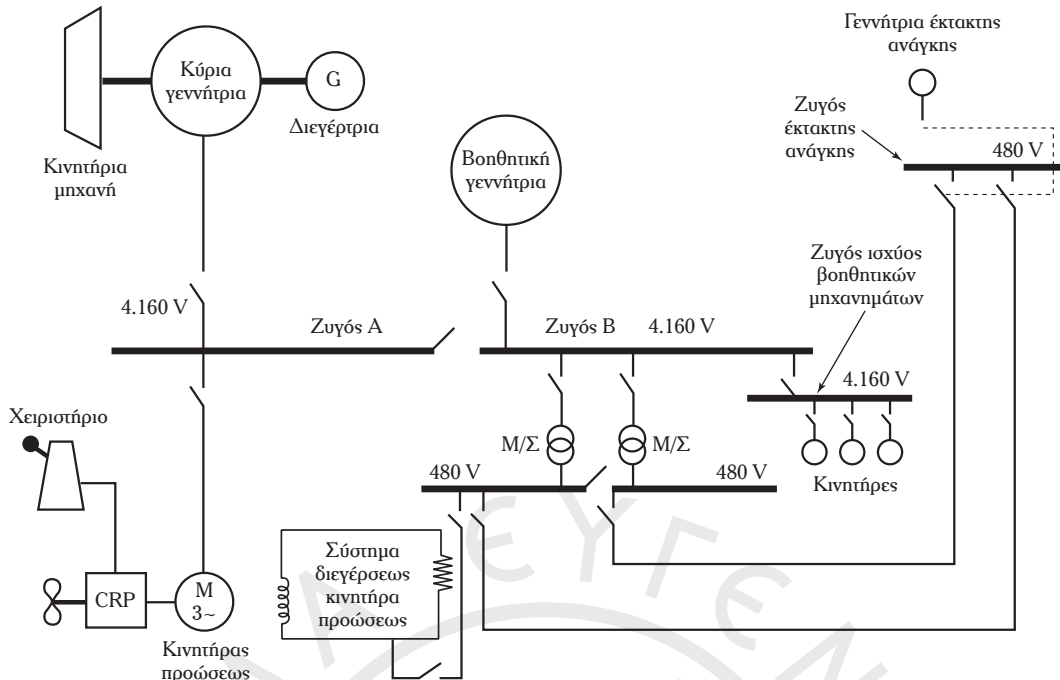
Στο σχήμα 7.6γ δίδονται οι τυπικές χαρακτηριστικές χρόνου για χειρισμούς αναστροφής της έλικας με μεταβλητό βήμα.

Όταν γίνεται η αναστροφή, η ισχύς του κινητήρα ισούται με μηδέν. Αυτή η απότομη μείωση στη ζήτηση ισχύος προκαλεί αύξηση της ταχύτητας της γεννήτριας. Η υπερτάχυνση πρέπει να προσδιοριστεί με μια μέγιστη τιμή περίπου 106% της ονομαστικής.



Σχ. 7.6α

Σχηματική διάταξη συστήματος ηλεκτρικής προώσεως με EP.



Σχ. 7.6β

Σχηματική διάταξη συστήματος ηλεκτρικής προώσεως με EP για έλικες μεταβλητού βήματος.

Όταν το βήμα περάσει από το μηδέν, η ζήτηση της ισχύος αυξάνεται απότομα, προκαλώντας μείωση της ταχύτητας του συστήματος.

Όταν η ταχύτητα μειώνεται κάτω από την ονομαστική, το σύστημα ελέγχου λειτουργεί για να μειώσει το βήμα της έλικας και να ξαναπάρει η ταχύτητα την ονομαστική της τιμή. Στη συνέχεια το βήμα της έλικας αυξάνεται, ώστε να παρέχεται η μέγιστη ισχύς από το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος του σχήματος 7.6β.

Στο σύστημα προώσεως EP με έλικα μεταβλητού βήματος, η αναστροφή της ταχύτητας γίνεται τροποποιώντας την κλίση των περυγίων της έλικας, χωρίς να μεταβάλλεται η φορά περιστροφής του ελικοφόρου άξονα.

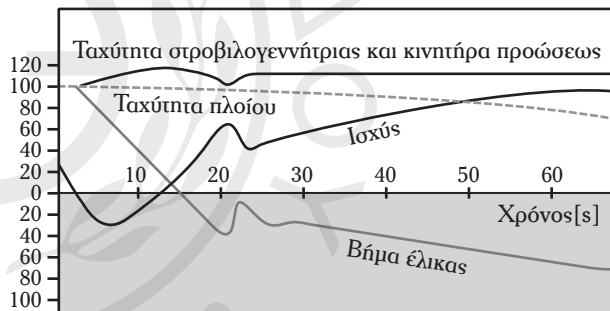
2) Σύστημα ηλεκτρικής προώσεως EP για έλικες σταθερού βήματος (FPP).

Σε εμπορικά πλοία, τα οποία χρησιμοποιούν ηλεκτρικό σύστημα προώσεως με έλικα σταθερού βήματος (σχ. 7.6δ) υπάρχει περισσότερη διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια τόσο για χρήση σε βοηθητικά μηχανήματα, όσο και για την κίνηση του πλοίου.

Η λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής προώσεως EP με έλικα σταθερού βήματος παρομοιάζεται με τη λειτουργία ενός μειωτήρα διπλής μείωσης και του συμπλέκτη αναστροφής σε μηχανικό σύστημα.

Ο λόγος της μείωσης της ταχύτητας, η οποία επιτυγχάνεται μεταξύ γεννήτριας και κινητήρα προώσεως δίδεται ως εξής:

Ταχύτητα [%]



□ Πρόσω
 □ Ανάποδα

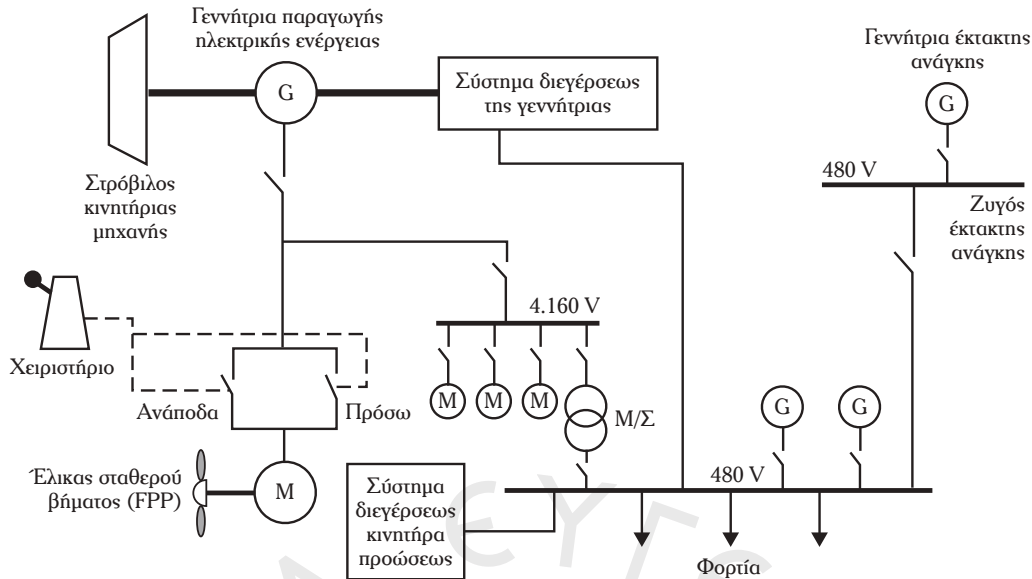
Σχ. 7.6γ

Τυπικές χαρακτηριστικές χρόνου για χειρισμούς αναστροφής της έλικας με μεταβλητό βήμα.

$$\text{Λόγος μείωσης της ταχύτητας} = \frac{\text{Αριθμός πόλων κινητήρα προώσεως}}{\text{Αριθμός πόλων γεννήτριας}}$$

Μια 6-πολική γεννήτρια 1.200 ΣΑΛ και κινητήρας 72 πόλων έχουν λόγο μείωσης 12 (οπότε η έλικα περιστρέφεται με 1.200 ΣΑΛ/12 = 100 ΣΑΛ), ενώ η 2-πολική γεννήτρια 3.600 ΣΑΛ, και ο κινητήρας 72 μαγνητικών πόλων έχουν λόγο μείωσης 36.

Η εκκίνηση και η αναστροφή της φοράς περιστροφής της έλικας επιτυγχάνεται λειτουργώντας τον σύγχρονο κινητήρα προώσεως σαν ασύγχρονο. Η εναλ-



Σχ. 7.6δ

Σχηματική διάταξη ουστήματος ηλεκτρικής προώσεως με ΕΡ, για έλικες σταθερού βήματος (FPP).

λαγή των ηλεκτρικών φάσεων που εφαρμόζεται στον κινητήρα προώσεως μέσω των επιλογών «πρόσω» και «ανάποδα» καθορίζει την κατεύθυνση περιστροφής του κινητήρα προώσεως.

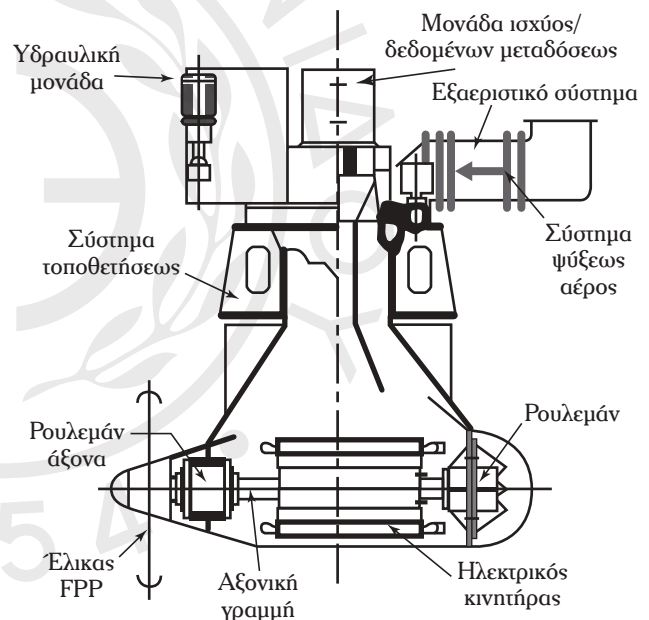
Κατά την κίνηση «πρόσω», αρχικά ο κινητήρας συνδέεται με την γεννήτρια μέσω του χειριστηρίου που καθορίζει την ορθή (πρόσω) ή ανάποδη φορά περιστροφής του. Στη συνέχεια συνδέει την διεγέρση της γεννήτριας στην μέγιστη τιμή της, η οποία προκαλεί υπερδιέγερση της γεννήτριας και ανάπτυξη μεγάλης πολικής τάσεως. Ο κινητήρας εκκινείται σαν επαγωγικός. Λόγω της χαμηλής συχνότητας και της μεγάλης τάσεως V_t , ο κινητήρας αναπτύσσει μεγάλη ροπή εκκινήσεως και αποκτά ταχύτητα σχεδόν ίση με τη σύγχρονη.

Τότε συνδέεται η διεγέρση στον κινητήρα προώσεως και όταν αποκατασταθεί ο συγχρονισμός του, μειώνονται οι διεγέρσεις της γεννήτριας και του κινητήρα στις κανονικές του τιμές. Όταν οι ταχύτητες περιστροφής μειωθούν, αφαιρείται και αποσυνδέεται ο κινητήρας από το δίκτυο προώσεως. Η κινητήρια μηχανή δεν απαιτείται να κρατηθεί. Μπορεί να μείνει σε αναμονή και να περιστρέφεται με τις χαμηλότερες στροφές.

Για την κίνηση «ανάποδα» ο κινητήρας συνδέεται με τις δυο φάσεις αντίστροφα. Στη συνέχεια τηρείται η ίδια διαδικασία, όπως και κατά την «πρόσω» κίνηση.

3) Αξιμουθιακό προωστήριο σύστημα (POD).

Στο αξιμουθιακό προωστήριο σύστημα (POD) ο ηλεκτρικός κινητήρας και η έλικα είναι μια ενιαία μονάδα, εμβυσισμένη στη θάλασσα στο πρυμναίο μέρος του πλοίου (σχ. 7.6ε).



Σχ. 7.6ε

Αξιμουθιακό προωστήριο σύστημα με μια έλικα.

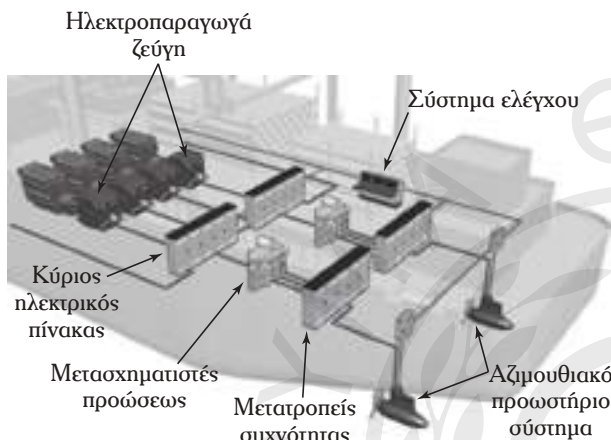
Το σύστημα περιλαμβάνει μια ή δυο έλικες και έχει τη δυνατότητα να περιστρέφεται σχεδόν 360° στην αξιμουθιακή διεύθυνση, στο οριζόντιο επίπεδο, οπότε αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η ικανότητα ελιγμών του πλοίου, ενώ εκμηδενίζεται το αξονικό σύστημα και δεν υφίσταται μηχανισμός πηδαλίου.

Στο σχήμα 7.6στ δίδεται μια ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου στην οποία διακρίνεται το αξιμουθιακό προωστήριο σύστημα.

Οι γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

συνδέονται με μηχανές ντίζελ ή σε αεριοστρόβιλους ή σε έναν συνδυασμό ντίζελ - αεριοστρόβιλο. Η ταχύτητα των κινητήρων ελέγχεται από τον ρυθμιστή στρόφων, ενώ η τάση των γεννητριών (6,6 kV ή 11 kV) ελέγχεται από τους Αυτόματους Ρυθμιστές Τάσεως (Automatic Voltage Regulator – AVR).

Στις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής προώσεως ανήκουν όλα τα συστήματα μέσω των οποίων περιστρέφονται οι ελικοφόροι άξονες. Συνήθως είναι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος ή κινητήρες συνεχούς, με τις αντίστοιχες διατάξεις χειρισμών.



Σχ. 7.6στ

Ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου με αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα.

7.7 Φαινόμενα ποιότητας ισχύος.

Στα ηλεκτρικά συστήματα πλοίων τα οποία χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος, πέρα από τη θεμελιώδη συχνότητα στις παραγόμενες τάσεις και στα ρεύματα αναπτύσσεται ένα πλήθος αρμονικών συνιστωσών. Οι αρμονικές αυξάνουν την άεργο ισχύ, η οποία κυκλοφορεί στην ηλεκτρική εγκατάσταση και αναπτύσσονται προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

Τα βασικότερα φαινόμενα ποιότητας ισχύος είναι:

- 1) Η βύθιση τάσεως, που οφείλεται σε εμφάνιση σφαλμάτων και σε εκκίνηση μεγάλων κινητήρων.
- 2) Η ανύψωση τάσεως, που οφείλεται στην εμφάνιση σφαλμάτων.
- 3) Τα γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα, που οφείλονται στα διακοπικά φαινόμενα.
- 4) Οι αρμονικές, που οφείλονται στην παρουσία των μη γραμμικών διατάξεων.

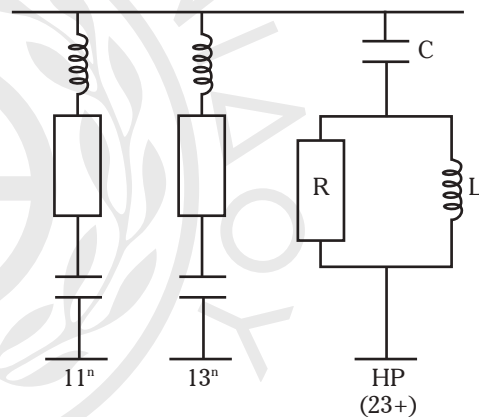
Το πρόβλημα εμφάνισης αρμονικών όμως, στα πλοία τα οποία χρησιμοποιούν ηλεκτρική πρόωση είναι σοβαρότατο σε σχέση με τα άλλα φαινόμενα ποιότητας ισχύος. Η μεθοδολογία για τη μείωση των

αρμονικών είναι η ακόλουθη:

- 1) Αύξηση του αριθμού των παλμών ενός μετατροπέα.
- 2) Χρήση καταλλήλων φίλτρων.
- 3) Διαχωρισμός των ευαίσθητων φορτίων μέσω στρεφομένων μετατροπέων.

Η χρήση των φίλτρων είναι διαδεδομένη στην περίπτωση της ηλεκτρικής προώσεως με συγχρομετατροπείς.

Θεωρούμε την περίπτωση ενός δωδεκαπαλμικού συστήματος. Οι αρμονικές είναι της τάξεως $12K + 1$, $K \in \mathbb{R}$ (πραγματικός ή ακέραιος). Μπορούμε να εγκαταστήσουμε ένα σύστημα φίλτρων, το οποίο αποτελείται από ένα συντονισμένο φίλτρο στην $11^{\text{η}}$ αρμονική, ένα στην $13^{\text{η}}$ και ένα άλλο, το λεγόμενο HP, το οποίο είναι σε θέση να φιλτράρει τις αρμονικές της τάξεως $23^{\text{η}}$ και μετά (σχ. 7.7). Πρόκειται για φίλτρα της ομάδας R-L-C, με ξεχωριστή παρουσία του φίλτρου HP το οποίο ανήκει στην ομάδα C-R//L.

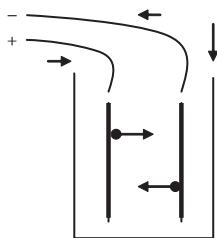


Σχ. 7.7

Εγκατάσταση ενός συστήματος φίλτρων για τη μείωση των αρμονικών.

7.8 Ερωτήσεις.

- 1) Τι εννοούμε με τον όρο ηλεκτρική πρόωση;
- 2) Ποιοι είναι οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρική πρόωση;
- 3) Ποια είναι τα συστήματα ηλεκτρικής προώσεως με ΣΡ;
- 4) Ποια είναι τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής προώσεως με ΕΡ;
- 5) Ποια είναι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ηλεκτρικής προώσεως;
- 6) Ποιοι είναι οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρική πρόωση με ΕΡ;
- 7) Τι είναι το αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα;
- 8) Ποια είναι τα βασικά φαινόμενα ποιότητας ισχύος σε μία ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου;



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

8.1 Εισαγωγή.

Οι **συσσωρευτές** είναι συσκευές που εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο της πολώσεως των ηλεκτροδίων μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική.

Αποτελούνται από ηλεκτρόδια (πόλοι) που είναι βυθισμένα σε ηλεκτρολυτικά διαλύματα.

Κατά τη φόρτιση του συσσωρευτή (σύνδεση πηγής ΣΡ στους πόλους του), λόγω της πολώσεως των ηλεκτροδίων, αναπτύσσεται μεταξύ τους ηλεκτρεγερτική δύναμη. Αν διακοπεί η φόρτιση, τότε ο συσσωρευτής μετατρέπεται σε πηγή συνεχούς τάσεως. Όταν συνδεθεί ηλεκτρικό κύκλωμα στον συσσωρευτή, τότε μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας παρέχεται στο κύκλωμα. Αυτή είναι η διαδικασία της εκφόρτισης του συσσωρευτή.

8.2 Κύρια χαρακτηριστικά των συσσωρευτών.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των συσσωρευτών είναι τα ακόλουθα:

1) Η **ηλεκτρεγερτική δύναμη** (ΗΕΔ), δηλαδή η τάση η οποία μετράται με ένα βολτόμετρο όταν ο συσσωρευτής δεν τροφοδοτεί εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα.

2) Η **εσωτερική αντίσταση** (r), δηλαδή ο βαθμός δυσκολίας διελύσεως του ρεύματος στο εσωτερικό του συσσωρευτή όταν λειτουργεί με φορτίο.

Κατά τη φόρτιση των συσσωρευτών ισχύει: $V = E + rI$, ενώ κατά την εκφόρτισή τους: $V = E - rI$, όπου V η πολική τάση του συσσωρευτή, που είναι η τάση η οποία μετρείται στους πόλους του συσσωρευτή όταν αυτός συνδέεται σε κύκλωμα, και I το ρεύμα που παρέχει ο συσσωρευτής στο κύκλωμα.

Οι τιμές της τάσεως V κατά τη φόρτιση είναι: 2,10 V ή 2,60 V ή 2,65 V, ενώ οι αντίστοιχες τιμές της τάσεως V κατά την εκφόρτιση είναι 2,10 V ή 1,70 V για κάθε στοιχείο. Θεωρούμε, συνήθως, τα 2 V ως μέση τιμή.

Η ΗΕΔ είναι ηλεκτροχημικό μέγεθος που εξαρτά-

ται από την πυκνότητα του ηλεκτρολύτη που μετράται σε βαθμούς Μπωμέ. Στον πίνακα 8.2.1 δίδονται οι σχετικές πυκνότητες και οι αντίστοιχοι βαθμοί Μπωμέ που χρησιμοποιούνται στην πράξη.

Στον πίνακα 8.2.2 δίδεται η αντιστοιχία πυκνότη-

Πίνακας 8.2.1
Αντιστοιχία βαθμών Μπωμέ και σχετικής πυκνότητας ηλεκτρολυτών.

Πυκνότητα	Βαθμοί Μπωμέ	Σχετική πυκνότητα	Βαθμοί Μπωμέ
1,107	140	1,190	230
1,116	150	1,199	240
1,125	160	1,209	250
1,133	170	1,220	260
1,142	180	1,230	270
1,152	190	1,241	280
1,162	200	1,252	290
1,170	210	1,263	300
1,180	220		

Πίνακας 8.2.2
Αντιστοιχία βαθμών Μπωμέ και ΗΕΔ στοιχείου συσσωρευτή.

Βαθμοί Μπωμέ ηλεκτρολύτη	ΗΕΔ σε V
350	2,15
300	2,10
250	2,05
200	2,01
150	1,96
100	1,92
50	1,87
10	1,84

τας ηλεκτρολύτη και της ΗΕΔ ενός στοιχείου συσσωρευτή.

3) Η **χωρητικότητα Q**, δηλαδή το ηλεκτρικό φορτίο σε αμπερώρια (Ah), που δίδει ο συσσωρευτής κατά τη διάρκεια της εκφορτίσής του.

4) Το **κανονικό ρεύμα φορτίσεως** ή **εκφορτίσεως** το οποίο ισούται με το $1/10$ της χωρητικότητας του συσσωρευτή.

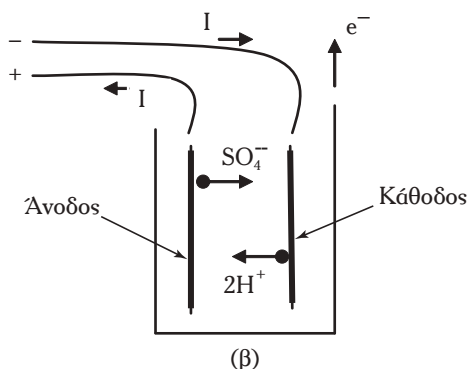
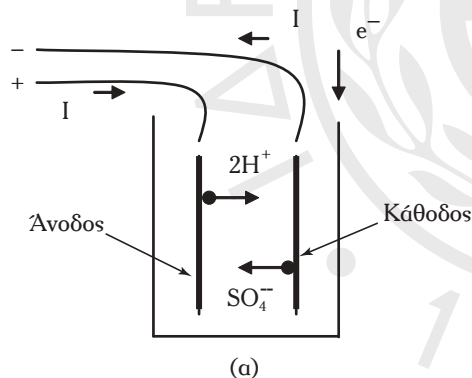
8.3 Συσσωρευτές μολύβδου (Pb).

Στους συσσωρευτές μολύβδου τα ηλεκτρόδια είναι πλάκες μολύβδου, ενώ ο ηλεκτρολύτης είναι διάλυμα H_2SO_4 . Στη διάρκεια της φορτίσεως, τα θετικά ιόντα του υδρογόνου έρχονται στην κάθοδο και τα αρνητικά ιόντα SO_4^- στην άνοδο [σχ. 8.3α(α)].

Στη διάρκεια φορτίσεως και εκφορτίσεως γίνονται οι ακόλουθες χημικές αντιδράσεις:

1) Φόρτιση [σχ. 8.3α(α)]:

Άνοδος:

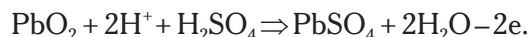


Σχ. 8.3α

(α) Φόρτιση και (β) εκφόρτιση συσσωρευτή.

2) Εκφόρτιση [σχ. 8.3α(β)]:

Άνοδος:



Τρόπος φορτίσεως των συσσωρευτών μολύβδου.

Έστω V η τάση η οποία εφαρμόζεται στους πόλους του συσσωρευτή κατά τη φόρτίσή του. Ισχύει:

$$V = E + rI$$

όπου E είναι η αντι-ΗΕΔ μεταξύ των ηλεκτροδίων, και r η εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή.

Όταν μεταβάλλεται η τιμή της τάσεως V , τότε παίρνομε διάφορες τιμές του ρεύματος φορτίσεως του συσσωρευτή. Κανονικά οι τιμές του ρεύματος φορτίσεως δεν πρέπει να ξεπερνάνε τιμές 10–16% της χωρητικότητας Q του συσσωρευτή. Όσο συνεχίζεται η φόρτιση του συσσωρευτή η αντι-ΗΕΔ αυξάνεται, οπότε όταν επιθυμούμε μια φόρτιση με σταθερό ρεύμα πρέπει να αυξηθεί διαδοχικά η τάση V .

Στο σχήμα 8.3β δίδονται τα τυπικά διαγράμματα αργής και γρήγορης φορτίσεως. Ειδικά δίδονται η γραφική παράσταση της τάσεως και του ρεύματος φορτίσεως, αλλάζοντας την αρχική φόρτιση με σταθερό ρεύμα (μέχρι 60–70% της τελικής τιμής) και τη φόρτιση με σταθερή τάση για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα φορτίσεως.

Στο τέλος της φορτίσεως, η τάση στους ακροδέκτες του συσσωρευτή μειώνεται στα 2,1 V. Όταν συνδέομε στους ακροδέκτες του συσσωρευτή ένα φορτίο, τότε ισχύει:

$$V = E - rI$$

Στη διάρκεια εκφορτίσεως η ΗΕΔ E , οπότε και η τάση V τείνει να μειωθεί διαδοχικά, σε συνάρτηση με τον χρόνο εκφορτίσεως. Στο σχήμα 8.3γ δίδεται η διαδικασία εκφορτίσεως του συσσωρευτή μολύβδου.

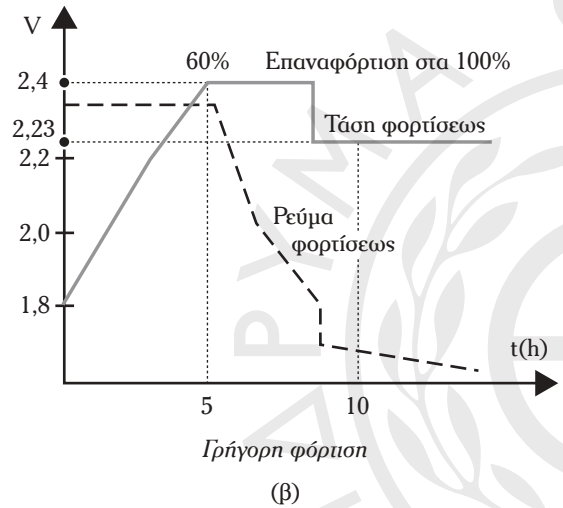
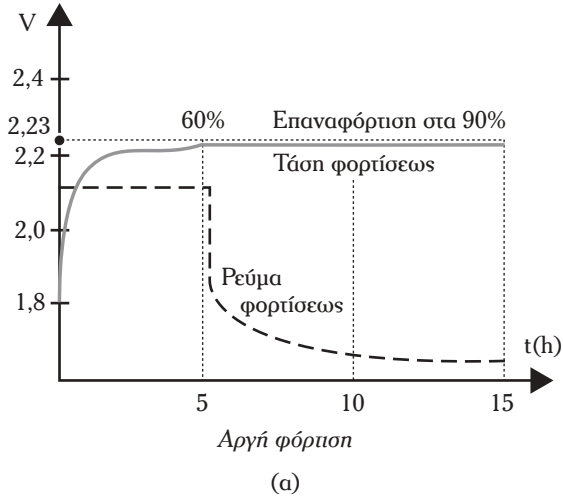
8.3.1 Βλάβες των συσσωρευτών μολύβδου.

Οι κυριότερες βλάβες των συσσωρευτών μολύβδου είναι οι ακόλουθες:

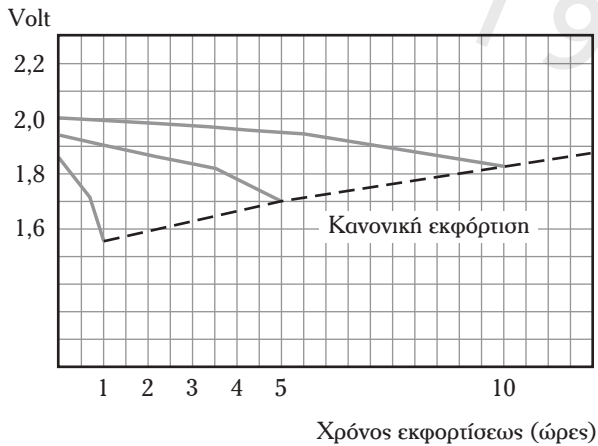
1) Θειίκωση.

Η θειίκωση είναι μια βλάβη που οφείλεται στην κρυστάλλωση του θειικού μολύβδου ($PbSO_4$), η οποία δημιουργείται ως εξής:

α) Κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή σχηματίζεται στα ηλεκτρόδια του $PbSO_4$.



Σχ. 8.3β
 Διαδικασία φόρτισης του συσσωρευτή μολύβδου.



Σχ. 8.3γ
 Διαδικασία εκφόρτισης συσσωρευτή μολύβδου.

Όταν ένας συσσωρευτής για μεγάλο χρονικό διάστημα παραμένει αφόρτιστος, τότε ο $PbSO_4$ κρυσταλλώνεται και δεν διαλύεται κατά τη φόρτιση.

β) Όταν το ρεύμα εκφόρτισης είναι μεγαλύτερο από το κανονικό, τότε η ποσότητα του $PbSO_4$, η οποία σχηματίζεται είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα να κρυσταλλώνεται και να μην διαλύεται κατά την φόρτιση.

γ) Όταν ο ηλεκτρολύτης είναι πολύ πυκνός, τότε παρατηρείται κρυστάλλωση του $PbSO_4$.

2) Εσωτερικό βραχυκύκλωμα.

Όταν στη φόρτιση και στην εκφόρτιση ενός συσσωρευτή χρησιμοποιούνται μεγάλα ρεύματα, τα ενεργά υλικά στις πλάκες του διαστέλλονται και πέφτουν στον ηλεκτρολύτη. Με την πάροδο του χρόνου συγκεντρώνονται στον πυθμένα του δοχείου, οπότε έρχονται σε επαφή με τα κάτω άκρα των ηλεκτροδίων, τα οποία βραχυκυκλώνονται.

3) Εξωτερικό βραχυκύκλωμα.

Το βραχυκύκλωμα αυτό συμβαίνει στους ακροδέκτες του συσσωρευτή όταν έρθουν σε επαφή μέσω ενός μεταλλικού αντικειμένου ή ενός βραχυκυκλώματος στο κύκλωμα, το οποίο τροφοδοτούν. Η τοποθέτηση καταλλήλων ασφαλειών στα κυκλώματα των συσσωρευτών εξασφαλίζει την προστασία τους.

4) Αποκεφαλισμός ηλεκτροδίων.

Κατά τη μακροχρόνια χρήση των συσσωρευτών η στάθμη του ηλεκτρολύτη κατέρχεται, με αποτέλεσμα ένα τμήμα των ηλεκτροδίων να έρχεται σε επαφή με τον αέρα και να οξειδώνεται. Όταν η οξείδωση προχωρήσει πολύ, τότε οι κεφαλές των ηλεκτροδίων αποκόπτονται και δεν έρχονται σε επαφή με τους ακροδέκτες του συσσωρευτή. Γι' αυτό σε τακτά χρονικά διαστήματα ελέγχουμε τη στάθμη του ηλεκτρολύτη και όταν έχει μειωθεί συμπληρώνουμε με αποσταγμένο νερό.

8.3.2 Συντήρηση των συσσωρευτών μολύβδου.

1) Όταν οι συσσωρευτές είναι σε λειτουργία θα πρέπει:

α) Να ελέγχεται η στάθμη του ηλεκτρολύτη και στην περίπτωση που έχει μειωθεί να συμπληρώνεται με αποσταγμένο νερό.

β) Να μην αφήνονται φορτισμένοι συσσωρευτές σε υγρούς και μη αεριζόμενους χώρους.

γ) Να μην εκφορτίζονται οι συσσωρευτές με τάση κάτω του 1,8 V.

δ) Να φορτίζονται και να εκφορτίζονται οι συσσωρευτές με το κανονικό ρεύμα.

2) Όταν οι συσσωρευτές δεν χρησιμοποιούνται για μεγάλα χρονικά διαστήματα θα πρέπει να:

α) Εκφορτίζονται.

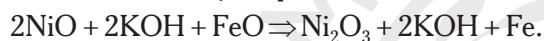
β) Τοποθετούνται σε ξηρούς χώρους.

γ) Αντικαθιστάται ο ηλεκτρολύτης με αποσταγμένο νερό και να αφήνονται τα ηλεκτρόδια στο νερό για 24 ώρες.

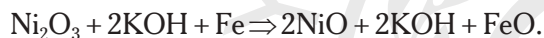
8.4 Συσσωρευτές σιδηρονικελίου (Fe-Ni).

Ο ηλεκτρολύτης είναι υδατικό διάλυμα (21%) καυστικού καλίου. Η άνοδος αποτελείται από υδροξείδιο του νικελίου $[\text{Ni}(\text{OH})_2]$, το οποίο τοποθετείται μέσα σε διάτρητους σωλήνες από σιδηρονικέλιο. Η κάθοδος αποτελείται από Fe, η οποία επικαλύπτεται με λεπτό στρώμα FeO. Οι χημικές αντιδράσεις είναι:

α) Φόρτιση:



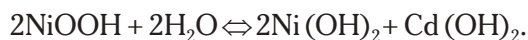
β) Εκφόρτιση:



Η ΗΕΔ του συσσωρευτή στο τέλος της φορτίσεως ανέρχεται στα 1,7 V για κάθε στοιχείο. Η ΗΕΔ στην πλήρη φόρτιση είναι 1,4 V.

8.5 Συσσωρευτές καδμιονικελίου (Cd-Ni).

Η κάθοδος στους συσσωρευτές καδμιονικελίου αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο υδροξειδίου του νικελίου (κάθοδος), ενώ η άνοδος είναι από καδμίο. Ο ηλεκτρολύτης είναι υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH) (σε ποσοστό 32%). Οι κύριες χημικές αντιδράσεις οι οποίες γίνονται στους συσσωρευτές Cd-Ni είναι:



Τα δυναμικά της οξειδοαναγωγής αναφερόμενα σε τυπικές συνθήκες μεταβάλλονται, ελαφρά, κατά τη διάρκεια χρήσεως του συσσωρευτή και παρέχουν μια ΗΕΔ 1,29 V.

Οι χημικές αντιδράσεις είναι αντιστρεπτές, η χημική αντίδραση από αριστερά προς τα δεξιά αντιστοιχεί στην εκφόρτιση, ενώ από τα δεξιά προς τα αριστερά αντιστοιχεί στη φόρτιση των συσσωρευτών. Κατά τη διάρκεια της φορτίσεως η τάση του συσσωρευτή αυξάνει απότομα και στη συνέχεια αργά μέχρι την μέγιστη τιμή του 1,4 V ανά στοιχείο. Σε αυτήν τη τιμή, αν

ο συσσωρευτής τροφοδοτείται με το ίδιο ρεύμα, τότε εμφανίζεται το φαινόμενο τερφορτίσεως. Οπότε η τάση μειώνεται, στον συσσωρευτή δεν αποθηκεύεται πλέον ενέργεια, ενώ το ρεύμα στο εσωτερικό του μετασχηματίζεται σε θερμότητα, προκαλώντας υπερθέρμανση.

Σε αυτήν τη φάση αναπτύσσεται υδρογόνο και οξυγόνο. Είναι αναγκαίο να οριστεί με ακρίβεια ο όρος φόρτιση του συσσωρευτή, δηλαδή η χρονική στιγμή κατά την οποία η καμπύλη της τάσεως παίρνει τη μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται:

Η επιταχυνόμενη φόρτιση με $I = 1/5 I_{ov}$
και διάρκεια 6-7 ώρες.

Για γρήγορη φόρτιση: $I = I_{ov}$ με διάρκεια 1 ώρα.

Για μόνιμη φόρτιση με: $I = 1/20 I_{ov}$.

Σε αυτήν την περίπτωση ο συσσωρευτής φορτίζεται αλλά δεν υπερθερμαίνεται όταν η τάση παίρνει τη μέγιστη τιμή, γιατί το ρεύμα έχει μικρή τιμή.

Μετά από 500 φορτίσεις/εκφορτίσεις οι συσσωρευτές Cd-Ni χάνουν 20% της χωρητικότητας. Συνήθως η χωρητικότητα διατηρείται για 3-5 χρόνια, ενώ στη συνέχεια μειώνεται γιατί αναπτύσσονται δευτερεύουσες χημικές αντιδράσεις στο εσωτερικό του συσσωρευτή. Οι συσσωρευτές Cd-Ni **πλεονεκτούν** διότι:

1) Αντέχουν μέχρι 1.000 φορτίσεις/εκφορτίσεις.

2) Έχουν σταθερή τάση για μεγάλα χρονικά διαστήματα και στη συνέχεια απότομη μείωση τάσεως.

Μειονεκτούν όμως διότι έχουν:

1) Ευαισθησία σε χαμηλές θερμοκρασίες (μικρότερες από -5°C) και διότι

2) η παρουσία του καδμίου, είναι επικίνδυνη για το περιβάλλον και για τον άνθρωπο.

8.6 Αλκαλικοί συσσωρευτές τύπου Ni-MH.

Για τις φορτιές συσκευές συσσωρευτών με μεγάλη διάρκεια εκφορτίσεως, η αναγκαιότητα να αποκλειστεί η παρουσία του καδμίου Cd για οικολογικούς λόγους, υποχρέωσε τις βιομηχανίες να κατευθυνθούν σε άλλες λύσεις. Μία από αυτές τις λύσεις είναι οι αλκαλικοί συσσωρευτές Ni-MH. Έχουν χωρητικότητα μεγαλύτερη κατά 30% από την αντίστοιχη και διάρκεια ζωής κατά 40% μεγαλύτερη από τους αντίστοιχους συσσωρευτές Cd-Ni.

Οι χημικές αντιδράσεις στους συσσωρευτές Ni-MH είναι οι εξής:

Κάθοδος: $\text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Ni}(\text{OH})_2 + \text{OH}^-$

Άνοδος: $\text{MH} + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{M} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$

Συνολική χημική αντίδραση:



Οι χημικές αντιδράσεις είναι αντιστρεπτές:

Από τα αριστερά στα δεξιά αντιστοιχεί στην εκφόρτιση, ενώ από τα δεξιά προς τα αριστερά στη φόρτιση.

Τα **πλεονεκτήματα** των συσσωρευτών Ni-MH είναι ότι έχουν:

- 1) Η μεγάλη πυκνότητα ενέργειας.
- 2) Η αντοχή μέχρι 1.000 φορτίσεις/εκφορτίσεις.
- 3) Η αποφυγή προκλήσεων προβλημάτων στο περιβάλλον.
- 4) Η σταθερή τάση για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Τα **μειονεκτήματα** είναι:

- 1) Το υψηλό κόστος.
- 2) Η ευαισθησία σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Οι συσσωρευτές, σύμφωνα με τους Νηογνώμονες, πρέπει να τοποθετούνται σε κατάλληλες διατάξεις και σε χώρους στους οποίους δεν υπάρχει υγρασία, ενώ η θερμοκρασία περιβάλλοντος πρέπει να είναι μικρότερη των 45°C .

8.7 Συσσωρευτές έκτακτης ανάγκης.

Σύμφωνα με τη ΔΣ SOLAS και τους κανονισμούς GL (γερμανικοί κανονισμοί), όλα τα επιβα-

τηγά πλοία, ανεξάρτητα από τη χωρητικότητά τους, πρέπει να έχουν μια έκτακτη πηγή ηλεκτρικής ισχύος, η οποία είναι ανεξάρτητη απ' το σύστημα των κυρίων πηγών ηλεκτρικής ισχύος.

Η πηγή ηλεκτρικής ισχύος έκτακτης ανάγκης μπορεί να είναι είτε γεννήτρια είτε συσσωρευτές.

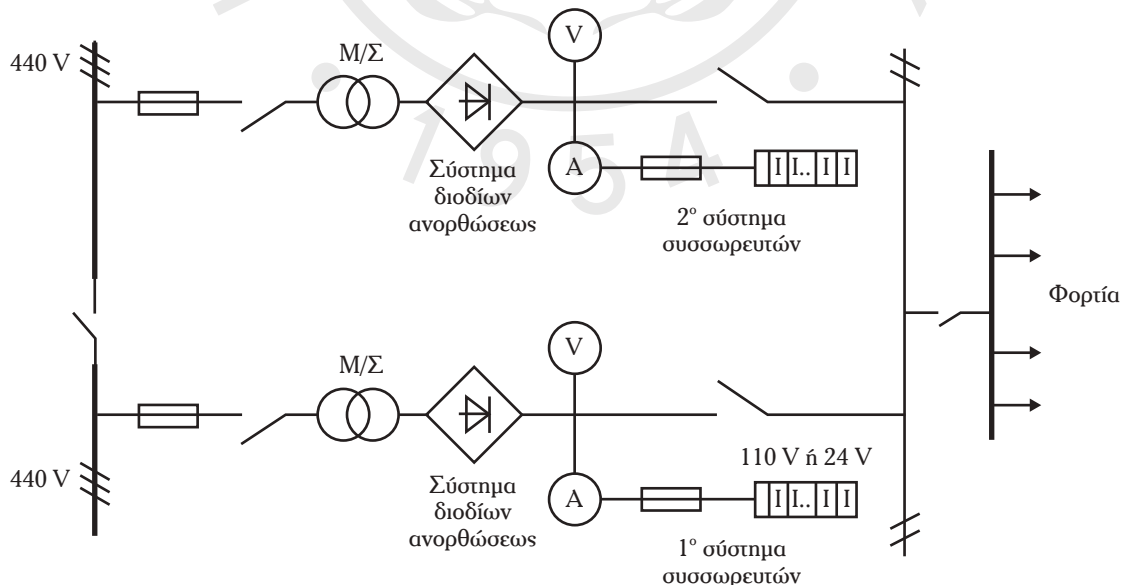
Οι συσσωρευτές θα πρέπει να συνδέονται αυτόματα στον πίνακα έκτακτης ανάγκης, όταν υπάρχει βλάβη στις κύριες γεννήτριες.

Όταν η πηγή έκτακτης ανάγκης είναι συσσωρευτές, τότε αυτοί δεν πρέπει να εγκαθίστανται στον ίδιο χώρο με τον πίνακα έκτακτης ανάγκης. Ο πίνακας αυτός συνδέεται με τον κύριο πίνακα διανομής ηλεκτρικής ισχύος μέσω ενός διακόπτη, ο οποίος θα πρέπει να προστατεύεται από υπερφόρτιση και βραχυκυκλώματα.

8.8 Συστήματα φόρτισης συσσωρευτών.

Στα εμπορικά πλοία υπάρχουν διατάξεις ζωτικής σημασίας, οι οποίες είναι αναγκαίο να λειτουργούν και στην περίπτωση κατά την οποία οι εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ισχύος βρίσκονται για διάφορους λόγους, εκτός λειτουργίας. Αυτές οι διατάξεις είναι τα **συστήματα ναυσιπλοΐας**, οι **ηλεκτρονικές επικοινωνίες** και τα **συστήματα σημάτων** (alarm). Αυτές οι διατάξεις τροφοδοτούνται από ένα αδιάλειπτο σύστημα παροχής τάσεως (Uninterruptible Power Supply-UPS).

Στο σχήμα 8.8 δίδεται ένα αδιάλλειπτο σύστημα



Σχ. 8.8

Αδιάλλειπτο σύστημα παροχής τάσεως σε συστήματα συσσωρευτών
(D. T. Hall: Practical Marine electrical Knowledge).

παροχής τάσεως το οποίο φορτίζει ένα σύστημα συσσωρευτών.

Το σύστημα τροφοδοτεί ζυγό στον οποίο συνδέονται φορτία ΣΡ.

8.9 Ερωτήσεις.

- 1) Ποιος είναι ο ρόλος των συσσωρευτών;
- 2) Ποια είναι η δομή ενός συσσωρευτή;
- 3) Ποια είναι τα κύρια χαρακτηριστικά των συσσωρευτών;

4) Ποιες είναι οι τιμές της τάσεως κατά τη φόρτιση και ποιες κατά την εκφόρτιση των συσσωρευτών;

5) Ποια είναι η σημασία των βαθμών Μπωμέ;

6) Πώς λειτουργεί ο συσσωρευτής μολύβδου;

7) Ποια είναι η διαδικασία φορτίσεως των συσσωρευτών μολύβδου;

8) Ποιες είναι οι κυριότερες βλάβες των συσσωρευτών μολύβδου;

9) Πώς λειτουργούν οι συσσωρευτές καδμιονικελίου;

10) Πώς λειτουργούν οι αλκαλικοί συσσωρευτές;



ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Αγγλικά σύμβολα

- A: Ampere – μονάδα μετρήσεως εντάσεως ηλεκτρικού ρεύματος, εμβαδόν διατομής αγωγού, αρχή πηνίου φάσεως, αρχικό σύμβολο ασύγχρονου κινητήρα, ακροδέκτης πηνίου αυτόματου διακόπτη, αποζεύκτης - διακόπτης, διακόπτης σε πίνακα Μ.Τ..
- A': Πέρασ πηνίου φάσεως.
- B: Πλάτος θαλαμηγού, γεννήτρια, μαγνητικό πεδίο, ακροδέκτης δικτύου.
- aM: Ασφάλειες οι οποίες προστατεύουν κινητήρες.
- C: Ακροδέκτης δικτύου, μανομετρικό του ανεμιστήρα προσαγωγής αέρα στον λέβητα, χωρητικότητα πυκνωτή.
- E: Ηλεκτρεγερτική δύναμη.
- E_f : Τάση διεγέρσεως, αντι-ΗΕΔ.
- E_o : Μέγιστη τιμή ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως.
- F: Μαγνητεγερτική δύναμη.
- f: Συχνότητα.
- G: Γεννήτρια.
- I: Ένταση ρεύματος.
- I_o : Μέγιστη τιμή εντάσεως ηλεκτρικού ρεύματος, ρεύμα εισόδου του κινητήρα στη λειτουργία χωρίς φορτίο.
- I_A : Ρεύμα το οποίο παρέχει ένας ΑΜ/Σ σε ασύγχρονο κινητήρα, ρεύμα φάσεως A.
- I_B : Ρεύμα εκκινήσεως ασύγχρονου κινητήρα, ρεύμα φάσεως B.
- I_{sc} : Ρεύμα βραχυκυκλώσεως.
- \dot{I} : Διάνυσμα ρεύματος.
- i: Στιγμιαία τιμή ρεύματος.
- J: Βαθμός ανομοιομορφίας.
- K: Λόγος μετασχηματισμού.
- K_1 : Συντελεστής τυλίγματος του στάτη ασύγχρονου κινητήρα.

- K_2 : Συντελεστής Kapp.
- L: Αυτεπαγωγή, φάση ηλεκτρικού δικτύου.
- m: Κλίση χαρακτηριστικής f-P
- N: Βόρειος πόλος.
- n: Αριθμός σπειρών, ταχύτητα περιστροφής δρομέα ηλεκτρικής περιστρεφόμενης μηχανής.
- n_s : Σύγχρονη ταχύτητα.
- P: Αριθμός μαγνητικών πόλων, ισχύς εισόδου, ισχύς εξόδου, ισχύς απωλειών.
- R: Ωμική αντίσταση.
- S: Νότιος πόλος, φαινομένη ισχύς, ακροδέκτης φάσεως δικτύου.
- s: Ολίσθηση ασύγχρονου κινητήρα.
- T: Περίοδος χρόνου, Ροπή.
- V: Τάση σε Volt, αρχή τυλίγματος στάτη ασύγχρονου κινητήρα.
- \dot{V} : Διάνυσμα τάσεως.
- v: Ταχύτητα περιστροφής, πέρασ τυλίγματος τάσεως ασύγχρονου κινητήρα.
- W: Αρχή τυλίγματος στάτη ασύγχρονου κινητήρα, αρχικά μονάδας μετρήσεως πραγματικής ισχύος, απώλειες ηλεκτρικής γραμμής.
- w: Πέρασ φάσεως τυλίγματος ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια.
- X: Αντίδραση σκεδάσεως, πέρασ φάσεως τυλίγματος στάτη ασύγχρονου κινητήρα, αρχή φάσεως τυλίγματος ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια.
- X_m : Αντίδραση μαγνητίσεως.
- Y: Σύνδεση φάσεων σε αστέρα, πέρασ φάσεως τυλίγματος στάτη ασύγχρονου κινητήρα, αρχή φάσεως τυλίγματος δρομέα ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια.
- Z: Σύνθετη αντίσταση, πέρασ φάσεως τυλίγματος στάτη, αρχή φάσεως τυλίγματος δρομέα ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια.

Ελληνικά σύμβολα

- A: Γεννήτρια, καμπύλη, ακροδέκτης πηνίου.
- α: Καμπύλη ροπής-στροφών, συντελεστής, λόγος $I_{εκκ}/I_{πφ}$.
- B: Γεννήτρια, καμπύλη, ακροδέκτης πηνίου.
- β: Συντελεστής ο οποίος παίρνει τιμές από 0,75 μέχρι και 0,90.
- Γ: Γεννήτρια, καμπύλη.
- γ: Καμπύλη ροπής-στροφών.
- Δ: Διαφορά.

- δ: Γωνία ισχύος.
- HN: Ηλεκτρονόμος.
- η: Απόδοση.
- λ: Σταθερά.
- μ: Συντελεστής.
- π: 3,14.
- Σ: Άθροισμα.
- σ: Συντελεστής σκεδάσεως, συντελεστής $\Sigma I_b/\Sigma I_a$.
- Φ: Μαγνητική ροή.
- ω: Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε rad/s.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

A

αδιάλλειπτο σύστημα παροχής τάσεως σε
 συστήματα συσσωρευτών 205
 έργος ισχύς 7
 αεριοστρόβιλος 35
 αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα (POD) 199
 αλκαλικοί συσσωρευτές τύπου Ni-MH 204
 ανάλυση ισοδύναμου κυκλώματος 87
 ανοικτά δακτυλιοειδή εφεδρικά δίκτυα 70
 αντιπαράλληλα θυρίστρο 113
 αντιστροφεία ΕΡ σε ΣΡ 195
 αξιοπιστία 3
 αξονική γεννήτρια 12, 13
 απλή διάταξη προώσεως με ΣΡ 188
 αποζεύκτες 155
 ασύγχρονος κινητήρας βαθέων αυλακιών 106
 ασύγχρονος κινητήρας διπλού κλωβού 104
 ασύγχρονος κινητήρας με δακτυλίδια 81
 ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας 79
 ασφάλειες 176
 αυτόματοι διακόπτες 155
 αυτόματος ρυθμιστής στροφών 44

B

βαθμοί προστασίας για το περίβλημα ενός
 ηλεκτρικού πίνακα Χ.Τ. 76
 βλάβες των συσσωρευτών μολύβδου 202
 βολτόμετρο του κυκλώματος διεγέρσεως 75
 βύθιση τάσεως 99

Γ

γενικές αρχές λειτουργίας του ασύγχρονου
 κινητήρα 81
 γεννήτριες με κινητήριες μηχανές στροβίλου 12

Δ

δευτερεύουσα διανομή 2, 65
 δεύτερη μέθοδος: υπολογισμός ρεύματος

 βραχυκυκλώσεως ανά φάση 148
 διαδικασία χαράξεως του κυκλικού
 διαγράμματος 108
 διακόπτες 155
 διακόπτες βοηθητικών κυκλωμάτων 155
 διακόπτες εκκινητές κινητήρων 155
 διακόπτες Μ.Τ. 180
 διακόπτες φορτίου 155
 διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας με
 εναλλασσόμενο ρεύμα (ΕΡ) 65
 διατάξεις προστασίας του κινητήρα από
 βραχυκυκλώματα 118
 διατάξεις προστασίας του κινητήρα από
 υπερφορτίσεις 117
 δίκτυο διανομής έκτακτης ανάγκης 72
 δοκιμή με ακινητοποιημένο δρομέα 98
 δοκιμή χωρίς φορτίο 97
 δομή ηλεκτρικών δικτύων Μ.Τ. 174
 δομή ηλεκτρομαγνητικών ηλεκτρονόμων 157
 δομή και λειτουργία των θερμικών διατάξεων 162
 δομή του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα 79
 δρομέας 80

Ε

 εκκίνηση ασυγχρόνων κινητήρων με δακτυλίδια 103
 εκκίνηση με αντιστάσεις στον στάτη 99
 εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή 100
 εκκίνηση με διακόπτη αστέρα – τρίγωνο (Υ/Δ) 102
 εκκίνηση του ασύγχρονου κινητήρα και
 προστασία από υπερφόρτιση 116
 εκκίνηση των τριφασικών ασυγχρόνων
 κινητήρων 99
 έλεγχος – συντήρηση – βλάβες κινητήρων ΕΡ 134
 έλεγχος ταχύτητας του σύγχρονου κινητήρα 124
 εξήγηση του λειτουργικού κυκλώματος της συνδε-
 σμολογίας του κινητήρα 161
 εξηλεκτρισμένο εμπορικό πλοίο 13
 εξοικονόμηση χώρου και πόρων 3
 επαγόμενες τάσεις 84

επαφές του ηλεκτρομαγνητικού HN 157
 επίδραση της μεταβολής της R_{2r} 92
 επίδραση της μεταβολής της συχνότητας της
 τάσεως του δικτύου 93
 επίδραση της μεταβολής
 της τάσεως του δικτύου V_1 93
 επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων του
 ασύγχρονου κινητήρα στη λειτουργία του 92
 επιλεκτικότητα των προστασιών 68
 επιτρεπόμενη φόρτιση ενός αγωγού 154
 εφαρμογές των ηλεκτρομαγνητικών
 HN 158

Z

ζυγός M.T. 66

H

ηλεκτρική πρόωση με EP 192
 ηλεκτρική πρόωση με ΣΡ 187
 ηλεκτρονικοί ηλεκτρονόμοι 158
 ηλεκτρονόμοι 156
 ηλεκτροπρόωση 185
 ηλεκτροστάσιο 33

Θ

θειίκωση 202
 θεμελιώδεις εξισώσεις 85

I

ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα 121
 ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού ασύγχρονου
 κινητήρα στη λειτουργία με φορτίο 87

K

καθορισμός της αναπτυσσόμενης ροπής T
 του ασύγχρονου κινητήρα 89
 καλώδια M.T. 181
 κανονικό ρεύμα φορτίσεως ή εκφορτίσεως 202
 κατανομή πραγματικής ισχύος μεταξύ
 παραλληλισμένων συγχρόνων γεννητριών 45
 κατασκευή ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα 79
 κατηγορίες ασύγχρονων κινητήρων με
 βραχυκυκλωμένο δρομέα 104
 κατηγορίες ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων 1

κατηγορίες λειτουργίας των ασφαλειών 165
 κίνδυνοι στη M.T. 184
 κινητήρας με βραχυκυκλωμένο
 δρομέα – απευθείας εκκίνηση 99
 κλειστά εφεδρικά δακτυλιοειδή δίκτυα 69
 κυκλικό διάγραμμα του ασύγχρονου κινητήρα 106
 κυκλομετατροπείς 196
 κύρια χαρακτηριστικά συσσωρευτών 201
 κύριοι ηλεκτρικοί πίνακες μιας ηλεκτρικής
 εγκαταστάσεως πλοίου 70

Λ

λειτουργία ενός σύγχρονου κινητήρα με
 μεταβαλλόμενο φορτίο και σταθερή
 διέγερση 123
 λειτουργία του κινητήρα προώσεως στη
 μέγιστη ισχύ του 189
 λεπτομερής ηλεκτρικός ισολογισμός ισχύος 27

M

μαχαιρωτές ασφάλειες τύπου NH ή HRC 164
 μεγέθη ανά μονάδα (p.u.) 139
 μείωση της ταχύτητας περιστροφής του
 κινητήρα προώσεως 189
 μέτρα προστασίας για βραχυκυκλώματα 154
 μηχανές με ανόμοιες χαρακτηριστικές
 ρυθμιστών στροφών 46
 μηχανές με ρυθμιστές στροφών ίδιων
 χαρακτηριστικών 45
 μηχανικά και ηλεκτρικά ακτίνια 83
 μηχανική ενέργεια 42
 μηχανισμός «f - P» 42
 μηχανισμός « V_t - Q» 42
 μικροασφάλειες τύπου G 165
 μονογραμμικά διαγράμματα των
 ηλεκτρικών δικτύων ηλεκτρικής
 ενέργειας σε εμπορικά πλοία 67
 μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου
 ακτινικής μορφής με υποπίνακες 68
 μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου
 ακτινικής μορφής με υποσταθμούς 69
 μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου απλής
 ακτινικής μορφής 67
 μονογραμμική παρουσίαση εφεδρικών
 δικτύων τροφοδοσίας 69

N

Νόμος του Hopkinson 86

Νόμος του Kirchhoff 87

O

ονομαστική κρουστική τάση αντοχής (V_{imp}) 75

ονομαστική συχνότητα (f_{ov}) 76

ονομαστική τάση (V_n) 74

ονομαστική τάση λειτουργίας (V_e) 75

ονομαστική τάση μονώσεως (V_i) 75

ονομαστικό ρεύμα (I_{nA}) 75

ονομαστικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως

μικρής διάρκειας (I_{cw}) 76

ονομαστικός συντελεστής ταυτοχρονισμού (σ) 76

όργανα ενδείξεως και ελέγχου των κύριων
ηλεκτρικών πινάκων 74

Π

παρουσίαση συστήματος ηλεκτρικής
ισχύος ενός εμπορικού πλοίου 140

πειραματικός προσδιορισμός των παραμέτρων
του ισοδυνάμου κυκλώματος του ασύγχρονου
κινητήρα 97

πίνακες Μ.Τ. 182

πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσεως
δικτύων Μέσης Τάσεως (Μ.Τ.) 173

πλοία με πρόωση ατμού 25

πλοία με πρόωση ντίζελ 26

πραγματική ισχύς 7

πρακτική κατασκευή του κυκλικού διαγράμματος 108

προκαταρκτική εκτίμηση ηλεκτρικού φορτίου 25

προστασία ασυγχρόνων κινητήρων 115

P

ροπή εκκινήσεως ($T_{εκκ}$) ασύγχρονου κινητήρα 91

ρύθμιση θερμικού 163

ρύθμιση στροφών ασύγχρονου κινητήρα με
δακτυλιοφόρο δρομέα 114

ρύθμιση στροφών ασυγχρόνων κινητήρων 111

Σ

στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο 82

στροβιλογεννήτριες 34

σύγκριση μεταξύ ασφαλειών τήξεως και
αυτομάτων διακοπών 166

συγχρομετατροπείς 196

σύγχρονοι κινητήρες 119

σύγχρονος κινητήρας ακτινικής ροής 193

σύγχρονος κινητήρας αξονικής ροής 193

συμπεριφορά της σύγχρονης γεννήτριας πλοίου
στην περίπτωση του συμμετρικού βραχυκυκλώ-
ματος 149

σύνδεση γεννητριών παράλληλα 191

σύνδεση γεννητριών ΣΡ σε σειρά 191

συνδεσμολογία και λειτουργία του
αυτόματου διακόπτη Υ-Δ 159

συνδυασμός αξονικής γεννήτριας και
συμβατικών ηλεκτροπαραγωγών ζευγών 13

συνεργασία ασφαλιστικών διατάξεων και οργάνων
διακοπής ρευμάτων βραχυκυκλώσεως 170

συνθήκες παραλληλισμού συγχρόνων γεννητριών 43

συντήρηση των συσσωρευτών μολύβδου 203

συσσωρευτές 201

σύστημα ηλεκτρικής προώσεως με γεννήτρια
ΣΡ και κινητήρα ΣΡ μεγάλης ισχύος 191

σύστημα πρωτεύουσας και δευτερεύουσας
διανομής 65

σύστημα τάσεων, ρευμάτων και συχνοτήτων
των ηλεκτρικών δικτύων πλοίων 3

συστήματα κυκλομετατροπέων και σύγχρονος
κινητήρας 125

συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος
σε εμπορικά πλοία 11

συστήματα προώσεως με κινητήρες ΣΡ 190

συστήματα φορτίσεως συσσωρευτών 205

T

τάσεις και συχνότητες ηλεκτρικών
εγκαταστάσεων πλοίων 11

τριφασικά συστήματα 3

τριφασικά συστήματα συμμετρικά και ισορροπημένα
και φορτία σε σύνδεση σε αστέρα 4

τριφασικά συστήματα συμμετρικά και ισορροπημένα
και φορτία σε σύνδεση σε τρίγωνο 5

τρόποι αντισταθμίσεως 10

τυπικά δίκτυα Μέσης Τάσεως 173

τυπικά συστήματα ηλεκτρικής προώσεως με ΕΡ 197

τύποι ηλεκτρικών κινητήρων στην ηλεκτρική
πρόωση 186

τύποι μετατροπέων 195

τύπος του Kloss 91

Υ

υπολογισμός ρευμάτων βραχυκυκλώσεως
σε σύστημα ηλεκτρικής ισχύος 144
υπολογισμός της ισχύος αντισταθμίσεων και της
χωρητικότητας του πυκνωτή 8
υπολογισμός του ρεύματος σφάλματος 149

Φ

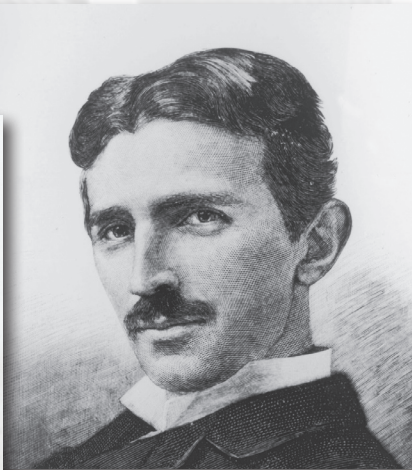
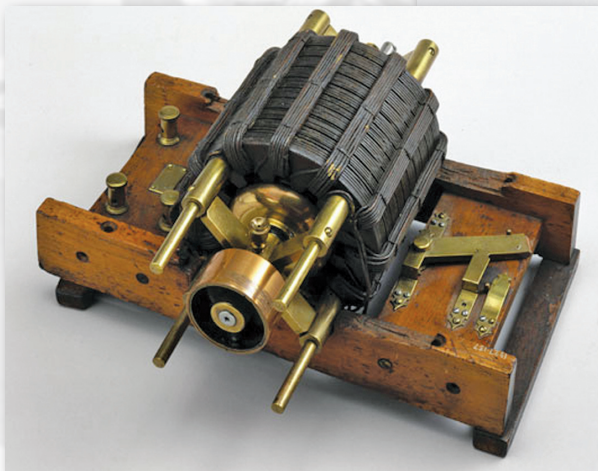
φαινόμενα ποιότητας ισχύος 200
φαινομένη ισχύς 7

Χ

χαρακτηριστικά ρυθμιστών στροφών των
κινητηρίων μηχανών 44

χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής προώσεως με ΕΡ 193
χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου τήξεως –
ρεύματος των ασφαλειών HRC 178
χαρακτηριστικές συχνότητας – ισχύος (f-P) και
τάσεως – αέργου ισχύος (V-Q) των
συγχρόνων γεννητριών 41
χαρακτηριστικές χρόνου – ρεύματος των
ασφαλειών τήξεως 166
χρήση των μετασχηματιστών στις ηλεκτρικές
εγκαταστάσεις πλοίων 77
χρησιμότητα του πραγματικού κυκλικού
διαγράμματος ασύγχρονου κινητήρα 108
χρόνος αποκολλήσεως επαφών 156
χρόνος λειτουργίας και κριτήρια επιλογής
των ασφαλειών 164





*Πρωτότυπος επαγωγικός κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος
(Μουσείο Επιστημών του Λονδίνου) του Νίκολα Τέσλα.*

*Ο Νίκολα Τέσλα (1856 - 1943), ήταν Σέρβος εφευρέτης, μηχανολόγος,
ηλεκτρολόγος μηχανικός, και από τους σημαντικότερους φυσικούς
στην ιστορία της επιστήμης.*