



ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ
ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ
ΑΚΑΔΗΜΙΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΑΡΙΣΤΕΙΔΗ Γ. ΒΛΑΧΟΥ

ΤΟΜΟΣ ΠΡΩΤΟΣ



ΑΘΗΝΑ 2018

ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ



ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ
ΑΚΑΔΗΜΙΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ



Α' ΕΚΔΟΣΗ 2016

ISBN: 978-960-337-126-7

Copyright © 2016 Ιδρυμα 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 τήν εκπαίδευσιν νέων ελληνικής ύπηκοότητος έν τῷ έπιστημονικῷ καί 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 τεχνιτών κατά τα πρότυπα της επαγγελματικής εκπαίδευσως άλλων ευρωπαϊκών χωρών.

Την 23η Φεβρουαρίου του 1956 εγκρίθηκε η σύσταση του κοινωφελούς Ιδρύματος Ευγενίδου, την διαχείριση του οποίου κατά 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 συνεχιστής του έργου του Ιδρύματος Ευγενίδου έχει αναλάβει ο Λεωνίδας Δημητριάδης-Ευγενίδης.

Μία από τις πρώτες δραστηριότητες του Ιδρύματος Ευγενίδου, ευθύς μετά την ίδρυσή του, υπήρξε η συγγραφή και έκδοση κατάλληλων διδακτικών εγχειριδίων για τους μαθητές των τεχνικών σχολών, καθώς διαπιστώθηκε ότι αποτελεί πρωταρχική ανάγκη ο εφοδιασμός των μαθητών με σειρές από βιβλία, τα οποία θα έθεται η ορθά θεμέλια για την παιδεία τους και θα αποτελούσαν ουσιαστικά πολύτιμη βιβλιοθήκη για κάθε τεχνικό. Καρπός αυτής της δραστηριότητας είναι η Βιβλιοθήκη του Τεχνίτη (1957-1975), η οποία αριθμεί 32 τίτλους, η Βιβλιοθήκη του Τεχνικού (1962-1975), που περιλαμβάνει 50 τίτλους, η Τεχνική Βιβλιοθήκη (1969-1980) με 11 τίτλους και η Βιβλιοθήκη του Τεχνικού Βοηθού Χημικού (1971-1973) με 3 τίτλους. Επί πλέον, από το 1977 μέχρι σήμερα έχουν εκδοθεί 171 τίτλοι για τους μαθητές των Τεχνικών και Επαγγελματικών Λυκείων και 16 για τους μαθητές των Σχολών Μέσης Τεχνικής και Επαγγελματικής εκπαίδευσως.

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 Εκπαίδευσως Ναυτικών του Υπουργείου Ναυτιλίας. Η συγγραφή και έκδοση των εκπαιδευτικών εγχειριδίων για τους σπουδαστές των ναυτικών σχολών ανειτέθη στο Ίδρυμα Ευγενίδου με την υπ' αριθμ. 61288/5031/9.8.1966 απόφαση του Υπουργείου Εμπορικής Ναυτιλίας, όποτε και λειτούργησε η αρμόδια Επιτροπή Εκδόσεων, η οποία είχε συσταθεί ήδη από το 1958. Η συνεργασία Ιδρύματος Ευγενίδου και Υπουργείου Εμπορικής Ναυτιλίας ανανεώθηκε με την υπ. αριθμ. Μ2111.1/2/99 υπουργική απόφαση όπως τροποποιήθηκε από την Μ3611.2/05/05/16-12-2005, με την οποία το ΥΕΝ ανέθεσε στο Ίδρυμα Ευγενίδου την συγγραφή διδακτικών εγχειριδίων για τις Ακαδημίες Εμπορικού Ναυτικού.

Στην Βιβλιοθήκη του Ναυτικού περιλαμβάνονται συνολικά 137 τίτλοι μέχρι σήμερα: 27 τίτλοι για τις Δημόσιες Σχολές Εμπορικού Ναυτικού (1967-1979), 42 τίτλοι για τις Ανώτατες Δημόσιες Σχολές Εμπορικού Ναυτικού (1981-2001), 39 τίτλοι για τις Ακαδημίες Εμπορικού Ναυτικού, 13 εγχειρίδια κατευθυνόμενης εκπαίδευσως επί πλοίου και 16 μεταφράσεις ναυτικών εγχειριδίων.

Όλα τα βιβλία της Βιβλιοθήκης του Ναυτικού, εκτός του ότι έχουν συγγραφεί σύμφωνα με τα αναλυτικά προγράμματα διδασκαλίας των σχολών και ανταποκρίνονται στις ανάγκες των σπουδαστών, είναι γενικότερα χρήσιμα για όλους τους αξιωματικούς του Εμπορικού Ναυτικού, που ασκούν το επάγγελμα ή εξελίσσονται στην ιεραρχία. Επί πλέον οι συγγραφείς και η Επιτροπή Εκδόσεων καταβάλλουν κάθε προσπάθεια ώστε τα βιβλία να είναι επιστημονικώς άρτια αλλά και προσαρμοσμένα στις ανάγκες και στις δυνατότητες των σπουδαστών.

Την περίοδο 2012-2013 το ΥΝΑ με το υπ' αριθμ. Μ3616/01/2012/26-09-2012 έγγραφο ανέθεσε στην Επιτροπή Εκδόσεων του Ιδρύματος Ευγενίδου την σύσταση ειδικής ομάδας εργασίας εμπειρογνομόνων για την επικαιροποίηση των αναλυτικών προγραμμάτων σπουδών για τις ΑΕΝ, τα ΚΕΣΕΝ και τα ειδικά σχολεία Πλοίαρχων και Μηχανικών, εφαρμόζοντας τις νέες απαιτήσεις εκπαίδευσης και πιστοποίησης ναυτικών της Διεθνούς Συμβάσεως STCW '78 (Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers – Manila amendments 2010). Με βάση τα νέα αναλυτικά προγράμματα για τις ΑΕΝ, τα οποία εφαρμόστηκαν για πρώτη φορά την χρονιά 2013-2014, ξεκίνησε από το 2014 και η επικαιροποίηση των υφισταμένων διδακτικών χειριδίων, προκειμένου αυτά να είναι συμβατά με τις νέες διεθνείς απαιτήσεις.

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

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Εμμανουήλ Δρns, Ομ. Καθηγητής ΕΜΠ, Πρόεδρος.

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

Στυλιανός Μπέλλας, Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Υπ. Ναυτιλίας και Νησιωτικής Πολιτικής.

Σύμβουλος επί των εκδόσεων του Ιδρύματος **Κων. Αγγ. Μανάφns**, Ομ. Καθηγ. Φιλοσοφικής Σχολής Πανεπιστημίου Αθηνών.

Γραμματέας της Επιτροπής, **Ελευθερία Τελειώνη**.

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

Διατελέσαντα μέλη της Επιτροπής

Γ. Κακριδής (1955-1959) Καθηγητής ΕΜΠ, Α. Καλογεράς (1957-1970) Καθηγητής ΕΜΠ, Α. Παππάς (1955-1983) καθηγητής ΕΜΠ, Χ. Καβουνίδης (1955-1984) Μπχ. Ηλ. ΕΜΠ, Μ. Αγγελόπουλος (1970-2003) ομ. καθηγητής ΕΜΠ, Σπ. Γουλιέλμος (1958) Αντ/ρχος, Ξ. Αντωνιάδης (1959-1966) Αντ/ρχος, Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Π. Γ. Τσακίρης (1967-1969) Πλοίαρχος, Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Ελλ. Σίδερns (1967-1969) Υποναύαρχος, Π. Φουσιέρns (1969-1971) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Αλ. Μοσχονάς (1971-1972) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Ι. Χρυσανθακόπουλος (1972-1974) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Αθαν. Σωτηρόπουλος (1974-1977) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Γ. Σπαριώτης (1977) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., προσωρινός Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Θ. Πουλάκης (1977-1979) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Π. Λυκούδης (1979-1981) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Αναστ. Δημαράκης (1981-1982) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Κ. Τσαντίλας (1982-1984) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Α. Σιαυρόπουλος ομ. καθηγητής Πειραιώς (2003-2008) Ε. Τζαβέλας (1984-1986) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Γ. Γρηγοράκος (1986-1988) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Α. Μπαρκασιός (1988-1989) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Κ. Παπαναστασίου (1989) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Γ. Λάμπρου (1989-1992) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Κ. Κοκορέσιος (1992-1993) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Κ. Μαρκάκης (1993-1994) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Ι. Ζουμπούλης (1994-1995) Πλοίαρχος Λ.Σ., Φ. Ψαρράς (1995-1996) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Γ. Καλαρόνης (1996-1998) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Θ. Ρενιζεπέρns (1998-2000) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Ι. Στεφανάκης (2000-2001) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Κ. Μαρβίνος (2001) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Π. Εξαρχόπουλος (2001-2003) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Κ. Μιτριλάκης (2003-2004) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Ν. Θεμέλαρος (2003-2004) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Π. Κουβέλης (2004-2005) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Δ. Βασιλάκης (2005-2008) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Π. Πειρόπουλος (2008-2009) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Α. Ματοάγγος (2009-2011) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Ι. Σέργης (2011-2012) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντης 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/ντης Ναυτ. Εκπαιδ., Βενετία Καλλιπολίτου (2014-2017) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ. Δ/ντρια Ναυτ. Εκπαιδ..

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

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΤΟΜΟΣ ΠΡΩΤΟΣ

Δρ. ΒΛΑΧΟΥ Γ. ΑΡΙΣΤΕΙΔΗ
Ηλεκτρολόγου Μηχανικού
Καθηγητή ΑΕΝ Ασπροπύργου

ΑΘΗΝΑ
2018



ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Το βιβλίο αυτό απευθύνεται στους σπουδαστές Μηχανικούς Γ' 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 στόχο του αν οι σπουδαστές κατανοήσουν την αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών διατάξεων-ουσκευών που αναλύονται στα αντίστοιχα κεφάλαια.

Αισθάνομαι επιτακτική 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 Προυσαλίδη 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 στην κατεύθυνση αυτή.

Ο συγγραφέας





ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

1.1	Εισαγωγή.....	1
1.2	Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Νόμος του Faraday.....	7
1.3	Βασικές αρχές λειτουργίας γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος.....	9
1.4	Μαγνητικά κυκλώματα.....	16
1.5	Ερωτήσεις.....	21
1.6	Προτεινόμενες ασκήσεις.....	22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

2.1	Εισαγωγή.....	25
2.2	Δομή και χρήσεις των μονοφασικών Μ/Σ.....	25
2.3	Λειτουργία των μονοφασικών Μ/Σ.....	26
2.4	Πειραματικός προσδιορισμός των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος του πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ.....	36
2.5	Διακύμανση τάσεως ή εκατοστιαία πώση τάσεως.....	38
2.6	Απώλειες και απόδοση των πραγματικών Μ/Σ – Γενικά.....	39
2.7	Τριφασικός Μ/Σ.....	50
2.8	Συνθήκες παραλληλισμού μονοφασικών Μ/Σ.....	61
2.9	Συνθήκες παραλληλισμού.....	64
2.10	Ειδικές κατηγορίες Μ/Σ.....	64
2.11	Συντήρηση, βλάβες και επισκευές Μ/Σ.....	67
2.12	Ερωτήσεις.....	71
2.13	Προτεινόμενες ασκήσεις.....	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ ΑΝΟΡΘΩΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ

3.1	Εισαγωγή.....	73
3.2	Ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος.....	73
3.3	Το πρόβλημα ψύξεως και προστασίας των ηλεκτρονικών ισχύος.....	77
3.4	Σύγκριση των ηλεκτρονικών ισχύος.....	79
3.5	Κυκλώματα ανορθωτικών διατάξεων ισχύος – Εισαγωγή.....	79
3.6	Ερωτήσεις.....	82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1	Εισαγωγή.....	83
4.2	Στοιχειώδης κινητήρας μαγνητικής αντιστάσεως – Γενικά.....	84
4.3	Μαγνητικό σύστημα με διπλή διέγερση.....	89

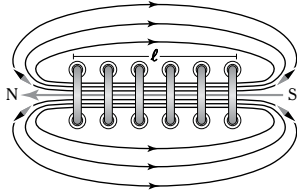
4.4 Ερωτήσεις.....	93
4.5 Προτεινόμενες ασκήσεις.....	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

5.1 Εισαγωγή.....	95
5.2 Δομή των μηχανών ΣΡ.	95
5.3 Τυλίγματα μηχανών ΣΡ.	97
5.4 Λειτουργία γεννήτριας ΣΡ.	100
5.5 Είδη μηχανών (γεννητριών) ΣΡ – Εισαγωγή.....	107
5.6 Προτεινόμενες ασκήσεις.....	124
5.7 Κινητήρες ΣΡ – Εισαγωγή.	125
5.8 Είδη κινητήρων ΣΡ – Εισαγωγή.	127
5.9 Ρύθμιση ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων ΣΡ – Εισαγωγή.....	133
5.10 Κινητήρες ΣΡ με μόνιμους μαγνήτες.	139
5.11 Βλάβες, αιτίες και επισκευές των μηχανών ΣΡ.....	140
5.12 Ερωτήσεις – Εργασίες	150
5.13 Προτεινόμενες ασκήσεις.....	151

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

6.1 Εισαγωγή.....	153
6.2 Κατηγορίες συγχρόνων γεννητριών.	153
6.3 Συστήματα διεγέρσεως συγχρόνων γεννητριών.....	153
6.4 Αρχή λειτουργίας της στοιχειώδους σύγχρονης γεννήτριας.....	155
6.5 Επαγωγικό τύμπανο σύγχρονης γεννήτριας.	157
6.6 Ανάπτυξη τάσεως σε μια σύγχρονη γεννήτρια.....	160
6.7 Αντίδραση τυμπάνου σύγχρονης γεννήτριας	165
6.8 Ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας.	166
6.9 Ισοζύγιο ισχύων και απόδοση της σύγχρονης γεννήτριας.....	166
6.10 Εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ισχύς και ροπή σε σύγχρονη γεννήτρια.....	167
6.11 Ρύθμιση της πραγματικής και αέργου ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας.....	168
6.12 Πειραματικός προσδιορισμός των κυκλωματικών στοιχείων του απλοποιημένου ισοδυναμίου, ανά φάση, ηλεκτρικού κυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας.	169
6.13 Ρύθμιση και έλεγχος τάσεως στις σύγχρονες γεννήτριες. Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσεως.....	171
6.14 Ψύξη, βλάβες, λίπανση και συντήρηση των συγχρόνων γεννητριών.	172
6.15 Ερωτήσεις.....	180
6.16 Προτεινόμενες ασκήσεις.....	181
Πίνακας συμβόλων	183
Ευρετήριο	184



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

1.1 Εισαγωγή.

Προκειμένου να κατανοηθούν οι αρχές λειτουργίας των ηλεκτρικών διατάξεων και συσκευών σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση πλοίου είναι απαραίτητο να δοθούν οι βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού.

Οι έννοιες του μαγνητικού πεδίου, της μαγνητικής ροής, της μαγνητικής διεγέρσεως και των μαγνητικών ιδιοτήτων της ύλης αποκτούν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην κατασκευή και λειτουργία, γενικά, των ηλεκτρικών διατάξεων και συσκευών.

1.1.1 Μαγνητικό πεδίο.

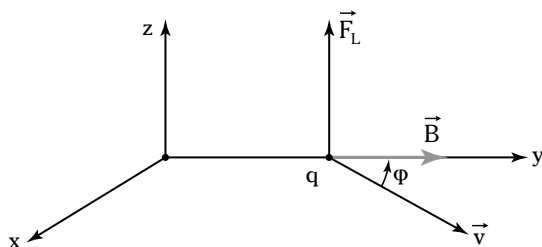
Για το μαγνητικό πεδίο ισχύουν οι ακόλουθοι ορισμοί.

Ορισμός 1: Μαγνητικό πεδίο είναι η περιοχή του χώρου, σε κάθε σημείο της οποίας ένα φυσικό διανυσματικό μέγεθος, που ονομάζεται **μαγνητική επαγωγή**, λαμβάνει μία ορισμένη τιμή.

Ορισμός 2: Μαγνητικό πεδίο είναι η περιοχή του χώρου μέσα στην οποία αν τοποθετηθεί ρευματοφόρος αγωγός, μαγνήτης ή κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο δέχεται την επίδραση δυνάμεων.

1) Μαγνητική επαγωγή.

Έστω κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο q , με ταχύτητα \vec{v} μέσα σ' ένα μαγνητικό πεδίο (σχ. 1.1α). Στο φορτίο ασκείται από το μαγνητικό πεδίο μία δύναμη Laplace, \vec{F}_L .



Σχ. 1.1α

Δύναμη Laplace σε κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο.

Πειραματικά, αποδεικνύεται ότι η δύναμη Laplace (\vec{F}_L), η οποία ασκείται σε κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο q , μέσα σε μαγνητικό πεδίο, με ταχύτητα \vec{v} είναι:

1) Ανάλογη της ταχύτητας \vec{v} .

2) Ανάλογη του φορτίου q .

3) Ανάλογη του ημιτόνου της γωνίας φ , η οποία σχηματίζεται μεταξύ του διανύσματος της ταχύτητας και της διεύθυνσεως του μαγνητικού πεδίου.

Το μέτρο της δυνάμεως Laplace, δίδεται:

$$F_L = Bqnv\sin\varphi. \quad (1.1)$$

Η σταθερή αναλογίας, B , από την τιμή της οποίας εξαρτάται το μαγνητικό πεδίο ονομάζεται **μαγνητική επαγωγή** ή **πυκνότητα μαγνητικής ροής**. Διανυσματικά, η **δύναμη Laplace** γράφεται:

$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \times \vec{B}]. \quad (1.2)$$

Η διεύθυνση της δυνάμεως Laplace είναι κάθετη στο επίπεδο, που ορίζουν τα διανύσματα \vec{v} και \vec{B} και η φορά της είναι η ίδια με εκείνη, κατά την οποία προχωρεί δεξιόστροφος κοχλίας, αν στρέψουμε το διάνυσμα \vec{v} κατά την μικρότερη γωνία για να συναντήσουμε το διάνυσμα \vec{B} (στο σχ. 1.1α κατά τη γωνία φ).

Από τη σχέση 1.1, έχουμε:

$$B = \frac{F_L}{qnv\sin\varphi}. \quad (1.3)$$

Η σχέση 1.3, δίνει το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής B . Ένα μαγνητικό πεδίο έχει μαγνητική επαγωγή 1 Tesla (1 T) σ' ένα σημείο του, όταν φορτίο 1 C [$q=1$ C (Coulomb)] το οποίο περνάει από το σημείο με ταχύτητα 1 m/s, κάθετα στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου μαγνητικής επαγωγής \vec{B} , δέ-

χεται δύναμη 1 N: $1\text{T} = \frac{1\text{Ns}}{1\text{Cm}} = \frac{1\text{N}}{\text{Am}}$

όπου $\frac{1\text{C}}{1\text{s}} = 1\text{A}$ (Αμπέρ).

2) Δύναμη Laplace σε ρευματοφόρο αγωγό.

Έστω ότι ευθύγραμμος αγωγός ενεργού μήκους ℓ τοποθετείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο \vec{B} ενώ διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως I (οx. 1.1β).

Στον αγωγό ασκείται δύναμη Laplace, το μέτρο της οποίας είναι:

$$F_L = BI\ell\eta\mu\varphi. \quad (1.4)$$

Αν $\varphi = 0$ ή $\varphi = 180^\circ$, τότε στον αγωγό δεν ασκείται καμία δύναμη.

Απόδειξη της σχέσεως 1.4.

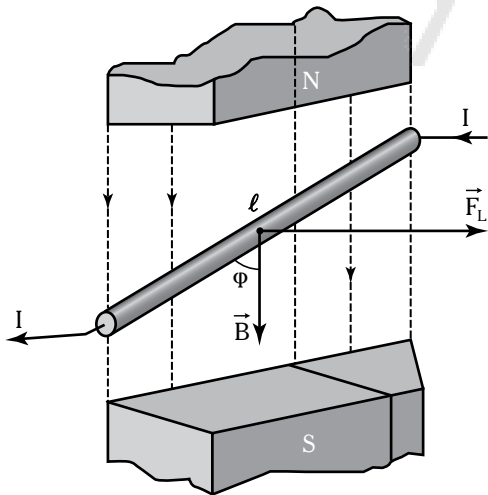
Θεωρούμε $\Delta\ell_1, \Delta\ell_2, \dots, \Delta\ell_n$ τα στοιχειώδη μήκη του αγωγού μήκους ℓ στα οποία ασκούνται στοιχειώδεις δυνάμεις Laplace $\Delta\vec{F}_L^{(1)}, \Delta\vec{F}_L^{(2)}, \dots, \Delta\vec{F}_L^{(n)}$ που έχουν το ίδιο μέτρο, διεύθυνση και φορά. Η συνισταμένη \vec{F}_L των στοιχειωδών δυνάμεων, η οποία ασκείται στον αγωγό θα έχει μέτρο ίσο με το άθροισμα των μέτρων τους.

$$\begin{aligned} F_L &= \sum_{n=1}^L \Delta F_n = \sum_{n=\Delta\ell_1}^L BI\Delta\ell_n\eta\mu\varphi = \\ &= BI\eta\mu\varphi \cdot \sum_{n=\Delta\ell_1}^L \Delta\ell_n = BI\ell\eta\mu\varphi. \end{aligned}$$

Το μήκος ℓ είναι το ενεργό μήκος του αγωγού (εκείνο το οποίο βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο).

1.1.2 Μαγνητική ροή.

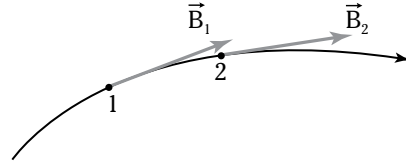
Ένα μαγνητικό πεδίο απεικονίζεται με ένα σύνολο μαγνητικών δυναμικών γραμμών.



Σx. 1.1β

Ρευματοφόρος αγωγός σε μαγνητικό πεδίο.

Ορισμός. Δυναμική γραμμή του μαγνητικού πεδίου ονομάζεται η γραμμή εκείνη, σε κάθε σημείο της οποίας το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} εφάπτεται σε αυτήν (οx. 1.1γ).



Σx. 1.1γ

Μαγνητική δυναμική γραμμή ενός μαγνητικού πεδίου.

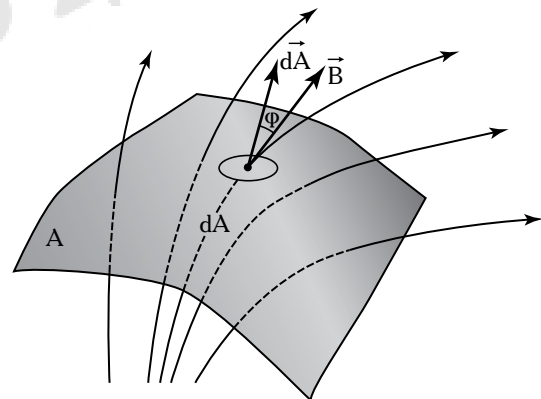
Τα χαρακτηριστικά των μαγνητικών γραμμών ενός μαγνητικού πεδίου είναι ότι:

- 1) Είναι κλειστές.
- 2) Ξεκινούν από τον βόρειο πόλο και καταλήγουν στον νότιο πόλο σε έναν μαγνήτη.
- 3) Δεν τέμνονται, γιατί σε κάθε σημείο του μαγνητικού πεδίου το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής έχει μία διεύθυνση, οπότε από κάθε σημείο του πεδίου διέρχεται μία και μόνο μία μαγνητική δυναμική γραμμή.

4) Όταν είναι παράλληλες και ισαπέχουσες, τότε το μαγνητικό πεδίο είναι ομοιόμορφο.

Η μαγνητική ροή Φ , ενός μαγνητικού πεδίου, μαγνητικής επαγωγής \vec{B} , είναι το μονόμετρο φυσικό μέγεθος, το οποίο εκφράζει το πλήθος των μαγνητικών δυναμικών γραμμών, που διέρχονται από μία επιφάνεια, η οποία τοποθετείται στο μαγνητικό πεδίο (οx. 1.1δ).

Έστω μία επιφάνεια εμβαδού A σε ένα μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής \vec{B} (οx. 1.1δ). Η στοιχειώδης μαγνητική ροή $d\Phi$ του διανύσματος \vec{B} ,



Σx. 1.1δ

Επιφάνεια εμβαδού A , η οποία τοποθετείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής \vec{B} .

η οποία περνάει από κάποιο στοιχειώδες τμήμα εμβαδού dA της επιφάνειας A , ισούται με το γινόμενο του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής στην περιοχή της στοιχειώδους επιφάνειας, επί το εμβαδόν της, επί το συνημίτονο της γωνίας προσπτώσεως των δυναμικών γραμμών στο τμήμα dA :

$$d\Phi = BdA \cos\varphi \quad (\vec{B}, d\vec{A}) \quad \text{ή} \quad d\Phi = \vec{B}d\vec{A}. \quad (1.5)$$

Η ολική ροή Φ , που διέρχεται από την επιφάνεια εμβαδού A , δίδεται από το ακόλουθο ολοκλήρωμα:

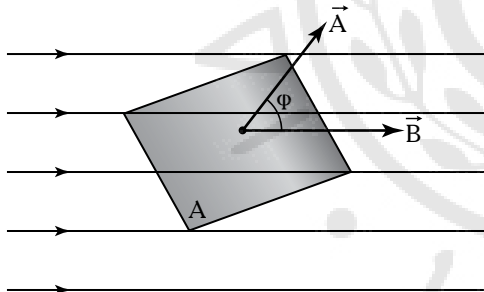
$$\Phi = \int_A B \cos\varphi dA. \quad (1.6)$$

Στην περίπτωση ομογενούς και ομοιόμορφου μαγνητικού πεδίου (σχ. 1.1ε) ισχύει:

$$\Phi = BA \cos\varphi. \quad (1.7)$$

Η μονάδα μετρήσεως της μαγνητικής ροής είναι Weber (Wb). Από τη σχέση 1.7, έχουμε $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Tm}^2$ όπου: T (Tesla), είναι η μονάδα μετρήσεως της μαγνητικής επαγωγής B και m^2 το εμβαδό σε τετραγωνικά μέτρα της επίπεδης επιφάνειας (σχ. 1.1ε).

Αν η επίπεδη επιφάνεια είναι κάθετη στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές, τότε $\cos\varphi = 1$, οπότε η ροή Φ είναι: $\Phi = BA$.



Σχ. 1.1ε

Ομογενές και ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο και επίπεδη επιφάνεια.

- Προέλευση του μαγνητικού πεδίου.

Βιομηχανικά αξιοποιήσιμο μαγνητικό πεδίο παράγεται απ' το ηλεκτρικό ρεύμα. Η μαγνητική επαγωγή εξαρτάται απ' το ρεύμα (αίτιο δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου) και από τη φύση του μέσου, εντός του οποίου εγκαθίσταται το πεδίο. Η ιδιότητα αυτού του μέσου ονομάζεται **μαγνητική διαπερατότητα**.

Ορισμός. Μαγνητική διαπερατότητα ενός μέσου ονομάζεται η ιδιότητά του να επηρεάζει το μαγνητικό πεδίο μέσα στο οποίο εγκαθίσταται. Η απόλυτη

μαγνητική διαπερατότητα μ , ενός μέσου εκφράζει το μέτρο της «ευκολίας» το οποίο εμφανίζει το μέσο για την εγκατάσταση ενός μαγνητικού πεδίου.

Για μια μεγάλη οικογένεια υλικών μέσων ισχύει $\mu = \mu_0 \mu_r$, όπου το μ_r ονομάζεται **σχετική μαγνητική διαπερατότητα** του υλικού:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}. \quad (1.8)$$

Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ_r , είναι καθαρός αριθμός, προσδιορίζεται πειραματικά, και εκφράζει πόσες φορές είναι μεγαλύτερη η απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα ενός μέσου σε σχέση με το κενό. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού μ_0 , είναι παγκόσμια σταθερά ίση με: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

1.1.3 Μαγνητική διέγερση.

Η μαγνητική επαγωγή \vec{B} , ενός μαγνητικού πεδίου, σε ένα σημείο του, εξαρτάται από την αιτία δημιουργίας του αλλά και από το μέσο μέσα στο οποίο εγκαθίσταται. Ένα πεδιακό διάνυσμα, που είναι ανεξάρτητο από το μέσο, εντός του οποίου εγκαθίσταται το μαγνητικό πεδίο είναι η μαγνητική διέγερση \vec{H} .

Ορισμός. Μαγνητική διέγερση \vec{H} σε ένα σημείο του μαγνητικού πεδίου ονομάζεται ένα διάνυσμα \vec{H} ομόρροπο του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} , στο αντίστοιχο σημείο, με μέτρο το πηλίκο του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής προς την απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα του μέσου:

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{B}{\mu_r \mu_0}, \quad (1.9)$$

είναι: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$.

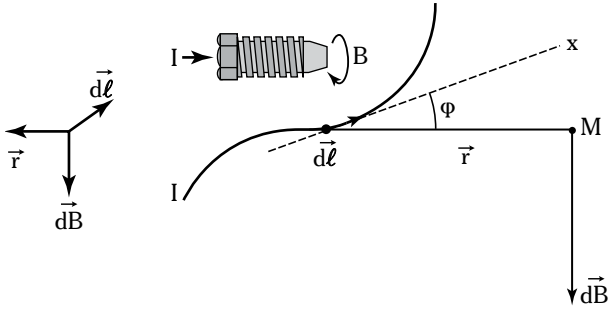
Οι μονάδες μετρήσεως της μαγνητικής διεγέρσεως είναι $[H] = [A]/[M]$ (Αμπέρ/μ).

1) Νόμος των Biot-Savart.

Στην περίπτωση μίας αυθαίρετης κατανομής ρεύματος, ο υπολογισμός του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} , σε κάθε σημείο γίνεται χρησιμοποιώντας τον Νόμο του Biot-Savart. Οπότε η μαγνητική επαγωγή του μαγνητικού πεδίου σε σημείο ενός μέσου, στο οποίο εγκαθίσταται, υπολογίζεται ως εξής (σχ. 1.1στ):

1) Διαιρούμε τον αγωγό σε στοιχειώδη ευθύγραμμα τμήματα, $d\vec{\ell}$.

2) Σε κάθε στοιχειώδες ρευματοφόρο τμήμα,



Σχ. 1.1στ

Νόμος των Biot-Savart,

όπου \vec{r} η διανυσματική ακτίνα (προσανατολισμένη απόσταση αγωγού-σημείου) και φ η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων $d\vec{\ell}$ και \vec{r} .

$d\vec{\ell} \times \mathbf{I}$, του αγωγού αντιστοιχίζουμε μια στοιχειώδη μαγνητική επαγωγή $d\vec{B}$. Το άθροισμα όλων των μαγνητικών επαγωγών $\sum d\vec{B}$ για όλα τα στοιχειώδη ρευματοφόρα τμήματα του αγωγού δίνει τη μαγνητική επαγωγή \vec{B} , την οποία δημιουργεί ο αγωγός.

Ο Νόμος των Biot-Savart συνδέει τα χαρακτηριστικά του στοιχείου ρεύματος ($d\vec{\ell} \times \mathbf{I}$) με τη στοιχειώδη μαγνητική επαγωγή $d\vec{B}$. Το διάνυσμα $d\vec{\ell}$ έχει τη φορά της εντάσεως του ηλεκτρικού ρεύματος στον αγωγό.

Η στοιχειώδης μαγνητική επαγωγή $d\vec{B}$ στο σημείο $M(\vec{r}, \varphi)$ έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1) Διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο ($d\vec{\ell}, \vec{r}$) το οποίο ορίζει η διεύθυνση $d\vec{\ell}$ και το σημείο M .

2) Το σύστημα των διανυσμάτων ($d\vec{B}, d\vec{\ell}, \vec{r}$) να έχει την φορά των δεικτών του ρολογιού.

Το μέτρο της στοιχειώδους μαγνητικής επαγωγής είναι:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\ell}{r^2} \eta\mu\varphi \quad (1.10)$$

όπου $\frac{\mu_0}{4\pi}$ η μαγνητική σταθερά.

Διανυσματικά, η στοιχειώδης μαγνητική επαγωγή, στο σημείο M , δίδεται ως εξής: $d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{\ell} \times \vec{r}}{r^3}$

όπου \vec{r} , είναι το διάνυσμα θέσεως από το στοιχειώδες ρευματικό στοιχείο προς το σημείο M . Η τιμή της συνολικής μαγνητικής επαγωγής προκύπτει από το διανυσματικό ολοκλήρωμα: $\vec{B} = \int d\vec{B}$.

Στην περίπτωση κατά την οποία δεν λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες του μέσου, στο οποίο εγκαθίσταται το μαγνητικό πεδίο, ο Νόμος των Biot-Savart, για τη στοιχειώδη μαγνητική διέγερση (μέτρο) στο σημείο M (σχ. 1.1στ), του μαγνητικού πεδίου είναι:

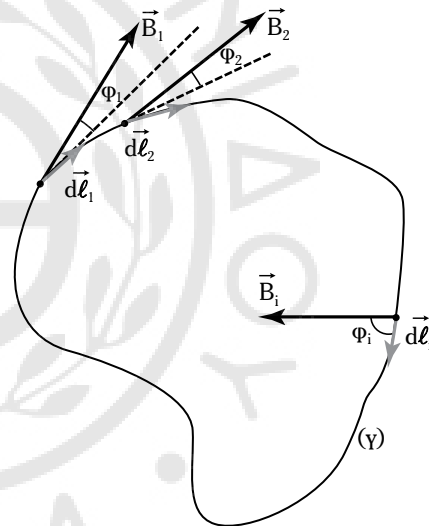
$$dH = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\ell}{r^2} \eta\mu\varphi. \quad (1.11)$$

Η πηγή του μαγνητικού πεδίου είναι το στοιχείο ρεύματος $d\vec{\ell} \times \mathbf{I}$, όπως ακριβώς είναι το φορτίο q είναι η πηγή του ηλεκτροστατικού πεδίου.

2) Νόμος του διαρρέυματος.

Ο Νόμος του διαρρέυματος ή του Ampere χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μαγνητικής επαγωγής του μαγνητικού πεδίου, όταν η συμμετρία κατανομής του ρεύματος είναι πολύ μεγάλη, ώστε να είναι εύκολος ο υπολογισμός του ολοκληρώματος: $\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$. Ο συμβολισμός \oint δείχνει ότι η ολοκλήρωση (κυκλοφορία), γίνεται κατά μήκος κλειστής γραμμής.

Έστω λοιπόν μία κλειστή γραμμή (γ), η οποία τοποθετείται σε μόνιμο μαγνητικό πεδίο, που δημιουργείται από ρευματοφόρους αγωγούς (σχ. 1.1ζ).



Σχ. 1.1ζ

Κλειστή γραμμή (γ) μέσα σε μόνιμο μαγνητικό πεδίο.

Διαμοιράζουμε την κλειστή γραμμή (γ) σε στοιχειώδη τμήματα (dl_1, dl_2, \dots, dl_n), έτσι ώστε το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} , να θεωρείται σταθερό σε κάθε στοιχειώδες τμήμα. Σχηματίζουμε τα ακόλουθα αθροίσματα στην φορά, η οποία συμπίπτει με τη φορά περιστροφής του δεξιόστροφου κοχλία, που στρέφεται στη φορά, διαγραφής της καμπύλης (γ):

$$\Lambda_B = B_1 dl_1 \eta\mu\varphi_1 + B_2 dl_2 \eta\mu\varphi_2 + \dots + B_n dl_n \eta\mu\varphi_n$$

$$\eta \quad \Lambda_B = \sum_{(\gamma)} B_i dl_i \eta\mu\varphi_i = \sum_{(\gamma)} \vec{B}_i \cdot d\vec{\ell}_i. \quad (1.12)$$

Το στοιχειώδες τμήμα $d\vec{\ell}$ έχει την φορά διαγραφής της κλειστής γραμμής (γ).

Το άθροισμα Λ_B είναι η κυκλοφορία του \vec{B} πάνω στην προσανατολισμένη γραμμή (γ).

Ο Νόμος του διαρρέυματος ή του Ampere συνδέει την κυκλοφορία Λ_B με τις εντάσεις των ρευμάτων, τα οποία δημιουργούν το μαγνητικό πεδίο.

Από μια πιο αυστηρή μαθηματική άποψη ο Νόμος του Ampere για ένα μαγνητικό πεδίο εκφράζει την κυκλοφορία της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος της κλειστής γραμμής (γ), που ισούται με μ_0 (διαπερατότητα του κενού) επί το συνολικό ρεύμα, η οποία διαπερνά την επιφάνεια A , που περικλείεται από την κλειστή γραμμή (γ):

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I. \quad (1.13)$$

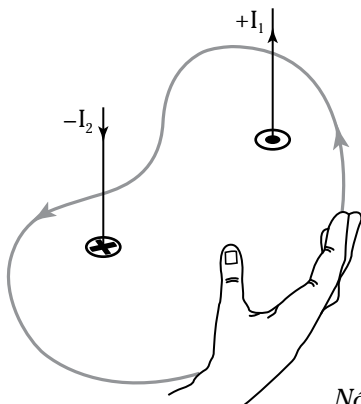
Στην περίπτωση, κατά την οποία δεν λαμβάνουμε υπόψη τις ιδιότητες του μέσου, μέσα στο οποίο αναπτύσσεται το μαγνητικό πεδίο, αν στη θέση του διάνυσματος της μαγνητικής επαγωγής, θεωρήσουμε το διάνυσμα της μαγνητικής διεγέρσεως \vec{H} , τότε ισχύει το γινόμενο: $\vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \vec{H}_1 \cdot d\vec{\ell} + \vec{H}_2 \cdot d\vec{\ell} + \dots + \vec{H}_i \cdot d\vec{\ell}$ (ονομάζεται **μαγνητική τάση**). Εφαρμόζοντας το ολοκλήρωμα της μαγνητικής διεγέρσεως κατά μήκος της κλειστής γραμμής (γ), (Νόμος του Ampere), έχουμε:

$$\oint \vec{H}_i \cdot d\vec{\ell}_i = \sum I_i \quad (1.14)$$

όπου I_i είναι το i -οστό ρεύμα της κλειστής γραμμής (γ) με $i = 1, 2, \dots, i$.

Η κυκλοφορία της μαγνητικής διεγέρσεως του μαγνητικού πεδίου, το οποίο οφείλεται σε ρευματοφόρους αγωγούς κατά μήκος μίας κλειστής καμπύλης, ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των εντάσεων των ρευμάτων του ηλεκτρικού ρεύματος, που περικλείει η καμπύλη (σχ. 1.1n).

Το ρεύμα I , θεωρείται θετικό όταν η φορά του



Σχ. 1.1n
Νόμος του Ampere.

συμπίπτει με τη φορά με την οποία προχωράει δεξιόστροφος κοχλίας (ή κανόνας του δεξιού χεριού). Διαφορετικά είναι αρνητικό.

Ισχύει, για το σχήμα 1.1n:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \sum I_i = I_1 - I_2. \quad (1.15)$$

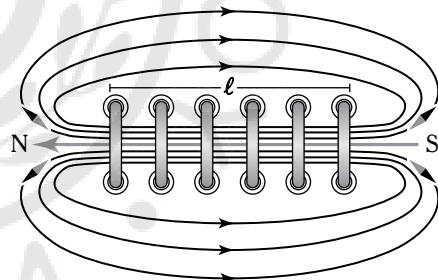
Όσα ρεύματα δεν περικλείονται από την κλειστή γραμμή (γ) δεν λαμβάνονται υπόψη στο άθροισμα $\sum I_i$.

3) Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου.

Ένα σωληνοειδές πηνίο αποτελείται από σταθερό αριθμό ομοαξονικών σπειρών, που έχουν την ίδια ακτίνα, διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, ενώ ο άξονάς του θεωρείται ότι έχει άπειρο μήκος (σχ. 1.1θ).

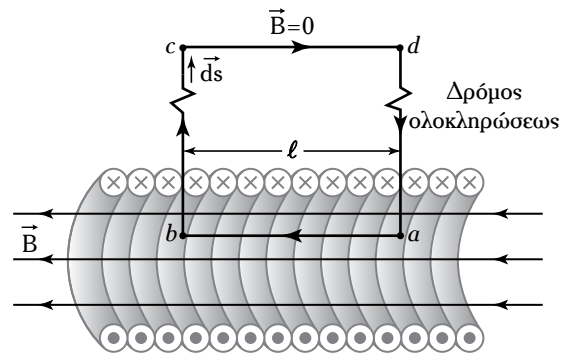
Το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του σωληνοειδούς είναι ομοιόμορφο, με τη μαγνητική επαγωγή να είναι παράλληλη στον άξονά του και με φορά εκείνη την οποία δίδει ο αντίχειρας του δεξιού χεριού, όταν το χέρι εφαρμόζει στο σωληνοειδές στη φορά κυκλοφορίας του ρεύματος. Στον εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο του πηνίου ισούται με μηδέν.

Θεωρούμε ένα σωληνοειδές άπειρου μήκους, το οποίο αποτελείται από n αριθμό σπειρών, ανά μονάδα μήκους (σχ. 1.1ι).



Σχ. 1.1θ

Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου σωληνοειδούς πηνίου.



Σχ. 1.1ι

Σωληνοειδές πηνίο άπειρου μήκους.

Υπολογίζουμε το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής (\vec{B}) στο εσωτερικό του σωληνοειδούς επιλέγοντας την κλειστή γραμμή $abcd$, στην οποία εφαρμόζουμε τον Νόμο του Ampere:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_b^c \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_c^d \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_d^a \vec{B} \cdot d\vec{s}. \quad (1.16)$$

Στο εσωτερικό του σωληνοειδούς η μαγνητική επαγωγή \vec{B} είναι παράλληλη στη στοιχειώδη μετατόπιση $d\vec{s}$, κατά μήκος της κλειστής διαδρομής $abcd$, οπότε ισχύει: $\vec{B} \cdot d\vec{s} = Bds$.

Το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής στο εσωτερικό του σωληνοειδούς, στο τμήμα ab , είναι σταθερό και ισούται με: $\int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{s} = B\ell$.

Είναι: $\int_b^c \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$ και $\int_d^a \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$

γιατί το $d\vec{s}$ είναι κάθετο στο διάνυσμα \vec{B} .

Είναι: $\int_c^d \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$

γιατί θεωρούμε μηδέν την μαγνητική επαγωγή \vec{B} , η οποία είναι εκτός σωληνοειδούς.

Ο αριθμός των ρευμάτων, που εμπλέκονται με την κλειστή γραμμή $abcd$ είναι ίσος με τον αριθμό των σπειρών n_c ($n_c = n\ell$), οι οποίες περιλαμβάνονται στο τμήμα ab μήκους ℓ .

Αυτά τα ρεύματα είναι ίσα και έχουν την ίδια φορά. Από τη σχέση 1.16, προκύπτει ότι:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_a^b Bds = B\ell \quad \text{και} \quad B\ell = \mu_0 n_c I = \mu_0 n\ell I.$$

Τελικά η τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο εσωτερικό του σωληνοειδούς είναι:

$$B = \mu_0 In \quad (1.17)$$

Το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του σωληνοειδούς είναι ομοιόμορφο και το μέτρο του εξαρτάται μόνο από το ρεύμα, το οποίο κυκλοφορεί στο σωληνοειδές και από τον αριθμό των σπειρών ανά μονάδα μήκους.

4) Μαγνητικό πεδίο δακτυλιοειδούς πηνίου (τορροειδές).

Θεωρούμε ένα δακτυλιοειδές (τορροειδές) πηνίο, το οποίο αποτελείται από n σπείρες (σχ. 1.11α).

Τα a και b συμβολίζουν την εσωτερική και την

εξωτερική ακτίνα του δακτυλιοειδούς πηνίου, αντίστοιχα, ενώ το r είναι μέση ακτίνα του. Το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως I .

Δεδομένης της συμμετρίας του πηνίου, οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου, το οποίο αναπτύσσεται στο τορροειδές, είναι περιφέρειες κύκλου με κέντρο στον άξονά του.

Εφαρμόζοντας τον Νόμο του Ampere στο πηνίο, επιλέγοντας σαν δρόμο ολοκλήρωσης την κλειστή μαγνητική γραμμή ℓ ακτίνας r και φορά η οποία συμπίπτει με εκείνη της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} έτσι ώστε τα διανύσματα \vec{B} και $d\vec{s}$ να είναι παράλληλα και ομόρροπα, έχουμε:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 nI = 2\pi r B. \quad (1.18)$$

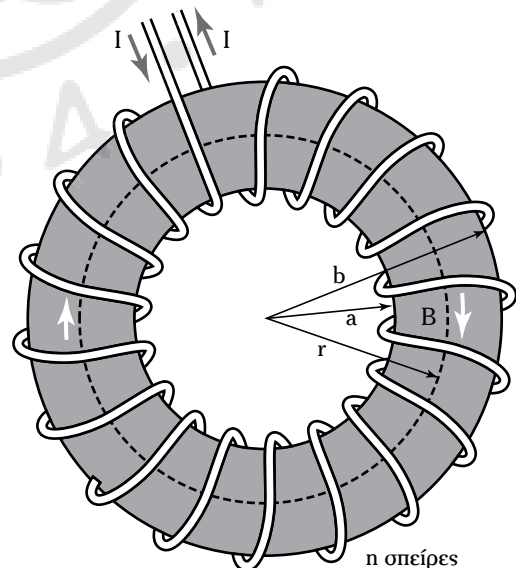
Από τη σχέση 1.18, έχουμε:

$$B = \frac{\mu_0 nI}{2\pi r}. \quad (1.19)$$

Αν στη θέση του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} , τοποθετήσουμε το διάνυσμα της μαγνητικής διεγέρσεως \vec{H} , η σχέση 1.18, τροποποιείται ως εξής: $\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = nI$ ή $2\pi r H = nI$

και $H = \frac{nI}{2\pi r} \quad (1.20)$

όπου n ο συνολικός αριθμός σπειρών του τορροειδούς.

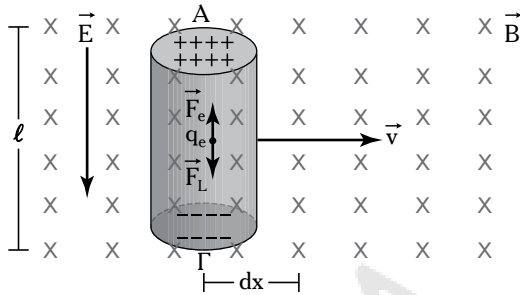


Σχ. 1.11α

Δακτυλιοειδές πηνίο.

1.2 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Νόμος του Faraday.

Έστω ότι μεταλλικός κυλινδρικός αγωγός ΑΓ, μήκους ℓ κινείται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, τέμνοντας κάθετα τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές του πεδίου, ενώ η διεύθυνση της ταχύτητάς του είναι κάθετη στον αγωγό (σχ. 1.2α).



Σχ. 1.2α

Ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) στα άκρα του αγωγού, ο οποίος κινείται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο.

Κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο (έστω q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου) δέχεται από το μαγνητικό πεδίο μια δύναμη Laplace, με μέτρο:

$$F_L = Bq_e v \quad (1.21)$$

όπου: B το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής του μαγνητικού πεδίου, q_e το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου και v το μέτρο της ταχύτητας του αγωγού ΑΓ μέσα στο μαγνητικό πεδίο.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού μετακινούνται στο άκρο του Γ. Τελικά, στο άκρο Α συσσωρεύονται θετικά φορτία, ενώ στο άκρο Γ αρνητικά, αντίστοιχα. Οπότε, στα άκρα του αγωγού δημιουργείται μία διαφορά δυναμικού, η οποία ονομάζεται **τάση από επαγωγή** (V_{en}) ή **ηλεκτρεγερτική δύναμη** (ΗΕΔ).

Η V_{en} δημιουργεί στο εσωτερικό του αγωγού ένα ηλεκτρικό πεδίο εντάσεως:

$$E = \frac{V_{en}}{\ell} \quad (1.22)$$

με φορά από το άκρο Α στο άκρο Γ, ενώ ℓ είναι το **ενεργό μήκος του αγωγού ΑΓ**¹. Σε κάθε φορτίο q_e του αγωγού ασκείται, συγχρόνως, η δύναμη Laplace, και η δύναμη F_e , από το ηλεκτρικό πεδίο E , με μέτρο:

$$F_e = Eq_e. \quad (1.23)$$

Η σχέση 1.23 με βάση τη σχέση 1.22 γίνεται:

$$F_e = \frac{V_{en}}{\ell} q_e \quad (1.24)$$

με φορά αντίθετη της αντίστοιχης του ηλεκτρικού πεδίου.

Η μετακίνηση των ηλεκτρικών φορτίων q_e μέσα στον αγωγό σταματά όταν η δύναμη από το ηλεκτρικό πεδίο γίνει αντίθετη από τη δύναμη Laplace:

$$F_e + F_L = 0. \quad (1.25)$$

Η σχέση 1.25 με βάση τις σχέσεις 1.21 και τη σχέση 1.24 γίνεται:

$$\frac{V_{en}}{\ell} q_e + Bq_e v = 0. \quad (1.26)$$

Από τη σχέση 1.26, προκύπτει:

$$V_{en} = -Bv\ell. \quad (1.27)$$

Από τη σχέση 1.27, προκύπτει ότι στα άκρα ενός αγωγού, ο οποίος κινείται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, εμφανίζεται **ηλεκτρεγερτική δύναμη** (ΗΕΔ) από επαγωγή, V_{en} .

Έστω ότι ο αγωγός ΑΓ (σχ. 1.2α), μετακινείται κατά dx . Τότε, η στιγμιαία ταχύτητά του είναι: $v = \frac{dx}{dt}$.

Η σχέση 1.27 γίνεται: $V_{en} = -B \frac{dx}{dt} \ell$. (1.28)

όπου $dx\ell = dA$ είναι η στοιχειώδης επιφάνεια, την οποία διατρέχει ο αγωγός ΑΓ, κατά τη μετακίνησή του. Αν $d\Phi = BdA$ είναι η μεταβολή της μαγνητικής ροής, η οποία προκαλείται από την μετακίνηση του αγωγού, τότε η ΗΕΔ, V_{en} , στα άκρα του αγωγού είναι (Νόμος του Faraday):

$$V_{en} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.29)$$

Όταν το κλειστό κύκλωμα είναι ένα πηνίο με n αριθμό σπειρών, τότε η σχέση 1.29 γίνεται (Νόμος του Faraday):

$$V_{en} = -n \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.30)$$

Το αρνητικό πρόσημο καθορίζει την πολικότητα της ΗΕΔ, V_{en} , και δικαιολογείται από τον Κανόνα του Lenz.

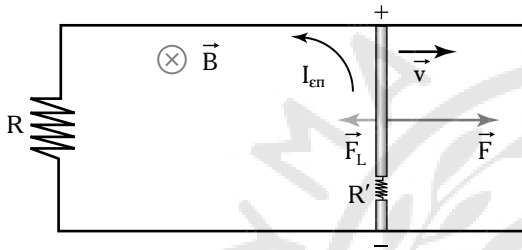
¹ Ενεργό μήκος του αγωγού ΑΓ είναι εκείνο το οποίο βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο.

1.2.1 Επαγωγικό ρεύμα – Κανόνας του Lenz.

Αν στη θέση του αγωγού ΑΓ (σχ. 1.2α), θεωρήσουμε ένα κλειστό κύκλωμα (σχ. 1.2β), στο οποίο ένας αγωγός κινείται με ταχύτητα \vec{v} , μέσα στο μαγνητικό πεδίο, μαγνητικής επαγωγής \vec{B} , και με διεύθυνση από τον αναγνώστη προς τη σελίδα (\otimes)², τέμνοντας κάθετα τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές, τότε στο κύκλωμα επάγεται το ρεύμα με φορά, η οποία δίδεται στο σχήμα 1.2β:

$$I_{\text{εν}} = \frac{V_{\text{εν}}}{R_{\text{ολ}}} \quad (1.31)$$

όπου $R_{\text{ολ}} = R + R'$ η συνολική ωμική αντίσταση του κλειστού κυκλώματος.



Σχ. 1.2β

Διάταξη για την απόδειξη του Κανόνα του Lenz.

Το φαινόμενο της επαγωγής είναι η εμφάνιση της τάσεως από επαγωγή $V_{\text{εν}}$, στα άκρα του αγωγού, ενώ στη συνέχεια δημιουργείται το ρεύμα από επαγωγή, $I_{\text{εν}}$.

Η φορά του επαγωγικού ρεύματος στο κλειστό κύκλωμα προκύπτει από τον **Κανόνα του Lenz**:

«Το επαγωγικό ρεύμα, σε κλειστό κύκλωμα, έχει τέτοια φορά, ώστε μέσω του ηλεκτρομαγνητικού αποτελέσματός του να αντισταθεί στο αίτιο, το οποίο το προκαλεί».

Ο Κανόνας του Lenz (εμφάνιση του αρνητικού πρόσημου στις σχέσεις 1.29 και 1.30) στηρίζεται στην Αρχή της Διατηρήσεως της Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Πράγματι, όταν ο αγωγός κινείται στο μαγνητικό πεδίο, δέχεται από το μαγνητικό πεδίο δύναμη Laplace αντίρροπη απ' το διάνυσμα της ταχύτητας \vec{v} , με σταθερό μέτρο:

$$F_L = BI_{\text{εν}}\ell \quad (1.32)$$

όπου ℓ το μήκος του αγωγού.

Προκειμένου να κινείται ο αγωγός με σταθερή

ταχύτητα, πρέπει να ασκείται σ' αυτόν μία εξωτερική δύναμη \vec{F} , η οποία εξουδετερώνει τη δύναμη \vec{F}_L :

$$\vec{F}_L = \vec{F}. \quad (1.33)$$

Όταν ο αγωγός μετακινηθεί κατά μήκος x σε χρονικό διάστημα t , τότε η δύναμη \vec{F} παράγει έργο:

$$W = Fx = Fvt. \quad (1.34)$$

Από τις σχέσεις 1.31, 1.32, 1.33, και 1.34 έχουμε:

$$W = \frac{v^2 B^2 \ell^2}{R_{\text{ολ}}} t. \quad (1.35)$$

Η ηλεκτρική ενέργεια, η οποία παράγεται στο κύκλωμα στο ίδιο χρονικό διάστημα t είναι:

$$W_{\text{ηλ}} = V_{\text{εν}} I_{\text{εν}} t. \quad (1.36)$$

Από τις σχέσεις 1.27 (κατ' απόλυτη τιμή), 1.31 και 1.36, έχουμε:

$$W_{\text{ηλ}} = \frac{v^2 B^2 \ell^2}{R_{\text{ολ}}} t. \quad (1.37)$$

Από τις σχέσεις 1.35 και 1.37, προκύπτει:

$$W = W_{\text{ηλ}}. \quad (1.38)$$

Η ηλεκτρική ενέργεια, η οποία παράγεται στο κλειστό κύκλωμα ισούται με το έργο της εξωτερικής δύναμης, που απαιτείται ώστε να κινηθεί ο αγωγός με σταθερή ταχύτητα.

Αναλυτικότερα, κατά τη διάρκεια της κινήσεως του αγωγού παράγεται ηλεκτρική ενέργεια σε βάρος του μηχανικού έργου της εξωτερικής δύναμης. Προκειμένου να κινείται ο αγωγός με σταθερή ταχύτητα, ασκείται σε αυτόν αντίθετη δύναμη, η οποία είναι η \vec{F}_L . Το έργο της \vec{F}_L μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Το $I_{\text{εν}}$, με βάση το οποίο δημιουργείται η \vec{F}_L θα πρέπει να έχει τέτοια φορά, έτσι ώστε η \vec{F}_L να αντιστέκεται στην κίνηση του αγωγού, οπότε και στην μεταβολή της μαγνητικής ροής, η οποία προκαλείται από την κίνησή του.

Αν η δύναμη Laplace είχε την φορά κινήσεως του αγωγού, τότε ο αγωγός θα μπορούσε να κινηθεί μόνο με την επίδραση της δύναμης Laplace, οπότε θα είχαμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το μηδέν, γεγονός το οποίο είναι αντίθετο με την Αρχή της Διατηρήσεως της Ηλεκτρικής Ενέργειας.

² Με το σύμβολο \otimes συμβολίζουμε τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου από τον αναγνώστη προς τη σελίδα του βιβλίου, ενώ με το σύμβολο \odot τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου από τη σελίδα του βιβλίου προς τον αναγνώστη.

1.2.2 Αυτεπαγωγή.

Σε ένα σωληνοειδές όταν μεταβάλλεται η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο διαρρέει το πηνίο, τότε μεταβάλλεται και η μαγνητική ροή που διαπερνά τις σπείρες του, οπότε στα άκρα του δημιουργείται ΗΕΔ από επαγωγή.

Το φαινόμενο κατά το οποίο στα άκρα ενός σωληνοειδούς δημιουργείται ΗΕΔ όταν μεταβάλλεται η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, η οποία το διαπερνά ονομάζεται **αυτεπαγωγή**.

Θεωρούμε ένα σωληνοειδές μήκους ℓ , το οποίο διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως I και έχει n αριθμό σπειρών με εμβαδό A η κάθε μία. Τοποθετούμε μέσα στο σωληνοειδές υλικό σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας μ_r .

Η μαγνητική επαγωγή στο εσωτερικό του πηνίου είναι:

$$B = \mu_0 I \frac{n}{\ell}. \quad (1.39)$$

Η μαγνητική ροή, η οποία εμπλέκεται με κάθε σπείρα είναι:

$$\Phi = BA \text{ ή } \Phi = \mu_0 \frac{n}{\ell} AI. \quad (1.40)$$

Αν $d\Phi$ είναι η μεταβολή της μαγνητικής ροής, σε χρόνο dt , όταν μεταβάλλεται το ρεύμα κατά dI , τότε έχουμε:

$$d\Phi = \mu_0 \frac{nA}{\ell} dI. \quad (1.41)$$

Η ΗΕΔ από αυτεπαγωγή, η οποία δημιουργείται στα άκρα του σωληνοειδούς, με βάση το Νόμο του Faraday, γίνεται:

$$E_{\text{αυτ}} = -\mu_0 \frac{n^2}{\ell} A \frac{dI}{dt}. \quad (1.42)$$

Από τη σχέση 1.42 προκύπτει ότι η ΗΕΔ από αυτεπαγωγή είναι ανάλογη με την ταχύτητα μεταβολής της εντάσεως του ηλεκτρικού ρεύματος dI/dt . Ο συντελεστής αναλογίας

$$\mu_0 \frac{n^2}{\ell} A = L \quad (1.43)$$

που εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πηνίου και τη φύση του υλικού, το οποίο τοποθετείται στο εσωτερικό του, ονομάζεται **συντελεστής αυτεπαγωγής του σωληνοειδούς**. Από τις σχέσεις 1.42 και 1.43 έχουμε:

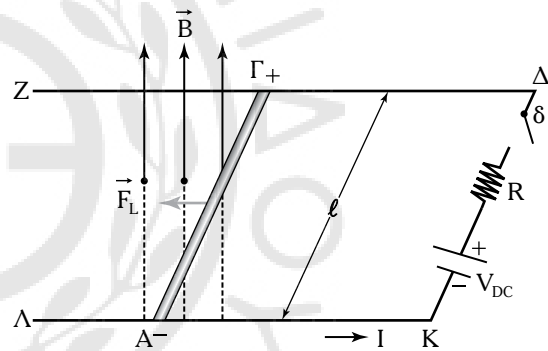
$$E_{\text{αυτ}} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (1.44)$$

Η σχέση 1.44 εκφράζει τον **Νόμο της αυτεπαγωγής**.

Το πρόσημο τις σχέσεις 1.42 και 1.44 καθορίζει την πολικότητα της ΗΕΔ από αυτεπαγωγή. Η μονάδα μετρήσεως του συντελεστή αυτεπαγωγής είναι το Henry και ορίζεται από τη σχέση 1.44: όπου 1 Henry είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής ενός κυκλώματος στο οποίο εμφανίζεται ΗΕΔ από αυτεπαγωγή 1 V, όταν το ρεύμα μεταβάλλεται με ρυθμό 1 A/s.

1.3 Βασικές αρχές λειτουργίας γραμμικής μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Στο σχήμα 1.3α, δίδεται γραμμική μηχανή συνεχούς ρεύματος (ΣΡ). Αυτή η μηχανή είναι μία θεωρητική συσκευή, η οποία όμως συμπεριφέρεται και λειτουργεί με τις ίδιες αρχές λειτουργίας των πραγματικών μηχανών συνεχούς ρεύματος και αποτελεί σημαντική εισαγωγή για την κατανόηση της λειτουργίας των πραγματικών μηχανών συνεχούς ρεύματος.



Σχ. 1.3α

Γραμμική μηχανή συνεχούς ρεύματος.

1.3.1 Διαδικασία εκκινήσεως της γραμμικής μηχανής.

Ο αγωγός ΑΓ, μηδενικής ωμικής αντίστασης, μήκους ℓ , κινείται χωρίς τριβές πάνω σε δύο οριζόντιους μεταλλικούς αγωγούς ΔΖ και ΚΛ, οι οποίοι συνδέονται με πηγή συνεχούς ρεύματος τάσεως V_{DC} . Έστω R η συνολική ωμική αντίσταση του κυκλώματος ΑΓΔΚ. Στο κλειστό κύκλωμα προβλέπεται ένας διακόπτης δ αρχικά ανοικτός. Ολόκληρη η διάταξη βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο επαγωγής \vec{B} .

Η διαδικασία εκκινήσεως της γραμμικής μηχανής ακολουθεί τα εξής βήματα που αποτελούν τη διαδικασία, η οποία ακολουθείται κατά την εκκίνηση ενός κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διέγερση:

Βήμα 1.

Όταν κλείσει ο διακόπτης, ο αγωγός ΑΓ, αρχικά, δεν κινείται, οπότε διαρρέεται από ρεύμα $I = \frac{V_{DC}}{R}$.

Βήμα 2.

Στη συνέχεια, ο αγωγός ΑΓ διαρρέεται από το ρεύμα I , βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, οπότε δέχεται τη δύναμη Laplace \vec{F}_L . Η διεύθυνση της δυνάμεως Laplace είναι οριζόντια, γιατί είναι κάθετη στο κατακόρυφο επίπεδο, το οποίο ορίζουν το διάνυσμα \vec{B} και ο αγωγός ΑΓ (σχ. 1.3α). Η φορά του ρεύματος I στον αγωγό ΑΓ είναι από το Γ στο Α. Γνωρίζοντας την φορά του ρεύματος I και του διανύσματος \vec{B} , εφαρμόζουμε τον κανόνα του δεξιού χεριού βρίσκουμε ότι η φορά της δυνάμεως \vec{F}_L είναι προς τα αριστερά. Το μέτρο της \vec{F}_L είναι $\vec{F}_L = BI\ell$.

Βήμα 3.

Ο αγωγός ΑΓ, στον οποίο επιδρά η δύναμη Laplace \vec{F}_L επιταχύνεται, «κόβοντας» τις μαγνητικές δυναμικές του μαγνητικού πεδίου, οπότε στα άκρα του αναπτύσσεται η ΗΕΔ V_{en} με απόλυτη τιμή $V_{en} = Bv\ell$, όπου v , η ταχύτητα του αγωγού.

Στο σχήμα 1.3β δίδεται η κυκλωματική παράσταση της διατάξεως του σχήματος 1.3α.

Βήμα 4.

Εφαρμόζοντας τον Δεύτερο Κανόνα του Kirchhoff στο κύκλωμα του σχήματος 1.3β, έχουμε:

$$V_{DC} - V_{en} - IR = 0 \quad \text{και} \quad I = \frac{V_{DC} - V_{en}}{R}.$$

Όταν η επαγόμενη τάση V_{en} αυξάνεται, το ρεύμα I μειώνεται.

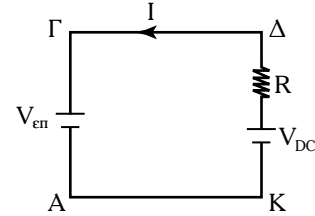
Το μέτρο της δυνάμεως Laplace γίνεται:

$$F_L = \frac{(V_{DC} - Bv\ell)}{R} B\ell.$$

Η φορά της \vec{F}_L διατηρείται σταθερή, ενώ το μέτρο της ταχύτητας του αγωγού ΑΓ διαρκώς αυξάνεται, με αποτέλεσμα το μέτρο της \vec{F}_L να μειώνεται. Σε κάποια χρονική στιγμή το μέτρο της δυνάμεως Laplace μηδενίζεται, οπότε ο αγωγός κινείται με σταθερή ταχύτητα (οριακή ταχύτητα v_{op}), η οποία είναι η μέγιστη τελική:

$$\text{Αν } F_L = 0, \text{ τότε } V_{DC} - Bv_{op}\ell = 0 \text{ και } v_{op} = \frac{V_{DC}}{B\ell}.$$

Όταν ο αγωγός ΑΓ κινείται με οριακή ταχύτητα τότε: $F_L = 0$ και $I = 0$.

**Σχ. 1.3β**

Κυκλωματική παράσταση της διατάξεως του σχήματος 1.3α.

1.3.2 Λειτουργία γραμμικής μηχανής ΣΡ σαν κινητήρας.

Έστω ότι στη γραμμική μηχανή ΣΡ του σχήματος 1.3α (βήμα 2), ασκείται στον αγωγό ΑΓ μια εξωτερική δύναμη F , (φορτίο), αντίθετη στην κατεύθυνση της κινήσεώς του. Στον αγωγό ασκείται συνισταμένη δύναμη $\vec{F}_\Sigma = \vec{F} - \vec{F}_L$, με φορά αντίθετη από εκείνη της κινήσεώς του. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της ταχύτητας του αγωγού. Η μείωση της ταχύτητας προκαλεί μείωση της επαγόμενης τάσεως $V_{en} \downarrow = Bv\ell$. Εφαρμόζοντας τον Δεύτερο Κανόνα

του Kirchhoff στο κλειστό κύκλωμα (σχ. 1.3β) έχουμε: $I \uparrow = \frac{V_{DC} - V_{en} \downarrow}{R}$.

Η μείωση της επαγόμενης τάσεως $V_{en} \downarrow$, προκαλεί αύξηση του ρεύματος ($I \uparrow$). Στη συνέχεια, η δύναμη Laplace αυξάνεται: $F_L \uparrow = BI \uparrow \ell$, μέχρι να φτάσει την εξωτερική δύναμη, οπότε υπάρχει μία νέα κατάσταση ισορροπίας της γραμμικής μηχανής με σταθερή ταχύτητα μικρότερη από την αντίστοιχη αρχική.

Η φορά της δυνάμεως Laplace F_L είναι ίδια με την κατεύθυνση κινήσεως του αγωγού ΑΓ.

Αν πολλαπλασιαστούν και τα δύο μέλη της εξισώσεως της δυνάμεως Laplace με την ταχύτητα v , τότε έχουμε $vF_L = BvI\ell$ ή $vF_L = V_{en}I$. Αυτό σημαίνει ότι μια ποσότητα της ηλεκτρικής ισχύος ($V_{en}I$) καταναλώνεται στον αγωγό ΑΓ παράγοντας μηχανική ισχύ (vF_L). Τότε η γραμμική μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας ΣΡ.

Ένας πραγματικός κινητήρας ΣΡ με παράλληλη διέγερση συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο όταν αυξάνομε το φορτίο στον άξονά του. Αυτή η αύξηση προκαλεί μείωση της ταχύτητάς του, με αποτέλεσμα να μειώνεται η εσωτερική αναπτυσσόμενη τάση, ενώ αυξάνεται το ρεύμα. Η αύξηση του ρεύματος προκαλεί αύξηση της ροπής στον άξονα του κινητήρα μέχρι αυτή να εξισωθεί με την ροπή του φορτίου. Αυτό συμβαίνει σε μια μικρότερη ταχύτητα.

1.3.3 Λειτουργία γραμμικής μηχανής ΣΡ σαν γεννήτρια.

Έστω ότι έχουμε τη γραμμική μηχανή ΣΡ (σχ. 1.3α). Αν εφαρμοστεί στον αγωγό ΑΓ εξωτερική δύναμη \vec{F} , στη διεύθυνση της κινήσεώς του, τότε το αποτέλεσμα είναι η επιτάχυνση του αγωγού στη διεύθυνση της κινήσεώς του. Η ταχύτητά του αυξάνεται: $V_{en} \uparrow = Bv \uparrow \ell$, οπότε και η επαγόμενη τάση αυξάνεται ($V_{en} > V_{DC}$). Τότε το ρεύμα αλλάζει φορά.

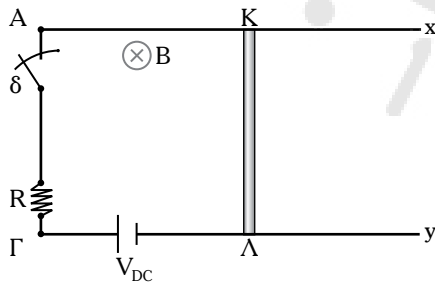
Στον αγωγό ΑΓ εφαρμόζεται δύναμη Laplace αντίθετη στη φορά της κινήσεώς του. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι το μέτρο της F_L να εξισωθεί με το αντίστοιχο της F .

Η σταθερή ταχύτητα, τώρα, έχει μεγαλύτερη τιμή από την αντίστοιχη της αρχικής. Η πηγή V_{DC} λειτουργεί σαν αποδέκτης. Σε αυτήν την περίπτωση η μηχανική ισχύς μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η γραμμική μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια.

Τελικά, ανάλογα σε ποια κατεύθυνση εφαρμόζεται η εξωτερική δύναμη η γραμμική μηχανή λειτουργεί είτε σαν γεννήτρια είτε σαν κινητήρας ΣΡ. Από ηλεκτρικής απόψεως αν $V_{en} > V_{DC}$ η μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια, ενώ όταν $V_{DC} > V_{en}$ η μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας ΣΡ.

1.3.4 Ενεργειακές μεταβολές σε γραμμική μηχανή ΣΡ.

Η μεταφορική κίνηση του αγωγού ΚΛ (σχ. 1.3γ), μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο προσομοιώνει τη συμπεριφορά της γραμμικής μηχανής ΣΡ.



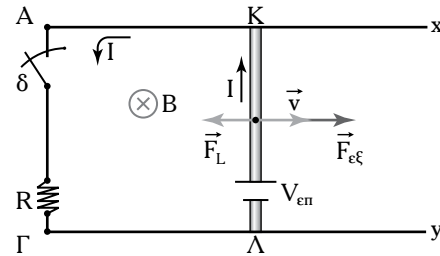
Σχ. 1.3γ

Στοιχειώδης γραμμική μηχανή ΣΡ.

Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, όμως, για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας των μηχανών ΣΡ να αναλύσουμε τις ενεργειακές μεταβολές, οι οποίες συμβαίνουν στις διάφορες περιπτώσεις μεταφορικής κινήσεως του αγωγού ΚΛ μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο:

1) $H V_{en}$ είναι η μοναδική πηγή στο κύκλωμα.

Έστω ότι ο αγωγός ΚΛ, μάζας m , κινείται χωρίς τριβές πάνω στους αγωγίσιμους παράλληλους αγωγούς Αx και Γy «κόβοντας» κάθετα τις μαγνητικές γραμμές του ομογενούς μαγνητικού πεδίου, επαγωγής B (σχ. 1.3δ).



Σχ. 1.3δ

Γραμμική μηχανή ΣΡ όταν στο κύκλωμα η μοναδική πηγή είναι η V_{en} .

Στον αγωγό ΚΛ εκτός από την εξωτερική δύναμη $\vec{F}_{εξ}$, ασκείται και η δύναμη Laplace \vec{F}_L .

Εφαρμόζοντας τον Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα έχουμε:

$$\sum F_x = ma \Rightarrow F_{εξ} - F_L = m \frac{dv}{dt}$$

$$\text{ή} \quad F_{εξ} = F_L + m \frac{dv}{dt} \quad (1.45)$$

όπου a η επιτάχυνση του αγωγού ΚΛ.

Πολλαπλασιάζοντας τους όρους της σχέσεως 1.45 επί την στοιχειώδη μετατόπιση dx , του αγωγού

$$\text{ΚΛ έχουμε: } F_{εξ} dx = F_L dx + m \frac{dv}{dt} dx$$

$$\text{ή} \quad F_{εξ} dx = F_L dx + m v dv \quad (1.46)$$

είναι $\frac{dx}{dt} = v$, η ταχύτητα του αγωγού ΚΛ.

Η σχέση 1.46 δηλώνει τον ενεργειακό μετασχηματισμό στον αγωγό ΚΛ:

α) Ο όρος $F_{εξ} dx$ είναι το στοιχειώδες μηχανικό έργο $dW_{εξ}$, το οποίο προσφέρει η εξωτερική δύναμη $F_{εξ}$ στον αγωγό.

β) Ο όρος $F_L dx$ είναι η στοιχειώδης ηλεκτρική ενέργεια $dE_{n\lambda}$, η οποία εμφανίζεται στο κύκλωμα όταν ο αγωγός ΚΛ μετατοπίζεται κατά dx . Πράγματι είναι: $F_L dx = (BI\ell)(vdt)$ ή $F_L dx = (Bv\ell)(Idt)$

$$\text{ή} \quad F_L dx = E_{en} Idt = dE_{n\lambda} \quad (1.47)$$

γ) Ο όρος $m v dv$ είναι η στοιχειώδης μεταβολή της κινητικής ενέργειας, dK_a , του αγωγού ΚΛ:

$$dK_a = d\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = \frac{1}{2}m(dv^2) \\ = \frac{1}{2}mv^2 dv = \frac{1}{2}m2v dv = mv dv. \quad (1.48)$$

2) **Έστω, τώρα, ότι προστίθεται η πηγή συνεχούς τάσεως, V_{DC} , στο κύκλωμα της γραμμικής μηχανής ΣΡ.**

Όταν στο κύκλωμα της γραμμικής μηχανής ΣΡ (σχ. 1.3δ), υπάρχει και πηγή συνεχούς τάσεως V_{DC} (σχ. 1.3ε), τότε διακρίνουμε τις ακόλουθες υποπεριπτώσεις:

α) **Η πολικότητα της V_{en} είναι τέτοια, ώστε να δίδει ομόρροπο ρεύμα με εκείνο της πηγής V_{DC} .**

Στην υπόπεριπτωση αυτή η V_{en} λειτουργεί ως γεννήτρια ΣΡ. Αν $v = \text{σταθερό}$, τότε $\Sigma \vec{F} = 0$ και

$$F_{εξ} = F_L = BI\ell. \quad (1.49)$$

Από τη σχέση 1.49, προκύπτει ότι το έργο της εξωτερικής δυνάμεως $\vec{F}_{εξ}$ μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο κύκλωμα, μέσω του έργου της F_L που δρα στον αγωγό. Πράγματι:

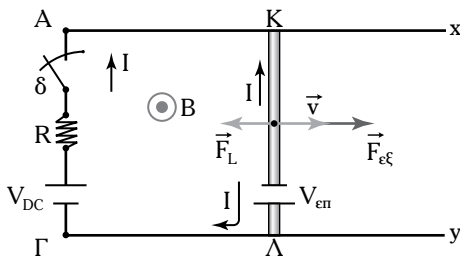
$$F_{εξ}x = (BI\ell)(vt) = (Bv\ell)(It) = V_{en}It.$$

Αν x είναι η μετατόπιση του αγωγού ΚΛ, η ηλεκτρική ενέργεια $V_{en}It$ και η αντίστοιχή της V_{DC} , $V_{DC}It$, μετατρέπονται σε θερμότητα στο κύκλωμα. Πράγματι, ισχύει:

$$V_{DC}It + V_{en}It = (V_{DC} + V_{en})It. \quad (1.50)$$

Εφαρμόζοντας τον Δεύτερο Κανόνα του Kirchoff στο κύκλωμα του σχήματος 1.3ε έχουμε:

$$V_{DC} + V_{en} = IR. \quad (1.51)$$



Σχ. 1.3ε

V_{DC} η πηγή συνεχούς τάσεως στο κύκλωμα της γραμμικής μηχανής ΣΡ.

Η εξίσωση 1.50 με βάση την εξίσωση 1.51, γίνεται:

$$V_{DC}It + V_{en}It = I^2Rt. \quad (1.52)$$

Στο σχήμα 1.3ε αν η ταχύτητα του αγωγού ΚΛ δεν είναι σταθερή γιατί $F_{εξ} > F_L$, θα είναι: $\Sigma F = ma$, όπου: a η επιτάχυνση του αγωγού, και $F_{εξ} - F_L = m \frac{dv}{dt}$ για στοιχειώδη μετατόπιση, dx , του αγωγού ΚΛ. Οπότε έχουμε:

$$F_{εξ}dx = F_L dx + mvdv. \quad (1.53)$$

Εδώ ένα μέρος του έργου της $\vec{F}_{εξ}$, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο κύκλωμα μέσω του έργου της F_L ($V_{en}It$) και το υπόλοιπο αυξάνει την κινητική ενέργεια του αγωγού ΚΛ.

β) **Η πολικότητα της πηγής V_{en} είναι τέτοια, ώστε να δίδει αντίρροπο ρεύμα από το αντίστοιχο της πηγής V_{DC} .**

Στην υποπεριπτωση αυτή διακρίνουμε τα εξής:

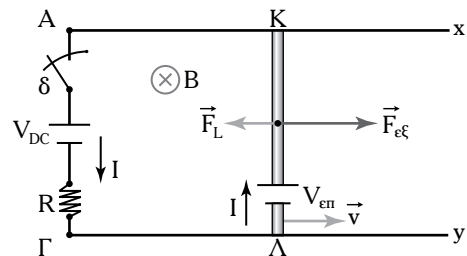
ι) Αν $V_{en} > V_{DC}$, τότε τη φορά του ρεύματος στο κύκλωμα την επιβάλλει η V_{en} , η οποία συμπεριφέρεται ως γεννήτρια ΣΡ ενώ η πηγή V_{DC} είναι **αποδέκτης**³ (σχ. 1.3στ).

Όταν ο αγωγός μετατοπίζεται κατά dx , τότε το στοιχειώδες μηχανικό έργο της $F_{εξ}$ είναι:

$$F_{εξ}dx = F_{εξ}vdt. \quad (1.54)$$

Μέρος αυτού του έργου μετατρέπεται σε στοιχειώδη ηλεκτρική ενέργεια στο κύκλωμα ($V_{en}Idt$) μέσω του έργου της F_L και το υπόλοιπο μέρος $(F_{εξ} - F_L)vdt$ αυξάνει την κινητική ενέργεια του αγωγού ΚΛ.

Η στοιχειώδης ηλεκτρική ενέργεια του κυκλώματος ($V_{en}Idt$) μετατρέπεται κατά ένα μέρος σε θερμότητα στην αντίσταση R και το υπόλοιπο μέρος $V_{DC}Idt$ αποδίδεται στην πηγή V_{DC} , οπότε αυτή συμπεριφέρεται ως αποδέκτης.



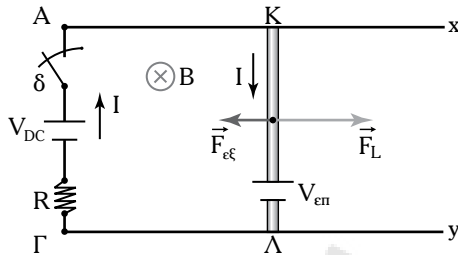
Σχ. 1.3στ

Γραμμική μηχανή ΣΡ όταν $V_{en} > V_{DC}$.

³ Στην θεωρία των ηλεκτρικών μηχανών η έννοια του αποδέκτη αντιστοιχεί στον κινητήρα.

ii) Αν $V_{en} < V_{DC}$, τότε η V_{en} λειτουργεί ως αποδέκτης (σχ. 1.3ζ). Η πηγή V_{DC} δίδει ηλεκτρική ενέργεια $V_{DC}Idt$ στο κύκλωμα, που μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση R : το υπόλοιπο μέρος μεταφέρεται στον αγωγό $ΚΛ$, ο οποίος λειτουργεί ως αποδέκτης, $V_{en}Idt$.

iii) Αν $V_{en} = V_D$ τότε $I = 0$, οπότε δεν υπάρχει ηλεκτρική ενέργεια ούτε ενεργειακός μετασχηματισμός.



Σχ. 1.3ζ

Η γραμμική μηχανή ΣΡ λειτουργεί ως αποδέκτης όταν $V_{en} < V_{DC}$.

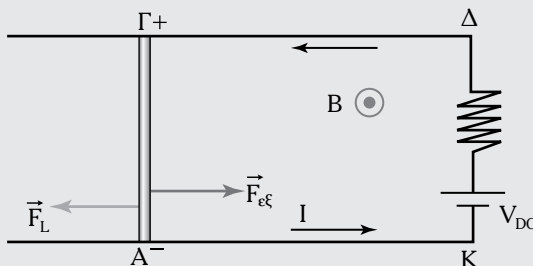
- Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Στη διάταξη του σχήματος 1.3η, ο αγωγός ΑΓ έχει μήκος $\ell = 0,6\text{ m}$ και ολισθαίνει πάνω στους οριζώντιους μεταλλικούς αγωγούς ΑΚ και ΓΔ χωρίς τριβές. Η ηλεκτρική πηγή έχει τάση $V_{DC} = 4\text{ V}$ και το κλειστό κύκλωμα σταθερή ωμική αντίσταση $R = 2\ \Omega$.

Η διάταξη βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, του οποίου η διεύθυνση και η φορά είναι προς τον αναγνώστη (\odot), με μαγνητική επαγωγή $B = 0,2\text{ T}$. Στον αγωγό ασκείται μια εξωτερική δύναμη, η οποία έχει μέτρο $F_{\epsilon\xi} = 0,06\text{ N}$ και φορά προς τα δεξιά, οπότε ο αγωγός κινείται προς τα αριστερά.

- 1) Να εξηγήσετε τη φορά κινήσεως του αγωγού.
- 2) Ποια είναι η τελική ταχύτητα, που αποκτά ο



Σχ. 1.3η

αγωγός και ποια η τιμή της επαγόμενης τάσεως;

3) Να μελετηθούν οι ενεργειακές μετατροπές, που συμβαίνουν στη διάταξη.

Λύση.

1) Όταν ρευματοφόρος αγωγός βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, τότε στον αγωγό ασκείται δύναμη Laplace \vec{F}_L . Η διεύθυνση της \vec{F}_L είναι οριζόντια, γιατί είναι κάθετη στο κατακόρυφο επίπεδο, που ορίζουν οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου και ο αγωγός. Η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος στον αγωγό είναι από το Γ στο Α. Γνωρίζοντας την φορά του μαγνητικού πεδίου και την αντίστοιχη του ρεύματος βρίσκουμε τη φορά της \vec{F}_L , που είναι προς τα αριστερά.

Το μέτρο της \vec{F}_L είναι: $F = BI\ell$. (1)

Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος την χρονική στιγμή, κατά την οποία αφήνουμε να ολισθήσει ο αγωγός είναι:

$$I = \frac{V_{DC}}{R}. \quad (2)$$

Η εξίσωση 1 με βάση την εξίσωση 2 γίνεται:

$$F_L = B \frac{V_{DC}}{R} \ell = \frac{4 \cdot 0,6 \cdot 0,2}{2} = 0,24\text{ N}.$$

Παρατηρούμε ότι η συνισταμένη, $\vec{F}_{\alpha\lambda}$ των δυνάμεων \vec{F}_L και $\vec{F}_{\epsilon\xi}$ έχει φορά προς τα αριστερά γιατί $F_L > F_{\epsilon\xi}$.

2) Όταν ο αγωγός ΑΓ κινείται «κόβει» τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου, οπότε αναπτύσσεται κατά μήκος του μια ΗΕΔ V_{en} , της οποίας η τιμή είναι:

$$V_{en} = Bv\ell \quad (3)$$

όπου v η ταχύτητα του αγωγού ΑΓ.

Η κυκλωματική παράσταση της διατάξεως είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.3β.

Κατά τον Δεύτερο Κανόνα του Kirchhoff έχομε:

$$V_{DC} - V_{en} - IR = 0 \text{ και } I = \frac{V_{DC} - V_{en}}{R} \quad (4)$$

Από την εξίσωση 1, 3 και 4 προκύπτει:

$$F_L = \frac{(V_{en} - Bv\ell)}{R} \quad (5)$$

Η φορά της συνισταμένης $\vec{F}_{\alpha\lambda}$ ($\vec{F}_L, \vec{F}_{\epsilon\xi}$) διατη-

ρείται σταθερή προς τα αριστερά, το μέτρο της ταχύτητας \vec{v} του αγωγού διαρκώς αυξάνει, ενώ το μέτρο της δύναμης \vec{F}_L μειώνεται.

Σε κάποια χρονική στιγμή γίνεται $\vec{F}_L = \vec{F}_{εξ}$, οπότε η συνισταμένη $\vec{F}_{ολ}$ μηδενίζεται. Απ' αυτήν τη χρονική στιγμή, στη συνέχεια ο αγωγός κινείται με σταθερή ταχύτητα. Η οριακή (μέγιστη) ταχύτητα του αγωγού υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Είναι: } F_L = F_{εξ} \text{ και } \frac{(V_{DC} - Bv_{op}\ell)}{R} B\ell = F_{εξ}$$

$$\text{ή } v_{op} = \frac{V_{DC}B\ell - F_{εξ}R}{B^2\ell^2}. \quad (6)$$

$$\text{Είναι: } v_{op} = \frac{(4 \cdot 0,2 \cdot 0,6) - (0,06 \cdot 2)}{0,2^2 \cdot 0,6^2} = 25 \text{ m/s.}$$

3) Όταν $F_L = F_{εξ}$, ο αγωγός κινείται με σταθερή ταχύτητα, ενώ η ηλεκτρική ισχύς μετατρέπεται σε μηχανική σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_{εν} = Fv \quad (7)$$

Στην προκειμένη περίπτωση ένα μέρος της ηλεκτρικής ισχύος ($V_{εν}I$) μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ ($vF_{εξ}$). Η αντίστοιχη συσκευή λειτουργεί ως κινητήρας συνεχούς ρεύματος.

Ισχύει για την ισχύ:

$$P_{FL} = F_L v_{op} = 0,62 \cdot 25 = 1,5 \text{ W.}$$

Παρατήρηση: Αν στον αγωγό ΑΓ εφαρμοστεί εξωτερική δύναμη $\vec{F}_{εξ}$ στη διεύθυνση της κινήσεως, η ταχύτητά του αυξάνεται. Στη συνέχεια, αυξάνεται η επαγόμενη τάση $V_{εν}$, η οποία γίνεται μεγαλύτερη από την V_{DC} . Το ρεύμα αλλάζει φορά και η τιμή του δίδεται απ' την ακόλουθη εξίσωση:

$$I = \frac{V_{DC} - V_{εν}}{R}.$$

Η δύναμη Laplace, η οποία ασκείται στον αγωγό είναι $F_L = BI\ell$, και σύμφωνα με τον δεξιόστροφο κοχλία είναι αντίθετη προς την εξωτερική δύναμη.

Σε κάποια χρονική στιγμή ισχύει: $F_L = F_{εξ}$ οπότε η σταθερή ταχύτητα της ράβδου είναι μεγαλύτερη της αρχικής. Η πηγή V_{DC} τώρα φορτίζεται.

Η μηχανική ισχύς μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ, οπότε η διάταξη λειτουργεί ως γεννήτρια.

Άσκηση 2.

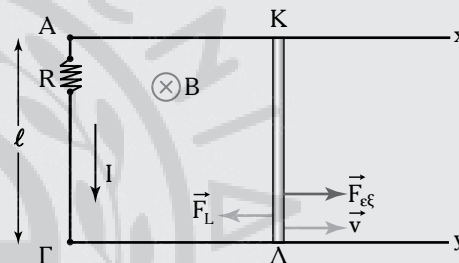
Αγωγός ΚΛ μηδενικής ωμικής αντιστάσεως

και μήκους $\ell = 0,2 \text{ m}$ κινείται χωρίς τριβές πάνω σε δύο παράλληλους αγωγούς Αx και Γy συνολικής αντιστάσεως $R = 0,06 \Omega$. Το σύστημα τοποθετείται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο $B = 0,7 \text{ T}$, κάθετα στο επίπεδο της σελίδας με κατεύθυνση από τον αναγνώστη προς τη σελίδα \otimes . Να υπολογίσετε:

- 1) Την $V_{εν}$.
- 2) Το ρεύμα του κυκλώματος I.s
- 3) Το μέτρο της δύναμης $\vec{F}_{εξ}$, που πρέπει να ασκηθεί στον αγωγό ΚΛ για να διατηρεί την ταχύτητά του σταθερή.
- 4) Την μηχανική ισχύ που χρειάζεται για να διατηρηθεί ο αγωγός ΚΛ σε κίνηση.

Λύση.

Η σχηματική παράσταση του κυκλώματος δίδεται στο σχήμα 1.30.



Σχ. 1.30

- 1) Η τάση, η οποία αναπτύσσεται στα άκρα του αγωγού ΚΛ, όταν αυτός κόβει κάθετα τις μαγνητικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου επαγωγής B είναι:

$$V_{εν} = Bv\ell = 0,7 \cdot 2 \cdot 0,2 = 0,28 \text{ V.}$$

- 2) Το ρεύμα I στο κύκλωμα είναι:

$$I = \frac{V_{εν}}{R} = \frac{0,28}{0,06} = 4,6 \text{ A.}$$

Η δύναμη Laplace, η οποία αναπτύσσεται αντίθετα με την κατεύθυνση της κινήσεως του αγωγού ΚΛ είναι: $F_L = BI\ell = 0,7 \cdot 4,6 \cdot 0,2 = 0,64 \text{ N}$.

3) Ο αγωγός ΚΛ διατηρεί την κίνησή του με σταθερή ταχύτητα αποκλειστικά μόνο όταν ασκηθεί εξωτερική δύναμη $F_{εξ}$ ίση σε μέτρο και αντίθετη κατεύθυνσεως της F_L .

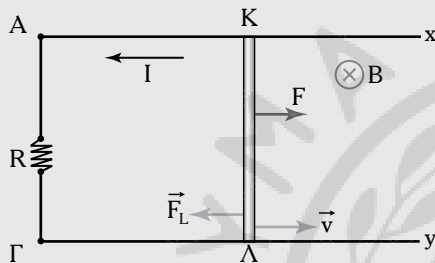
3) Οπότε, η ισχύς της $F_{εξ}$, η οποία απαιτείται για να διατηρηθεί η κίνηση του αγωγού ΚΛ, είναι:

$$P_{εξ} = F_{εξ}v = 0,64 \cdot 2 = 1,28 \text{ W.}$$

Άσκηση 3.

Αγωγός ΚΛ, μηδενικής ωμικής αντιστάσεως και μήκους $\ell = 1,2 \text{ cm}$ κινείται χωρίς τριβές πάνω σε δύο παράλληλους αγωγούς Αx και Γy συνολικής αντιστάσεως R (σχ. 1.3i).

Το σύστημα βρίσκεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο κάθετο με κατεύθυνση \otimes από τον αναγνώστη προς τη σελίδα. Η μαγνητική επαγωγή του πεδίου είναι $B = 0,7 \text{ T}$. Στον αγωγό ΚΛ ασκείται δύναμη F κι αυτός κινείται προς τα δεξιά με σταθερή ταχύτητα $3,5 \text{ cm/s}$. Πόση είναι η τιμή της αντιστάσεως R, την οποία πρέπει να έχει το κύκλωμα, αν η δύναμη F, η οποία ασκείται στον αγωγό ΚΛ, παράγει έργο με ρυθμό 150 W ;



Σχ. 1.3i

Λύση.

Στον αγωγό ΚΛ του σχήματος 1.3i αναπτύσσεται, κατά την κίνηση μία τάση εξ επαγωγής:

$$V_{\text{en}} = Bv\ell \quad (1)$$

Το ρεύμα στο κύκλωμα είναι:

$$I = \frac{V_{\text{en}}}{R} \quad (2)$$

Η σχέση 2 με βάση τη σχέση 1 γίνεται:

$$I = \frac{Bv\ell}{R} \quad (3)$$

Στον αγωγό ΚΛ αναπτύσσεται δύναμη Laplace αντίθετης κατευθύνσεως από την κίνησή του:

$$F_L = BI\ell \quad (4)$$

Η σχέση 4 με βάση τη σχέση 3 γίνεται:

$$F_L = B \frac{Bv\ell}{R} \quad \text{ή} \quad F_L = \frac{B^2 v \ell^2}{R} \quad (5)$$

Για να διατηρηθεί η κίνηση του αγωγού ΚΛ με σταθερή ταχύτητα, η δύναμη F πρέπει να είναι ίση και αντίθετη με την F_L .

Η ισχύς που προσφέρεται στον αγωγό ΚΛ είναι:

$$P = Fv = \frac{B^2 v \ell^2}{R} v = \frac{B^2 v^2 \ell^2}{R} \quad (6)$$

Από τη σχέση 4.6 προκύπτει:

$$R = \frac{B^2 \ell^2}{P} v^2 = \frac{(0,7)^2 \cdot (1,2)^2 \cdot (3,5)^2}{150} = 0,057 \Omega.$$

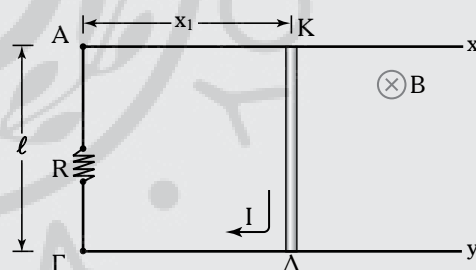
Άσκηση 4.

Έστω ότι έχουμε αγωγό ΚΛ, μηδενικής ωμικής αντιστάσεως και μήκους ℓ , που κινείται χωρίς τριβές πάνω σε δύο παράλληλους αγωγούς Αx και Γy συνολικής ωμικής αντιστάσεως R.

Το σύστημα βρίσκεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο κάθετο με κατεύθυνση από τον αναγνώστη προς την σελίδα, μαγνητικής επαγωγής B. Το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό dB/dt . Αρχικά, η τιμή της μαγνητικής επαγωγής του μαγνητικού πεδίου είναι B_0 , ενώ η απόσταση του αγωγού από τα άκρα ΑΓ είναι x_1 . Να υπολογίσετε την επιτάχυνση a του αγωγού ΚΛ.

Λύση.

Στο σχήμα 1.3ia δίδεται το αντίστοιχο κύκλωμα.



Σχ. 1.3ia

Όταν $t = 0$, η μαγνητική ροή του κυκλώματος είναι:

$$\Phi = B_0 x_1 \ell. \quad (1)$$

Το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό:

$$\frac{d\Phi}{dt} = x_1 \ell \frac{dB}{dt}. \quad (2)$$

Σύμφωνα με τον Νόμο του Faraday η επαγόμενη τάση στον αγωγό είναι κατά απόλυτη τιμή:

$$V_{\text{en}} = \frac{d\Phi}{dt} = x_1 \ell \frac{dB}{dt}. \quad (3)$$

Το ρεύμα του κυκλώματος είναι:

$$I = \frac{V_{\text{en}}}{R} = \frac{x_1 \ell}{R} \frac{dB}{dt}. \quad (4)$$

Στον αγωγό αναπτύσσεται δύναμη Laplace:

$$F_L = BI\ell. \quad (5)$$

Η σχέση 5 με βάση τη σχέση 3 γίνεται:

$$F_L = \left(\frac{x_1 \ell}{R} \frac{dB}{dt} \right) B \ell = \frac{x_1 \ell^2}{R} \frac{dB}{dt} B. \quad (6)$$

Η επιτάχυνση του αγωγού στο χρόνο $t = 0$ είναι:

$$a = \frac{F_L}{m} = \frac{x_1 \ell^2}{mR} \frac{dB}{dt} B \quad (7)$$

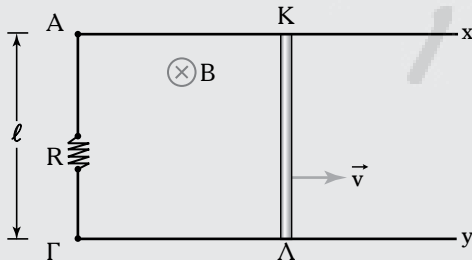
όπου m η μάζα του αγωγού ΚΛ.

Άσκηση 5.

Αγωγός ΚΛ, μηδενικής ωμικής αντιστάσεως, μήκους $\ell = 1,3 \text{ m}$ και μάζας $m = 0,2 \text{ kg}$ κινείται χωρίς τριβές πάνω σε δύο παράλληλους αγωγούς Αx και Γy συνολικής ωμικής αντιστάσεως $R = 8 \Omega$. Το σύστημα βρίσκεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο κάθετο, με κατεύθυνση από τον αναγνώστη προς την σελίδα. Η μαγνητική επαγωγή του πεδίου είναι $0,5 \text{ T}$. Σε πόσο χρόνο η ταχύτητα του αγωγού θα μειωθεί στη μισή τιμή της αρχικής ταχύτητας v_{ap} .

Λύση.

Γραφικά το σύστημα δίδεται στο σχήμα 1.3ιβ.



Σχ. 1.3ιβ

Όταν ο αγωγός κινείται δημιουργεί μια μεταβολή του μαγνητικού πεδίου στο κύκλωμα, οπότε επάγεται στα άκρα του η τάση:

$$V_{\text{en}} = \frac{d\Phi}{dt} = B \frac{dA}{dt} = Bv\ell. \quad (1)$$

Στη συνέχεια, παράγεται ένα ρεύμα στο κύκλωμα:

$$I = \frac{V_{\text{en}}}{R}. \quad (2)$$

Η σχέση 2 με βάση τη σχέση 1 γίνεται:

$$I = \frac{V_{\text{en}}}{R} = \frac{Bv\ell}{R}. \quad (3)$$

Στον αγωγό ΚΛ ασκείται μια δύναμη Laplace F_L αντίθετη στην κίνηση του αγωγού:

$$F_L = BI\ell. \quad (4)$$

Η σχέση 4 με βάση τη σχέση 3 γίνεται:

$$F_L = \frac{Bv\ell}{R} \ell B = \frac{B^2 v \ell^2}{R}. \quad (5)$$

Η εξίσωση κινήσεως του αγωγού ΚΛ είναι:

$$F \equiv F_L = ma = m \frac{dv}{dt} = - \frac{(\ell B)^2}{R} v. \quad (6)$$

Οπότε:
$$v(t) = v_0 (\equiv v_{\text{ap}}) e^{-\frac{(\ell B)^2}{Rm} t}. \quad (7)$$

Ο χρόνος t^* για τον οποίο ισχύει:

$$(t^*) = \frac{v_0}{2} \quad (8)$$

προκύπτει από τη σχέση:

$$e^{-\frac{(\ell B)^2}{Rm} t^*} = \frac{1}{2}. \quad (9)$$

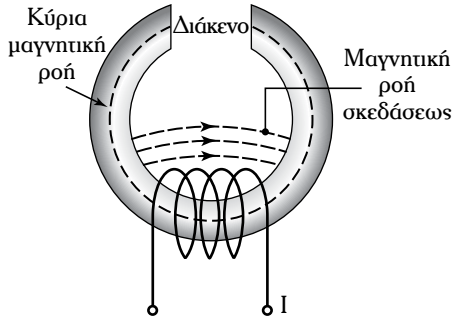
Τελικά:
$$t^* = \frac{Rm}{(\ell B)^2} \ln 2 \quad (10)$$

Εφαρμογή:
$$t^* = \frac{8 \cdot 0,2 \cdot 10^3}{(1,3 \cdot 0,5)^2} \cdot \ln 2 = 1.109,03 \text{ s}.$$

1.4 Μαγνητικά κυκλώματα.

Ως **μαγνητικό κύκλωμα** ονομάζεται το σύνολο των μαγνητικών υλικών, μέσα από τα οποία περνάει μαγνητική ροή, που δημιουργείται από κατάλληλη **μαγνητογενετική δύναμη** (ΜΕΔ).

Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι η αιτία παραγωγής της μαγνητικής ροής. Το γινόμενο της εντάσεως του ρεύματος (I) και του αριθμού των σπειρών (n) (σχ. 1.4α), αν δεν ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της ροής σκεδάσεως) ονομάζεται **μαγνητογενετική δύναμη** (F) όπου $F = nI$ και η μονάδα μετρήσεως είναι οι αμπεροστροφές (At).



Σχ. 1.4α

Μαγνητικό κύκλωμα και παρουσία μαγνητικών ροών.

Τα υλικά των μαγνητικών κυκλωμάτων είναι σιδηρομαγνητικά, με σχετική μαγνητική διαπερατότητα πολύ μεγαλύτερη της μονάδας.

Ένα μαγνητικό κύκλωμα μπορεί να περιλαμβάνει εκτός από **σιδηρομαγνητικά υλικά** και **διάκενα** αέρα.

Το μαγνητικό κύκλωμα παρουσιάζει ομοιότητες με το ηλεκτρικό κύκλωμα. Πράγματι, η μαγνητική ροή σ' ένα μαγνητικό κύκλωμα αντιστοιχεί στο ηλεκτρικό ρεύμα σ' ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Η θεμελιώδης διαφορά είναι ότι στο μαγνητικό κύκλωμα λαμβάνεται υπόψη η ροή σκεδάσεως, δηλαδή οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές, οι οποίες κατά ένα μέρος περνάνε στο σιδηρομαγνητικό υλικό και κατά το άλλο κλείνουν κύκλωμα στον αέρα (σχ. 1.4α).

Στο σχήμα 1.4β(α) δίδεται ένα απλό μαγνητικό κύκλωμα, ενώ στα σχήματα 1.4β(β) και 1.4β(γ), το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα και το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα αντίστοιχα.

Στο σχήμα 1.4β(α) έχουμε:

I: Ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος σε A.

n: Αριθμό σπειρών.

Φ: Μαγνητική ροή σε Wb.

ℓ: Μήκος **μέσος μαγνητικής δυναμικής γραμμής**⁴ σε μέτρα (m).

Η μαγνητική διέγερση H, δίδεται ως εξής:

$$H = \frac{nI}{\ell} \left[\frac{\text{At}}{\text{m}} \right]. \quad (1.55)$$

Όπως είναι γνωστό, για τη μαγνητική επαγωγή B του πυρήνα του σιδηρομαγνητικού υλικού και τη μαγνητική διέγερση H, ισχύει:

$$B = \mu H \quad \text{ή} \quad B = \frac{\mu_0 \mu_r nI}{\ell} \left[\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \right] \quad (1.56)$$

όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και μ_r η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα.

Αν A η διατομή του μαγνητικού κυκλώματος [σχ. 1.4β(α)] σε m^2 , τότε έχουμε:

$$\Phi = BA = \frac{\mu_0 \mu_r nIA}{\ell} [\text{Wb}]$$

$$\text{ή} \quad \Phi = \frac{nI}{\frac{\ell}{\mu_0 \mu_r A}} \quad (1.57)$$

όπου nI, η ΜΕΔ και,

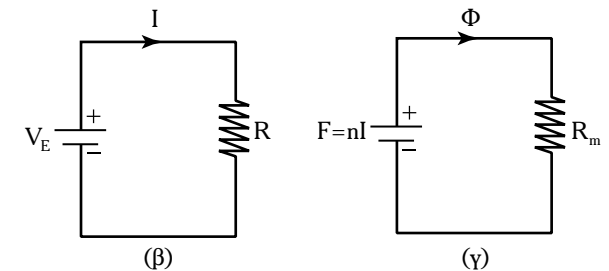
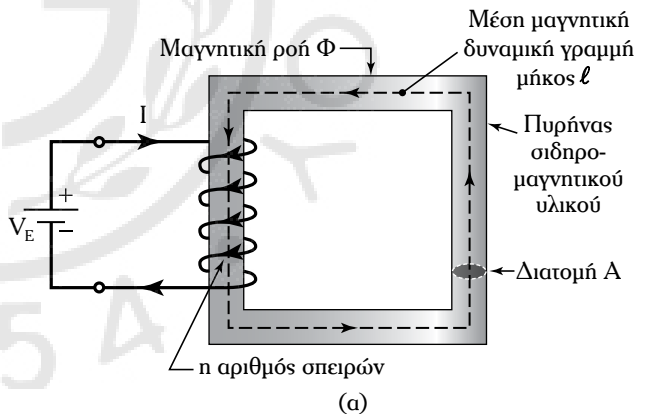
$$R_m = \frac{\ell}{\mu_0 \mu_r A} \quad (1.58)$$

η μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος.

Ως **μαγνητική αντίσταση** R_m , χαρακτηρίζεται η ιδιότητα του κυκλώματος να αντιστέκεται στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου. Η μονάδα μετρήσεως είναι [At/Wb].

Οι αναλογίες μεταξύ των μαγνητικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων είναι οι εξής:

1) Η τάση στα ηλεκτρικά κυκλώματα αντιστοιχεί στη ΜΕΔ στα μαγνητικά κυκλώματα.



Σχ. 1.4β

(α) Απλό μαγνητικό κύκλωμα, (β) ηλεκτρικό ισοδύναμο, και (γ) ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα.

⁴ Μέσος μαγνητικής δυναμικής γραμμής είναι μια αντιπροσωπευτική μαγνητική γραμμή της μαγνητικής ροής Φ.

2) Η ωμική αντίσταση στα ηλεκτρικά κυκλώματα αντιστοιχεί στη μαγνητική αντίσταση στα μαγνητικά κυκλώματα.

3) Το ηλεκτρικό ρεύμα στα ηλεκτρικά κυκλώματα αντιστοιχεί στη μαγνητική ροή στα μαγνητικά κυκλώματα.

Στον πίνακα 1.4 δίδεται, συγκεντρωτικά, η αναλογία μεταξύ ηλεκτρικού και μαγνητικού κυκλώματος.

Για μαγνητικό κύκλωμα, το οποίο αποτελείται από σύνολο μαγνητικών υλικών διαφορετικής μαγνητικής αντιστάσεως R_{mj} , η συνολική ΜΕΔ nI για την παραγωγή μαγνητικής ροής Φ , δίδεται από τον Νόμο του Hopkinson ως εξής:

$$nI = \Phi \sum R_{mj} \quad (1.59)$$

όπου: nI η ΜΕΔ και $R_m = \frac{\ell}{\mu_0 \mu_r A}$ η μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος.

Η μαγνητική αντίσταση, R_m είναι η ιδιότητα του κυκλώματος να αντιστέκεται στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου. Η μονάδα μετρήσεώς της είναι $[At/W_b]$.

Οι αναλογίες μεταξύ των μαγνητικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων δίδονται στον πίνακα 1.4.

Πράγματι, θεωρούμε το μαγνητικό κύκλωμα (σχ. 1.4γ), το οποίο αποτελείται από τέσσερα διαφορετικά μαγνητικά υλικά.

Έστω ℓ_1 το μήκος, A_1 η διατομή και μ_1 η απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα του τμήματος AB του μαγνητικού κυκλώματος. Ισχύει:

$$B_1 = \frac{\Phi}{A_1}, B_2 = \frac{\Phi}{A_2}, B_3 = \frac{\Phi}{A_3}, B_4 = \frac{\Phi}{A_4}.$$

Είναι:

$$B_1 = \mu_1 H_1, B_2 = \mu_2 H_2, B_3 = \mu_3 H_3, B_4 = \mu_4 H_4,$$

οπότε έχουμε:

$$H_1 = \frac{\Phi}{\mu_1 A_1}, H_2 = \frac{\Phi}{\mu_2 A_2}, H_3 = \frac{\Phi}{\mu_3 A_3}, H_4 = \frac{\Phi}{\mu_4 A_4}.$$

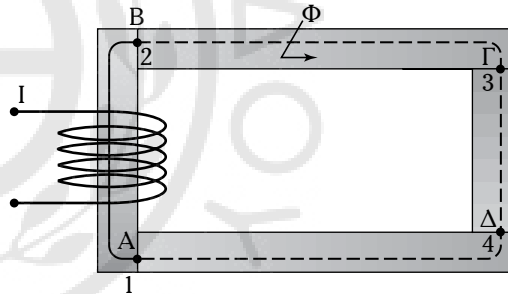
Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη με τα αντίστοιχα μήκη των αντιστοίχων μερών του μαγνητικού κυκλώματος, έχουμε:

$$\begin{aligned} \ell_1 H_1 &= \frac{\Phi}{\mu_1 A_1} \ell_1, & \ell_2 H_2 &= \frac{\Phi}{\mu_2 A_2} \ell_2, \\ \ell_3 H_3 &= \frac{\Phi}{\mu_3 A_3} \ell_3, & \ell_4 H_4 &= \frac{\Phi}{\mu_4 A_4} \ell_4 \end{aligned}$$

και, αθροίζοντας κατά μέλη, προκύπτει:

$$\begin{aligned} H_1 \ell_1 + H_2 \ell_2 + H_3 \ell_3 + H_4 \ell_4 &= \\ = \left[\frac{\ell_1}{(\mu_1 A_1)} + \frac{\ell_2}{(\mu_2 A_2)} + \frac{\ell_3}{(\mu_3 A_3)} + \frac{\ell_4}{(\mu_4 A_4)} \right] \Phi. \end{aligned}$$

όπου: ℓ_2 το μήκος, A_2 η διατομή και μ_2 η απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα του τμήματος ΒΓ, ℓ_3 το μήκος, A_3 η διατομή και μ_3 η απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα του τμήματος ΓΔ, και ℓ_4 το μήκος, A_4 η



Σχ. 1.4γ

Μαγνητικό κύκλωμα διαφορετικών μαγνητικών υλικών.

Πίνακας 1.4

Αναλογία μεταξύ ηλεκτρικού και μαγνητικού κυκλώματος.

Μαγνητικό κύκλωμα	Ηλεκτρικό κύκλωμα
Όταν σε μαγνητικό κύκλωμα εφαρμόζεται μία ΜΕΔ $F = nI$	Όταν σε μαγνητικό κύκλωμα εφαρμόζεται μία ΗΕΔ V_E
παράγεται μαγνητικό πεδίο (μαγνητική διέγερση) $H = F/\ell_\mu$	παράγεται ηλεκτρικό πεδίο $E = V_E/\ell$
(ℓ_μ : μήκος μέσης μαγνητικής δυναμικής γραμμής) το οποίο δημιουργεί μια μαγνητική επαγωγή $B = \mu H$	το οποίο δημιουργεί μία πυκνότητα ρεύματος $J = E/\rho$
και στο μαγνητικό κύκλωμα εγκαθίσταται μαγνητική ροή $\Phi = R_m A$	και στο ηλεκτρικό κύκλωμα εγκαθίσταται ρεύμα $I = J \cdot A$

διατομή και μ_4 η απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα του τμήματος ΔΑ.

Από τον Νόμο του Ampere:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = nI \quad (1.60)$$

όπου η ολοκλήρωση νοείται κατά μήκος της μέσης μαγνητικής δυναμικής γραμμής του μαγνητικού κυκλώματος του σχήματος 1.4γ έχουμε:

$$nI = (R_m^{(1)} + R_m^{(2)} + R_m^{(3)} + R_m^{(4)})\Phi. \quad (1.61)$$

Γενικά, σε ένα μαγνητικό κύκλωμα, ισχύει η σχέση 1.59: $nI = \Phi \sum R_{mj}$.

Για τα μαγνητικά κυκλώματα ισχύουν οι ανάλογοι Κανόνες του Kirchhoff, οι οποίοι ισχύουν και για τα ηλεκτρικά κυκλώματα:

1) Σε μια περιοχή του χώρου στην οποία συγκλίνουν ή αποκλίνουν περισσότερες μαγνητικές ροές, το άθροισμα των εισερχομένων μαγνητικών ροών ισούται με το άθροισμα των εξερχομένων ροών:

$$\sum \Phi = 0. \quad (1.62)$$

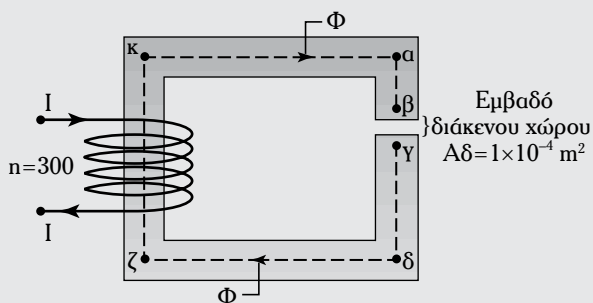
2) Για κλειστή μαγνητική διαδρομή, το αλγεβρικό άθροισμα των ΜΕΔ ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των μαγνητικών πτώσεων τάσεως:

$$nI = \Phi \sum R_{mj}$$

- Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Να υπολογίσετε την ένταση του ρεύματος I , το οποίο απαιτείται για να δημιουργηθεί μαγνητική ροή $\Phi = 0,85 \times 10^4$ Wb στο μαγνητικό κύκλωμα του σχήματος 1.4δ. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα του μαγνητικού κυκλώματος είναι: $\mu_r = 1.525$.

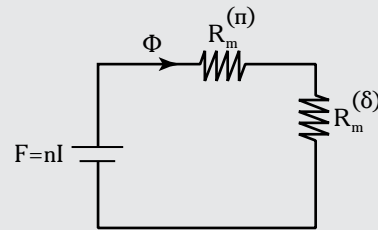


Μέσο μήκος l_n του πυρήνα:
 $l_n = l_{\gamma\delta\zeta\kappa\alpha\beta} = 105 \times 10^{-3} \text{ m}$
 Μέσο μήκος γραμμής διάκενου: $l_{\beta\gamma} = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}$

Σχ. 1.4δ

Λύση.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του μαγνητικού κυκλώματος του σχήματος 1.4δ είναι το ακόλουθο (σχ. 1.4ε):



Σχ. 1.4ε

Η μαγνητική επαγωγή B για κάθε τμήμα του μαγνητικού κυκλώματος είναι:

$$B = \frac{\Phi}{A_\delta} = \frac{0,85 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{1 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 0,85 \text{ T}. \quad (1)$$

Η μαγνητική διέγερση H_n , του πυρήνα είναι:

$$H_n = \frac{B}{\mu_n} = \frac{B}{\mu_r \mu_0} = \frac{0,85 \text{ T}}{1,525 \times 4\pi \cdot 10^{-7}} = 443,77 \text{ At/m}. \quad (2)$$

Η μαγνητική διέγερση H_δ του διάκενου είναι:

$$H_\delta = \frac{B}{\mu_\delta} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0,85 \text{ T}}{1 \times 4\pi \times 10^{-7}} = 6,76 \cdot 10^5 \text{ At/m}. \quad (3)$$

Η μαγνητογεωμετρική δύναμη F_n , του πυρήνα είναι:

$$F_n = H_n l_n = \left(443,77 \frac{\text{At}}{\text{m}} \right) \cdot (105 \times 10^{-3} \text{ m}) = 46,60 \text{ At}. \quad (4)$$

Ανάλογα η ΜΕΔ F_δ , του διάκενου είναι:

$$F_\delta = \left(6,76 \times 10^5 \frac{\text{At}}{\text{m}} \right) \cdot (1,5 \times 10^{-3} \text{ m}) = 1.015 \text{ At}. \quad (5)$$

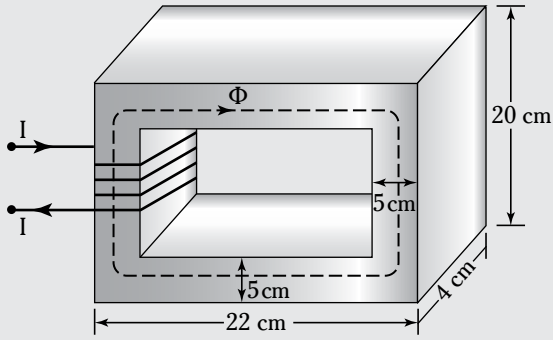
Ισχύει ο Νόμος του Ampere:

$$NI = H_n l_n + H_\delta l_\delta = 46,60 + 1.015 = 1.061,6 \text{ At}. \quad (6)$$

Από τη σχέση 6 προκύπτει ότι η ένταση του ρεύματος είναι: $I = 3,54 \text{ A}$.

Άσκηση 2.

Ο πυρήνας του μαγνητικού κυκλώματος (σχ. 1.4στ) είναι κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό με σχετική μαγνητική διαπερατότητα $\mu_r = 1.450$.



Σχ. 1.4στ

Να υπολογίσετε τη μαγνητική αντίσταση και τη μαγνητική ροή, όταν το πηνίο αποτελείται από 250 σπείρες και διαρρέεται από ρεύμα 1,5 Α.

Λύση.

Το μήκος της μέσης μαγνητικής διαδρομής είναι:

$$\ell = 17 + 15 + 17 + 15 = 64 \text{ cm} = 0,64 \text{ m}. \quad (1)$$

Το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του πυρήνα είναι:

$$A = (5 \text{ cm}) \cdot (4 \text{ cm}) = (0,05 \text{ m}) \cdot (0,04 \text{ m}) = 0,002^2 \text{ m} = 2 \text{ mm}^2. \quad (2)$$

Η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα είναι:

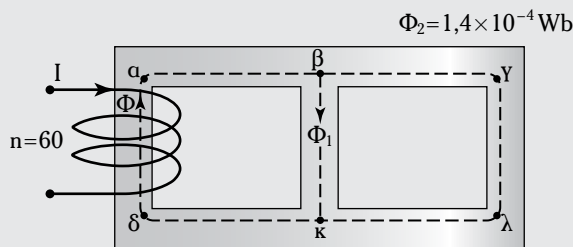
$$R_m = \frac{\ell}{\mu A} = \frac{0,64}{1.450 \cdot (4\pi \times 10^{-7}) \cdot (2 \times 10^{-3})} = 2,92 \times 10^5 \frac{\text{At}}{\text{Wb}}. \quad (3)$$

Η μαγνητική ροή είναι:

$$\Phi = \frac{F}{R_m} = \frac{nI}{R_m} = \frac{250 \cdot 1,5}{2,92 \times 10^5} = 1,28 \text{ mWb}. \quad (4)$$

Άσκηση 3.

Δίδεται το μαγνητικό κύκλωμα του σχήματος 1.4ζ.



Σχ. 1.4ζ

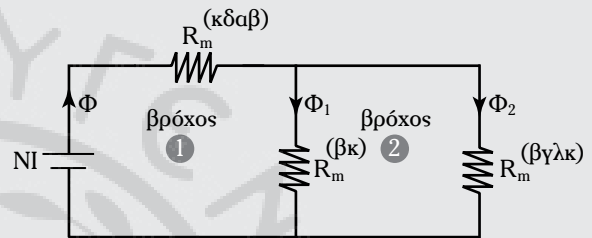
Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα των τμημάτων βγλκ, βκ, και κδαβ είναι: $\mu_{r2} = 4972$, $\mu_{r1} = 4821$, $\mu_r = 2426$. Να υπολογίσετε την ένταση του ρεύματος I, έτσι ώστε να εγκατασταθεί μία μαγνητική ροή $1 \cdot 45 \times 10^{-4} \text{ Wb}$.

Είναι:
$$\begin{aligned} \ell_{\beta\gamma\kappa\lambda} &= \ell_{\kappa\delta\alpha\beta} = 0,3 \text{ m} \\ \ell_{\beta\kappa} &= 0,07 \text{ cm}. \end{aligned}$$

Εμβαδόν εγκάρσιας διατομής: $A = 7 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.

Λύση.

Το ανάλογο ηλεκτρικό κύκλωμα του μαγνητικού κυκλώματος είναι αυτό του σχήματος 1.4η:



Σχ. 1.4η

Για το βρόχο 2, έχουμε:

$$B_2 = \frac{\Phi_2}{A} = \frac{1,4 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{7 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 0,2 \text{ T}. \quad (1)$$

Η ΜΕΔ $H_{\beta\gamma\kappa\lambda}$, είναι: $H_{\beta\gamma\kappa\lambda} = \frac{B_2}{\mu_{\beta\gamma\kappa\lambda}} = \frac{B_2}{\mu_{r2}\mu_0}$

$$= \frac{0,2 \text{ T}}{4.972 \cdot 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}} = 32 \frac{\text{At}}{\text{m}} \quad (2)$$

Εφαρμόζουμε τον Νόμο του Ampere στον βρόχο 2:

$$H_{\beta\kappa} \ell_{\beta\kappa} - H_{\beta\gamma\kappa\lambda} \ell_{\beta\gamma\kappa\lambda} = 0 \quad (3)$$

ή
$$H_{\beta\kappa} \cdot (0,07 \text{ m}) - \left(32 \frac{\text{At}}{\text{m}} \right) \cdot (0,3 \text{ m}) = 0$$

και
$$H_{\beta\kappa} = 171 \frac{\text{At}}{\text{m}}.$$

Η μαγνητική επαγωγή στο τμήμα βκ είναι:

$$\begin{aligned} B_1 &= B_{\beta\kappa} = \mu_{\beta\kappa} H_{\beta\kappa} = \mu_{r1}\mu_0 H_{\beta\kappa} = \\ &= 4.821 \cdot 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 171 \frac{\text{At}}{\text{m}} = 1,07 \text{ T}. \end{aligned} \quad (4)$$

Η μαγνητική ροή στο τμήμα βκ είναι:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= B_1 A = (1,07 \text{ T}) \cdot (7 \times 10^{-4} \text{ m}^2) = \\ &= 7,49 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ Wb}. \end{aligned} \quad (5)$$

Βρόχος 1: Η μαγνητική ροή είναι:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = (7,49 + 1,4) \times 10^{-4} \text{Wb} = 8,89 \cdot 10^{-4} \text{Wb}. \quad (6)$$

Η αντίστοιχη μαγνητική επαγωγή είναι:

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{8,89 \times 10^{-4} \text{Wb}}{7 \times 10^{-4} \text{m}^2} = 1,27 \text{T}. \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Η ΜΕΔ: } H_{\kappa\delta\alpha\beta} &= \frac{B}{\mu_{\kappa\delta\alpha\beta}} = \frac{B}{\mu_r \mu_0} = \\ &= \frac{1,27 \text{T}}{2426 \cdot 4\pi \times 10^{-7} \text{Hm}^{-1}} = 418 \frac{\text{At}}{\text{m}}. \end{aligned}$$

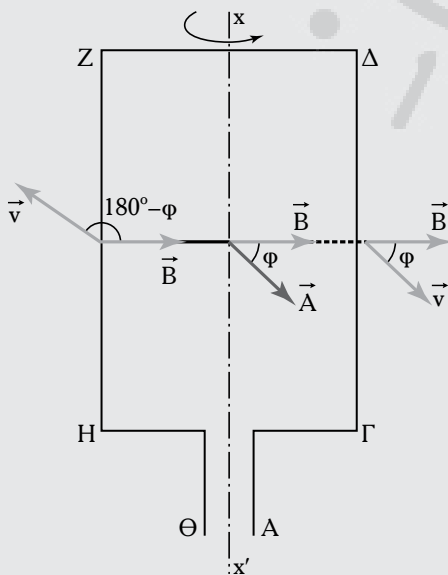
Εφαρμόζοντας τον Νόμο του Ampere στον βρόχο 1, έχουμε:

$$\begin{aligned} nI &= H_{\kappa\delta\alpha\beta} \ell_{\kappa\delta\alpha\beta} + H_{\beta\kappa} \ell_{\beta\kappa} = \left(418 \frac{\text{At}}{\text{m}} \right) \cdot (0,3 \text{m}) + \\ &+ \left(171 \frac{\text{At}}{\text{m}} \right) \cdot (0,07 \text{m}) = 137 \text{At} \quad (8) \end{aligned}$$

είναι: $I = 2,28 \text{A}$.

Άσκηση 4.

Για το περιστρεφόμενο πλαίσιο του σχήματος 1.40, να αποδείξετε ότι $V_{\text{ΕΠ}} = B\omega A n \mu \omega t$, όπου B η μαγνητική επαγωγή του μαγνητικού πεδίου μέσα στο οποίο περιστρέφεται το πλαίσιο, εμβαδού A με ταχύτητα ω rad/s.



Σχ. 1.40

Λύση.

Έστω ότι συρμάτινο πλαίσιο ΑΓΔΖΗΘ περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω rad/s γύρω από τον άξονα xx' , ο οποίος περνά από τα μέσα των πλευρών ΖΔ και ΗΓ.

Το πλαίσιο τοποθετείται σε ομοιόμορφο και ομογενές μαγνητικό πεδίο \vec{B} , και τη στιγμή $t = 0$ είναι κάθετο στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές.

Στη χρονική στιγμή t στρέφεται κατά γωνία $\varphi = \omega t$.

Στις πλευρές ΖΔ και ΗΓ δεν επάγεται τάση, γιατί αυτές στρέφονται σε επίπεδο παράλληλο στις δυναμικές γραμμές. Τάση επάγεται στις πλευρές ΖΗ και ΔΓ.

Έχομε:

$$\text{Πλευρά ΔΓ: } V_{\text{ΕΠ}}^{(\Delta\Gamma)} = Bv(\Delta\Gamma)n\mu\varphi. \quad (1)$$

$$\text{Πλευρά ΖΗ: } V_{\text{ΕΠ}}^{(ZH)} = Bv(ZH)n\mu(180^\circ - \varphi). \quad (2)$$

Είναι: $\Delta\Gamma = ZH$, οπότε η σχέση 2 γίνεται:

$$V_{\text{ΕΠ}}^{(ZH)} = Bv(\Delta\Gamma)n\mu\varphi. \quad (3)$$

Η $V_{\text{ΕΠ}}^{(\text{ολική})}$ στο πλαίσιο είναι:

$$V_{\text{ΕΠ}}^{(\text{ολική})} = V_{\text{ΕΠ}}^{(\Delta\Gamma)} + V_{\text{ΕΠ}}^{(ZH)} = 2Bv(\Delta\Gamma)n\mu\omega t. \quad (4)$$

Για την ταχύτητα v ισχύει:

$$v = \omega \frac{(Z\Delta)}{2}. \quad (5)$$

Η σχέση 4 με βάση τη σχέση 5, γίνεται:

$$\begin{aligned} V_{\text{ΕΠ}}^{(\text{ολική})} &= 2Bv(\Delta\Gamma)n\mu\omega t = \\ &= 2B\omega \frac{(Z\Delta)}{2} (\Delta\Gamma)n\mu\omega t = B\omega A n \mu \omega t. \quad (6) \end{aligned}$$

Αν το πλαίσιο αποτελείται από n αριθμό σπειρών, τότε η σχέση 6 γίνεται:

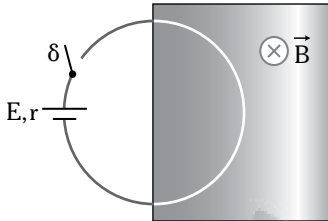
$$V_{\text{ΕΠ}}^{(\text{ολική})} = nB\omega A n \mu \omega t.$$

1.5 Ερωτήσεις.

- 1) Ποιος είναι ο ορισμός του μαγνητικού πεδίου;
- 2) Τι είναι οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές και γιατί δεν τέμνονται;
- 3) Τι ονομάζουμε μαγνητική ροή και ποια είναι η μονάδα μετρήσεώς της;
- 4) Ποια είναι η διαφορά μεταξύ μαγνητικής επαγωγής και μαγνητικής διεγέρσεως;

- 5) Τι εκφράζει η μαγνητική διαπερατότητα;
 6) Τι εκφράζει ο Νόμος των Biot-Savart;
 7) Να διατυπώσετε και να αναλύσετε τον Νόμο του Διαρρέυματος.

- 8) Τι είναι ένα επαγωγικό φαινόμενο;
 9) Τι εκφράζει ο Νόμος του Faraday;
 10) Κυκλικός αγωγός ακτίνας R , βρίσκεται κατά το ήμισυ κάθετα στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές ενός μαγνητικού πεδίου του σχήματος 1.5α.

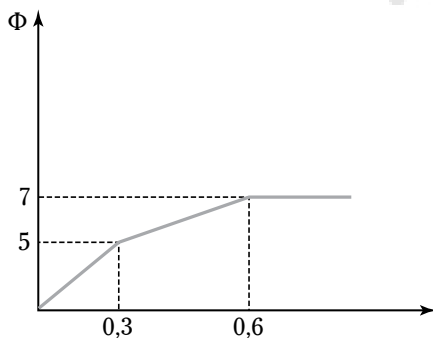


Σχ. 1.5α

Όταν κλείσουμε το διακόπτη δ , ο αγωγός:

- a) Θα μπει στο μαγνητικό πεδίο;
 β) Θα βγει από το μαγνητικό πεδίο;
 γ) Θα κινηθεί προς τα πάνω;
 δ) Θα κινηθεί προς τα κάτω;

- 11) Τι εκφράζει ο Κανόνας του Lenz;
 12) Τι είναι το φαινόμενο αυτεπαγωγής.
 13) Τι είναι το μαγνητικό κύκλωμα;
 14) Τι εκφράζει η μαγνητική αντίσταση και ποια είναι η μονάδα μετρήσεώς της;
 15) Τι είναι η μαγνητιεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) και ποια είναι η μονάδα μετρήσεώς της;
 16) Τι εκφράζει ο Νόμος του Hopkinson;
 17) Η μαγνητική ροή, η οποία διέρχεται μέσα από ένα πλαίσιο μεταβάλλεται, όπως στο διάγραμμα του σχήματος 1.5β.



Σχ. 1.5β

Ποια είναι η μέση ΗΕΔ από επαγωγή:

- a) από 0 μέχρι 0,3 s;
 β) από 0,3 μέχρι 0,6 s;

1.6 Προτεινόμενες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Σύρμα αγ σταθερής διατομής και ειδικής ωμικής αντιστάσεως λυγίζεται σε δύο σημεία Α και Γ, ώστε τα τμήματα 25 cm Αα και Γγ να είναι παράλληλα. Η απόσταση των σημείων Α και Γ είναι 25 cm. Κάθετα στα τμήματα Αα και Γγ γλιστρά αγωγός ΘΚ, χωρίς τριβές, με σταθερή ταχύτητα 15 m/s. Ο αγωγός ΘΚ έχει την ίδια διατομή με το σύρμα αγ, αλλά τριπλάσια ειδική αντίσταση.

Το σύστημα σύρμα και αγωγός ΘΚ τοποθετείται κάθετα στις δυναμικές γραμμές του ομογενούς μαγνητικού πεδίου μαγνητικής επαγωγής 1,2 T. Να υπολογίσετε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων Α και Γ και Θ και Κ όταν ο αγωγός ΘΚ απέχει από την πλευρά ΑΓ απόσταση 60 cm.

Άσκηση 2.

Οι παράλληλοι αγωγοί Αα και Γγ, αμελητέας ωμικής αντιστάσεως, απέχουν μεταξύ τους απόσταση 1,2 m. Τα άκρα Α και Γ συνδέονται μέσω διακόπτη δ , με ηλεκτρική πηγή συνεχούς τάσεως 25 V και εσωτερικής αντιστάσεως 1,5 Ω. Στους αγωγούς Αα, Γγ και κάθετα σε αυτούς γλιστρά, χωρίς τριβές, αγωγός ΘΚ, μήκους 1,2 m ωμικής αντιστάσεως 2,5 Ω.

Όλο το σύστημα τοποθετείται σε κατακόρυφο ομογενές μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής 1,2 T. Να υπολογίσετε την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος όταν κλείσουμε τον διακόπτη δ , και όταν η ταχύτητα του αγωγού ΘΚ είναι 8,5 m/s.

Άσκηση 3.

Δύο οριζόντιοι και παράλληλοι αγωγοί, αμελητέας ωμικής αντιστάσεως, ενώνονται στα δύο άκρα τους με πηγή συνεχούς τάσεως 15 V και εσωτερικής ωμικής αντιστάσεως 1,5 Ω.

Αγωγός ΘΚ, μάζας 3,5 kg και μήκους 1,2 m και ωμικής αντιστάσεως 1,5 Ω γλιστρά, χωρίς τριβές, πάνω στους παράλληλους αγωγούς. Όλο αυτό το σύστημα τοποθετείται μέσα σε κατακόρυφο ομογενές μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής 1,2 T. Έστω ότι εξασφαλίζουμε στον αγωγό ΘΚ σταθερή επιτάχυνση $1,5 \text{ m/s}^2$.

1) Να κατασκευαστεί η γραφική παράσταση της δυνάμεως Laplace και της δυνάμεως, η οποία ασκείται στον αγωγό ΘΚ σε συνάρτηση με τον χρόνο.

2) Να υπολογιστούν οι ενεργειακές μετατροπές και οι ρυθμοί αναπτύξεως κάθε μορφής ενέργειας

στις χρονικές στιγμές 2,5 s και 6,5 s.

Άσκηση 4.

Στα άκρα δύο παράλληλων αγωγών, αμελητέας ωμικής αντιστάσεως, Αα και Γγ συνδέεται ωμική αντίσταση 2,5 Ω. Πάνω στους δύο παράλληλους αγωγούς γλιστρά χωρίς τριβές, αγωγός ΘΚ μήκους 1,2 m, μάζας 1,2 kgr και ωμικής αντιστάσεως 1,2 Ω. Το όλο σύστημα τοποθετείται κάθετα στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου 1,2 T με φορά προς τον αναγνώστη. Στο κύκλωμα ΑΘΚΓ προβλέπεται διακόπτης δ.

1) Αν ο διακόπτης δ, είναι κλειστός και ο αγωγός ΘΚ κινείται με σταθερή ταχύτητα 3,1 m/s, να υπολογίσετε τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του αγωγού.

2) Να υπολογίσετε την προσφερόμενη μηχανική ισχύ στον αγωγό ΘΚ.

Άσκηση 5.

Έστω δύο παράλληλοι αγωγοί Αα και Γγ, αμελητέας ωμικής αντιστάσεως, στα άκρα των οποίων συνδέουμε ωμική αντίσταση 3,5 Ω. Θεωρούμε ότι αγωγός ΘΚ, μάζας 1,2 kgr, μήκους 1,2 m και αμελητέας ωμικής αντιστάσεως, γλιστρά πάνω στους αγωγούς Αα και Γγ χωρίς τριβές.

Το όλο σύστημα τοποθετείται σε κατακόρυφο ομογενές μαγνητικό πεδίο, μαγνητικής επαγωγής 1,5 T με φορά των μαγνητικών δυναμικών γραμμών προς τη σελίδα. Στον αγωγό ΘΚ δίδουμε σταθερή επιτάχυνση 3,5 m/s². Να υπολογίσετε το ρεύμα στο κύκλωμα ΑΘΚΓ τη χρονική στιγμή 1,5 s.

Άσκηση 6.

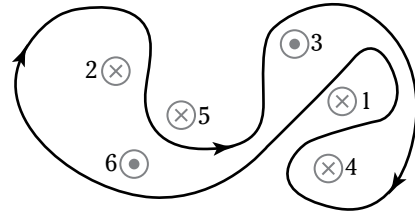
Στα άκρα δύο παράλληλων αγωγών Αα και Γγ, αμελητέας ωμικής αντιστάσεως, συνδέεται ωμική αντίσταση 1,2 Ω. Πάνω στους παράλληλους αγωγούς κινείται ράβδος ΘΚ, χωρίς τριβές, με ταχύτητα 12 m/s όταν επιδρά σε αυτή δύναμη 4,5 N.

Το σύστημα τοποθετείται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, μαγνητικής επαγωγής 1,5 T. Η φορά των μαγνητικών δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου είναι προς τον αναγνώστη. Να υπολογίσετε:

- 1) Τις δυνάμεις που ασκούνται στον αγωγό ΘΚ.
- 2) Την ισχύ αυτών των δυνάμεων.
- 3) Την ηλεκτρική ισχύ του κυκλώματος ΑΘΚΓ.
- 4) Τη διαφορά δυναμικού στα άκρα των σημείων Θ και Κ.

Άσκηση 7.

Έξι αγωγοί εισέρχονται κάθετα στη σελίδα όπως



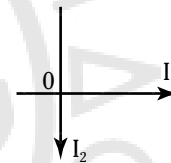
Σχ. 1.6α

παρουσιάζεται στο σχήμα 1.6α.

Κάθε αγωγός διαρρέεται από ρεύμα, στην κατεύθυνση όπως δίδεται στο σχήμα $I = nI_0$ όπου n είναι ο αριθμός, που αντιστοιχεί σε κάθε αγωγό. Να υπολογίσετε το ολοκλήρωμα $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$ κατά μήκος της κλειστής γραμμής στη διεύθυνση των βελών.

Άσκηση 8.

Δύο ευθύγραμμοι αγωγοί, άπειρου μήκους, τοποθετούνται κατά τους άξονες ενός καρτεσιανού συστήματος αξόνων, κατά μήκος του +x και -y, όταν διαρρέονται με ρεύμα $I_1 = 3$ A και $I_2 = 4$ A αντίστοιχα (σχ. 1.6β).



Σχ. 1.6β

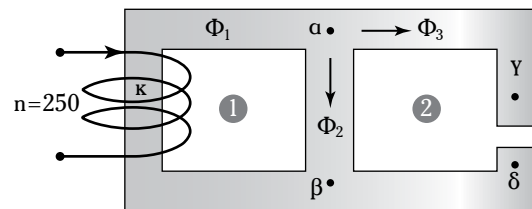
Να υπολογίσετε τη μαγνητική επαγωγή στο σημείο Β (4 m, 3 m).

Άσκηση 9.

Για το ακόλουθο μαγνητικό κύκλωμα (σχ. 1.6γ) να υπολογίσετε την ένταση του ρεύματος I , το οποίο είναι απαραίτητο για την εγκατάσταση στον διάκενο χώρο μιας μαγνητικής ροής $\Phi_g = 7 \cdot 10^{-3}$ Wb. Δεν λαμβάνονται υπόψη οι ροές σκεδάσεως.

Είναι:

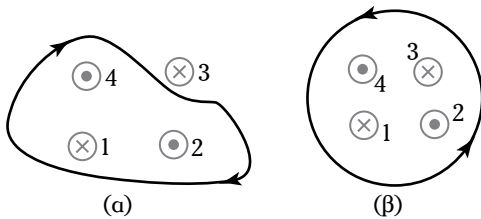
$$A = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2, \quad l_g = l_{\gamma\delta} = 0,24 \cdot 10^{-3} \text{ m}, \quad \Phi_g = \Phi_3, \\ l_{\alpha\gamma} = l_{\delta\beta} = 0,24 \text{ m}, \quad l_{\beta\alpha} = 0,1 \text{ m}, \quad l_{\beta\kappa\alpha} = 0,34 \text{ m}.$$



Σχ. 1.6γ

Άσκηση 10.

Καθένας από τους 8 αγωγούς του σχήματος 1.6δ, διαρρέεται με ρεύμα 2 A. Να υπολογίσετε το ολοκλήρωμα $\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$ κατά μήκος της κλειστής γραμμής του σχήματος 1.6δ(α) και του σχήματος 1.6δ(β).



Σχ. 1.6δ

Άσκηση 11.

Για μια γραμμική μηχανή με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

$$B = 0,7 \text{ T } \otimes$$

$$\text{Συνολική ωμική αντίσταση: } 0,30 \Omega$$

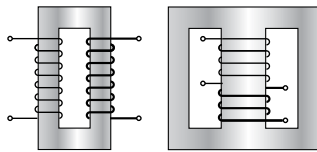
$$\ell = 0,7 \text{ cm } V_{\text{DC}} = 150 \text{ V}$$

Να βρεθεί:

- 1) Αν στον αγωγό, ο οποίος εκτελεί μεταφορική κίνηση εφαρμοστεί δύναμη 25 N αντίθετη στη φορά κινήσεώς της, ποια είναι η νέα ταχύτητα του αγωγού;
- 2) Αν μειωθεί η μαγνητική επαγωγή στα 0,5 T, πώς θα συμπεριφερθεί ο αγωγός;
- 3) Να μελετηθεί η συμπεριφορά της γραμμικής μηχανής όταν $V_{\text{DC}} = 115 \text{ V}$.
- 4) Με βάση τις απαντήσεις των (β) και (γ) πώς ελέγχεται η ταχύτητα της γραμμικής μηχανής;

Άσκηση 12.

Να μελετηθεί η συμπεριφορά ενός τροχού ακτίνας 1 m όταν κινείται με ταχύτητα $v = 8 \text{ m/s}$ μέσα σε οριζόντιο μαγνητικό πεδίο, μαγνητικής επαγωγής 1,1 T, όταν η ακτίνα του τροχού σχηματίζει γωνία $\varphi = 35^\circ$ με τη διεύθυνση της μεταφορικής κινήσεως.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

2.1 Εισαγωγή.

Οι **μετασχηματιστές** (Μ/Σ) είναι στατές ηλεκτρικές μηχανές που αποτελούνται από μαγνητικό κύκλωμα και από δύο ή περισσότερα τυλίγματα μπορεί να είναι μονοφασικού ή τριφασικού τύπου.

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στον Νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Οι Μ/Σ λειτουργούν αποκλειστικά όταν τα ηλεκτρικά μεγέθη στους ακροδέκτες εισόδου μεταβάλλονται στο χρόνο, όπως με τον Νόμο του ημίτονου.

Οι Μ/Σ χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ δύο κυκλωμάτων επαγωγικά συνεζευγμένων. Πρόκειται για ηλεκτρικές συσκευές, οι οποίες παρουσιάζουν πολύ μεγάλη απόδοση και βρίσκουν εφαρμογή σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, αλλά και στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις εμπορικών πλοίων.

2.2 Δομή και χρήσεις των μονοφασικών Μ/Σ.

Σε αυτήν την ενότητα θα αναφερθούμε στη δομή των βιομηχανικά αξιοποιήσιμων Μ/Σ, στα βασικά τους τεχνικά χαρακτηριστικά¹ και στις χρήσεις τους στο βιομηχανικό πεδίο και στον τομέα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

Προκειμένου να λειτουργήσει ένας Μ/Σ απαιτούνται τα ακόλουθα:

- 1) Εναλλασσόμενη ημιτονοειδής τάση τροφοδοσίας.
- 2) Ηλεκτρικά κυκλώματα.
- 3) Εναλλασσόμενη κοινή μαγνητική ροή και
- 4) κατάλληλο μαγνητικό κύκλωμα, το οποίο συνδέει τα ηλεκτρικά κυκλώματα μεταξύ τους.

Στους Μ/Σ ισχύος το μαγνητικό κύκλωμα υλοποιείται μέσω ενός σιδηροπυρήνα, για τους εξής λόγους:

- 1) Διότι το σιδηρομαγνητικό υλικό συγκεντρώνει

το μεγαλύτερο μέρος της μαγνητικής ροής σε μια καθορισμένη διαδρομή και εμπλέκει όλα τα τυλίγματα του Μ/Σ.

- 2) Διότι για την παραγωγή της μαγνητικής ροής απαιτείται μικρό ρεύμα διεγέρσεως.

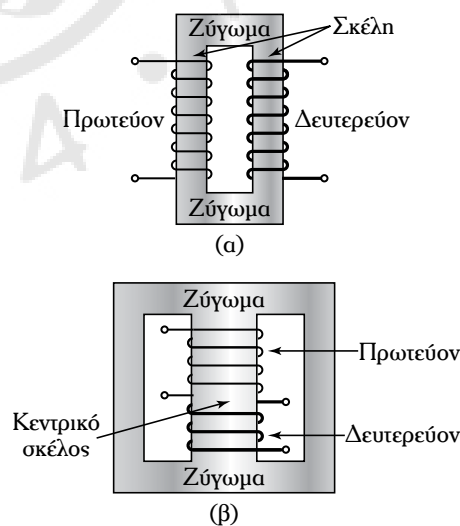
2.2.1 Δομή των μονοφασικών μετασχηματιστών.

Από κατασκευαστικής απόψεως υπάρχουν δύο κατηγορίες μονοφασικών Μ/Σ: οι **Μ/Σ τύπου πυρήνα** και οι **Μ/Σ τύπου μανδύα**.

Στην πρώτη κατηγορία [σχ. 2.2α(α)] τα ηλεκτρικά κυκλώματα (τυλίγματα), πρωτεύον (εκείνο στο οποίο εφαρμόζεται η εναλλασσόμενη τάση) και δευτερεύον (εκείνο στο οποίο συνδέεται το φορτίο) τοποθετούνται στα δύο σκέλη του μαγνητικού κυκλώματος, το οποίο έχει ορθογώνιο σχήμα.

Τα δύο σκέλη ενώνονται με δύο ζυγώματα, τα οποία κλείνουν το μαγνητικό κύκλωμα.

Στη δεύτερη κατηγορία [σχ. 2.2α(β)] τα δύο τυ-



Σχ. 2.2α

(α) Μ/Σ τύπου πυρήνα και (β) τύπου μανδύα.

¹ Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Μ/Σ αναγράφονται σε πινακίδα που φέρει από τον κατασκευαστή του.

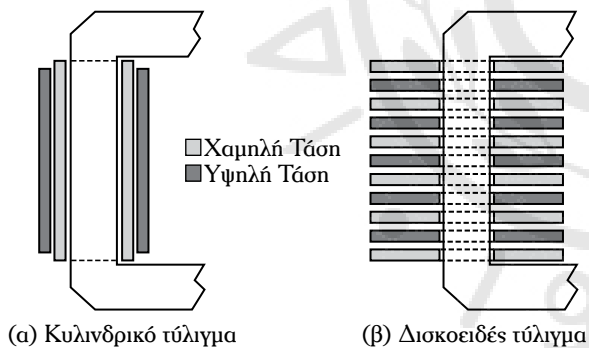
λίγματα, πρωτεύον και δευτερεύον, τοποθετούνται στο μεσαίο σκέλος. Το μαγνητικό κύκλωμα αποτελείται από τρία σκέλη.

Η διατομή του μεσαίου σκέλους είναι διπλάσια της διατομής των δύο άλλων σκελών και ζυγωμάτων. Αυτό συμβαίνει γιατί η μαγνητική ροή του μεσαίου σκέλους πρέπει να διαμερίζεται συμμετρικά στα εξωτερικά **σκέλη** και στα **ζυγώματα**. Γενικά, ο πυρήνας των Μ/Σ, που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων, κατασκευάζεται από έλασμα πάχους 0,25 έως 0,50 mm με τη μορφή δέσμης για τη μείωση των απωλειών από δινορρεύματα. Τα έλασματα κατασκευάζονται από πυριτιούχο χάλυβα και από τη μία πλευρά είναι μονωμένα με μονωτικό χαρτί ή με επίχρισμα κατάλληλου μονωτικού υλικού (βερνίκια κ.λπ.), ώστε να υπάρχει μόνωση μεταξύ τους.

Τα τυλίγματα των μετασχηματιστών είναι:

1) Τα **κυλινδρικά** ή **σωληνωτά τυλίγματα** [σχ. 2.2β(α)], στα οποία οι σωλήνες του τυλίγματος της υψηλής τάσεως (ΥΤ) περιβάλλουν τους σωλήνες του τυλίγματος χαμηλής τάσεως (ΧΤ) και

2) τα **δισκοειδή τυλίγματα** [σχ. 2.2β(β)], στα οποία τόσο το πρωτεύον, όσο και το δευτερεύον τυλίγμα διαιρείται σε περισσότερα πηνία, που έχουν τη μορφή δίσκων.



Σχ. 2.2β

Τυλίγματα μετασχηματιστών χαμηλής τάσεως και υψηλής τάσεως.

2.2.2 Ονομαστικά μεγέθη των Μ/Σ.

Τα βασικά θεμελιώδη ονομαστικά μεγέθη ενός πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ είναι:

1) Η **ονομαστική τάση πρωτεύοντος**, που είναι η μεγαλύτερη δυνατή τάση τροφοδοσίας του μονοφασικού Μ/Σ.

2) Η **ονομαστική τάση δευτερεύοντος**, που είναι η τάση στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος του Μ/Σ όταν αυτός λειτουργεί χωρίς φορτίο, ενώ τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση.

φοδοτείται με την ονομαστική του τάση.

3) Τα **ονομαστικά ρεύματα πρωτεύοντος** και **δευτερεύοντος**, που είναι τα αναγραφόμενα στην πινακίδα και υπολογίζονται με βάση τις ονομαστικές τιμές της ισχύος και της τάσεως.

4) Η **ονομαστική ικανότητα** ενός Μ/Σ που είναι η ισχύς στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος σε kiloVoltAmperes (kVA).

2.2.3 Χρήση των Μ/Σ.

Ο τρόπος κατασκευής των Μ/Σ προσδιορίζει το πεδίο εφαρμογής τους. Οι προδιαγραφές κατασκευής τους υπαγορεύονται από την ανάγκη υπάρξεως ηλεκτρικών και μαγνητικών χαρακτηριστικών, τα οποία να εγγυώνται την κανονική τους λειτουργία.

Για τους μονοφασικούς Μ/Σ, μικρής ισχύος, το ζήτημα της θερμάνσεως έχει μικρή σημασία.

Στους Μ/Σ ισχύος, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε μεγάλες βιομηχανικές μονάδες, η θέρμανση είναι ο κύριος παράγοντας για τον καθορισμό των διαστάσεών τους. Από τους Μ/Σ ισχύος απαιτούμε **μεγάλη απόδοση, μικρή εκατοστιαία πτώση τάσεως** κ.λπ..

Οι τύποι των Μ/Σ, που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι:

1) Οι **Μ/Σ ισχύος**, για τη μεταφορά και τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.

2) Οι **αυτομετασχηματιστές** (ΑΜ/Σ), για τη μετατροπή τάσεων μέσα σε μικρά όρια, για εκκίνηση κινητήρων εναλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ) και άλλες εφαρμογές.

3) Οι **Μ/Σ δοκιμών** και

4) οι **Μ/Σ με εφαρμογές στις τηλεπικοινωνίες**.

2.3 Λειτουργία των μονοφασικών Μ/Σ.

Σε αυτήν την παράγραφο θα μελετηθεί ο ιδανικός Μ/Σ, που χρησιμεύει για την εξαγωγή των ιδιοτήτων του, οι οποίες ισχύουν, όμως, και για τον πραγματικό Μ/Σ. Στη συνέχεια, θα κατασκευάσουμε το πλήρες ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μονοφασικού Μ/Σ, όταν αυτός λειτουργεί κανονικά. Από αυτό, κάνοντας κάποιες παραδοχές, θα προκύψουν το απλοποιημένο και το προσεγγιστικό απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα. Για τον προσδιορισμό των κυκλωματικών στοιχείων των αντιστοιχών ισοδυνάμων κυκλωμάτων, απαιτούνται δοκιμές (πειράματα) στην κατάσταση χωρίς φορτίο και σε ελεγχόμενο βραχυκύκλωμα.

2.3.1 Ιδανικός Μ/Σ.

Ο ιδανικός Μ/Σ είναι μία υποθετική συσκευή, η οποία χρησιμοποιείται, προσεγγιστικά, για την εξαγωγή των βασικών μαθηματικών σχέσεων, που διέπουν τη λειτουργία των πραγματικών Μ/Σ. Οι ακόλουθες παραδοχές ορίζουν τον ιδανικό Μ/Σ:

1) Οι ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων θεωρούνται αμελητέες.

2) Οι απώλειες πυρήνα θεωρούνται αμελητέες.

3) Όλη η μαγνητική ροή συγκεντρώνεται στον πυρήνα και στα δύο τυλίγματα. Η μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα θεωρείται άπειρη.

4) Η χωρητικότητα των τυλιγμάτων αμελείται.

Σύμφωνα με τις παραδοχές 1 και 3 ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$u_1 = e_1 = n_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

$$u_2 = e_2 = n_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

όπου: ϕ η συνολική, μέγιστη, μαγνητική ροή, η οποία παράγεται από την ταυτόχρονη δράση των ρευμάτων i_1 και i_2 (σχ. 2.3α), u_1 και u_2 οι στιγμιαίες τιμές των τάσεων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος αντίστοιχα.

Διαιρώντας τις εξισώσεις 2.1 και 2.2 προκύπτει η **1^η ιδιότητα των Μ/Σ**, με βάση την οποία οι Μ/Σ μετασχηματίζουν τάσεις ανάλογα με το λόγο των σπειρών. Ισχύει λοιπόν:

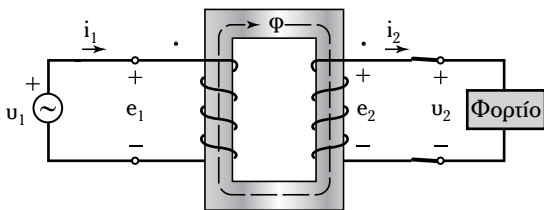
$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1}{n_2} = K \quad \acute{\eta}$$

Για ενεργές τιμές των μεγεθών είναι:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} = K \quad (2.3)$$

όπου K ο **λόγος μετασχηματισμού**: $\frac{n_1}{n_2} = K$.

Η αιτία παραγωγής της κύριας μαγνητικής ροής ϕ , (αυτή η οποία εμπλέκεται με το πρωτεύον και το



Σχ. 2.3α

Ιδανικός μονοφασικός Μ/Σ.

δευτερεύον τυλίγμα του Μ/Σ) είναι η μαγνητογενετική δύναμη (ΜΕΔ), F .

Για τον ιδανικό Μ/Σ η συνολική (ΜΕΔ) είναι: $F = n_1 i_1 - n_2 i_2$.

Σύμφωνα με τις παραδοχές 1 και 3 και τις φορές των ρευμάτων, στο κύκλωμα του σχήματος 2.3α, προκύπτει:

$$n_1 i_1 - n_2 i_2 = R_m \phi = 0. \quad (2.4)$$

Πράγματι, είναι: $R_m = \frac{1}{\mu} \frac{\ell}{A}$ (2.5)

όπου: μ η μαγνητική διαπερατότητα, ℓ το μέσο μήκος του πυρήνα, A το εμβαδόν διατομής του πυρήνα και R_m η μαγνητική αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος του Μ/Σ.

Όταν $\mu \rightarrow \infty$ (παραδοχή δ), τότε η μαγνητική αντίσταση ισούται με μηδέν.

Από την εξίσωση 2.4, προκύπτει η **2^η ιδιότητα των Μ/Σ**, με βάση την οποία οι Μ/Σ μετασχηματίζουν ρεύματα αντιστρόφως ανάλογα του λόγου των σπειρών.

Ισχύει λοιπόν: $\frac{i_1}{i_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{K}$. (2.6)

Πολλαπλασιάζοντας τις εξισώσεις 2.4 και 2.6 προκύπτει:

$$u_1 i_1 = u_2 i_2. \quad (2.7)$$

Η εξίσωση 2.7, εκφράζει ότι η στιγμιαία ισχύς εισόδου ισούται με τη στιγμιαία ισχύ εξόδου του ιδανικού Μ/Σ.

Για τις ενεργές τιμές των τάσεων και των ρευμάτων ισχύει:

$$V_1 = \frac{n_1}{n_2} V_2, \quad V_2 = \frac{n_2}{n_1} V_1. \quad (2.8)$$

$$I_1 = \frac{n_2}{n_1} I_2, \quad I_2 = \frac{n_1}{n_2} I_1. \quad (2.9)$$

Από τις εξισώσεις 2.8 και 2.9 προκύπτει η **3^η ιδιότητα των Μ/Σ**, με βάση την οποία οι Μ/Σ μετασχηματίζουν σύνθετες αντιστάσεις ανάλογα του τετραγώνου του λόγου των σπειρών.

Ισχύει λοιπόν:

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_1} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \left(\frac{\dot{V}_2}{\dot{I}_2}\right) = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \dot{Z}_2 \quad (2.10)$$

όπου \dot{Z}_2 η σύνθετη αντίσταση του φορτίου, το οποίο συνδέεται στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος του ιδανικού Μ/Σ. Στη σχέση 2.10 τα μεγέθη των τάσε-

ων, των ρευμάτων και της σύνθετης αντιστάσεως του φορτίου δίδονται στη μιγαδική τους μορφή.

Ο μηχανισμός λειτουργίας της 3^{ης} ιδιότητας δίδεται στα ακόλουθα ισοδύναμα κυκλώματα του ιδανικού Μ/Σ (σχ. 2.3β). Τα τρία κυκλώματα, από ηλεκτρικής απόψεως, είναι ισοδύναμα όταν θεωρούνται από τους ακροδέκτες A_1 και B_2 . Οι τιμές της τάσεως, εντάσεως και σύνθετης αντιστάσεως του δευτερεύοντος, όταν τις «βλέπομε» από την πλευρά του πρωτεύοντος, ονομάζονται **ανηγμένες στο πρωτεύον**.

2.3.2 Λειτουργία πραγματικού Μ/Σ χωρίς φορτίο.

Η μελέτη της συμπεριφοράς του πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ εξαρτάται από το αν λαμβάνονται υπόψη όλα τα είδη των απωλειών (στην παράγρ. 2.6, γίνεται πλήρης ανάπτυξη των απωλειών σε πραγμα-

τικό μονοφασικό Μ/Σ), και το φαινόμενο της ροής σκεδάσεως. Οι βασικότερες απώλειες είναι:

1) Οι **απώλειες χαλκού** P_{cu} . Είναι απώλειες Joule στις ωμικές αντιστάσεις του Μ/Σ και είναι ανάλογες με το τετράγωνο του ρεύματος στα τυλίγματά του και

2) Οι **απώλειες πυρήνα** P_c , που αποτελούνται:

α) Από τις απώλειες από δινορρεύματα. Είναι ανάλογες του τετράγωνου της τάσεως, η οποία εφαρμόζεται στην είσοδο του Μ/Σ και καταναλώνονται στο μέταλλο του πυρήνα, και

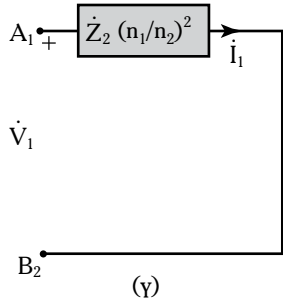
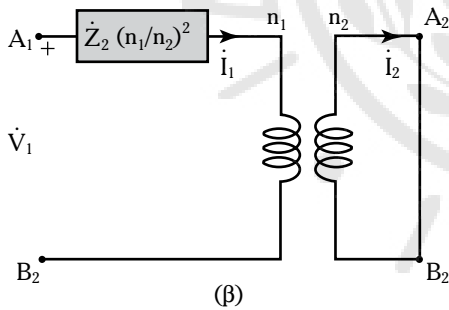
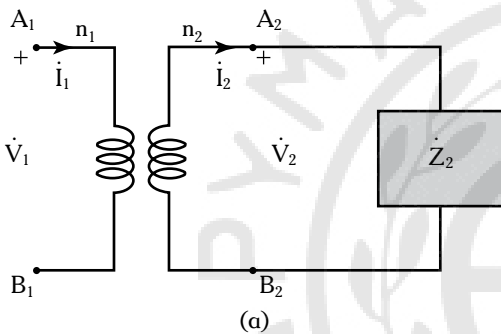
β) από τις απώλειες από μαγνητική υστέρηση, οι οποίες αποτελούν τις απώλειες ενέργειας μέσα στο σιδηρομαγνητικό υλικό κατά τη διαδικασία μαγνητίσεώς του.

Αυτές οι απώλειες εμφανίζονται με τη μορφή θερμότητας.

Κατά τη λειτουργία του πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ εμφανίζονται στο πρωτεύον και στο δευτερεύον τυλίγματα οι μαγνητικές ροές σκεδάσεως Φ_{o1} και Φ_{o2} αντίστοιχα, οι οποίες κατά ένα μέρος αναπτύσσονται στα αντίστοιχα τυλίγματα και κατά το άλλο στον αέρα, ο οποίος τα περιβάλλει. Οι μαγνητικές ροές σκεδάσεως παράγουν αυτεπαγωγές, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στην κατασκευή του ισοδυναμού κυκλώματος του Μ/Σ.

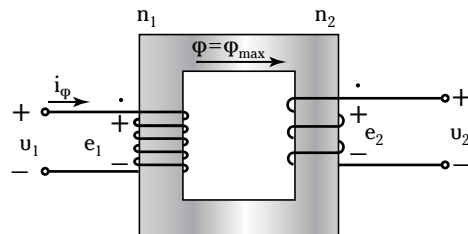
Στο σχήμα 2.3γ, δίδεται ένας πραγματικός μονοφασικός Μ/Σ (δύο τυλιγμάτων) με ανοικτό το δευτερεύον. Σ' αυτήν την κατάσταση ο Μ/Σ λειτουργεί χωρίς φορτίο. Θεωρούμε ότι στο πρωτεύον επιβάλλεται μία ημιτονοειδής εναλλασόμενη τάση, στιγμιαίας, τιμής u_1 . Ο Μ/Σ απορροφά από το δίκτυο ένα μικρό ρεύμα (ρεύμα διεγέρσεως) i_ϕ , το οποίο είναι 2 έως 2,5% του ονομαστικού ρεύματος του πρωτεύοντος, οπότε το φαινόμενο Joule και το φαινόμενο της ροής σκεδάσεως στο πρωτεύον δεν λαμβάνονται υπόψη.

Η ΜΕΔ $n_1 i_\phi$ παράγει τη μαγνητική ροή Φ (η οποία, στην πράξη, είναι η μέγιστη μαγνητική ροή Φ_m σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας του Μ/Σ), η



Σχ. 2.3β

(α), (β), (γ) Ισοδύναμα κυκλώματα για ιδανικό Μ/Σ ως προς τους ακροδέκτες A_1 και B_2 .



Σχ. 2.3γ

Μονοφασικός μετασχηματιστής, στη λειτουργία χωρίς φορτίο.

οποία συγκεντρώνεται στον σιδηροπυρήνα του Μ/Σ και εμπλέκει το δευτερεύον τύλιγμά του. Αυτή η μαγνητική ροή ονομάζεται **κύρια, χρήσιμη** ή **ωφέλιμη** γιατί καθορίζει την ανάπτυξη της ΗΕΔ e_2 , στο δευτερεύον (σχ. 2.3γ). Η κύρια μαγνητική ροή Φ , εμπλέκει όλες τις σπείρες n_1 του πρωτεύοντος, οπότε η αντίστοιχη **πεπλεγμένη ροή** είναι:

$$\psi_1 = n_1 \Phi. \quad (2.11)$$

Η κύρια μαγνητική ροή Φ , επάγει στο πρωτεύον τύλιγμα, την τάση e_1 , η οποία είναι:

$$e_1 = \frac{d\psi_1}{dt} = n_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.12)$$

Οι μονάδες μετρήσεως της Φ είναι σε Weber, και της e_1 σε Volt.

Σύμφωνα με τον Νόμο του Lenz η τάση e_1 είναι μία αντι-ΗΕΔ, όπου στο σχήμα 2.3γ αποδίδεται με τα σημεία + και -. Η αντι-ΗΕΔ e_1 , πρέπει να εξισορροπεί την επιβαλλόμενη τάση u_1 , ώστε:

$$u_1 = e_1 \quad (2.13)$$

(όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η ωμική αντίσταση και το φαινόμενο της ροής σκεδάσεως του πρωτεύοντος).

Θεωρώντας την τάση u_1 ως ημιτονοειδή, το ρεύμα i_Φ είναι μικρό. Αν δεν λαμβάνονται υπόψη η ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος και το αντίστοιχο φαινόμενο της ροής σκεδάσεως, τότε η αντι-ΗΕΔ e_1 , και η μαγνητική ροή Φ , θεωρούνται, πρακτικά, ημιτονοειδή μεγέθη. Πράγματι, αν η μαγνητική ροή Φ , είναι ημιτονοειδής:

$$\Phi = \Phi_m \eta \omega t \quad (2.14)$$

τότε η επαγόμενη αντι-ΗΕΔ είναι:

$$e_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt} = \omega n_1 \Phi_m \text{ συν} \omega t \quad (2.15)$$

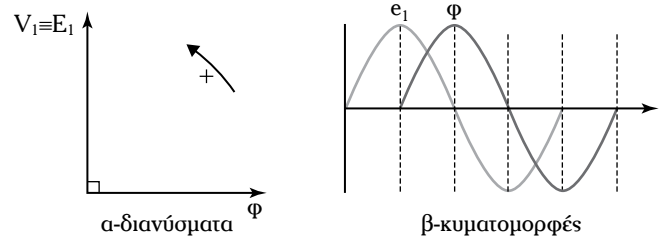
όπου Φ_m η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής και $\omega = 2\pi f$ η γωνιακή ταχύτητα σε rad/s.

Με βάση την πολικότητα των τάσεων, την οποία υιοθετήσαμε, η αντι-ΗΕΔ e_1 προηγείται της μαγνητικής ροής Φ κατά 90° (σχ. 2.3δ).

Η ενεργός τιμή της e_1 είναι:

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f n_1 \Phi_m = 4,44 f n_1 \Phi_m \quad (2.16)$$

όπου f η συχνότητα της πηγής, η οποία τροφοδοτεί



Σχ. 2.38

Κύρια ροή και επαγόμενη τάση.

τον Μ/Σ σε Hz και n_1 , είναι ο αριθμός σπειρών του πρωτεύοντος τυλίγματος του Μ/Σ.

Από την εξίσωση 2.16, όταν η ωμική αντίσταση R_1 , του τυλίγματος του πρωτεύοντος είναι αμελητέα, έχουμε:

$$\Phi_m = \frac{E_1 \equiv V_1}{4,44 f n_1}. \quad (2.17)$$

Γενικά, η μαγνητική ροή καθορίζεται μόνο από την επιβαλλόμενη τάση, την συχνότητα της τάσεως του δικτύου τροφοδοσίας και τον αριθμό σπειρών του τυλίγματος.

Η εξίσωση 2.17 δεν ισχύει μόνο για τους Μ/Σ, αλλά και για οποιαδήποτε συσκευή, η οποία λειτουργεί με ημιτονοειδή επιβαλλόμενη τάση, όταν η ωμική αντίσταση του πηνίου αμελείται.

Η κύρια μαγνητική ροή επάγει στο δευτερεύον τύλιγμα, με αριθμό σπειρών n_2 , μία τάση ενεργούς τιμής E_2 :

$$E_2 = 4,44 f n_2 \Phi_m. \quad (2.18)$$

Διαιρώντας την 2.16 με την 2.18 προκύπτει:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} = K. \quad (2.19)$$

Για τον πραγματικό μονοφασικό Μ/Σ, όταν λειτουργεί χωρίς φορτίο και για τις ενεργές τιμές των μεγεθών V_1 , V_2 , E_1 και E_2 ισχύει:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} = K. \quad (2.20)$$

Από την εξίσωση 2.20, προκύπτει η 1^η ιδιότητα των πραγματικών Μ/Σ:

Ο Μ/Σ μετασχηματίζει τάσεις ανάλογα με τον λόγο των σπειρών.

2.3.3 Ρεύμα μαγνητίσεως.

Μια μεταβολή του φορτίου προκαλεί μεταβολή του ρεύματος στο δευτερεύον. Ο Μ/Σ αντιδρά με μεταβολή του ρεύματος του πρωτεύοντος, έτσι ώστε να

διατηρείται σταθερή η διαφορά $n_1 I_1 - n_2 I_2$.

Όταν ο Μ/Σ τροφοδοτείται με μία τάση εναλλασσόμενη ημιτονοειδή $v_1(t)$, τότε $e_1(t)$ και $\phi(t)$ είναι εναλλασσόμενα ημιτονοειδή μεγέθη.

Αν αμελήσουμε τις απώλειες λόγω μαγνητικής υστερήσεως (απώλειες του σιδηροπυρήνα κατά τη διαδικασία μαγνητίσεώς του), τότε το ρεύμα, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη μαγνήτιση του πυρήνα του Μ/Σ είναι το ρεύμα μαγνητίσεως $i_m(t)$.

Ο πυρήνας του Μ/Σ είναι μη γραμμικός, οπότε το ρεύμα μαγνητίσεως δεν είναι εναλλασσόμενο ημιτονοειδές μέγεθος, αλλά είναι παραμορφωμένο.

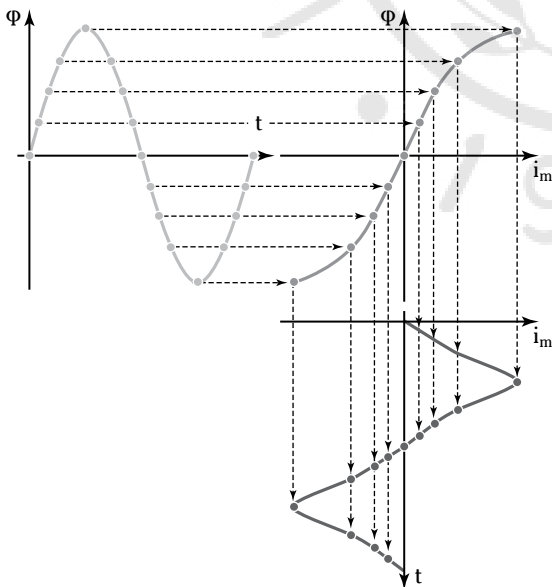
Μπορεί να αποδειχτεί, όταν αμελούνται οι απώλειες μαγνητικής υστερήσεως (σχ. 2.3ε), ότι το $i_m(t)$:

1) Περιλαμβάνει αρμονικές συνιστώσες, περίπου τάξεως (3^η, 5^η κ.λπ.) και ότι,

2) η σημαντικότερη είναι η 3^η αρμονική (σε φάση 180° με τη θεμελιώδη) (σχ. 2.3στ).

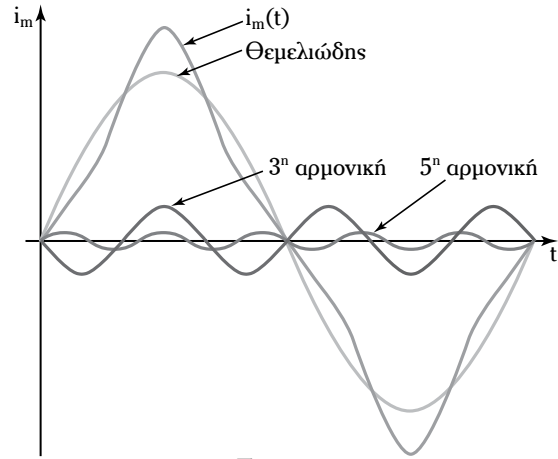
Δεδομένου ότι το ρεύμα μαγνητίσεως είναι μικρό σε σύγκριση με άλλα ρεύματα, σε πρώτη προσέγγιση, θεωρείται ημιτονοειδές, με ενεργό τιμή ίση με την αντίστοιχη του παραμορφωμένου ρεύματος.

Όταν λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες μαγνητικής υστερήσεως, το ρεύμα $i_m(t)$ προσδιορίζεται γραφικά (σχ. 2.3ζ). Σε αυτήν την περίπτωση, στο ρεύμα μαγνητίσεως προστίθεται ένα ρεύμα $i_h(t)$, κυκλικής συχνότητας ω , το οποίο προηγείται του ρεύματος $i_m(t)$ κατά 90° (σχ. 2.3η).



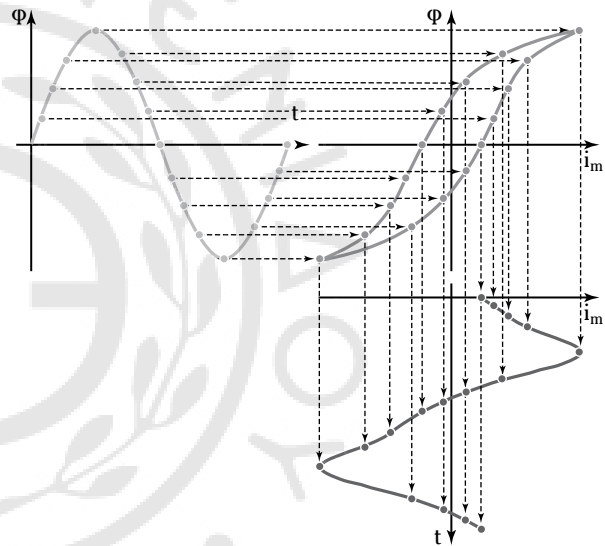
Σχ. 2.3ε

Παραμορφωμένο ρεύμα μαγνητίσεως, $i_m(t)$, λόγω των μη γραμμικών ιδιοτήτων του πυρήνα και χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη τις απώλειες μαγνητικής υστερήσεως.



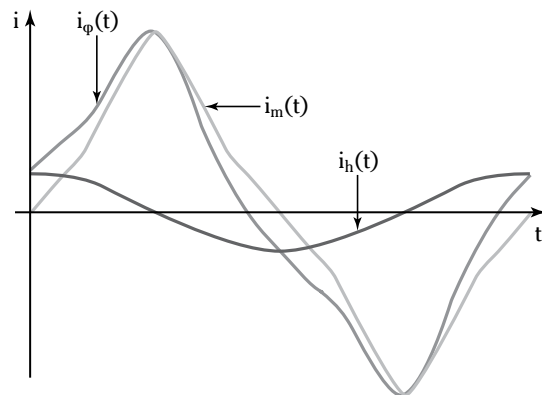
Σχ. 2.3στ

Ανάλυση του ρεύματος μαγνητίσεως στη θεμελιώδη, 3^η και 5^η αρμονική συνιστώσα.



Σχ. 2.3ζ

Γραφικός προσδιορισμός του ρεύματος διεγέρσεως $i_m(t)$ όταν λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες λόγω μαγνητικής υστερήσεως.



Σχ. 2.3η

Το ρεύμα μαγνητίσεως $i_m(t)$ και το ρεύμα $i_h(t)$.

Το ρεύμα $i_h(t)$ προηγείται κατά 90° της μαγνητικής ροής $\phi(t)$, οπότε είναι σε φάση με την $e_1(t)$. Τελικά, η συνεισφορά του ρεύματος $i_h(t)$ περιλαμβάνεται στο ρεύμα απωλειών πυρήνα i_c , το οποίο καλύπτει τις απώλειες μαγνητικής υστερήσεως και δινορρευμάτων.

Όταν λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες πυρήνα, τότε το ρεύμα, το οποίο απορροφά ο Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι το ρεύμα διεγέρσεως $i_\phi(t)$.

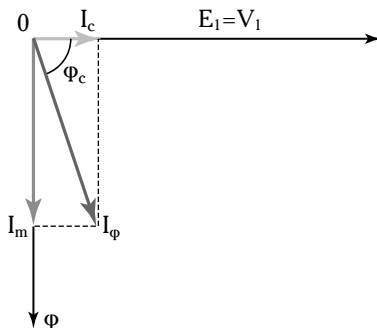
Το ρεύμα διεγέρσεως αναλύεται, διανυσματικά, σε δύο συνιστώσες, μία σε φάση με την αντι-ΗΕΔ- E_1 και μία άλλη, η οποία προηγείται της E_1 κατά 90° (σχ. 2.3θ).

Η άεργος συνιστώσα I_m σε φάση με τη μαγνητική ροή ϕ , ονομάζεται ρεύμα μαγνητίσεως και είναι υπεύθυνη για την παραγωγή της μαγνητικής ροής του Μ/Σ σ' αυτήν την κατάσταση λειτουργίας. Η συνιστώσα I_c (σε φάση με την τάση V_1) ονομάζεται **ρεύμα απωλειών πυρήνα** και είναι υπεύθυνη για την πραγματική ισχύ, την οποία απορροφά ο Μ/Σ από το δίκτυο και σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας του καλύπτει τις απώλειες πυρήνα.

Οι ηλεκτρομαγνητικές συσκευές, οι οποίες απορροφούν το ρεύμα μαγνητίσεως μέσω των μαγνητικών τους κυκλωμάτων, από ένα σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος, λειτουργούν με ισχυρό επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Αυτός είναι ο λόγος, για τον οποίο τα περισσότερα βιομηχανικά φορτία λειτουργούν επαγωγικά. Στο σχήμα 2.3θ, η γωνία ϕ_c ονομάζεται **γωνία απωλειών πυρήνα**. Οι απώλειες πυρήνα δίδονται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_c = (V_1 \equiv E_1) I_\phi \cos \phi_c. \quad (2.21)$$

Ενώ ο συντελεστής ισχύος δίδεται:



Σχ. 2.3θ

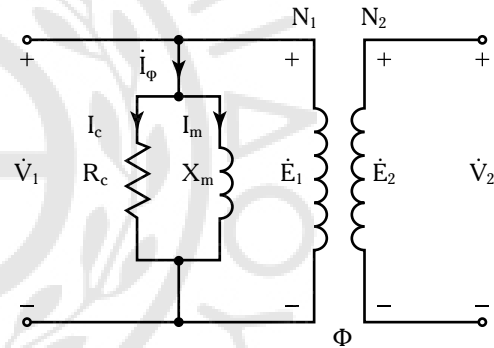
Διανυσματική ανάλυση του ρεύματος διεγέρσεως ενός πραγματικού Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο, όταν δεν λαμβάνονται υπόψη η R_1 και η ροή σκεδάσεως του πρωτεύοντος.

$$\cos \phi_c = \frac{P_c}{V_1 (\equiv E_1) I_\phi}. \quad (2.22)$$

Από το διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 2.3θ, προκύπτει το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο, όταν δεν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο Joule, και το αντίστοιχο φαινόμενο ροής σκεδάσεως του πρωτεύοντος (σχ. 2.3ι). Από το διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 2.3θ προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις μεταξύ των μεγεθών I_ϕ , I_c και I_m :

$$I_\phi = \sqrt{I_c^2 + I_m^2}, \quad I_c = I_\phi \cos \phi_c \quad \text{και} \quad I_m = I_\phi \sin \phi_c.$$

Το κυκλωματικό στοιχείο $R_c [\Omega]$, ονομάζεται **αντίσταση απωλειών πυρήνα** και αντιπροσωπεύει τις απώλειες λόγω μαγνητικής υστερήσεως και δινορρευμάτων, ενώ το κυκλωματικό στοιχείο $X_m [\Omega]$, ονομάζεται **αντίδραση μαγνητίσεως** και αντιπροσωπεύει την μαγνήτιση του πυρήνα του Μ/Σ.

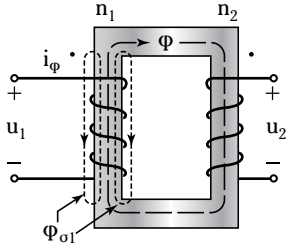


Σχ. 2.3ι

Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μονοφασικού Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο, όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος και το αντίστοιχο φαινόμενο ροής σκεδάσεως.

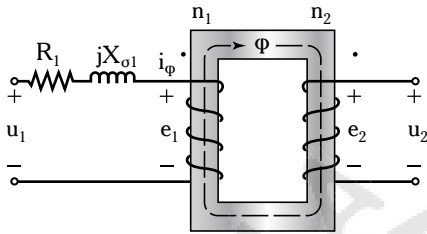
2.3.4 Ισοδύναμο κύκλωμα του πραγματικού Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο, λαμβάνοντας υπόψη την ωμική αντίσταση και τη ροή σκεδάσεως, αντίστοιχα, του πρωτεύοντος.

Όταν ο πραγματικός Μ/Σ λειτουργεί χωρίς φορτίο, εκτός της ωμικής αντιστάσεως στο πρωτεύον τύλιγμα υπάρχει και η αντίδραση σκεδάσεως ($X_{\sigma 1}$), η οποία οφείλεται στη ροή σκεδάσεως $\phi_{\sigma 1}$ (σχ. 2.3ια). Στο σχήμα 2.3ιβ, δίδεται ο ισοδύναμος Μ/Σ όταν λειτουργεί χωρίς φορτίο. Επίσης, δίδονται τα κυκλωματικά στοιχεία: ωμική αντίσταση R_1 και αντίδραση σκεδάσεως $X_{\sigma 1}$ τοποθετημένα συγκεκριμένα στο ισοδύναμο κύκλωμα σε σειρά με τον ιδανικό Μ/Σ.



Σχ. 2.31α

Μαγνητικά πεδία του πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο.



Σχ. 2.31β

Ισοδύναμο κύκλωμα του πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο.

Είναι: $\Phi_1 = \Phi_{o1} + \Phi.$ (2.23)

Η επιβαλλόμενη τάση στο πρωτεύον u_1 είναι:

$$u_1 = R_1 i_\phi + e_1 = R_1 i_\phi + n_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = R_1 i_\phi + n_1 \frac{d\Phi_{o1}}{dt} + n_1 \frac{d\Phi}{dt}$$
 (2.24)

Όταν η επιβαλλόμενη τάση είναι ημιτονοειδής, τότε έχουμε:

$$\dot{V}_1 = (R_1 + jX_{o1}) \dot{I}_1 + \dot{E}_1.$$
 (2.25)

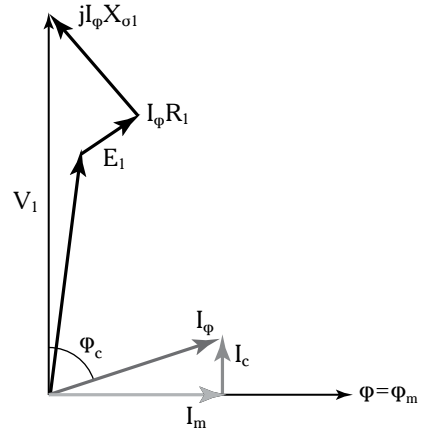
Για την αντίδραση σκεδάσεως του πρωτεύοντος X_{o1} ισχύει:

$$X_{o1} = L_{o1} \omega$$
 (2.26)

όπου L_{o1} η αυτεπαγωγή σκεδάσεως του πρωτεύοντος.

Με βάση την εξίσωση 2.25 κατασκευάζουμε το διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 2.31γ, το οποίο εκφράζει τη λειτουργία του Μ/Σ όταν στο δευτερεύον τύλιγμα δεν έχει συνδεθεί φορτίο.

Το ρεύμα διεγέρσεως I_ϕ , θεωρείται ημιτονοειδές και προκαλεί την κύρια μαγνητική ροή Φ . Το I_ϕ αναλύεται σε δύο συνιστώσες, το ρεύμα μαγνήτισεως I_m , σε φάση με τη μαγνητικής ροή και το ρεύμα απωλειών πυρήνα I_c , σε φάση με την επαγόμενη αντι-ΗΕΔ.



Σχ. 2.31γ

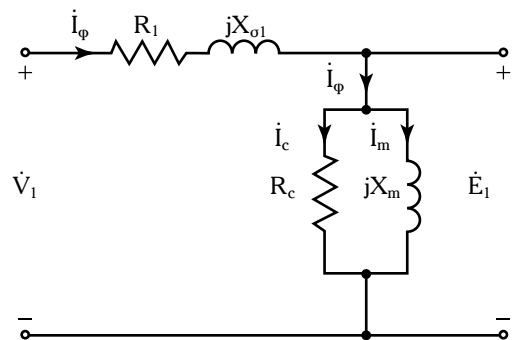
Διανυσματικό διάγραμμα λειτουργίας χωρίς φορτίο του Μ/Σ με R_1 και X_{o1} .

Η επαγόμενη αντι-ΗΕΔ E_1 , προηγείται της μαγνητικής ροής κατά 90° σύμφωνα με την υιοθετηθείσα σύμβαση φοράς περιστροφής των αντιστοίχων διανυσμάτων (θετική στη φορά των δεικτών του ρολογιού ή κανόνας του κοχλίου).

Οι πτώσεις τάσεως στην ωμική αντίσταση και στην αντίδραση σκεδάσεως του Μ/Σ είναι πολύ μικρές. Η διαφορά των μέτρων των διανυσμάτων V_1 και E_1 είναι της τάξεως 0,5%.

Στο σχήμα 2.31δ δίδεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του Μ/Σ όταν λειτουργεί χωρίς φορτίο, ενώ λαμβάνομε υπόψη την ωμική αντίσταση και την αντίδραση σκεδάσεως του πρωτεύοντος.

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.31δ, διακρίνεται ο κλάδος διεγέρσεως, ο οποίος αποτελείται από την παράλληλη σύνδεση του κλάδου απωλειών πυρήνα, με ισοδύναμη ωμική αντίσταση και τον κλάδο μαγνήτισεως με ισοδύναμη αντίδραση μαγνήτισεως.



Σχ. 2.31δ

Ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο.

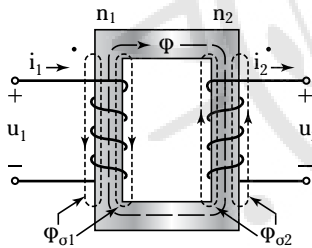
2.3.5 Πραγματικός Μ/Σ με φορτίο.

Ο ιδανικός Μ/Σ είναι μία θεωρητική συσκευή, η οποία χρησιμεύει για να κατανοηθεί, όσο πιο απλά γίνεται, η λειτουργία των Μ/Σ.

Στο σχήμα 2.3ιε, δίδονται, σχηματικά, οι μαγνητικές ροές, οι οποίες αναπτύσσονται στον πραγματικό μονοφασικό Μ/Σ όταν λειτουργεί με φορτίο. Αυτές είναι:

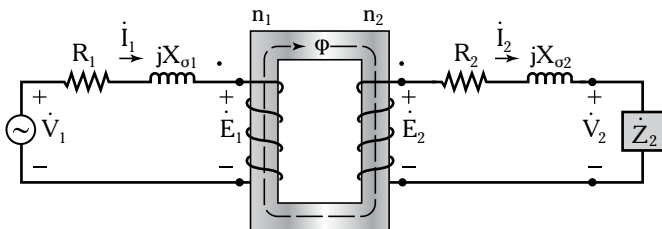
1) Η χρήσιμη μαγνητική ροή ϕ , η οποία εμπλέκει το πρωτεύον και το δευτερεύον τυλίγμα.

2) Οι ροές σκεδάσεως του πρωτεύοντος (ϕ_{o1}) και του δευτερεύοντος (ϕ_{o2}) αντίστοιχα (σχ. 2.3ιε), οι οποίες προκαλούνται γιατί η μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα είναι διαφορετική του μηδενός ($\mu \neq 0$), οπότε υπάρχουν κάποιες μαγνητικές δυναμικές γραμμές, μέρος των οποίων αναπτύσσεται στα τυλίγματα και το υπόλοιπο, μεγαλύτερο μέρος τους κλείνει κύκλωμα στον αέρα. Αυτές οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές καθορίζουν τις ροές σκεδάσεως του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος, οι οποίες δεν δημιουργούν τάσεις αλλά, αντίθετα, προκαλούν άεργες επαγωγικές πτώσεις τάσεως, ενώ υπάρχει και η παρουσία μιας άεργης επαγωγικής ισχύος σε κάθε τυλίγμα. Οι ροές σκεδάσεως, εκπροσωπούνται στο ισοδύναμο κύκλωμα (σχ. 2.3ιστ),



Σχ. 2.3ιε

Μαγνητικά πεδία του μονοφασικού Μ/Σ στη λειτουργία με φορτίο.



Σχ. 2.3ιστ

Ισοδύναμο Μ/Σ, που αποτελείται από τον ιδανικό Μ/Σ και τις συγκεντρωμένες ωμικές αντιστάσεις και αντιδράσεις σκεδάσεως του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αντίστοιχα.

από τις αντιδράσεις σκεδάσεως X_{o1} και X_{o2} , οι οποίες θεωρούνται σταθερές όταν η συχνότητα των τάσεων και των ρευμάτων είναι σταθερή.

Στο σχήμα 2.3ιστ δίδεται ο ισοδύναμος Μ/Σ όταν στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος συνδέεται ένα φορτίο σύνθετης αντιδράσεως Z_2 .

Για τον πραγματικό Μ/Σ, η συνολική μαγνητική ροή του πρωτεύοντος τυλίγματος είναι:

$$\phi_1 = \phi_{o1} + \phi \quad (2.27)$$

ενώ η συνολική μαγνητική ροή του δευτερεύοντος τυλίγματος είναι:

$$\phi_2 = -\phi_{o2} + \phi \quad (2.28)$$

όπου: ϕ_{o1} , ϕ_{o2} και ϕ είναι οι μαγνητικές ροές σκεδάσεως πρωτεύοντος, δευτερεύοντος και η ωφέλιμη μαγνητική ροή αντίστοιχα.

Αν θεωρήσουμε τις στιγμιαίες τιμές των τάσεων και των ρευμάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος αντίστοιχα, τότε για το πρωτεύον έχουμε:

$$u_1 = R_1 i_1 + n_1 \frac{d\phi_{o1}}{dt} + n_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.29)$$

Η στιγμιαία τιμή στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος είναι:

$$u_2 = R_2 i_2 + n_2 \frac{d(-\phi_{o2} + \phi)}{dt} \quad (2.30)$$

Όταν η τάση, η οποία επιβάλλεται στο πρωτεύον είναι ημιτονοειδής, τότε η μιγαδική διατύπωση της εξίσωσης 2.29 και της εξίσωσης 2.30 είναι αντίστοιχα:

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_{o1}) \quad (2.31)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (R_2 + jX_{o2}) \quad (2.32)$$

όπου: $X_{o1} = L_{o1}\omega$ και $X_{o2} = L_{o2}\omega$, οι αντιδράσεις σκεδάσεως και L_{o1} , L_{o2} οι αυτεπαγωγές σκεδάσεως των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αντίστοιχα.

Με βάση την ωφέλιμη ροή καθορίζεται η απαιτούμενη ΜΕΔ F_ϕ , διεγέρσεως για την μαγνήτιση του πυρήνα και το ρεύμα διεγέρσεως.

Όταν ο Μ/Σ λειτουργεί με φορτίο, η μαγνήτιση του πυρήνα προκαλείται από την ταυτόχρονη δράση των ΜΕΔ των δύο τυλιγμάτων του. Οι ΜΕΔ των δύο τυλιγμάτων μαζί προκαλούν σε κάθε στιγμή την απαιτούμενη ΜΕΔ, F_ϕ .

Ισχύει για τις στιγμιαίες τιμές των ΜΕΔ (F_1 , F_2 , F_ϕ) και των ρευμάτων αντίστοιχα: $F_1 + F_2 = F_\phi$:

$$n_1 i_1 - n_2 i_2 = n_1 i_\phi \quad (2.33)$$

όπου $F_1 = n_1 i_1$, $F_2 = (-n_2 i_2)$ και $F_\phi = n_1 i_\phi$.

Η σχέση 2.33 ισχύει και για τις ενεργές τιμές των ρευμάτων.

Πλήρης εικόνα αυτών των ΜΕΔ δίδεται, αν θεωρηθεί ότι το πρωτεύον ρεύμα πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω απαιτήσεις του μαγνητικού κυκλώματος:

- 1) Να αντισταθμίζει την απομαγνητίζουσα επίδραση του δευτερεύοντος ρεύματος.
- 2) Να παράγει την κατάλληλη ΜΕΔ για τη δημιουργία της συνολικής χρήσιμης ροής.

Διαιρώντας τα δύο μέλη της εξίσωσης 2.33 με τον αριθμό σπειρών του πρωτεύοντος n_1 προκύπτει:

$$i_1 - \frac{n_2}{n_1} i_2 = i_\phi \quad \hat{\eta} \quad i_1 = \frac{n_2}{n_1} i_2 + i_\phi$$

$\hat{\eta}$
$$i_1 = i'_2 + i_\phi \quad (2.34)$$

όπου
$$i'_2 = \frac{n_2}{n_1} i_2 \quad (2.35)$$

το ρεύμα αντιδράσεως του Μ/Σ.

Το i'_2 , είναι η συνιστώσα του ρεύματος του πρωτεύοντος, το οποίο αντισταθμίζει τη ΜΕΔ του δευτερεύοντος. Για εναλλασσόμενα ημιτονοειδή μεγέθη η εξίσωση 2.34 γράφεται:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_\phi + \dot{I}'_2 \quad (2.36)$$

όπου:
$$\dot{I}'_2 = \frac{n_2}{n_1} \dot{I}_2.$$

Όταν ο Μ/Σ λειτουργεί με φορτίο στον πυρήνα του επενεργεί και η ΜΕΔ του ρεύματος του δευτερεύοντος. Όμως, η ροή του πυρήνα πρέπει να παρα-

μένει πρακτικά αμετάβλητη, γιατί αυτή η ροή πρέπει να επάγει αντι-ΗΕΔ στο πρωτεύον, η οποία διαφέρει απ' την επιβαλλόμενη τάση κατά την πώση τάσεως στην αντίσταση του πρωτεύοντος.

Όταν ρέει ρεύμα στο δευτερεύον, το πρωτεύον ρεύμα μεταβάλλεται για να αντισταθμίσει την ΜΕΔ του δευτερεύοντος ρεύματος.

2.3.6 Ισοδύναμο κυκλώματα του πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ με φορτίο και διανυσματικά διαγράμματα.

Όταν ένας πραγματικός Μ/Σ τροφοδοτεί με ισχύ ένα φορτίο, τότε τα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη, τα οποία αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία του δίδονται στο **πλήρες** ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.3ιζ. Η τάση \dot{V}_2 , στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος διαφέρει από την τάση \dot{E}_2 κατά την πώση τάσεως στην αντίσταση του δευτερεύοντος R_2 και στην αντίδραση σκεδάσεως του δευτερεύοντος $X_{\sigma 2}$.

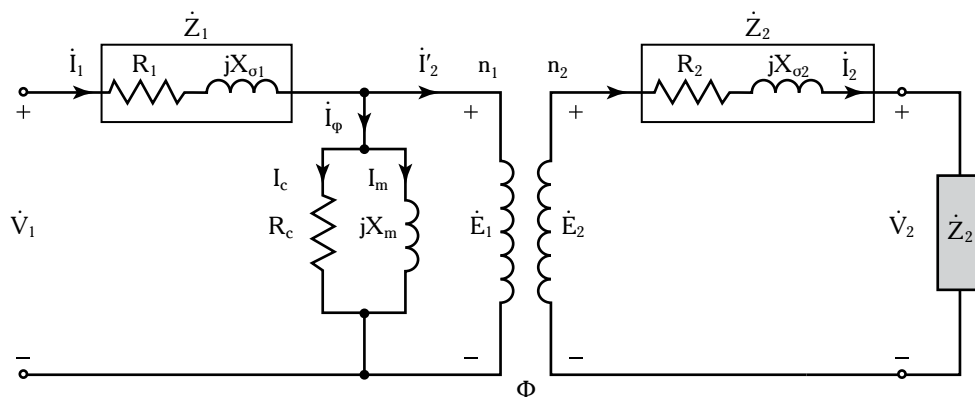
Με αναγωγή όλων των μεγεθών στο πρωτεύον ή στο δευτερεύον, προκύπτουν τα ηλεκτρικά ενιαία **απλοποιημένα** ισοδύναμο κυκλώματα του Μ/Σ με τα στοιχεία του δευτερεύοντος ανηγμένα στο πρωτεύον [σχ. 2.3ιη(α)] και με τα στοιχεία του πρωτεύοντος ανηγμένα στο δευτερεύον [σχ. 2.3ιη(β)] (βλ. παράγρ. 2.3.1).

Η αναγωγή των μεγεθών του δευτερεύοντος στο πρωτεύον [σχ. 2.3ιη(α)] γίνεται χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες ιδιότητες των Μ/Σ:

- 1) Ισοδύναμη τάση του δευτερεύοντος:

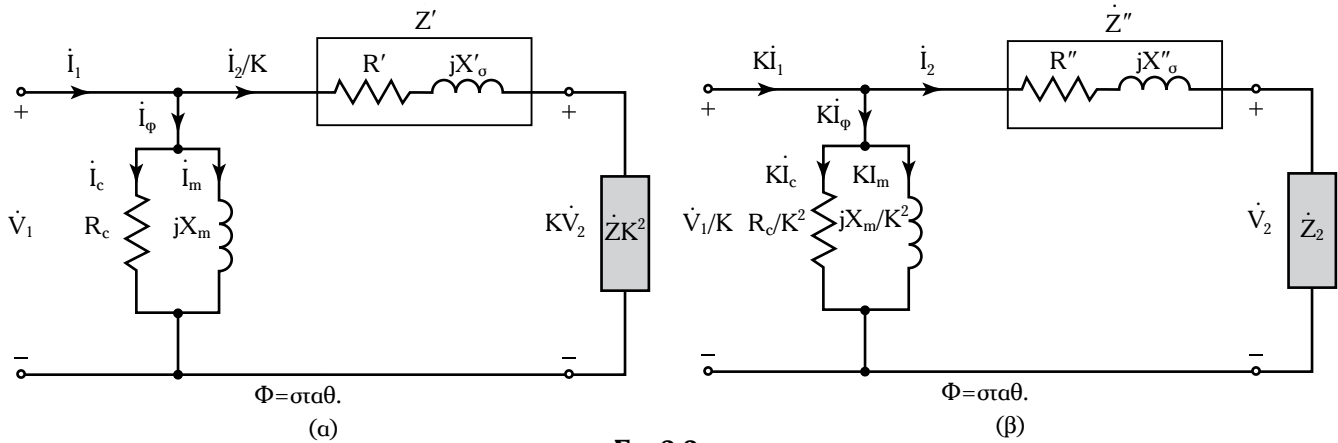
Από τη σχέση $\frac{V_1}{V_2} = K$, προκύπτει $V_1 = KV_2$.

Είναι η τάση V_2 του δευτερεύοντος ανηγμένη στο πρωτεύον.



Σχ. 2.3ιζ

Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ.



Σχ. 2.31m

Ισοδύναμα κυκλώματα μονοφασικού Μ/Σ (α) ανηγμένο στο πρωτεύον και (β) ανηγμένο στο δευτερεύον.

2) Ισοδύναμη ΗΕΔ του δευτερεύοντος:

Από τη σχέση: $\frac{E_1}{E_2} = K$ έχουμε $E_1 = KE_2$.

Είναι η ΗΕΔ του δευτερεύοντος ανηγμένη στο πρωτεύον.

3) Ισοδύναμο ρεύμα του δευτερεύοντος. Από τη σχέση: $\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{K}$ και $I_1 = \frac{I_2}{K}$: είναι το ρεύμα του δευτερεύοντος ανηγμένο στο πρωτεύον.

4) Ισοδύναμη αντίσταση του δευτερεύοντος.

Πολλαπλασιάζοντας την ωμική αντίσταση R_2 με το τετράγωνο του λόγου μετασχηματισμού (K) παίρνουμε την αντίσταση K^2R_2 . Είναι η αντίσταση του δευτερεύοντος ανηγμένη στο πρωτεύον. Η μεταφορά της R_2 στο πρωτεύον πρέπει να τέτοια, ώστε στη νέα θέση στο ισοδύναμο κύκλωμα να καταναλώνει την ίδια ισχύ, την οποία καταναλώνει στη φυσική του θέση. Πράγματι η ισχύς την οποία καταναλώνει η R_2 στη νέα θέση είναι:

$$\left(\frac{I_2}{K}\right)^2 \cdot K^2R_2 = I_2^2R_2.$$

5) Ισοδύναμη αντίδραση σκεδάσεως του δευτερεύοντος.

Πολλαπλασιάζοντας την αντίδραση σκεδάσεως με το τετράγωνο του λόγου μετασχηματισμού παίρνουμε την αντίδραση σκεδάσεως του δευτερεύοντος ανηγμένη στο πρωτεύον: K^2X_{o2} .

6) Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δευτερεύοντος κυκλώματος.

Είναι: $K^2R_2 + jK^2X_{o2} = K^2Z_2$.

Χρησιμοποιώντας, με ανάλογο τρόπο τις ιδιότη-

τες των Μ/Σ παίρνουμε τα μεγέθη του πρωτεύοντος ανηγμένα στο δευτερεύον:

$$\frac{V_1}{K}, \frac{E_1}{K}, KI_1, KI_m, KI_c, I_\phi, \frac{R_1}{K^2}, \frac{X_{o1}}{K^2}, \frac{R_c}{K^2}, \frac{X_m}{K^2}$$

τάση του πρωτεύοντος, ανυ-ΗΕΔ του πρωτεύοντος, ρεύμα του πρωτεύοντος, ρεύμα απωλειών πυρήνα, ρεύμα διεγέρσεως, ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος, αντίδραση σκεδάσεως του πρωτεύοντος, αντίσταση απωλειών πυρήνα και αντίδραση μαγνητίσεως ανηγμένα, αντίστοιχα, στο δευτερεύον.

Αν θεωρήσουμε ότι για το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα του Μ/Σ ισχύει $E_1 = KE_2$ (ίδιες διαφορές δυναμικού), τότε υπάρχουν σημεία στο πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα (σχ. 2.31ζ), τα οποία έχουν ίδια διαφορά δυναμικού οπότε συνδέονται μεταξύ τους χωρίς τη ροή κάποιου ρεύματος. Οπότε προκύπτει ένα ενιαίο (απλοποιημένο) ηλεκτρικό κύκλωμα του Μ/Σ με στοιχεία του δευτερεύοντος ανηγμένα στο πρωτεύον [σχ. 2.31η(α)] και, κατ' ανάλογο τρόπο, το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ με στοιχεία του πρωτεύοντος ανηγμένα στο δευτερεύον [σχ. 2.31η(β)].

Για το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.31η(α), ισχύει:

$$R' = R_1 + K^2R_2 \text{ και } X'_o = X_{o1} + K^2X_{o2}. \quad (2.37)$$

που είναι η συνολική ωμική αντίσταση και η συνολική αντίδραση σκεδάσεως από την πλευρά του δικτύου του Μ/Σ.

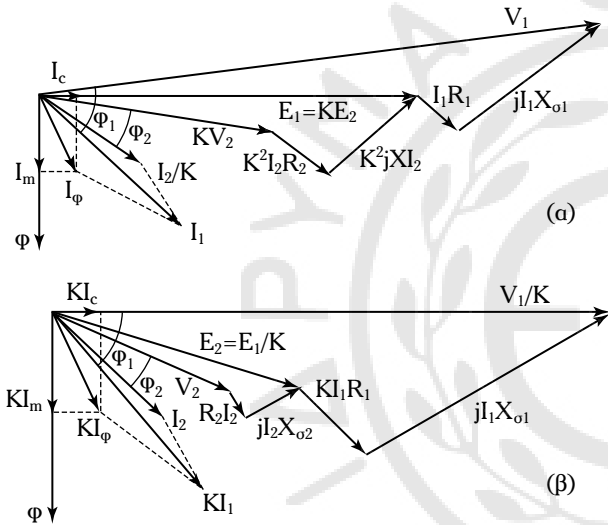
Για το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.31η(β), ισχύει:

$$R'' = \frac{R_1}{K^2} + R_2 \text{ και } X''_o = X_{o1}/K^2 + X_{o2} \quad (2.38)$$

που είναι η συνολική ωμική αντίσταση και η συνολική αντίδραση σκεδάσεως από την πλευρά του φορτίου.

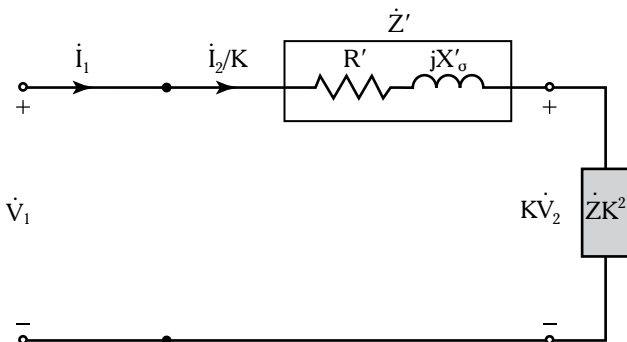
2.3.7 Διανυσματικά διαγράμματα του μονοφασικού Μ/Σ.

Για τα ισοδύναμα κυκλώματα του πραγματικού Μ/Σ [σχ. 2.3ιν(α) και (β)], χαράσσουμε τα διανυσματικά διαγράμματα των σχημάτων 2.3ιθ(α) (με στοιχεία του δευτερεύοντος ανηγμένα στο πρωτεύον) και 2.3ιθ(β) (με στοιχεία του πρωτεύοντος ανηγμένα στο δευτερεύον) αντίστοιχα. Όταν δεν λαμβάνουμε υπόψη τις απώλειες πυρήνα από το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.3ιν(α) προκύπτει το **προσεγγιστικό απλοποιημένο** ισοδύναμο κύκλωμα ανηγμένο στο πρωτεύον (σχ. 2.3κ).



Σχ. 2.3ιθ

(α) Διανυσματικά διαγράμματα του πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ από την πλευρά του δικτύου και (β) διανυσματικό διάγραμμα του πραγματικού Μ/Σ από την πλευρά του φορτίου.



Σχ. 2.3κ

Προσεγγιστικό απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα ανηγμένο στο πρωτεύον.

Τόσο για το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.3ιε(α), όσο και για το προσεγγιστικό απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.3ιν, ισχύει η ακόλουθη εξίσωση τάσεων (Δεύτερος Κανόνας του Kirchhoff):

$$\dot{V}_1 = K\dot{V}_2 + \frac{\dot{I}_2}{K}(R' + jX'_o) = K\dot{V}_2 + \frac{\dot{I}_2}{K}\dot{Z}' \quad (2.39)$$

όπου \dot{Z}' η συνολική σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ ανηγμένη στο πρωτεύον.

Για το κύκλωμα του σχήματος 2.3ιν(β), η αντίστοιχη εξίσωση τάσεων είναι:

$$\frac{\dot{V}_1}{K} = \dot{V}_2 + \dot{I}_2(R'' + jX''_o) = \dot{V}_2 + \dot{I}_2\dot{Z}'' \quad (2.40)$$

όπου \dot{Z}'' η συνολική σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ ανηγμένη στο δευτερεύον.

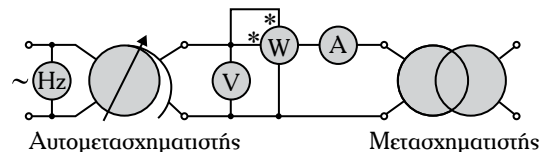
2.4 Πειραματικός προσδιορισμός των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος του πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ.

Τα κυκλωματικά στοιχεία του πλήρους ισοδύναμου κυκλώματος ενός πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ είναι: $R_1, X_{o1}, R_2, X_{o2}, R_c$ και X_m . Ο προσδιορισμός αυτών των στοιχείων γίνεται εκτελώντας δύο δοκιμές (πειράματα) στον Μ/Σ.

2.4.1 Δοκιμή χωρίς φορτίο.

Η δοκιμή χωρίς φορτίο χρησιμεύει, προκειμένου να προσδιοριστούν τα κυκλωματικά στοιχεία του παράλληλου κλάδου (κλάδος διεγέρσεως) του ισοδύναμου κυκλώματος του Μ/Σ (R_c, X_m) και οι απώλειες πυρήνα (P_c). Στο σχήμα 2.4α, δίδεται η πειραματική διάταξη, η οποία χρησιμοποιείται στη δοκιμή χωρίς φορτίο.

Ο Μ/Σ τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και συχνότητα. Οι απώλειες πυρήνα εξαρτώνται



Hz Συχνόμετρο **V** Βολιόμετρο **W** Βατόμετρο
A Αμπερόμετρο

Σχ. 2.4α

Πειραματική διάταξη για τη δοκιμή χωρίς φορτίο ενός πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ.

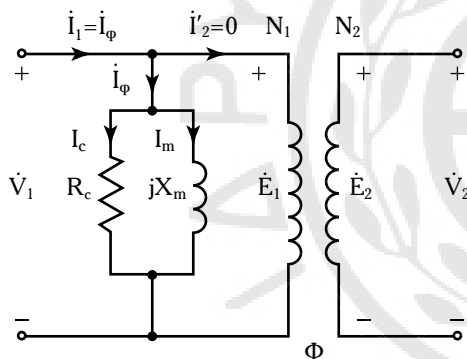
τόσο απ' την τάση τροφοδοσίας, όσο και από τη συχνότητα.

Η τάση τροφοδοσίας του Μ/Σ, στη δοκιμή χωρίς φορτίο, πρέπει να είναι εναλλασσόμενη ημιτονοειδής και ίση με την ονομαστική του τάση.

Η ρύθμιση της τάσεως πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην παραμορφώνεται η ημιτονοειδής κύμασή της. Γι' αυτό χρησιμοποιείται ένας αυτομετασχηματιστής (ΑΜ/Σ) (σχ. 2.4α), με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού. Δεν χρησιμοποιούνται ροοστάτες γιατί πιθανές παραμορφώσεις του ρεύματος μαγνητίσεως θα προκαλέσουν παραμορφώσεις στις πτώσεις τάσεως των ροοστατών, οπότε και στην τάση τροφοδοσίας του Μ/Σ.

Στη δοκιμή χωρίς φορτίο το αμπερόμετρο (σχ. 2.4α), δίδει το ρεύμα διεγέρσεως (I_ϕ), ενώ το βατόμετρο (W) τις απώλειες πυρήνα του Μ/Σ.

Όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η ωμική αντίσταση του τυλίγματος του πρωτεύοντος, το ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο δίδεται στο σχήμα 2.4β.



Σχ. 2.4β

Ισοδύναμο κύκλωμα του πραγματικού Μ/Σ στη δοκιμή χωρίς φορτίο, όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος.

Ο προσδιορισμός των R_c και X_m γίνεται ως εξής:

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.4β, ισχύει:

$$R_c = \frac{V_1}{I_c} \quad (2.41)$$

και

$$X_m = \frac{V_1}{I_m} \quad (2.42)$$

Από το διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 2.3η, έχουμε:

$$I_c = I_\phi \sin \phi_c \quad (2.43)$$

$$I_m = I_\phi \cos \phi_c \quad (2.44)$$

Ο συντελεστής ισχύος του Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο ($\cos \phi_c$) υπολογίζεται από την εξίσωση 2.22, οπότε και η γωνία απωλειών πυρήνα είναι:

$$\phi_c = \cos^{-1} = \frac{P_c}{V_1 I_\phi} \quad (2.45)$$

Ο συνδυασμός των εξισώσεων 2.45, 2.44, 2.43 και 2.42, 2.41 δίδει τις τιμές των R_c και X_m .

Η πραγματική ισχύς (ένδειξη του βατομέτρου), την οποία απορροφά ο Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο καλύπτει τις απώλειες πυρήνα P_c .

2.4.2 Δοκιμή βραχυκυκλώσεως.

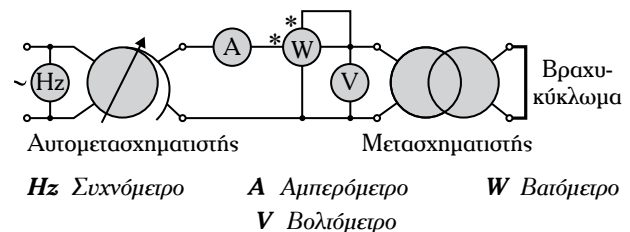
Η δοκιμή βραχυκυκλώσεως χρησιμεύει για τον προσδιορισμό:

- 1) Των απωλειών χαλκού (P_{cu}) των τυλιγμάτων.
- 2) Της τάσεως βραχυκυκλώσεως (και του σχετικού συντελεστή ισχύος), και
- 3) των κυκλωματικών στοιχείων $R' = R_1 + K^2 R_2$ και $X_o' = X_{o1} + K^2 X_{o2}$ του ισοδύναμου κυκλώματος του Μ/Σ, ανηγμένα στο πρωτεύον. Αυτά είναι τα κυκλωματικά στοιχεία του οριζόντιου κλάδου του ισοδύναμου κυκλώματος ενός πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ.

Στο σχήμα 2.4γ, δίδεται η πειραματική διάταξη της λειτουργίας του Μ/Σ σε δοκιμαστικό βραχυκύκλωμα.

Στη διάρκεια του πειράματος βραχυκυκλώσεως το δευτερεύον τυλίγμα βραχυκυκλώνεται, ενώ στο πρωτεύον εφαρμόζεται τάση μικρής τιμής (τάση βραχυκυκλώσεως V_{sc}). Η τάση αυτή ρυθμίζεται, ώστε τα ρεύματα στα τυλίγματα του Μ/Σ να παίρνουν τις ονομαστικές του τιμές.

Διαιρώντας την ένδειξη του βολτομέτρου με την ένδειξη του αμπερομέτρου (σχ. 2.4γ), παίρνομε τη σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ ανηγμένη στο πρωτεύον:



Σχ. 2.4γ

Πειραματική διάταξη του Μ/Σ στη δοκιμή σε βραχυκύκλωμα.

$$\frac{V_{sc}}{I_{sc}} = Z' \quad (2.46)$$

Διαιρώντας την ένδειξη του βατομέτρου με το τετράγωνο της ενδείξεως του αμπερομέτρου παίρνομε την τιμή της συνολικής αντιστάσεως του μετασχηματιστή ανηγμένη στο πρωτεύον:

$$R' = \frac{P_{sc} (P_{cu})}{I_{sc}^2} \quad (2.47)$$

Η συνολική αντίδραση σκεδάσεως X'_o υπολογίζεται από το τρίγωνο των αντιστάσεων (σχ. 2.46).

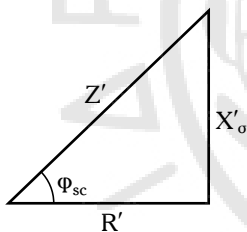
Από το τρίγωνο του σχήματος 2.46, προκύπτει:

$$X'_o = \sqrt{(Z')^2 - (R')^2} \quad (2.48)$$

Η τάση βραχυκυκλώσεως και η ισχύς η οποία απορροφάται απ' τον Μ/Σ στην κατάσταση βραχυκυκλώσεως, συνήθως, εκφράζονται επί τοις εκατό (%):

$$V_{sc} \% = \frac{V_{sc}}{V_{lov}} \cdot 100 \quad \text{και} \quad P_{sc} \% = \frac{P_{sc}}{S_{lov}} \cdot 100$$

όπου: V_{lov} και S_{lov} η ονομαστική τάση του πρωτεύοντος και η ονομαστική ικανότητα, αντίστοιχα, του Μ/Σ.



Σχ. 2.46

Τρίγωνο των αντιστάσεων.

2.5 Διακύμανση τάσεως ή εκατοστιαία πώση τάσεως.

Η διακύμανση τάσεως (Voltage Regulation – VR) βρίσκεται σαν αριθμητική διαφορά μεταξύ της τάσεως εξόδου $V_{2x.φ.}$, στη λειτουργία χωρίς φορτίο, και της τάσεως εξόδου του Μ/Σ στο πλήρες φορτίο $V_{2π.φ.}$.

Η μεταβολή της τάσεως του δευτερεύοντος ΔV_2 όταν ο Μ/Σ «περνάει» από τη λειτουργία χωρίς φορτίο ($V_{2x.φ.}$) στη λειτουργία με πλήρες φορτίο ($V_{2π.φ.}$) δίδεται ως εξής:

$$\Delta V_2 = V_{2x.φ.} - V_{2π.φ.} \quad (2.49)$$

Η τάση εισόδου στον Μ/Σ και η συχνότητα της πηγής τροφοδοσίας του Μ/Σ διατηρούνται σταθερές.

Η ΔV_2 υπολογίζεται από το διάγραμμα του σχήματος 2.5, το οποίο προκύπτει από το προσεγγιστικό απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ, με κυκλωματικά στοιχεία του πρωτεύοντος ανηγμένα στο δευτερεύον.

Από το σχήμα 2.5, έχουμε:

$$\Delta V_2 = V_{2x.φ.} - V_{2π.φ.} = \overline{O\Delta} - \overline{O\Lambda} = \overline{A\Delta} \quad (2.50)$$

Όταν η γωνία δ είναι πολύ μικρή, τότε το τόξο $\Gamma\Delta$ συμπίπτει με την ημιχορδή ΓE , οπότε το τμήμα $E\Delta$ αμελείται.

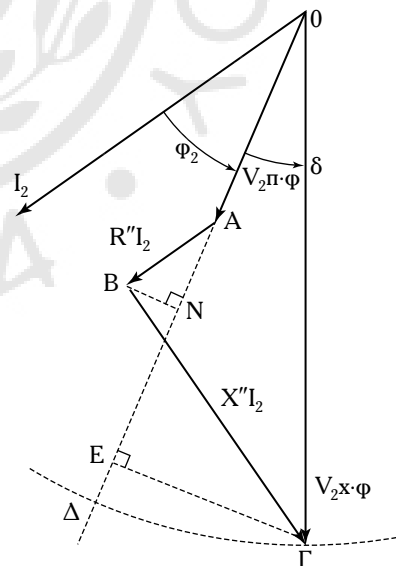
Έχομε:

$$\begin{aligned} \Delta V_2 &\cong \overline{AE} = \overline{AN} + \overline{NE} \cong \\ &\cong I_2 (R'' \cos \phi_2 + X''_o \sin \phi_2) [V]. \end{aligned} \quad (2.51)$$

Συνήθως, η σύγκριση μεταξύ των διαφορών Μ/Σ πραγματοποιείται υπολογίζοντας τη **διακύμανση τάσεως επί τοις εκατό**² ως εξής:

$$VR\% = \frac{V_{2x.φ.} - V_{2π.φ.}}{V_{2π.φ.}} \cdot 100 \quad (2.52)$$

Για τους Μ/Σ, οι οποίοι είναι σωστά κατασκευασμένοι, η διακύμανση τάσεως πρέπει να είναι μικρότερη του 4%.



Σχ. 2.5

Υπολογισμός της ΔV_2 για ωμικο-επαγωγική φόρτιση του Μ/Σ.

² Ο τεχνικός όρος διακύμανση τάσεως επί τοις εκατό συναντάται και με τον όρο εκατοστιαία πώση τάσεως επί τοις εκατό.

2.6 Απώλειες και απόδοση των πραγματικών Μ/Σ – Γενικά.

Οι απώλειες στους πραγματικούς Μ/Σ είναι οι ακόλουθες:

1) Οι απώλειες πυρήνα P_c , οι οποίες περιλαμβάνουν τις απώλειες από μαγνητική υστέρηση (P_h) και τις απώλειες από δινορρεύματα (P_e) και

2) οι απώλειες χαλκού (P_{cu}).

Οι απώλειες πυρήνα P_c δεν εξαρτώνται από το φορτίο αλλά, κυρίως, από την τάση τροφοδοσίας του μετασχηματιστή και γι' αυτό προσδιορίζονται από τη δοκιμή χωρίς φορτίο. Οι συνολικές απώλειες χαλκού, σε έναν πραγματικό μονοφασικό Μ/Σ στη λειτουργία με φορτίο είναι:

$$P_{cu} = RI_1^2 + R_2I_2^2. \quad (2.53)$$

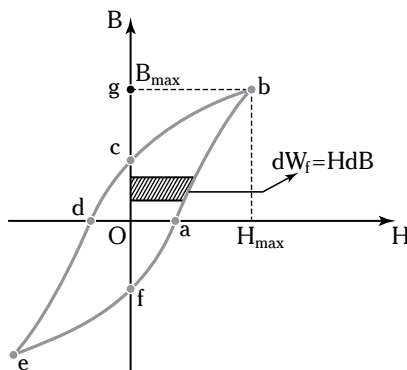
Οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται απ' το φορτίο και προσδιορίζονται, πειραματικά, με τη δοκιμή βραχυκυκλώσεως.

2.6.1 Απώλειες από μαγνητική υστέρηση.

Έστω ένα **σιδηρομαγνητικό υλικό**, το οποίο τοποθετείται στο εσωτερικό ενός πηνίου με n αριθμό σπειρών, στο οποίο κυκλοφορεί εναλλασσόμενο ημιτονοειδές ρεύμα. Όταν μεταβάλλεται η μαγνητική διέγερση H (ανάλογη του ρεύματος), τότε στο σιδηρομαγνητικό υλικό αναπτύσσεται μαγνητική επαγωγή B . Η σχέση μεταξύ μαγνητικής διεγέρσεως και μαγνητικής επαγωγής δίδεται, γραφικά, από τον βρόχο υστερήσεως του σχήματος 2.6α.

Όταν μεταβάλλεται η μαγνητική επαγωγή στο σιδηρομαγνητικό υλικό προκαλείται μεταβολή της μαγνητικής ενέργειας.

Όταν η μαγνητική διέγερση H αυξάνεται από 0 μέχρι μία μέγιστη τιμή, η μαγνητική ενέργεια προ-



Σχ. 2.6α

Απώλειες μαγνητικής υστερήσεως.

σφύεται από την H , και αποθηκεύεται στο υλικό.

Η μαγνητική ενέργεια ανά μονάδα όγκου του υλικού είναι:

$$\int_0^{B_b=B_{max}} HdB = \text{εμβαδόν επιφάνειας } OfabgO. \quad (2.54)$$

Όταν η μαγνητική διέγερση μειώνεται μέχρι την τιμή 0, το dB είναι αρνητικό, οπότε η μαγνητική ενέργεια αποδίδεται από το σιδηρομαγνητικό υλικό στο πηνίο και παίρνει την τιμή:

$$\int_{B_b=B_{max}}^{B_c} HdB = \text{εμβαδόν επιφάνειας } cbg. \quad (2.55)$$

Το εμβαδόν του βρόχου υστερήσεως $abcdefa$, (αποτέλεσμα των μεταβολών του ζεύγους τιμών $B-H$), ισούται με την ενέργεια, ανά μονάδα όγκου του σιδηρομαγνητικού υλικού, η οποία καταναλώνεται (μετατρέπεται σε θερμότητα) κατά τη διάρκεια μίας κυκλικής μεταβολής του πεδίου. Αυτή η ενέργεια αντιπροσωπεύει τις απώλειες από μαγνητική υστέρηση (P_h).

Οι απώλειες από μαγνητική υστέρηση, ανά μονάδα όγκου (U) του υλικού στη συχνότητα f Hz είναι:

$$P_h = w_h U f W \quad (2.56)$$

όπου w_h το εμβαδόν του βρόχου υστερήσεως.

Οι απώλειες από μαγνητική υστέρηση δίδονται και από τον ακόλουθο εμπειρικό τύπο Steinmetz:

$$P_h = K_h f B_{max}^{n^*} \frac{W}{m^3} \quad (2.57)$$

όπου: K_h μια χαρακτηριστική σταθερή του υλικού, B_{max} η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής, n^* ο εκθέτης του Steinmetz (παίρνει τιμές μεταξύ 1,5 και 2,5) και f σε Hz.

Χρησιμοποιώντας εμπλουτισμένα με πυρίτιο σιδηρομαγνητικά υλικά μειώνουμε το εμβαδόν βρόχου υστερήσεως, οπότε και τις απώλειες από μαγνητική υστέρηση.

2.6.2 Απώλειες από δινορρεύματα.

Τα δινορρεύματα οφείλονται στην κυκλοφορία των επαγωγικών ρευμάτων, σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, και προκαλούνται από τη μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή. Στο σχήμα 2.6β, δίδεται ένας σιδηροπυρήνας, στον οποίο η μαγνητική ροή Φ μεταβάλλεται στο χρόνο.

Σύμφωνα με τον Νόμο των Faraday-Neuman-Lenz μια μεταβαλλόμενη στο χρόνο μαγνητική ροή δημιουργεί ΗΕΔ, οπότε και ρεύμα το οποίο κυκλοφορεί

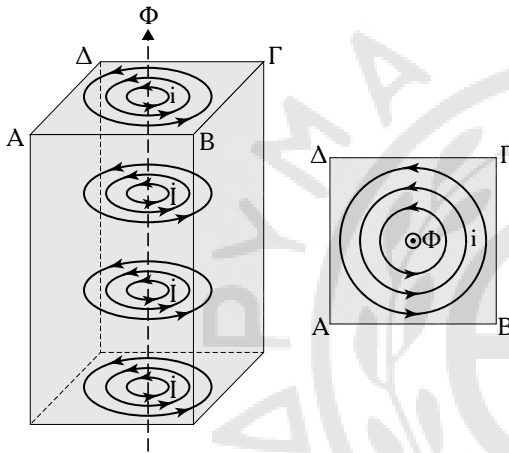
σε επίπεδο κάθετο στην αύξηση της μαγνητικής ροής Φ (σχ. 2.6β). Αυτά είναι τα δινορρεύματα ή ρεύματα Foucault, τα οποία προκαλούν θερμικές απώλειες:

$$P_e = K_e f^2 B_{\max}^2 \quad (2.58)$$

όπου: f η συχνότητα του διανύσματος B , K_e η σταθερή χαρακτηριστική του υλικού και B_{\max} η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής B .

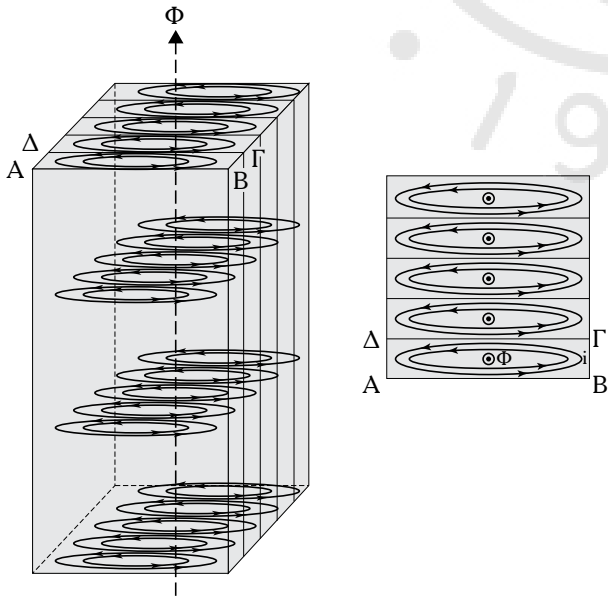
Οι απώλειες από δινορρεύματα ελαχιστοποιούνται ελασματοποιώντας το σιδηρομαγνητικό υλικό.

Η ελασματοποίηση συνίσταται στη δημιουργία, στο μαγνητικό κύκλωμα του σιδηροπυρήνα, τμημάτων (ελάσματα), τα οποία τοποθετούνται παράλληλα στην κατεύθυνση της μαγνητικής ροής (σχ. 2.6γ).



Σχ. 2.6β

Σιδηροπυρήνας με δινορρεύματα.



Σχ. 2.6γ

Ελασματοποίηση του σιδηροπυρήνα.

Κάθε έλασμα είναι μονωμένο με κατάλληλο μονωτικό υλικό. Με αυτόν τον τρόπο η μαγνητική ροή κατανέμεται στα διάφορα ελάσματα, οπότε μειώνεται η επαγόμενη ΗΕΔ σε κάθε έλασμα και αντίστοιχα μειώνονται τα δινορρεύματα, τα οποία υποχρεούνται να κυκλοφορούν σε κυκλώματα μικρής διατομής και μεγάλης αντιστάσεως. Τότε έχουμε συνολική μείωση των απωλειών από δινορρεύματα.

Η σταθερή K_e , στην εξίσωση 2.58, εξαρτάται από την ειδική αντίσταση ρ του υλικού και του πάχους S των ελασμάτων του.

2.6.3 Απόδοση του Μ/Σ.

Η απόδοση του Μ/Σ, σε ποσοστό επί τοις εκατό (%), είναι ο λόγος της ισχύος εξόδου P_{out} (ισχύος στο φορτίο) προς την ισχύ εισόδου P_{in} (την ισχύ που παρέχει η πηγή στον Μ/Σ):

$$\eta\% = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \cdot 100 \quad (2.59)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + \sum P_a} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_c + P_{\text{cu}}} \quad (2.60)$$

όπου $\sum P_a$, είναι οι συνολικές απώλειες ισχύος του Μ/Σ (P_c οι απώλειες πυρήνα και P_{cu} , οι απώλειες χαλκού του Μ/Σ).

Οι απώλειες χαλκού στα δύο τυλίγματα είναι:

$$P_{\text{cu}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = R'' I_2^2 \quad (2.61)$$

όπου R'' η συνολική ωμική αντίσταση του Μ/Σ ανηγμένη στο δευτερεύον και η ισχύς εξόδου είναι:

$$P_{\text{out}} = V_2 I_2 \cos\phi_2 \quad (2.62)$$

όπου $\cos\phi_2$ είναι ο συντελεστής ισχύος του φορτίου, οπότε η εξίσωση 2.60 γράφεται:

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos\phi_2}{V_2 I_2 \cos\phi_2 + P_c + I_2^2 R''} \quad (2.63)$$

Όταν η τάση V_2 και ο συντελεστής ισχύος του φορτίου είναι σταθερά, τότε έχουμε τη μέγιστη απόδοση για:

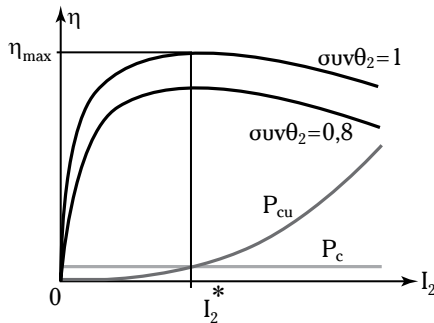
$$\frac{d\eta}{dI_2} = 0. \quad (2.64)$$

Στο σχήμα 2.6δ, δίδεται η μεταβολή της αποδόσεως του Μ/Σ σε συνάρτηση με το ρεύμα φορτίου και τον συντελεστή ισχύος του φορτίου.

Η συνθήκη της μέγιστης αποδόσεως είναι:

$$P_c = I_2^2 R'' \quad (2.65)$$

Η απόδοση του Μ/Σ είναι μέγιστη, όταν οι απώλειες του χαλκού είναι ίσες με τις απώλειες πυρήνα.



Σχ. 2.6δ

Καμπύλες της αποδόσεως και των απωλειών ενός Μ/Σ.

- Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Μονοφασικός Μ/Σ απορροφά από το δίκτυο ρεύμα 0,75 Α όταν τροφοδοτείται με τάση 200 V, 50 Hz, ενώ το δευτερεύον είναι ανοικτό. Ο Μ/Σ απορροφά ισχύ 64 W. Να υπολογίσετε το ρεύμα απωλειών πυρήνα και το ρεύμα μαγνητίσεως.

Λύση.

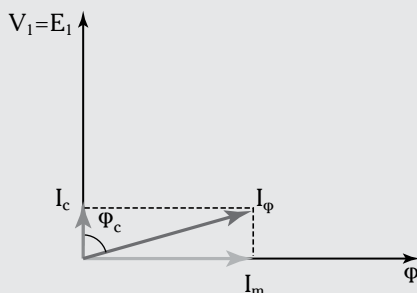
Το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων του Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι αυτό του σχήματος 2.6ε.

Από το διανυσματικό διάγραμμα προκύπτει:

$$I_\phi = \sqrt{I_c^2 + I_m^2}, \quad I_m = I_\phi \eta \mu \phi_c, \quad I_c = I_\phi \sigma \nu \eta \phi_c.$$

Η ισχύς, την οποία απορροφά ο Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι:

$$P_c = E_1 (\equiv V_1) I_\phi \sigma \nu \eta \phi_c \quad \text{και} \quad 64 = 200 \cdot 0,75 \cdot \sigma \nu \eta \phi_c$$



Σχ. 2.6ε

$$\sigma \nu \eta \phi_c = \frac{64}{200 \cdot 0,75} = 0,426.$$

$$\text{Είναι:} \quad \sigma \nu \eta^{-1} 0,426 = 64,78^\circ = \phi_c.$$

Η τιμή του ρεύματος απωλειών πυρήνα είναι:

$$I_c = I_\phi \sigma \nu \eta \phi_c = 0,75 \cdot 0,426 = 0,319 \text{ A.}$$

Η τιμή του ρεύματος μαγνητίσεως είναι:

$$I_m = I_\phi \eta \mu \phi_c = 0,75 \cdot 0,904 = 0,678 \text{ A.}$$

Άσκηση 2.

Το ρεύμα χωρίς φορτίο ενός Μ/Σ είναι 5 Α με συντελεστή ισχύος 0,27 επαγ., ενώ τροφοδοτείται με 235 V, 50 Hz. Ο αριθμός των σπειρών του πρωτεύοντος είναι 200.

Να υπολογίσετε:

- 1) Την μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής.
- 2) Τις απώλειες πυρήνα.
- 3) Το ρεύμα μαγνητίσεως.

Λύση.

Στη λειτουργία χωρίς φορτίο ενός μονοφασικού Μ/Σ ισχύει το διανυσματικό διάγραμμα της ασκήσεως 1, απ' το οποίο προκύπτουν οι σχέσεις μεταξύ του ρεύματος διεγέρσεως, του ρεύματος μαγνητίσεως και του ρεύματος απωλειών πυρήνα. Οπότε ισχύει:

$$I_\phi = \sqrt{I_c^2 + I_m^2}, \quad I_m = I_\phi \eta \mu \phi_c, \quad I_c = I_\phi \sigma \nu \eta \phi_c.$$

Ο Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο απορροφά ισχύ:

$$P_c = V_1 I_\phi \sigma \nu \eta \phi_c.$$

Το ρεύμα διεγέρσεως είναι: $I_\phi = 5 \text{ A}$.

Ο συντελεστής ισχύος είναι (ΣΙ) 0,27 επαγ..

Η τάση πρωτεύοντος είναι $V_1 = 235 \text{ V}$.

Η συχνότητα είναι $f = 50 \text{ Hz}$.

Ο αριθμός των σπειρών του πρωτεύοντος είναι $n_1 = 200$.

1) Μέγιστη ροή:

$$V_1 = E_1 = 4,44 \phi_m f n_1$$

$$\text{είναι:} \quad \phi_m = \frac{235}{4,44 \cdot 200 \cdot 50} = 5,29 \text{ mW.}$$

2) Οι απώλειες πυρήνα είναι:

$$P_c = V_1 I_\phi \cos \varphi_c = 235 \cdot 5 \cdot 0,27 = 317,25 \text{ W.}$$

3) Ρεύμα μαγνητίσεως. Για τον υπολογισμό του ρεύματος μαγνητίσεως (I_m) πρέπει να γνωρίζουμε την τιμή της γωνίας απωλειών πυρήνα (φ_c). Ο συντελεστής ισχύος (ΣI) είναι 0,27 επαγ..

$$\text{Είναι:} \quad \cos^{-1} 0,27 = 74,33^\circ.$$

Οπότε έχομε:

$$I_m = I_\phi \eta \mu \varphi_c = 5 \cdot \eta \mu (74,33^\circ) = 4,81 \text{ A.}$$

Άσκηση 3.

Το πρωτεύον τύλιγμα ενός πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ 50 kVA, 2.200/230 V, 50 Hz, τροφοδοτείται με τάση 230 V, ενώ στο δευτερεύον δεν συνδέεται φορτίο. Για τον έλεγχο της τάσεως, του ρεύματος και της ισχύος χρησιμοποιήθηκαν ένα βολτόμετρο, ένα αμπερόμετρο και ένα βατόμετρο αντίστοιχα, με τις εξής ενδείξεις: $V_1 = 230 \text{ V}$, $I_\phi = 6,5 \text{ A}$ και $P_{\text{ολ}} = 187 \text{ W}$.

Η ωμική αντίσταση του τυλίγματος των 230 V είναι 0,06 Ω.

Να υπολογίσετε:

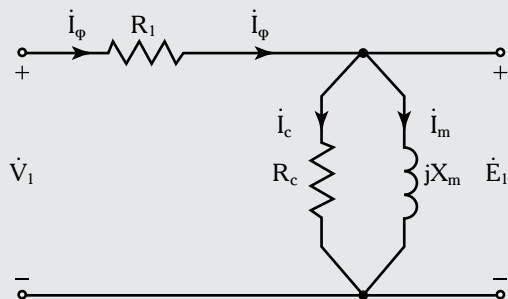
- 1) Τις απώλειες πυρήνα.
- 2) Το ρεύμα μαγνητίσεως.
- 3) Το ρεύμα απωλειών πυρήνα.
- 4) Το ρεύμα διεγέρσεως επί τοις εκατό του ονομαστικού ρεύματος.

Λύση.

Είναι γνωστό (παράγρ. 2.3.3) ότι τα μεγέθη I_ϕ , I_c και I_m συνδέονται με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$I_\phi = \sqrt{I_c^2 + I_m^2}, \quad I_m = I_\phi \eta \mu \varphi_c, \quad I_c = I_\phi \cos \varphi_c.$$

Από τα δεδομένα προκύπτει το ακόλουθο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του Μ/Σ (σχ. 2.6στ):



Σχ. 2.6στ

Από το κύκλωμα, εφαρμόζοντας τον Δεύτερο

Κανόνα του Kirchhoff, προκύπτει η εξίσωση των τάσεων:

$$\dot{V}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_\phi R_1.$$

Το μέτρο του ρεύματος διεγέρσεως είναι:

$$|\dot{i}_\phi| = 6,5 \text{ A.}$$

Η ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος είναι:

$$R_1 = 0,06 \Omega.$$

1) Οι απώλειες χαλκού οι οποίες οφείλονται στο ρεύμα διεγέρσεως είναι: $P_{\text{cu}} = 6,5^2 \cdot 0,06 = 2,5 \text{ W}$. Οι ολικές απώλειες $P_{\text{ολ}} = P_c + P_{\text{cu}}$, οπότε οι απώλειες πυρήνα (P_c) = συνολικές απώλειες ($P_{\text{ολ}}$) – απώλειες χαλκού (P_{cu}) = $187 - 2,5 = 184,5 \text{ W}$.

2) Αν $P_{\text{ολ}}$ η ισχύς την οποία απορροφά ο Μ/Σ, τότε είναι:

$$P_{\text{ολ}} = V_1 I_\phi \cos \varphi_c$$

$$\cos \varphi_c = \frac{P_{\text{ολ}}}{V_1 I_\phi} = \frac{187}{230 \cdot 6,5} = 0,125.$$

Η γωνία απωλειών πυρήνα φ_c είναι:

$$\cos^{-1} 0,125 = 82,81^\circ.$$

$$\text{Είναι:} \quad \eta \mu \varphi_c = \eta \mu (82,81^\circ) = 0,992.$$

Η τιμή του ρεύματος διεγέρσεως είναι:

$$I_m = I_\phi \eta \mu \varphi_c = 6,5 \cdot 0,992 = 6,4 \text{ A.}$$

3) Η τιμή του ρεύματος απωλειών πυρήνα είναι:

$$I_c = I_\phi \cos \varphi_c = 6,5 \cdot 0,125 = 0,8 \text{ A.}$$

4) Το ρεύμα πλήρους φορτίου ($I_{\text{n.φ.}}$) του Μ/Σ είναι: $I_{\text{n.φ.}} = \frac{VA}{V} = \frac{50.000 \text{ VA}}{230 \text{ V}} = 217,4 \text{ A}$.

Το ρεύμα διεγέρσεως επί τοις εκατό του ονομαστικού ρεύματος: $I_{\varphi\%} = \frac{100 \cdot 6,5}{217,4} \cong 3\%$.

Άσκηση 4.

Πραγματικός μονοφασικός Μ/Σ 50 kVA, 2.300/230 V, 60 Hz έχει:

$$R_1 = 4,2 \Omega, \quad X_{\text{oi}} = 5,50 \Omega, \\ R_2 = 0,042 \Omega, \quad X_{\text{o2}} = 0,55 \Omega.$$

Οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στο πρωτεύον

και το δευτερεύον κύκλωμα αντίστοιχα.

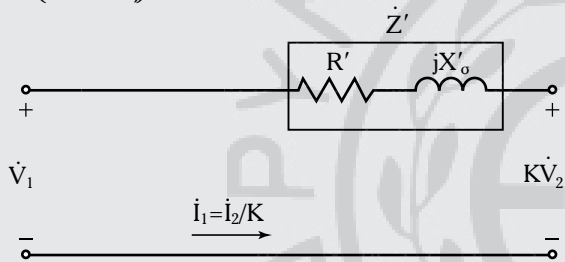
1) Να υπολογίσετε τη συνολική αντίσταση, ανηγμένη στην πλευρά υψηλής τάσεως (YT) και στην πλευρά χαμηλής τάσεως (XT)

2) Θεωρήστε ότι ο Μ/Σ αποδίδει την κανονική του ισχύ σε kVA υπό συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ., σε φορτίο συνδεδεμένο στην πλευρά XT, με τάση 230 V. Να υπολογίσετε την τάση στην πλευρά της YT.

3) Θεωρήστε ότι οι απώλειες πυρήνα είναι 70 W. Να υπολογίσετε την απόδοση του Μ/Σ στην περίπτωση (2).

Λύση.

Από τα δεδομένα προκύπτει ότι δεν δίδονται κυκλωματικά στοιχεία του παράλληλου κλάδου. Το ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ ανηγμένο στην πλευρά της υψηλής τάσεως (YT) είναι το ακόλουθο (σχ. 2.6ζ):

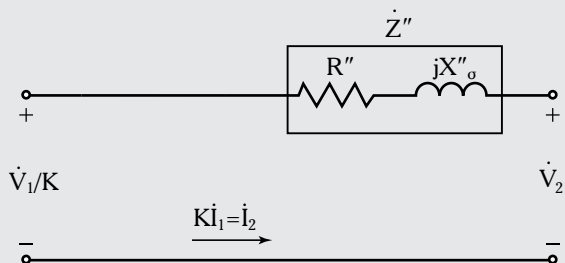


Σχ. 2.6ζ

Εφαρμόζοντας τον Δεύτερο Κανόνα του Kirchhoff, προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση των τάσεων:

$$\dot{V}_1 = K\dot{V}_2 + \frac{\dot{I}_2}{K}(R' + jX'_\sigma).$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ ανηγμένο στην πλευρά της χαμηλής τάσεως (XT) είναι το ακόλουθο (σχ. 2.6η):



Σχ. 2.6η

Η συνολική ωμική αντίσταση και η συνολική αντίδραση σκεδάσεως του Μ/Σ από την πλευρά

της χαμηλής τάσεως (XT), είναι αντίστοιχα:

$$R'' = \frac{R_1}{K^2} + R_2 \quad \text{και} \quad X''_\sigma = \frac{X_{\sigma 1}}{K^2} + X_{\sigma 2}.$$

Ο λόγος μετασχηματισμού είναι:

$$K = \frac{2.300}{230} = 10.$$

1) Αντιστάσεις ανηγμένες στο πρωτεύον (YT).

Σύνθετη αντίσταση ανηγμένη στο πρωτεύον (YT):

$$\dot{Z}' = (R_1 + K^2 R_2) + j(X_{\sigma 1} + K^2 X_{\sigma 2}).$$

Ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος (XT) ανηγμένη στο πρωτεύον (YT):

$$K^2 R_2 = 10^2 \cdot 0,042 = 4,2 \, \Omega.$$

Αντίδραση σκεδάσεως του δευτερεύοντος (XT) ανηγμένη στο πρωτεύον (YT):

$$K^2 X_{\sigma 2} = 10^2 \cdot 0,55 = 55 \, \Omega.$$

Η σύνθετη αντίσταση \dot{Z}' είναι:

$$\begin{aligned} \dot{Z}' &= (4,2 + 4,2) + j(5,50 + 55) \, \Omega \\ &= 8,4 + j60,5 \, \Omega. \end{aligned}$$

Η \dot{Z}' στην πολική μορφή είναι:

$$\dot{Z}' = 61 \angle 82^\circ \, \Omega.$$

Αντιστάσεις ανηγμένες στο δευτερεύον (XT).

Σύνθετη αντίσταση ανηγμένη στο δευτερεύον (XT):

$$\dot{Z}'' = \left(\frac{R_1}{K^2} + R_2 \right) + j \left(\frac{X_{\sigma 1}}{K^2} + X_{\sigma 2} \right).$$

Ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος (YT) ανηγμένη στο δευτερεύον (XT):

$$\frac{R_1}{K^2} = \frac{4,2}{100} = 0,042 \, \Omega.$$

Αντίδραση σκεδάσεως του πρωτεύοντος (YT) ανηγμένη στο δευτερεύον (XT):

$$\frac{X_{\sigma 1}}{K^2} = \frac{5,50}{100} = 0,055 \, \Omega.$$

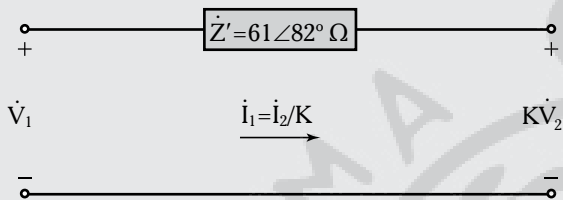
Η σύνθετη αντίσταση \dot{Z}'' είναι:

$$\begin{aligned}\dot{Z}'' &= (0,042 + 0,042) + j(0,055 + 0,55) = \\ &= 0,084 + j0,605 \Omega.\end{aligned}$$

Σε πολική μορφή: $\dot{Z}'' = 0,61 \angle 82,09^\circ \Omega$.

2) Για τον υπολογισμό της τάσεως στην πλευρά της ΥΤ (πρωτεύον του Μ/Σ) χρησιμοποιούμε το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα με στοιχεία του δευτερεύοντος (ΧΤ) ανηγμένα στο πρωτεύον (ΥΤ).

Εφαρμόζοντας τον Δεύτερο Κανόνα του Kirchhoff στο κύκλωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6θ, προκύπτει:



Σχ. 2.6θ

$$\dot{V}_1 = K\dot{V}_2 + \frac{\dot{I}_2}{K} \dot{Z}'. \quad (1)$$

Επειδή η τάση του δευτερεύοντος είναι γνωστή από την εκφώνηση του (2) ερωτήματος μας ενδιαφέρει το μέτρο της, το οποίο είναι 230 V. Οπότε:

$$KV_2 = 10 \cdot 230 = 2.300 \text{ V}.$$

Το ονομαστικό ρεύμα του δευτερεύοντος προκύπτει από τη σχέση της φαινομένης ισχύος του Μ/Σ:

$$P_\phi = V_2 I_2.$$

Είναι:
$$I_2 = \frac{50 \cdot 10^3}{230} = 217,39 \text{ A}.$$

Η γωνία ϕ_2 , η οποία αντιστοιχεί στον συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ. είναι:

$$\cos^{-1} 0,8 = 36,87^\circ.$$

Επειδή ο συντελεστής ισχύος είναι επαγωγικός, τότε το πρόσημο της ϕ_2 στην εξίσωση τάσεων-ρευμάτων είναι αρνητικό.

Το ρεύμα $\frac{\dot{I}_2}{K}$ είναι:
$$\frac{\dot{I}_2}{K} = 21,73 \angle -36,87^\circ \text{ A}.$$

Η εξίσωση 1 γίνεται:

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= 2.300 \angle 0^\circ + 21,73 \angle -36,86^\circ \cdot 61 \angle 82^\circ = \\ &= 2.300 + 1.325,53 \angle 45,13^\circ \text{ V} = \\ &= 2.300 + 1.325,53 (\cos 45,13 + j \sin 45,13) = \\ &= 2.300 + 935,16 + j939,415 = \\ &= 3.235,16 + j939,415 \approx 3.369 \angle 16,17^\circ \text{ V}.\end{aligned}$$

3) Η απόδοση του Μ/Σ δίδεται:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}.$$

$$P_{\text{out}} = kVA_{\text{συν}\phi_2} = 50 \cdot 0,8 = 40 \text{ kW}.$$

Οι απώλειες πυρήνα:

$$P_c = 0,07 \text{ kW}.$$

Οι απώλειες χαλκού:

$$P_{\text{cu}} = I_2^2 R'' = (217,39)^2 \cdot 0,084 = 3,97 \text{ kW}.$$

Η ισχύς εισόδου: $P_{\text{in}} = P_{\text{out}} + P_{\text{cu}} + P_c = 44,04 \text{ kW}.$

Η απόδοση:
$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \cdot 100 = \frac{40}{44,04} \cdot 100 = 90,82\%.$$

Άσκηση 5.

Σε πραγματικό μονοφασικό Μ/Σ 1.100/220 V, έγιναν οι παρακάτω δοκιμές με τις αντίστοιχες ενδείξεις των οργάνων:

	V	A	W
Δοκιμή χωρίς φορτίο	1.100	0,5	55
Δοκιμή σε βραχυκύκλωμα	10	80	400

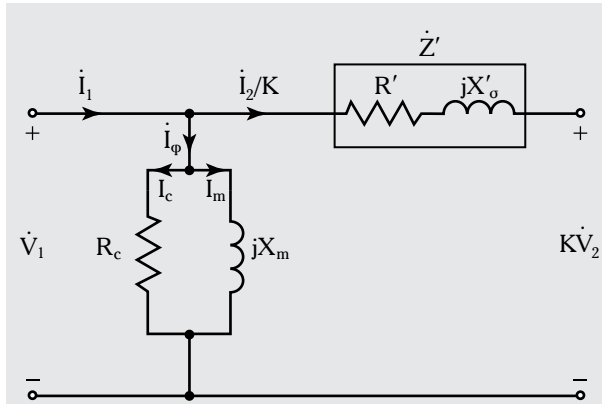
Να σχεδιάσετε το ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ με στοιχεία του δευτερεύοντος ανηγμένα στο πρωτεύον.

Να υπολογίσετε:

- 1) Την πώση τάσεως στον Μ/Σ, και
- 2) την απόδοση του Μ/Σ όταν τροφοδοτεί φορτίο με ρεύμα 100 A και με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ..

Λύση.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ, το οποίο αντιστοιχεί στις δοκιμές είναι το ακόλουθο (σχ. 2.6ι).



Σχ. 2.61

Οι τιμές των κυκλωματικών στοιχείων του ισοδύναμου κυκλώματος καθορίζονται από τις δοκιμές χωρίς φορτίο και σε βραχυκύκλωση.

Ειδικότερα:

1) **Δοκιμή χωρίς φορτίο.**

Στη λειτουργία χωρίς φορτίο ισχύει:

$$I_{\phi} = \sqrt{I_c^2 + I_m^2}, \quad P_c = V_1 I_{\phi} \cos \varphi_c.$$

Είναι: $P_{oc} \equiv P_c = V_1 I_{\phi} \cos \varphi_c$

όπου P_{oc} η ισχύς που απορροφά ο Μ/Σ στη λειτουργία χωρίς φορτίο

και $\cos \varphi_c = \frac{P_c}{V_1 I_{\phi}} = \frac{55}{1.100 \cdot 0,5} = 0,1.$

Το ρεύμα απωλειών πυρήνα είναι:

$$I_c = I_{\phi} \cos \varphi_c = 0,5 \cdot 0,1 = 0,05 \text{ A.}$$

Η γωνία απωλειών πυρήνα φ_c , είναι:

$$\cos^{-1} 0,1 = 84,26^\circ = \varphi_c.$$

Το ρεύμα μαγνητίσεως είναι:

$$I_m = I_{\phi} \sin \varphi_c = 0,5 \cdot 0,995 = 0,497 \text{ A.}$$

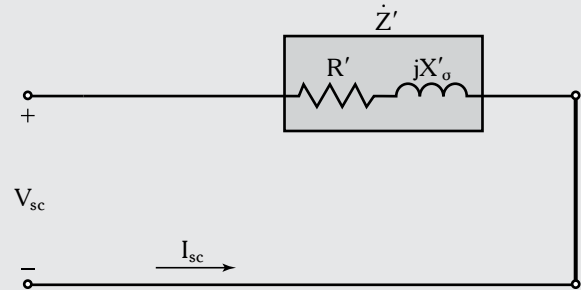
Από το ισοδύναμο κύκλωμα η αντίσταση απωλειών πυρήνα είναι:

$$R_c = \frac{V_1}{I_c} = \frac{1.100}{0,05} = 22 \text{ k}\Omega.$$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα η αντίδραση μαγνητίσεως είναι:

$$X_m = \frac{V_1}{I_m} = \frac{1.100}{0,497} = 2,21 \text{ k}\Omega.$$

2) **Δοκιμή σε βραχυκύκλωση.** Το ισοδύναμο κύκλωμα στη δοκιμή σε βραχυκύκλωση είναι το ακόλουθο (σχ. 2.61α):



Σχ. 2.61α

V_{sc} : Τάση τροφοδοσίας του Μ/Σ στην κατάσταση βραχυκύκλωσης. I_{sc} : ρεύμα το οποίο κυκλοφορεί στα τυλίγματα του Μ/Σ στην κατάσταση βραχυκύκλωσης.

Από το κύκλωμα η τάση βραχυκύκλωσης είναι:

$$V_{sc} = I_{sc} |Z'|.$$

Η ισχύς P_{sc} , την οποία απορροφά ο Μ/Σ στην κατάσταση βραχυκύκλωσης αντιπροσωπεύει τις απώλειες χαλκού του Μ/Σ:

$$P_{sc} = P_{cu} = I_{sc}^2 \cdot R' = 400 \text{ W.}$$

Στη δοκιμή σε βραχυκύκλωση το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι: $I_{sc} = 80 \text{ A.}$

Η ωμική αντίσταση ανηγμένη στο πρωτεύον είναι:

$$R' = \frac{P_{cu}}{I_{sc}^2} = \frac{400}{80^2} = 0,062 \text{ }\Omega.$$

Η σύνθετη αντίσταση ανηγμένη στο πρωτεύον είναι:

$$Z' = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{10}{80} = 0,125 \text{ }\Omega.$$

Απ' το τρίγωνο των αντιτάσεων (σχ. 2.4δ) έχουμε:

$$\begin{aligned} X'_o &= \sqrt{(Z')^2 - (R')^2} = \\ &= \sqrt{(0,125)^2 - (0,062)^2} = 0,108 \text{ }\Omega. \end{aligned}$$

Για τον υπολογισμό της πώσεως τάσεως, ΔV , του Μ/Σ απαιτείται ο υπολογισμός των R'' και X''_o . Η ισοδύναμη ωμική αντίσταση ανηγμένη στο δευτερεύον είναι:

$$R'' = \frac{R'}{K^2} = \frac{0,062}{(1.100/220)^2} = 0,00248 \text{ }\Omega.$$

Η ισοδύναμη αντίσταση σκεδάσεως ανηγμένη στο δευτερεύον είναι:

$$X_o'' = \frac{X_o'}{K^2} = \frac{0,108}{(1.100/220)^2} = 0,00432 \Omega.$$

1) Η πώση τάσεως στον Μ/Σ δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta V = I_2 R'' \cos \phi_2 + I_2 X_o'' \sin \phi_2 = 4,577 \text{ V}.$$

Είναι: $I_2 = 100 \text{ A}$, $\cos \phi_2 = 0,8$, $\sin \phi_2 = 0,6$.

2) Η ισχύς εξόδου είναι:

$$P_{\text{out}} = V_2 I_2 \cos \phi_2 = 220 \cdot 100 \cdot 0,8 = 17,6 \text{ kW}.$$

Οι απώλειες χαλκού στη δοκιμή σε βραχυκύκλωση είναι 400 W όταν το ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι 80 A. Όταν το ρεύμα φορτίου είναι 100 A, τότε οι **απώλειες χαλκού**³ δίδονται από τη σχέση:

$$P_{\text{cu}} = \text{απώλειες χαλκού (στα 100 A)} = 400 \left(\frac{I_2}{I_{\text{sc}}} \right)^2 = 400 \left(\frac{100}{80} \right)^2 = 625 \text{ W} = 0,625 \text{ kW}.$$

Οι απώλειες πυρήνα δεν επηρεάζονται απ' τη μεταβολή του ρεύματος φορτίου του Μ/Σ. Οι απώλειες πυρήνα είναι εκείνες της δοκιμής χωρίς φορτίο: $P_c = 55 \text{ W} = 0,055 \text{ kW}$.

Η ισχύς στην είσοδο του Μ/Σ είναι:

$$P_{\text{in}} = P_{\text{out}} + P_{\text{cu}} + P_c = 17,6 + 0,625 + 0,055 = 18,28 \text{ kW}.$$

Η απόδοση του Μ/Σ είναι:

$$\eta = \frac{17,6}{18,28} \cdot 100 = 96,28\%.$$

Άσκηση 6.

Δίδεται πραγματικός μονοφασικός Μ/Σ 20 kVA, 2.500/500 V, ο οποίος έχει:

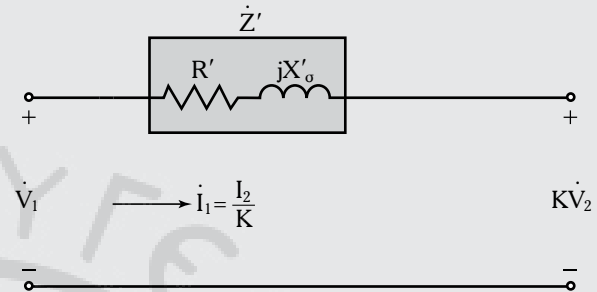
$$R_1 = 5 \Omega, X_{o1} = 8 \Omega, R_2 = 0,20 \Omega, X_{o2} = 0,4 \Omega.$$

Ο Μ/Σ παρέχει τα ονομαστικά kVA και το ονο-

μαστικό ρεύμα σε φορτίο με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ.. Να υπολογίσετε την τάση στο φορτίο, όταν ο Μ/Σ τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση.

Λύση.

Χρησιμοποιούμε το ακόλουθο ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ του σχήματος 2.6ιβ με στοιχεία του δευτερεύοντος ανηγμένα στο πρωτεύον.



Σχ. 2.6ιβ

Έχομε:

$$K = \frac{2.500}{500} = 5, R' = R_1 + K^2 R_2 = 5 + 5^2 \cdot 0,20 = 10 \Omega$$

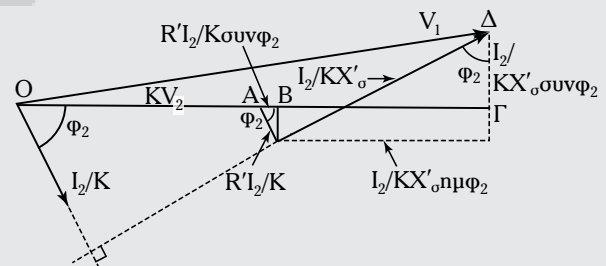
$$X_o' = X_{o1} + K^2 X_{o2} = 8 + 5^2 \cdot 0,4 = 18 \Omega$$

$$\cos^{-1} 0,8 = 36,87^\circ = \phi_2.$$

Εφαρμόζοντας τον Δεύτερο Κανόνα του Kirchhoff στο κύκλωμα προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση τάσεων:

$$\dot{V}_1 = K \dot{V}_2 + \frac{\dot{I}_2}{K} (R' + jX_o').$$

Σ' αυτήν την εξίσωση τάσεων αντιστοιχεί το ακόλουθο διανυσματικό διάγραμμα (σχ. 2.6ιγ):



Σχ. 2.6ιγ

³ Ισχύει: $P_{\text{cu}}^{(\text{sc})} = I_{\text{sc}}^2 \cdot R'' = 400 \text{ W}$ (1). Οι απώλειες χαλκού $P_{\text{cu}}^{(100)}$ στα 100 A είναι: $P_{\text{cu}}^{(100)} = I_2^2 \cdot R'' =$; (2).

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις 1 και 2 προκύπτει: $P_{\text{cu}}^{(100)} = 625 \text{ W}$.

Το ονομαστικό ρεύμα είναι $I_2 \frac{20.000}{500} = 40 \text{ A}$.

Από το διάγραμμα έχομε, εφαρμόζοντας το Πυθαγόρειο Θεώρημα στο τρίγωνο ΟΓΔ:

$$V_1^2 = \left(KV_2 + R' \frac{I_2}{K} \cos\phi_2 + X'_o \frac{I_2}{K} \sin\phi_2 \right)^2 + \left(\frac{I_2}{K} X'_o \cos\phi_2 \right)^2$$

$$\text{ή } 6.250.000 = 25V_2^2 + 725V_2 + 35.891,2$$

$$\text{ή } V_2^2 + 29V_2 - 248.564,352 = 0.$$

Λύνοντας την δευτεροβάθμια εξίσωση βρίσκομε: $V_2 = 484,27 \text{ V}$.

Άσκηση 7.

Δίδεται πραγματικός μονοφασικός Μ/Σ 400/230 V, ο οποίος απορροφά από το δίκτυο 1,5 A με συντελεστή ισχύος 0,3, όταν λειτουργεί χωρίς φορτίο.

Ο Μ/Σ παρέχει ρεύμα 45 A σε φορτίο με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ.. Να υπολογίσετε το ρεύμα, το οποίο απορροφά ο Μ/Σ από το δίκτυο και τον αντίστοιχο συντελεστή ισχύος.

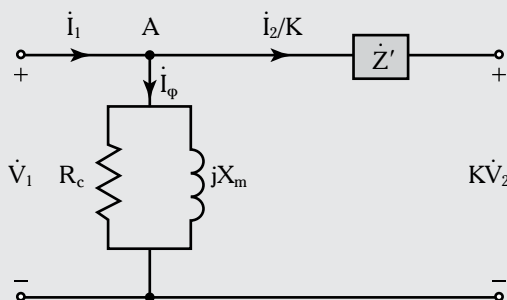
Λύση.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6ιδ.

$$\text{Έχομε: } K = \frac{400}{230} = 1,7, \quad I_\phi = 1,5 \text{ A}$$

$$\cos\phi_c = 0,3, \quad I_2 = 45 \text{ A}, \quad \cos\phi_2 = 0,8.$$

Εφαρμόζοντας τον Πρώτο Κανόνα του Kirchhoff, στον κόμβο Α προκύπτει:



Σχ. 2.6ιδ

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_\phi + \frac{\dot{I}_2}{K} = 1,5 \angle -72,54^\circ + \frac{45}{1,7} \angle -36,87^\circ$$

$$\begin{aligned} \text{ή } \dot{I}_1 &= 1,5 \angle -72,54^\circ + 26,47 \angle -36,87^\circ = \\ &= 1,5[\cos(-72,54^\circ) + j\sin(-72,54^\circ)] + \\ &+ 26,47[\cos(-36,87^\circ) + j\sin(-36,87^\circ)] = \\ &= (0,45 - j1,43) + (21,17 - j15,88) = \\ &= 21,62 - j17,31 \text{ A.} \end{aligned}$$

Στην πολική μορφή το ρεύμα είναι:

$$\dot{I}_1 = 27,96 \angle -38,65^\circ \text{ A.}$$

Ο συντελεστής ισχύος είναι:

$$\cos(-38,65^\circ) = 0,78 \text{ επαγ..}$$

Άσκηση 8.

Πραγματικός μονοφασικός Μ/Σ έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

$$100 \text{ kVA}, \quad E_1 = 1.000 \text{ V}, \quad I_1 = 105 \text{ A}, \quad K = 4$$

$$f = 50 \text{ Hz}, \quad V_{sc}\% = 5\%, \quad \cos\phi_{sc} = 0,40$$

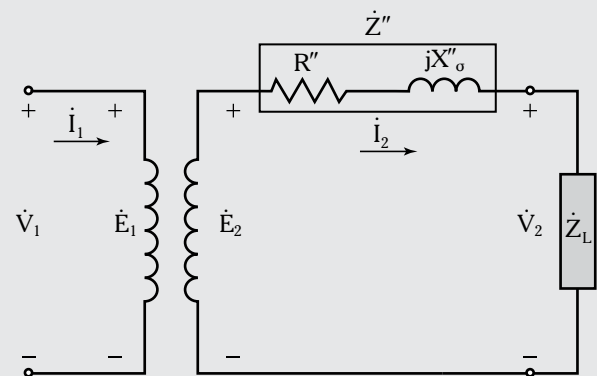
Αμελώντας τον κλάδο διεγέρσεως, να υπολογίσετε την τάση στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος, όταν ο Μ/Σ τροφοδοτεί φορτίο $0,4 + j0,3 \Omega$.

Λύση.

Θεωρούμε το ακόλουθο ισοδύναμο κύκλωμα του πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ σύμφωνα με τα δεδομένα (σχ. 2.6ιε).

Ισχύουν οι ιδιότητες των Μ/Σ:

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = K \quad \text{και} \quad \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \frac{1}{K}$$



Σχ. 2.6ιε

Το μέτρο της τάσεως \dot{E}_2 είναι:

$$|\dot{E}_2| = \frac{|\dot{E}_1|}{K} = \frac{1.000}{4} = 250 \text{ V.}$$

Το μέτρο του ρεύματος \dot{I}_2 είναι:

$$|\dot{I}_2| = |\dot{I}_1| K = 4 \cdot 105 = 420 \text{ A.}$$

Η τιμή της τάσεως βραχυκυκλώσεως δίδεται ως εξής:

$$V_{sc} = 5\% \cdot E_2 = 0,05 \cdot 250 = 12,5 \text{ V.}$$

Η συνολική σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ από την πλευρά του φορτίου (δευτερεύοντος) είναι:

$$\dot{Z}'' = R'' + jX''_o.$$

Από το πείραμα σε βραχυκύκλωση προκύπτει η τιμή της $|\dot{Z}''|$:

$$|\dot{Z}''| = \frac{V_{sc}}{|\dot{I}_2|} = \frac{12,5}{420} = 0,0298 \Omega.$$

Χρησιμοποιώντας το τρίγωνο των αντιστάσεων (σχ. 2.4δ) υπολογίζουμε τις τιμές των κυκλωματικών στοιχείων στο R'' και X''_o . Έχουμε:

$$R'' = Z'' \cos \varphi_{sc} = 0,0298 \cdot 0,40 = 0,0119 \Omega \quad (1)$$

$$X''_o = Z'' \sin \varphi_{sc} = 0,0298 \cdot 0,916 = 0,0273 \Omega. \quad (2)$$

Η τάση \dot{V}_2 με την οποία τροφοδοτείται το φορτίο \dot{Z}_L είναι: $\dot{V}_2 = \dot{I}_2 \dot{Z}_L$, όπου \dot{Z}_L η σύνθετη αντίσταση του φορτίου στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος.

Το ρεύμα, το οποίο απορροφά το φορτίο από το ισοδύναμο κύκλωμα είναι:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}'' + \dot{Z}_L} \dot{Z}_L.$$

Από τις εξισώσεις 1 και 2 έχουμε:

$$\dot{Z}'' = 0,00119 + j0,0273 \Omega.$$

Η τάση \dot{V}_2 την οποία απορροφά το φορτίο είναι:

$$\dot{V}_2 = \frac{250}{(0,0119 + j0,0273) + (0,4 + j0,3)} \cdot (0,4 + j0,3) \text{ V}$$

$$\dot{V}_2 = 157,430 \angle -1,59^\circ \text{ V.}$$

Άσκηση 9.

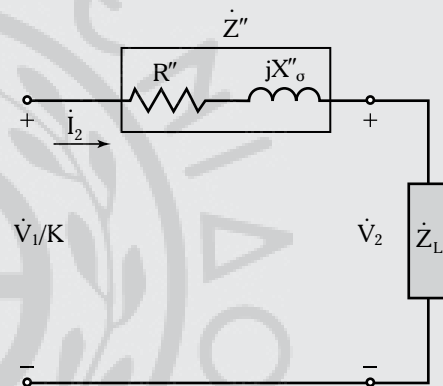
Πραγματικός Μ/Σ, 10 kVA, 400/230 V, 50 Hz, τροφοδοτείται από δίκτυο τάσεως 400 V. Ο Μ/Σ τροφοδοτεί φορτίο το οποίο απορροφά ρεύμα 30 A, με συντελεστή ισχύος $\cos \varphi_L = 0,8$ επαγ.. Από τη δοκιμή σε βραχυκύκλωση του Μ/Σ προέκυψε:

$$V_{sc}\% = 6\%, P_{sc} = 3\%.$$

Να υπολογίσετε την τάση στους ακροδέκτες του φορτίου και την πραγματική ισχύ την οποία απορροφά το φορτίο.

Λύση.

Χρησιμοποιείται απλοποιημένο κύκλωμα του Μ/Σ με στοιχεία του πρωτεύοντος ανηγμένο στο δευτερεύον (σχ. 2.6ιστ).



Σχ. 2.6ιστ

Προσδιορισμός των R'' και X''_o .

Το ονομαστικό ρεύμα I_{2ov} του δευτερεύοντος είναι: $I_{2ov} = \frac{10 \cdot 10^3}{230} \cong 43,48 \text{ A}$

όπου \dot{Z}_L είναι η σύνθετη αντίσταση του φορτίου, το οποίο συνδέεται στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος του Μ/Σ.

Στη συνέχεια προσδιορίζουμε τα κυκλωματικά στοιχεία R'' και X''_o για τα ονομαστικά στοιχεία του Μ/Σ.

Οι απώλειες χαλκού P_{sc} είναι:

$$P_{sc} = \frac{3}{100} \cdot 10.000 = 300 \text{ W.}$$

Ισχύει: $P_{sc} = I_{2ov}^2 R''$ και

$$R'' = \frac{P_{sc}}{I_{2ov}^2} = \frac{300}{(43,48)^2} = 0,159 \Omega.$$

Η τάση βραχυκυκλώσεως είναι:

$$V_{sc} = 6\% \cdot \frac{V_1}{K} = 0,06 \cdot 235,29 = 14,11 \text{ V.}$$

Είναι: $Z'' = \frac{V_{sc}}{I_{2ov}} = \frac{14,11}{43} = 0,324 \Omega$

και: $X''_o = \sqrt{(0,324)^2 - (0,159)^2} = 0,282 \Omega.$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα, έχουμε:

$$\dot{V}_2 = \frac{\dot{V}_1}{K} - \dot{I}_2 (R'' + jX''_o)$$

$$\dot{V}_2 = \frac{400}{400} - 30 \angle -36,87^\circ \cdot (0,159 + j0,282) = \frac{230}{230}$$

$$= 230 - 30 \angle -36,87^\circ \cdot 0,324 \angle 60,58^\circ =$$

$$= 230 - 9,72 \angle 23,71^\circ \text{ V} = 226,43 \angle -0,98^\circ \text{ V.}$$

Η πραγματική ισχύς, την οποία απορροφά το φορτίο είναι:

$$P_L = V_2 I_2 \cos \phi_L = 226,43 \cdot 30 \cdot 0,8 \approx 5,434 \text{ kW.}$$

Άσκηση 10.

Η μέγιστη απόδοση ενός Μ/Σ 100 kVA, 6.600/250 V, 50 Hz, όταν λειτουργεί στο $\frac{1}{2}$ του πλήρους φορτίου (π.φ.) είναι 98% με συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα. Να υπολογίσετε την απόδοση στο πλήρες φορτίο με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ..

Λύση.

$$P^* \equiv P_{out_{\frac{1}{2}}} \text{ πλήρους φορτίου} = \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 1 = 50 \text{ kW}$$

$$\eta_{\frac{1}{2}} \text{ πλήρους φορτίου} = 0,98$$

Ισχύς εισόδου:

$$P_{in}^* = \frac{P^*}{\eta} = \frac{50}{0,98} = 51,02 \text{ kW.}$$

Οι συνολικές απώλειες, $P_{\alpha\lambda}$ είναι:

$$P_{\alpha\lambda} = P_{in}^* - P^* = 51,02 - 50 = 1,02 \text{ kW.}$$

Στη μέγιστη απόδοση:

$$P_{cu} = P_c = \frac{1,02}{2} = 0,51 \text{ kW.}$$

Στο πλήρες φορτίο και με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ. ισχύει:

$$P_{out} = 100 \cdot 0,8 = 80 \text{ kW.}$$

Οι απώλειες πυρήνα είναι: $P_c = 0,51 \text{ kW}$ γιατί είναι ανεξάρτητη απ' την φόρτιση του Μ/Σ. Οι απώλειες χαλκού, P_{cu} , στο πλήρες φορτίο είναι:

$$P_{cu_{n.\phi.}} = 2^2 \cdot P_{\frac{1}{2}} \text{ πλήρους φορτίου} = 2,04 \text{ kW}$$

$$P_{in} = 80 + 0,51 + 2,04 = 82,55 \text{ kW}$$

και η απόδοση στο πλήρες φορτίο είναι:

$$\eta_{n.\phi.} = \frac{80}{82,55} \cdot 100 = 96,91 \text{ \%}.$$

Άσκηση 11.

Πραγματικός μονοφασικός Μ/Σ 25 kVA, 3.300/230 V έχει απώλειες χαλκού και απώλειες πυρήνα στο πλήρες φορτίο 400 W και 350 W αντίστοιχα. Να υπολογίσετε:

1) Την απόδοση του Μ/Σ στο μισό του πλήρους φορτίου και για $\Sigma I = 0,8$ επαγ..

2) Τα kVA στα οποία ο Μ/Σ έχει την μέγιστη απόδοση.

Λύση.

1) Ισχύς εξόδου στο μισό του πλήρους φορτίου και με $\Sigma I = 0,8$ επαγ.:

$$P_{out}^{(\frac{1}{2}n.\phi.)} = \frac{25}{2} \times 0,8 = 10 \text{ W}$$

$$P_c = 350 \text{ W}$$

$$P_{cu}^{(\frac{1}{2}n.\phi.)} = 400 \left(\frac{1}{2} \right)^2 = 100 \text{ W}$$

$$P_{cu_{n.\phi.}} = 400 \text{ W}$$

$$P_{in}^{(\frac{1}{2}n.\phi.)} = 10 + \frac{350 + 100}{1.000} = 10,45 \text{ kW}$$

$$\eta_{(\frac{1}{2}n.\phi.)} = \frac{10}{10,45} \times 100 = 95,7\%.$$

2) Κατάσταση μέγιστης αποδόσεως:

$$P_{cu}^{(max)} = P_c^{(max)}.$$

Οι απώλειες πυρήνα είναι σταθερές, οπότε:

$$P_c^{(\max)} = 350 \text{ W.}$$

Οι απώλειες χαλκού στη μέγιστη απόδοση είναι: $P_{cu}^{(\max)} = 350 \text{ W.}$

Οι απώλειες χαλκού στο πλήρες φορτίο είναι:

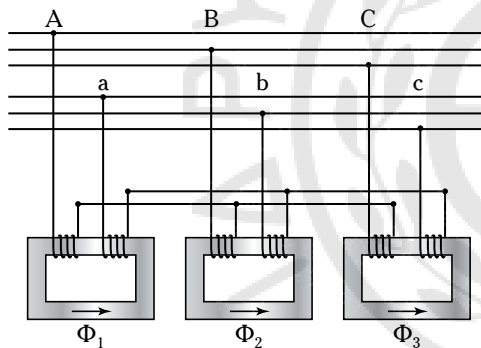
$$P_{cu \text{ πλήρες φορτίο}} = 400 \text{ W.}$$

Τα kVA στη μέγιστη απόδοση είναι:

$$\sqrt{\frac{350}{400}} \cdot 25 = \frac{18,7}{20} \cdot 25 = 23,375 \text{ kVA.}$$

2.7 Τριφασικός Μ/Σ.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ δύο τριφασικών δικτύων, διαφορετικής τάσεως πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας έναν τριφασικό Μ/Σ ή τρεις μονοφασικούς Μ/Σ (σχ. 2.7α).



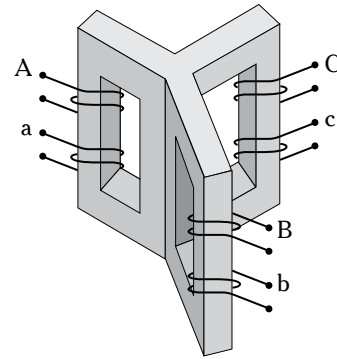
Σχ. 2.7α

Σύστημα τριων μονοφασικών Μ/Σ.

Η χρήση τριων μονοφασικών Μ/Σ σε σχέση με τη χρήση ενός τριφασικού Μ/Σ έχει το πλεονέκτημα ότι εξασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία και μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ισχύος, αλλά παρουσιάζει το μειονέκτημα του μεγάλου βάρους του σιδηρομαγνητικού υλικού, το οποίο απαιτείται για τη διαμόρφωση του πυρήνα.

Αντί της συνδέσεως τριων ανεξαρτήτων μονοφασικών Μ/Σ για την κατασκευή τριφασικού Μ/Σ χρησιμοποιείται ένα κοινό μαγνητικό κύκλωμα, στο οποίο τοποθετούνται έξι τυλίγματα (σχ. 2.7β).

Αυτός ο τριφασικός Μ/Σ χρησιμοποιείται, συνήθως, στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων γιατί έχει μικρότερο βάρος και όγκο και λειτουργεί με, σχετική, μεγαλύτερη απόδοση.



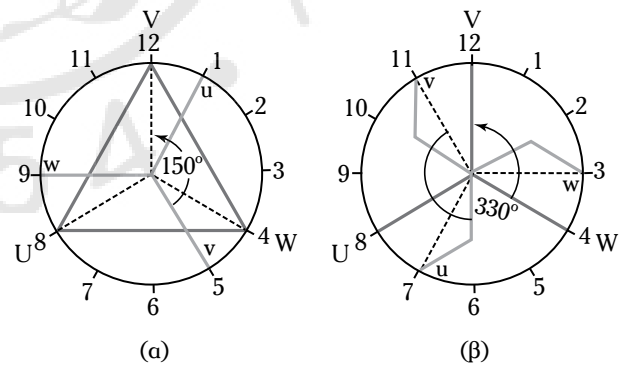
Σχ. 2.7β

Τριφασικός Μ/Σ ισodύναμος με το σύστημα τριων ανεξαρτήτων μονοφασικών Μ/Σ.

Η **συνδεσμολογία των φάσεων υψηλής τάσεως** (ΥΤ) των τριφασικών Μ/Σ χαρακτηρίζεται με κεφαλαία λατινικά γράμματα D και Y (πίν. 2.7) όπου: D η σύνδεση φάσεων σε τρίγωνο και Y η σύνδεση φάσεων σε αστέρα.

Η **συνδεσμολογία των φάσεων χαμηλής τάσεως** (ΧΤ) χαρακτηρίζεται με τα μικρά λατινικά γράμματα d, y και z (πίν. 2.7) όπου: d η σύνδεση φάσεων σε τρίγωνο, y η σύνδεση φάσεων σε αστέρα και z η σύνδεση φάσεων σε τεθλασμένο αστέρα (ζικ-ζακ).

Η φασική απόκλιση μεταξύ των φάσεων ΥΤ και ΧΤ χαρακτηρίζεται με έναν αριθμό, ο οποίος αν πολλαπλασιαστεί επί 30° δίδει τη φασική απόκλιση σε μοίρες (σχ. 2.7γ) και προσδιορίζει τον τύπο της συνδεσμολογίας του τυλίγματος ΥΤ και του αντιστοίχου τυλίγματος ΧΤ.



Σχ. 2.7γ

(α) Σύνδεση D_{y5} και (β) σύνδεση Y_{z11} .

Ομάδα των τριφασικών Μ/Σ ονομάζεται ο αριθμός, ο οποίος προκύπτει διαιρώντας τη φασική απόκλιση, μεταξύ των φάσεων ΥΤ, και των αντιστοίχων της ΧΤ, με 30° .

Οι ομάδες που μπορούν να πραγματοποιηθούν είναι 0, 1, 2, ..., 11.

Πίνακας 2.7
Συνδεσμολογίες των τριφασικών Μ/Σ με τα αντίστοιχα σύμβολά τους.

Ομάδα	Συνδεσμολογία	Σύμβολα		Συνδέσεις	
		Πρωτεύον τύλιγμα	Δευτερεύον τύλιγμα	Πρωτεύον τύλιγμα	Δευτερεύον τύλιγμα
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

Οι διάφορες ομάδες προσδιορίζουν τις ακόλουθες οικογένειες:

Οικογένεια I: ομάδες 1, 5, 9

Οικογένεια II: ομάδες 2, 6, 10

Οικογένεια III: ομάδες 3, 7, 11

Οικογένεια IV: ομάδες 0, 4, 8

Στον πίνακα 2.7 δίδονται οι συνηθισμένες συνδεσμολογίες των τριφασικών Μ/Σ, οι οποίες χρησιμο-

ποιούνται στην πράξη με τους αντίστοιχους συμβολισμούς τους.

2.7.1 Τριφασικές συνδέσεις.

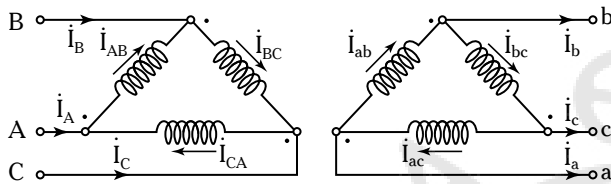
Για το μετασχηματισμό των μεγεθών τάσεων ρευμάτων τριφασικής πηγής απαιτούνται τρεις κατάλληλα συνδεδεμένοι μονοφασικοί Μ/Σ ή ένας τριφασικός Μ/Σ.

Η επιλογή του τριφασικού Μ/Σ σημαίνει οικονο-

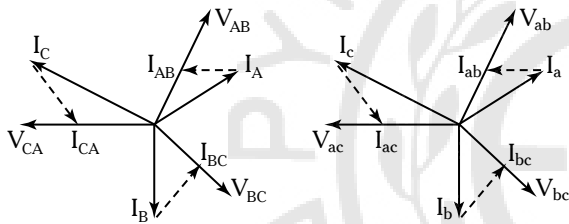
μία λόγω της μείωσης του βάρους και του όγκου του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα του Μ/Σ, οπότε προκύπτει και μείωση των αντιστοίχων απωλειών πυρήνα. Χρησιμοποιώντας ένα σύστημα τριών μονοφασικών Μ/Σ πραγματοποιούνται οι ακόλουθες συνδεσμολογίες:

1) Τρίγωνο – Τρίγωνο (D/D).

Στα σχήματα 2.7δ και 2.7ε δίδεται η συνδεσμολογία σε τρίγωνο – τρίγωνο (D/D) και τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσεων και ρευμάτων.



Σχ. 2.7δ
Συνδεσμολογία D/D.



Σχ. 2.7ε
Συνδεσμολογία τρίγωνο – τρίγωνο (D/D).

Μεταξύ των ρευμάτων γραμμής (πολικών), I_{Δ} και των ρευμάτων που διαρρέουν τα τυλίγματα (φάσεων) ισχύει: $I_{\Delta} = \sqrt{3}I_{AB} \angle -30^{\circ} A$.

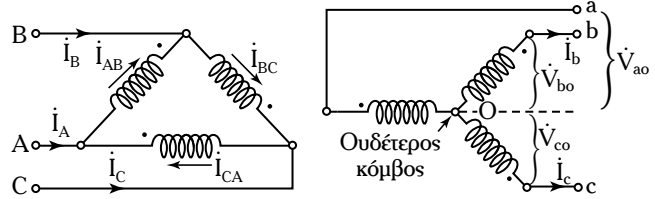
Κάθε τυλίγμα παραλαμβάνει το ένα τρίτο ($1/3$) της συνολικής ισχύος.

Το **πλεονέκτημα**, γενικά, της συνδεσμολογίας σε τρίγωνο είναι ότι αυτή δεν επιτρέπει την δημιουργία αρμονικών στις τάσεις και τις μαγνητικές ροές, στην περίπτωση της ασύμμετρης φορτίσεως, γιατί λόγω του κανόνα των βρόχων πρέπει το άθροισμα των τριών φασικών τάσεων να ισούνται με μηδέν.

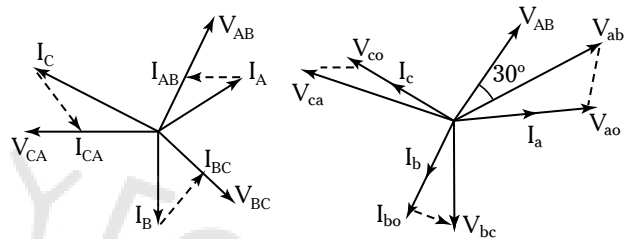
Όταν επισκευάζεται ένας Μ/Σ D/D, η συνδεσμολογία μπορεί να λειτουργήσει και ως σύστημα δύο Μ/Σ συνδεδεμένων σε ανοικτό τρίγωνο (V/V), η οποία παρέχει 58% της συνολικής ισχύος της συνδεσμολογίας D/D.

2) Τρίγωνο – Αστέρας (D/Y).

Στο σχήμα 2.7στ δίδεται η συνδεσμολογία D/Y. Το πρωτεύον του Μ/Σ συνδέεται στο ηλεκτρικό δί-



Σχ. 2.7στ
Σύνδεση D/Y.



Σχ. 2.7ζ

Διανυσματικά διαγράμματα τάσεων-ρευμάτων των φασικών και πολικών μεγεθών του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος της συνδεσμολογίας D/Y.

κυτο κατά τρίγωνο. Στο σχήμα 2.7ζ δίδονται τα διανυσματικά διαγράμματα των φασικών και πολικών μεγεθών του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος για ωμική φόρτιση.

Στο διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων παρατηρούμε ότι η τάση του δευτερεύοντος καθυστερεί σε σχέση με την τάση του πρωτεύοντος κατά 30° .

– Εξισώσεις πρωτεύοντος-δευτερεύοντος.

Τα διανυσματικά διαγράμματα του σχήματος 2.7ζ έχουν χαραχθεί με βάση τις ακόλουθες εξισώσεις, οι οποίες διέπουν την συνδεσμολογία «τρίγωνο-αστέρα», για συμμετρική φόρτιση των φάσεων:

1) Εξισώσεις πρωτεύοντος:

α) Εξίσωση των φασικών τάσεων

$$\dot{V}_{AB} + \dot{V}_{BC} + \dot{V}_{CA} = 0.$$

β) Εξίσωση των πολικών τάσεων: είναι ίδια με εκείνη των φασικών τάσεων, γιατί στη συνδεσμολογία σε τρίγωνο φασικές και πολικές τάσεις συμπίπτουν.

γ) Εξίσωση των φασικών ρευμάτων

$$\dot{I}_{AB} + \dot{I}_{BC} + \dot{I}_{CA} = 0.$$

δ) Εξίσωση των πολικών ρευμάτων

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

ε) Ανάλυση των πολικών ρευμάτων

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}, \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}.$$

2) Εξισώσεις δευτερεύοντος.

α) Εξίσωση των φασικών τάσεων:

$$\dot{V}_{ao} + \dot{V}_{bo} + \dot{V}_{co} = 0.$$

β) Εξίσωση των πολικών τάσεων:

$$\dot{V}_{ab} + \dot{V}_{bc} + \dot{V}_{ca} = 0.$$

γ) Ανάλυση των πολικών τάσεων:

$$\dot{V}_{ab} = \dot{V}_{ao} - \dot{V}_{bo}, \dot{V}_{bc} = \dot{V}_{bo} - \dot{V}_{co}, \dot{V}_{ca} = \dot{V}_{co} - \dot{V}_{ao}.$$

δ) Εξίσωση των φασικών ρευμάτων:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0.$$

ε) Εξίσωση των πολικών ρευμάτων: είναι ίδια με την εξίσωση των φασικών ρευμάτων, γιατί στη συνδεσμολογία σε αστέρα τα φασικά και πολικά ρεύματα συμπίπτουν.

3) **Λόγος μετασχηματισμού K'** , των πολικών μεγεθών.

Στη συνδεσμολογία «τρίγωνο-αστέρα» ο λόγος μετασχηματισμού K' των πολικών μεγεθών είναι:

$$K' = \frac{V_{1L}}{V_{2L}} = \frac{V_{1P}}{\sqrt{3}V_{2P}} = \frac{K}{\sqrt{3}}$$

Ο λόγος μετασχηματισμού K' είναι μειωμένος κατά $\sqrt{3}$.

4) **Πλεονεκτήματα** της συνδεσμολογίας «τρίγωνο-αστέρας». Αυτά είναι:

α) Κατάργηση του ουδέτερου αγωγού στο πρωτεύον. Είναι γνωστό ότι στη συνδεσμολογία σε τρίγωνο δεν χρησιμοποιείται ουδέτερος αγωγός. Οπότε είναι πιο οικονομικός.

β) Μικρότερη διατομή των αγωγών του πρωτεύοντος. Το πρωτεύον είναι συνδεδεμένο σε τρίγωνο. Οπότε σε κάθε φάση διέρχεται το φασικό ρεύμα, το οποίο είναι κατά $\sqrt{3}$ μικρότερο του πολικού $\left(I_p = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \right)$. Η διατομή των αγωγών του πρωτεύοντος είναι μειωμένη κατά $\sqrt{3}$, οπότε έχουμε οικονομία χαλκού του πρωτεύοντος.

γ) Διάθεση δύο τάσεων στο δευτερεύον. Το δευτερεύον είναι συνδεδεμένο σε αστέρα. Στον αστέρα έχουμε δύο τάσεις: Η τάση μεταξύ του ακροδέκτη της μίας φάσεως και του ουδέτερου κόμβου είναι η φασική τάση. Η τάση μεταξύ των ακροδεκτών των φάσεων είναι η πολική τάση. Η σχέση μεταξύ της πολικής και της φασικής τάσεως είναι: $V_L = \sqrt{3} V_p$, όπου: V_L η πολική τάση και V_p η φασική τάση.

δ) Κανονική λειτουργία στην ασύμμετρη φόρ-

τιση. Η φόρτιση του πρωτεύοντος ακολουθεί πιστά την φόρτιση του δευτερεύοντος. Αν στο δευτερεύον η φόρτιση των τριών φάσεων είναι $(-I_2, 0, 0)$, στο πρωτεύον έχουμε $(-I_1, 0, 0)$. Αυτό συμβαίνει διότι το ρεύμα κάθε φάσεως του πρωτεύοντος κλείνει κύκλωμα προς την πηγή τάσεως μέσω των αγωγών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (σχ. 2.7n). Στην περίπτωση ασύμμετρης φορτίσεως των φάσεων του δευτερεύοντος, οι επαγόμενες τάσεις στις τρεις φάσεις του δευτερεύοντος δεν μεταβάλλονται.

ε) Δεν υπάρχουν ρεύματα τρίτης αρμονικής. Αναφερόμενοι στο σχήμα 2.7στ για τα ρεύματα τρίτης αρμονικής στους κόμβους A, B και C έχουμε:

$$\text{κόμβος A: } i_A^{(3)} = I_{AB}^{(3)} \eta \mu 3\omega t - I_{CA}^{(3)} \eta \mu 3(\omega t + 240^\circ)$$

είναι όμως: $I_{AB}^{(3)} = I_{CA}^{(3)} = I_3$ η μέγιστη τιμή του ρεύματος τρίτης αρμονικής, οπότε είναι:

$$i_A^{(3)} = I_3 \eta \mu 3\omega t - I_3 \eta \mu 3(\omega t + 240^\circ) = 0$$

$$\text{κόμβος B: } i_B^{(3)} = I_{BC}^{(3)} \eta \mu 3(\omega t + 120^\circ) - I_{AB}^{(3)} \eta \mu 3\omega t$$

είναι όμως: $I_{BC}^{(3)} = I_{AB}^{(3)} = I_3$, οπότε έχουμε:

$$i_B^{(3)} = I_3 \eta \mu 3(\omega t + 120^\circ) - I_3 \eta \mu 3\omega t = 0$$

$$\text{κόμβος C: } i_C^{(3)} = I_{CA}^{(3)} \eta \mu 3(\omega t + 240^\circ) - I_{BC}^{(3)} \eta \mu 3(\omega t + 120^\circ)$$

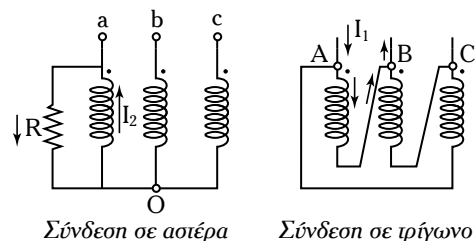
είναι όμως: $I_{CA}^{(3)} = I_{BC}^{(3)} = I_3$, οπότε:

$$i_C^{(3)} = I_3 \eta \mu 3(\omega t + 120^\circ) - I_3 \eta \mu 3(\omega t + 240^\circ) = 0.$$

Τελικά, στο πρωτεύον δεν υπάρχει ρεύμα τρίτης αρμονικής.

5) **Μειονεκτήματα** της συνδεσμολογίας D/Y. Αυτά είναι:

α) Αύξηση του αριθμού σπειρών του πρωτεύοντος. Το πρωτεύον είναι συνδεδεμένο σε τρίγωνο, οπότε φασική και πολική τάση συμπίπτουν. Ο αριθμός σπειρών του πρωτεύοντος θα είναι αυξημένος κατά τον συντελεστή $\sqrt{3}$. Αν η φασική τάση του δικτύου υπολογίζεται για 230 V, τα τυλίγματα του



Σχ. 2.7n

Συνδεσμολογία D/Y σε ασύμμετρη φόρτιση $(-I_2, 0, 0)$.

πρωτεύοντος πρέπει να υπολογιστούν για τάση ίση με $\sqrt{3} \cdot 230 \cong 400 \text{ V}$. Ανάλογα θα είναι αυξημένες οι μονώσεις του πρωτεύοντος.

β) Αύξηση της διατομής των αγωγών του δευτερεύοντος. Το δευτερεύον είναι συνδεδεμένο σε αστέρα: το φασικό ρεύμα συμπίπτει με το πολικό ρεύμα ($I_p \equiv I_L$). Οπότε, οι διατομές των αγωγών του δευτερεύοντος θα είναι αυξημένες κατά $\sqrt{3}$.

γ) Παρουσία του ουδέτερου αγωγού στο δευτερεύον. Οι φάσεις του δευτερεύοντος είναι συνδεδεμένες σε αστέρα. Οπότε είναι απαραίτητη η παρουσία του ουδέτερου αγωγού. Έτσι οι αγωγοί του δευτερεύοντος αυξάνονται σε τέσσερις.

3) Αστέρας – Αστέρας (Y/Y).

Στο σχήμα 2.7θ δίδεται η συνδεσμολογία αστέρα – αστέρα (Y/Y). Η συνδεσμολογία αυτή λειτουργεί, κανονικά, σε ασύμμετρη φόρτιση και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές στο πεδίο υψηλής τάσεως.

4) Αστέρας – Τρίγωνο (Y/D).

Στο σχήμα 2.7ι, δίδεται η συνδεσμολογία αστέρα – τρίγωνο. Η συνδεσμολογία αυτή λειτουργεί, κανονικά, σε ασύμμετρη φόρτιση και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές στο πεδίο υψηλής τάσεως.

5) Αστέρας – Τεθλασμένος Αστέρας (Y/Z).

Στο σχήμα 2.7ια, δίδεται η συνδεσμολογία αστέρα – τεθλασμένου αστέρα.

Στην συνδεσμολογία αυτή κάθε φάση στο δευτερεύον αποτελείται από δύο τυλίγματα και κάθε γραμμή του φορτίου τροφοδοτείται από τα τυλίγματα δύο φάσεων. Η συνδεσμολογία αυτή προσφέρει αρκετά **πλεονεκτήματα** όπως:

- 1) Ομαλή λειτουργία σε ασύμμετρη φόρτιση.
- 2) Δυνατότητα εξυπηρέτησης των **μεικτών δικτύων**⁴, αλλά είναι σχετικά ακριβή στην κατασκευή.

2.7.2 Χρήση των μετασχηματιστών στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων.

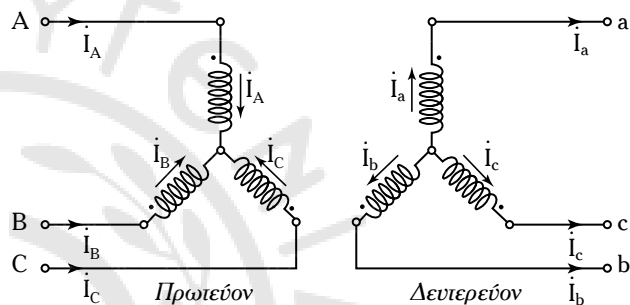
Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας στα εμπορικά πλοία γίνεται μέσω τριφασικών γεννητριών με τάσεις 380/220 V, 50 Hz (ευρωπαϊκού τύπου) ή 440,450/110, 127 V, 60 Hz (αμερικανικού τύπου).

Υπάρχουν συσκευές όμως, οι οποίες λειτουργούν σε διαφορετική τάση από αυτή που παράγεται από τις γεννήτριες πλοίων. Όταν είναι ανάγκη να τροφοδοτη-

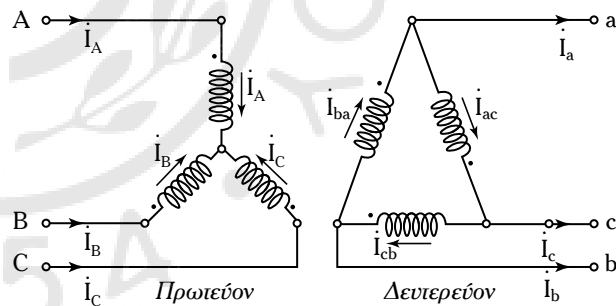
θούν με τάση μικρότερη από την τάση εξόδου των γεννητριών χρησιμοποιούνται Μ/Σ υποβιβαστές τάσεως.

Όταν τα ηλεκτρικά δίκτυα πλοίων περιλαμβάνουν μονοφασικά φορτία, η τροφοδοσία τους επιτυγχάνεται μέσω των Μ/Σ. Αυτά συνδέονται μεταξύ των δύο φάσεων του δευτερεύοντος των Μ/Σ. Αν επιλεγεί η κατάλληλη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων ενός Μ/Σ (όπως αναφερθήκαμε στις συνδεσμολογίες των τριφασικών Μ/Σ), τότε ελαχιστοποιούνται τα προβλήματα που δημιουργούν οι μονοφασικές συσκευές στο δίκτυο, όπως η ασυμμετρία φορτίσεως μεταξύ των τριών φάσεων.

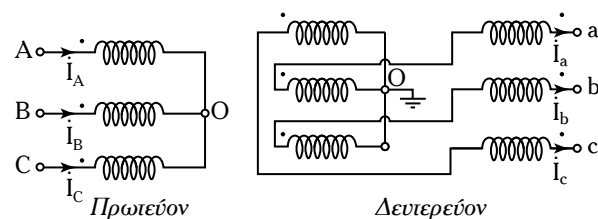
Οι τριφασικοί Μ/Σ υποβιβασμού τάσεως χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία του συστήματος



Σχ. 2.7θ
Συνδεσμολογία Y/Y.



Σχ. 2.7ι
Συνδεσμολογία Y/D.



Σχ. 2.7ια
Συνδεσμολογία αστέρας-τεθλασμένου αστέρας (Y/Z).

⁴ Μεικτά δίκτυα είναι τα δίκτυα κινήσεως και φωτισμού.

φωτισμού, το οποίο αποτελεί μία μονοφασική διάταξη χαμηλότερης τάσεως από εκείνη της παραγωγής. Οι τριφασικοί Μ/Σ 440/220 V οι οποίοι προορίζονται για το σύστημα φωτισμού, συνήθως αποτελούνται από τρεις μονοφασικούς, ξεχωριστούς Μ/Σ, οι οποίοι συνδέονται για να σχηματίσουν μία διάταξη 3-φάσεων. Αυτό επιτρέπει την εύκολη αντικατάσταση ενός μονοφασικού Μ/Σ αν εμφανιστεί κάποιο σφάλμα. Μία εναλλακτική λύση είναι να χρησιμοποιηθεί ένας 3-φασικός Μ/Σ με τα τυλίγματά του τοποθετημένα σε έναν κοινό μαγνητικό πυρήνα. Αυτός ο τύπος Μ/Σ πρέπει να απομονωθεί εντελώς στην περίπτωση ενός σφάλματος σε μία μόνο φάση.

Όταν ένα πλοίο έχει **δίκτυα υψηλής τάσεως**⁵, τότε οι γεννήτριες πλοίων παράγουν τάσεις επιπέδου 3,3 kV, 6,6 kV ή και 11 kV.

Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι απαραίτητη η παρουσία των τριφασικών Μ/Σ για την τροφοδότηση φορτίων, τα οποία λειτουργούν με χαμηλότερη τάση από εκείνη της παραγωγής.

Στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων, οι οποίες διαθέτουν δίκτυα υψηλής τάσεως η παρουσία των Μ/Σ είναι ευεργετική, γιατί λόγω της σύνθετης αντιστάσεώς τους περιορίζεται η τιμή των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως σε όλη την εγκατάσταση.

Συνήθως στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων, όπου χρησιμοποιούνται τριφασικοί Μ/Σ, η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων τους είναι: D/Y ή D/D.

Σημειώνουμε ότι για διαφορετικούς λόγους, όπως περιορισμοί βάρους και όγκου ή και για κρίσιμα φορτία, τα οποία απαιτούν τροφοδότηση απευθείας από τις γεννήτριες πλοίων, δεν συνηθίζεται η παράλληλη λειτουργία των Μ/Σ.

Οι νηογνώμονες δίνουν οδηγίες, με βάση τις οποίες οι Μ/Σ πρέπει να καλύπτουν συγκεκριμένες διατάξεις. Αυτές αναφέρονται στον χώρο όπου θα εγκατασταθούν, στον επαρκή εξαερισμό τους, στην αποφυγή βραχυκυκλωμάτων τους και στην απαίτηση της διπλής τους παρουσίας για λόγους ασφαλείας. Στη συγκεκριμένη διάταξη πρέπει να αποφευχθεί η παράλληλη λειτουργία τους.

Οι Μ/Σ οι οποίοι χρησιμοποιούνται στους χώρους ενδιαίτησεως πρέπει να είναι ξηρού τύπου με φυσική ψύξη. Οι Μ/Σ, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση μεγάλης ισχύος κινητήρων θα πρέπει να είναι διπλού τυλίγματος, με δύο ξεχωριστά τυλίγματα στο δευτερεύον.

⁵ Δίκτυα υψηλής τάσεως σε εμπορικά πλοία θεωρούνται αυτά, στα οποία το επίπεδο της τάσεως είναι μεγαλύτερο των 1.000 V.

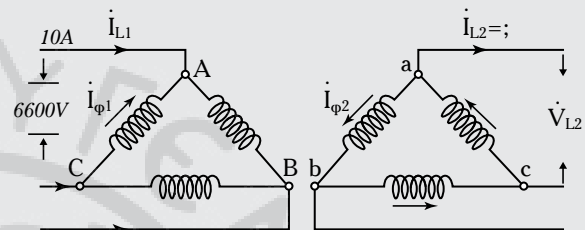
- Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Τριφασικός Μ/Σ, υποβιβαστής τάσεως, συνδέεται σε δίκτυο τάσεως 6,6 kV και απορροφά ρεύμα 10 A. Να υπολογίσετε την πολική τάση στο δευτερεύον, τα ρεύματα γραμμών στο δευτερεύον, για τις συνδεσμολογίες: (1) D/D, (2) Y/D και (3) D/Y. Ο λόγος σπειρών είναι 12.

Λύση.

1) Συνδεσμολογία D/D (σχ. 2.71β).



Σχ. 2.71β

Ισχύει ότι η φασική τάση ισούται με την πολική τάση στη σύνδεση σε τρίγωνο.

Φασική τάση πρωτεύοντος:

$$V_{1P} = V_{1L} = 6.600 \text{ V.}$$

Πολική τάση δευτερεύοντος:

$$V_{2P} = V_{2L} = V_{1P} \frac{V_2}{K} = \frac{6.600}{12} = 550 \text{ V.}$$

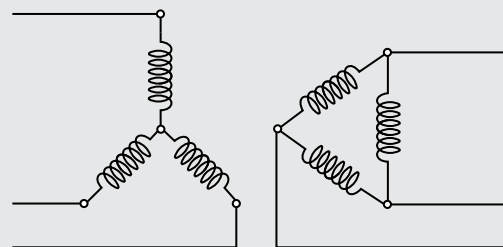
Φασικό ρεύμα πρωτεύοντος:

$$I_{1P} = \frac{I_{1L}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,733 \text{ A.}$$

Πολικό ρεύμα δευτερεύοντος:

$$I_{2L} = \sqrt{3} \cdot I_{2P} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{1P} \cdot n_1}{n_2} = \sqrt{3} \cdot 5,733 \cdot 12 = 120 \text{ A.}$$

2) Συνδεσμολογία Y/D (σχ. 2.71γ).



Σχ. 2.71γ

Φασική τάση πρωτεύοντος:

$$V_{IP} = \frac{V_{IL}}{\sqrt{3}} = \frac{6.600}{\sqrt{3}} \text{ V.}$$

Πολική τάση δευτερεύοντος:

$$V_{2L} = V_{2P} = V_{IP} \cdot \frac{n_2}{n_1} = \frac{6.000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{12} = 317,5.$$

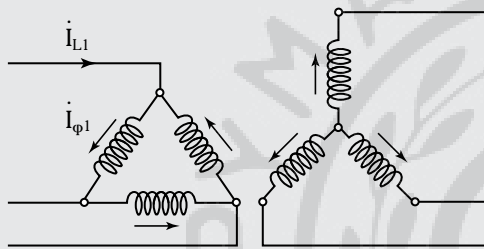
Φασικό ρεύμα πρωτεύοντος:

$$I_{IP} = I_{IL} = 10 \text{ A.}$$

Πολικό ρεύμα δευτερεύοντος:

$$I_{2L} = \sqrt{3} I_{2P} = \sqrt{3} \cdot I_{IP} \cdot \frac{n_1}{n_2} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 12 = 208 \text{ A.}$$

γ) Συνδεσμολογία D/Y (σχ. 2.71δ).



Σχ. 2.71δ

Φασική τάση πρωτεύοντος:

$$V_{IP} = V_{IL} = 6.600 \text{ V.}$$

Πολική τάση δευτερεύοντος:

$$V_{2L} = \sqrt{3} V_{2P} = \sqrt{3} \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot V_{IP} = \sqrt{3} \cdot 6.600 \cdot \frac{1}{12} = 952,6 \text{ V.}$$

Φασικό ρεύμα πρωτεύοντος:

$$I_{IP} = \frac{I_{IL}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} \text{ A}$$

Πολικό ρεύμα δευτερεύοντος:

$$I_{2L} = I_{2P} = I_{IP} \cdot \frac{n_1}{n_2} = \frac{10}{\sqrt{3}} \cdot 12 = 69,3 \text{ A.}$$

Άσκηση 2.

Τριφασικός Μ/Σ έχει τα τυλίγματα του πρωτεύοντος συνδεδεμένα σε τρίγωνο, ενώ τα τυλίγματα του δευτερεύοντος σε αστέρα. Η πολική τάση του πρωτεύοντος είναι 22.000 V, ενώ του δευτερεύοντος είναι 400 V.

Στον Μ/Σ συνδέομε ένα ισορροπημένο σύστημα φορτίων με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ.. Το πο-

λικό ρεύμα στο πρωτεύον είναι 5 A. Να υπολογίσετε το ρεύμα στο κάθε τυλίγμα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Να βρείτε τα kW που παρέχει στο φορτίο ο Μ/Σ.

Λύση.

Πρωτεύον συνδεδεμένο σε D.

$$V_{IP} = V_{IL} = 22.000 \text{ V.}$$

Δευτερεύον σε Y.

$$V_{2P} = \frac{V_{2L}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ A.}$$

Λόγος μετασχηματισμού.

$$K = \frac{V_{2P}}{V_{IP}} = \frac{231}{22.000} = \frac{21}{2.000}.$$

Στο πρωτεύον.

$$I_{IP} = 5 \text{ A.}$$

Φασικό ρεύμα στο πρωτεύον:

$$I_{IP} = \frac{I_{IL}}{\sqrt{3}} = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2,887 \text{ A.}$$

Στο δευτερεύον.

$$I_{2P} = \frac{I_{IP}}{K} = \frac{2,887}{21/2.000} = 275 \text{ A.}$$

Είναι:

$$I_{2P} = I_{2L} = 275 \text{ A.}$$

Η ισχύς στην έξοδο του Μ/Σ:

$$P_{out} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi_L, \quad V_L = 400 \text{ V, } I_P = 275 \text{ A,} \\ \cos \phi_L = 0,8, \quad P_{out} = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 275 \cdot 0,8 = 15.242 \text{ W.}$$

Άσκηση 3.

Τριφασικός Μ/Σ 100 kVA, 50 Hz, 3.300/400 V έχει τα τυλίγματα υψηλής τάσεως συνδεδεμένα σε τρίγωνο, ενώ τα τυλίγματα χαμηλής τάσεως είναι συνδεδεμένα σε αστέρα. Η ωμική αντίσταση ανά φάση των τυλιγμάτων υψηλής τάσεως είναι 3,6 Ω, ενώ των τυλιγμάτων χαμηλής τάσεως 0,02 Ω. Να υπολογίσετε τις απώλειες πυρίνα στην κανονική τάση όταν η απόδοση πλήρους φορτίου είναι 95,8% με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ..

Λύση.

Η P_{out} στο πλήρες φορτίο είναι:

$$P_{out} = (kVA) \cdot \Sigma I = 100 \cdot 0,8 = 80 \text{ kW.}$$

Η απόδοση είναι: $\eta = 0,958$.

$$\text{Η ισχύς εισόδου είναι: } P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{80}{0,958} = 83,5.$$

$$\text{Ισχύει: } P_{in} = P_{out} + P_{\ell}$$

όπου P_{ℓ} οι συνολικές απώλειες.

$$\text{Είναι: } P_{\ell} = P_{in} - P_{out} = 83,5 - 80 = 3,5 \text{ kW.}$$

Λόγος μετασχηματισμού:

$$\frac{V_{(Y.T.)P}}{V_{(X.T.)P}} = \frac{3.300}{400/\sqrt{3}} = \frac{33\sqrt{3}}{4}.$$

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση ανηγμένη στην πλευρά ΧΤ.

$$R'' = R_{(X.T.)} + \frac{R_{(Y.T.)}}{K^2} = 0,02 + 3,5 \cdot \frac{4^2}{(33\sqrt{3})^2} = 0,037 \Omega.$$

Το ρεύμα της φάσεως στην πλευρά της ΧΤ είναι:

$$I_{(X.T.)P} = \frac{\text{ονομαστικό (kVA)} \cdot 1.000}{3 \cdot V_{(X.T.)P}} = \frac{100 \cdot 1.000}{3 \cdot \frac{400}{\sqrt{3}}} = 144,1 \text{ A}$$

Συνολικές απώλειες χαλκού:

$$3(I_{X.T.})^2 P = R'' = 3 \cdot (144,1)^2 \cdot 0,037 = 2,3 \text{ kW.}$$

$$\text{Απώλειες πυρήνα} = \text{Συνολικές απώλειες} - \text{απώλειες χαλκού} = 3,5 - 2,3 = 1,2 \text{ kW.}$$

Άσκηση 4.

Τριφασικός Μ/Σ 120 kVA, 6.000/400 V, 50 Hz, Υ/Υ έχει απώλειες πυρήνα 1.600 W. Απαιτείται η μέγιστη απόδοση στα $\frac{3}{4}$ του πλήρους φορτίου. Να υπολογίσετε την απόδοση του Μ/Σ:

1) Στο πλήρες φορτίο υπό συντελεστή ισχύος 0,8 και

2) να υπολογίσετε τη μέγιστη απόδοση για συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα.

Λύση.

$$\text{Απώλειες πυρήνα} = 1.600 \text{ W.}$$

Απώλειες χαλκού στα $\frac{3}{4}$ του πλήρους φορτίου = απώλειες πυρήνα.

$$\text{Απώλειες πυρήνα} = 1,8 \text{ kW.}$$

Απώλειες χαλκού στο πλήρες φορτίο:

$$1.800 \cdot \left(\frac{4}{3}\right)^2 = 3,200 \text{ W} = 3,2 \text{ kW.}$$

$$1) P_{(out)x.φ.} = 120 \cdot 0,8 = 96 \text{ kW}$$

$$P_{(in)x.φ.} = 96 + 1,8 + (3,2) = 101 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{96}{101} \cdot 100 = 95\%.$$

$$2) P_{(out)\frac{3}{4}x.φ.} = 120 \cdot \frac{3}{4} \cdot 1 = 90 \text{ kW}$$

$$P_{in} = 90 + 1,8 + 1,8 = 93,6 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{90}{93,6} \cdot 100 = 96,15\%.$$

Άσκηση 5.

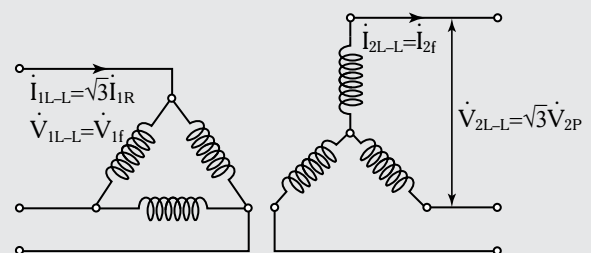
Τριφασικός Μ/Σ, 500 kVA, 50 Hz έχει λόγο πολικών τάσεων 30/11 kV. Η σύνδεση των τυλιγμάτων είναι D/Y. Η ανά φάση αντίσταση στην πλευρά ΥΤ είναι 35 Ω, ενώ στην πλευρά ΧΤ είναι 0,876 Ω αντίστοιχα. Οι απώλειες πυρήνα είναι 3.050 W.

Να υπολογίσετε την απόδοση στο πλήρες φορτίο και στο $\frac{1}{2}$ του πλήρους φορτίου για:

- 1) Συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα, και
- 2) για συντελεστή ισχύος 0,8.

Λύση.

Η συνδεσμολογία είναι D/Y (σχ. 2.71ε).



Σχ. 2.71ε

$$\text{Ισχύει: } \frac{V_{1LL}}{V_{2LL}} = \frac{V_{1P}}{\sqrt{3}V_{2P}} = \frac{n_1}{\sqrt{3}n_2} = \frac{K}{\sqrt{3}}$$

$$\text{και } \frac{I_{1LL}}{I_{2LL}} = \frac{\sqrt{3}I_{1P}}{I_{2P}} = \frac{\sqrt{3}n_2}{n_1} = \frac{\sqrt{3}}{K}.$$

Ο λόγος μετασχηματισμού είναι:

$$K = \frac{\sqrt{3}V_{1LL}}{V_{2LL}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 33.000}{11.000} = 3\sqrt{3}.$$

Η συνολική ωμική αντίσταση ανηγμένη στο δευτερεύον είναι:

$$\begin{aligned} R''/\text{φάση} &= R_2 + \frac{R_1}{K^2} = \\ &= 0,876 + \frac{35}{(3\sqrt{3})^2} = 2,172 \Omega. \end{aligned}$$

Το ρεύμα στο δευτερεύον ανά φάση είναι:

$$I_{21} = \frac{50.000}{\sqrt{3} \cdot 11.000} = \frac{550}{11\sqrt{3}} \text{ A.}$$

Συνθήκες πλήρους φορτίου.

Συνολικές απώλειες χαλκού στο πλήρες φορτίο = $3 \cdot \left(\frac{500}{11\sqrt{3}}\right)^2 \cdot 2,172 = 4.490 \text{ W.}$

Απώλειες πυρήνα = 3.050 W.

Συνολικές απώλειες στο πλήρες φορτίο = $4.490 + 3.050 = 7.540 \text{ W.}$

Ισχύς εξόδου με $(\Sigma I = 1) = 500 \text{ kW.}$

$$\eta_{\text{π.φ.}} = \frac{500.000}{507.540} = 0,9851 \text{ ή } 98,51\%.$$

Ισχύς εξόδου με $\Sigma I = 0,8 \text{ επαγ.} = (500 \text{ kVA}) \cdot 0,8 = 400 \text{ kW}$

$$\eta_{\text{π.φ.}} = \frac{400.000}{407.540} = 0,981 \text{ ή } 98,1\%.$$

Συνθήκες $\frac{1}{2}$ του πλήρους φορτίου:

Ισχύς εξόδου με Συντελεστή Ισχύος (ΣI) ίσο με την μονάδα = 250 kW.

$$P_{\text{cu}} = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot 4.490 = 1.122 \text{ W}$$

Συνολικές απώλειες:

$$P_{\ell} = 3.050 + 1.122 = 4.172 \text{ W}$$

$$\eta_{\frac{1}{2}\text{π.φ.}} = \frac{250.000}{254.172} = 0,9835 \text{ ή } 98,35\%.$$

Ισχύς εξόδου με $\Sigma I = 0,8 \text{ επαγ.}$ στο $\frac{1}{2}$ του πλήρους φορτίου = 200 kW

$$\eta_{\frac{1}{2}\text{π.φ.}} = \frac{200.000}{204.172} = 0,98 \text{ ή } 98\%.$$

Άσκηση 6.

Τριφασικός Μ/Σ 100 kVA, 50 Hz, 3.300/400 V, D/Y έχει:

$$R_{(Y.T.)} = 3,5 \Omega/\text{φάση}, R_{(X.T.)} = 0,02 \Omega/\text{φάση}.$$

Να υπολογίσετε τις απώλειες πυρήνα του Μ/Σ στην ονομαστική τάση αν η απόδοση στις συνθήκες πλήρους φορτίου είναι 95,8% με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ..

Λύση.

Ισχύς εξόδου στο πλήρες φορτίο:

$$P_{\text{out}} = 100 \cdot 0,8 = 80 \text{ kW}, P_{\text{in}} = \frac{80}{0,958} = 83,5 \text{ kW}$$

$$P_{\ell} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} = 83,5 - 80 = 3,5 \text{ kW.}$$

Ο λόγος μετασχηματισμού:

$$K = \frac{\text{τάση στο πρωτεύον/φάση}}{\text{τάση στο δευτερεύον/φάση}} = \frac{3.300}{\frac{400}{\sqrt{3}}} = \frac{3.300 \cdot \sqrt{3}}{400}$$

$$\text{και } K = \frac{33\sqrt{3}}{4}.$$

Είναι:

$$R'' = R_2 + \frac{R_1}{K^2} = 0,02 + \frac{3,5}{\left(\frac{33\sqrt{3}}{4}\right)^2} = 0,037 \Omega.$$

Το ρεύμα πλήρους φορτίου στο δευτερεύον είναι:

$$I_2 = \frac{100.000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 144,1 \text{ A}$$

$$P_c = 3I_2^2 R'' = 3(144,1)^2 \cdot 0,037 = 2,305 \text{ W.}$$

$$\text{Είναι: } P_{\text{in}} = P_{\text{out}} + P_L = P_{\text{out}} + P_c + P_{\text{cu}}$$

$$\text{και: } P_c = 1.195 \text{ W.}$$

Άσκηση 7.

Ένα τριφασικό ισορροπημένο φορτίο 150 kVA, 1.000 V με συντελεστή ισχύος 0,866 επαγ., τροφοδοτείται με τάση 2.000 V, από σύστημα τριών μονοφασικών Μ/Σ (θεωρούνται ιδανικοί), οι οποίοι συνδέονται σε:

- 1) D/D,
- 2) V/V.

Να υπολογίσετε το ρεύμα σε κάθε τύλιγμα.

Λύση.

- 1) Σύνδεση D/D.

$$\sqrt{3}V_{LL}I_{LL}\cos\varphi = 150.000 \text{ W}$$

$$\sqrt{3} \cdot 1.000 \cdot I_{LL} \cdot 0,866 = 150.000 \text{ W}$$

$$I_{LL} = 100 \text{ A.}$$

Λόγος μετασχηματισμού:

$$\frac{2.000}{1.000} = 2, \quad I_{IP} = \frac{57,7}{2} = 28,85 \text{ A.}$$

- 2) Σύνδεση V/V.

Στην περίπτωση αυτή ισχύει: $I_{2LL} = I_{2P}$ οπότε:

$$\sqrt{3} \cdot 1.000 \cdot I_{2LL} \cdot 0,866 = 150.000 \text{ W}$$

και $I_{2LL} = 100 \text{ A}, \quad I_{1L} = 100 \cdot \frac{1}{2} = 50 \text{ A.}$

Άσκηση 8.

Τριφασικός Μ/Σ 1.000 kVA με λόγο μετασχηματισμού $\frac{50.000}{10.000}$, Y/D έχει τάση βραχυκυκλώματος 8% της κανονικής υπό συντελεστή ισχύος 0,45.

Το ρεύμα χωρίς φορτίο του Μ/Σ είναι 10% του κανονικού υπό συντελεστή ισχύος 0,12. Να υπολογίσετε την πώση τάσεως και το βαθμό αποδόσεως του Μ/Σ στο πλήρες φορτίο και με συντελεστή ισχύος 1.

Λύση.

Αναφερόμαστε στο ανά φάση κύκλωμα του Μ/Σ.

Ο λόγος μετασχηματισμού ανά φάση είναι:

$$\frac{V_{1L}}{V_{2P}} = \frac{50.000}{\sqrt{3} \cdot 10.000} = 2,89$$

Το ρεύμα I_{2P} ανά φάση είναι:

$$I_{2L} = \frac{(\text{kVA})}{3V_{2L}\cos\varphi_2} = \frac{100.000}{\sqrt{3} \cdot 10.000 \cdot 1} = 33,4 \text{ A.}$$

Η τάση βραχυκυκλώσεως ανηγμένη στο δευτερεύον είναι: $V_{sc_2} = 0,08 \cdot 10.000 = 800 \text{ V.}$

Η συνολική σύνθετη αντίσταση ανηγμένη στο δευτερεύον είναι:

$$Z_{sc} = \frac{800}{33,4} = 24 \Omega .$$

Είναι: $R_{sc} = Z_{sc}\cos\varphi_{sc} = 24 \cdot 0,45 = 10,8 \Omega$

$$X_{osc} = Z_{sc}\sin\varphi_{sc} = 24 \cdot 0,89 = 21,36 \Omega.$$

Όταν $\cos\varphi_2 = 1$ τότε:

$$\begin{aligned} \Delta V\% &= 100 \frac{I_2}{V_2} (R_{sc}\cos\varphi_2 + X_{osc}\sin\varphi_2) + \\ &+ 50 \left(\frac{I_2}{V_2} \right)^2 (X_{osc}\cos\varphi_2 - R_{sc}\sin\varphi_2)^2 \\ &= 100 \frac{33,4}{10.000} \cdot 10,8 + 50 \cdot \left(\frac{33,4}{10.000} \right)^2 \cdot \\ &\cdot (21,36)^2 = 3,85\% \end{aligned}$$

Τότε η τάση στο δευτερεύον είναι (σχ. 2.4δ):

$$\begin{aligned} V_2 &= E_2 - \Delta V\% \cdot E_2 = \\ &= 10.000 - 0,0385 \cdot 10.000 = 9.615 \text{ V.} \end{aligned}$$

Για το ρεύμα χωρίς φορτίο έχουμε:

$$I_\varphi = 0,1 \cdot I_{IP} = 0,1 \cdot \frac{I_{2P}}{2,89} = 0,1 \cdot \frac{33,4}{2,89} = 1,156 \text{ A.}$$

Οι απώλειες πυρίνα είναι:

$$\begin{aligned} P_C &= \sqrt{3}V_{LL}I_\varphi\cos\varphi_C = \\ &= 1,73 \cdot 50.000 \cdot 1,156 \cdot 0,12 = 12.000 \text{ W.} \end{aligned}$$

Οι απώλειες χαλκού:

$$P_{CU} = 3R_{SC}I_{2P}^2 = 3 \cdot 10,8 \cdot (33,4)^2 = 36.144 \text{ W.}$$

Ο βαθμός αποδόσεως για $\cos\varphi_2 = 1$ είναι:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{3V_{2P}I_{2L}\cos\varphi_2}{3V_{2P}I_{2P}\cos\varphi_2 + P_C + P_{CU}} = \\ &= \frac{3 \cdot 10.000 \cdot 33,4 \cdot 1}{3 \cdot 10.000 \cdot 33,4 + 12.000 + 36.144} = 0,954. \end{aligned}$$

Άσκηση 9.

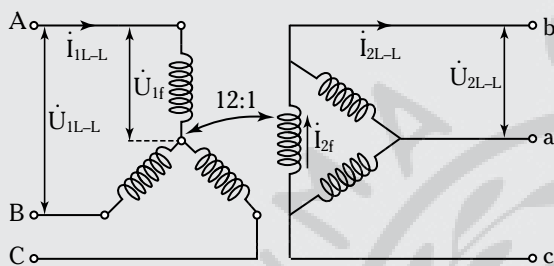
Ένας τριφασικός Μ/Σ αποτελείται από τρεις μονοφασικούς Μ/Σ, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον υποβιβασμό της τάσεως 6.600 V. Αν το πρωτεύον ρεύμα γραμμής είναι 10 A, να υπολογίσετε: (1) V_{2LL} , (2) I_{LL} και (3) $(kVA)_{out}$.

Στις συνδεσμολογίες (1) Y/D και (2) D/Y.

Δίδεται ότι ο λόγος μετασχηματισμού είναι 12. Αμελούνται οι απώλειες.

Λύση.

1) Συνδεσμολογία Y/D (σχ. 2.71στ).



Σχ. 2.71στ

$$\text{Είναι: } V_{1L} = \frac{6.600}{\sqrt{3}}$$

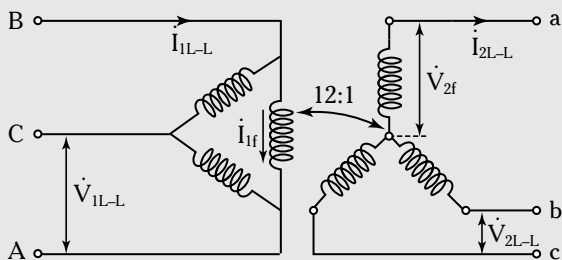
$$V_{2LL} = V_{2P} = \frac{6.600}{\sqrt{3} \cdot 12} = 317,55 \text{ V}$$

$$I_{2P} = 10 \cdot 12 = 120 \text{ A}$$

$$I_{2LL} = 120 \cdot \sqrt{3} = 207,8 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} (kVA)_{out} &= \sqrt{3} \cdot \frac{6.600}{\sqrt{3} \cdot 12} \cdot 120 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{1}{1.000} = \\ &= 66\sqrt{3} = 114,3 \end{aligned}$$

2) Συνδεσμολογία D/Y (σχ. 2.71ζ).



Σχ. 2.71ζ

$$I_{2P} = \frac{10}{\sqrt{3}} \text{ A}, \quad I_{2LL} = \frac{12 \cdot 10}{\sqrt{3}} = 62,28 \text{ A},$$

$$V_{2P} = \frac{6.600}{12} \text{ V}, \quad V_{2LL} = \frac{6.600 \cdot \sqrt{3}}{12} = 925,6 \text{ V}$$

$$3) (kVA)_{out} = \sqrt{3} \cdot \frac{6.600 \cdot \sqrt{3}}{12} \cdot \frac{110}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1.000} = 114,3$$

Άσκηση 10.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός τριφασικού Μ/Σ είναι τα εξής: $S_{ov} = 600 \text{ kVA}$, $V_{1ov} = 10 \text{ kV}$, $V_{2ov} = 400 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $V_{sc}\% = 4,8\%$, $P_c\% = 0,48\%$, $P_{sc}\% = 1,28\%$.

Να υπολογίσετε:

1) Την πώση τάσεως στο δευτερεύον όταν ο Μ/Σ περνάει από τη λειτουργία χωρίς φορτίο στο 75% του πλήρους φορτίου.

2) Την απόδοση του Μ/Σ όταν λειτουργεί στο 75% του πλήρους φορτίου και το ρεύμα στο δευτερεύον, το οποίο αντιστοιχεί στη μέγιστη απόδοση του Μ/Σ.

Λύση.

1) Το ονομαστικό ρεύμα στο δευτερεύον του Μ/Σ είναι:

$$I_{2ov} = \frac{S_{ov}}{\sqrt{3}V_{2ov}} = \frac{600 \cdot 10^3}{400} = 866 \text{ A}.$$

Στη λειτουργία του 75% του πλήρους φορτίου, το ρεύμα στο δευτερεύον είναι:

$$I_2 = 0,75 \cdot 866 = 650 \text{ A}.$$

Υπολογισμός των μεγεθών: V_{2sc} , Z_{2sc} , R_{2sc} και X_{o2sc}

$$V_{2sc} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_{sc}\% \cdot V_{2ov}}{100} = \frac{4,8 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 100} = 11,1 \text{ V}$$

$$Z_{2sc} = \frac{V_{sc}}{I_{2ov}} = \frac{11,1}{866} = 12,8 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{2sc} = \frac{P_{sc}\% \cdot S_{2ov}}{3 \cdot 100 \cdot I_{2ov}^2} = \frac{1,28 \cdot 600 \cdot 10^3}{3 \cdot 100 \cdot 866^2} = 3,4 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$\begin{aligned} X_{o2sc} &= \sqrt{(Z_{2sc})^2 - (R_{2sc})^2} = \\ &= \sqrt{(12,8 \cdot 10^{-3})^2 - (3,4 \cdot 10^{-3})^2} = 12,3 \cdot 10^{-3} \Omega. \end{aligned}$$

Η πώση τάσεως υπολογίζεται ως εξής:

$$|\Delta V| = \sqrt{3}I_2 (R_{2sc} \cos\phi + X_{o2sc} \sin\phi) = 13,4 \text{ V}.$$

2) Η ισχύς την οποία απορροφούν οι καταναλώσεις είναι:

$$P_2 = \sqrt{3}V_2 I_2 \cos\phi = \sqrt{3} \cdot (400 - 13,4) \cdot 650 \cdot 0,6 = 261,1 \text{ kW}$$

Οι απώλειες πυρήνα είναι:

$$P_c = \frac{P_c \% \cdot S_{ov}}{100} = \frac{0,48 \cdot 600}{100} = 2,88 \text{ kW.}$$

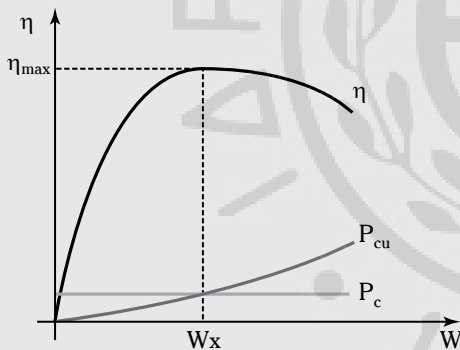
Οι απώλειες χαλκού είναι:

$$P_{cu} = 3I_2^2 R_{2sc} = 3 \cdot 650^2 \cdot 3,4 \cdot 10^{-3} = 4,3 \text{ kW.}$$

Η απόδοση του Μ/Σ στο 75% του πλήρους φορτίου είναι:

$$\eta\% = \frac{P_2}{P_2 + P_c + P_{cu}} \cdot 100 = \frac{261,1}{261,1 + 2,88 + 4,3} \cdot 100 = 97,3\%.$$

Μέγιστη απόδοση έχουμε όταν οι απώλειες πυρήνα εξισώνονται με τις απώλειες χαλκού. Η μέγιστη απόδοση του Μ/Σ απεικονίζεται στο σχήμα 2.7in:



Σχ. 2.7in

Έχουμε:

$$I_{2x} = w_x I_{2ov} = \sqrt{\frac{P_c \%}{P_{sc} \%}} \cdot I_{2ov} = \sqrt{\frac{0,48}{1,28}} \cdot 866 = 530 \text{ A.}$$

2.8 Συνθήκες παραλληλισμού μονοφασικών Μ/Σ.

Η παράλληλη σύνδεση, γενικά, των Μ/Σ είναι αναγκαία για δύο, κυρίως, λόγους:

- 1) Για την κάλυψη της αύξησεως του φορτίου σε υπάρχουσα εγκατάσταση, και
- 2) για την απόκτηση εφεδρείας σε μια εγκατάσταση

σε περίπτωση, κατά την οποία υπάρχει ευπαθές φορτίο για το οποίο δεν επιτρέπονται διακοπές ηλεκτροδότησεως (αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος).

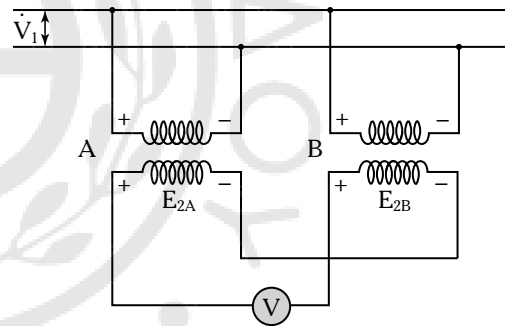
Για την παράλληλη λειτουργία των μονοφασικών Μ/Σ πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής συνθήκες:

1) Οι στιγμιαίες πολικότητες των ακροδεκτών των δευτερευόντων, τα οποία πρόκειται να συνδεθούν πρέπει να είναι ίδιες.

Η περίπτωση αυτή είναι παρόμοια με εκείνη της παράλληλης συνδέσεως ηλεκτρικών στοιχείων, όταν συνδέεται ο θετικός πόλος ενός στοιχείου με τον αντίστοιχο θετικό πόλο του επόμενου στοιχείου και του αρνητικού πόλου του πρώτου στοιχείου με τον αρνητικό πόλο του δεύτερου στοιχείου.

Στην αντίθετη περίπτωση οι δύο ηλεκτρικές πηγές βραχυκυκλώνονται. Στην περίπτωση των Μ/Σ θα κυκλοφορήσουν ισχυρά ρεύματα βραχυκυκλώσεως στο πρωτεύον και το δευτερεύον, με αποτέλεσμα την καταστροφή των τυλιγμάτων.

Η ταυτότητα της πολικότητας των δύο, παράλληλα, συνδεμένων Μ/Σ ελέγχεται με την πειραματική διάταξη του σχήματος 2.8α.



Σχ. 2.8α

Πειραματική διάταξη για τον έλεγχο της ταυτότητας της στιγμιαίας πολικότητας των δευτερευόντων.

Συνδέονται τυχαία δύο ακροδέκτες των δευτερευόντων τυλιγμάτων των δύο Μ/Σ, μέσω ενός βολτομέτρου. Αν η ένδειξη του βολτομέτρου είναι μηδενική, τότε η σύνδεση των ακροδεκτών έγινε κανονικά. Στη συνέχεια αφαιρείται και συνδέονται μεταξύ τους και οι υπόλοιποι δύο ακροδέκτες.

2) Οι ονομαστικές τάσεις των πρωτεύοντων τυλιγμάτων πρέπει να είναι μεταξύ τους ίσες. Επίσης, οι Μ/Σ θα πρέπει να έχουν τον ίδιο λόγο μετασχηματισμού, έτσι ώστε να ικανοποιείται και η συνθήκη της ισότητας των τάσεων μεταξύ των δευτερευόντων.

3) Οι επί τοις εκατό σύνθετες αντιστάσεις των Μ/Σ πρέπει να είναι ίσες.

4) Ο λόγος των ωμικών αντιστάσεων προς τις αντίστοιχες αντιδράσεις σκεδάσεως πρέπει να είναι ο ίδιος για τους Μ/Σ, οι οποίοι πρόκειται να λειτουργήσουν παράλληλα.

Το κύριο πρόβλημα, που σχετίζεται με την παράλληλη λειτουργία των Μ/Σ, είναι ο καθορισμός του τρόπου με τον οποίο διαμοιράζονται το φορτίο μεταξύ τους.

Ο τρόπος με βάση τον οποίο γίνεται ο διαμοιρασμός του φορτίου μεταξύ των Α και Β Μ/Σ οι οποίοι λειτουργούν παράλληλα δίδεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$(kVA)_A = \frac{\left(\frac{kVA}{\%IZ}\right)_A}{\left(\frac{kVA}{\%IZ}\right)_A + \left(\frac{kVA}{\%IZ}\right)_B} \cdot (kVA)_{ολ.}$$

Ομοίως:

$$(kVA)_B = \frac{\left(\frac{kVA}{\%IZ}\right)_B}{\left(\frac{kVA}{\%IZ}\right)_A + \left(\frac{kVA}{\%IZ}\right)_B} \cdot (kVA)_{ολ.}$$

όπου: $(kVA)_A = kVA$ του Μ/Σ Α.

$(kVA)_B = kVA$ του Μ/Σ Β.

$(kVA)_{ολ.}$ είναι τα συνολικά kVA του συνδεδεμένου φορτίου.

2.8.1 Διαμοιρασμός φορτίου μεταξύ δύο μονοφασικών Μ/Σ όταν οι τάσεις, χωρίς φορτίο, στα δευτερεύοντα τυλίγματα των Μ/Σ είναι ίσες.

Στο σχήμα 2.8β(α) δίδονται δύο μονοφασικοί μετασχηματιστές συνδεδεμένοι παράλληλα, που τροφοδοτούν το ίδιο φορτίο, ενώ στο σχήμα 2.8β(β) δίδεται το ισοδύναμο κύκλωμα των Μ/Σ με κυκλωματικά στοιχεία ανηγμένα στο δευτερεύον.

Από το κύκλωμα (β) προκύπτει:

$$\dot{E}_2 = \dot{V}_2 + \dot{I}_A \dot{Z}_A'' \quad (2.66)$$

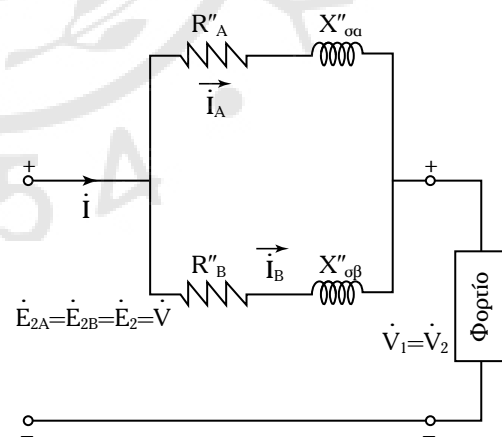
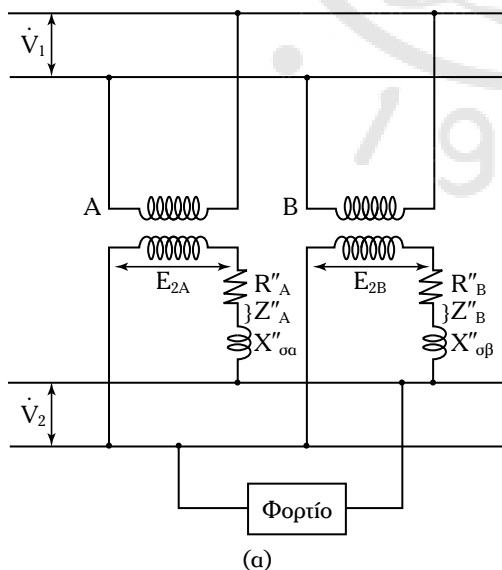
$$\dot{E}_2 = \dot{V}_2 + \dot{I}_B \dot{Z}_B'' \quad (2.67)$$

Και $\dot{I}_A \dot{Z}_A'' = \dot{I}_B \dot{Z}_B'' \quad (2.68)$

ή $\frac{\dot{I}_A}{\dot{I}_B} = \frac{\dot{Z}_B''}{\dot{Z}_A''} \quad (2.69)$

Η εξίσωση 2.69 γίνεται:

$$\frac{\dot{I}_A}{\dot{I}_A + \dot{I}_B} = \frac{\dot{Z}_B''}{\dot{Z}_A'' + \dot{Z}_B''} \quad (2.70)$$



Σχ. 2.8β

(α) Παράλληλη σύνδεση των Μ/Σ και (β) ισοδύναμο κύκλωμα με κυκλωματικά στοιχεία ανηγμένα στα δευτερεύοντα τυλίγματα των Μ/Σ.

Η συνολική σύνθετη αντίσταση είναι:

$$Z'' = \frac{\dot{Z}''_A \cdot \dot{Z}''_B}{\dot{Z}''_A + \dot{Z}''_B} \quad (2.71)$$

Το ρεύμα, το οποίο απορροφά το φορτίο είναι:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B = \dot{I} = \frac{\dot{V}}{Z''} = \frac{\dot{V}}{\frac{\dot{Z}''_A \cdot \dot{Z}''_B}{\dot{Z}''_A + \dot{Z}''_B}} \quad (2.72)$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{Z}''_A \cdot \dot{Z}''_B}{\dot{Z}''_A + \dot{Z}''_B} \cdot \dot{I} \quad (2.73)$$

Όταν: $\dot{E}_{2A} = \dot{E}_{2B} = \dot{E}_2 = \dot{V}$.

Ισχύει: $\dot{I}_A \dot{Z}''_A = \dot{I}_B \dot{Z}''_B = \dot{V}$ και $\dot{I}_A \dot{Z}''_A = \frac{\dot{Z}''_A \cdot \dot{Z}''_B}{\dot{Z}''_A + \dot{Z}''_B} \cdot \dot{I}$

και: $\dot{I}_A = \frac{\dot{Z}''_B}{\dot{Z}''_A + \dot{Z}''_B} \cdot \dot{I}$ (2.74)

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{Z}''_A}{\dot{Z}''_A + \dot{Z}''_B} \cdot \dot{I} \quad (2.75)$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη των εξισώσεων 2.74 και 2.75 με την τάση \dot{V} προκύπτει:

$$\dot{I}_A \dot{V} = \frac{\dot{Z}''_B}{\dot{Z}''_A + \dot{Z}''_B} \cdot \dot{I} \cdot \dot{V}$$

ή $(\text{kVA})_A = \frac{\dot{Z}''_B}{\dot{Z}''_A + \dot{Z}''_B} \cdot (\text{kVA})_{\text{ολ}}$ (2.76)

και: $(\text{kVA})_B = \frac{\dot{Z}''_A}{\dot{Z}''_A + \dot{Z}''_B} \cdot (\text{kVA})_{\text{ολ}}$ (2.77)

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις 2.76 και 2.77 προκύπτει:

$$\frac{(\text{kVA})_A}{(\text{kVA})_B} = \frac{\dot{Z}''_B}{\dot{Z}''_A} \quad (2.78)$$

Το φορτίο σε (kVA) διαμοιράζεται αντιστρόφως ανάλογα προς τις σύνθετες αντιστάσεις των Μ/Σ.

Η εξίσωση 2.76 γράφεται:

$$(\text{kVA})_A = \frac{1}{\frac{\dot{Z}''_A}{\dot{Z}''_B} + 1} \cdot (\text{kVA})_{\text{ολ}} \quad (2.79)$$

απ' την οποία προκύπτει ότι ο διαμοιρασμός του φορτίου εξαρτάται από το λόγο των συνθέτων αντιστάσεων των Μ/Σ.

2.8.2 Διαμοιρασμός φορτίου μεταξύ δύο μονοφασικών Μ/Σ όταν οι τάσεις, χωρίς φορτίο, στα δευτερόλεπτα των Μ/Σ είναι άνισες.

Στο σχήμα 2.8γ δίδεται η συνδεσμολογία δύο μονοφασικών Μ/Σ σε παράλληλη λειτουργία, όταν οι τάσεις χωρίς φορτίο είναι άνισες. Σε αυτήν την περίπτωση οι Μ/Σ έχουν διαφορετικό λόγο μετασχηματισμού.

Θεωρήστε ότι \dot{V}_1 είναι η τάση τροφοδοσίας στο πρωτεύον του Μ/Σ, και K_A , K_B οι λόγοι μετασχηματισμού των Μ/Σ Α και Β αντίστοιχα.

Αν \dot{E}_{2A} και \dot{E}_{2B} οι ΗΕΔ των δευτερευόντων τυλιγμάτων, τότε ισχύει:

$$\dot{E}_{2A} = \frac{\dot{V}_1}{K_A} = \dot{V}_2 + \dot{I}_A \dot{Z}'' \quad (2.80)$$

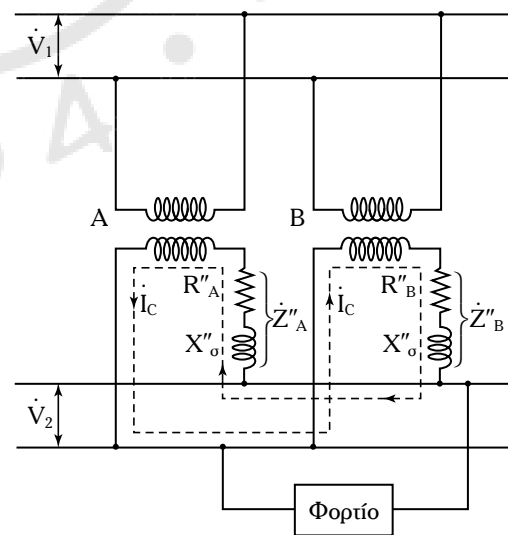
και $\dot{E}_{2B} = \frac{\dot{V}_1}{K_B} = \dot{V}_2 + \dot{I}_B \dot{Z}''_B$ (2.81)

και $\dot{V}_2 = \dot{I}_A \dot{Z}_L = (\dot{I}_A + \dot{I}_B) \cdot \dot{Z}_L$ (2.82)

όπου \dot{Z}_L η σύνθετη αντίσταση του φορτίου:

$$\dot{E}_{2A} = \dot{I}_A \dot{Z}_A = (\dot{I}_A + \dot{I}_B) \cdot \dot{Z}_L \quad (2.83)$$

$$\dot{E}_{2B} = \dot{I}_B \dot{Z}_B = (\dot{I}_A + \dot{I}_B) \cdot \dot{Z}_L \quad (2.84)$$



Σχ. 2.8γ

Παράλληλη λειτουργία δύο μονοφασικών Μ/Σ με διαφορετικό λόγο μετασχηματισμού.

αφαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις 2.83 και 2.84 προκύπτει:

$$\dot{E}_{2A} - \dot{E}_{2B} = \dot{I}_A Z_A'' - \dot{I}_B Z_B''$$

$$\dot{I}_A = \frac{(\dot{E}_{2A} - \dot{E}_{2B}) + \dot{I}_B Z_B''}{Z_A''} \quad (2.85)$$

Η εξίσωση 2.84 με βάση την εξίσωση 2.85 γίνεται:

$$\dot{E}_{2B} = \dot{I}_B Z_B'' + \frac{(\dot{E}_{2A} - \dot{E}_{2B}) + \dot{I}_B Z_B''}{Z_A''} \cdot \dot{Z}_L + \dot{I}_B \dot{Z}_L \quad (2.86)$$

$$\dot{I}_B \left(\dot{Z}_B + \dot{Z}_L + \frac{\dot{Z}_B}{Z_A''} \cdot \dot{Z}_L \right) = \frac{\dot{E}_{2B} Z_A'' - (\dot{E}_{2A} - \dot{E}_{2B}) \cdot \dot{Z}_L}{Z_A''}$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{E}_{2B} Z_A'' - (\dot{E}_{2A} - \dot{E}_{2B}) \cdot \dot{Z}_L}{Z_A'' \cdot \dot{Z}_B + \dot{Z}_L (Z_A'' + Z_B'')} \quad (2.87)$$

Με τον ίδιο τρόπο είναι:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_{2A} Z_B'' - (\dot{E}_{2A} Z_B'') \cdot \dot{Z}_L}{Z_A'' \cdot \dot{Z}_B + \dot{Z}_L (Z_A'' + Z_B'')} \quad (2.88)$$

Το ρεύμα που κυκλοφορεί στα δευτερεύοντα τυλίγματα, λόγω διαφορετικού λόγου μετασχηματισμού είναι:

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{E}_{2A} - \dot{E}_{2B}}{Z_A'' + Z_B''} \quad (2.89)$$

2.9 Συνθήκες παραλληλισμού.

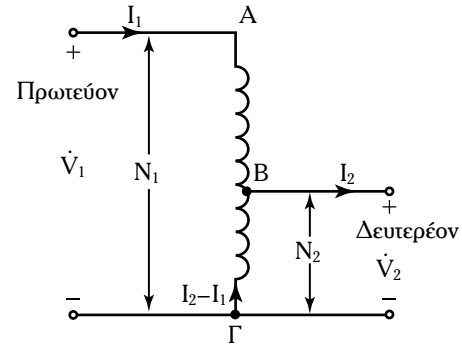
Οι τριφασικοί Μ/Σ για να λειτουργήσουν παράλληλα πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής συνθήκες:

- 1) Να έχουν τις ίδιες τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος αντίστοιχα.
- 2) Να ανήκουν στην ίδια ομάδα συνδέσεως.
- 3) Να έχουν τις ίδιες τάσεις βραχυκυκλώσεως.
- 4) Ο λόγος των ονομαστικών ισχύων να μην είναι μεγαλύτερος του 1:3.

2.10 Ειδικές κατηγορίες Μ/Σ.

2.10.1 Αυτομετασχηματιστής.

Ο *αυτομετασχηματιστής* (ΑΜ/Σ) είναι ένας Μ/Σ, ο οποίος αποτελείται από ένα μόνο τυλίγμα και ένα μέρος του είναι κοινό στο πρωτεύον και στο δευτερεύον (σχ. 2.10α). Ο ΑΜ/Σ χρησιμοποιείται για μικρές τιμές του λόγου μετασχηματισμού ($n_1 \approx n_2$) γιατί στην περίπτωση σφάλματος μπορεί στην πλευ-



Σχ. 2.10α

Αυτομετασχηματιστής υποβιβασμού τάσεως.

ρά της χαμηλής τάσεως να εφαρμόζεται η τάση του τυλίγματος υψηλής τάσεως. Ένας ΑΜ/Σ μπορεί να χρησιμοποιείται είτε ως υποβιβαστής τάσεως είτε ως ανυψωτής τάσεως αντίστοιχα.

Αν αμελήσουμε τις ωμικές πτώσεις τάσεως και το φαινόμενο της ροής σκεδάσεως στο τυλίγμα, τότε όταν η διάταξη του σχήματος 2.10α χρησιμοποιείται σαν Μ/Σ δύο τυλιγμάτων, ο λόγος μετασχηματισμού είναι:

$$K = \frac{n_1 - n_2}{n_2} = \frac{E_{AB}}{E_{B\Gamma}} = \frac{n_1}{n_2} - 1. \quad (2.90)$$

Όταν η διάταξη του σχήματος 2.10α, χρησιμοποιείται ως ΑΜ/Σ τότε ο λόγος μετασχηματισμού είναι:

$$K' = \frac{E_{AB} + E_{B\Gamma}}{E_{B\Gamma}} = \frac{E_{A\Gamma}}{E_{B\Gamma}} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (2.91)$$

Από τις εξισώσεις 2.90 και 2.91, έχουμε:

$$K' = 1 + K. \quad (2.92)$$

Από την εξίσωση 2.92, προκύπτει ότι ο λόγος μετασχηματισμού των δύο τυλιγμάτων είναι μεγαλύτερος στη συνδεσμολογία του ΑΜ/Σ.

1) Πλεονέκτημα φαινόμενης ισχύος στους ΑΜ/Σ.

Από τα τυλίγματα του ΑΜ/Σ δεν διέρχεται όλη η ισχύς, η οποία μεταφέρεται απ' τη μια πλευρά στην άλλη. Τα τυλίγματα του Μ/Σ όταν επανασυνδεθούν με τη συνδεσμολογία του ΑΜ/Σ, αυξάνεται η ονομαστική ικανότητα (φαινομένη ισχύς) της συσκευής.

Όταν ο ΑΜ/Σ (σχ. 2.10α), χρησιμοποιείται σαν Μ/Σ δύο τυλιγμάτων, η φαινομένη ισχύς είναι:

$$S_{M/\Sigma} = (V_1 - V_2) I_1 = (I_2 - I_1) V_2. \quad (2.93)$$

$$\text{Για τον ΑΜ/Σ έχουμε: } S_{AM/\Sigma} = V_1 I_1 = V_2 I_2. \quad (2.94)$$

Αλλά είναι:
$$\frac{V_1 - V_2}{V_2} = K = \frac{I_2 - I_1}{I_1}$$

η οποία δίδει $V_1 - V_2 = KV_2$, και $I_1 = \frac{1}{1+K} I_2$.

Η εξίσωση 2.93, γίνεται:

$$S_{M/\Sigma} = \frac{K}{K+1} V_2 I_2 = \frac{K}{K+1} S_{AM/\Sigma} \quad (2.95)$$

ή
$$S_{AM/\Sigma} = \left(\frac{1}{K} + 1 \right) S_{M/\Sigma} = \frac{n_1}{n_1 - n_2} S_{M/\Sigma}. \quad (2.96)$$

Τελικά, είναι:
$$S_{AM/\Sigma} > S_{M/\Sigma}. \quad (2.97)$$

Από την εξίσωση 2.97, η φαινόμενη ισχύς του AM/Σ είναι μεγαλύτερη από τη φαινόμενη ισχύ του M/Σ δύο τυλιγμάτων.

2) Οικονομία χαλκού και σιδήρου στους AM/Σ.

Στους αγωγούς των τυλιγμάτων θεωρούμε σταθερή την πυκνότητα ρεύματος. Σ' αυτήν την περίπτωση η διατομή των αγωγών και το υλικό, που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των τυλιγμάτων είναι ανάλογα του ρεύματος, που ρέει στους αγωγούς των τυλιγμάτων. Το βάρος του υλικού, που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των τυλιγμάτων ενός AM/Σ και ενός M/Σ, για την ίδια φαινόμενη ισχύ, είναι:

$$\begin{aligned} \frac{G_{AM/\Sigma}}{G_{M/\Sigma}} &= \frac{I_1(n_1 - n_2) + (I_2 - I_1)n_2}{I_1 n_1 + I_2 n_2} = \\ &= 1 - \frac{2I_1 n_2}{2I_1 n_1} = 1 - \frac{n_2}{n_1} = 1 - \frac{V_2}{V_1}. \end{aligned} \quad (2.98)$$

Ισχύει: $I_1 n_1 = I_2 n_2$.

όπου G το βάρος του υλικού, με το οποίο κατασκευάζονται τα τυλιγμάτων. Από την εξίσωση 2.98, έχουμε:

$$G_{M/\Sigma} - G_{AM/\Sigma} = \frac{1}{K'} G_{M/\Sigma}. \quad (2.99)$$

Αν $\frac{1}{K'} = 0,1$, τότε έχουμε 10% μείωση βάρους του χαλκού (υλικό των τυλιγμάτων), ενώ όταν $\frac{1}{K'} = 0,9$, τότε η αντίστοιχη μείωση του βάρους του υλικού είναι 90%.

Ο AM/Σ υπολογίζεται για μικρότερη ισχύ από την αντίστοιχη, την οποία προσφέρει στο φορτίο, οπότε και ο σιδηροπυρήνας θα είναι μικρότερων διαστάσεων και βάρους (οικονομία σιδήρου).

Τελικά, τα **πλεονεκτήματα** των AM/Σ είναι:

- 1) Πλεονέκτημα φαινομένης ισχύος.
- 2) Οικονομία χαλκού.
- 3) Οικονομία σιδήρου.
- 4) Μικρές πτώσεις τάσεως. Λόγω του μικρότερου μήκους του χάλκινου αγωγού, του μοναδικού τυλιγματος, και της μικρότερης τιμής του ρεύματός του, οι ωμικές αντιστάσεις, οι αντιδράσεις σκεδάσεως και αντίστοιχα οι πτώσεις τάσεως είναι μειωμένες και

5) ο μεγαλύτερος βαθμός αποδόσεως. Επειδή το βάρος του χαλκού και του σιδήρου και του αντίστοιχου ρεύματος είναι μειωμένο, οι αντίστοιχες απώλειες χαλκού και πυρήνα, είναι μειωμένες, οπότε ο βαθμός αποδόσεως είναι μεγάλος.

Τα **μειονεκτήματα** των AM/Σ είναι ότι:

- 1) Δεν υπάρχει γαλβανική απομόνωση του πρωτεύοντος από το δευτερεύον και
- 2) δημιουργείται κίνδυνος ηλεκτροπληξίας.

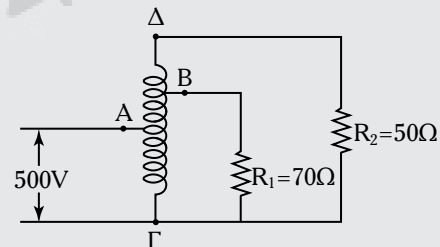
Ο AM/Σ χρησιμοποιείται, κυρίως, ως υποβιβαστής τάσεως για την εκκίνηση μεγάλων ασυγχρόνων κινητήρων και στη σύνδεση δύο τριφασικών συστημάτων διαφορετικών τάσεων, π.χ. 150/400 kV.

- Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Δίδεται ο ακόλουθος AM/Σ (σχ. 2.10β) ο οποίος τροφοδοτεί φορτία $R_1 = 70 \Omega$ και $R_2 = 50 \Omega$. Έστω $n_{A\Gamma} = 110$, $n_{\Delta\Gamma} = 250$, $n_{AB} = 60$ και $n_{B\Delta} = 60$ ο αριθμός σπειρών των τμημάτων AΓ, ΔΓ, AB και ΒΔ του τυλιγματος του AM/Σ, για τον οποίο αμελούμε τις απώλειες χαλκού και πυρήνα.

Να υπολογίσετε τα ρεύματα στους διάφορους κλάδους του κυκλώματος του AM/Σ.



Σχ. 2.10β

Είναι 500 V, η τάση τροφοδοσίας του AM/Σ.

Λύση.

Είναι: $V_{A\Gamma} = 500 \text{ V}$, $n_{A\Gamma} = 110$.

Τάση ανά σπείρα $500/110 = 4,54 \text{ V}$.

Τάση στα άκρα του φορτίου $50 \Omega = N_{\Delta\Gamma} \cdot \text{τάση ανά σπείρα} = 250 \cdot 4,54 = 1.135 \text{ V}$.

Το ρεύμα στην αντίσταση των 50Ω είναι:

$$1.135 / 50 = 22,7 \text{ A}$$

Τάση στα άκρα της αντιστάσεως των $70 \Omega = N_{B\Gamma} \cdot \text{τάση ανά σπείρα} = 170 \cdot 4,54 = 771,8 \text{ V}$.

Ρεύμα στην αντίσταση R_{Γ} : $771,8 / 70 = 11 \text{ A}$.

Τα συνολικά kVA στην έξοδο του AM/Σ είναι:

$$(771,8 \cdot 11 + 1.135 \cdot 22,7) \approx 34 \text{ kVA}$$

Δεν λαμβάνομε υπόψη τις απώλειες χαλκού και πυρήνα στον AM/Σ, οπότε:

$$(\text{kVA})_{\text{in}} = (\text{kVA})_{\text{out}} = 34 \text{ kVA}$$

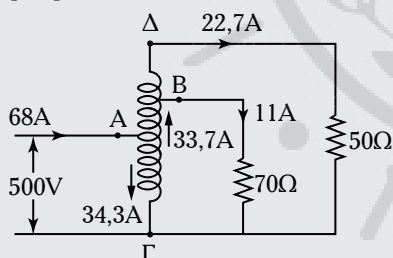
Το ρεύμα το οποίο παρέχει η πηγή τροφοδοσίας στον AM/Σ είναι: $34.000 / 500 = 68 \text{ A}$.

Το ρεύμα $I_{B\Delta}$ στο τμήμα του τυλιγματος ΒΔ είναι: $22,7 \text{ A}$.

Το ρεύμα στο τμήμα του τυλιγματος ΑΒ είναι $22,7 + 11 = 33,7 \text{ A}$.

Το ρεύμα στο τμήμα του τυλιγματος ΑΓ είναι $68 - 33,7 = 34,3 \text{ A}$.

Στο σχήμα 2.10γ δίδονται οι φορές των αντιστοίχων ρευμάτων.



Σχ. 2.10γ

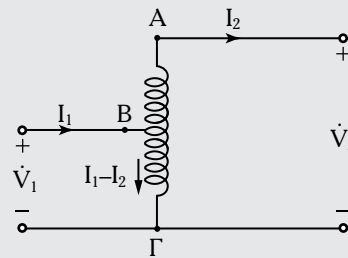
Άσκηση 2.

Δίδεται ο ακόλουθος πραγματικός μονοφασικός Μ/Σ 2.000/200 V, 20 kVA (σχ. 2.10δ), του οποίου οι απώλειες πυρήνα, όταν τροφοδοτείται με τάση 2.000 V είναι 120 W, ενώ οι απώλειες χαλκού στο πλήρες φορτίο είναι 300 W. Ο Μ/Σ συνδέεται σαν AM/Σ ανυψωτής τάσεως. Στο τμήμα ΑΒ του τυλιγματος αντιστοιχεί τάση 200 V, ενώ στο τμήμα ΒΓ τάση 2.000 V. Να υπολογίσετε:

1) Την τάση στην πλευρά της χαμηλής τάσεως (ΧΤ) και στην πλευρά της υψηλής τάσεως (ΥΤ).

2) Τα kVA του AM/Σ και

3) την απόδοση στο πλήρες φορτίο με ΣΙ 0,8 επαγ.. Η απόδοση του Μ/Σ δύο τυλιγμάτων είναι 97,44%.



Σχ. 2.10δ

Λύση.

1) Είναι: $V_1 (\text{Χ.Τ.}) = 2.000 \text{ V}$

$$V_2 (\text{Υ.Τ.}) = 2.000 + 200 = 2.200 \text{ V}$$

2) $I_2 = \frac{20 \cdot 1.000}{200} = 100 \text{ A}$

$$I_1 - I_2 = 10 \text{ A}, I_1 = 110 \text{ A}$$

$$\text{kVA} = \frac{2.200 \cdot 100}{1.000} = 220 = \frac{2.200 \cdot 110}{1.000} = 220$$

Όταν ο Μ/Σ των 20 kVA δύο τυλιγμάτων συνδέεται ως AM/Σ, η φαινόμενη ισχύς γίνεται 220 kVA.

3) Οι συνολικές απώλειες είναι: $120 + 300 = 420 \text{ W}$.

Η ισχύς εξόδου στο πλήρες φορτίο του AM/Σ είναι: $2.200 \cdot 100 \cdot 0,8 = 176 \text{ W}$.

$$\text{Η απόδοση είναι: } n = 1 - \frac{420}{176 \cdot 420} = 99,76\%$$

Η απόδοση του Μ/Σ δύο τυλιγμάτων είναι 97,4%. Όταν συνδέεται ως AM/Σ η απόδοση γίνεται 99,76%.

2.10.2 Μ/Σ μετρήσεων.

Οι Μ/Σ μετρήσεων είναι οι ακόλουθοι:

1) Ο Μ/Σ τάσεως.

Η σύνδεση ενός βολτομέτρου για μέτρηση μιας τιμής υψηλής τάσεως παρουσιάζει τις εξής δυσχέρειες:

1) Υψηλές τιμές αντιστάσεων σε σειρά με το βολτόμετρο.

- 2) Μεγάλες απορροφώμενες ισχύες.
- 3) Κινδύνους ηλεκτροπληξίας για τον χρήστη.

Συμφέρει να μειωθεί η τιμή της τάσεως, η οποία πρέπει να μετρηθεί μέσω ενός Μ/Σ συγκεκριμένου και σταθερού λόγου μετασχηματισμού. Ένας τέτοιος Μ/Σ ονομάζεται **Μ/Σ τάσεως** [σχ. 2.10ε(α)].

Για να είναι ανεξάρτητος ο λόγος μετασχηματισμού από τις πτώσεις τάσεως στα τυλίγματα, πρέπει να ισχύουν τα ακόλουθα:

1) Ο Μ/Σ τάσεως να λειτουργεί, σχεδόν, στις συνθήκες χωρίς φορτίο. Οπότε, μεταξύ της τάσεως V_2 (βολτομέτρου) και της τάσεως V_1 (την οποία επιθυμούμε να μετρήσουμε) να ισχύει:

$$V_1 = \frac{n_1}{n_2} V_2.$$

2) Να περιοριστούν οι πτώσεις τάσεως στα τυλίγματα. Σ' αυτήν την περίπτωση, το τεχνικό ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στις σύνθετες αντιστάσεις και στα ρεύματα, τα οποία κυκλοφορούν σ' αυτές:

α) Προκειμένου να μειωθούν οι τιμές των συνθέτων αντιστάσεων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, η μαγνητική σύνδεση των τυλιγμάτων κατασκευάζεται έτσι, ώστε να μειώνεται, σημαντικά, το φαινόμενο της ροής σκεδάσεως. Τα τυλίγματα κατασκευάζονται με μικρές αντιστάσεις.

β) Προκειμένου να μειωθούν οι πτώσεις τάσεως, στη σύνθετη αντίσταση σκεδάσεως του πρωτεύοντος, ο πυρήνας του Μ/Σ (ο Μ/Σ πρέπει να περιλαμβάνει και το ρεύμα μαγνητίσεως), ελασματοποιείται σε πολύ λεπτά ελάσματα, μεγάλης μαγνητικής διαπερατότητας, οπότε μειώνεται η μαγνητική του αντίσταση.

Η χαρακτηριστική καμπύλη μαγνητίσεως του Μ/Σ τάσεως πρέπει να είναι γραμμική στο σημείο λειτουργίας του, ώστε να αποκλείονται φαινόμενα μαγνητικού κορεσμού, τα οποία εισάγουν τη μη γραμμικότητα στη σχέση μεταξύ της τάσεως του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλιγματος. Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής πρέπει να είναι μειωμένη. Η σωστή επιλογή του μονωτικού υλικού των σπειρών των τυλιγμάτων του Μ/Σ παίζει σημαντικό ρόλο.

2) Ο Μ/Σ ρεύματος.

2) Ο Μ/Σ ρεύματος.

Ο Μ/Σ ρεύματος επιτρέπει τη μέτρηση μεγάλων τιμών ρεύματος. Το πρωτεύον τυίλιγμα του Μ/Σ [σχ. 2.10ε(β)] συνδέεται σε σειρά με την ηλεκτρική γραμμή, το ρεύμα της οποίας επιθυμούμε να μετρήσουμε.

Προκειμένου να υπάρχει γραμμικότητα μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ρεύματος, ο Μ/Σ πρέπει να λειτουργεί στις συνθήκες βραχυκυκλώσεως. Σε αυτές τις συνθήκες ισχύει: $I_1 = \frac{n_2}{n_1} I_2$.

Για τη σωστή λειτουργία του Μ/Σ ρεύματος, πρέπει το ρεύμα κενής λειτουργίας (άθροισμα του ρεύματος μαγνητίσεως και του ρεύματος απωλειών πυρήνα) να μην λαμβάνεται υπόψη. Για να διατηρηθεί σε πολύ χαμηλές τιμές το ρεύμα μαγνητίσεως πρέπει να μειωθεί η μαγνητική ροή και η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα. Οι Μ/Σ ρεύματος λειτουργούν με χαμηλές τιμές μαγνητικών ροών, οπότε πρέπει οι τιμές της σύνθετης αντιστάσεως του δευτερεύοντος να είναι χαμηλές.

Για τη μείωση των τιμών της σύνθετης αντιστάσεως του δευτερεύοντος ισχύουν τα εξής:

1) Τα τυλίγματα του δευτερεύοντος κατασκευάζονται με υλικά χαμηλής αντιστάσεως.

2) Οι σπείρες του δευτερεύοντος τοποθετούνται κατά τέτοιο τρόπο στον τορροειδή πυρήνα, ώστε να αποκλείονται οι ροές σκεδάσεως.

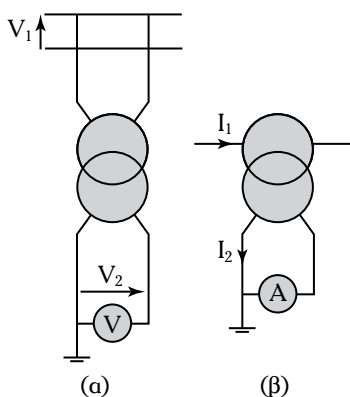
3) Το μέσο μήκος του μαγνητικού κυκλώματος του πυρήνα πρέπει να είναι το μικρότερο δυνατό. Αυτό συμβάλλει στην μικρή τιμή της μαγνητικής αντιστάσεως του πυρήνα.

2.11 Συντήρηση, βλάβες και επισκευές Μ/Σ.

Στους Μ/Σ κάθε μήνα πρέπει να πραγματοποιούνται οι ακόλουθοι έλεγχοι:

1) Έλεγχος ελαίου, στην περίπτωση του Μ/Σ ελαίου. Κάθε τέσσερις μήνες πρέπει να ελέγχεται η διηλεκτρική αντοχή του ελαίου (μόνο για Μ/Σ ελαίου).

2) Έλεγχος θερμοκρασίας, η οποία αναπτύσσεται κατά τη λειτουργία του και καταγραφή της.



Σχ. 2.10ε

(α) Μ/Σ τάσεως, (β) Μ/Σ ρεύματος.

Πίνακας 2.11
Βλάβες, πιθανές αιτίες και απαιτούμενες επισκευές Μ/Σ.

α/α	Βλάβη	Πιθανή αιτία	Απαιτούμενη επισκευή
1.	Ο Μ/Σ υπερθερμαίνεται.	α) Υπερφόρτιση. β) Βραχυκύκλωμα στα τυλίγματα. γ) Βραχυκύκλωμα στα ελάσματα του πυρήνα. δ) Ο χώρος τοποθέτησης του Μ/Σ δεν αερίζεται σωστά.	α) Να μειωθεί το φορτίο ή να τοποθετηθεί μεγαλύτερος Μ/Σ. β) Να αντικατασταθούν τα βραχυκυκλωμένα τυλίγματα. γ) Να επισκευαστούν τα ελάσματα. δ) Να ληφθούν μέτρα για τον σωστό αερισμό του χώρου.
2.	Ο αυτόματος διακόπτης ανοίγει ή τήκονται οι ασφάλειες.	α) Βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγών φάσεων ή προς τη γη. β) Διάσπαση μονώσεως των ακροδεκτών ή βλάβη στη μόνωση του ζυγίσματος.	α) Να βρεθεί το βραχυκύκλωμα και να επισκευαστεί. β) Να γίνει έλεγχος με Μέγκερ ⁶ . Να αντικατασταθούν οι ακροδέκτες και να γίνει επισκευή του τυλίγματος.

3) Έλεγχος του συστήματος ενδεικτικών λυχνίων, το οποίο σχετίζεται με την κανονική λειτουργία του.

4) Οπτικός έλεγχος των συνδέσεων των καλωδίων με το δίκτυο.

Στον πίνακα 2.11 δίδονται οι βλάβες με τις πιθανές αιτίες και τις αντίστοιχες απαιτούμενες επισκευές στους Μ/Σ.

– Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Δύο Μ/Σ, ο ένας 50 kVA, 2.400/240 V έχει σύνθετη αντίσταση 4% και ο άλλος 75 kVA, 2.400/240 V έχει σύνθετη αντίσταση 6%, συνδέονται παράλληλα και τροφοδοτούν ένα φορτίο 125 kVA. Να βρείτε πώς διαμοιράζεται το φορτίο μεταξύ των Μ/Σ.

Λύση.

Είναι:

$$(kVA)_A = \frac{\frac{50}{4}}{\frac{50}{4} + \frac{75}{6}} \cdot 125 = 62,5 \text{ kVA}$$

$$\text{και } (kVA)_B = \frac{\frac{75}{6}}{\frac{50}{4} + \frac{75}{6}} \cdot 125 = 62,5 \text{ kVA.}$$

Ο Μ/Σ των 50 kVA υπερφορτίζει σε σχέση με τον Μ/Σ των 75 kVA.

Άσκηση 2.

Δύο μονοφασικοί Μ/Σ με τον ίδιο λόγο μετασχηματισμού έχουν σύνθετες αντιστάσεις ανηγμένες στο δευτερεύον τυλίγμα $(0,5 + j3) \Omega$ και $(0,6 + j10) \Omega$ αντίστοιχα.

Να βρείτε το φορτίο που αναλαμβάνει κάθε Μ/Σ, όταν και οι δύο τροφοδοτούν φορτίο 100 kW υπό συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ..

Λύση.

Έστω Α και Β είναι οι Μ/Σ που λειτουργούν παράλληλα και τροφοδοτούν το φορτίο των 100 kW.

$$\begin{aligned} Z'_A &= (0,5 + j3) = 3,04 \angle 80,6^\circ \Omega \\ \text{Είναι: } Z'_B &= (0,6 + j10) = 10,02 \angle 86,6^\circ \Omega \\ Z'_A + Z'_B &= 1,1 + j13 = 13,05 \angle 85,2^\circ \Omega. \end{aligned}$$

⁶ Το Μέγκερ είναι όργανο μετρήσεως των αντιστάσεων μόνωσης των τυλιγμάτων του Μ/Σ.

Τα kVA του φορτίου είναι:

$$(kVA)_L = \frac{100}{0,8} = 125$$

$$(kVA)_{\text{ολ}} = (kVA)_L = 125 \angle -36,9^\circ$$

$$(kVA)_A = (kVA)_{\text{ολ}} = \frac{Z_B''}{Z_A'' + Z_B''} = \frac{125 \angle -36,9^\circ \cdot 3,04 \angle 80,06^\circ}{13,5 \angle 85,2^\circ} = 29,1 \angle 41,5^\circ$$

$$\text{ή } 96 \cdot \text{ συν}35,5^\circ = 78,2 \text{ kW}$$

$$(kVA)_B = (kVA)_{\text{ολ}} = \frac{Z_A''}{Z_A'' + Z_B''} = \frac{125 \angle -36,9^\circ \cdot 3,04 \angle 80,06^\circ}{13,5 \angle 85,2^\circ} = 29,1 \angle 41,5^\circ$$

$$\text{ή } 29,1 \cdot \text{ συν}41,5^\circ = 21,8 \text{ kW.}$$

Παρατήρηση: Ο Μ/Σ Α υπερφορτώνεται.

Άσκηση 3.

Δύο Μ/Σ των 800 kVA έκαστος συνδέονται παράλληλα. Ο ένας Μ/Σ έχει ωμική αντίσταση σκεδάσεως 1% και 4% αντίστοιχα, ενώ ο άλλος έχει ωμική αντίσταση 1,5% και 6% αντίστοιχα. Να υπολογίσετε το φορτίο, που αναλαμβάνει κάθε Μ/Σ με τον αντίστοιχο συντελεστή ισχύος, όταν τροφοδοτούν φορτίο 100 kVA υπό συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ..

Λύση.

$$\text{Είναι: } \text{συν}^{-1}0,8 = -36,87^\circ$$

$$(kVA)_{\text{ολ}} = 100 \angle -36,87^\circ$$

$$Z_A'' = (1 + j4) = 4,12 \angle 76^\circ$$

$$Z_B'' = (1,5 + j6) = 6,18 \angle 76^\circ$$

$$Z_A'' + Z_B'' = (2,5 + j10) = 10,3 \angle 76^\circ$$

Το φορτίο που αναλαμβάνει ο Μ/Σ Α είναι:

$$(kVA)_B = (kVA)_{\text{ολ}} \cdot \frac{Z_B''}{Z_A'' + Z_B''} = 100 \angle -36,87^\circ \cdot \frac{6,18 \angle 76^\circ}{10,3 \angle 76^\circ} = 60 \angle -36,87^\circ \text{ kVA}$$

$$\text{ή } = 48 \text{ kW, } (\Sigma I = 0,8 \text{ επαγ.})$$

Το φορτίο που αναλαμβάνει ο Μ/Σ Β είναι:

$$(kVA)_B = (kVA)_{\text{ολ}} \cdot \frac{Z_A''}{Z_A'' + Z_B''} = 100 \angle -36,87^\circ \cdot \frac{4,12 \angle 76^\circ}{10,3 \angle 76^\circ} = 40 \angle -36,87^\circ \text{ kVA}$$

$$\text{ή } = 32 \text{ kW } (\Sigma I = 0,8 \text{ επαγ.}).$$

Άσκηση 4.

Δύο Μ/Σ 6.600/250 Ω έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά βραχυκυκλώσεως:

	V	A	W
Μ/Σ Α	200	30	1.200
Μ/Σ Β	120	20	1.500

Οι παραπάνω τιμές μετρήθηκαν από την πλευρά υψηλής τάσεως, ενώ η πλευρά χαμηλής τάσεως είναι βραχυκυκλωμένη.

Να υπολογίσετε προσεγγιστικά το ρεύμα και το συντελεστή ισχύος για κάθε Μ/Σ όταν λειτουργούν παράλληλα και τροφοδοτούν φορτίο 300 kW υπό συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ..

Λύση.

Ισοδύναμη αντίσταση του Μ/Σ Α:

$$R_A = \frac{1.200}{30^2} = 1,333 \Omega.$$

Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ:

$$|Z_A''| = \frac{200}{30} = 6,667 \Omega.$$

Ισοδύναμη αντίδραση σκεδάσεως του Μ/Σ Α:

$$X_{\sigma A} = \sqrt{6,667^2 - 1,333^2} = 6,53 \Omega.$$

Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ Α:

$$\dot{Z}_A = (1,333 + j6,53) = 6,667 \angle 78,7^\circ \Omega.$$

Ισοδύναμη αντίσταση του Μ/Σ Β:

$$R_B = \frac{1.500}{20^2} = 3,75 \Omega.$$

Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ Β:

$$|Z_B''| = \frac{120}{20} = 6 \Omega.$$

Ισοδύναμη αντίδραση σκεδάσεως του Μ/Σ Β:

$$X_{\sigma B} = \sqrt{6^2 + 3,75^2} = 4,684 \Omega.$$

Είναι: $Z_B'' = (3,75 + j4,684) = 6 \angle 51,3^\circ \Omega.$

Είναι:

$$\begin{aligned} Z_A'' + Z_B'' &= (1,3333 + j6,53) + (3,75 + j4,684) = \\ &= (5,083 + j11,219) = 12,3 \angle 65,6^\circ. \end{aligned}$$

Συνολικό φορτίο:

$$(kVA)_{\sigma\lambda} = \frac{300}{0,8} \angle -36,89^\circ = 375 \angle -36,89^\circ.$$

Συνολικό ρεύμα φορτίου:

$$I_{\sigma\lambda} = \frac{kVA}{V_1} = \frac{375 \cdot 1.000}{6.600} = 56,82 \angle -36,89^\circ \text{ A.}$$

Ο Μ/Σ Α παρέχει ρεύμα:

$$\begin{aligned} I_B &= I_{\sigma\lambda} \cdot \frac{Z_A''}{Z_A'' + Z_B''} = \\ &= \frac{56,82 \angle -36,89^\circ \cdot 6,66 \angle 78,7^\circ}{12,3 \angle 65,6^\circ} = \\ &= 30,8 \angle -23,8^\circ \text{ A.} \end{aligned}$$

Ο συντελεστής ισχύος του Μ/Σ Β είναι:

$$\cos(-23,8^\circ) = 0,915 \text{ επαγ.}$$

Άσκηση 5.

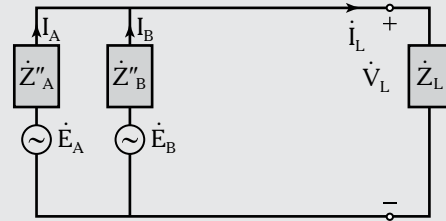
Δύο Μ/Σ (Α και Β) συνδέονται παράλληλα και τροφοδοτούν φορτίο $(2 + j1,5) \Omega$ (σχ. 2.11). Οι σύνθετες αντιστάσεις των Μ/Σ ανηγμένες στο δευτερεύον είναι $Z_A'' = (0,15 + j0,5) \Omega$ και $Z_B'' = (0,1 + j0,6) \Omega$ αντίστοιχα. Οι τάσεις χωρίς φορτίο των Μ/Σ είναι $\dot{E}_A = 207 \angle 0^\circ \text{ V}$ και $\dot{E}_B = 205 \angle 0^\circ \text{ V}$ αντίστοιχα.

Να υπολογίσετε την ισχύ εξόδου και τον συντελεστή ισχύος κάθε Μ/Σ.

Λύση.

Είναι: $\dot{I}_L = \dot{I}_A + \dot{I}_B$

$$\dot{V}_L = \dot{I}_L \cdot \dot{Z}_L = (2 + j1,5) \cdot (\dot{I}_A + \dot{I}_B)$$



Σχ. 2.11

$$\begin{aligned} \text{(α)} \quad \dot{E}_A &= \dot{V}_L + \dot{I}_A \dot{Z}_A \Rightarrow \\ &\Rightarrow (207 + j0) = (2 + j1,5) \end{aligned}$$

$$(\dot{I}_A + \dot{I}_B) + (0,1 + j0,6) \dot{I}_B$$

$$\text{ή} \quad (2,16 + j2) \dot{I}_A + (2 + j1,6) \dot{I}_B = 207 + j0 \quad (1)$$

$$\text{(β)} \quad \dot{E}_B = \dot{V}_L + \dot{I}_B \dot{Z}_B$$

$$\text{ή} \quad (205 + j0) = (2 + j1,5)(\dot{I}_A + \dot{I}_B) + (0,1 + j0,6) \dot{I}_B$$

$$\text{ή} \quad (2 + j1,5) \dot{I}_A + (2,1 + j2,1) \dot{I}_B = 205 + j0 \quad (2)$$

Λύνοντας ως προς \dot{I}_A, \dot{I}_B τις εξισώσεις (1) και (2) προκύπτει:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{(2,1 + j2,1)(207 + j0) - (2 + j1,5)(205 + j0)}{(2,15 + j2,0)(2,1 + j2,1) - (2 + j1,5)(2 + j1,5)} = \\ &= \frac{24,7 + j127,2}{-1,435 + j2,715} = \frac{129,7 \angle 79^\circ}{3,07 \angle 117,9^\circ} = \\ &= 42,26 \angle -38,9^\circ \text{ A} = (32,89 - j26,55) \text{ A} \end{aligned}$$

Και:

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= \frac{(207 + j0)(2 + j1,5) - (205 + j0)(2,15 + j2,0)}{(2 + j1,5)(2 + j1,5) - (2,1 + j2,1)(2,15 + j2,0)} = \\ &= \frac{26,75 + j99,5}{-1,435 + j2,715} = \frac{103 \angle 75^\circ}{3,07 \angle 117,9^\circ} = \\ &= 33,56 \angle -42,9^\circ = (24,58 - j22,89) \text{ A} \end{aligned}$$

Η τάση φορτίου:

$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= (\dot{I}_A + \dot{I}_B) \dot{Z}_L = \\ &= (32,69 + j26,55 + 24,58 - j22,84) (2 + j1,5) = \\ &= (57,47 + j49,39) (2 + j1,5) = \\ &= 189 - j12,58 = 189 \angle -3,9^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\Sigma I)_A &= 3,9^\circ - (-38,9^\circ) = 35^\circ \Rightarrow \\ &\Rightarrow \cos 35^\circ = 0,819 \text{ επαγ.} \end{aligned}$$

$$(\Sigma I)_B = -3,9^\circ - (-42,9^\circ = 39^\circ \Rightarrow \\ \Rightarrow \cos 39^\circ = 0,777) \text{ (επαγ.)}$$

$$(P_{\text{out}})_A = \frac{V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi_A}{1.000} \text{ kW} = \\ = \frac{189,4 \cdot 42,26 \cdot 0,819}{1.000} = 6,55 \text{ kW}$$

$$(P_{\text{out}})_B = \frac{189,4 \cdot 33 \cdot 56 \cdot 0,777}{1.000} = 4,94 \text{ kW.}$$

2.12 Ερωτήσεις.

- 1) Γιατί είναι χρήσιμος ο Μ/Σ στα συστήματα ισχύος;
- 2) Σε ποιες κατηγορίες κατατάσσονται οι Μ/Σ ανάλογα με την κατασκευή του πυρήνα τους;
- 3) Ποια είναι τα τεχνικά χαρακτηριστικά των Μ/Σ;
- 4) Ποια είναι η αρχή λειτουργίας του Μ/Σ;
- 5) Γιατί η χρήσιμη μαγνητική ροή ενός Μ/Σ είναι ανεξάρτητη απ' το ρεύμα φορτίου;
- 6) Με ποιον τρόπο το ρεύμα του πρωτεύοντος αυτορρυθμίζεται όταν το ρεύμα στο δευτερεύον ενός Μ/Σ αυξάνεται;
- 7) Ποιες είναι οι ιδιότητες των ιδανικών Μ/Σ και η φυσική τους σημασία;
- 8) Ποιες είναι οι απώλειες σε έναν πραγματικό μονοφασικό Μ/Σ, πού οφείλονται και πώς ελαχιστοποιούνται;
- 9) Γιατί οι απώλειες πυρήνα ενός Μ/Σ, πρακτικά, είναι ανεξάρτητες του ρεύματος φορτίου;
- 10) Πόσα μαγνητικά πεδία αναπτύσσονται στη λειτουργία με φορτίο του πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ και ποιος είναι ο ρόλος τους;
- 11) Ποιες είναι οι εξισώσεις λειτουργίας ενός πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ και η φυσική του σημασία;
- 12) Σχεδιάστε και εξηγήστε τα ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα ενός πραγματικού μονοφασικού Μ/Σ.
- 13) Για ποιον λόγο γίνονται τα πειράματα (δοκιμές) χωρίς φορτίο και σε βραχυκύκλωση σε έναν Μ/Σ;
- 14) Πότε ένας πραγματικός μονοφασικός Μ/Σ έχει τη μέγιστη απόδοση;
- 15) Τι συμπεράσματα προκύπτουν από τη διακύμανση τάσεως των Μ/Σ;
- 16) Ποιες είναι οι βασικές συνδεσμολογίες των τριφασικών Μ/Σ και ποια είναι τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους;

- 17) Πώς λειτουργεί ένας ΑΜ/Σ;
- 18) Πώς λειτουργεί ένας Μ/Σ τάσεως;
- 19) Πώς λειτουργεί ένας Μ/Σ ρεύματος;
- 20) Με ποιες προϋποθέσεις ένας Μ/Σ ονομαστικής συχνότητας 60 Hz μπορεί να λειτουργήσει στα 50 Hz;

2.13 Προτεινόμενες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Ιδανικός μονοφασικός Μ/Σ, 50 kVA, 400/2.000 V, τροφοδοτεί φορτίο των 40 kVA με τάση 2.000 V και υπό συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ..

Να υπολογίσετε:

- 1) Τη σύνθετη αντίσταση φορτίου.
- 2) Τη σύνθετη αντίσταση φορτίου ανηγμένη στο πρωτεύον τύλιγμα.

Άσκηση 2.

Το φορτίο που συνδέεται στο δευτερεύον ενός ιδανικού Μ/Σ είναι 10 kVA και η σύνθετη αντίστασή του είναι: $\dot{Z}_L = 2 \angle -32^\circ \Omega$. Η σύνθετη αντίσταση του φορτίου ανηγμένη στο πρωτεύον είναι $\dot{Z}'_L = 32 \angle 32^\circ \Omega$.

Να υπολογίσετε τον λόγο σπειρών και το ρεύμα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος.

Άσκηση 3.

Ιδανικός μονοφασικός Μ/Σ με λόγο σπειρών 10:1 τροφοδοτεί με τάση 39,8 kV, ενώ η ονομαστική του ικανότητα είναι 1.000 kVA με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ..

Να υπολογίσετε τη σύνθετη αντίσταση του φορτίου συνδεδεμένου στο δευτερεύον.

Άσκηση 4.

Μονοφασικός Μ/Σ λειτουργεί χωρίς φορτίο. Τροφοδοτείται με τάση 230 V, 50 Hz και απορροφά ρεύμα 5 A υπό συντελεστή ισχύος 0,3 επαγ..

Ο αριθμός των σπειρών του πρωτεύοντος τυλίγματος είναι 200.

Να υπολογίσετε:

- 1) Τη μέγιστη μαγνητική ροή στον πυρήνα Μ/Σ.
- 2) Τις απώλειες πυρήνα.
- 3) Το ρεύμα μαγνητίσεως.

Άσκηση 5.

Ο αριθμός σπειρών ενός μονοφασικού Μ/Σ είναι 180 και 90 του δευτερεύοντος και του πρωτεύοντος αντίστοιχα. Η ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος είναι 0,067 Ω, ενώ του δευτερεύοντος είναι 0,233 Ω.

Να υπολογίσετε:

1) Την ωμική αντίσταση ανηγμένη στο πρωτεύον τύλιγμα.

2) Την ωμική αντίσταση ανηγμένη στο δευτερεύον τύλιγμα.

3) Την συνολική σύνθετη αντίσταση ανηγμένη στο πρωτεύον.

3) Την συνολική σύνθετη αντίσταση ανηγμένη στο δευτερεύον.

Άσκηση 6.

Πραγματικός μονοφασικός Μ/Σ 10 kVA, 2.000/440 V, 50 Hz έχει:

$$R_1 = 5,5 \Omega \quad X_{\sigma 1} = 12 \Omega$$

$$R_2 = 0,2 \Omega \quad X_{\sigma 2} = 0,45 \Omega$$

Ο δείκτης 1 αναφέρεται στο πρωτεύον, ενώ ο δείκτης 2 στο δευτερεύον.

Να υπολογίσετε την τάση στο δευτερεύον όταν ο

Μ/Σ λειτουργεί στο πλήρες φορτίο και υπό συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ. ενώ τροφοδοτείται με τάση 2.000 V.

Άσκηση 7.

Μονοφασικός Μ/Σ 25 kVA 2.200/600 V, 60 Hz χρησιμοποιείται σαν υποβιβαστής τάσεως και έχει:

$$R_{(Y.T.)} = 1,40 \Omega$$

$$R_{(X.T.)} = 0,11 \Omega$$

$$X_{\sigma(Y.T.)} = 3,20 \Omega$$

$$X_{\sigma(X.T.)} = 0,25 \Omega$$

$$X_{\pi(Y.T.)} = 5,011 \Omega$$

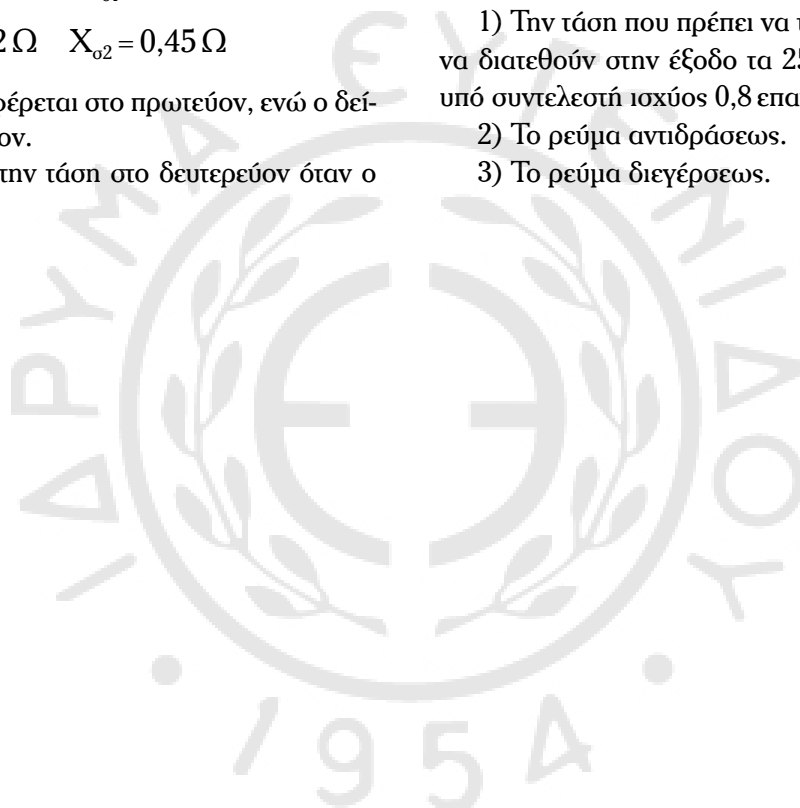
$$R_{c(Y.T.)} = 18.649 \Omega$$

Να σχεδιάσετε το ισοδύναμο κύκλωμα και να υπολογίσετε:

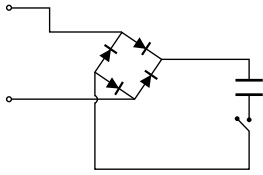
1) Την τάση που πρέπει να τροφοδοτεί ο Μ/Σ για να διατεθούν στην έξοδο τα 25 kVA με τάση 600 V υπό συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ..

2) Το ρεύμα αντιδράσεως.

3) Το ρεύμα διεγέρσεως.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ ΑΝΟΡΘΩΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ



3.1 Εισαγωγή.

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη των **ηλεκτρονικών ισχύος** έλυσε πρακτικά, οποιοδήποτε πρόβλημα ρυθμίσεως ισχύος. Κατέστησε δυνατή την εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος (ΣΡ) όταν η πηγή τροφοδοσίας είναι εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ), ενώ εξασφάλισε τη λειτουργία των κινητήρων ΕΡ όταν η πηγή τροφοδοσίας τους είναι συνεχούς τάσεως. Επίσης μετατρέπεται εναλλασσόμενη τάση, δεδομένης συχνότητας, σε εναλλασσόμενη τάση διαφορετικής συχνότητας. Σε αυτό το κεφάλαιο, τα ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται για να λάβουμε συνεχή τάση από εναλλασσόμενη (ανορθωτές ισχύος).

Το μειωμένο κόστος, αλλά και η μεγάλη αξιοπιστία των ηλεκτρονικών ισχύος έχουν ως αποτέλεσμα την καθολική εφαρμογή τους σε ηλεκτρονικές μονάδες ελέγχου των κινητήρων ΣΡ και ΕΡ.

3.2 Ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος.

Στην πράξη, ο ηλεκτρονικός τρόπος ελέγχου των κινητήρων, αλλά και της διελεύσεως μεγάλων ρευμάτων (δηλ. ρευμάτων πολλών Ampere), απαιτεί τη χρήση ειδικών ημιαγωγίων στοιχείων. Αυτά τα στοιχεία είναι: η **Δίοδος** (Diode), το **Θυρίστορ** ή **Ελεγχόμενος Ανορθωτής Πυριτίου** (Silicon-Controlled Rectifier–SCR), οι **Αμφίδρομες Δίοδοι Σκανδαλισμού** (Diode for Alternating Current–DIAC), οι **Αμφίδρομες Τρίοδοι** (Triode for Alternating Current–TRIAC), το **Τρανζίστορ Εγκαρσίου Πεδίου** (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor–MOSFET), το **GTO θυρίστορ** (Gate Turn-Off thyristor) και το **Διπολικό Τρανζίστορ Απομονωμένης Πύλης** (Insulated Gate Bipolar Transistor–IGBT).

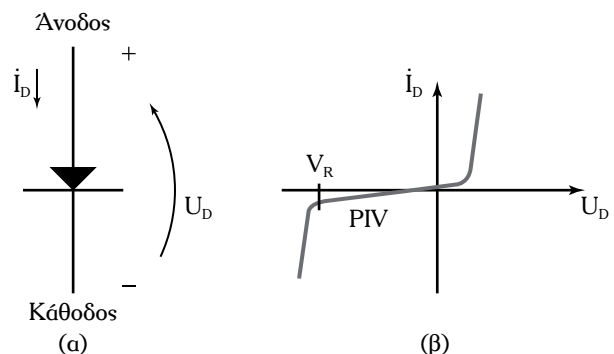
3.2.1 Η δίοδος (σχ. 3.2α).

Η δίοδος αποτελείται από δύο ημιαγωγία στοιχεία p-n ή n-p και άγει μόνο κατά τη μία κατεύθυνση.

Όταν η δίοδος είναι πολωμένη ορθά διαρρέεται από ρεύμα. Προκειμένου η δίοδος ισχύος να άγει μεγαλύτερες ποσότητες ρεύματος, πρέπει η επιφάνεια επαφής p-n να είναι μεγάλη. Η ισχύς που καταναλώνει η δίοδος όταν είναι πολωμένη ορθά ισούται με την πώση τάσεως στα άκρα της επί το ρεύμα διελεύσεως. Αυτή η ισχύς πρέπει να ελέγχεται γιατί αυξάνει τη θερμοκρασία της διόδου και προκαλεί υπερθέρμανση.

Όταν η δίοδος είναι πολωμένη ανάστροφα, το ρεύμα δεν ισούται με το μηδέν, αλλά είναι πολύ μικρό σε σχέση με το αντίστοιχο της ορθής πολώσεως, ώστε πρακτικά να θεωρείται μηδενικό. Αν η ανάστροφη τάση πολώσεως είναι αρκετά μεγάλη, τότε η δίοδος καταρρέει και επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος στην ανάστροφη κατεύθυνση. Η **Μέγιστη Τιμή της Ανάστροφης Τάσεως** (Peak Inverse Voltage–PIV) πρέπει να είναι μεγάλη, ώστε να μην άγει στην ανάστροφη κατεύθυνση.

Ο χρόνος μεταβάσεως της διόδου από τη μια κατάσταση λειτουργίας στην άλλη έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα ηλεκτρονικά ισχύος. Η μετάβαση από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγής γίνεται γρήγορα, ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο κατά την αντίστροφη μετάβαση. Αυτό συμβαίνει διότι στην ορθή πόλωση η ποσότητα ρεύματος είναι μεγάλη,



Σχ. 3.2α

(α) Το ηλεκτρονικό σύμβολο της διόδου, και
(β) η χαρακτηριστική τάσεως-ρεύματος της διόδου.

οπότε αποθηκεύονται φορτία γύρω από την επαφή, τα οποία πρέπει πρώτα να απομακρυνθούν όταν αλλάζει η πολικότητα, πριν μηδενιστεί το ρεύμα.

3.2.2 Το θυρίστορ ή ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου.

Το θυρίστορ (SCR) (σχ. 3.2β) είναι στοιχείο ισχύος, το οποίο αποτελείται από τέσσερα ημιαγωγικά στρώματα τύπου p και n διαδοχικά.

1) Ρεύμα πύλης μηδενικό.

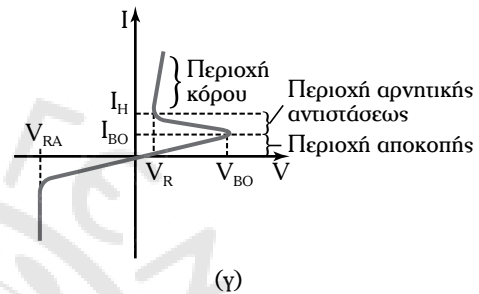
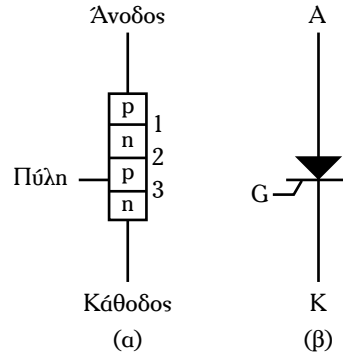
Όταν η άνοδος είναι θετική ως προς την κάθοδο οι επαφές 1 και 3 είναι ορθά πολωμένες, ενώ η επαφή 2 είναι ανάστροφα πολωμένη. Σε αυτήν την κατάσταση το θυρίστορ προβάλλει μεγάλη αντίσταση (της τάξεως των 100 MΩ). Για μικρές τιμές της τάσεως V μεταξύ ανόδου και καθόδου το ρεύμα I, του θυρίστορ, έχει μικρές τιμές, οπότε λειτουργεί στην κατάσταση αποκοπής. Όταν η τάση V ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή V_{BO} (Break-Over Voltage), το ρεύμα λαμβάνει μεγάλες τιμές, οι οποίες οφείλονται στην κατάρρευση της επαφής 2 και το θυρίστορ λειτουργεί στην περιοχή κόρου. Οι τιμές των τάσεων V_{BO} κυμαίνονται μεταξύ μερικών δεκάδων και μερικών εκατοντάδων Volt. Οι τιμές του ρεύματος I_{BO} είναι της τάξεως των μερικών εκατοντάδων mA. Όταν η τάση V λάβει τιμές πέρα από μίας κρίσιμης τιμής V_H (Holding Voltage), η οποία ονομάζεται **τάση συγκρατήσεως** ή όταν το ρεύμα I λάβει τιμές μικρότερες του ρεύματος συγκρατήσεως I_H, τότε το θυρίστορ επανέρχεται στην κατάσταση αποκοπής.

Στο σχήμα 3.2β(γ), δίδονται τα κρίσιμα μεγέθη τάσεων-ρευμάτων, όπως και οι χαρακτηριστικές περιοχές: αποκοπής, αρνητικής αντιστάσεως και κόρου όταν το θυρίστορ είναι πολωμένο ορθά και το ρεύμα πύλης μηδενικό. Το μέγεθος V_{RA} (Reverse Avalanche Breakdown Voltage) αντιστοιχεί στη μέγιστη ανάστροφη τάση, η οποία οδηγεί στην κατάρρευση του θυρίστορ.

2) Ρεύμα πύλης διαφορετικό του μηδενός.

Στο σχήμα 3.2γ, δίδεται το σμήνος χαρακτηριστικών τάσεων-ρευμάτων ενός θυρίστορ για διαφορετικές τιμές του ρεύματος πύλης I_G.

Όταν οι τιμές του ρεύματος πύλης I_G, αυξάνουν, τότε μειώνεται η τιμή της τάσεως V_{BO} και αντίστροφα. Με το ρεύμα πύλης ελέγχεται ο χρόνος εναύσεως του θυρίστορ, γι' αυτό το ηλεκτρονικό στοιχείο ονομάζεται **ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου SCR**.



Σχ. 3.2β

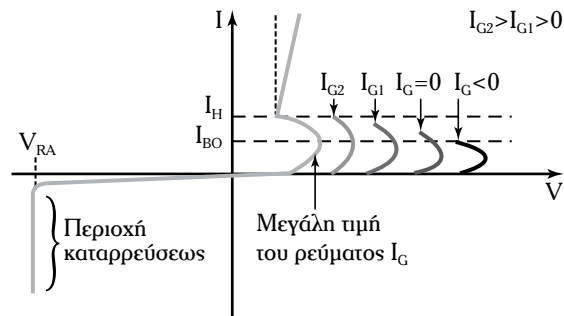
(α) Συγκρότηση του θυρίστορ, (β) το ηλεκτρονικό σύμβολό του και (γ) χαρακτηριστική τάσεως-ρεύματος της διόδου τεσσάρων στρωμάτων (SCR).

Η τάση V_H και το ρεύμα I_H δεν εξαρτώνται από το ρεύμα πύλης. Όταν το ρεύμα πύλης είναι πολύ μεγάλο, τότε το θυρίστορ συμπεριφέρεται σαν μια απλή δίοδος p-n.

Διακοπή της αγωγιμότητας του θυρίστορ πραγματοποιείται με τους ακόλουθους τρόπους:

1) Όταν η τάση V μεταξύ ανόδου και καθόδου ή το ρεύμα I λαμβάνουν τιμές μικρότερες από τις τιμές των V_H και I_H αντίστοιχα.

2) Όταν διοχετευθεί ένα ανάστροφο ρεύμα πύλης ίσο κατά πλάτος με το ρεύμα I αγωγιμότητας.



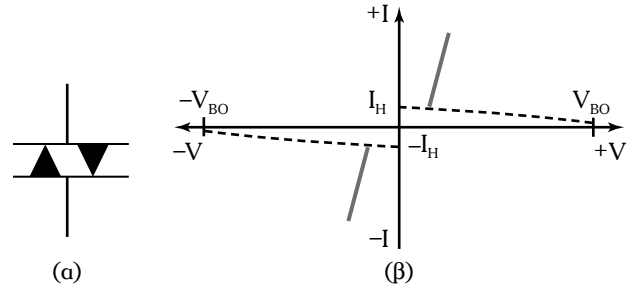
Σχ. 3.2γ

Σμήνος χαρακτηριστικών τάσεων-ρευμάτων ενός θυρίστορ για διαφορετικά ρεύματα πύλης.

3.2.3 Αμφίδρομη δίοδος σκανδαλισμού (DIAC).

Το ηλεκτρονικό σύμβολο του DIAC δίδεται στο σχήμα 3.2δ(α). Αυτό είναι παρόμοιο με το ηλεκτρονικό σύμβολο του TRIAC [σχ. 3.2ε(α)] εκτός του ότι δεν απαιτείται ο αγώγος συνδέσεως της πύλης (G).

Η χαρακτηριστική καμπύλη τάσεως-ρεύματος (V-I) για ένα τυπικό DIAC δίδεται στο σχήμα 3.2δ(β). Η καμπύλη δείχνει τη σχέση μεταξύ ρεύματος που ρέει διά μέσου της συσκευής, σε οποιαδήποτε κατεύθυνση (+I και -I) και της αντίστοιχης τάσεως της συσκευής, σε οποιαδήποτε κατεύθυνση (+V και -V). Το σχήμα 3.2δ(β) δείχνει επίσης ότι το ρεύμα που κυκλοφορεί μέσα στο DIAC, παραμένει σε χαμηλή τιμή, μέχρι που η τάση της συσκευής αυξηθεί σε ένα σημείο, όπου το DIAC διασπάται σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Οι τάσεις αυτές που απαιτούνται για την διάσπαση του DIAC, γενικά αναφέρονται σαν τάσεις διασπάσεως και συμβολίζονται ως +V_{BO} και -V_{BO} (αυτές οι τιμές είναι συνήθως μεταξύ 28 και 36 V). Όταν επιτευχθούν αυτές οι τιμές +V_{BO} και -V_{BO}, το ρεύμα μέσα στο DIAC αυξάνεται απότομα, αλλά η τάση στα άκρα του μειώνεται.



Σχ. 3.2δ

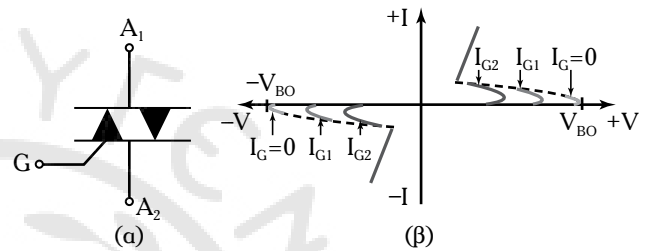
(α) Το ηλεκτρονικό σύμβολο του DIAC και (β) οι χαρακτηριστικές τάσεως-ρευμάτων του DIAC.

3.2.4 Αμφίδρομη τριόδος σκανδαλισμού (TRIAC).

Το TRIAC [σχ. 3.2ε(α)] αποτελείται από δύο ελεγχόμενους ανορθωτές πυριτίου συνδεδεμένους παράλληλα μεταξύ τους, οι οποίοι έχουν κοινή πύλη.

Όταν η αγωγιμότητα έχει φορά από τον ακροδέκτη A₁ προς τον ακροδέκτη A₂ τότε ο A₁ είναι η άνοδος και ο A₂ η κάθοδος. Το αντίστροφο συμβαίνει όταν η αγωγιμότητα έχει φορά από τον ακροδέκτη A₂ προς τον ακροδέκτη A₁. Ο έλεγχος του TRIAC μπορεί να πραγματοποιηθεί με θετικούς ή αρνητικούς παλμούς. Όμως η φορά της αγωγιμότητας εξαρτάται, αποκλειστικά, από τη σχετική πολικότητα των ακροδεκτών A₁ και A₂, και όχι από την πολικότητα των παλμών.

Από το σχήμα 3.2ε(β) προκύπτει ότι η τάση V_{BO} ρυθμίζεται απ' το μέγεθος του ρεύματος της πύλης I_G.



Σχ. 3.2ε

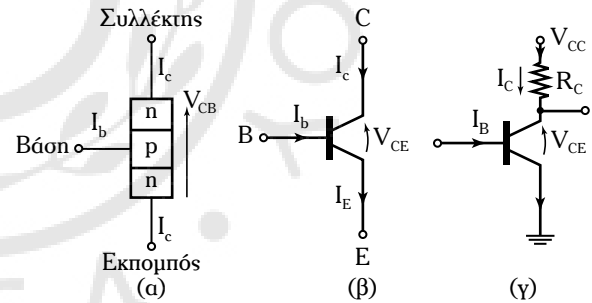
(α) Το ηλεκτρονικό σύμβολο του TRIAC και (β) οι χαρακτηριστικές τάσεως-ρεύματος του TRIAC, με τη συμβολή του ρεύματος πύλης I_G.

3.2.5 Το τρανζίστορ ισχύος.

Στα ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούνται τρία είδη τρανζίστορ: Το **διπολικό τρανζίστορ ισχύος** [σχ. 3.2στ(α)], το **MOSFET**, και το **IGBT**.

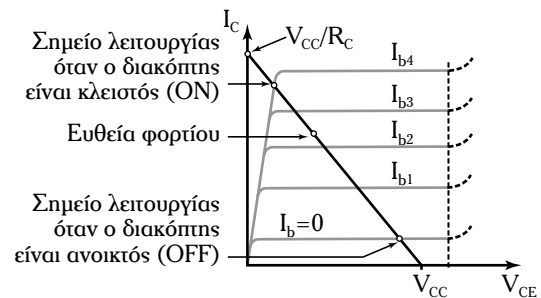
Στο σχήμα 3.2ζ, δίδεται η χαρακτηριστική έξοδου και η ευθεία φορτίου του τρανζίστορ ισχύος. Τα μεγέθη I_C, V_{CC}, V_{CE} και R_C συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \quad (3.1)$$



Σχ. 3.2στ

(α) Δομή, (β) κυκλωματικό σύμβολο, (γ) σύνδεση με ωμικό φορτίο ενός τρανζίστορ ισχύος.



Σχ. 3.2ζ

Χαρακτηριστική έξοδου ενός τρανζίστορ ισχύος.

Όταν το ρεύμα I_b αυξάνεται από την τιμή 0 μέχρι την τιμή, η οποία οδηγεί το τρανζίστορ στην περιοχή κόρου, τότε το ρεύμα συλλέκτη αυξάνεται και η τάση V_{CE} μειώνεται. Η κατανάλωση ισχύος στο τρανζίστορ στην διάρκεια μεταβάσεως από την αποκοπή (OFF) στον κόρο (ON) ισούται με το γινόμενο του ρεύματος συλλέκτη I_C και της τάσεως V_{CE} και μεταβάλλεται όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2n.

Στις εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος το τρανζίστορ ισχύος χρησιμοποιείται σαν διακόπτης στην κατάσταση αποκοπής (διακόπτης ανοικτός, OFF) όταν $I_b = 0$ ή στην περιοχή κόρου (κατάσταση ON). Κατά την μετάβαση από μία κατάσταση στην άλλη το τρανζίστορ καταναλώνει ισχύ που εξαρτάται από τον τρόπο μεταβολής του ρεύματος βάσεως I_b . Όσο πιο γρήγορα γίνεται αυτή η μετάβαση τόσο πιο μικρή είναι η ισχύς που καταναλώνεται στο τρανζίστορ στην αντίστοιχη μετάβαση.

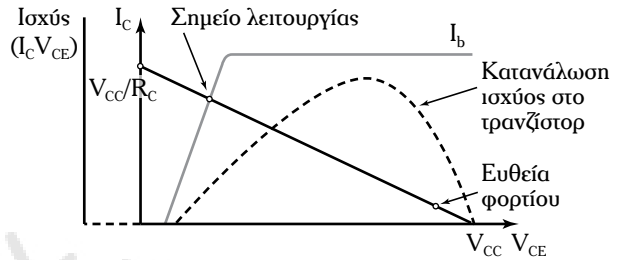
Το τρανζίστορ ισχύος λειτουργεί ως ταχύτερος διακόπτης από το θυρίστορ. Όμως, κατά τη διάρκεια της αγωγής του το ρεύμα βάσεως πρέπει να έχει μεγάλη τιμή. Σε αντίθεση με το θυρίστορ, η μετάβαση από την κατάσταση αγωγής στην κατάσταση αποκοπής πραγματοποιείται με μηδενισμό του ρεύματος βάσεως. Τέλος, αντίθετα προς το θυρίστορ, στο τρανζίστορ ισχύος δεν υπάρχει δυνατότητα αναστροφής της εφαρμοζόμενης τάσεως V , διότι επέρχεται κατάρρευση της επαφής εκπομπού-βάσεως.

Το **MOSFET ισχύος** [σχ. 3.2θ(β)] ελέγχεται από τάση, η οποία εφαρμόζεται μεταξύ πύλης και πηγής, σε αντίθεση με το τρανζίστορ ισχύος, το οποίο ελέγχεται από το ρεύμα βάσεως. Από άποψη ισχύος, το MOSFET ισχύος έχει μικρότερες δυνατότητες από το τρανζίστορ ισχύος και το θυρίστορ. Είναι, όμως ταχύτερο ως διακόπτης, ενώ απαιτείται ελάχιστη ισχύ στο κύκλωμα πύλης για τη δράση του αυτή.

Το **διπολικό τρανζίστορ απομονωμένης πύλης** (IGBT) (σχ. 3.2ι) είναι ένας συνδυασμός τρανζίστορ MOSFET και τρανζίστορ ισχύος. Η είσοδος του IGBT συμπεριφέρεται σαν MOSFET, ενώ η έξοδος συμπεριφέρεται σαν τρανζίστορ ισχύος. Η τάση η οποία εφαρμόζεται μεταξύ πύλης-εκπομπού ελέγχει το ρεύμα ενός MOSFET, το οποίο αποτελεί το ρεύμα βάσεως του τρανζίστορ ισχύος. Η διακοπτική λειτουργία του IGBT επιτυγχάνεται με θετικούς και αρνητικούς παλμούς που εφαρμόζονται στην πύλη του.

Οι χρόνοι μεταβάσεως από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγής είναι μικρότεροι από τους αντίστοιχους του τρανζίστορ ισχύος, όπως συμ-

βαίνει και στην περίπτωση του MOSFET ισχύος, αλλά κατά τη μετάβαση από την κατάσταση αγωγής στην κατάσταση αποκοπής είναι ίδιοι περίπου με αυτούς του διπολικού τρανζίστορ. Οι δυνατότητες του IGBT από πλευράς ισχύος είναι ίδιες με αυτές του διπολικού τρανζίστορ ισχύος.



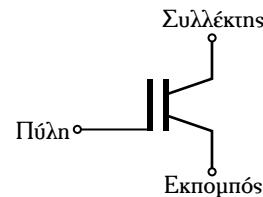
Σχ. 3.2n

Μεταβολή της ισχύος η οποία καταναλώνεται στο τρανζίστορ όταν η τάση V_{CE} μεταβάλλεται για σταθερό φορτίο.



Σχ. 3.2θ

(α) MOSFET ισχύος και (β) το ηλεκτρονικό σύμβολό του.

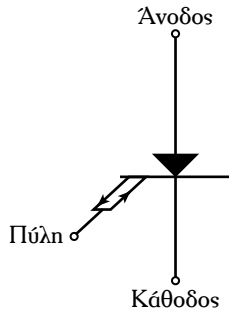


Σχ. 3.2ι

Το ηλεκτρονικό σύμβολο του IGBT.

3.2.6 Το GTO θυρίστορ.

Το GTO (σχ. 3.2ια) αποτελεί μια βελτίωση του θυρίστορ (SCR), που έχει τη δυνατότητα να μεταβεί στην κατάσταση αποκοπής με ρεύμα, το οποίο απομακρύνεται από την πύλη (εφαρμογή αρνητικού παλμού στην πύλη) ακόμα και αν το ρεύμα ανόδου είναι μεγαλύτερο του ρεύματος I_H .



Σχ. 3.2ια
Το ηλεκτρονικό σύμβολο
του GTO.

Τα δύο παράλληλα και αντίθετα βέλη στο ηλεκτρόδιο της πύλης εκφράζουν τη διπλή αποστολή της πύλης. Όταν το ρεύμα πύλης είναι μηδενικό και εφαρμόζεται θετική τάση στην άνοδο ως προς την κάθοδο το GTO δεν άγει λόγω της ανάστροφα πολωμένης κεντρικής επαφής n-p. Με την κάθοδο θετική ως προς την άνοδο η επαφή της ανόδου καταρρέει, οπότε δεν υπάρχει δυνατότητα αποκοπής του GTO με ανάστροφη πόλωση, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του SCR. Το μέγεθος του ρεύματος πύλης, που απαιτείται για την έναυση ενός GTO είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ενός SCR. Όταν ένα GTO είναι μεγάλης ισχύος, το απαιτούμενο ρεύμα πύλης είναι της τάξεως των 10 A ή και μεγαλύτερο. Για να οδηγηθεί στην κατάσταση αποκοπής ένα GTO απαιτείται ρεύμα πύλης, το μέγεθος του οποίου είναι από το $\frac{1}{5}$ μέχρι και το $\frac{1}{3}$ του ρεύματος ανόδου, πολύ μεγαλύτερο από εκείνο που απαιτείται για να μεταβεί από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγής.

3.3 Το πρόβλημα ψύξεως και προστασίας των ηλεκτρονικών ισχύος.

Οι υψηλές τιμές ισχύος, που διακινούνται μέσω των ημιαγωγών ισχύος, συνοδεύονται από απώλειες μέρους της διακινούμενης ισχύος στα στοιχεία αυτά. Αναπόφευκτα οι απώλειες αυτές αντιστοιχούν σε καταναλώσεις ισχύος των στοιχείων, που αυξάνουν την θερμοκρασία τους. Οι **βασικές αιτίες των απωλειών** αυτών είναι:

1) Κατά τη χρονική διάρκεια, όπου το στοιχείο είναι αγωγίμο, η απώλεια ισχύος εξαρτάται από το ρεύμα αγωγής και την πώση τάσεως στο στοιχείο, η οποία, έστω και μικρή, συνδυάζεται με την υψηλή τιμή του ρεύματος αγωγής.

2) Κατά την αποκοπή υπάρχει διαρροή κάποιου ρεύματος, το οποίο όμως συνδυάζεται με την υψηλή τάση που επιβάλλεται στο στοιχείο.

3) Απώλειες της διακοπικής λειτουργίας κατά τη διάρκεια μεταβάσεως από τη μία κατάσταση στην

άλλη, δηλαδή από την αποκοπή στην αγωγή και αντίστροφα. Οι απώλειες αυτές αυξάνουν με τη συχνότητα της διακοπικής λειτουργίας και πιθανόν να είναι σημαντικές.

Κατά τη διάρκεια της αγωγής, η καταναλισκόμενη ενέργεια στο στοιχείο δίδεται από το γινόμενο της πώσεως τάσεως επί το ρεύμα σε αυτό και επί το χρόνο αγωγής. Πολλαπλασιάζοντας με τη συχνότητα επαναλήψεως της αγωγής προκύπτει η ισχύς, η οποία απορροφάται από το στοιχείο λόγω της αγωγής. Το γινόμενο της τάσεως επί το ρεύμα σε κάθε χρονική στιγμή δίδει τη στιγμιαία τιμή της καταναλισκόμενης ισχύος στο στοιχείο, η οποία μεταβάλλεται με το χρόνο. Ολοκληρώνοντας ως προς το χρόνο βρίσκεται η καταναλισκόμενη ενέργεια, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα σε κάθε μετάβαση. Αθροίζοντας τις δύο τιμές αυτής της ενέργειας, μίας κατά τη μετάβαση από αποκοπή σε αγωγή και μίας από αγωγή σε αποκοπή, και πολλαπλασιάζοντας το άθροισμα επί τη συχνότητα της διακοπικής λειτουργίας, υπολογίζουμε την ισχύ καταναλώσεως στο στοιχείο λόγω της διακοπικής λειτουργίας.

Η συνολικά καταναλισκόμενη ισχύς στο στοιχείο θα είναι το άθροισμα της ισχύος καταναλώσεως κατά την αγωγή και της ισχύος καταναλώσεως λόγω της διακοπικής λειτουργίας. Εξυπακούεται, ότι αυτές οι καταναλώσεις ενέργειας είναι προσθετικές, δηλαδή είναι όλες παρούσες κατά τη λειτουργία του στοιχείου και επομένως προστίθενται μεταξύ τους. Η καταναλισκόμενη αυτή ενέργεια μέσα στο στοιχείο μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία αυξάνει τη θερμοκρασία του στοιχείου. Ασφαλώς λειτουργία του στοιχείου θα υπάρξει αν η παραγόμενη θερμότητα απάγεται στο περιβάλλον, οπότε η θερμοκρασία του στοιχείου θα παραμένει σταθερή. Αν όμως αυτό δεν συμβεί και παράγεται περισσότερη θερμότητα στο στοιχείο απ' αυτήν, που απάγεται, θα προκύψει συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα την υπολειτουργία και ίσως την τελική καταστροφή του. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί την ονομαζόμενη **θερμική απόκλιση** του στοιχείου και μπορούμε να τη μελετήσουμε αναφερόμενοι συγκεκριμένα σε ένα στοιχείο ισχύος. Επιλέγουμε για το σκοπό αυτό το τρανζίστορ ισχύος. Σχεδόν όλη η καταναλισκόμενη ισχύς στο τρανζίστορ ισχύος κατά τη διακοπική λειτουργία του αναφέρεται στην επαφή συλλέκτη-βάσεως. Αυτή η ισχύς P_d όταν μετατρέπεται σε θερμότητα αυξάνει τη θερμοκρασία της επαφής T_j πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος T_A . Μεταξύ των μεγεθών αυτών

ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$T_j = T_A + R_{th} P_d \quad (3.2)$$

όπου οι T_j και T_A εκφράζονται σε °C και

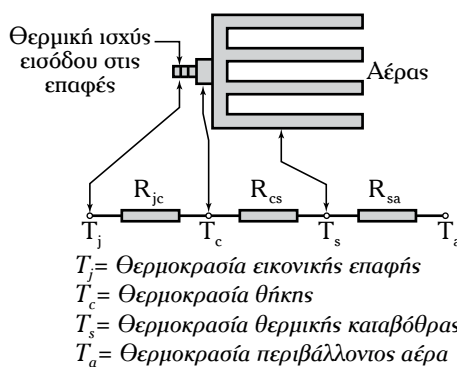
$$R_{th} = \frac{\partial T_j}{\partial P_d} \cong \frac{\Delta T_j}{\Delta P_d} \quad (3.3)$$

όπου R_{th} είναι η **θερμική αντίσταση** του τρανζίστορ από την επαφή συλλέκτη προς το περιβάλλον μετρούμενη σε °C/W. Η θερμική αντίσταση είναι μέτρο της δυσκολίας απαγωγής της καταναλισκόμενης ισχύος συλλέκτη προς το περιβάλλον. Στις εφαρμογές ισχύος το **περίβλημα** (η θήκη) του τρανζίστορ ισχύος στερεώνεται σε **θερμική καταβόθρα**, δηλαδή πάνω σε μέταλλο, το οποίο είναι κατάλληλα διαμορφωμένο, ώστε να παρουσιάζει μεγάλη επιφάνεια επαφής με τον αέρα (σχ. 3.3α).

Μ' αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η απαγωγή της θερμότητας από την επαφή του συλλέκτη προς το περιβάλλον, με συνέπεια την ελάττωση της θερμικής αντιστάσεως R_{th} . Στην περίπτωση αυτή η θερμική αντίσταση R_{th} ισούται προς το άθροισμα της θερμικής αντιστάσεως μεταξύ επαφής συλλέκτη και περιβλήματος του τρανζίστορ R_{jc} , της θερμικής αντιστάσεως μεταξύ περιβλήματος τρανζίστορ και θερμικής καταβόθρας R_{cs} και της θερμικής αντιστάσεως μεταξύ καταβόθρας και περιβάλλοντος R_{sa} . Δηλαδή:

$$R_{th} = R_{jc} + R_{cs} + R_{sa} \quad (3.4)$$

Η αύξηση της θερμοκρασίας T_j , εάν δεν ελέγχεται μπορεί να αποβεί καταστρεπτική για το τρανζίστορ. Η σχέση 3.2, ισχύει και για τα λοιπά στοιχεία ισχύος, με την παραδοχή ότι η επαφή στην οποία καταναλίσκεται η ισχύς είναι μάλλον εικονική, αφού σε στοιχείο πολλαπλού στρώματος (π.χ. θυρίστορ)



Σχ. 3.3α

Ροή θερμότητας και κατανομή της θερμοκρασίας.

δεν είναι δυνατόν να οριστεί σε ποια ακριβώς επαφή καταναλίσκεται η ισχύς. Από τη θερμότητα που προκύπτει από την καταναλισκόμενη ισχύ στο στοιχείο, ένα μέρος συγκρατείται σ' αυτό και αυξάνει τη θερμοκρασία του και το υπόλοιπο μεταβιβάζεται στη θερμική καταβόθρα. Αν θ είναι η θερμοκρασία στην επαφή πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, που τη χρονική στιγμή t είναι μηδέν αποδεικνύεται, ότι η αύξηση της θερμοκρασίας μετά από χρόνο t θα είναι:

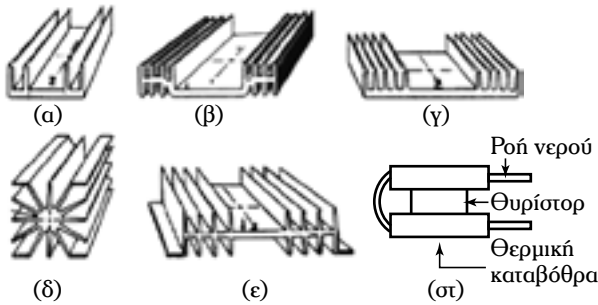
$$\theta = \theta_{max} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.5)$$

όπου θ_{max} η τελική σταθερή τιμή της αύξησεως της θερμοκρασίας της επαφής και τη λεγόμενη **θερμική σταθερά χρόνου**, η οποία εξαρτάται από τη θερμοχωρητικότητα του στοιχείου σε joules αποθηκευμένης ενέργειας ανά °C αύξησεως της θερμοκρασίας και από την καταναλισκόμενη ισχύ ανά °C αύξησεως της θερμοκρασίας. Η σχέση 3.5, είναι χρήσιμη για κανονική λειτουργία των στοιχείων ισχύος, στην περίπτωση όμως που υπάρξει υπερφόρτωση για μικρό χρόνο χρειάζεται προσοχή, γιατί ο χρόνος ασφαλούς λειτουργίας θα είναι μικρότερος. Για τέτοιες περιπτώσεις υπερφορτώσεως οι κατασκευαστές παρέχουν τη λεγόμενη **μεταβατική θερμική εμπέδωση Z_{th}** , που πρέπει να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αύξησεως της θερμοκρασίας. Η Z_{th} ορίζεται ως εξής:

$$Z_{th} = \frac{\text{διαφορά θερμοκρασίας (αύξηση)}}{\text{κατανάλωση ισχύος στο στοιχείο στο δεδομένο χρόνο}} \quad (3.6)$$

Η μεταβατική θερμική εμπέδωση χρησιμοποιείται για εφαρμογές, όπου εμφανίζεται κατ' επανάληψη υψηλή κατανάλωση ισχύος επαναληπτικά.

Η **θερμική καταβόθρα** (σχ. 3.3β), που αναφέρθηκε παραπάνω για τη διευκόλυνση της απαγωγής θερμότητας από το τρανζίστορ στο περιβάλλον, είναι απαραίτητη για την προστασία των ημιαγωγών ισχύος από υπερθέρμανση κατά τη λειτουργία τους. Το στοιχείο προσαρμόζεται κατάλληλα πάνω σε μεταλλική επιφάνεια, κατάλληλα διαμορφωμένη, ώστε αφενός να παρουσιάζει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη επιφάνεια και αφετέρου να διευκολύνεται η κυκλοφορία του αέρα μέσα και γύρω απ' αυτόν. Η προσαρμογή του στοιχείου ισχύος στην θερμική καταβόθρα πραγματοποιείται κατά τρόπο τέτοιο, ώστε να υπάρχει



Σχ. 3.3β

Διάφοροι τύποι θερμικής καταβόθρας.

ηλεκτρική μόνωση μεταξύ της εξωτερικής μεταλλικής επιφάνειας του στοιχείου και της θερμικής καταβόθρας. Απ' την άλλη πλευρά όμως η θερμική καταβόθρα R_{cs} μεταξύ αυτών των μεταλλικών επιφανειών πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.

Ως μονωτικό υλικό συνήθως χρησιμοποιείται λεπτό φύλλο μίας. Σε περιπτώσεις που απαιτείται καλύτερη ψύξη, η κυκλοφορία του αέρα επιταχύνεται με ανεμιστήρα. Τέλος, για ακόμη πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα, η θερμική καταβόθρα ψύχεται με την κυκλοφορία ύδατος μέσα από σωλήνες που αποτελούν μέρος της [σχ. 3.3β(στ)].

3.4 Σύγκριση των ηλεκτρονικών ισχύος.

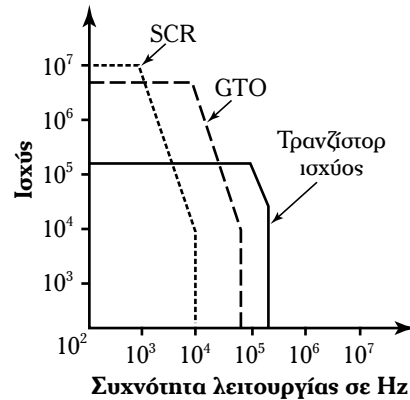
Μέσω του διαγράμματος που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4 γίνεται σύγκριση των SCR, των GTO και των τρανζιστορ ισχύος με κριτήριο τη διαχειριζόμενη ισχύ και την ταχύτητα αποκρίσεως.

Τα SCR διαχειρίζονται μεγαλύτερα ποσά ισχύος ως προς τα GTO και τα τρανζιστορ ισχύος. Τα GTO διαχειρίζονται ποσότητες ισχύος περίπου ίσες με τα SCR, αλλά είναι πολύ ταχύτερα των SCR. Τα τρανζιστορ ισχύος διαχειρίζονται λιγότερες ποσότητες ισχύος από τα SCR και GTO αλλά η ταχύτητά τους είναι δεκαπλάσια από την αντίστοιχη των SCR και GTO.

3.5 Κυκλώματα ανορθωτικών διατάξεων ισχύος – Εισαγωγή.

Ο σκοπός των διατάξεων αυτών είναι η μεταφορά ενέργειας από ένα σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος σε ένα σύστημα συνεχούς. Τελικά, τα συστήματα ανορθώσεως είναι μετατροπείς ηλεκτρικού ρεύματος. Ανάλογα με τον τρόπο μεταβίβασης του ρεύματος φορτίου από έναν κλάδο σε έναν άλλον, οι μετατροπείς διακρίνονται:

1) Στους **μετατροπείς χωρίς μετάβαση** στους



Σχ. 3.4

Διάγραμμα σύγκρισης της ισχύος και της ταχύτητας αποκρίσεως SCR, των GTO και των τρανζιστορ ισχύος.

οποίους το ρεύμα δεν αλλάζει κλάδο και η μεταβίβαση ισχύος στο φορτίο γίνεται μέσω διακοπών, οι που μπορεί να είναι μηχανικοί ή ηλεκτρονικοί.

2) Στους **μετατροπείς με φυσική μετάβαση** στους οποίους χρησιμοποιούνται, σε συνδυασμό, θυρίστορ και δίοδοι. Η σβέση του στοιχείου που άγει, είναι αποτέλεσμα της δράσεως της εναλλασσόμενης τάσεως που έπεται της εναύσεως του επόμενου στοιχείου στη διάταξη. Σ' αυτήν την περίπτωση δεν απαιτείται εξωτερικό κύκλωμα για τη σβέση του στοιχείου που άγει.

3) Μια από τις εφαρμογές των μετατροπών είναι η ανόρθωση του εναλλασσόμενου ρεύματος και η τροφοδότηση κάποιου φορτίου. Όταν χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά ισχύος, το τροφοδοτούμενο φορτίο είναι, συνήθως, συνδυασμός ωμικής αντιστάσεως R , και επαγωγής L . Σε αυτήν την περίπτωση το ρεύμα στο φορτίο δεν μηδενίζεται όταν η εναλλασσόμενη τάση γίνεται μηδέν, αλλά διατηρείται και πέραν της μισής περιόδου. Πολλά κυκλώματα ανορθώσεως, κυρίως μισού-κύματος περιλαμβάνουν μια δίοδο παράλληλη στο ωμικο-επαγωγικό φορτίο, η οποία ονομάζεται δίοδος ελεύθερης ροής.

Ο σκοπός αυτής της δίοδου είναι να καταναλώνει την αποθηκευμένη ενέργεια στην επαγωγή L , στα διαστήματα κατά τα οποία τα θυρίστορ δεν άγουν. Στην περίπτωση, κατά την οποία τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι MOSFET ισχύος, IGBT και GTO θυρίστορ η σβέση τους μπορεί να πραγματοποιηθεί με έλεγχο της τάσεως ή του ρεύματος στη βάση ή την πύλη τους. Προκειμένου να επιτευχθεί η ελεγχόμενη σβέση απαιτούνται εξωτερικά κυκλώματα. Σε αυτήν την περίπτωση οι **μετατροπείς είναι με εξαναγκασμένη μετάβαση**.

3.5.1 Μονοφασική σύνδεση για ημιανόρθωση.

Στο σχήμα 3.5α παρουσιάζεται κύκλωμα ελεγχόμενης ημιανορθώσεως, το οποίο περιλαμβάνει θυρίστορ και δίοδο ελεύθερης ροής. Στο σχήμα 3.5β παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων για διάφορες στιγμές εναύσεως του θυρίστορ με το παλμικό ρεύμα i_g .

Όταν η γωνία εναύσεως $\alpha = \omega t$ είναι μικρή, το ρεύμα i_L και η τάση U_L στο φορτίο λαμβάνουν μεγάλες τιμές. Όταν η τάση U_s γίνεται αρνητική και το ρεύμα i_L δεν μηδενίζεται, η δίοδος ελεύθερης ροής άγει ρεύμα, του οποίου η τιμή ελαττώνεται εκθετικά με το χρόνο, γιατί το φορτίο περιλαμβάνει επαγωγή. Οπότε η τάση U_L δεν γίνεται αρνητική γιατί η δίοδος ελεύθερης ροής, ορθά πολωμένη έχει σχεδόν μηδενική τάση στους ακροδέκτες της. Από την κυματομορφή της τάσεως U_L , η συνεχής συνιστώσα της είναι:

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \sigma \nu \alpha) \quad (3.7)$$

όπου V_m η μέγιστη τιμή της κυματομορφής της τάσεως.

3.5.2 Μονοφασικό κύκλωμα γέφυρας για πλήρη ανόρθωση (σχ. 3.5γ).

Τα θυρίστορ ανά δύο, T_1, T_3 και T_2, T_4 πρέπει να έρχονται σε αγωγή συγχρόνως. Τα T_1, T_3 κατά τη μία ημιπερίοδο και τα T_2, T_4 κατά την άλλη. Η ένωση πραγματοποιείται με τη χρήση μετασχηματιστή παλμών. Η τιμή της συνεχούς τάσεως στο φορτίο (σχ. 3.5δ) είναι:

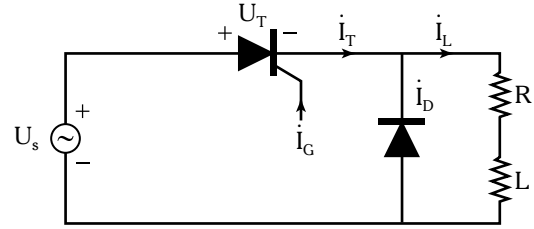
$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} \sigma \nu \alpha. \quad (3.8)$$

Η εξίσωση 3.8 δεν ισχύει, όταν το ρεύμα φορτίου δεν είναι συνεχόμενο.

3.5.3 Μονοφασικός ανορθωτής γέφυρας με διπλή ανόρθωση και πυκνωτή στην έξοδο (σχ. 3.5ε).

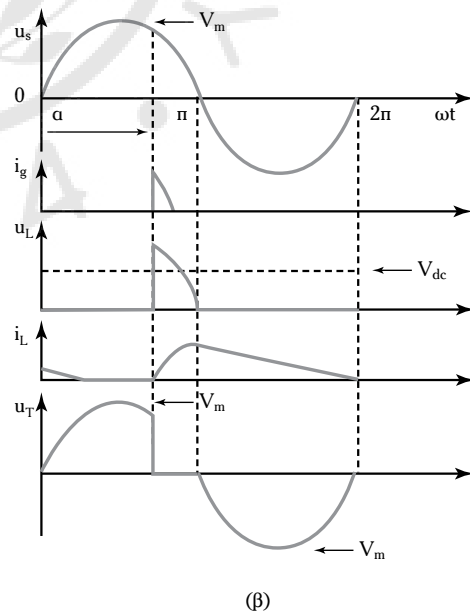
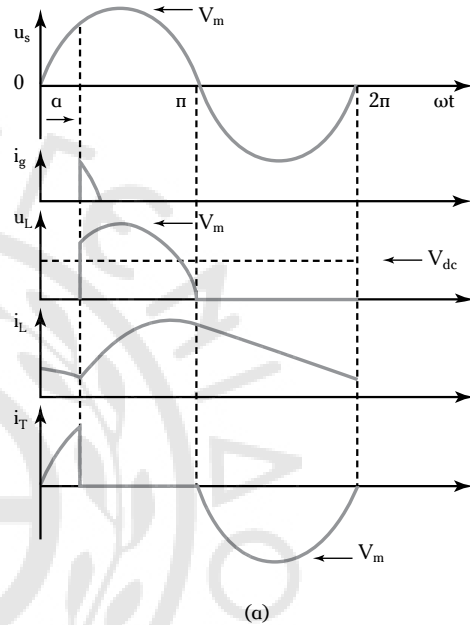
Έστω $V_m \eta \mu \omega t$ η τάση στα άκρα του δευτερεύοντος του Μ/Σ. Κατά την θετική ημιπερίοδο στα άκρα του δευτερεύοντος ΑΒ, άγουν οι δίοδοι D_1 και D_2 και το ρεύμα έχει την φορά των βελών.

Στην αρνητική ημιπερίοδο της τάσεως του δευτερεύοντος του Μ/Σ άγουν οι δίοδοι D_3 και D_4 και η φορά του ρεύματος δίδεται από εκείνη των διακεκομμένων βελών.



Σχ. 3.5α

Κύκλωμα ελεγχόμενης ημιανορθώσεως.

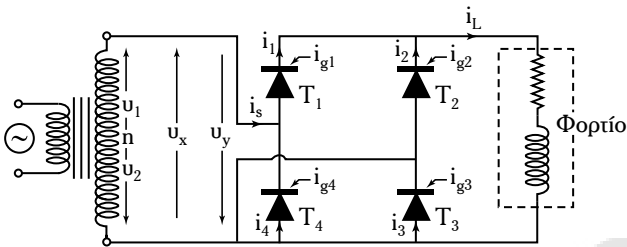


Σχ. 3.5β

(α) και (β) Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων για διάφορες στιγμές εναύσεως του θυρίστορ.

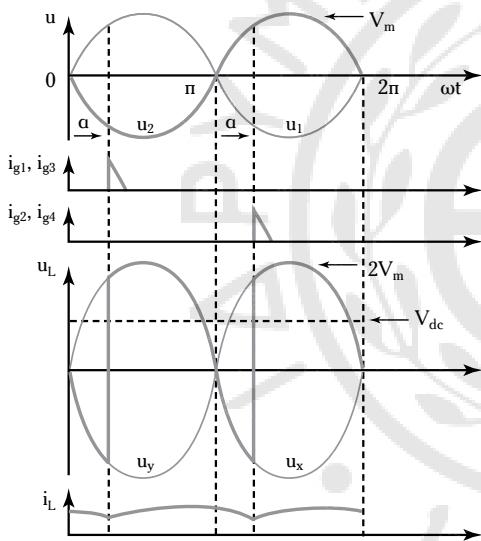
Αποδεικνύεται ότι η συνεχής τάση στα άκρα της γέφυρας διόδων είναι διπλάσια από εκείνη, την οποία λαμβάνουμε όταν έχουμε απλή ανόρθωση. Θεωρούμε ότι στην έξοδο της γέφυρας συνδέεται πυκνωτής χωρητικότητας C (σχ. 3.5στ).

Η μέση τιμή της ανορθωμένης τάσεως V_{av} , όταν ο



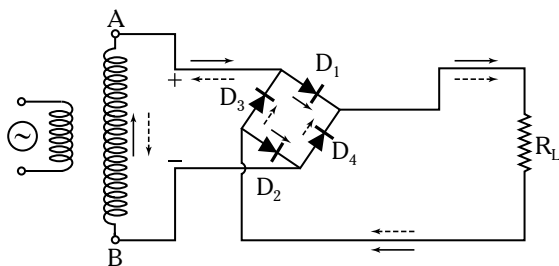
Σχ. 3.5γ

Μονοφασικό κύκλωμα γέφυρας με θυρίστορ πλήρους ανορθώσεως.



Σχ. 3.5δ

Κυματομορφές τάσεων-ρευμάτων σε μονοφασικό κύκλωμα γέφυρας πλήρους ανορθώσεως, όταν το φορτίο είναι ωμικο-επαγωγικό.



Σχ. 3.5ε

Κύκλωμα διπλής ανορθώσεως με γέφυρα.

διακόπτης δ είναι ανοικτός είναι:

$$V_{av} = 0,9 \cdot V_{ev} = 0,9 \cdot 10 = 9 \text{ V}$$

όπου V_{ev} είναι η ενεργός τιμή της τάσεως τροφοδοσίας της γέφυρας.

Όταν ο διακόπτης δ κλείσει, ο πυκνωτής φορτίζεται και η τιμή κορυφής (V_p) της κυματομορφής της τάσεως είναι:

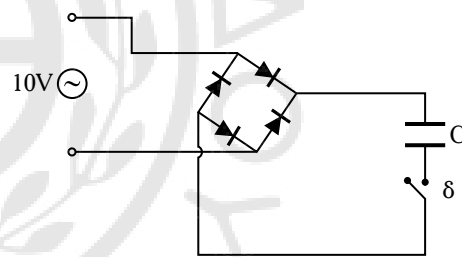
$$V_p = 1,414 \cdot V_{ev} = 1,414 \cdot 10 = 14,14 \text{ V.}$$

Όταν στην έξοδο της γέφυρας συνδεθεί φορτίο, τότε η V_p θα έχει μικρότερη τιμή.

3.5.4 Τριφασικό κύκλωμα ανορθωτή γέφυρας πλήρους ανορθώσεως.

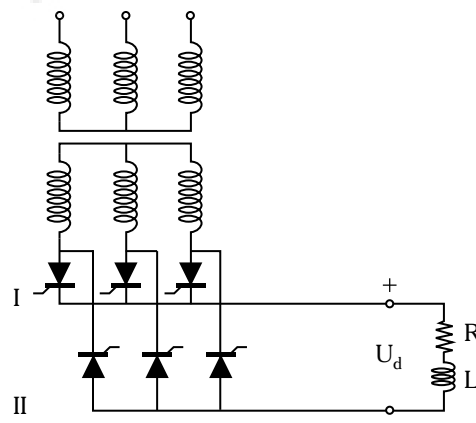
Στο σχήμα 3.5ζ παρουσιάζεται το κύκλωμα γέφυρας για την μετατροπή της τριφασικής τάσεως σε συνεχή. Η κυκλωματική αυτή διάταξη, αποτελείται από έξι θυρίστορ, τα οποία διακρίνονται σε δύο ομάδες (I και II).

Η **ομάδα I** αποτελεί τη **θετική ομάδα** ανορθώσεως γιατί τα θυρίστορ άγουν στη θετική ημιπερίοδο,



Σχ. 3.5στ

Γέφυρα με διπλή ανόρθωση και πυκνωτή κατά μήκος της εξόδου.

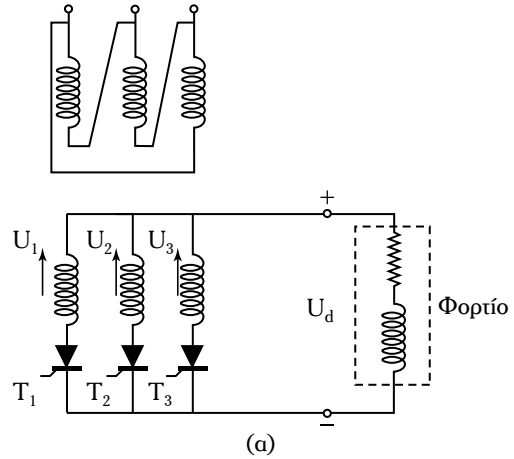


Σχ. 3.5ζ

Τριφασικό κύκλωμα ανορθωτή πλήρους ανορθώσεως.

ενώ η ομάδα II αποτελεί την αρνητική ομάδα γιατί τα θυρίστορ άγουν στην αρνητική ημιπερίοδο των τάσεων εισόδου. Κάθε θυρίστορ άγει για 120° . Η γωνία εναύσεως καθορίζεται από την γωνία $\omega t = 30^\circ$. Η ανόρθωση αυτή είναι έξι παλμών, γιατί η τάση εξόδου αποτελείται από έξι παλμούς. Αν η γωνία εναύσεως είναι μηδενική τότε η κυκλωματική διάταξη λειτουργεί ως κλασική τριφασική γέφυρα ανορθώσεως.

Όταν το δίκτυο και η γέφυρα δεν τροφοδοτούν το φορτίο, τότε για να μην υπερθερμαθούν τα θυρίστορ τοποθετούμε παράλληλα με το φορτίο μια δίοδο ελεύθερης ροής, με πολικότητα όπως εκείνη των θυρίστορ της ομάδας II.

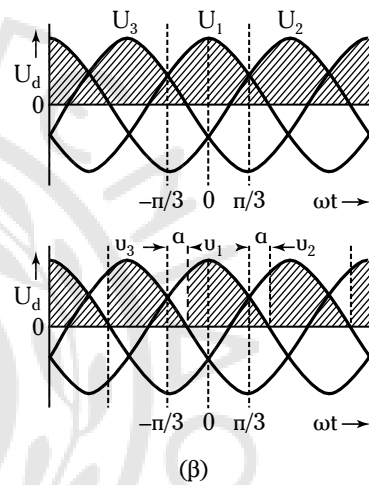


3.5.5 Τριφασική σύνδεση γέφυρας για ημιανόρθωση στο δευτερεύον του τριφασικού μετασχηματιστή, σύνδεση τυλιγμάτων σε αστέρα.

Οι συνδεσμολογίες της ελεγχόμενης τριφασικής ανορθώσεως εφαρμόζονται στον έλεγχο κινητήρων ΣΡ, σε διάταξη φορτίσεως συσσωρευτών και σε ηλεκτρικά δίκτυα μεταφοράς ΣΡ.

Στο σχήμα 3.5n(α) παρουσιάζεται η διάταξη τριφασικής συνδέσεως γέφυρας για ημιανόρθωση όταν τα τυλίγματα του δευτερεύοντος, του μετασχηματιστή συνδέονται σε αστέρα, ενώ στο σχήμα 3.5n(β) οι κυματομορφές των τριών τάσεων u_1, u_2 και u_3 .

Το μειονέκτημα αυτής της διατάξεως είναι ότι τα ρεύματα εισόδου περιλαμβάνουν συνεχή συνιστώσα, η οποία μπορεί να δημιουργήσει μαγνητικό κορεσμό του σιδηροπυρήνα του μετασχηματιστή. Το μειονέκτημα αυτό εξαλείφεται αν τα τυλίγματα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή είναι συνδεσμολογίας ζικ-ζακ.



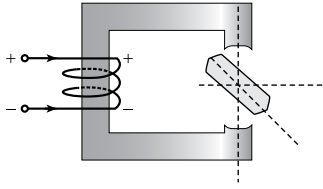
Σχ. 3.5n

(α) Διάταξη τριφασικής συνδέσεως γέφυρας για ημιανόρθωση συνδέσεως σε αστέρα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή και (β) κυματομορφές των φασικών τάσεων u_1, u_2 και u_3 . (u_d : Συνεχής τάση στο φορτίο, α : γωνία εναύσεως).

3.6 Ερωτήσεις.

- 1) Ποιος είναι ο ρόλος των ηλεκτρονικών ισχύος;
- 2) Ποια είναι η βασική αρχή λειτουργίας της διόδου;
- 3) Τι είναι το θυρίστορ, πώς λειτουργεί και ποια η χρήση του;
- 4) Τι είναι το DIAC; Ποια η αρχή λειτουργίας του;
- 5) Σχεδιάστε τη χαρακτηριστική ρεύματος-τάσεως ενός TRIAC και εξηγήστε τη λειτουργία του.
- 6) Τι είναι το τρανζίστορ ισχύος και ποιο το πεδίο εφαρμογής του;

- 7) Τι είναι το MOSFET και πώς λειτουργεί;
- 8) Πώς φύχονται και πώς προσαιεύονται τα ηλεκτρονικά ισχύος;
- 9) Ποια συμπεράσματα βγάξετε από τη σύγκριση των ηλεκτρονικών ισχύος;
- 10) Σε ποιες κατηγορίες κατατάσσονται οι μετατροπείς ανάλογα με τον τρόπο μεταβίβασης του ρεύματος από έναν κλάδο στον άλλο μίας συνδεσμολογίας τους;
- 11) Τι είναι η δίοδος ελεύθερης ροής;
- 12) Σχεδιάστε ένα μονοφασικό κύκλωμα γέφυρας θυρίστορ πλήρους ανορθώσεως. Περιγράψτε τη λειτουργία της.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή.

Είναι γνωστό ότι η ηλεκτρική ενέργεια, που είναι βιομηχανικά αξιοποιήσιμη, δεν είναι διαθέσιμη στη φύση γι' αυτό είναι απαραίτητο να παραχθεί. Η γεννήτρια είναι διάταξη, η οποία μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Το αντίστροφο συμβαίνει στους κινητήρες.

Η ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας υλοποιείται με τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ ηλεκτρικών και μηχανικών συστημάτων, μέσω του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου.

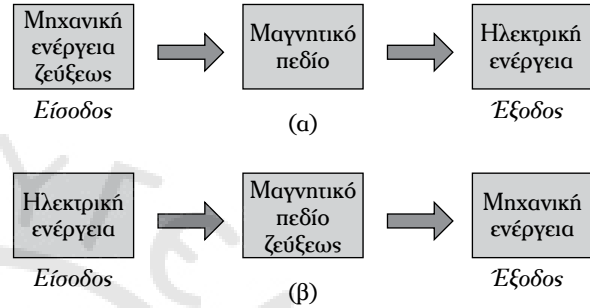
Το μαγνητικό πεδίο έχει μεγάλη πρακτική αξία για τις περισσότερες συσκευές. Η δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας στο μαγνητικό πεδίο είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη στο ηλεκτρικό.

Η ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας βασίζεται στην Αρχή της Διατηρήσεως της Ενέργειας. Η ενέργεια δεν δημιουργείται, δεν καταστρέφεται, αλλά μετασχηματίζεται από τη μία μορφή σε άλλη.

Στο σχήμα 4.1α δίδονται, σχηματικά, ηλεκτρομηχανικά συστήματα μετατροπής ενέργειας, τα οποία μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια και αντίστροφα.

Η διαδικασία της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας περιλαμβάνει τέσσερις μορφές ενέργειας.

Στο σχήμα 4.1β παρουσιάζονται οι ενεργειακοί



Σχ. 4.1α

Σχηματική παράσταση διατάξεων ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας: (α) γεννήτρια και (β) κινητήρας.

μετατροπείς, οι οποίοι περιλαμβάνουν τις διαδικασίες ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας.

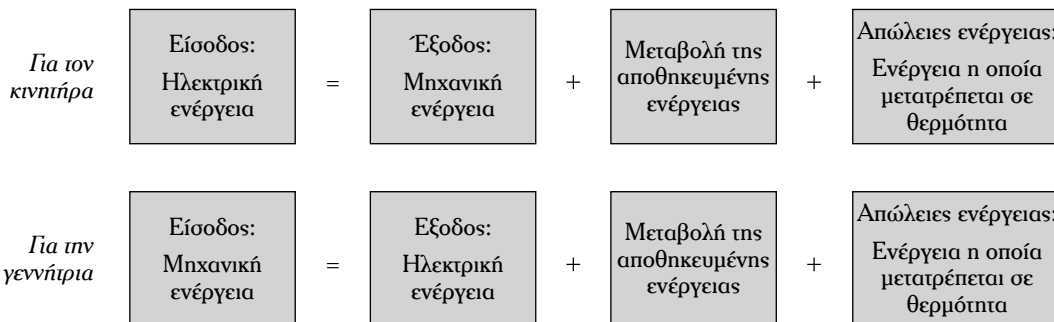
Οι απώλειες ενέργειας εντοπίζονται στο χαλκό (απώλειες Joule), στη διαδικασία μαγνητίσεως (απώλειες λόγω μαγνητικής υστερήσεως), στις τριβές και στον ανεμισμό κ.λπ..

Η εξίσωση του ισολογισμού ενέργειας με τη διαφορική μορφή των όρων είναι:

$$dW_e = dW_m + dW_f + dW_{loss}$$

και
$$dW_m = dW_e + dW_f + dW_{loss} \quad (4.1)$$

όπου: dW_e η στοιχειώδης ηλεκτρική ενέργεια, dW_m η στοιχειώδης μηχανική ενέργεια, dW_{loss} η στοιχειώδης απώλεια ενέργειας και dW_f η στοιχειώδης ενέρ-



Σχ. 4.1β

Ενεργειακοί μετατροπείς, οι οποίοι περιλαμβάνουν τις διαδικασίες ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας.

γεια, που αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο.

Η ανάλυση της συμπεριφοράς των ηλεκτρομηχανικών συσκευών μετατροπής ενέργειας πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την εξίσωση ισολογισμού ενέργειας. Αυτή είναι η ενεργειακή μέθοδος αναλύσεως, που βασίζεται στην Αρχή Διατηρήσεως της Ενέργειας.

4.2 Στοιχειώδης κινητήρας μαγνητικής αντιστάσεως – Γενικά.

Στο σχήμα 4.2α παρουσιάζεται η δομή ενός απλού γραμμικού συστήματος κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως, στο οποίο διακρίνονται τα εξής βασικά στοιχεία των συστημάτων ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας: Το **σταθερό μέρος (στάτης)**, το **περιστρεφόμενο μέρος (δρομέας)** τα **τυλίγματα**, σκοπός των οποίων είναι η δημιουργία της κατάλληλης μαγνητικής ροής και το **διάκενο** μεταξύ του στάτη και του δρομέα.

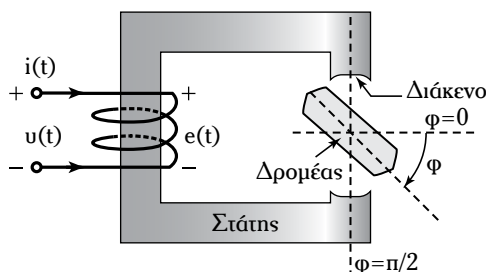
Στο σχήμα 4.2α, ο κινητήρας μαγνητικής αντιστάσεως περιλαμβάνει ένα τυλίγμα, το οποίο τοποθετείται στον στάτη, και έναν δρομέα διαμορφωμένο κατάλληλα, ώστε η μαγνητική αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος να εξαρτάται από τη γωνιακή του θέση.

Η μαγνητική ροή δημιουργεί μια ηλεκτρομαγνητική ροπή, η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει τον δρομέα στη θέση $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Στην ανάλυση που ακολουθεί, εξετάζεται με ποσοτικούς και ποιοτικούς όρους η σχέση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής με τα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη: μαγνητική ροή και ρεύμα.

4.2.1 Βασικές εξισώσεις για τον κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως.

Από ηλεκτρικής απόψεως η βασική εξίσωση, η οποία περιγράφει την ισορροπία τάσεων του συστήματος στο σχήμα 4.2α, είναι η ακόλουθη:

$$u(t) = i(t)R + e(t) \quad (4.2)$$



Σχ. 4.2α

Στοιχειώδης κινητήρας μαγνητικής αντιστάσεως.

όπου: $u(t)$ η τάση τροφοδοσίας σε Volt του τυλίγματος του στάτη, $i(t)$ το ρεύμα σε Ampere του τυλίγματος του στάτη, R η ωμική αντίσταση σε Ω του τυλίγματος του στάτη και $e(t)$ η επαγόμενη τάση σε Volt στο τυλίγμα του στάτη.

Με βάση τον Νόμο του Faraday η επαγόμενη τάση $e(t)$ δίδεται:

$$e(t) = \frac{d\Psi}{dt} \quad (4.3)$$

όπου Ψ η πεπλεγμένη μαγνητική ροή με το τυλίγμα του στάτη σε Weber.

- Ποιοτική σχέση μεταξύ πεπλεγμένης ροής και ρεύματος.

Με βάση τον Νόμο του Hopkinson των μαγνητικών κυκλωμάτων, ισχύει ότι:

$$ni = R_m \Phi \quad \text{και} \quad n^2 i = R_m \Psi \quad (4.4)$$

όπου R_m , η μαγνητική αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος.

Ισχύει:
$$R_m = \frac{l}{\mu A} \quad (4.5)$$

όπου: l το μήκος της μέσης μαγνητικής δυναμικής γραμμής, A το εμβαδόν της διατομής του μαγνητικού κυκλώματος και μ η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου, στο οποίο αναπτύσσεται η μαγνητική ροή.

Για το σύστημα που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2α, η μαγνητική αντίσταση του μαγνητικού κυκλώματος εξαρτάται απ' τη θέση του δρομέα.

Όταν μεταβάλλεται η γωνία φ , μεταβάλλεται το μήκος της διαδρομής στο διάκενο, το οποίο έχει μία μαγνητική διαπερατότητα μικρή και σταθερή, ως προς το μήκος της διαδρομής στο σιδηρομαγνητικό υλικό, που έχει μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα (η οποία μεταβάλλεται λόγω του φαινομένου του μαγνητικού κόρου).

Αν η θέση του δρομέα είναι $\varphi = 0$, το διάκενο είναι μεγάλο, οπότε η μαγνητική ροή (ανάλογα και το ρεύμα) έχει μικρή τιμή, αλλά μεταβάλλεται γραμμικά με το ρεύμα. Αν η θέση του δρομέα είναι $\varphi = \frac{\pi}{2}$, το διάκενο είναι μικρό, οπότε η μαγνητική ροή είναι μεγαλύτερη, αλλά παρουσιάζεται το φαινόμενο του μαγνητικού κόρου για μεγάλες τιμές ρεύματος.

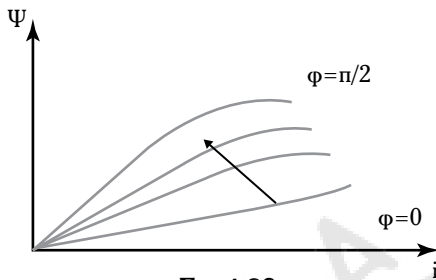
Στο σχήμα 4.2β, δίδονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής και του ρεύματος οι οποίες περιλαμβάνονται μεταξύ των ορι-

ακών θέσεων $\varphi \left(0, \frac{\pi}{2} \right)$ του συστήματος.

Το σύνολο των χαρακτηριστικών αυτών καμπυλών και της εξισώσεως των τάσεων, αποτελεί το πρότυπο του στοιχειώδους κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως:

$$u(t) = i(t)R + \frac{d\Psi}{dt} \quad (4.6)$$

$$\Psi = \Psi(i, \Phi). \quad (4.7)$$



Σχ. 4.2β

Χαρακτηριστικές καμπύλες της πεπλεγμένης ροής και του ρεύματος σε έναν στοιχειώδη κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως.

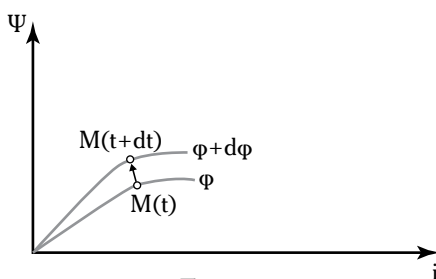
4.2.2 Ενεργειακό ισοζύγιο.

Θεωρούμε το ηλεκτρομαγνητικό σύστημα του σχήματος 4.2γ στη διάρκεια λειτουργίας ενός στοιχειώδους χρόνου dt , στο οποίο συμβαίνει μια στοιχειώδης μετατόπιση του δρομέα $d\varphi$. Το ρεύμα, η πεπλεγμένη ροή και η θέση του δρομέα καθορίζουν το σημείο λειτουργίας M στο επίπεδο $\Psi - i$.

Αν πολλαπλασιάσουμε και τα δύο μέλη της εξισώσεως 4.6 με idt , προκύπτει το ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος:

$$uidt = Ri^2dt + d\Psi i. \quad (4.8)$$

Το πρώτο μέλος της εξισώσεως 4.8 ($dW_e = uidt$) εκφράζει την ηλεκτρική ενέργεια, την οποία προσφέρει το δίκτυο στο σύστημα στο χρόνο dt .



Σχ. 4.2γ

Μετατόπιση σημείου λειτουργίας στις μαγνητικές χαρακτηριστικές του κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως.

Το πρώτο μέλος του δεύτερου μέρους της εξισώσεως 4.8, εκφράζει τις απώλειες Joule (dW_J).

$$\text{Ισχύει:} \quad dW_e = id\Psi = dW_f + dW_m. \quad (4.9)$$

Η εξίσωση 4.9, εκφράζει την ηλεκτρική ενέργεια, μέρος της οποίας αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο dW_f , και το υπόλοιπο μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια dW_m , η οποία αποδίδεται στον άξονα του συστήματος.

Για τον στοιχειώδη κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως (σχ. 4.2α), η μηχανική ενέργεια ισούται με το μηχανικό έργο της ροπής T , η οποία ασκείται στην κατεύθυνση της μετατοπίσεως $d\varphi$ του δρομέα:

$$dW_m = Td\varphi. \quad (4.10)$$

4.2.3 Αποθηκευμένη ενέργεια. Συνενέργεια.

Για τον υπολογισμό της αποθηκευμένης ενέργειας στο μαγνητικό πεδίο του κινητήρα του σχήματος 4.2α, θεωρούμε σταθερό τον δρομέα στη θέση $\varphi = 0$. Σε αυτήν την περίπτωση η ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου, μετασχηματίζεται σε μαγνητική ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο. Δεν υπάρχει μηχανική ενέργεια γιατί ο δρομέας, όταν $\varphi = 0$, δεν περιστρέφεται. Με βάση την ακόλουθη σχέση διατυπώνουμε το ισοζύγιο ενέργειας στο διάστημα $[0, t]$:

$$dW_e = id\Psi = dW_f. \quad (4.11)$$

Ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου:

$$W_e = \int_0^t uidt. \quad (4.12)$$

Ηλεκτρική ενέργεια, η οποία καταναλώνεται στην αντίσταση R :

$$W_J = \int_0^t Ri^2dt. \quad (4.13)$$

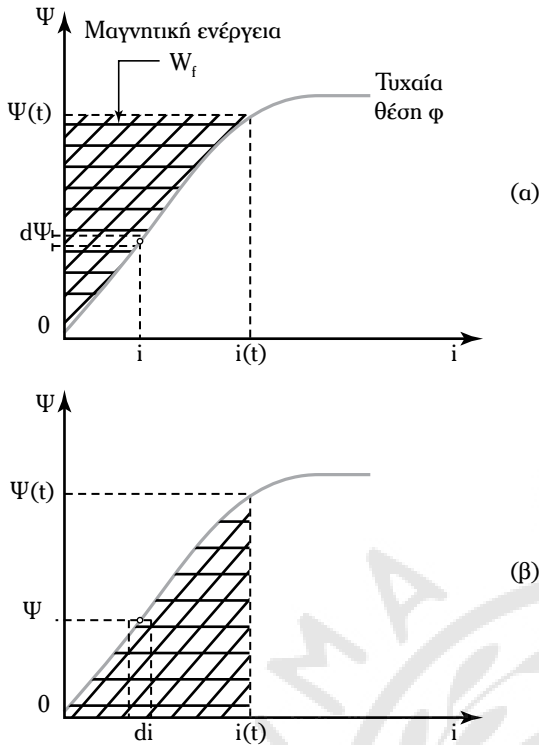
Ενέργεια, που αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο:

$$W = W_e - W_J = W_f = \int_0^\Psi id\Psi. \quad (4.14)$$

Η γραμμοσκιασμένη περιοχή στο σχήμα 4.2δ(α), εκφράζει τη μαγνητική ενέργεια.

Η συνενέργεια (γραμμοσκιασμένη περιοχή), ορίζεται στο σχήμα 4.2δ(β), ως εξής:

$$W_c = \int_0^i \Psi di. \quad (4.15)$$



Σχ. 4.28

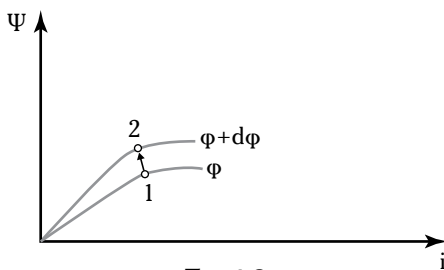
(α) Μαγνητική ενέργεια και
(β) ορισμός της συνενέργειας στο επίπεδο Ψ-i.

Η ενέργεια και η συνενέργεια συνδέονται μεταξύ τους με την ακόλουθη εξίσωση:

$$W_f + W_c = \Psi i. \quad (4.16)$$

4.2.4 Ηλεκτρομαγνητική ροπή.

Το ηλεκτρομηχανικό σύστημα του σχήματος 4.2α, στο χρονικό διάστημα dt μετατοπίζει το σημείο λειτουργίας του όταν μεταβάλλεται το ρεύμα, η μαγνητική ροή και η θέση του δρομέα (μετατόπιση από το σημείο 1 στο σημείο 2) (σχ. 4.2ε).



Σχ. 4.2ε

Μεταβολή του σημείου λειτουργίας του στοιχειώδους κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως, όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή σε συνάρτηση με το ρεύμα.

Για τον υπολογισμό της μηχανικής ενέργειας (οπότε και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής T) του ηλεκτρομηχανικού συστήματος θεωρούμε τα ακόλουθα δύο είδη μετατοπίσεως του σημείου λειτουργίας του:

1) Μετατόπιση του σημείου λειτουργίας όταν η ροή διατηρείται σταθερή.

Όταν η μετατόπιση πραγματοποιείται με σταθερή ροή (dΨ = 0) η παρεχόμενη στο σύστημα ηλεκτρική ενέργεια ισούται με μηδέν (dW_e = idΨ = 0). Από το ισοζύγιο ενέργειας προκύπτει:

$$dW_e = 0 = dW_m + dW_f. \quad (4.17)$$

Με σταθερή μαγνητική ροή, η μηχανική ενέργεια (χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το αρνητικό πρόσημο) ισούται με τη μεταβολή της αποθηκευμένης ενέργειας:

$$dW_m = Td\phi = -dW_f \mid \psi = \text{σταθ.} \quad (4.18)$$

Η μαγνητική ενέργεια είναι συνάρτηση περισσότερων μεταβλητών (θέση δρομέα, ρεύμα και μαγνητική ροή). Η ροπή γράφεται ως εξής:

$$T = - \frac{dW_f}{d\phi} \mid \psi = \text{σταθ.} \quad (4.19)$$

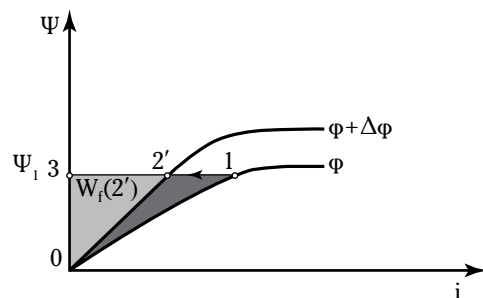
Με βάση την εξίσωση 4.19, υπολογίζουμε την ηλεκτρομαγνητική ροπή όταν W_f = W_f(Ψ, φ).

Στο σχήμα 4.2στ, δίδεται η μετατόπιση του σημείου λειτουργίας, του συστήματος, απ' τη θέση 1 στη θέση 2' και ο υπολογισμός της αντίστοιχης μεταβολής της μαγνητικής ενέργειας ΔW_f (Ψ₁ είναι η σταθερή τιμή της ροής).

Στην περίπτωση αυτή ισχύει:

1) Μαγνητική ενέργεια στο σημείο 1:

$$W_f^{(1)} = \int_0^{\Psi_1} i d\Psi \mid \phi = \text{εμβαδόν (0130)}. \quad (4.20)$$



Σχ. 4.2στ

Μετατόπιση του σημείου λειτουργίας με σταθερή ροή.

2) Μαγνητική ενέργεια στο σημείο 2':

$$W_f^{(2')} = \int_0^{\Psi_1} id\Psi \Big|_{\Phi + \Delta\Phi = \text{εμβαδόν (02'30)}}. \quad (4.21)$$

3) Μεταβολή της μαγνητικής ενέργειας:

$$\Delta W = W_f^{(2')} - W_f^{(1)} = -\text{εμβαδόν (012'0)}. \quad (4.22)$$

2) Μετατόπιση του σημείου λειτουργίας όταν το ρεύμα διατηρείται σταθερό.

Σ' αυτήν την περίπτωση $dW_e = id\Psi \neq 0$. Η μεταβολή της μαγνητικής ενέργειας δίδεται από την εξίσωση:

$$dW_m = dW_e - dW_f. \quad (4.23)$$

Από το σχήμα 4.2ζ, προκύπτουν οι εξής ενέργειες:

1) **Παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια:**

$$\Delta W = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} id\Psi = i(\Psi_2 - \Psi_1) = \text{εμβαδόν (12''43)}$$

$$i = \text{σταθ.} \quad (4.24)$$

2) **Μαγνητική ενέργεια στο σημείο 1:**

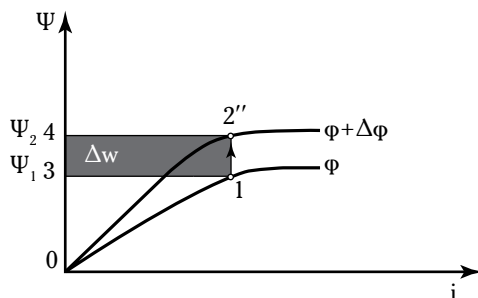
$$W_f^{(1)} = \int_0^{\Psi_1} id\Psi = \text{καμπύλη}(\Phi) = \text{εμβαδόν (0130)}. \quad (4.25)$$

3) **Μαγνητική ενέργεια στο σημείο 2'':**

$$W_f^{(2'')} = \int_0^{\Psi_2} id\Psi = \text{καμπύλη}(\Phi + \Delta\Phi) = \text{εμβαδόν (02''40)}. \quad (4.26)$$

4) **Μεταβολή της μαγνητικής ενέργειας:**

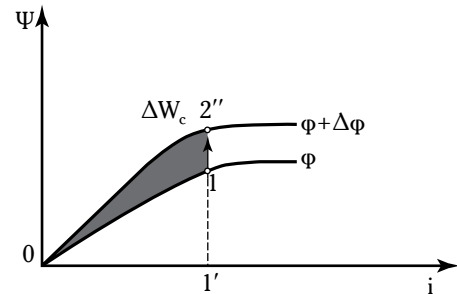
$$\Delta W_f = W_f^{(2'')} - W_f^{(1)} = \text{εμβ. (2''432)} - \text{εμβ. (012'0)}. \quad (4.27)$$



Σχ. 4.2ζ

Μετατόπιση του σημείου λειτουργίας με σταθερό ρεύμα.

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 4.24 και 4.27 στην εξίσωση 4.23, διαμορφώνεται η γραφική παράσταση του σχήματος 4.2η:



Σχ. 4.2η

Μεταβολή της μαγνητικής συνενέργειας.

Από το σχήμα 4.2η έχομε:

$$dW_m = \text{εμβαδόν (12''43)} - \text{εμβαδόν (2''432')} + \text{εμβαδόν (012'0)} = \text{εμβαδόν (012''0)} = \Delta W_c.$$

Αν η μετατόπιση του σημείου λειτουργίας γίνεται με σταθερό ρεύμα, η μηχανική ενέργεια ισούται με την μεταβολή της συνενέργειας:

$$dW_m = Td\Phi = dW_c \Big|_{i = \text{σταθ.}} \quad (4.28)$$

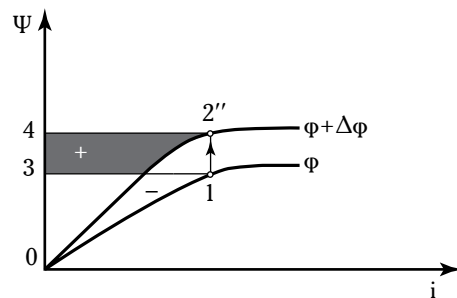
όποτε η ροπή T είναι:

$$T = \frac{dW_c}{d\Phi} \quad \text{για } i = \text{σταθ.} \quad (4.29)$$

Με βάση την εξίσωση 4.29, υπολογίζομε την ηλεκτρομαγνητική ροπή χρησιμοποιώντας τη συνενέργεια $W_c = W_c(i, \Phi)$.

4.2.5 Γραμμικά συστήματα.

Στο σχήμα 4.2ι, δίδεται η γραμμική σχέση μαγνητικής ροής-ρεύματος για κάθε θέση του δρομέα, του στοιχειώδους κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως. Σε



Σχ. 4.2θ

Μεταβολή της μαγνητικής ενέργειας.

αυτήν την περίπτωση ενέργεια και συνενέργεια συμπίπτουν (σχ. 4.2ι):

$$W_f \equiv W_c \quad (4.30)$$

Από την εξίσωση: $W_c \equiv W_f' = \int_0^i \Psi di$

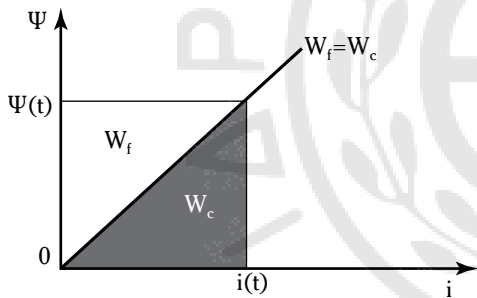
προκύπτει: $W_f = W_f' (\equiv W_c) = \frac{1}{2} \Psi i$. (4.31)

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή εκφράζεται σε συνάρτηση, μόνο της μαγνητικής ενέργειας:

$$T = \frac{\partial W_f}{\partial \Phi} \Big|_{i = \text{σταθ.}} \quad (4.32)$$

$$T = - \frac{\partial W_f}{\partial \Phi} \Big|_{\Psi = \text{σταθ.}} \quad (4.33)$$

Συνήθως, χρησιμοποιείται η εξίσωση 4.32, για τον υπολογισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, γιατί τα ρεύματα είναι μετρήσιμα οπότε λαμβάνονται ως ανεξάρτητες μεταβλητές, ενώ η μαγνητική ροή υπολογίζεται απ' αυτά.



Σχ. 4.2ι

Ενέργεια και συνενέργεια στα γραμμικά ουστήματα.

- Υπολογισμός της ηλεκτρομαγνητικής ροπής του κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως.

Στο σχήμα 4.2ια(α), δίδεται ο στοιχειώδης κινητήρας μαγνητικής αντιστάσεως. Θεωρούμε το ηλεκτρομηχανικό σύστημα γραμμικό, υποθέτοντας ότι το ρεύμα λαμβάνει τέτοιες τιμές, ώστε να μην εμφανίζεται το φαινόμενο του **μαγνητικού κόρου**. Οπότε οι χαρακτηριστικές $\psi-i$ είναι γραμμικές [σχ. 4.2ια(β)]. Η σχέση μεταξύ πεπλεγμένης ροής και ρεύματος δίδεται ως εξής:

$$\Psi = L(\varphi) i \quad (4.34)$$

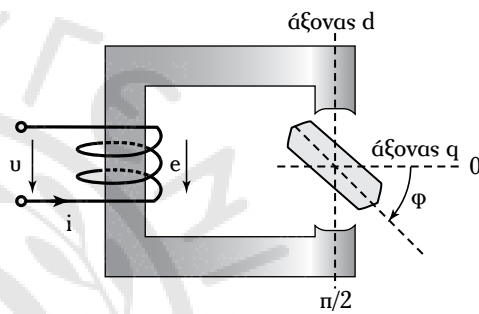
όπου $L(\varphi)$ η αυτεπαγωγή, η οποία εκφράζει την κλίση των διαφόρων μαγνητικών χαρακτηριστικών σε

συνάρτηση με την γωνιακή θέση του δρομέα.

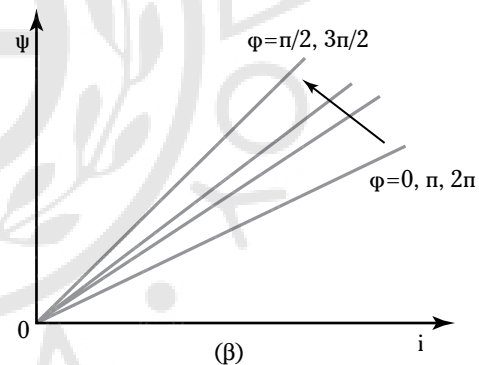
Η αυτεπαγωγή στη θέση του άξονα d είναι μεγαλύτερη από εκείνη, που αντιστοιχεί στη θέση του άξονα q . Αν L_d και L_q είναι οι τιμές της αυτεπαγωγής στους άξονες d και q αντίστοιχα, για ημιτονοειδή μεταβολή σε συνάρτηση με την γωνία φ λαμβάνουμε τη γραφική παράσταση (σχ. 4.2ιβ) με περίοδο π :

$$L(\varphi) = L_o - \hat{L} \cos(2\varphi). \quad (4.35)$$

Με: $L_o = \frac{(L_d - L_q)}{2}$ $\hat{L} = \frac{(L_d - L_q)}{2}$. (4.36)

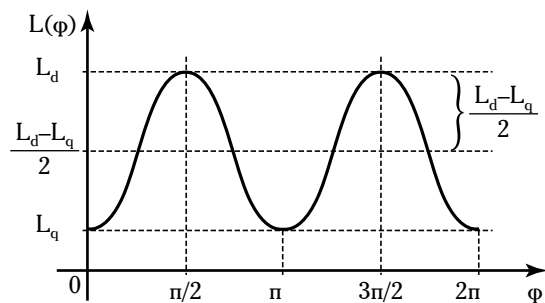


(α)



Σχ. 4.2ια

Μαγνητικές χαρακτηριστικές του γραμμικού ηλεκτρομηχανικού ουστήματος.



Σχ. 4.2ιβ

Μεταβολή της αυτεπαγωγής με την θέση του δρομέα.

Για τον υπολογισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής για γραμμικά συστήματα χρησιμοποιείται η εξίσωση 4.32.

Πρώτα, όμως, πρέπει να βρούμε μία σχέση για την ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο W_f . Αντικαθιστώντας την εξίσωση 4.34, στην εξίσωση 4.31, προκύπτει:

$$W_f = \frac{1}{2} L(\phi) i^2. \quad (4.37)$$

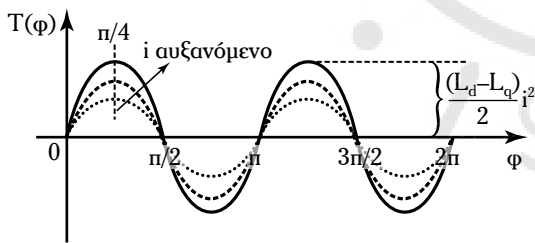
Η εξίσωση 4.37, εκφράζει την αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια σε γραμμικά συστήματα. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 4.32 την εξίσωση 4.37 και παραγωγίζοντας ως προς τη θέση (με ρεύμα σταθερό) τη συνάρτηση $W_f(i, \phi)$, έχουμε:

$$T = \frac{1}{2} \frac{dL(\phi)}{d\phi} i^2. \quad (4.38)$$

Η εξίσωση 4.38, εκφράζει την ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως (σχ. 4.21γ). Αντικαθιστώντας την εξίσωση 4.35 στην εξίσωση 4.38 και παραγωγίζοντας ως προς ϕ λαμβάνουμε τη ροπή σε συνάρτηση των παραμέτρων L_d και L_q (σχ. 4.21β):

$$T = i^2 \frac{(L_d - L_q)}{2} \sin(2\phi). \quad (4.39)$$

Για κυλινδρικό δρομέα ($L_d = L_q$) η ροπή είναι μηδενική.

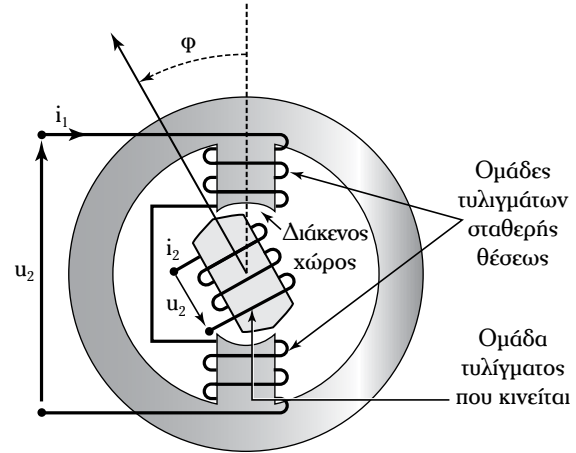


Σχ. 4.21γ

Χαρακτηριστική ροπής-θέσεως του δρομέα του γραμμικού ηλεκτρομαγνητικού συστήματος.

4.3 Μαγνητικό σύστημα με διπλή διέγερση.

Τα περισσότερα συστήματα ηλεκτρομαγνητικής μετατροπής ενέργειας διαθέτουν περισσότερα τυλίγματα. Στα συστήματα διπλής διεγέρσεως (σχ. 4.3α) μια ομάδα τυλιγμάτων τοποθετείται στον στάτη και μια άλλη ομάδα στον δρομέα. Όταν μια ομάδα τυ-



Σχ. 4.3α

Μαγνητικό σύστημα με διπλή διέγερση.

λιγμάτων κινείται ως προς τα τυλίγματα της άλλης ομάδας προκαλείται μεταβολή της ενέργειας του συνολικού μαγνητικού πεδίου στον διάκενο χώρο του συστήματος (σχ. 4.3α), οπότε αναπτύσσονται μηχανικές δυνάμεις. Η λειτουργία των στρεφομένων μηχανών βασίζεται σε αυτήν την αρχή μετατροπής ενέργειας.

1) Ηλεκτρικές εξισώσεις του μαγνητικού συστήματος διπλής διεγέρσεως.

Οι ηλεκτρικές εξισώσεις των δυο τυλιγμάτων είναι:

1) Η ηλεκτρική εξίσωση του στάτη:

$$u_1 = R i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt}. \quad (4.40)$$

2) και η ηλεκτρική εξίσωση του δρομέα:

$$u_2 = R i_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} \quad (4.41)$$

όπου Ψ_1 και Ψ_2 οι συνολικές πεπλεγμένες μαγνητικές ροές του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη τη γραμμικότητα, έχουμε:

$$\Psi_1 = \Psi_{11} + \Psi_{12} = L_1(\phi) i_1 + M_{12}(\phi) i_2 \quad (4.42)$$

$$\Psi_2 = \Psi_{21} + \Psi_{22} = M_{21}(\phi) i_1 + L_2(\phi) i_2 \quad (4.43)$$

$$\text{όπου: } \Psi_{11} = L_1(\phi) i_1 \text{ και } \Psi_{21} = M_{21}(\phi) i_1 \quad (4.44)$$

οι κοινές μαγνητικές ροές του στάτη και του δρομέα, ενώ M_{12} και M_{21} οι συντελεστές αλληλεπαγωγής.

Οι ηλεκτρικές εξισώσεις 4.40, 4.41 και οι εξισώσεις των πεπλεγμένων ροών 4.42, 4.43 γράφονται

ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{bmatrix} \rightarrow \\ \rightarrow v &= Ri + \frac{d\Psi}{dt} \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_1(\varphi) & M_{12}(\varphi) \\ M_{21}(\varphi) & L_2(\varphi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \rightarrow \\ \rightarrow \Psi &= L(\varphi)i \end{aligned} \quad (4.46)$$

$$\text{όπου: } v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, i = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, \Psi = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

είναι τα διανύσματα των τάσεων, των ρευμάτων και των πεπλεγμένων ροών, και

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix}, L(\varphi) = \begin{bmatrix} L_1(\varphi) & M_{12}(\varphi) \\ M_{21}(\varphi) & L_2(\varphi) \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

είναι η μήτρα των ωμικών αντιστάσεων και η αντίστοιχη των αλληλεπαγωγών και αυτεπαγωγών.

2) Μαγνητική ενέργεια.

Για τον υπολογισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της συνολικής μαγνητικής ενέργειας, η οποία αποθηκεύεται στο σύστημα του σχήματος 4.3α και οφείλεται στη λειτουργία των συνολικών τυλίγματος. Γενικά, για ένα σύστημα ηλεκτρομαγνητικής μετατροπής ενέργειας, το οποίο περιλαμβάνει πολλαπλά τυλίγματα η συνολική μαγνητική ενέργεια γράφεται ως εξής:

$$W_f = \sum_{k=1}^N W_{fk} \quad (4.49)$$

όπου W_{fk} είναι η αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια στο τυλίγμα, για την οποία ισχύει:

$$W_{fk} + W_{ck} = i_k \Psi_k \quad (4.50)$$

Λαμβάνοντας το άθροισμα της εξίσωσης 4.49, για όλα τα τυλίγματα και αθροίζοντας την εξίσωση 4.50, για όλα τα τυλίγματα έχουμε:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N (W_{fk} + W_{ck}) &= \sum_{k=1}^N i_k \Psi_k = \\ &= i_1 \Psi_1 + i_2 \Psi_2 + \dots + i_n \Psi_n = i^T \Psi \end{aligned} \quad (4.51)$$

$$\text{όπου: } i^T = [i_1 i_2 \dots i_N], \Psi = \begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \vdots \\ \Psi_N \end{bmatrix}. \quad (4.52)$$

Στην περίπτωση των γραμμικών συστημάτων έχουμε:

$$W_{fk} = W_{ck} \quad (4.53)$$

$$\Psi = L(\varphi). \quad (4.54)$$

Για πολλαπλά τυλίγματα έχουμε:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N (W_{fk} + W_{ck}) &= \sum_{k=1}^N 2W_{fk} = \\ &= 2W_f = i^T L(\varphi)i. \end{aligned} \quad (4.55)$$

Η μαγνητική ενέργεια είναι:

$$W_f = \frac{1}{2} i^T L(\varphi)i. \quad (4.56)$$

3) Ηλεκτρομαγνητική ροπή.

Υπολογίζουμε την ηλεκτρομαγνητική ροπή T ως εξής:

$$T = \frac{\partial W_f}{\partial \varphi} (i = \text{σταθ.}) \quad (4.57)$$

η οποία ισχύει με την υπόθεση της γραμμικότητας.

Αντικαθιστώντας την εξίσωση 4.56, στην εξίσωση 4.57, έχουμε:

$$T = \frac{\partial W_f}{\partial \varphi} (i = \text{σταθ.}) = \frac{1}{2} i^T \frac{dL(\varphi)}{d\varphi} i. \quad (4.58)$$

Στην περίπτωση ενός μαγνητικού συστήματος με διπλή διέγερση (ένα πηνίο στον στάτη και το άλλο στον δρομέα), (λαμβάνεται $M_{12} = M_{21} = M$) ισχύει:

$$T = \frac{1}{2} [i_1 i_2] \frac{d}{d\varphi} \left(\begin{bmatrix} L_1(\varphi) & M(\varphi) \\ M(\varphi) & L_2(\varphi) \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

$$\begin{aligned} \text{ή} \quad T &= \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1(\varphi)}{d\varphi} + i_1 i_2 \frac{dM(\varphi)}{d\varphi} + \\ &+ \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2(\varphi)}{d\varphi}. \end{aligned} \quad (4.60)$$

Ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρομαγνητικού συστήματος (γεωμετρία, ιδιαίτερα κατασκευαστικά κα-

ρακτηριστικά) η μήτρα των $L(\phi)$ θα είναι διαφορετική και θα έχουμε διαφορετικές συνιστώσες ροπών. Γενικά θα έχουμε:

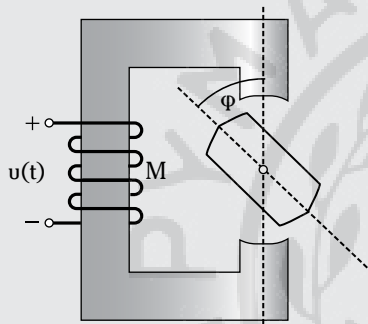
1) Ροπές μαγνητικής αντιστάσεως (1^{ος} και 3^{ος} όρος της εξίσωσης 4.60), ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος στην περίπτωση ενός μόνο πηνίου.

2) Ροπές, οι οποίες οφείλονται στην αλληλεπίδραση των ρευμάτων (2^{ος} όρος της εξίσωσης 4.60) του στάτη και του δρομέα.

- Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Δίδεται σύστημα ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας με απλή διέγερση (σχ. 4.3β).



Σχ. 4.3β

1) Να αποδείξετε ότι: $P_m = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt}$

όπου: P_m η μηχανική ισχύς και L η αυτεπαγωγή του τυλίγματος διεγέρσεως.

2) Να αποδείξετε τις σχέσεις της ροπής και της μηχανικής ισχύος όταν η αυτεπαγωγή μεταβάλλεται με ημιτονοειδή νόμο.

Λύση.

Η διάταξη του σχήματος από ηλεκτρικής απόψεως είναι ένα κύκλωμα σειράς με μεταβλητή αυτεπαγωγή και ωμική αντίσταση, οπότε ισχύει:

$$u = Ri + \frac{d}{dt}(Li) = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}. \quad (1)$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης 1 με την ένταση του ρεύματος i , έχουμε:

$$W = ui = Ri^2 + iL \frac{di}{dt} + i^2 \frac{dL}{dt}. \quad (2)$$

Η στιγμιαία ισχύς την οποία απορροφά το μαγνητικό πεδίο είναι:

$$P_m = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right) = Li \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt}. \quad (3)$$

Συγκρίνοντας την εξίσωση 3 με την εξίσωση η οποία δίνει το ενεργειακό ισοζύγιο του ηλεκτρικού κυκλώματος R , $L(t)$, η ηλεκτρική ισχύς εισόδου του συστήματος κατανέμεται ως εξής:

1) Απώλειες στην ωμική αντίσταση R : $P_j = Ri^2$

2) Ισχύς η οποία συνδέεται με το μαγνητικό πε-

δίο: $P_\mu = Li \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt}$.

3) Μηχανική ισχύς: $P_m = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt}$.

Όταν η αυτεπαγωγή μεταβάλλεται με ημιτονοειδή νόμο έχουμε:

$$P_m = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt} \frac{dt}{d\phi} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\phi} \Omega$$

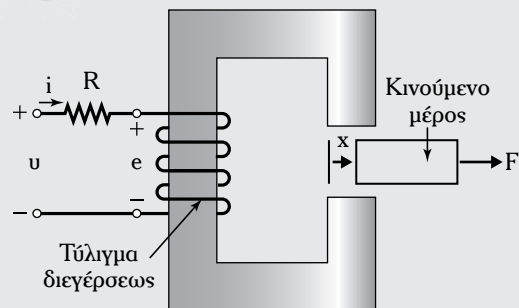
και
$$T = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\phi}.$$

όπου Ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε rad/s και η ταχύτητα περιστροφής του περιστρεφόμενου μέρους.

Άσκηση 2.

Για το μαγνητικό σύστημα με απλή διέγερση του σχήματος 4.3γ να αποδείξετε ότι η δύναμη η οποία ασκείται στο κινούμενο μέρος είναι:

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx}$$



Σχ. 4.3γ

Λύση.

Έστω R η ωμική αντίσταση του τυλίγματος διε-

γέρεως. Ο πυρήνας του τυλίγματος και του κινητού μέρους είναι από σιδηρομαγνητικό υλικό.

Σε μια χρονική στιγμή dt το σύστημα τροφοδοτείται με τάση v . Το τυλίγμα διαρρέεται με το ρεύμα i . Το x προσδιορίζει τη θέση του κινητού μέρους, ενώ ασκείται η δύναμη F στη θετική διεύθυνση του άξονα x .

Στο χρονικό διάστημα dt η δύναμη F επιδρά στο κινούμενο μέρος του παραπάνω σχήματος και το μετατοπίζει σε απόσταση dx . Το μηχανικό έργο της δυνάμεως F στο χρονικό διάστημα dt είναι:

$$dW_m = Fdx. \quad (1)$$

Η αποθηκευμένη στο μαγνητικό πεδίο ενέργεια είναι:

$$W_f(\Psi, x) = \int_0^\Psi i(\Psi, x)d\Psi. \quad (2)$$

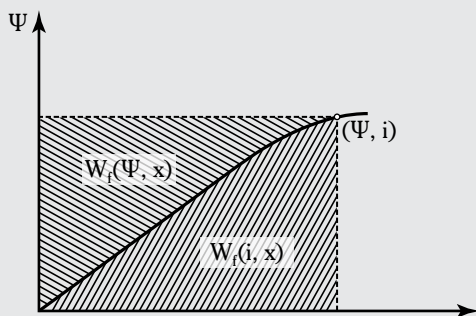
Για ένα γραμμικό μαγνητικό σύστημα (με σταθερή μαγνητική διαπερατότητα ή γραμμική μηχανική χαρακτηριστική έτσι, ώστε η αυτεπαγωγή του τυλίγματος να είναι ανεξάρτητη του ρεύματος i), ισχύει:

$$W_f(\Psi, x) = \frac{1}{2} \frac{\Psi^2}{L(x)}. \quad (3)$$

Η μηχανική δύναμη είναι:

$$F = -\frac{\partial W_f(\Psi, x)}{\partial x} = -\frac{1}{2} \left[\frac{\Psi}{L(x)} \right]^2 \frac{dL(x)}{dx} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx}. \quad (4)$$

Στο σχήμα 4.3δ δίδεται η καμπύλη μαγνητίσεως, όπου οι γραμμοσκιασμένες περιοχές, εκφράζουν την ενέργεια $W_f(\Psi, x)$ και την συνενέργεια $W_f(i, x)$.



Σχ. 4.3δ

Ισχύει: $W_f(i, x) = i\Psi - W_f(\Psi, x) \quad (5)$

$$\begin{aligned} \text{οπότε: } dW_f'(i, x) &= \Psi di + i d\Psi - dW_f(\Psi, x) = \\ &= \Psi di + Fdx = \\ &= \frac{\partial W_f(i, x)}{\partial i} di + \frac{\partial W_f(i, x)}{\partial x} dx. \end{aligned} \quad (6)$$

Ισχύει: $\Psi = \frac{\partial W_f(i, x)}{\partial x} \quad (7)$

$$F = \frac{\partial W_f(i, x)}{\partial x}. \quad (8)$$

Από το προηγούμενο σχήμα, το εμβαδόν της γραμμοσκιασμένης περιοχής το οποίο αντιστοιχεί στη συνενέργεια υπολογίζεται ως εξής:

$$W_f'(i, x) = \int_0^i \Psi(i, x) dx. \quad (9)$$

Για γραμμικό μαγνητικό σύστημα ισχύει:

$$W_f'(i, x) = \frac{1}{2} i^2 L(x). \quad (10)$$

Η δύναμη F υπολογίζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$F = \frac{\partial W_f'(i, x)}{\partial x} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx}. \quad (11)$$

Άσκηση 3.

Δίδεται γραμμικό σύστημα ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας [σχ. 4.3ε(α)].

Να υπολογίσετε τη δύναμη, η οποία ασκείται στο κινούμενο μέρος του συστήματος.

Λύση.

Θεωρούμε άπειρη τη μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα και του κινούμενου μέρους του συστήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3ε(β). Το σύστημα θεωρείται γραμμικό.

Από το ισοδύναμο κύκλωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3ε(γ), υπολογίζουμε την αυτεπαγωγή του τυλίγματος διεγέρσεως:

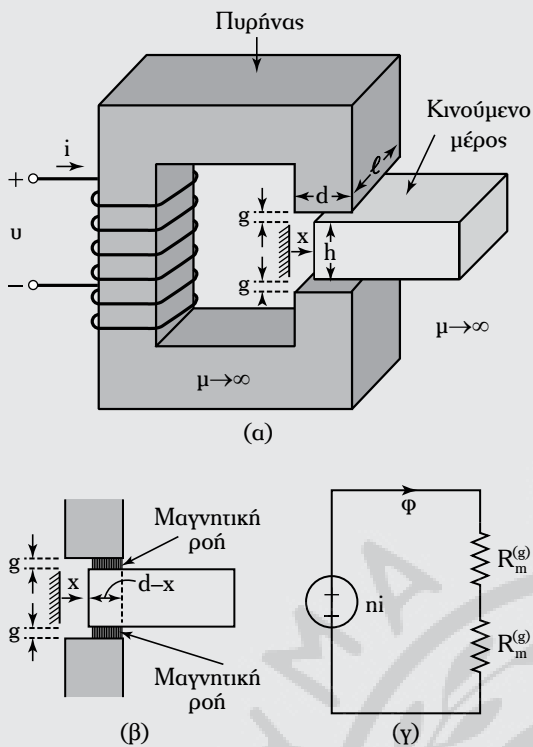
$$L(x) = \frac{n^2}{2R_m^{(g)}} = \frac{\mu_0 n^2 \cdot (d-x)}{2g}. \quad (1)$$

όπου n ο αριθμός σπειρών.

Η δύναμη, η οποία ασκείται στο κινούμενο μέρος είναι:

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} = -\frac{\mu_0 \cdot (ni)^2}{4g}. \quad (2)$$

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι δύναμη



Σχ. 4.3ε

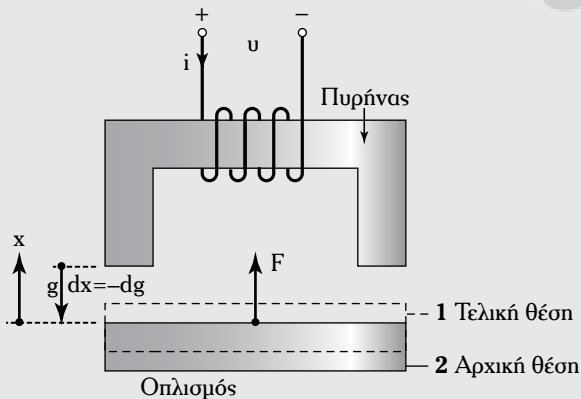
ασκείται στην κατεύθυνση μείωσης της μαγνητικής αντιστάσεως του διάκενου.

Άσκηση 4.

Δίδεται ηλεκτρομηχανικό σύστημα απλής διεγέρσεως, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3στ.

Η σχέση μεταξύ Ψ και i δίδεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Psi = \frac{0,2i^2}{g} \text{ με } 0 < i < 5 \text{ A και } 0,02 < g < 0,09 \text{ m.}$$



Σχ. 4.3στ

Αν $i = 2,5 \text{ A}$, να υπολογίσετε τη δύναμη F , η οποία ασκείται στον οπλισμό του συστήματος του σχήματος 4.3στ, όταν $g = 0,05 \text{ m}$.

Λύση.

$$\text{Ισχύει: } W_c = \int_0^i \Psi di = \int_0^i \frac{0,2i^3}{g} di = \frac{0,2}{0,05} \cdot \frac{i^3}{3}. \quad (1)$$

Είναι:

$$F = \frac{\partial W_c(i, g)}{\partial g} = \frac{\partial}{\partial g} \left(\frac{0,2}{g} \cdot \frac{1}{3} \cdot i^3 \right) = -\frac{0,2}{g^2} \cdot \frac{i^3}{3}. \quad (2)$$

Για $g = 0,05 \text{ m}$ και $i = 2,5 \text{ A}$ η εξίσωση 2 γίνεται:

$$F = \frac{0,2}{(0,05)^2} \cdot \frac{1}{3} \cdot (2,5)^3 = -417 \text{ N.}$$

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η δύναμη F δρα προς την κατεύθυνση μείωσης του μήκους του διάκενου.

4.4 Ερωτήσεις.

- 1) Να περιγράψετε τη δομή του κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως.
- 2) Να γράψετε και να εξηγήσετε τις εξισώσεις του ηλεκτρικού κυκλώματος του κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως.
- 3) Να γράψετε και να εξηγήσετε τη χαρακτηριστική μαγνήσεως του κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως.
- 4) Να γράψετε και να εξηγήσετε το ενεργειακό ισοζύγιο του κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως.
- 5) Να ορίσετε την ενέργεια και τη συνενέργεια και τις σχέσεις, οι οποίες τις συνδέουν.
- 6) Να αποδείξετε την εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής για μειατόπιση με σταθερή ροή.
- 7) Να αποδείξετε την εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής με σταθερό ρεύμα.
- 8) Τι εννοούμε όταν αναφερόμαστε στο γραμμικό κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως;
- 9) Να σχεδιάσετε και να εξηγήσετε την χαρακτηριστική μαγνήσεως του γραμμικού κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως.
- 10) Να γράψετε και να εξηγήσετε τις εξισώσεις των ηλεκτρικών κυκλωμάτων σε κινητήρα μαγνητικής αντιστάσεως με πολλαπλά τυλίγματα.

4.5 Προτεινόμενες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Για ηλεκτρομηχανικό σύστημα, το οποίο διεγείρεται από πηγή τάσεως, όπου η πεπλεγμένη ροή και το ρεύμα συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$i = \lambda^3 + 5\lambda^2 + 4\lambda(1-2x)^2 \quad \text{όπου } x < \frac{1}{2}$$

Να υπολογίσετε την δύναμη F , η οποία ασκείται στο κινούμενο μέρος του συστήματος ως συνάρτηση του λ και x .

Άσκηση 2.

Για ένα σύστημα διπλής διεγέρσεως έχουμε:

$$\begin{aligned} L_{11} &= (3 + \sin 2\theta) 10^{-3} \text{ H,} \\ M_{12} &= 0,14 \sin \theta \text{ H,} \\ L_{22} &= (18 + 4\sin 2\theta) \text{ H.} \end{aligned}$$

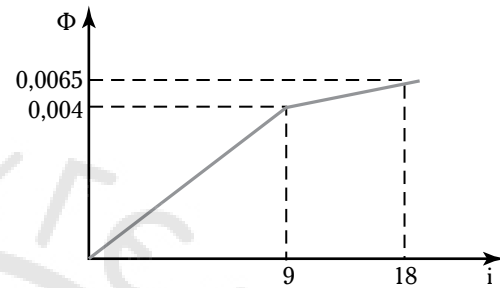
Να υπολογίσετε την αναπτυσσόμενη ροπή αν

$$i_1 = 0,8 \text{ A και } i_2 = 0,01 \text{ A.}$$

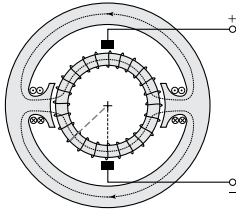
Άσκηση 3.

Σε ένα μαγνητικό κύκλωμα, η μαγνητική ροή αυξάνεται με μια γραμμική σχέση με το ρεύμα i του πηνίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5, στο οποίο πηνίο τοποθετείται σίδηρος.

Να υπολογίσετε την αποθηκευμένη ενέργεια στις δύο περιοχές του σχήματος σε συνάρτηση με το ρεύμα του πηνίου.



Σχ. 4.5



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

5.1 Εισαγωγή.

Οι **μηχανές συνεχούς ρεύματος (ΣΡ)** βρήκαν μεγάλο πεδίο εφαρμογής στη βιομηχανία, στην περίοδο μεταξύ 1870 και 1900. Ξεπεράστηκαν στις επόμενες χρονικές περιόδους με την ανάπτυξη της διανομής του εναλλασσόμενου ρεύματος, για να βρουν, πεδία εφαρμογής στις αρχές της δεκαετίας του '60 με την εισαγωγή των συστημάτων ανορθώσεως, τα οποία επιτρέπουν την μετατροπή εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές (C.A. – C.C.), με οικονομία και ασφάλεια.

Γεννήτριες ΣΡ χρησιμοποιούνται σε κάποιους σταθμούς παραγωγής για την τροφοδότηση της διεγέρσεως των συγχρόνων γεννητριών. Και σ' αυτές τις χρήσεις η τάση είναι οι γεννήτριες ΣΡ να αντικαθίστανται από γεννήτριες ΕΡ απευθείας συνδεδεμένες με συστήματα ανορθώσεως.

Οι κινητήρες ΣΡ βρίσκουν μεγάλα πεδία επαγγελματικών εφαρμογών λόγω της δυνατότητας ρυθμίσεως της ροπής και της ταχύτητας με χαρακτηριστικές, οι οποίες δεν υπάρχουν στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος.

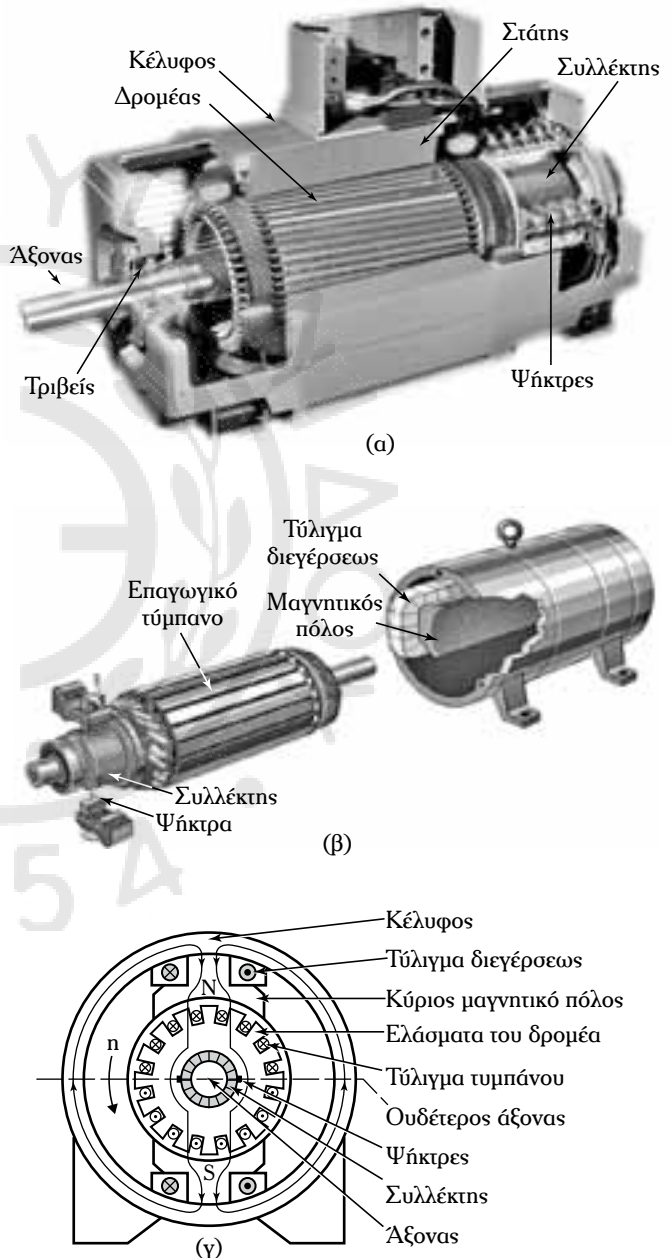
Σήμερα, κατασκευάζονται κινητήρες ΣΡ με ισχύ μεταξύ μερικών δεκάδων W και μερικών MW, με τάσεις μέχρι μερικά kV και ταχύτητα περιστροφής μεταξύ μερικών **Στροφών Ανά Λεπτό (ΣΑΛ)** και από 3.000 έως 4.000 ΣΑΛ.

5.2 Δομή των μηχανών ΣΡ.

Στο σχήμα 5.2α παρουσιάζεται μία μηχανή ΣΡ, τα κύρια μέρη της οποίας είναι ο στάτης, ο δρομέας, ο συλλέκτης και οι ψήκτρες. Αναλυτικότερα:

1) Στάτης.

Στον στάτη, που είναι το ακίνητο μέρος των μηχανών ΣΡ, τοποθετούνται οι κύριοι μαγνητικοί πόλοι, οι οποίοι είναι προεξέχοντες πόλοι (προεξέχουν από την επιφάνεια του στάτη).



Σχ. 5.2α

Εγκάρσια τομή μηχανής ΣΡ.

(α) Δομή μηχανής ΣΡ, (β) στάτης και δρομέας της και (γ) τομή διπολικής μηχανής ΣΡ.

Κάθε μαγνητικός πόλος αποτελείται από:

1) Τον **πυρήνα** [σχ. 5.2β(α)], ο οποίος κατασκευάζεται από πολλά λεπτά, ειδικά σιδερένια ελάσματα. Στον πυρήνα τοποθετείται το τυλίγμα διεγέρσεως το οποίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, κατάλληλης φοράς, έτσι ώστε να παράγεται η διαδοχική μαγνητική πολικότητα: Βόρειος (N) και Νότιος (S) πόλος. Η ελασματοποίηση του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα πραγματοποιείται για να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες από δινορρεύματα, τις οποίες προκαλούν και οι ηλεκτρονικές διατάξεις ελέγχου που παρέχουν τάσεις με υψηλές αρμονικές.

2) Το **πέλημα** [σχ. 5.2β(β)], το οποίο είναι υπεύθυνο για την κατανομή του μαγνητικού πεδίου στον διάκενο χώρο της μηχανής. Ανάλογα με τον αριθμό των μαγνητικών πόλων, τους οποίους διαθέτει μια μηχανή ονομάζεται **διπολική, τετραπολική, εξαπολική** κ.λπ.. Οι ηλεκτρικές μηχανές έχουν πάντοτε άρτιο αριθμό μαγνητικών πόλων.

Στα πέσματα εμφανίζονται δινορρεύματα λόγω των αυλακώσεων του δρομέα [σχ. 5.2γ(β)]. Το διάκενο μεταξύ πέσματος και δρομέα δεν είναι σταθερό, αλλά παρουσιάζει μικρές κυματώσεις, οπότε η μαγνητική επαγωγή ακολουθεί τον ρυθμό αυτών των κυματώσεων.

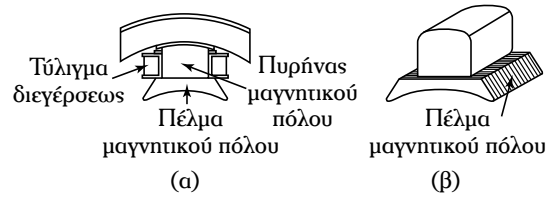
Η μεταβολή αυτής της μαγνητικής επαγωγής προκαλεί τάσεις από επαγωγή και συνεπώς δινορρεύματα στα πέσματα των μαγνητικών πόλων. Για να εμποδίσουμε την δημιουργία αυτών, κατασκευάζουμε τα πέσματα από λεπτά ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους [σχ. 5.2β(β)].

2) Δρομέας.

Ο δρομέας, δηλαδή το περιστρεφόμενο μέρος της μηχανής ΣΡ, είναι κυλινδρικού τύπου και κατασκευάζεται από πολλά λεπτά μαγνητικά ελάσματα [σχ. 5.2δ(β)]. Οι οδοντώσεις του δρομέα, οι οποίες έχουν τα ελάσματα στην περιφέρειά τους [σχ. 5.2γ(α)], σχηματίζουν τα αυλάκια του πυρήνα [σχ. 5.2γ(β) και σχ. 5.2δ(β)] μέσα στα οποία τοποθετούνται τα τυλίγματα του δρομέα.

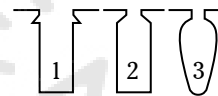
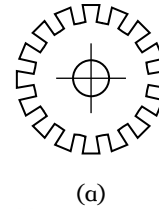
3) Συλλέκτης.

Ο συλλέκτης κατασκευάζεται από πολλά χάλκινα ελάσματα, τους **τομείς** [σχ. 5.2δ(α)], οι οποίοι μονώνονται μεταξύ τους με μονωτικό υλικό τύπου μίκας. Οι τομείς στερεώνονται ανάμεσα σε δυο σιδερένιους δακτύλιους, ώστε να σχηματίζουν την κυλινδρική επιφάνεια. Ο συλλέκτης τοποθετείται στο περιστρεφόμενο μέρος της μηχανής ΣΡ [σχ. 5.2δ(β)].



Σχ. 5.2β

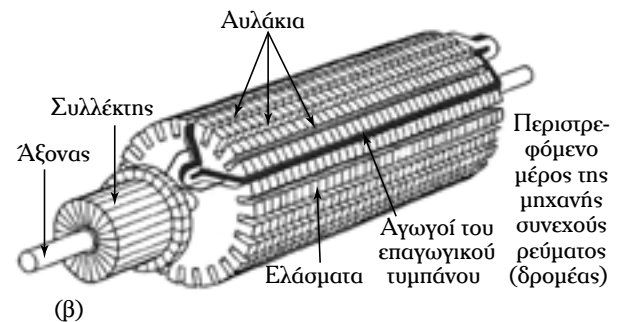
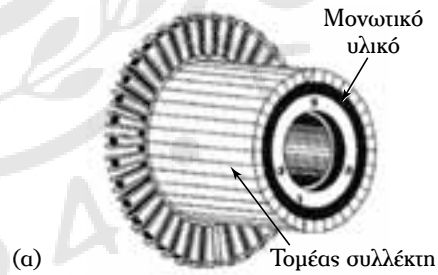
(α) Μαγνητικός πόλος του στάτι, και (β) πέλημα του κύριου μαγνητικού πόλου.



1) Αυλάκι ανοικτού τύπου (παράλληλόγραμο)
2) Αυλάκι ημίκλειστου τύπου (παράλληλόγραμο)
3) Αυλάκι ημίκλειστο τραπεζοειδούς μορφής (β)

Σχ. 5.2γ

(α) Έλασμα του σιδηρομαγνητικού υλικού του δρομέα και (β) διάφοροι τύποι αυλακίων των μηχανών ΣΡ.

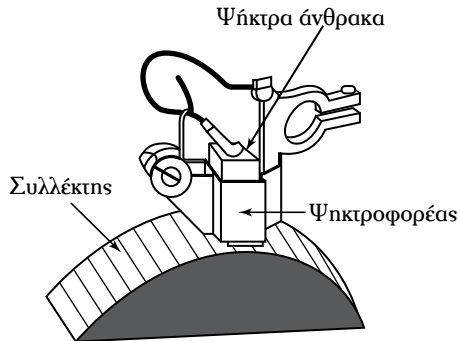


Σχ. 5.2δ

(α) Συλλέκτης μιας μηχανής ΣΡ και (β) θέση του συλλέκτη στο περιστρεφόμενο μέρος (δρομέας) της μηχανής ΣΡ.

4) Ψήκτες.

Οι ψήκτες (σχ. 5.2ε), κατασκευάζονται από άνθρακα ή μεταλλικό γραφίτη ή από μείγμα άνθρακα και γραφίτη.

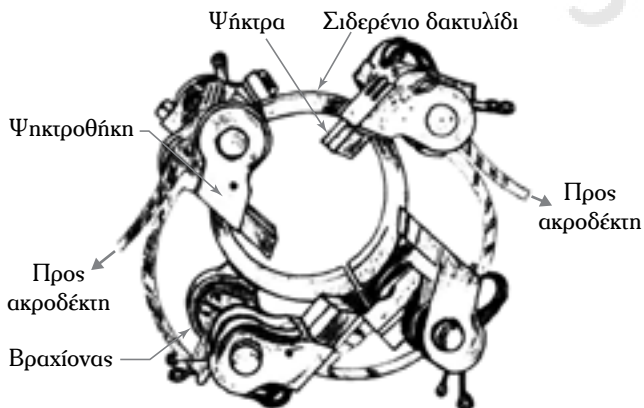


Σχ. 5.2ε
Ψήκτρα μηχανής ΣΡ.

Έχουν μεγάλη αγωγιμότητα και συνδέουν το επαγωγικό τύμπανο μ' ένα εξωτερικό κύκλωμα. Οι ψήκτες τοποθετούνται στις ψηκτροθήκες του ψηκτροφορέα (σχ. 5.2στ), ο οποίος στερεώνεται στο ακίνητο μέρος της μηχανής προς την πλευρά του συλλέκτη. Στους βραχίονες στερεώνονται οι ψηκτροθήκες, μέσα στις οποίες τοποθετούνται οι ψήκτες.

Η επιλογή της πίεσεως μεταξύ των επιφανειών ψήκτρας και συλλέκτη πρέπει να είναι κατάλληλη, γιατί αν η πίεση των ψηκτρών στον συλλέκτη είναι πολύ υψηλή, τότε τα δύο μέρη φθείρονται πολύ.

Αν η πίεση μεταξύ τους είναι πολύ μικρή, τότε μεταξύ των ψηκτρών και της επιφάνειας του συλλέκτη δημιουργείται κενό, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σπινθήρες.



Σχ. 5.2στ
Ψηκτροφορέας.

5.3 Τυλίγματα μηχανών ΣΡ.

5.3.1 Δομικά χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων τυμπάνου.

Τα τυλίγματα επαγωγικού τυμπάνου είναι το σημαντικότερο μέρος των μηχανών ΣΡ γιατί μέσα σε αυτά αναπτύσσονται οι τάσεις και μέσω αυτών οδηγείται το κύριο ρεύμα της ηλεκτρικής μηχανής.

Το επαγωγικό τύμπανο, στις μηχανές ΣΡ, τοποθετείται στον δρομέα, ο οποίος αποτελείται από δισκοειδή ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού. Η περιφέρεια κάθε δίσκου διαμορφώνεται με οδοντώσεις. Όταν τα δισκοειδή ελάσματα [σχ. 5.2γ(α)] συγκροτούν τον πυρήνα του δρομέα σχηματίζονται τα αυλάκια, μέσα στα οποία τοποθετούνται τα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου.

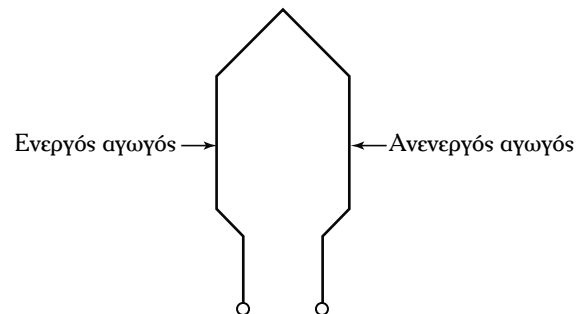
Το τύλιγμα τυμπάνου, συνήθως, αποτελείται από δυο στρώσεις αγωγών, σε κάθε αυλάκι: η πρώτη στρώση τοποθετείται κοντά στο διάκενο και η δεύτερη στο εσωτερικό μέρος του αυλακιού.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων τυμπάνων είναι:

1) Ο **αγωγός**, δηλαδή το στοιχειώδες μέρος του τυλιγματος, όπου το ενεργό τμήμα τοποθετείται στο εσωτερικό του αυλακιού, ενώ το υπόλοιπο είναι ο συνδετήριος αγωγός ο οποίος τοποθετείται στα μέτωπα των επιφανειών του δρομέα.

2) Η **σπείρα** (πλαίσιο), δηλαδή το μέρος του τυλιγματος το οποίο αποτελείται από δύο (ενεργούς) αγωγούς συνδεδεμένους σε σειρά (σχ. 5.3α).

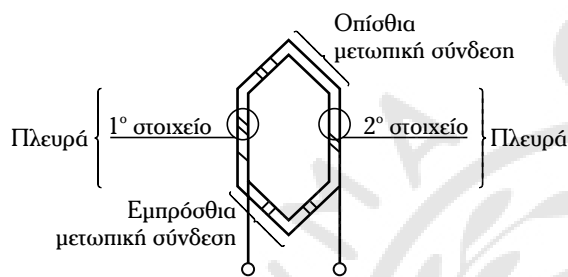
3) Η **ομάδα τυλιγματος**: Όταν το πλαίσιο αποτελείται από πολλούς αγωγούς συνδεδεμένους σε σειρά, τότε έχουμε την ομάδα τυλιγματος (σχ. 5.3β). Οι πλευρές της ομάδας ονομάζονται **στοιχεία**. Η σύνδεση των στοιχείων μεταξύ τους, προς την πλευρά του συλλέκτη ονομάζεται **εμπρόσθια μετωπική σύνδεση**, ενώ η αντίθετη ονομάζεται **οπίσθια με-**



Σχ. 5.3α
Σπείρα (πλαίσιο).

τωπική σύνδεση (σχ. 5.3β). Οι ομάδες διαμορφώνονται έτσι, ώστε η απόσταση μεταξύ των δύο στοιχείων τους να είναι ίση περίπου με την απόσταση των αξόνων δύο γειτονικών πόλων, η οποία ονομάζεται **πολικό βήμα** (τ_p).

4) Τα **στοιχεία**, δηλαδή οι πλευρές της ομάδας. Τα άκρα των ομάδων καταλήγουν σε διαφορετικούς τομείς του συλλέκτη. Κάθε στοιχείο μιας ομάδας βρίσκεται υπό την επίδραση μαγνητικών πεδίων, τα οποία προέρχονται από ετερόνυμους μαγνητικούς πόλους. Δύο διαδοχικοί κύριοι μαγνητικοί πόλοι βρίσκονται σε απόσταση 180 ηλεκτρικών μοιρών.



Σχ. 5.3β
Ομάδα τυλίγματος.

5.3.2 Είδη τυλίγματος.

Στις ηλεκτρικές μηχανές ΣΡ διακρίνουμε δυο είδη τυλίγματος επαγωγικού τυμπάνου, τα **βροχοτυλίγματα** ή παράλληλα τυλίγματα και τα **κυματοτυλίγματα** ή τυλίγματα σειράς.

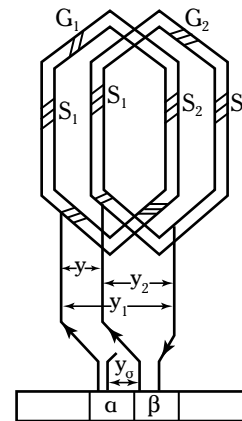
Στα βροχοτυλίγματα τα άκρα μιας ομάδας καταλήγουν σε γειτονικούς τομείς του συλλέκτη, ενώ στα κυματοτυλίγματα τα άκρα μιας ομάδας καταλήγουν σε απομακρυσμένους τομείς του συλλέκτη, οι οποίοι απέχουν περίπου ένα πλήρες (διπλό)¹ πολικό βήμα.

1) Βροχοτυλίγματα.

Στα βροχοτυλίγματα δημιουργούνται τόσο παράλληλοι κλάδοι στοιχείων ομάδων, όσος είναι ο αριθμός των μαγνητικών πόλων. Με αυτά τα τυλίγματα παράγονται μεγάλες εντάσεις ρευμάτων στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο συνδέεται στη μηχανή ΣΡ.

Στο σχήμα 5.3γ παρουσιάζεται ένα τυπικό βροχοτύλιγμα.

Τα άκρα των ομάδων G_1 και G_2 καταλήγουν σε γειτονικούς τομείς.

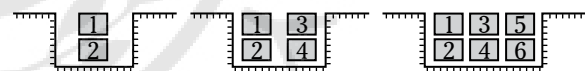


Σχ. 5.3γ
Τυπικό βροχοτύλιγμα ΣΡ.

Κάθε στοιχείο των ομάδων αποτελείται από περισσότερους του ενός αγωγούς. Έστω z ο αριθμός των αγωγών κάθε στοιχείου.

Τα στοιχεία των ομάδων τοποθετούνται στα αυλάκια K (αριθμός αυλακιών), τα οποία διαμορφώνονται από τις οδοντώσεις των ελασμάτων του δρομέα. Τα στοιχεία S_1 και S_2 μιας ομάδας βρίσκονται κάτω από την επίδραση ετερόνυμων πόλων. Τα στοιχεία κατανέμονται σε στρώσεις (σχ. 5.3δ).

Η άνω στρώση αριθμείται με περιττούς αριθμούς, ενώ η κάτω στρώση με άρτιους αριθμούς.



Σχ. 5.3δ

Κατανομή σε στρώσεις των στοιχείων των ομάδων.

- Βήματα βροχοτυλίγματος.

Οι αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων ενός τυλίγματος μετρώνται, συνήθως, σε αριθμό οδοντώσεων ή αυλακιών (διαστήματα στοιχείων) των βροχοτυλίγματος.

Στην περίπτωση των βροχοτυλίγματος διακρίνουμε τα ακόλουθα βήματα (σχ. 5.3γ):

1) Το πρώτο μερικό βήμα (y_1), που είναι η απόσταση των στοιχείων της ίδιας ομάδας.

2) Το δεύτερο μερικό βήμα (y_2), που είναι η απόσταση του πρώτου στοιχείου μιας ομάδας και του δεύτερου στοιχείου της προηγούμενης ομάδας.

¹ Δύο συνεχόμενα απλά ποδικά βήματα αποτελούν ένα πλήρες ή διπλό πολικό βήμα.

3) Το βήμα τυλίγματος (y) που είναι η απόσταση των πρώτων στοιχείων δύο διαδοχικών ομάδων. Είναι άρτιος αριθμός και ισχύει η σχέση:

$$y = y_1 - y_2 \quad (5.1)$$

4) Το βήμα συλλέκτη (y_p) είναι ο αριθμός των τομέων που παρεμβάλλεται μεταξύ των άκρων των δύο στοιχείων της ομάδας.

Η απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο κυρίων διαδοχικών μαγνητικών πόλων ονομάζεται **πολικό βήμα**.

Αν D η διάμετρος του δρομέα, το πολικό βήμα σε κάποιο τμήμα της περιφέρειας του επαγωγικού τυμπάνου είναι:

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2P} \quad (5.2)$$

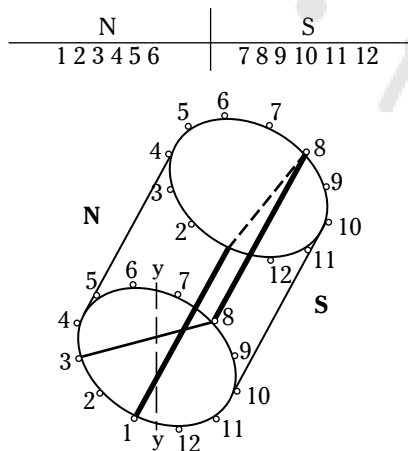
Όταν το πολικό βήμα εκφράζεται σε αριθμό στοιχείων τότε, έχουμε:

$$\tau_p = \frac{S}{2P} \quad (5.3)$$

όπου: S ο συνολικός αριθμός στοιχείων του τυλίγματος και P τα ζεύγη των κύριων μαγνητικών πόλων της μηχανής.

- Σχεδιασμός ενός απλού βροχοτυλίγματος.

Θεωρούμε 12 αγωγούς, οι οποίοι κατανομούνται στην περιφέρεια ενός κυλινδρικού δρομέα, μιας μηχανής ΣΡ, τοποθετημένοι, αρχικά, συμμετρικά ως προς το επίπεδο $y-y$ (σχ. 5.3ε).



Σχ. 5.3ε

Τοποθέτηση 12 αγωγών σε κυλινδρικό δρομέα μιας μηχανής ΣΡ και αρίθμηση αγωγών τοποθετημένων κάτω από τον Βόρειο (N) και Νότιο (S) πόλο αντίστοιχα.

Οι αγωγοί αριθμούνται από το 1 έως και το 12.

Έξι (6) αγωγοί τοποθετούνται κάτω από την επίδραση του Βόρειου πόλου (N) και έξι (6) αγωγοί τοποθετούνται κάτω από την επίδραση του Νότιου πόλου (S).

Συνδέουμε έναν αγωγό, ο οποίος αριθμείται με περιττό αριθμό και βρίσκεται κάτω από την επίδραση του Βόρειου πόλου με έναν αγωγό ο οποίος αριθμείται με άρτιο αριθμό και βρίσκεται κάτω από την επίδραση του Νότιου πόλου (σχ. 5.3ε), δηλαδή συνδέουμε τον αγωγό 1 με τον αγωγό 8.

Συνεχίζουμε, με τον ίδιο τρόπο, να συνδέουμε τους «περιττούς» αγωγούς με τους αντίστοιχους «άρτιους» (σχ. 5.3στ).



Σχ. 5.3στ

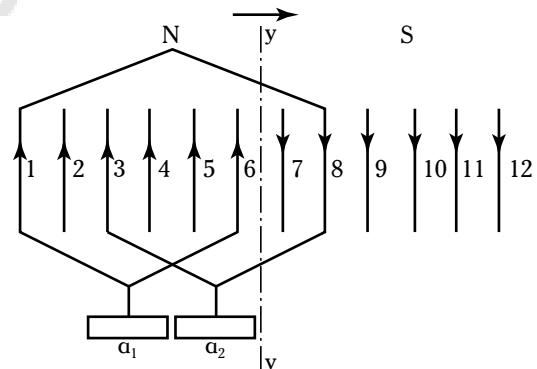
Σύνδεση περιττών με άρτιους αγωγούς.

Όταν ολοκληρωθεί η συνδεσμολογία των αγωγών προκύπτει η κατασκευή ενός απλού βροχοτυλίγματος, όπου κάθε εμπρόσθια μετωπική σύνδεση συνδέεται σε έναν τομέα του συλλέκτη.

Στο σχήμα 5.3ζ, παρουσιάζεται το ανάπτυγμα του απλού βροχοτυλίγματος στο επίπεδο.

Στο σχήμα αυτό ο τομέας α_1 συνδέεται με τον αγωγό 1, ο οποίος βρίσκεται κάτω από την επίδραση του Βόρειου πόλου. Στη συνέχεια, ο αγωγός 1 συνδέεται με τον αγωγό 8, ο οποίος βρίσκεται κάτω από την επίδραση του Νότιου πόλου κ.λπ..

Στο σχήμα 5.3η δίδεται, τελικά, η ολοκληρωμένη κατασκευή του απλού βροχοτυλίγματος, το οποίο αποτελείται από 12 αγωγούς.



Σχ. 5.3ζ

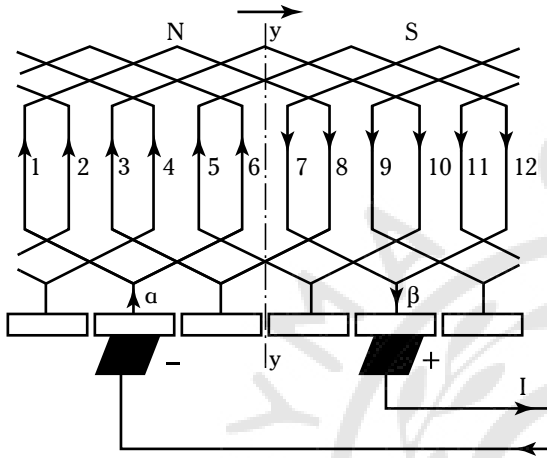
Ανάπτυξη στο επίπεδο ενός απλού βροχοτυλίγματος, το οποίο αποτελείται από δώδεκα αγωγούς.

Οι ψήκτρες στο σχήμα 5.3η, διαιρούν τους αγωγούς σε δύο παράλληλους κλάδους.

Γενικά, για τα απλά βροχοτυλίγματα ισχύει ότι:

- 1) Ο αριθμός των τομέων του συλλέκτη είναι ίσος με τον αριθμό των ομάδων του τυλίγματος.
- 2) Ο αριθμός των ψηκτρών είναι ίσος με τον αριθμό των μαγνητικών πόλων.

Τα βροχοτυλίγματα χρησιμοποιούνται στις μηχανές ΣΡ μεγάλης εντάσεως ρεύματος και μικρής τάσεως.

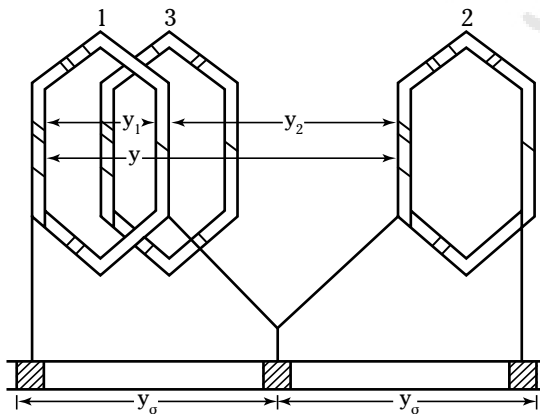


Σχ. 5.3η

Ολοκληρωμένη κατασκευή ενός απλού βροχοτυλίγματος δώδεκα αγωγών.

2) Κυματοτυλίγματα.

Στα κυματοτυλίγματα (τυλίγματα σειράς) οι παράλληλοι κλάδοι είναι πάντοτε δύο, ανεξάρτητα από τον αριθμό μαγνητικών πόλων της μηχανής (σχ. 5.3θ). Τα κυματοτυλίγματα παρέχουν στο εξωτερικό κύκλωμα της μηχανής μικρές τιμές εντάσεως ρεύματος.



Σχ. 5.3θ

Ομάδες από κυματοτυλίγματα.

Σε κάθε τομέα ενώνεται το τέλος μίας ομάδας με την αρχή της επόμενης, οπότε ο αριθμός των τομέων (T), είναι ίδιος με τον αριθμό των ομάδων του τυλίγματος και το 1/2 του αριθμού των στοιχείων του τυλίγματος:

$$T = G = \frac{S}{2} \quad (5.4)$$

όπου: G ο αριθμός ομάδων του τυλίγματος και S ο αριθμός των στοιχείων του τυλίγματος.

Τα στοιχεία μιας ομάδας βρίσκονται υπό την επίδραση ετερονύμων πόλων.

Στα κυματοτυλίγματα ο αριθμός των ψηκτρών αρκεί να ισούται με τον αριθμό των παράλληλων κλάδων. Όμως, συνηθίζεται στην πράξη ο αριθμός των ψηκτρών των κυματοτυλιγμάτων να ισούται με τον αριθμό των μαγνητικών πόλων. Αυτό γίνεται για να επιτυγχάνεται μείωση της ροής του ρεύματος που διαρρέει κάθε ψήκτρα.

- Βήματα κυματοτυλιγμάτων.

Τα βήματα σε ένα κυματοτύλιγμα είναι τα ακόλουθα:

1) Το πρώτο μερικό βήμα (y_1) είναι η απόσταση των στοιχείων της ίδιας ομάδας, ανά αριθμό στοιχείων. Είναι περιττός αριθμός και ισούται με το πολικό βήμα (τ_p) της μηχανής.

2) Το δεύτερο μερικό βήμα (y_2) είναι η απόσταση του πρώτου στοιχείου μίας ομάδας και του δεύτερου στοιχείου της προηγούμενης ομάδας.

3) Το βήμα κυματοτυλίγματος (y) είναι η απόσταση, ανά αριθμό στοιχείων, μεταξύ του πρώτου στοιχείου δύο διαδοχικών συνδεδεμένων ομάδων. Το βήμα του κυματοτυλίγματος y , είναι άρτιος αριθμός και ίσος, περίπου, μ' ένα διπλό πολικό βήμα $2\tau_p$.

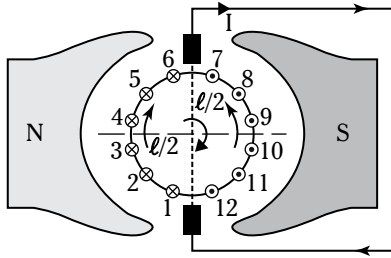
5.4 Λειτουργία γεννήτριας ΣΡ.

Στο σχήμα 5.4α, παρουσιάζεται η τομή στοιχειώδους γεννήτριας ΣΡ με επαγωγικό τύμπανο, το οποίο αποτελείται από 12 αγωγούς.

Ο ουδέτερος άξονας είναι ο νοητός άξονας συμμετρίας μεταξύ των κύριων μαγνητικών πόλων (N, S), ο οποίος χωρίζει το κύκλωμα του επαγωγικού τυμπάνου σε δύο παράλληλους κλάδους.

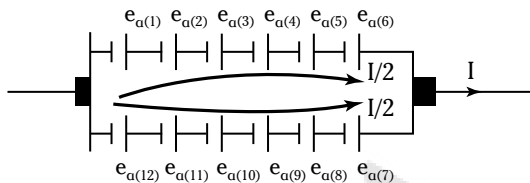
Όταν ο δρομέας περιστρέφεται σε κάθε αγωγό του επαγωγικού τυμπάνου επάγεται ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ, e_o). Στο σχήμα 5.4β, παρουσιάζεται η ηλεκτρική συμπεριφορά του επαγωγικού τυμπάνου.

Οι ψήκτρες τοποθετούνται κατά μήκος του ουδέ-



Σχ. 5.4α

Τομή στοιχειώδους γεννήτριας ΣΡ με επαγωγικό τύπανο 12 αγωγών.



Σχ. 5.4β

Σχηματική παράσταση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του επαγωγικού τυμπάνου 12 αγωγών.

τερου άξονα, οπότε απάγεται το μεγαλύτερο δυνατό ρεύμα.

5.4.1 Ανάπτυξη τάσεως σε μια γεννήτρια ΣΡ.

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφονται δύο τρόποι αναπότξεως τάσεως σε μία γεννήτρια ΣΡ.

1) **A' τρόπος:** Όταν η γεννήτρια ΣΡ του σχήματος 5.4α, λειτουργεί χωρίς φορτίο, ενώ ο δρομέας περιστρέφεται, σε κάθε αγωγό του επαγωγικού τυμπάνου ενεργού μήκους ℓ , επάγεται μια ΗΕΔ η οποία είναι:

$$e = Bv\ell \tag{5.5}$$

όπου: B η μαγνητική επαγωγή (πυκνότητα μαγνητικής ροής) των μαγνητικών πόλων του στάτι και v η περιφερειακή ταχύτητα των αγωγών του επαγωγικού τυμπάνου, που δίδεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$v = \omega \frac{D}{2} \tag{5.6}$$

όπου: ω η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και D η διάμετρος του δρομέα.

Έστω N ο συνολικός αριθμός των ενεργών αγωγών του επαγωγικού τυμπάνου. Αν $2a$ είναι ο αριθμός των παραλλήλων κλάδων, τότε $\frac{N}{2a}$ είναι ο

αριθμός των ενεργών αγωγών, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε σειρά. Η τάση τυμπάνου E_a , δίδεται από τη σχέση:

$$E_a = \omega \frac{D}{2} B \frac{N}{2a} \tag{5.7}$$

όπου ℓ το αξονικό μήκος του δρομέα.

Η μαγνητική ροή Φ ανά πόλο δίδεται απ' τη σχέση:

$$\Phi = \frac{\pi D'}{2P} B \tag{5.8}$$

όπου $2P$ ο αριθμός των μαγνητικών πόλων.

Η τάση του τυμπάνου είναι:

$$E_a = \left(\frac{2PN}{2a2\pi} \right) \Phi \omega \tag{5.9}$$

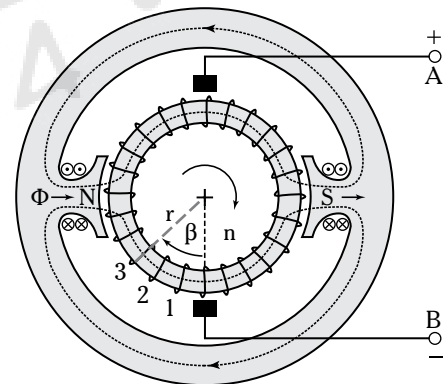
$$A_n \quad K = \frac{2PN}{2a2\pi} \tag{5.10}$$

και $\omega = 2\pi \frac{n}{60} \tag{5.11}$

τότε ισχύει: $E_a = K\Phi n \tag{5.12}$

όπου n ο αριθμός των στροφών της γεννήτριας σε ΣΑΛ.

2) **B' τρόπος:** Στο σχήμα 5.4γ, παρουσιάζεται μια στοιχειώδης γεννήτρια ΣΡ, της οποίας το περιστρεφόμενο μέρος είναι ο **δρομέας του Pacinotti**².



Σχ. 5.4γ

Στοιχειώδης γεννήτρια ΣΡ.

² Πρόκειται για πρότυπο (μοντέλο) δρομέα απλό, που χρησιμεύει για την κατανόηση της λειτουργίας των μηχανών ΣΡ. Πρόκειται για ένα τορροειδές μαγνητικό υλικό, στο οποίο τοποθετείται ένα πηνίο N σπειρών έτσι ώστε να αποτελεί ένα κλειστό κύλινδρο.

Η επαγόμενη ΗΕΔ σε μια σπείρα (όταν $\Phi \neq 0$, $n \neq 0$) είναι:

$$e = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| \quad (5.13)$$

όπου $\Phi = \Phi(\beta)$.

$$\text{Ισχύει: } e = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = \frac{d\Phi}{d\beta} \frac{d\beta}{dt} = Br' \omega = Bv' \quad (5.14)$$

όπου: r είναι η εξωτερική ακτίνα του δρομέα, ℓ το αξονικό μήκος και v η περιφερειακή ταχύτητα του Racinotti.

Η συνολική ΗΕΔ στους ακροδέκτες της μηχανής ισούται με το άθροισμα των επί μέρους επαγομένων ΗΕΔ στις σπείρες του κυκλώματος του επαγωγικού τυμπάνου. Άρα ισχύει:

$$E_a = e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_n$$

$$E_a = \frac{e_1 \Delta t + e_2 \Delta t + e_3 \Delta t + \dots + e_n \Delta t}{\Delta t} = \frac{\Phi}{\Delta t} \quad (5.15)$$

όπου Δt ο αναγκαίος χρόνος ο οποίος απαιτείται, ώστε ο περιστρεφόμενος δρομέας να διατρέξει δύο διαδοχικές σπείρες.

Στην περίπτωση μιας διπολικής γεννήτριας ισχύει:

$$\Delta t = \frac{60}{Nn}$$

όπου N ο αριθμός των σπειρών του κυκλώματος του επαγωγικού τυμπάνου και n ο αριθμός στροφών του δρομέα.

Όταν πρόκειται για γεννήτριες με βροχοειδές κύκλωμα επαγωγικού τυμπάνου, με 2α παράλληλους κλάδους και $2p$ μαγνητικούς πόλους, τότε ισχύει:

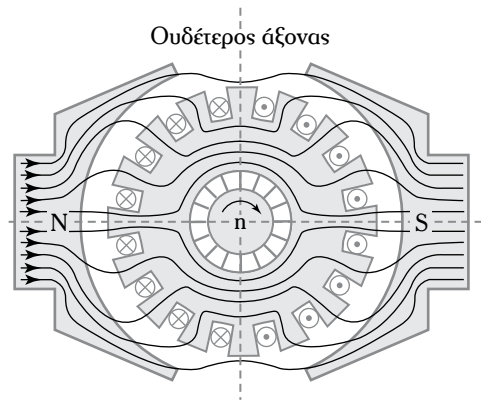
$$E_a = \frac{2P}{2\alpha} \frac{n}{60} \Phi \quad \text{ή} \quad E_a = K\Phi n \quad (5.16)$$

όπου K η κατασκευαστική σταθερά της γεννήτριας.

5.4.2 Αντίδραση τυμπάνου.

Όταν μια μηχανή ΣΡ λειτουργεί χωρίς φορτίο, στον διάκενο χώρο της υπάρχει μόνο το μαγνητικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται από τους κύριους μαγνητικούς πόλους του στάτη. Στο σχήμα 5.4δ παρουσιάζεται η κατανομή της μαγνητικής ροής του μαγνητικού πεδίου των κυρίων μαγνητικών πόλων στη λειτουργία χωρίς φορτίο.

Όταν η μηχανή λειτουργεί με φορτίο, τότε το επαγωγικό τύμπανο διαρρέεται από ρεύμα, οπότε δη-



Σχ. 5.4δ

Κατανομή της μαγνητικής ροής του μαγνητικού πεδίου των κύριων μαγνητικών πόλων του στάτη στη λειτουργία χωρίς φορτίο.

μιουργείται το μαγνητικό πεδίο του δρομέα ($N'-S'$) κάθετα στο μαγνητικό πεδίο του στάτη (σχ. 5.4ε).

Η υπέρθεση των δύο μαγνητικών πεδίων προκαλεί το φαινόμενο αντιδράσεως τυμπάνου. Το φαινόμενο αυτό συνίσταται στην δημιουργία ενός συνολικού παραμορφωμένου μαγνητικού πεδίου, το οποίο προκαλεί μετατόπιση του ουδέτερου άξονα (νέος ουδέτερος άξονας) (σχ. 5.4στ) στην φορά περιστροφής του δρομέα για γεννήτριες και σε αντίθετη φορά για κινητήρες.

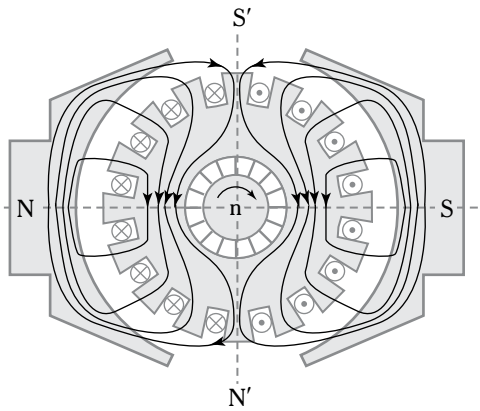
Το φαινόμενο αντιδράσεως τυμπάνου προκαλεί τα ακόλουθα προβλήματα σε μια μηχανή ΣΡ.

- 1) Μετατοπίζει τον ουδέτερο άξονα (σχ. 5.4στ).
- 2) Μειώνει το συνολικό μαγνητικό πεδίο.
- 3) Δημιουργεί μηχανικά προβλήματα.
- 4) Παραμορφώνει το μαγνητικό πεδίο των κύριων πόλων (βλ. σχ. 5.4ε και 5.4στ).

1) Μετατόπιση του ουδέτερου άξονα.

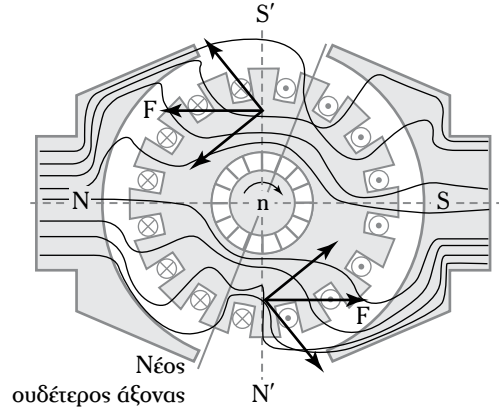
Στον ουδέτερο άξονα των μηχανών ΣΡ η επαγόμενη τάση στο επαγωγικό τύμπανο μηδενίζεται. Στο σχήμα 5.4ζ(α) δίδεται η γραφική παράσταση της μαγνητικής ροής Φ_r των κυρίων πόλων μιας στοιχειώδους διπολικής μηχανής ΣΡ στη λειτουργία χωρίς φορτίο.

Στο σχήμα 5.4ζ(β) η συνολική μαγνητική ροή Φ_i μηδενίζεται σε διαφορετική θέση από εκείνη στη λειτουργία της μηχανής χωρίς φορτίο. Ο ουδέτερος άξονας έχει μετατοπιστεί σε σχέση με την αρχική του θέση. Ο ουδέτερος άξονας μετατοπίζεται προς την φορά περιστροφής στις γεννήτριες ΣΡ και αντίθετα της φοράς περιστροφής στους κινητήρες ΣΡ.



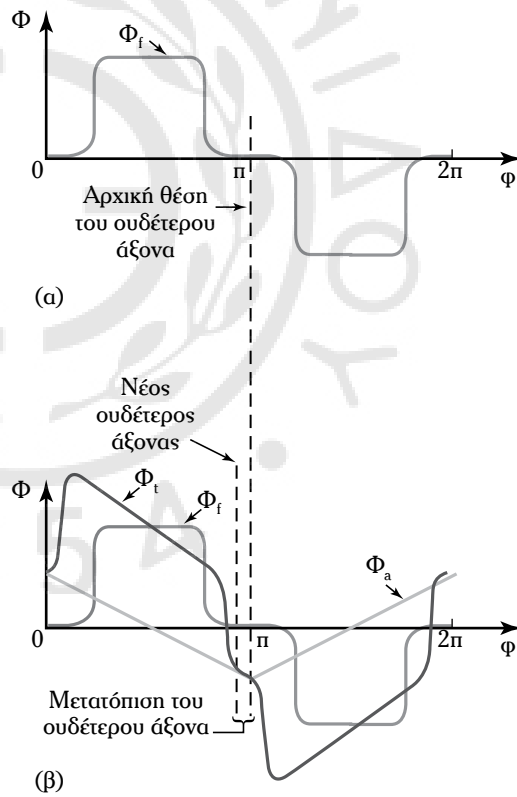
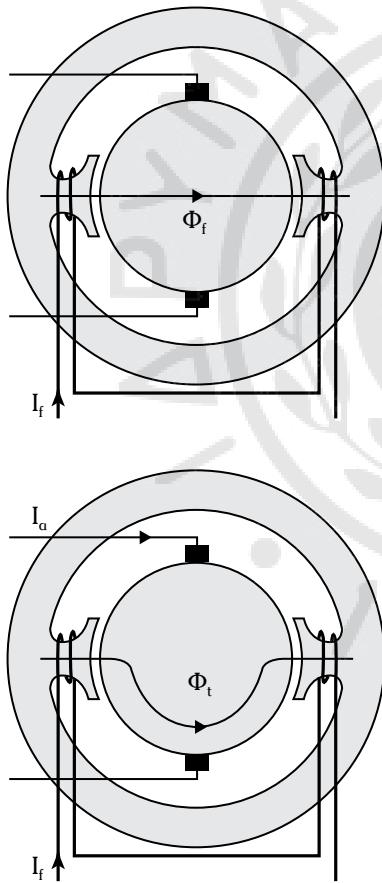
Σχ. 5.4ε

Κατανομή του μαγνητικού πεδίου του δρομέα.



Σχ. 5.4στ

Συνολικό μαγνητικό πεδίο μηχανής ΣΡ στη λειτουργία με φορτίο.



Φ_f : μαγνητική ροή των κύριων μαγνητικών πόλων του στάτη.
 Φ_a : μαγνητική ροή του δρομέα.
 Φ_t : συνολική μαγνητική ροή στον διάκενο χώρο της μηχανής.

Σχ. 5.4ζ

(α) Γραφική παράσταση της μαγνητικής ροής Φ_f στη λειτουργία χωρίς φορτίο και
 (β) γραφική παράσταση των μαγνητικών ροών στη λειτουργία με φορτίο.

Η μετατόπιση του ουδέτερου άξονα είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα τυμπάνου.

Οι μαγνητικές ροές Φ_f , Φ_a (που είναι η μαγνητική ροή του δρομέα) και Φ_i παράγουν το μαγνητικό πεδίο B_f των κύριων μαγνητικών πόλων, το οποίο κατανέμεται στον διάκενο χώρο της μηχανής κατά τη λειτουργία της χωρίς φορτίο, το μαγνητικό πεδίο του δρομέα B_a , και το συνολικό μαγνητικό πεδίο B_f , το οποίο κατανέμεται στον διάκενο χώρο της μηχανής, όταν αυτή λειτουργεί με φορτίο.

Το αποτέλεσμα της μετατοπίσεως της ουδέτερης γραμμής είναι η εμφάνιση σπινθηρισμών στον συλλέκτη, οι οποίοι προκαλούν βλάβες τόσο στον συλλέκτη όσο και στις ψήκτρες.

2) Μείωση του συνολικού μαγνητικού πεδίου.

Το δεύτερο πρόβλημα, το οποίο προκαλεί το φαινόμενο αντιδράσεως τυμπάνου είναι η μείωση της συνολικής μαγνητικής ροής σε σχέση με τη μαγνητική ροή, η οποία παράγεται απ' τους κύριους μαγνητικούς πόλους του στάτη. Η συνολική μαγνητική ροή εξασθενίζει στην είσοδο των κύριων μαγνητικών πόλων και ενισχύεται στην έξοδό τους. Αυτό συμβαίνει διότι η μηχανή λειτουργεί κοντά στον μαγνητικό κορεσμό. Η μείωση της συνολικής μαγνητικής ροής προκαλεί στις γεννήτριες ΣΡ μείωση της παραγόμενης τάσεως και στους κινητήρες ΣΡ αύξηση της ταχύτητας περιστροφής τους.

Τα αποτελέσματα του φαινομένου αντιδράσεως τυμπάνου θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν με την μετακίνηση των ψηκτρών στη θέση του ουδέτερου άξονα. Η θέση του ουδέτερου άξονα εξαρτάται από το φορτίο. Κάθε φορά που αλλάζει η θέση του ουδέτερου άξονα πρέπει να μετακινούνται οι ψήκτρες. Η μετακίνηση των ψηκτρών δεν είναι πρακτικά εύκολη και επί πλέον δεν λύνει το πρόβλημα της μείωσης της συνολικής μαγνητικής ροής.

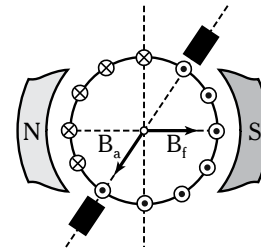
Πράγματι αν τοποθετηθούν οι ψήκτρες στην νέα θέση του ουδέτερου άξονα, η μείωση του συνολικού μαγνητικού πεδίου επιδεινώνεται. Αυτό συμβαίνει διότι:

1) Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα αποκτά μια συνιστώσα, η οποία αντιτίθεται στο μαγνητικό πεδίο των κύριων μαγνητικών πόλων (σχ. 5.4n).

2) Μεταβάλλεται η κατανομή του ρεύματος τυμπάνου, οπότε προκαλείται έντονη συγκέντρωση μαγνητικής ροής στα κορεσμένα μέρη των πελμάτων των μαγνητικών πόλων.

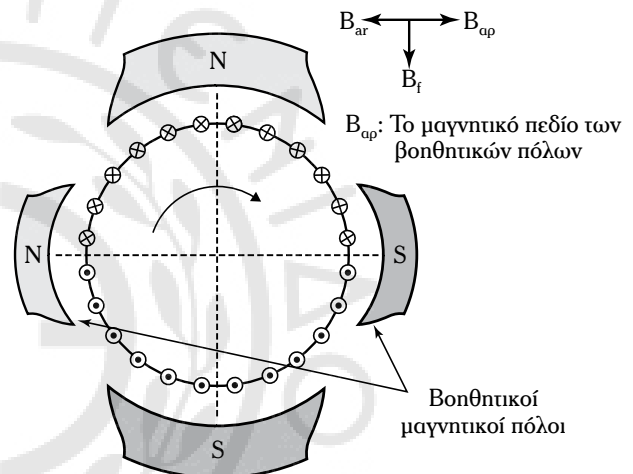
Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα αποτελέσμα-

τα αντιδράσεως τυμπάνου χρησιμοποιούνται στις μηχανές ΣΡ οι βοηθητικοί μαγνητικοί πόλοι (σχ. 5.4θ) και τα τυλίγματα αντισταθμίσεως (σχ. 5.4ι).



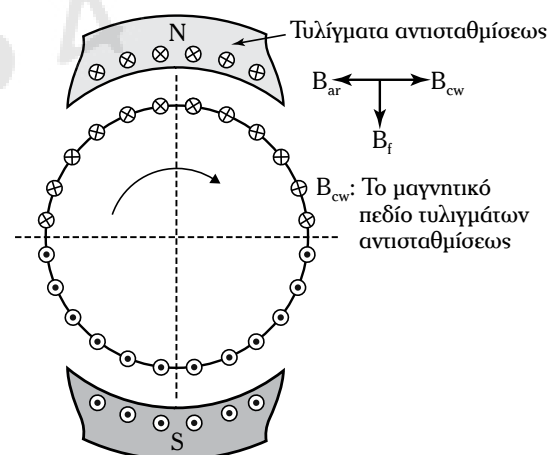
Σχ. 5.4n

Μαγνητικό πεδίο δρομέα.



Σχ. 5.4θ

Βοηθητικοί μαγνητικοί πόλοι.

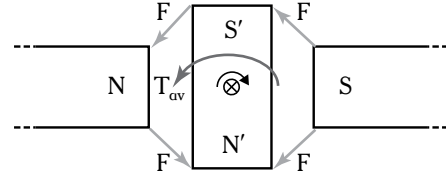


Σχ. 5.4ι

Τυλίγματα αντισταθμίσεως.

3) Μηχανικά προβλήματα.

Τα δύο μαγνητικά πεδία, του στάτη και του δρομέα, αναπτύσσουν δυνάμεις (σχ. 5.4α), οι οποίες ανθίσταται στην περιστροφή του δρομέα, οπότε δημιουργείται η ανθιστάμενη ροπή (T_{av}) της μηχανής.



Σχ. 5.4α

Εμφάνιση ανθιστάμενης ροπής (T_{av}) στον δρομέα.

5.4.3 Μεταγωγή.

Μεταγωγή ονομάζουμε το φαινόμενο της αναστροφής της φοράς του ρεύματος τυμπάνου σε ένα πνίο (ή ομάδα) μόλις αυτό περάσει μπροστά από μία ψήκτρα. Το ρεύμα μιας ψήκτρας περνάει προηγουμένως από έναν τομέα, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με ένα πνίο (ή ομάδα) του τυλίγματος και περιστρέφεται. Η κυκλοφορία του ρεύματος μέσω αυτού του τομέα διαρκεί τόσο χρόνο, όσο έρχεται σε επαφή με την ψήκτρα. Χαρακτηριστικό της αναστροφής είναι ότι κατά το χρονικό διάστημα που συμβαίνει αυτή, βραχυκυκλώνεται το πνίο από μία ή περισσότερες ψήκτρες.

Για να κατανοήσουμε το φαινόμενο της μεταγωγής παρακολουθούμε στο σχήμα 5.4β το πνίο (ή ομάδα) αβγ, το οποίο κινείται μαζί με τον συλλέκτη μπροστά από τις ψήκτρες με ταχύτητα v .

Στη χρονική στιγμή $t = 0$, το ρεύμα I_a που διέρχεται μέσα από την ψήκτρα και τον τομέα 1, προέρχεται μισό από το υπό μεταγωγή πνίο αβγ και μισό από το διαδοχικό πνίο γδε [σχ. 5.4β(α)]. Στη δεύτερη φάση η ψήκτρα εφάπτεται στους δύο τομείς 1 και 2 [σχ. 5.4β(β)].

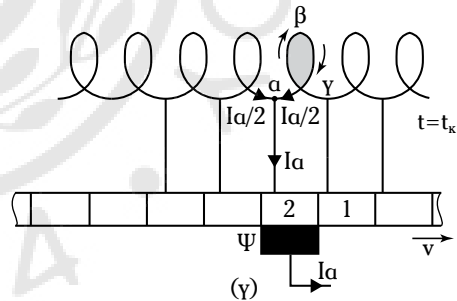
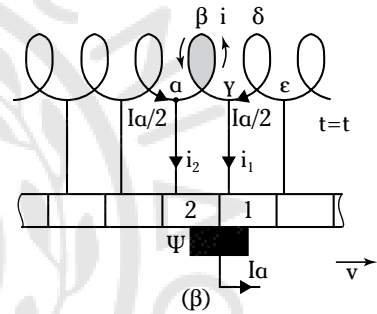
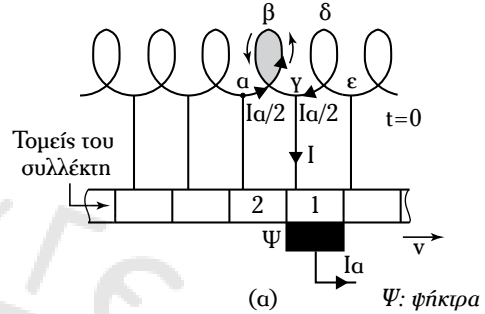
Μετά από χρόνο $t = t_c$ η ψήκτρα εφάπτεται μόνο στον τομέα 2 [σχ. 5.4β(γ)], ενώ το ρεύμα έχει αλλάξει φορά στο πνίο αβγ, και στον τομέα 1 δεν ρέει ρεύμα, παρά μόνο στον τομέα 2.

Γενικά, όταν ένας αγωγός του επαγωγικού τυμπάνου, ο οποίος συνδέεται με τον αντίστοιχο τομέα του συλλέκτη, δεν εφάπτεται με την αντίστοιχη ψήκτρα, το ρεύμα, το οποίο διαρρέει αντιστρέφεται απ' την τιμή $1/2$ στην τιμή $-1/2$ (σχ. 5.4γ).

Χρόνο μεταγωγής t_c , ονομάζουμε το χρόνο που απαιτείται, ώστε ο τομέας του συλλέκτη να μετατοπιστεί πλήρως από την ψήκτρα. Αν v είναι η περιφερειακή ταχύτητα των τομέων του συλλέκτη και ℓ το αντίστοιχο μήκος τους, τότε ο χρόνος μεταγωγής t_c είναι:

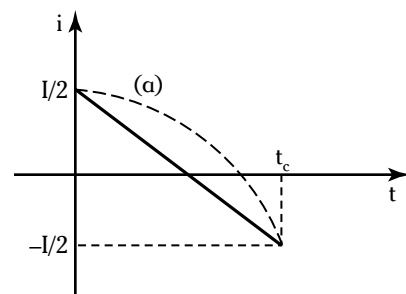
$$t_c = \frac{\ell}{v} \tag{5.17}$$

Στη διάρκεια του χρόνου μεταγωγής οι αγωγοί του επαγωγικού τυμπάνου μετατοπίζονται από τον ουδέτερο άξονα, ενώ η ψήκτρα [σχ. 5.4β(β)] βραχυκυκλώνει δύο τομείς.



Σχ. 5.4β

Μεταγωγή σε μία σπείρα του επαγωγικού τυμπάνου.



Σχ. 5.4γ

Ιδανική περίπτωση μεταγωγής.

Η επιφάνεια επαφής της ψήκτρας και του τομέα του συλλέκτη, ο οποίος μετατοπίζεται, στη φορά περιστροφής του δρομέα, μειώνεται ως εξής:

$$A_c(t) = A \left(\frac{1-t}{t_c} \right) \quad (5.18)$$

όπου A η επιφάνεια του αντίστοιχου τομέα συλλέκτη.

Όταν ολόκληρη η επιφάνεια του τομέα, του συλλέκτη, είναι σε πλήρη επαφή με την αντίστοιχη ψήκτρα, τότε η πυκνότητα του ρεύματος J , στον τομέα είναι:

$$J = \frac{I}{A}. \quad (5.19)$$

Στη διάρκεια του χρόνου μεταγωγής t_c , οι αγωγοί, οι οποίοι συνδέουν το πηνίο με τους τομείς του συλλέκτη [σχ. 5.41β(β)], διαρρέονται αντίστοιχα από τα ρεύματα:

$$i_1(t) = \frac{I_a}{2} + i(t) \quad \text{και} \quad i_2(t) = \frac{I_a}{2} + i(t) \quad (5.20)$$

όπου $i(t)$ το ρεύμα του πηνίου $\alpha\beta\gamma$.

Ιδανική περίπτωση είναι εκείνη κατά την οποία η πυκνότητα του ρεύματος στο ποσοστό του τομέα, ο οποίος μετατοπίζεται, διατηρείται σταθερή.

Σε αυτήν την περίπτωση ισχύει:

$$J = \frac{I}{A} = \frac{\left(\frac{I}{2} + i(t) \right)}{A} \left(1 - \frac{t}{t_c} \right). \quad (5.21)$$

Από την εξίσωση προκύπτει η μεταβολή του ρεύματος στην ιδανική περίπτωση μεταγωγής.

Γενικά, η ιδανική περίπτωση μεταγωγής θεωρείται εκείνη, στην οποία λαμβάνονται υπόψη:

1) Η μηδενική ωμική αντίσταση των αγωγών του επαγωγικού τυμπάνου.

2) Οι μηδενικές οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις, οι οποίες αναπτύσσονται στους βραχυκυκλωμένους αγωγούς.

3) Η σταθερή αντίσταση επαφής μεταξύ ψήκτρας και συλλέκτη. Στην ιδανική μεταγωγή ισχύει:

$$i = \frac{I}{2} - I \frac{t}{t_c}. \quad (5.22)$$

Η εξίσωση 5.22, είναι η εξίσωση μιας ευθείας (σχ. 5.41γ).

Στην πράξη, κατά τη διάρκεια της μεταγωγής εμφανίζονται επαγωγικά φαινόμενα, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στα κυκλώματα του τυμπάνου.

Στη διάρκεια μεταγωγής εμφανίζονται δύο τύποι ΗΕΔ, οι οποίες επιβραδύνουν την αλλαγή φοράς του ρεύματος i .

Η πρώτη ΗΕΔ (e_1) οφείλεται στην αυτεπαγωγή της σπείρας, στην οποία πρόκειται να γίνει η μεταγωγή του ρεύματος. Η e_1 ορίζεται από τον Νόμο του Faraday, και αντιτίθεται στη μεταβολή της μαγνητικής ροής που παράγεται από το ρεύμα i :

$$e_1 = \left| -L \frac{di}{dt} \right| \quad (5.23)$$

όπου e_1 η τάση από αυτεπαγωγή.

Η δεύτερη ΗΕΔ (e_2), οφείλεται στην παρουσία του ακτινικού μαγνητικού πεδίου στην περιοχή όπου πραγματοποιείται η μεταγωγή του ρεύματος i . Αυτό το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από το φαινόμενο αντιδράσεως τυμπάνου και προκαλεί, κατά την περιστροφή του δρομέα μια ΗΕΔ στους αγωγούς, στους οποίους πραγματοποιείται η αλλαγή φοράς του ρεύματος. Τελικά ισχύει:

$$e_2 = K^1 B_{ar} n \quad (5.24)$$

όπου: n η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε στροφές ανά λεπτό, K^1 μια σταθερά, που εξαρτάται από το συνολικό μήκος των αγωγών –όπου πραγματοποιείται η αλλαγή του ρεύματος– και από την ακτίνα του δρομέα και B_{ar} το μαγνητικό πεδίο αντιδράσεως τυμπάνου που προκαλείται από το φαινόμενο αντιδράσεως τυμπάνου στην περιοχή των αγωγών στους οποίους αλλάζει η φορά του ρεύματος.

Στην πράξη, κατά τη διάρκεια της μεταγωγής ισχύουν τα εξής:

1) Αναπτύσσονται οι ΗΕΔ e_1 και e_2 , οι οποίες επιβραδύνουν την αντιστροφή του ρεύματος στους αγωγούς του επαγωγικού τυμπάνου.

2) Η αντίσταση των αγωγών του επαγωγικού τυμπάνου δεν είναι μηδενική.

3) Η αντίσταση επαφής (τομέα-ψήκτρας) μειώνεται όταν αυξάνεται η πυκνότητα του ρεύματος στην επαφή.

Οι ΗΕΔ e_1 και e_2 επιβραδύνουν την αντιστροφή του ρεύματος στους αγωγούς, οι οποίοι μέσω των τομών έρχονται σε επαφή με την αντίστοιχη ψήκτρα. Αυτή η επιβράδυνση προκαλεί συσώρευση ρεύματος στην επιφάνεια επαφής τομέα-συλλέκτη, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται σπινθηρισμοί, οι οποίοι αυξάνονται όταν αυξάνεται η τιμή του ρεύματος i , που παρέχει η γεννήτρια ΣΡ.

Η μεταβολή του ρεύματος i , στην διάρκεια μετα-

γωγής δίδεται ποιοτικά από την καμπύλη (α) που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.4γ.

Αν τροποποιήσουμε κατάλληλα τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου του επαγωγικού τυμπάνου ομαλοποιούμε τη μεταγωγή, διατηρώντας τις ψήκτες στον ουδέτερο άξονα. Γι' αυτό χρησιμοποιούνται οι βοηθητικοί πόλοι και τα τυλίγματα αντισταθμίσεως.

5.5 Είδη μηχανών (γεννητριών) ΣΡ – Εισαγωγή.

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο είναι συνδεδεμένο το τυλίγμα διεγέρσεως με το επαγωγικό τύμπανο, οι μηχανές ΣΡ διακρίνονται σε τέσσερα είδη:

- 1) Με ανεξάρτητη ή ξένη διέγερση.
- 2) Με παράλληλη διέγερση.
- 3) Με διέγερση σειράς.
- 4) Με σύνθετη διέγερση.

Εκτός από τις μηχανές ξένης διεγέρσεως, οι υπόλοιπες είναι αυτοδιειγερόμενες μηχανές, γιατί το ρεύμα διεγέρσεως προέρχεται από το ρεύμα αυτών των μηχανών.

Στη συνέχεια θα μελετήσουμε τα είδη των γεννητριών ΣΡ. Μεγάλη σημασία έχουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες των γεννητριών ΣΡ, μέσω των οποίων μελετάται η συμπεριφορά τους σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας τους.

5.5.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες γεννητριών ΣΡ.

Η μελέτη των γεννητριών ΣΡ, πραγματοποιείται με την βοήθεια των εξής βασικών, χαρακτηριστικών καμπυλών:

1) **Στατική χαρακτηριστική:** Περιγράφει τη μεταβολή της τάσεως τυμπάνου E_a , σε συνάρτηση με το ρεύμα διεγέρσεως I_f , όταν το ρεύμα φορτίου I_L ισούται με μηδέν (λειτουργία χωρίς φορτίο) και η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής είναι σταθερή.

$$E_a = f(I_f) \Big|_{\substack{I_L=0 \\ n=\text{σταθ.}}} \quad (5.25)$$

2) **Χαρακτηριστική φορτίου:** Δίδει την τερματική τάση V_t , (τάση ακροδεκτών της γεννήτριας όταν λειτουργεί με φορτίο), σε συνάρτηση με το ρεύμα διεγέρσεως I_f . Στη χαρακτηριστική αυτή το ρεύμα τυμπάνου I_a και οι στροφές n είναι σταθερές.

$$V_t = f(I_f) \Big|_{\substack{n=\text{σταθ.} \\ I_a=\text{σταθ.}}} \quad (5.26)$$

3) **Εξωτερική χαρακτηριστική:** Δίδει τη μεταβολή της τερματικής τάσεως V_t , σε συνάρτηση με το

ρεύμα φορτίου I_L , όταν το ρεύμα διεγέρσεως I_f και οι στροφές n , είναι σταθερές:

$$V_t = f(I_L) \rightarrow I_f = \text{σταθ.}, n = \text{σταθ.} \quad (5.27)$$

5.5.2 Γεννήτρια ΣΡ ξένης ή ανεξάρτητης διεγέρσεως.

Σε αυτήν τη γεννήτρια το τυλίγμα διεγέρσεως τροφοδοτείται με τάση, η οποία παρέχεται ανεξάρτητα από την πηγή.

Στο σχήμα 5.5α, παρουσιάζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας γεννήτριας με ανεξάρτητη διέγερση. Το τυλίγμα διεγέρσεως F_1-F_2 , τροφοδοτείται από μία πηγή συνεχούς τάσεως $V_{D.C.}$. I_f είναι το ρεύμα διεγέρσεως, το οποίο κυκλοφορεί στο κύκλωμα διεγέρσεως της γεννήτριας. Σε σειρά με το τυλίγμα διεγέρσεως τοποθετούμε μια μεταβλητή ωμική αντίσταση R_f . Θεωρούμε R_f τη συνολική ωμική αντίσταση του κυκλώματος διεγέρσεως. Με E_a και R_a συμβολίζουμε την τάση τυμπάνου και την αντίσταση τυμπάνου, αντίστοιχα της γεννήτριας. Στους ακροδέκτες της γεννήτριας συνδέουμε ωμικό φορτίο R_L , το οποίο τροφοδοτείται με την τερματική της τάση V_t . Το ρεύμα τυμπάνου I_a ισούται με το ρεύμα φορτίου I_L , με το οποίο τροφοδοτείται το φορτίο R_L .

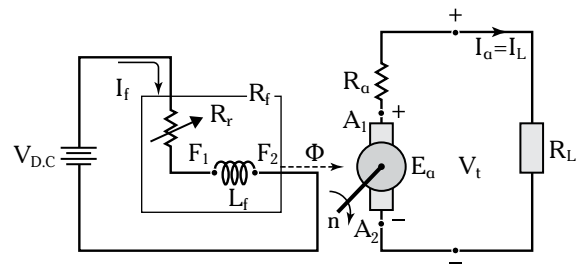
Η μελέτη της γεννήτριας με ανεξάρτητη διέγερση πραγματοποιείται με βάση τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$E_a = K\Phi n \quad (5.28)$$

$$I_L = I_a \quad (5.29)$$

$$V_t = E_a - I_a R_a \quad (5.30)$$

$$I_f = \frac{V_{D.C.}}{R_f} \quad (5.31)$$



Σχ. 5.5α

Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας γεννήτριας ΣΡ με ανεξάρτητη διέγερση.

Η συμπεριφορά των γεννητριών αναλύεται κάνοντας χρήση των ακόλουθων καμπυλών:

1) **Στατική χαρακτηριστική.** Για την χάραξη της στατικής χαρακτηριστικής, απαιτείται η συνδεσμολογία που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.5β.

Αν ο αριθμός στροφών n της γεννήτριας είναι σταθερός μεταβάλλοντας τη θέση του δρομέα δ της μεταβλητής αντιστάσεως R_f στο κύκλωμα διεγέρσεως, προκύπτουν διάφορες τιμές του I_f και αντίστοιχες τιμές της E_a στους ακροδέκτες της μηχανής. Σ' αυτήν την περίπτωση κατασκευάζεται πίνακας τιμών, σύμφωνα με τις οποίες κατασκευάζεται η στατική χαρακτηριστική ① της γεννήτριας για $n = \text{σταθ.}$ (σχ. 5.5γ).

Μεταβάλλοντας τον αριθμό στροφών n , λαμβάνουμε σμήνος στατικών χαρακτηριστικών της γεννήτριας.

Από το σχήμα 5.5γ προκύπτει ότι το τμήμα αβ της καμπύλης ① δεν είναι γραμμικό. Αυτό συμβαίνει διότι η ΜΕΔ του διακένου είναι το άθροισμα της σταθερής ΜΕΔ της παραμένουσας μαγνητίσεως και της μεταβλητής ΜΕΔ $N_f I_f$.

Το τμήμα βγ είναι γραμμικό διότι η επίδραση της παραμένουσας μαγνητίσεως είναι μικρή ως προς εκείνη της ΜΕΔ $N_f I_f$, ώστε να θεωρείται αμελητέα. Στο τμήμα γδ η επίδραση της ΜΕΔ $N_f I_f$, μειώνεται διότι η μηχανή λειτουργεί στην περιοχή του μαγνητικού κόρου.

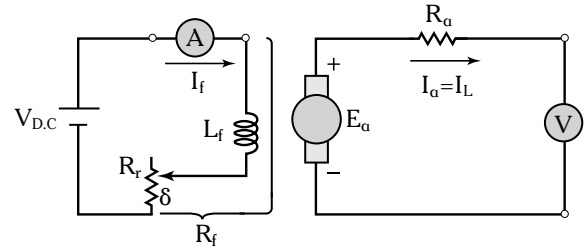
2) **Χαρακτηριστική φορτίου.** Αν στους ακροδέκτες της γεννήτριας που δίδεται στο σχήμα 5.5α, συνδεθεί φορτίο R_L , τότε η τερματική τάση V_t , δεν θα είναι ίση με την ΗΕΔ E_a , της γεννήτριας. Η τάση V_t παρουσιάζεται μειωμένη λόγω του φαινομένου της αντιδράσεως τυμπάνου και των διαφόρων πτώσεων τάσεως στα διάφορα σημεία, από τα οποία περνάει το ρεύμα τυμπάνου.

Στο σχήμα 5.5δ, παρουσιάζεται η χαρακτηριστική φορτίου (καμπύλη 3) μίας γεννήτριας με ξένη διέγερση.

Η καμπύλη 1 είναι στατική χαρακτηριστική. Η καμπύλη 2 προκύπτει αν προστεθούν στην χαρακτηριστική φορτίου οι ηλεκτρικές πτώσεις τάσεως στα διάφορα μέρη της γεννήτριας, οι οποίες εκφράζονται από το τμήμα ΑΒ της χαρακτηριστικής του σχήματος 5.5δ. Το τμήμα ΒΓ εκφράζει τις πτώσεις τάσεως λόγω του φαινομένου της αντιδράσεως τυμπάνου.

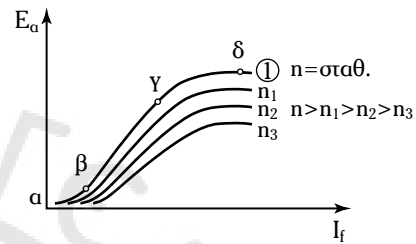
Προκειμένου να έχουμε την ίδια τάση, όταν η γεννήτρια λειτουργεί χωρίς φορτίο και με φορτίο, θα πρέπει να αυξηθεί το ρεύμα I_f από την τιμή ΟΗ (χωρίς φορτίο) στην τιμή ΟΖ (με φορτίο).

3) **Εξωτερική χαρακτηριστική.** Στο σχήμα 5.5ε, παρουσιάζεται η εξωτερική χαρακτηριστική



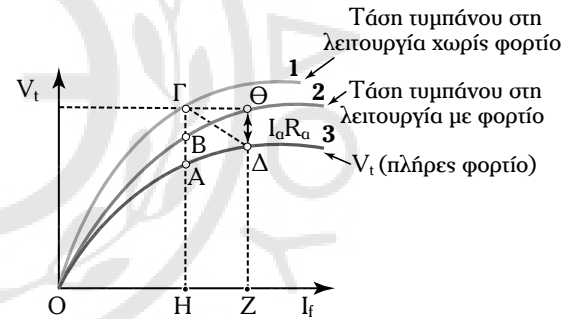
Σχ. 5.5β

Συνδεσμολογία μιας γεννήτριας με ξένη διέγερση για τη χάραξη της στατικής χαρακτηριστικής.



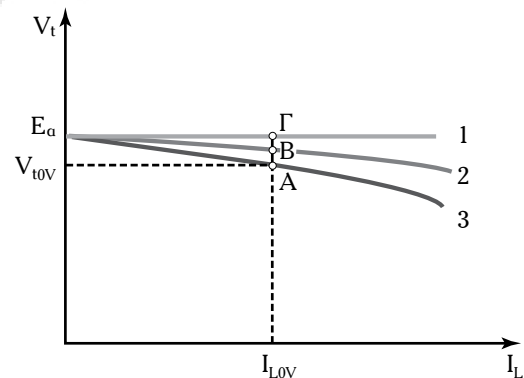
Σχ. 5.5γ

Στατική χαρακτηριστική γεννήτριας με ξένη διέγερση. Σμήνος χαρακτηριστικών για διαφορετικό αριθμό στροφών.



Σχ. 5.5δ

Γραφική παράσταση της $V_t = f(I_f)$ με I_a και $n = \text{σταθερά}$ (καμπύλη 3).



Σχ. 5.5ε

Γραφική παράσταση της $V_t = f(I_f)$, όταν I_f και η διατρούνη είναι σταθερά.

(καμπύλη 3) μίας γεννήτριας ΣΡ με ξένη διέγερση.

Από το σχήμα 5.5ε, προκύπτει ότι όσο το ρεύμα I_L αυξάνεται, τόσο αυξάνονται οι πτώσεις τάσεως και η επίδραση του φαινομένου της αντίδρασης τυμπάνου.

Το τμήμα ΓΒ εκφράζει τις πτώσεις τάσεως λόγω του φαινομένου της αντίδρασης τυμπάνου.

Το τμήμα ΑΒ εκφράζει τις πτώσεις τάσεως στο ηλεκτρικό κύκλωμα τυμπάνου.

Η γεννήτρια ΣΡ με ξένη διέγερση χαρακτηρίζεται από μεγάλη σταθερότητα τάσεως, επειδή η διέγερση μπορεί να διατηρηθεί εντελώς σταθερή με την βοήθεια της πηγής V_{DC} και της R_f . Αν βραχυκυκλωθούν οι ακροδέκτες της γεννήτριας, το ρεύμα τυμπάνου αποκτά πολύ μεγάλη τιμή, επειδή η τάση τυμπάνου E_a παραμένει μεγάλη και η αντίσταση τυμπάνου είναι πολύ μικρή.

Η γεννήτρια αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τη λειτουργία σε δίκτυο σταθερής τάσεως.

5.5.3 Γεννήτρια ΣΡ με παράλληλη διέγερση.

Σ' αυτήν τη γεννήτρια το τύλιγμα διεγέρσεως συνδέεται παράλληλα με το επαγωγικό τύμπανο. Στο σχήμα 5.5στ παρουσιάζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μίας γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση.

R_f είναι η συνολική ωμική αντίσταση του τυλίγματος διεγέρσεως, που συνδέεται παράλληλα στο επαγωγικό τύμπανο της γεννήτριας.

Η μελέτη των γεννητριών ΣΡ με παράλληλη διέγερση πραγματοποιείται με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$E_a = K\Phi n \tag{5.32}$$

$$I_a = I_L + I_f \tag{5.33}$$

$$V_t = E_a - I_a R_a \tag{5.34}$$

$$I_f = \frac{V_t (\equiv E_a)}{R_f} \tag{5.35}$$

Οι γεννήτριες ΣΡ με παράλληλη διέγερση είναι αυτοδιεγερσόμενες μηχανές. Ο **μηχανισμός αυτοδιεγέρσεως** λειτουργεί ως εξής:

Υποθέτουμε ότι η γεννήτρια ΣΡ με παράλληλη διέγερση περιστρέφεται με τον ονομαστικό αριθμό στροφών και στους ακροδέκτες της δεν είναι συνδεδεμένο φορτίο (λειτουργία χωρίς φορτίο). Το ρεύμα $I_a = I_f$ είναι πολύ μικρό. Τότε έχουμε:

$$V_t = E_a = f(I_f) \tag{5.36}$$

Σε σειρά με το τύλιγμα διεγέρσεως συνδέεται μια μεταβλητή αντίσταση R_f . Οπότε η R_f (σχ. 5.5στ) εκπροσωπεί τη συνολική ωμική αντίσταση του τυλίγματος διεγέρσεως.

Λόγω του **παραμένουτος μαγνητισμού** υπάρχει μαγνητική ροή και όταν το ρεύμα διεγέρσεως ισούται με μηδέν:

$$\Phi (I_f = 0) = \Phi_0 = \Phi_{\text{ΠΑΡ. ΜΑΓΝ.}} \tag{5.37}$$

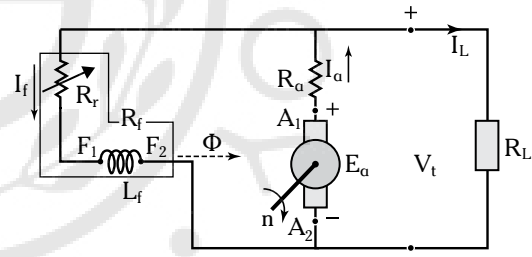
Όταν η γεννήτρια περιστρέφεται με τον ονομαστικό αριθμό στροφών εμφανίζεται, αρχικά, η τάση τυμπάνου $E_{a0} = E_{aA}$ (σημείο Α στο σχ. 5.5ζ).

Είναι:
$$E_{aA} = E_{a0} = K\Phi_0 n. \tag{5.38}$$

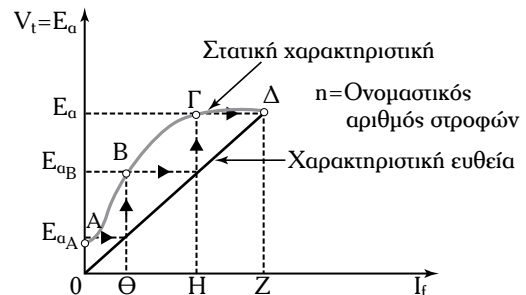
Τότε στο κύκλωμα του σχήματος 5.5στ ρέει ρεύμα:

$$I_{a0} = I_{f0} = \frac{E_{aA} \equiv E_{a0}}{R_a + R_f} \tag{5.39}$$

Η εξίσωση 5.39 αντιστοιχεί στην χαρακτηριστική ευθεία του κυκλώματος του σχήματος 5.5ζ. Αυτό το ρεύμα αντιστοιχεί στο τμήμα ΟΘ.



Σχ. 5.5στ
Ισοδύναμο κύκλωμα μιας γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση.



Σχ. 5.5ζ
Μηχανισμός αυτοδιεγέρσεως μιας γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση.

Στο ρεύμα $I_f = 0\theta$ αντιστοιχεί μια νέα μαγνητική ροή:

$$\Phi(I_f = 0\theta) > \Phi_0. \quad (5.40)$$

Αρκεί το ρεύμα διεγέρσεως I_f , να έχει στο τύλιγμα διεγέρσεως, τέτοια διεύθυνση, ώστε να ενισχύεται το μαγνητικό πεδίο του παραμένοντος μαγνητισμού. Στην αντίθετη περίπτωση ο παραμένων μαγνητισμός εξουδετερώνεται και η γεννήτρια δεν δίδει τάση.

Στο ρεύμα διεγέρσεως $I_f = 0\theta$ αντιστοιχεί η τάση E_{aB} :

$$E_{aB} = K\Phi n(I_f = 0\theta) \quad (5.41)$$

το σημείο Β στην στατική χαρακτηριστική στο σχήμα 5.5ζ.

Η διαδικασία αύξησης του ρεύματος διεγέρσεως I_f και της τάσεως E_a συνεχίζεται μέχρι το σημείο Δ , το οποίο είναι η τομή της στατικής χαρακτηριστικής και της χαρακτηριστικής ευθείας $V_t = E_a = I_f R_f$. Το σημείο Δ είναι σημείο σταθερής ισορροπίας (κανονική λειτουργία της γεννήτριας) και ονομάζεται **σημείο λειτουργίας της γεννήτριας**. Το σημείο Δ δίδει την τάση της γεννήτριας όταν αυτή λειτουργεί χωρίς φορτίο. Η θέση του σημείου λειτουργίας εξαρτάται από την κλίση της χαρακτηριστικής ευθείας ή από την τιμή της R_f .

Όταν η συνολική αντίσταση R_f αυξάνεται, τότε ελαττώνεται η παραγόμενη τάση.

Για μια μεγάλη τιμή της R_f η χαρακτηριστική ευθεία συμπίπτει με το ευθύγραμμο τμήμα της στατικής χαρακτηριστικής. Τότε το σημείο λειτουργίας θα πλησιάσει το σημείο Α της καμπύλης του σχήματος 5.5η, το οποίο αντιστοιχεί στην ΗΕΔ E_{aA} του παραμένοντος μαγνητισμού.

Η τιμή αυτή της αντιστάσεως R_f ονομάζεται **κρίσιμη τιμή** (R_{fcr}). Όταν $R_f > R_{fcr}$, η γεννήτρια χάνει τον παραμένοντα μαγνητισμό.

- Κρίσιμη ταχύτητα n_{cr} , της γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση.

Έστω ότι η τιμή της αντιστάσεως του τυλίγματος διεγέρσεως R_f , η οποία περνάει από το σημείο Δ της χαρακτηριστικής χωρίς φορτίο του σχήματος 5.5θ παραμένει αμετάβλητη. Όταν ο αριθμός στροφών της γεννήτριας μειώνεται διαδοχικά, κάποια στιγμή το γραμμικό τμήμα της στατικής χαρακτηριστικής θα συμπίπτει με την χαρακτηριστική ευθεία R_f . Ο αντίστοιχος αριθμός στροφών ονομάζεται **κρίσιμος αριθμός στροφών** (n_{cr}), $n_{cr} \equiv n_2$ (σχ. 5.5θ). Για $n < n_{cr}$ η γεννήτρια χάνει τον παραμένοντα μαγνητισμό.

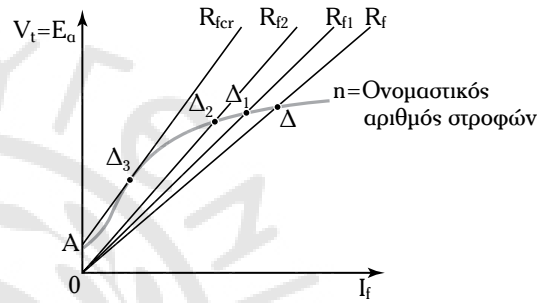
- Χαρακτηριστική φορτίου.

Η χαρακτηριστική φορτίου μιας γεννήτριας με παράλληλη διέγερση είναι ίδια με τη χαρακτηριστική φορτίου της γεννήτριας με ξένη διέγερση.

- Εξωτερική χαρακτηριστική.

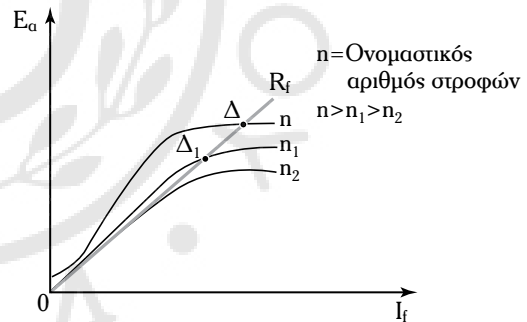
Για την χάραξη της εξωτερικής χαρακτηριστικής χρησιμοποιείται η συνδεσμολογία του σχήματος 5.5ι. Θεωρούμε ότι ισχύει $R_f = \text{σταθ.}$ και $n = \text{σταθ.}$.

Το ρεύμα φορτίου μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση δ_L του δρομέα του μεταβλητού φορτίου R_L . Στο



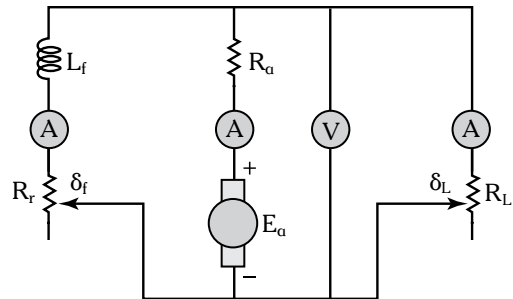
Σχ. 5.5η

Σμήνος των χαρακτηριστικών ευθειών. Κρίσιμη αντίσταση R_{fcr}



Σχ. 5.5θ

Κρίσιμος αριθμός στροφών.



Σχ. 5.5ι

Συνδεσμολογία για την χάραξη της εξωτερικής χαρακτηριστικής μιας γεννήτριας παράλληλης διέγερσεως.

σχήμα 5.5ια δίδεται η εξωτερική χαρακτηριστική (καμπύλη ①) της γεννήτριας.

Το τμήμα $E_a Z$ της εξωτερικής χαρακτηριστικής ① δεν διαφέρει από το αντίστοιχο της γεννήτριας ΣΡ με ανεξάρτητη διέγερση. Όμως η κλίση της είναι μεγαλύτερη διότι η τερματική τάση μειώνεται όταν το ρεύμα φορτίου αυξάνεται, οπότε εκτός από την παρουσία του φαινομένου αντιδράσεως τυμπάνου (τμήμα ΔΓ, εκφράζει την πτώση τάσεως για το φαινόμενο αντιδράσεως τυμπάνου), την πτώση τάσεως στην αντίσταση τυμπάνου R_a (τμήμα ΒΓ στη χαρακτηριστική του), προστίθεται και η μείωση του ρεύματος διεγέρσεως (τμήμα ΑΒ στη χαρακτηριστική του), με αποτέλεσμα να προκαλείται μια πλέον μείωση της μαγνητικής ροής Φ . Αυτό το φαινόμενο αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος φορτίου μέχρι να λάβει την τιμή $I_{L,max}$. Όταν το ρεύμα φορτίου λάβει μεγαλύτερη τιμή από την $I_{L,max}$, τότε η τερματική τάση δεν αυξάνεται, αλλά μειώνεται δραματικά, οπότε η γεννήτρια χάνει τον παραμένοντα μαγνητισμό της. Αυτό συμβαίνει γιατί το ρεύμα διεγέρσεως λαμβάνει μικρές τιμές κι αυτό διότι μειώθηκε η τερματική τάση. Το σημείο Ζ, εκφράζει το όριο ευσταθούς λειτουργίας της γεννήτριας. Όταν η τερματική τάση μηδενίζεται, η γεννήτρια βρίσκεται στην κατάσταση βραχυκυκλώσεως. Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{sc} , είναι μικρότερο απ' το αντίστοιχο της γεννήτριας με ανεξάρτητη διέγερση και αποτελεί πλεονέκτημα της γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση.

5.5.4 Γεννήτρια ΣΡ με διέγερση σειράς.

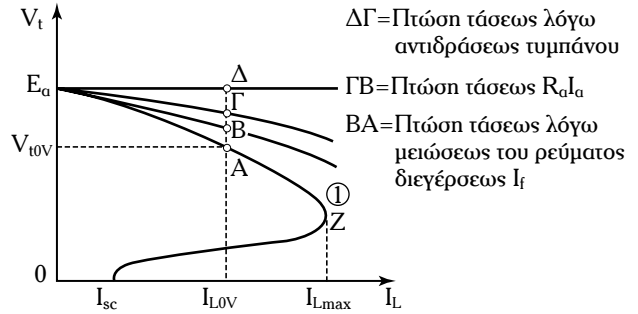
Σ' αυτήν τη γεννήτρια το τύλιγμα διεγέρσεως συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου. Στο σχήμα 5.5ιβ παρουσιάζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας γεννήτριας ΣΡ με διέγερση σειράς. R_s είναι η συνολική ωμική αντίσταση του κλάδου διεγέρσεως, η οποία περιλαμβάνει την μεταβλητή ωμική αντίσταση R_r και την αντίσταση του τυλίγματος διεγέρσεως, το οποίο αποτελείται από λίγες σπείρες μεγάλης διατομής.

Οι εξισώσεις με βάση τις οποίες πραγματοποιείται η μελέτη των γεννητριών ΣΡ με διέγερση σειράς είναι οι εξής:

$$E_a = K\Phi n \tag{5.42}$$

$$I_a = I_s = I_L \tag{5.43}$$

$$V_t = E_a - I_a (R_a + R_s). \tag{5.44}$$



Σχ. 5.5ια

Εξωτερική χαρακτηριστική μιας γεννήτριας με παράλληλη διέγερση.

- Στατική χαρακτηριστική.

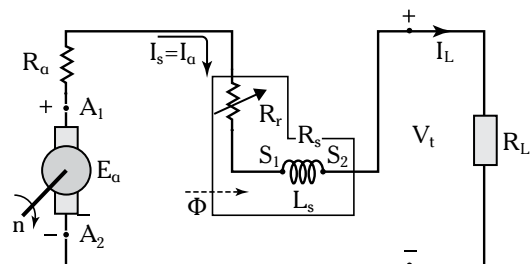
Προκειμένου να χαρακτηριστεί η στατική χαρακτηριστική, η γεννήτρια πρέπει να λειτουργεί χωρίς φορτίο. Από το σχήμα 5.5ιβ προκύπτει ότι όταν η μηχανή λειτουργεί χωρίς φορτίο ισχύει: $I_a = I_s = I_L = 0$.

Στη λειτουργία χωρίς φορτίο δεν υπάρχει ρεύμα διεγέρσεως, οπότε η τάση στους ακροδέκτες της μηχανής είναι πολύ μικρή ($V_t = E_{a0}$), και προέρχεται από τη μεταβολή της μαγνητικής ροής της παραμένουσας μαγνητίσεως. Τελικά, στατική χαρακτηριστική δεν υφίσταται, γιατί η γεννήτρια σειράς δεν λειτουργεί εν κενώ.

- Εξωτερική χαρακτηριστική.

Όταν στους ακροδέκτες της γεννήτριας συνδεθεί ένα φορτίο R_L , τότε διαρρέεται με ρεύμα I_L , ενώ το τύλιγμα σειράς διαρρέεται με ρεύμα I_s . Η ΜΕΔ $N_s I_s$ δημιουργεί μεγαλύτερη μαγνητική ροή, με αποτέλεσμα να προκύψει μια μεγαλύτερη τάση $E_a > E_{a0}$.

Αν οι μαγνητικοί πόλοι έχουν παραμένουσα μαγνήτιση και συνδεθεί το φορτίο R_L στους ακροδέκτες της γεννήτριας, η τάση V_t θα αυξηθεί από μόνη της και ταυτόχρονα θα αυξηθούν τα ρεύματα I_a και I_s .



Σχ. 5.5ιβ

Ισοδύναμο κύκλωμα μιας γεννήτριας ΣΡ με διέγερση σειράς.

Στην γεννήτρια σειράς υπάρχουν οι ακόλουθες πτώσεις τάσεως:

$I_a R_a$: στα τυλίγματα τυμπάνου,

$I_s R_s$: στα τυλίγματα σειράς,

και οι πτώσεις τάσεως, οι οποίες οφείλονται στο φαινόμενο της αντιδράσεως τυμπάνου.

Η τάση V_t είναι αποτέλεσμα των ακολούθων δύο αντιθέτων επιδράσεων:

1) Εκείνων που μειώνουν την τάση και το ρεύμα I_L (πτώσεις τάσεως σε όλα τα μέρη της μηχανής και αντίδραση τυμπάνου) και

2) εκείνων που αυξάνουν την τάση και το ρεύμα και προκαλούν την αυτοδιέγερση της μηχανής.

Από το σχήμα 5.5ιγ έχομε δύο περιοχές λειτουργίας μιας γεννήτριας σειράς. Η περιοχή (α) ονομάζεται **περιοχή αυξανόμενης τάσεως**. Αν η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας είναι σταθερή, τότε υπάρχει μια μέγιστη κρίσιμη τάση E_{Amax} . Πέρα από την τάση αυτή η γεννήτρια δεν παράγει μεγαλύτερη τάση (περιοχή β). Η τάση αυτή αντιστοιχεί σε ένα ρεύμα φορτίου I_{Lmax} .

Από εδώ και πέρα κάθε αύξηση ρεύματος I_L , προκαλείται με μείωση της αντιστάσεως φορτίου R_L , οπότε εμφανίζεται ραγδαία πώση τάσεως στο φορτίο R_L . Η περιοχή (β) ονομάζεται **περιοχή σταθερού ρεύματος**. Οι γεννήτριες ΣΡ διεγέρσεως σειράς, λόγω της μεγάλης μεταβολής της τερματικής τάσεως V_t με το ρεύμα φορτίου χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές, όπως οι ηλεκτροσυγκολλήσεις.

5.5.5 Γεννήτρια ΣΡ σύνθετης διεγέρσεως.

Όταν το κύκλωμα διεγέρσεως είναι αποτέλεσμα συνδυασμού του κυκλώματος παράλληλης διεγέρσεως και του κυκλώματος διεγέρσεως σειράς, τότε η γεννήτρια ονομάζεται **γεννήτρια με σύνθετη διεγερση**. Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας με σύνθετη διεγερση μπορεί να λάβει τις ακόλουθες δύο μορφές: το **κύκλωμα μακρινής διακλαδώσεως** [σχ. 5.5ιδ(α)] και το **κύκλωμα βραχείας διακλαδώσεως** [σχ. 5.5ιδ(β)].

Οι εξισώσεις για το κύκλωμα μακρινής διακλαδώσεως είναι:

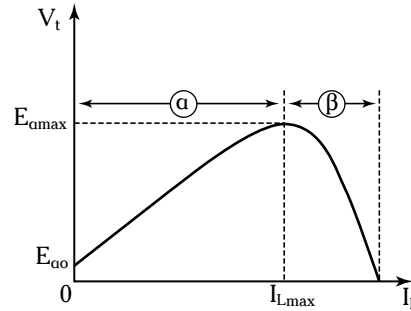
$$E_a = K\Phi n \tag{5.45}$$

$$I_a = I_f + I_L = I_s + I_d. \tag{5.46}$$

Για το κύκλωμα βραχείας διακλαδώσεως ισχύει:

$$I_a = I_f + I_L \tag{5.47}$$

και
$$I_L = I_s + I_d. \tag{5.48}$$



Σχ. 5.5ιγ

Εξωτερική χαρακτηριστική μιας γεννήτριας.

Η εξίσωση τάσεως και στις δύο διακλαδώσεις ισχύει:

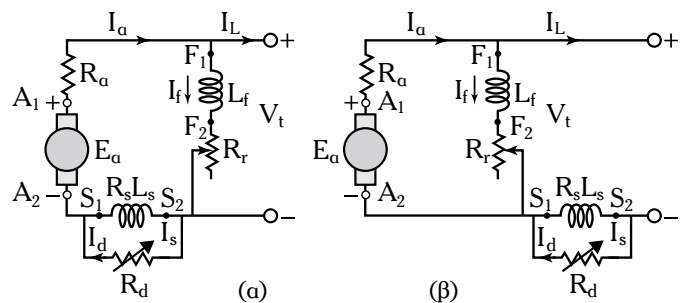
$$V_t = E_a - (I_s R_s + I_a R_a). \tag{5.49}$$

Η ΜΕΔ, η οποία παράγει την ΗΕΔ E_a είναι το άθροισμα της ΜΕΔ του τυλίγματος σειράς $N_s I_s$ και της ΜΕΔ του παράλληλου τυλίγματος $N_f I_f$. Στην περίπτωση κατά την οποία ισχύει $N_f I_f + N_s I_s$, η σύνθετη διεγερση ονομάζεται **αθροιστική** ή **ολοκληρωτική**.

Στην περίπτωση κατά την οποία ισχύει $N_f I_f - N_s I_s$, η σύνθετη διεγερση ονομάζεται **αφαιρετική** ή **διαφορική**.

5.5.6 Γεννήτρια με αθροιστική ή ολοκληρωτική σύνθετη διεγερση.

Στις γεννήτριες αθροιστικής σύνθετης διεγέρσεως υπάρχουν δύο τυλίγματα διεγέρσεως, το ένα συνδέεται σε σειρά και το άλλο παράλληλα στο επαγωγικό τύμπανο. Η φορά συνδέσεως των δύο τυλιγμάτων είναι τέτοια, ώστε οι ΜΕΔ $N_s I_s$ και $N_f I_f$ να προστίθενται. Στο σχήμα 5.5ιδ(α), το τύλιγμα σειράς διαρρέεται από το ρεύμα τυμπάνου (γεννήτρια μακρινής διακλαδώσεως), ενώ στο σχήμα 5.5ιδ(β),



Σχ. 5.5ιδ

Ισοδύναμο κύκλωμα μιας γεννήτριας σύνθετης διεγέρσεως (α) μακρινής διακλαδώσεως και (β) βραχείας διακλαδώσεως.

το τύλιγμα σειράς διαρρέεται από το ρεύμα φορτίου I_L (γεννήτρια βραχείας διακλαδώσεως). Η διαφορά αυτών των γεννητριών δεν είναι μεγάλη γιατί το ρεύμα διεγέρσεως είναι πολύ μικρό απ' ό,τι το ρεύμα τυμπάνου.

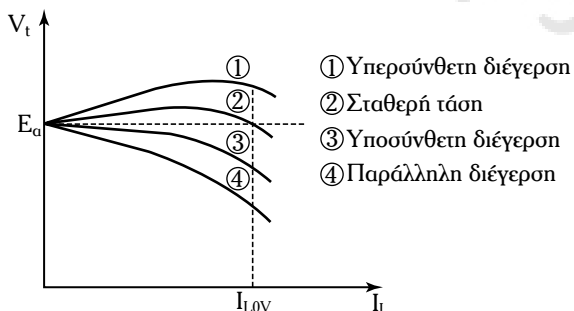
– Εξωτερική χαρακτηριστική.

Η εξωτερική χαρακτηριστική της γεννήτριας αθροιστικής σύνθετης διεγέρσεως (σχ. 5.5ιε), εξαρτάται από την επίδραση του τυλίγματος σειράς. Αν βραχυκυκλωθεί η αντίσταση R_d , τότε η εξωτερική χαρακτηριστική της γεννήτριας είναι αντίστοιχη της γεννήτριας με παράλληλη διεγερση (καμπύλη ④). Όταν η τιμή της αντιστάσεως R_d είναι μικρή, το τύλιγμα σειράς διαρρέεται από μικρές τιμές ρεύμα φορτίου. Όταν το ρεύμα φορτίου έχει μικρή τιμή, προκαλείται αύξηση της ΜΕΔ $N_s I_s$ της συνολικής μαγνητικής ροής, της τάσεως τυμπάνου και της τερματικής τάσεως.

Όταν το ρεύμα φορτίου παρουσιάζει μικρή αύξηση, λαμβάνομε την καμπύλη ③, στην οποία η μείωση της τερματικής τάσεως σε συνάρτηση με το ρεύμα φορτίου, είναι μικρότερη συγκριτικά με την παράλληλη διεγερση. Η καμπύλη ③ αντιστοιχεί στη λειτουργία της γεννήτριας με υποσύνθετη διεγερση (εξασθένιση του συνολικού μαγνητικού πεδίου της γεννήτριας).

Για μια συγκεκριμένη τιμή της R_d η εξωτερική χαρακτηριστική δίδεται από την καμπύλη ②, η οποία ονομάζεται **καμπύλη σταθερής τάσεως**. Σε αυτήν την περίπτωση η τερματική τάση ισούται με την τάση τυμπάνου.

Αυξάνοντας, στη συνέχεια, την τιμή της R_d , ενισχύεται ο ρόλος του τυλίγματος σειράς στο συνολικό



Σχ. 5.5ιε

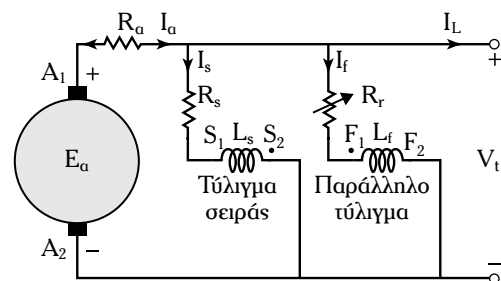
Εξωτερική χαρακτηριστική της γεννήτριας αθροιστικής σύνθετης διεγέρσεως.

μαγνητικό πεδίο της μηχανής. Οπότε, η τερματική τάση, για το **ονομαστικό ρεύμα φορτίου**³, αυξάνεται σε σχέση με την τάση χωρίς φορτίο (καμπύλη ①). Η γεννήτρια λειτουργεί με υπερσύνθετη διεγερση (αύξηση του συνολικού μαγνητικού πεδίου της γεννήτριας).

Τελικά, με τις ρυθμιστικές αντιστάσεις R_r και R_d μπορούμε να ρυθμίζομε την τερματική τάση της γεννήτριας.

5.5.7 Γεννήτριες ΣΡ αφαιρετικής ή διαφορικής σύνθετης διεγέρσεως.

Στις γεννήτριες ΣΡ διαφορικής σύνθετης διεγέρσεως οι ΜΕΔ $N_s I_s$ και $N_f I_f$ αφαιρούνται. Αυτό συμβαίνει γιατί ισχύει η σύμβαση της τελείας, δηλαδή όταν δοθεί η φορά των ρευμάτων σε δύο πηνία, τότε με βάση τις τελείες καθορίζεται και η φορά των παραγομένων ΜΕΔ (οπότε και των παραγομένων ροών). Αν τα βέλη δείχνουν ότι τα ρεύματα εισέρχονται ή εξέρχονται από τα άκρα των τελειών, τότε οι ΜΕΔ στα πηνία αντίστοιχα, ενεργούν με την ίδια φορά. Αντιστρόφως, αν σε ένα πηνίο εισέρχεται το ρεύμα στην τελεία και στο άλλο πηνίο εξέρχεται, τότε οι ΜΕΔ ενεργούν σε αντίθετη φορά. Στο σχήμα 5.5ιστ, δίδεται το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας διαφορικής σύνθετης διεγέρσεως. Το ρεύμα τυμπάνου έχει φορά προς το άκρο της αυτεπαγωγής του τυλίγματος, το οποίο θα σημειώνεται με τελεία (.), ενώ το ρεύμα διεγέρσεως I_f , στο παράλληλο τύλιγμα έχει φορά προς την τελεία στο άκρο της αντίστοιχης παράλληλης αυτεπαγωγής. Με R_r συμβολίζομε τη συνολική ωμική αντίσταση του τυλίγματος παράλληλης διεγέρσεως, το οποίο περιλαμβάνει και τη μεταβλητή αντίσταση R_d .



Σχ. 5.5ιστ

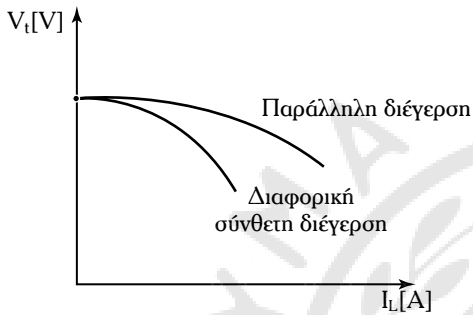
Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας ΣΡ διαφορικής σύνθετης διεγέρσεως.

³ Ονομαστικό ρεύμα φορτίου ονομάζεται το μεγαλύτερο δυνατό ρεύμα, το οποίο παρέχει η γεννήτρια στην κανονική της λειτουργία.

- Εξωτερική χαρακτηριστική.

Στο σχήμα 5.5ιζ, παρουσιάζεται η εξωτερική χαρακτηριστική μιας γεννήτριας διαφορικής σύνθετης διεγέρσεως.

Όταν αυξάνεται το ρεύμα τυμπάνου, τότε αυξάνεται η πώση τάσεως $I_a(R_a + R_s)$, οπότε μειώνεται η τερματική τάση. Μια αύξηση του ρεύματος τυμπάνου προκαλεί επίσης αύξηση της ΜΕΔ του τυλίγματος σειράς, η οποία στη συνέχεια μειώνει τη συνολική ΜΕΔ της γεννήτριας, με αποτέλεσμα να μειώνεται η συνολική μαγνητική ροή της γεννήτριας $E_a = K\Phi\downarrow n$, με ταυτόχρονη μείωση της τερματικής τάσεως της μηχανής.



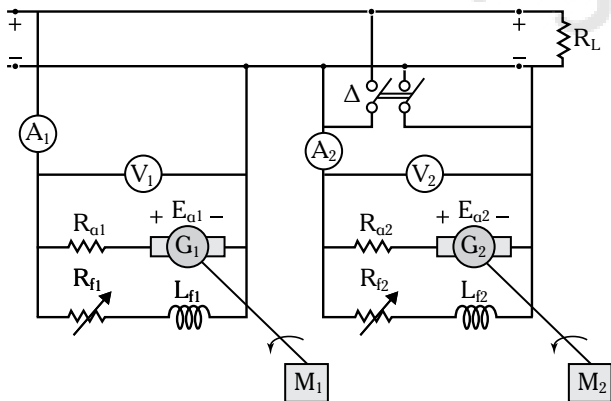
Σχ. 5.5ιζ

Εξωτερική χαρακτηριστική γεννήτριας διαφορικής σύνθετης διεγέρσεως.

5.5.8 Παράλληλη λειτουργία γεννητριών ΣΡ.

Δύο γεννήτριες ΣΡ συνδέονται παράλληλα όταν τροφοδοτούν το ίδιο φορτίο (ή το ίδιο δίκτυο) με την ίδια τάση. Συνδέονται παράλληλα γεννήτριες, οι οποίες λειτουργούν με σταθερή τάση (γεννήτριες με ανεξάρτητη διεγερση, παράλληλη διεγερση, σύνθετη διεγερση).

Στο σχήμα 5.5ιθ, παρουσιάζεται η γεννήτρια G_1



Σχ. 5.5ιθ

Παράλληλη λειτουργία γεννητριών ΣΡ με παράλληλη διεγερση.

συνδεδεμένη στο δίκτυο, η οποία τροφοδοτεί φορτίο, ενώ υπάρχει ανάγκη να συνδεθεί παράλληλα η γεννήτρια G_2 . Οι κινητήριες μηχανές είναι οι M_1 και M_2 . Οι γεννήτριες ΣΡ είναι παράλληλης διεγέρσεως.

Για τον παραλληλισμό των γεννητριών ΣΡ απαιτείται να έχουν την ίδια πολικότητα, την ίδια τάση και την ίδια εξωτερική χαρακτηριστική.

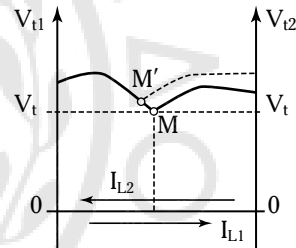
Η πρώτη συνθήκη ελέγχεται κατά την εγκατάσταση των γεννητριών και στην περίπτωση κατά την οποία οι γεννήτριες παραλληλίζονται για πρώτη φορά. Για την ικανοποίηση της δεύτερης συνθήκης πραγματοποιούνται οι ακόλουθοι χειρισμοί:

1) Τίθεται σε λειτουργία η κινητήρια μηχανή M_2 .

2) Όταν η γεννήτρια αποκτήσει τον ονομαστικό αριθμό στροφών μειώνουμε την R_{f2} , ώστε η τάση της γεννήτριας G_2 να ισούται με την τάση της γεννήτριας G_1 , που είναι ήδη συνδεδεμένη στο δίκτυο.

3) Κάτω από αυτές τις συνθήκες κλείνουμε τον διακόπτη Δ .

Οι γεννήτριες έχουν τις ίδιες εξωτερικές χαρακτηριστικές (σχ. 5.5ιθ).



Σχ. 5.5ιθ

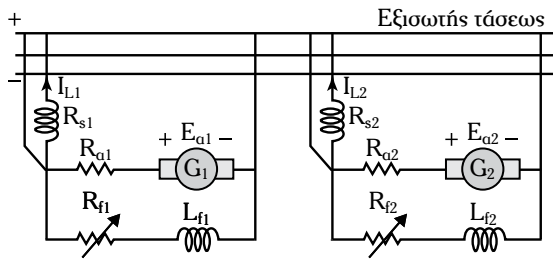
Εξωτερικές χαρακτηριστικές γεννητριών, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα και αντίστοιχο σημείο λειτουργίας τους.

Η τάση V_t των δύο γεννητριών πρέπει να είναι ίδια, οπότε M , είναι το σημείο λειτουργίας των μηχανών, το οποίο προκύπτει από την τομή των εξωτερικών χαρακτηριστικών τους.

Αν μειωθεί η R_{f2} , τότε αυξάνεται το ρεύμα διεγέρσεως της γεννήτριας G_2 και τότε M' είναι το νέο σημείο λειτουργίας. Η γεννήτρια G_2 παρέχει περισσότερο ρεύμα, ενώ η γεννήτρια G_1 λιγότερο, με αποτέλεσμα να επιταχύνεται ανυδρώντας με σταθεροποιητικό τρόπο σ' αυτήν τη διαταραχή.

Στην περίπτωση του παραλληλισμού των γεννητριών ΣΡ με σύνθετη διεγερση (σχ. 5.5κ), ισχύουν οι συνθήκες παραλληλισμού ΣΡ με την εξής παρατήρηση:

Λόγω της παρουσίας του τυλίγματος σειράς ενδεχομένως, όταν μειωθούν οι στροφές μιας από τις



Σχ. 5.5κ

Παράλληλη λειτουργία γεννητριών ΣΡ
με σύνθετη διέγερση.

κινητήριες μηχανές να προκληθούν σοβαρές ανωμαλίες στο σύστημα. Στην περίπτωση αυτή η γεννήτρια η οποία λειτουργεί κανονικά δίδει ρεύμα στην άλλη γεννήτρια, με μειωμένες στροφές.

Αυτή μπορεί αφενός να λειτουργήσει σαν κινητήρας, αφετέρου να αλλάξει πολικότητα. Προκειμένου να εξουδετερωθεί ο κίνδυνος αυτός στον **πίνακα ζεύξεως και ελέγχου**⁴ των δύο γεννητριών χρησιμοποιείται εκτός από τους δύο κύριους ζυγούς και ένας τρίτος, ο οποίος ονομάζεται **εξισωτής τάσεως**.

Με την τοποθέτηση του εξισωτή τάσεως οι διαφορές των ρευμάτων, οι οποίες προκύπτουν στην περίπτωση της μειώσεως των στροφών ή από αιτία άλλων ανωμαλιών εξισώνονται χωρίς να επηρεάζεται το μαγνητικό πεδίο των γεννητριών.

5.5.9 Απώλειες ισχύος γεννητριών ΣΡ.

Στις γεννήτριες ΣΡ συναντάμε τις ακόλουθες απώλειες:

1) Μαγνητικές απώλειες.

Οι μαγνητικές απώλειες είναι οι απώλειες πυρήνα (P_h) οι οποίες αποτελούνται από:

1) Τις **απώλειες μαγνητικής υστερήσεως** (P_h) που οφείλονται στις διαδοχικές μεταβολές μαγνητισμού του δρομέα και δίδονται ως εξής:

$$P_h = K_p n \Phi^2 \quad (5.50)$$

όπου: K_p μια σταθερή παράμετρος και n , η ταχύτητα περιστροφής σε στροφές ανά λεπτό και

2) τις **απώλειες δινορρευμάτων** (P_e) ή απώλειες Foucault που οφείλονται στα δινορρεύματα τα οποία δημιουργούνται στον πυρήνα του δρομέα λόγω της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής. Οι απώλειες δινορρευμάτων δίδονται ως εξής:

$$P_e = K_y n^2 \Phi^2 \quad (5.51)$$

όπου K_y μια σταθερή παράμετρος.

Οι απώλειες δινορρευμάτων για σταθερή ταχύτητα περιστροφής n και σταθερή μαγνητική ροή Φ είναι σταθερές.

Οι απώλειες πυρήνα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής και σταθερή διέγερση είναι σταθερές, ανεξάρτητες από το φορτίο της μηχανής και εντοπίζονται αποκλειστικά στον δρομέα.

2) Ηλεκτρικές απώλειες.

Ηλεκτρικές απώλειες ονομάζονται οι απώλειες χαλκού (P_{cu}), οι οποίες είναι: **σταθερές** και **μεταβλητές** με το φορτίο.

1) Οι **σταθερές απώλειες χαλκού** P_{cuf} είναι απώλειες, που εντοπίζονται στα τυλίγματα διεγέρσεως στη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση:

$$P_{cuf} = R_{lf} I_f^2 \quad (5.52)$$

Η τιμή των απωλειών P_{cuf} διατηρείται σταθερή, τόσο στη λειτουργία χωρίς φορτίο, όσο και στη λειτουργία με φορτίο μηχανής.

2) Στις **μεταβλητές με το φορτίο απώλειες χαλκού**, ανήκουν οι απώλειες οι οποίες εμφανίζονται στην αντίσταση τυμπάνου (R_a) και στο τυλίγμα διεγέρσεως (R_s) της γεννήτριας ΣΡ με διέγερση σειράς.

Στην αντίσταση (R_a) ενσωματώνονται η αντίσταση των αγωγών του επαγωγικού τυμπάνου, η αντίσταση των τυλιγμάτων των βοηθητικών πόλων, η αντίσταση των τυλιγμάτων αντισταθμίσεως, η αντίσταση των ψηκτρών και η αντίσταση επαφής μεταξύ των ψηκτρών και των τομέων του συλλέκτη.

Οι συνολικές απώλειες χαλκού στο επαγωγικό τύμπανο της μηχανής δίδονται ως εξής:

$$P_{cua} = R_a I_a^2 \quad (5.53)$$

και μεταβάλλονται με το τετράγωνο του φορτίου.

Οι απώλειες χαλκού P_{cus} στο τυλίγμα διεγέρσεως σειράς μιας γεννήτριας ΣΡ με διέγερση σειράς είναι:

$$P_{cus} = I_s^2 R_s \quad (5.54)$$

3) Μηχανικές απώλειες.

Μηχανικές απώλειες ονομάζονται και απώλειες

⁴ Πίνακας ζεύξεως και ελέγχου ονομάζεται ο ηλεκτρικός πίνακας συνδέσεως των δύο γεννητριών.

λόγω τριβών και ανεμισμού P_c . Οφείλονται στις τριβές των κινουμένων μερών και στην ισχύ, η οποία απαιτείται για την κίνηση των ανεμιστήρων ψύξεως.

Οι απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού είναι σταθερές με το φορτίο της μηχανής.

Οι συνολικές απώλειες (ΣP_a) μίας γεννήτριας ΣΡ αποτελούν το 6,5–7% της ισχύος εισόδου της γεννήτριας.

– Κατανομή της πραγματικής ισχύος στις γεννήτριες ΣΡ.

Έστω P_{in} η ισχύς εισόδου των γεννητριών ΣΡ, η οποία προσφέρεται απ' την κινητήρια μηχανή.

P_{out} είναι η ισχύς εξόδου των γεννητριών ΣΡ, η οποία ονομάζεται και **ωφέλιμη ισχύς**.

Για την κατανομή της πραγματικής ισχύος απαιτείται να είναι γνωστός ο τύπος της μηχανής και οι αντίστοιχες εξισώσεις λειτουργίας της.

Έστω ότι έχουμε μια γεννήτρια ΣΡ με παράλληλη διέγερση. Η εξίσωση των τάσεων είναι:

$$E_a = V_t + R_a I_a \quad (5.55)$$

Πολλαπλασιάζουμε και τα δύο μέλη της εξίσωσης με το ρεύμα τυμπάνου I_a , οπότε έχουμε:

$$I_a E_a = I_a V_t + R_a I_a^2 \quad (5.56)$$

Η εξίσωση δίδει την **κατανομή της εσωτερικής ηλεκτρικής ισχύος** (P_{em})⁵ ή της ισχύος η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητική:

$$P_{em} = E_a I_a \quad (5.57)$$

Η ισχύς P_{em} μεταφέρεται ηλεκτρομαγνητικά από την κινητήρια μηχανή στην γεννήτρια ΣΡ και αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος εισόδου P_{in} . Η ισχύς, η οποία καταναλώνεται απ' τις μηχανικές τριβές και τον ανεμιστήρα, όπως και οι απώλειες πυρήνα, δεν μεταφέρεται.

Στο σχήμα 5.5κα δίδεται το διάγραμμα ροής ισχύος μιας γεννήτριας ΣΡ, όπου: $T_{αξ}$ η ροπή στον άξονα της γεννήτριας, ω η γωνιακή ταχύτητα σε rad/s του άξονα της γεννήτριας ΣΡ, T_{em} η ηλεκτρομαγνητική ροπή σε N-m και n είναι η ταχύτητα περιστροφής σε ΣΑΛ, της γεννήτριας ΣΡ.

Ο βαθμός αποδόσεως η , μιας γεννήτριας ΣΡ δίδεται ως εξής:

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) 100 \quad (5.58)$$

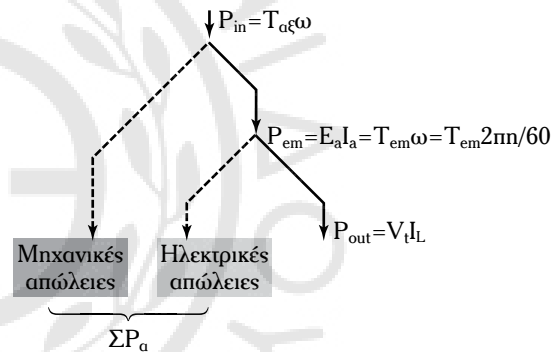
$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{(P_{in} + \Sigma P_a)} \right) 100 \quad (5.59)$$

Ο βαθμός αποδόσεως των γεννητριών ΣΡ είναι της τάξεως των 90 έως 94%.

Ο βαθμός αποδόσεως των γεννητριών ΣΡ μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο (σχ. 5.5κβ).

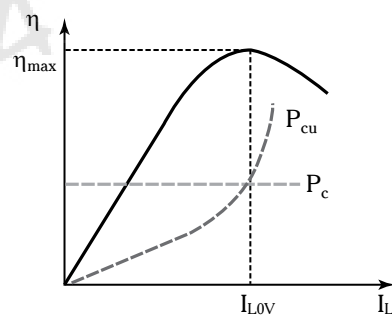
Σε μικρά φορτία αυξάνεται απότομα ο βαθμός αποδόσεως της μηχανής με την αύξηση του φορτίου.

Όταν οι απώλειες πυρήνα εξισώνονται με τις μεταβλητές απώλειες, τότε η μηχανή έχει τη μέγιστη απόδοση. Αυτό γίνεται για ονομαστική φόρτιση της γεννήτριας ΣΡ.



Σχ. 5.5κα

Διάγραμμα ροής ισχύος γεννητριών ΣΡ.



Σχ. 5.5κβ

Απόδοση γεννήτριας ΣΡ.

⁵ Κατανομή της εσωτερικής ηλεκτρικής ισχύος (P_{em}) ονομάζεται η ισχύς η οποία εκφράζει τη μετατροπή της μηχανικής ισχύος σε ηλεκτρική.

– **Λυμένες ασκήσεις.**

Άσκηση 1.

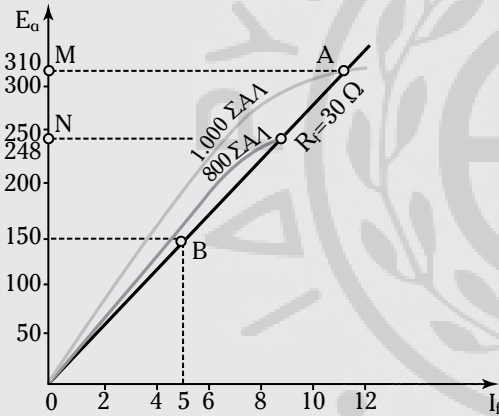
Δίδεται ο πίνακας τιμών της συναρτήσεως $E_a = f(I_f)$ της χαρακτηριστικής χωρίς φορτίο μιας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση στις 1.000 ΣΑΛ:

E_a [V]	52,5	107,5	155	196,5	256,5	275	278,5
I_f [A]	1	2	3	4	5	6	7

Να υπολογίσετε την τάση χωρίς φορτίο E_a , εάν η γεννήτρια περιστρέφεται με 800 ΣΑΛ και η αντίσταση του τυλίγματος διεγέρσεως είναι 30 Ω.

Λύση.

Στο σχήμα 5.5κγ δίδεται η στατική χαρακτηριστική της γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση στις 1.000 ΣΑΛ.



Σχ. 5.5κγ

Η τάση χωρίς φορτίο E_a , όταν οι στροφές της μηχανής είναι 1.000 ΣΑΛ προσδιορίζεται ως εξής:

Είναι γνωστό, ότι η χαρακτηριστική ευθεία περνάει από την αρχή των αξόνων του σχήματος. Για $I_f = 5 \text{ A}$ είναι $E_a = R_f I_f = 30 \cdot 5 = 150 \text{ V}$, οπότε προσδιορίζεται το σημείο Β στο σχήμα. Προεκτείνοντας την ευθεία, η οποία περνάει από τα σημεία Ο (0, 0) και Β (5, 150) προσδιορίζεται το σημείο λειτουργίας Α, της γεννήτριας. Είναι το σημείο τομής της χαρακτηριστικής ευθείας με την χαρακτηριστική χωρίς φορτίο στις 1.000 ΣΑΛ. Η τάση χωρίς φορτίο είναι $E_a = 310 \text{ V}$.

Για να υπολογιστεί η τάση χωρίς φορτίο στις 800 ΣΑΛ εργαζόμαστε ως εξής:

$$\text{Είναι:} \quad E_a^{(1)} = K\Phi n_1 \quad (1)$$

$$\text{και} \quad E_a^{(2)} = K\Phi n_2 \quad (2)$$

Διαιρώντας τις εξισώσεις 1 και 2 κατά μέλη προκύπτει:

$$\frac{E_a^{(1)}}{E_a^{(2)}} = \frac{n_1}{n_2}$$

αν $E_a^{(2)} = X$, τότε έχουμε $310/X = 1.000/800$. Είναι $X = 248 \text{ V}$. Η τιμή αντιστοιχεί στο σημείο Ν του σχήματος 5.5κγ.

Άσκηση 2.

Τα δεδομένα της στατικής χαρακτηριστικής μιας γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση, όταν περιστρέφεται στις 1.500 ΣΑΛ, δίδονται στον ακόλουθο πίνακα:

I_f [A]	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3
E_a [V]	6	60	120	172,5	202,5	221	231	237	240,03

Να υπολογίσετε:

1) Την τάση χωρίς φορτίο της γεννήτριας ΣΡ, όταν η τιμή της αντιστάσεως του τυλίγματος διεγέρσεως είναι 100 Ω.

2) Την τιμή της κρίσιμης αντιστάσεως του τυλίγματος διεγέρσεως, R_{fcr} , στην ταχύτητα περιστροφής των 150 ΣΑΛ.

3) Να χαράξετε τη στατική χαρακτηριστική της γεννήτριας ΣΡ, όταν αυτή περιστρέφεται με 1.200 ΣΑΛ. Να υπολογίσετε την τάση χωρίς φορτίο της γεννήτριας ΣΡ, όταν η τιμή της αντιστάσεως διεγέρσεως είναι 100 Ω.

Λύση.

1) Από τα δεδομένα του πίνακα (I_f , E_a) κατασκευάζουμε την στατική χαρακτηριστική της γεννήτριας ΣΡ, όταν περιστρέφεται με 1.500 ΣΑΛ. (σχ. 5.5κδ). Χαράσσομε τη χαρακτηριστική ευθεία

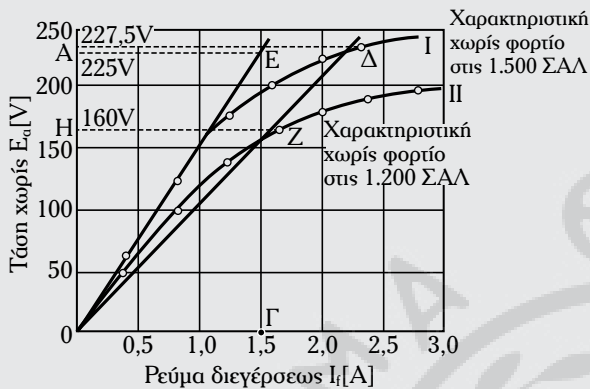
(σχέση $R_f = \frac{E_a}{I_f}$) συνδέοντας τα σημεία (0, 0)

και (1 A, 100 V). Το σημείο τομής της στατικής χαρακτηριστικής και της χαρακτηριστικής ευθείας (σημείο Δ) αντιστοιχεί στην τάση χωρίς φορτίο 227,5 V.

2) Χαράσσομε την εφαπτομένη ΟΓ στη στατική χαρακτηριστική, η οποία διέρχεται από την αρχή των αξόνων (0, 0). Η κρίσιμη τιμή της αντιστάσεως του τυλίγματος αντιστοιχεί στην κλίση

της επαπομένους $OΓ = \frac{225}{1,5} = 150 \Omega$.

3) Η τάση χωρίς φορτίο της γεννήτριας ΣΡ στις 1.200 ΣΑΛ είναι $\left(\frac{1.200}{1.500}\right)$ ή 0,8 φορές της αντίστοιχης τιμής στις 1.500 ΣΑΛ.



Σχ. 5.5κδ

Τα δεδομένα των τιμών (I_f, E_a) για την χάραξη της στατικής χαρακτηριστικής (καμπύλη II), της γεννήτριας ΣΡ, όταν αυτή περιστρέφεται με 1.200 ΣΑΛ, δίδονται στον ακόλουθο πίνακα:

$I_f [A]$	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3
$E_a [V]$	4,8	48	96	138	162	176,8	184,8	189,6	192

Άσκηση 3.

Τα δεδομένα της στατικής χαρακτηριστικής μιας γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση, όταν αυτή περιστρέφεται με 1.000 ΣΑΛ, δίδονται στον ακόλουθο πίνακα:

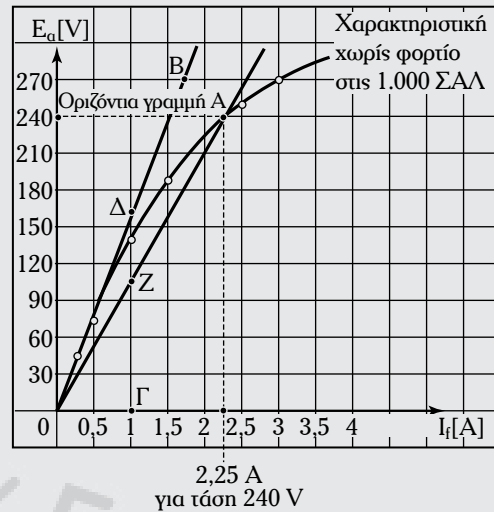
$I_f [A]$	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$E_a [V]$	36	72	138	188	225	250	270

Να υπολογίσετε:

- 1) Την τιμή της αντιστάσεως του τυλίγματος διέγερσεως όταν η τάση χωρίς φορτίο είναι 240 V.
- 2) Τον κρίσιμο αριθμό στροφών n_c της γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση.

Λύση.

Από τα δεδομένα του πίνακα των τιμών (I_f, E_a)



Σχ. 5.5κε

κατασκευάζουμε την στατική χαρακτηριστική της γεννήτριας με παράλληλη διέγερση (σχ. 5.5κε).

1) Η τάση χωρίς φορτίο είναι: $E_a = 240 V$. Φέρουμε την οριζόντια γραμμή από την τιμή της τάσεως 240 V, η οποία κόβει στο σημείο Α την στατική χαρακτηριστική. Σε αυτό το σημείο τομής αντιστοιχεί το ρεύμα διέγερσεως 2,25 A. Η κλίση της χαρακτηριστικής ευθείας ΟΑ, αντιστοιχεί στην τιμή της αντιστάσεως διέγερσεως. Οπότε είναι:

$$R_f = \frac{240}{2,25} = 106,67 \Omega.$$

2) Χαράσσουμε την επαπομένη ΟΒ στη στατική χαρακτηριστική όταν η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση είναι $n_1 = 1.000$ ΣΑΛ. Επιλέγουμε το ρεύμα διέγερσεως 1 A (σημείο Γ). Φέρουμε την κάθετο στο σημείο Γ η οποία κόβει την επαπομένη ΟΒ στο σημείο Δ και την χαρακτηριστική ευθεία ΟΑ στο σημείο Ζ. Η κρίσιμη τιμή n_c , προσδιορίζεται ως εξής:

$$\frac{\Gamma Z}{\Gamma \Delta} = \frac{n_c}{n_1} \text{ και } n_c = \frac{\Gamma Z}{\Gamma \Delta} n_1 = \frac{105}{159} \cdot 1.000 \cong 660 \text{ ΣΑΛ.}$$

Οπότε, ο κρίσιμος αριθμός στροφών της γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση είναι 660 ΣΑΛ.

Άσκηση 4.

Η αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου μιας γεννήτριας ανεξάρτητης διέγερσεως, 50 kW, 250 V είναι 0,025 Ω.

Η γεννήτρια παρέχει το **ονομαστικό ρεύμα**⁶ με την **ονομαστική της τάση**⁷. Να υπολογίσετε το ρεύμα τυμπάνου και την τάση χωρίς φορτίο στο **ονομαστικό φορτίο**⁸. Αν η τερματική τάση διατηρείται στα 250 V και η ισχύς εξόδου μειώνεται στα 40 kW, να υπολογίσετε την τάση χωρίς φορτίο σ' αυτήν την κατάσταση λειτουργίας.

Λύση.

Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας είναι:

$$P_{\text{out}} = V_t I_a.$$

Το ονομαστικό ρεύμα τυμπάνου είναι:

$$I_a = 50 \cdot 10^3 / 250 = 200 \text{ A}.$$

$$\begin{aligned} \text{Είναι: } E_a &= V_t + I_a R_a = \\ &= 250 + 200 \cdot (0,025) = 255 \text{ V}. \end{aligned}$$

Όταν η ισχύς εξόδου είναι 40 kW, τότε:

$$I_a = 40 \cdot 10^3 / 250 = 160 \text{ A}.$$

$$\text{Τότε: } E_a = 250 + 160 \cdot (0,025) = 254 \text{ V}.$$

Άσκηση 5.

Η γεννήτρια της ασκήσεως 4 παρέχει 40 kW όταν η τάση χωρίς φορτίο είναι 255 V. Να υπολογίσετε την τερματική τάση V_t και το αντίστοιχο ρεύμα τυμπάνου I_a όταν η τερματική τάση διατηρείται στα 253 V και η τάση χωρίς φορτίο είναι 257 V. Να υπολογίσετε την ισχύ εξόδου της γεννήτριας.

Λύση.

$$\text{Είναι: } I_a = 40 \cdot 10^3 / V_t.$$

$$\text{Ισχύει } V_t = E_a - I_a R_a$$

$$V_t = 255 - \frac{40.000}{V_t} \cdot 0,025,$$

$$V_t^2 - 255 \cdot V_t + 1.000 = 0$$

$$\text{ή } V_t = 251 \text{ V}.$$

Το ρεύμα τυμπάνου είναι:

$$I_a = \frac{40.000}{251} \cong 159 \text{ A}.$$

Όταν η τάση χωρίς φορτίο είναι 257 V και η τερματική τάση είναι 253 V, το ρεύμα τυμπάνου είναι:

$$I_a = \frac{E_a - V_t}{R_a} = \frac{257 - 253}{0,025} = 160 \text{ A}.$$

Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας είναι:

$$P_{\text{out}} = V_t I_a = 253 \cdot 160 = 40.480 \text{ W}.$$

Άσκηση 6.

Δίδεται γεννήτρια ΣΡ με διέγερση σειράς με τα εξής χαρακτηριστικά:

$$P_{\text{out}} = 10 \text{ kW}, \quad V_t = 125 \text{ V}, \quad R_s = 0,05 \Omega$$

1) Όταν η τάση χωρίς φορτίο είναι 137 V να υπολογίσετε την αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου.

2) Για φορτίο ίσο με 75% του ονομαστικού να υπολογίσετε την τάση χωρίς φορτίο.

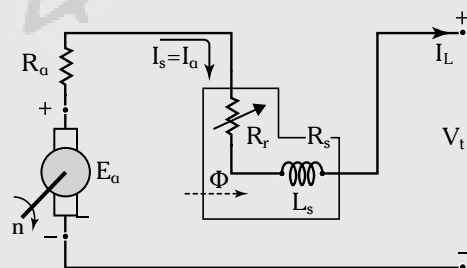
3) Όταν η E_a είναι 136 V και η ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας είναι 8 kW να υπολογίσετε την τερματική τάση της γεννήτριας.

Λύση.

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της γεννήτριας είναι δίδεται στο σχήμα 5.5κστ.

1) Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας δίδεται:

$$P_{\text{out}} = V_t I_a.$$



Σχ. 5.5κστ

⁶ Ονομαστικό ρεύμα ονομάζεται το μεγαλύτερο δυνατό ρεύμα, το οποίο δίδει η γεννήτρια όταν παρέχει τάση 250 V και ισχύ στην έξοδο της 50 kW.

⁷ Ονομαστική τάση ονομάζεται η μεγαλύτερη δυνατή τάση (250 V), για την οποία είναι κατασκευασμένη η γεννήτρια.

⁸ Το ονομαστικό φορτίο αντιστοιχεί στη λειτουργία της γεννήτριας όταν αυτή παρέχει 50 kW με τάση 250 V.

Ισχύει: $I_a = \frac{P_{out}}{V_t} = \frac{10.000 \text{ W}}{125 \text{ V}} = 80 \text{ A}.$

Εφαρμόζοντας τον Δεύτερο Κανόνα του Kirchhoff στο κύκλωμα έχουμε:

$$E_a - I_a (R_a + R_s) - V_t = 0$$

και $137 - 80 (0,05 + R_a) - 125 = 0$

και $R_a = 0,1 \Omega$

όπου R_s η συνολική αντίσταση του τυλίγματος σειράς της γεννήτριας.

2) Για φορτίο 75% του ονομαστικού:

$$P_{out} = 0,75 \cdot 10.000 = 7.500 \text{ W}.$$

Είναι: $I_a = I_f = I_L = \frac{7.500 \left[\frac{\text{W}}{\text{V}} \right]}{125} = 60 \text{ A}.$

Εφαρμόζοντας τον Δεύτερο Κανόνα του Kirchhoff στο ισοδύναμο κύκλωμα έχουμε:

$$E_a - I_a (R_a + R_s) - V_t = 0$$

ή $E_a - 60 (0,1 + 0,05) - 125 = 0$

και $E_a = 134 \text{ V}.$

3) Εφαρμόζουμε τον Δεύτερο Κανόνα του Kirchhoff στο κύκλωμα, οπότε προκύπτει η εξίσωση:

$$E_a - I_a (0,1 + 0,05) - V_t = 0. \quad (1)$$

Από την ισχύ εξόδου P_{out} της γεννήτριας, έχουμε:

$$P_{out} = V_t I_a \Rightarrow I_a = 8.000 / V_t. \quad (2)$$

Η εξίσωση 1 με βάση την εξίσωση 2 γίνεται:

$$136 - 8.000 \cdot (0,15) / V_t - V_t = 0.$$

Προκύπτει η ακόλουθη δευτεροβάθμια εξίσωση:

$$V_t^2 - 136 V_t + 1.200 = 0. \quad (3)$$

Οι ρίζες της εξίσωσης 3 είναι $V_t^{(1)} = 126,51 \text{ V}$ και $V_t^{(2)} = 9,48 \text{ V}$. Η ζητούμενη τιμή της τερματικής τάσεως είναι:

$$V_t^{(1)} \equiv V_t = 126,51 \text{ V}.$$

Άσκηση 7.

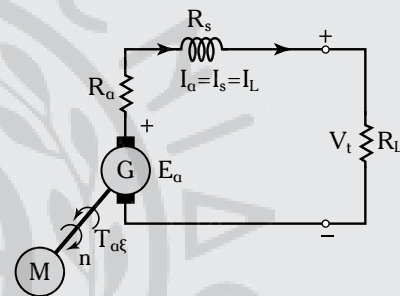
Γεννήτρια ΣΡ διεγέρσεως σειράς 220 V, 20 kW έχει αντίσταση τυμπάνου $0,3 \Omega$ και αντίσταση τυλίγματος διεγέρσεως σειράς $0,025 \Omega$.

Η γεννήτρια λειτουργεί με ονομαστική τάση και τροφοδοτεί φορτίο ίσο με 70% του ονομαστικού. Αν η μηχανική ισχύς εισόδου της γεννήτριας είναι 24 HP να υπολογίσετε:

- 1) Την τάση τυμπάνου.
- 2) Την απόδοση της γεννήτριας.

Λύση.

1) Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας είναι αυτό του σχήματος 5.5κζ.



Σχ. 5.5κζ

Εφαρμόζοντας τον Δεύτερο Κανόνα του Kirchhoff, προκύπτει:

$$E_a = V_t + I_a (R_a + R_s) = 220 + 90,91 \cdot (0,3 + 0,025) = 249,54 \text{ V},$$

γιατί: $I_a = \frac{P_{out}}{V_t} \left[\frac{\text{W}}{\text{V}} \right] = \frac{20.000}{220} = 90,90 \text{ A}.$

Όταν η γεννήτρια τροφοδοτεί φορτίο ίσο με 70% του ονομαστικού, τότε η ισχύς εξόδου της γεννήτριας είναι:

$$P_{out} = 0,70 \cdot 20.000 = 14.000 \text{ W}.$$

Σ' αυτήν την περίπτωση το ρεύμα τυμπάνου I_a είναι:

$$I_a = \frac{P_{out}}{V_t} \left[\frac{\text{W}}{\text{V}} \right] = \frac{14.000}{220} = 63,63 \text{ A}.$$

Είναι: $E_a = 220 + 63,63 \cdot (0,3 + 0,025) = 240,68 \text{ V}.$

2) Η ισχύς εισόδου της γεννήτριας είναι:

$$P_{in} = 24 \cdot 746 = 17.904 \text{ W, είναι } 1 \text{ HP} = 746 \text{ W.}$$

Η απόδοση της γεννήτριας είναι:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{14.000}{17.904} \cdot 100 = 78,19\%.$$

Άσκηση 8.

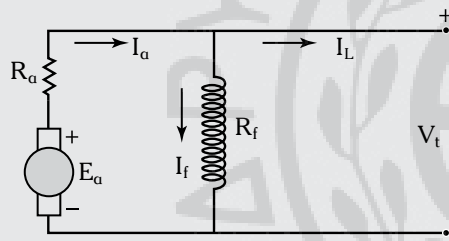
Γεννήτρια ΣΡ με παράλληλη διέγερση, 120 V, 12 kW λειτουργεί με την ονομασική της τάση. Έχει αντίσταση επαγωγικού τυμπάνου $0,2 \Omega$ και αντίσταση τυλίγματος διεγέρσεως 60Ω . Η γεννήτρια στρέφεται με $n = 1000$ ΣΑΛ, ενώ η ασκούμενη ροπή στον άξονά της είναι $T_{αξ} = 132 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Να υπολογίσετε:

Την μηχανική ισχύ, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική, και την απόδοση της γεννήτριας.

Λύση.

Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας απεικονίζεται στο σχήμα 5.5κπ:



Σχ. 5.5κπ

Η ισχύς εισόδου της γεννήτριας είναι:

$$P_{in} = T_{αξ} \omega$$

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} = 6,28 \frac{1000}{60} = 104,66 \text{ rad/s}$$

$$P_{in} = 132 \cdot 104,66 = 13.815,12 \text{ W.}$$

Η τάση τυμπάνου της γεννήτριας είναι:

$$E_a = V_t + I_a R_a. \quad (1)$$

Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας είναι:

$$P_{out} = V_t I_L.$$

Το ρεύμα φορτίου της γεννήτριας είναι:

$$I_L = \frac{P_{out}}{V_t} \left[\frac{\text{W}}{\text{V}} \right] = \frac{12.000}{120} = 100 \text{ A.}$$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα το ρεύμα τυμπάνου

$$I_a \text{ είναι: } I_a = I_L + I_f = I_L + \frac{V_t}{R_f} = 100 + \frac{120}{60} = 102 \text{ A.}$$

Από την εξίσωση 1 έχουμε:

$$E_a = 120 + 102 \cdot 0,2 = 140,4 \text{ V.}$$

Η μηχανική ισχύς, που μετατρέπεται σε ηλεκτρική (P_{em}) είναι:

$$P_{em} = E_a I_a = 140,4 \cdot 102 = 14.320,8 \text{ W.}$$

Η απόδοση της γεννήτριας είναι:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{12.000}{13.815,12} \cdot 100 = 86,86\%.$$

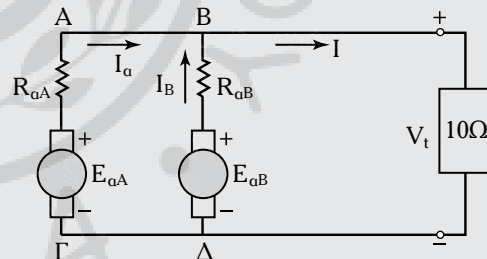
Άσκηση 9.

Δύο γεννήτριες A και B συνδέονται παράλληλα και τροφοδοτούν ένα φορτίο.

Οι τάσεις χωρίς φορτίο των γεννητριών είναι 205 V και 200 V αντίστοιχα, ενώ οι αντιστάσεις των επαγωγικών τυμπάνων των γεννητριών είναι $0,5 \Omega$ και $0,3 \Omega$ αντίστοιχα. Να υπολογίσετε τα ρεύματα φορτίων των γεννητριών και την κοινή τους τερματική τάση, αν το φορτίο το οποίο τροφοδοτούν είναι 10Ω .

Λύση.

Στο σχήμα 5.5κθ δίδεται η συνδεσμολογία των γεννητριών A και B όταν λειτουργούν παράλληλα.



Σχ. 5.5κθ

Εφαρμόζοντας την εξίσωση των τάσεων στους κλάδους ΑΓ και ΒΔ, προκύπτουν οι εξισώσεις 1 και 2:

$$V_t = 205 - 0,5 I_A \quad (1)$$

$$V_t = 200 - 0,3 I_B. \quad (2)$$

Εφαρμόζοντας τον Νόμο του Ωμ στο φορτίο των 10Ω , έχουμε:

$$V_t = I \cdot 10 = (I_A + I_B) \cdot 10 \text{ V.} \quad (3)$$

Επιλύουμε το σύστημα ως εξής: Η εξίσωση 1 με βάση την εξίσωση 3 γίνεται:

$$(I_A + I_B) \cdot 10 = 205 - 0,5 I_A$$

$$\text{ή} \quad 205 = 10,5 I_A + 10 I_B \quad (4)$$

Η εξίσωση 2 με βάση την εξίσωση 3 γίνεται:

$$(I_A + I_B) \cdot 10 = 200 - I_B \cdot 0,3$$

$$\text{ή} \quad 200 = 10 I_A + 10,3 I_B \quad (5)$$

Επιλύουμε το σύστημα εξισώσεων 4 και 5 με την μέθοδο Cramer ή οριζουσών. Είναι:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 10,5 & 10 \\ 10 & 10,3 \end{vmatrix} = 10,5 \times 10,3 - 10 \times 10 = 8,15$$

$$\Delta_A = \begin{vmatrix} 205 & 10 \\ 200 & 10,3 \end{vmatrix} = 205 \times 10,3 - 200 \times 10 = 111,5$$

$$\text{και} \quad I_A = \frac{111,5}{8,15} = 13,68 \text{ A.}$$

$$\text{Είναι: } \Delta_B = \begin{vmatrix} 10,5 & 205 \\ 10 & 200 \end{vmatrix} = 10,5 \times 200 - 10 \times 205 = 50$$

$$\text{και} \quad I_B = \frac{50}{0,15} = 6,13 \text{ A.}$$

Το ρεύμα φορτίου, I , είναι:

$$I = I_A + I_B = 13,68 + 6,13 = 19,81 \text{ A.}$$

Η κοινή τερματική τάση, V_t , είναι:

$$V_t = I \cdot 10 = 19,81 \cdot 10 = 198,1 \text{ V.}$$

Από το σύστημα των τριών εξισώσεων 1, 2, 3 προκύπτει:

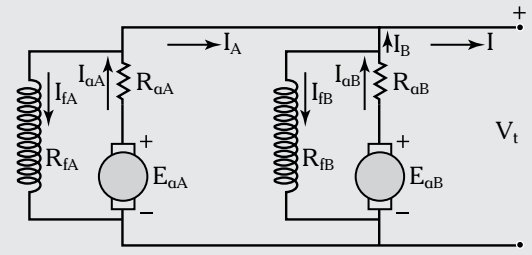
$$I_A = 13,68 \text{ A, } I_B = 6,13 \text{ A} \text{ και } V_t = 198,1 \text{ V.}$$

Άσκηση 10.

Δύο γεννήτριες Α και Β, με παράλληλη διέγερση συνδέονται παράλληλα και παρέχουν συνολικό ρεύμα 2.000 A. Η γεννήτρια Α έχει $R_f^{(A)} = 55 \Omega$, $R_a^{(A)} = 0,025 \Omega$, $E_a^{(A)} = 260 \text{ V}$. Η γεννήτρια Β έχει $R_f^{(B)} = 60 \Omega$, $R_a^{(B)} = 0,03 \Omega$, $E_a^{(B)} = 250 \text{ V}$. Να υπολογίσετε την κοινή τερματική τάση των γεννητριών και τα ρεύματα που παρέχουν σε κάποιο φορτίο. Ποιο είναι το συνολικό ρεύμα φορτίου το οποίο δίδουν οι γεννήτριες, όταν η κοινή τερματική τους τάση είναι 220 V;

Λύση.

Στο σχήμα 5.5λ δίδεται η συνδεσμολογία των γεννητριών Α και Β όταν λειτουργούν παράλληλα.



Σχ. 5.5λ

Έστω I_A και I_B τα ρεύματα φορτίου των γεννητριών Α και Β αντίστοιχα.

$$\text{Ισχύει:} \quad I = I_A + I_B = 2.000 \text{ A} \quad (1)$$

$$I_f^{(A)} = V_t / R_f^{(A)} = V_t / 55 \text{ A} \quad (2)$$

$$I_f^{(B)} = V_t / R_f^{(B)} = V_t / 60 \text{ A.} \quad (3)$$

Η τάση τυμπάνου της γεννήτριας Α είναι:

$$E_a^{(A)} = V_t + I_a^{(A)} R_a^{(A)}$$

$$\text{ή} \quad 260 = V_t + (I_f^{(A)} + I_A) R_a^{(A)} = V_t + (V_t / 55 + I_A) \cdot 0,025. \quad (4)$$

Η τάση τυμπάνου της γεννήτριας Β είναι:

$$E_a^{(B)} = V_t + I_a^{(B)} R_a^{(B)}$$

$$\text{ή} \quad 250 = V_t + (V_t / 60 + I_B) \cdot 0,03. \quad (5)$$

Από τις εξισώσεις 1, 2, 3, 4, 5 προκύπτει: $V_t = 228 \text{ V}$, $I_A = 1.266 \text{ A}$ και $I_B = 734 \text{ A}$.

Όταν η κοινή τερματική τάση των γεννητριών Α και Β είναι 220 V τότε, $I_a^{(A)}$ και $I_a^{(B)}$ είναι τα ρεύματα τυμπάνου των αντιστοίχων γεννητριών Α και Β.

$$\text{Είναι: } 260 - 0,025 \cdot I_a^{(A)} = 220 \Rightarrow I_a^{(A)} = 1.600 \text{ A.}$$

Αν I_A το ρεύμα φορτίου της Α γεννήτριας τότε:

$$I_a^{(A)} = I_A + V_t / R_f^{(A)}.$$

Όταν $V_t = 220 \text{ V}$ τότε:

$$I_A = I_a^{(A)} - V_t / R_f^{(A)} = 1.600 - 220 / 55 = 1.596 \text{ A.}$$

Αντίστοιχα για την γεννήτρια Β έχουμε:

$$205 - 0,03 \cdot I_a^{(B)} = 200$$

και $I_a^{(B)} = 1.000 \text{ A.}$

Αν I_B το ρεύμα φορτίου της Β γεννήτριας τότε:

$$I_B = 1.000 - 220/60 = 996,34 \text{ A.}$$

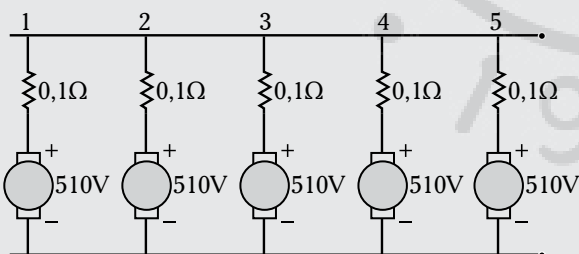
Το συνολικό ρεύμα φορτίου των γεννητριών είναι: $I = I_A + I_B = 1.596 + 996,34 = 2.592,34 \text{ A.}$

Άσκηση 11.

Πέντε γεννήτριες με παράλληλη διέγερση λειτουργούν παράλληλα, περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα περιστροφής, έχουν αντίσταση τυμπάνου $0,1 \Omega$ και αναπτύσσουν την ίδια εσωτερική τάση. Κάθε γεννήτρια παρέχει ίδια kW σ' ένα φορτίο 250 kW σταθερής ωμικής αντιστάσεως με τερματική τάση 500 V . Αν το ρεύμα διεγέρσεως μιας γεννήτριας αυξηθεί κατά 4% ως προς το αντίστοιχο ρεύμα διεγέρσεως των υπολοίπων γεννητριών, το οποίο παραμένει αμετάβλητο, να υπολογίσετε την ισχύ, την οποία παρέχει κάθε γεννήτρια και την κοινή τερματική τους τάση (V). Θεωρήστε την ταχύτητα περιστροφής σταθερή και τη μαγνητική ροή ανάλογη του ρεύματος διεγέρσεως.

Λύση.

Ισχύει το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της παράλληλης συνδεσμολογίας των γεννητριών (σχ. 5.5λα), σύμφωνα με τα δεδομένα της ασκήσεως:



Σχ. 5.5λα

Η ισχύς κάθε γεννήτριας είναι $250/5 = 50 \text{ kW}$.

Το ρεύμα φορτίου κάθε γεννήτριας είναι $50.000/500 = 100 \text{ A}$.

Η πώση τάσεως στο επαγωγικό τύμπανο για κάθε γεννήτρια είναι $0,1 \cdot 100 = 10 \text{ V}$.

Η τερματική τάση κάθε γεννήτριας είναι 500 V .

Η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ κάθε γεννήτριας είναι 510 V .

Όταν το ρεύμα διεγέρσεως της πρώτης γεννή-

τριας αυξάνεται κατά 4% , τότε αυξάνεται η μαγνητική ροή, οπότε αυξάνεται και η εσωτερική τάση της 1^{ης} γεννήτριας.

Είναι: $510 \text{ V} + 20,4 \text{ V} = 530,4 \text{ V}$.

Έστω ότι I_1 είναι το ρεύμα το οποίο παρέχει η πρώτη γεννήτρια μετά την αύξηση του ρεύματος διεγέρσεως και I_2 το ρεύμα, το οποίο παρέχει κάθε γεννήτρια από τις υπόλοιπες 4.

Έστω V η νέα τερματική τάση των γεννητριών.

Είναι: $530 - 0,1 \cdot I_1 = V$ (1)

$510 - 0,1 \cdot I_2 = V$. (2)

Η αντίσταση του φορτίου είναι:

$500/500 = 1 \Omega$. (3)

Το συνολικό ρεύμα είναι $I_1 + 4 I_2$, οπότε έχουμε:

$1 (I_1 + 4 I_2) = V$ ή $I_1 + 4 I_2 = V$. (4)

Αφαιρώντας την εξίσωση 2 από την εξίσωση 1 προκύπτει:

$I_1 - I_2 = 200 \text{ A}$. (5)

Αφαιρώντας την εξίσωση 4 από την εξίσωση 2 προκύπτει:

$I_1 + 4 \cdot 1 \cdot I_2 = 510$. (6)

Από τις εξισώσεις 5 και 6 προκύπτει:

$I_2 = \frac{310}{5,1} \cong 61 \text{ A}$.

Από την εξίσωση 5 έχουμε:

$I_1 = 200 + 61 = 261 \text{ A}$.

Από την εξίσωση 4 προκύπτει η ζητούμενη κοινή τερματική τάση: $V = 261 + 244 = 505 \text{ V}$.

Η ισχύς της 1^{ης} γεννήτριας είναι:

$505 \times 261 \cong 132 \text{ kW}$.

Η ισχύς εξόδου κάθε γεννήτριας από τις υπόλοιπες είναι: $505 \times 61 \cong 31 \text{ kW}$.

Άσκηση 12.

Δύο γεννήτριες ΣΡ Α και Β, με παράλληλη διέγερση και μια πηγή ΣΡ λειτουργούν παράλληλα. Αν κάθε γεννήτρια παρέχει το ίδιο ρεύμα φορτίου, ενώ το σύστημα (γεννήτριες και πηγή ΣΡ) παρέ-

χει συνολικό ρεύμα φορτίου 40 A, να υπολογίσετε την ΗΕΔ της πηγής ΣΡ (E_b), αν η εσωτερική της αντίσταση είναι 0,172 Ω.

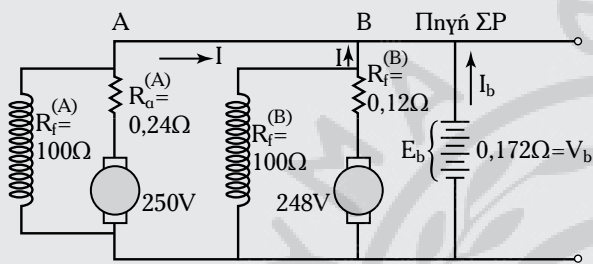
Δίδεται: $E_a^{(A)} = 250 \text{ V}$ και $E_a^{(B)} = 248 \text{ V}$.

$R_a^{(A)} = 0,24 \Omega$ και $R_f^{(A)} = 100 \Omega$.

$R_a^{(B)} = 0,12 \Omega$ και $R_f^{(B)} = 100 \Omega$.

Λύση.

Ισχύει το ακόλουθο ισοδύναμο κύκλωμα της συνδεσμολογίας (σχ. 5.5λβ):



Σχ. 5.5λβ

$$\text{Είναι: } 250 = V_t + (I + V_t/100) \cdot 0,24 \quad (1)$$

$$248 = V_t + (I + V_t/100) \cdot 0,12 \quad (2)$$

$$I + I + I_b = 40 \text{ A} \quad (3)$$

$$2I + I_b = 40 \text{ A}. \quad (4)$$

Αφαιρώντας την εξίσωση 2 απ' την 1 προκύπτει:

$$(I + V_t/100) \cdot 0,12 = 2. \quad (5)$$

Η εξίσωση 2 με βάση την εξίσωση 5 γίνεται:

$$V_t = 246 \text{ V}. \quad (6)$$

Η εξίσωση 5 με βάση την εξίσωση 6 γίνεται:

$$(I + 246/100) \cdot 0,12 = 2$$

$$\text{και } I = 50/3 - (2 \cdot 46) \Rightarrow I = 14,2 \text{ A}.$$

Από την εξίσωση (4) προκύπτει:

$$I_b = 40 - (2 \cdot 14,2) = 11,6 \text{ A}.$$

Η εσωτερική πώση τάσεως της πηγής ΣΡ είναι: $11,6 \cdot 0,172 \approx 2 \text{ V}$ και $E_b = 246 + 2 = 248 \text{ V}$.

5.6 Προτεινόμενες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Δίδεται πίνακας τιμών της συναρτήσεως $E_a = f(I_f)$ της χαρακτηριστικής χωρίς φορτίο μιας γεννήτριας με παράλληλη διέγερση για σταθερές στροφές:

E_a [V]	120	240	334	400	444	470
I_f [A]	0,5	1	1,5	2	2,5	3

Να υπολογίσετε την τάση χωρίς φορτίο, όταν η αντίσταση του κυκλώματος διεγέρσεως είναι 160 Ω και την κρίσιμη τιμή της αντιστάσεως του κυκλώματος διεγέρσεως.

Άσκηση 2.

Δίδεται πίνακας τιμών της συναρτήσεως $E_a = f(I_f)$ της χαρακτηριστικής χωρίς φορτίο μιας γεννήτριας ΣΡ στις 400 ΣΑΛ:

E_a [V]	110	155	186	212	230	246	260	271
I_f [A]	2	3	4	5	6	7	8	9

1) Να υπολογίσετε την τάση χωρίς φορτίο, όταν η μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια με παράλληλη διέγερση στις 400 ΣΑΛ και η αντίσταση του κυκλώματος διεγέρσεως είναι 34 Ω.

2) Να υπολογίσετε την αντίσταση του κυκλώματος διεγέρσεως, η οποία μειώνει την τάση χωρίς φορτίο στα 220 V.

3) Να υπολογίσετε την κρίσιμη τιμή της αντιστάσεως του κυκλώματος διεγέρσεως.

4) Να υπολογίσετε την κρίσιμη τιμή της ταχύτητας περιστροφής, όταν η αντίσταση του κυκλώματος διεγέρσεως είναι 34 Ω.

Άσκηση 3.

Γεννήτρια ΣΡ ξένης διεγέρσεως, 10 kW, 125 V, περιστρέφεται με 1.000 ΣΑΛ. Το ρεύμα διεγέρσεως είναι 2 A όταν η γεννήτρια παρέχει το ονομαστικό ρεύμα τυμπάνου. Να υπολογίσετε:

1) Την τάση τυμπάνου στο πλήρες φορτίο.

2) Το ρεύμα διεγέρσεως αν το ρεύμα τυμπάνου είναι 75% της ονομαστικής τιμής και η ταχύτητα περιστροφής αμετάβλητη.

Η αντίσταση τυμπάνου είναι 0,15 Ω.

Άσκηση 4.

Γεννήτρια ΣΡ με ξένη διέγερση, 30 kW, 250 V,

έχει αντίσταση τυμπάνου $0,125 \Omega$. Να υπολογίσετε το ρεύμα του τυμπάνου για την ονομαστική τερματική τάση και όταν η τάση τυμπάνου είναι 265 V .

Άσκηση 5.

Γεννήτρια ΣΡ διεγέρσεως σειράς έχει συνολική αντίσταση τυμπάνου και τυλίγματος σειράς $0,16 \Omega$. Τα ονομαστικά στοιχεία της γεννήτριας είναι 8 kW και 125 V (η τερματική τάση).

1) Να υπολογίσετε την τάση τυμπάνου αν το ρεύμα τυμπάνου είναι 40 A και η τερματική τάση διατηρείται στην ονομαστική της τιμή.

2) Η γεννήτρια παρέχει 6 kW όταν η τάση τυμπάνου είναι 132 V . Να υπολογίσετε την αντίστοιχη τερματική τάση.

3) Να υπολογίσετε την ισχύ φορτίου όταν η εσωτερική τάση είναι 127 V και η τερματική τάση $124,5 \text{ V}$.

Άσκηση 6.

Η ισχύς στην έξοδο μιας γεννήτριας ΣΡ διεγέρσεως σειράς είναι 27 kW , ενώ η ισχύς στην έξοδο είναι 25 kW όταν η τερματική τάση είναι 250 V . Να υπολογίσετε την τάση τυμπάνου και την απόδοση της γεννήτριας, όταν η μηχανή παρέχει την ονομαστική ισχύ.

Άσκηση 7.

Δίδεται γεννήτρια ΣΡ παράλληλης διεγέρσεως 30 kW , 250 V με αντίσταση τυμπάνου $0,124 \Omega$ και αντίσταση τυλίγματος διεγέρσεως 180Ω αντίστοιχα. Να υπολογίσετε την τάση τυμπάνου και την απόδοση της γεννήτριας όταν η μηχανή παρέχει την ονομαστική ισχύ.

Άσκηση 8.

Η γεννήτρια της ασκήσεως 7 λειτουργεί με απόδοση 92% με τερματική τάση 250 V . Να υπολογίσετε το ρεύμα τυμπάνου, την ισχύ στην είσοδο και στην έξοδο της μηχανής.

Άσκηση 9.

Γεννήτρια ΣΡ με παράλληλη διέγερση 50 kW , 250 V παρέχει το ονομαστικό φορτίο υπό ονομαστική τάση, όταν η τάση επαγωγικού τυμπάνου είναι $255,1 \text{ V}$. Θεωρήστε ότι η αντίσταση τυμπάνου είναι $0,025 \Omega$. Να υπολογίσετε:

- 1) Την αντίσταση του τυλίγματος διεγέρσεως.
- 2) Την τάση του επαγωγικού τυμπάνου όταν η γεννήτρια λειτουργεί στο μισό του ονομαστικού φορτίου υπό ονομαστική τάση.

5.7 Κινητήρες ΣΡ – Εισαγωγή.

Ένας κινητήρας ΣΡ συμπεριφέρεται σαν μετατροπέας τάσεως-ροπής. Μετατρέπει ένα ηλεκτρικό μέγεθος σε ένα αντίστοιχο μηχανικό, δημιουργώντας κίνηση. Ο κινητήρας ΣΡ αποτελείται από ένα σταθερό μέρος (στάτης), στο οποίο τοποθετούνται οι μαγνητικοί πόλοι και από ένα περιστρεφόμενο μέρος (δρομέας), στο οποίο τοποθετούνται τα τυλίγματα (κυκλώματα) του επαγωγικού τυμπάνου. Στο περιστρεφόμενο μέρος του κινητήρα τοποθετείται ο συλλέκτης.

5.7.1 Αρχή λειτουργίας ενός στοιχειώδους κινητήρα ΣΡ.

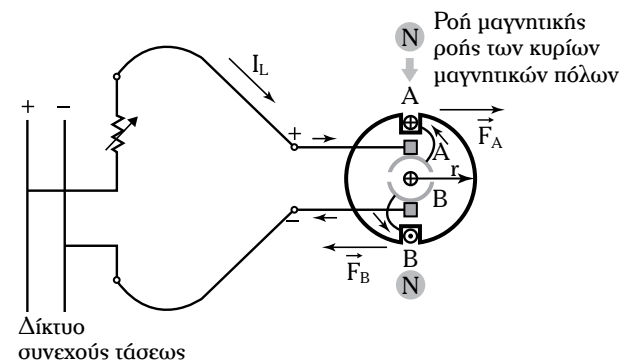
Στο σχήμα 5.7α, παρουσιάζεται ένας στοιχειώδης διπολικός κινητήρας ΣΡ.

Το επαγωγικό τύμπανο αποτελείται από μια σπείρα με βήμα όσο και το πολικό βήμα του κινητήρα. Ο αγωγός Α διαρρέεται από ρεύμα με φορά από τον αναγνώστη προς τη σελίδα, ενώ ο αγωγός Β διαρρέεται από ρεύμα με φορά από τη σελίδα προς τον αναγνώστη. Όταν ο αγωγός Α βρίσκεται στον βόρειο πόλο (N) τότε δέχεται δύναμη Laplace, το μέτρο της οποίας είναι:

$$F_A = BI'_A \ell_A \quad (5.60)$$

όπου: B η μαγνητική επαγωγή του μαγνητικού πεδίου, I'_A η ένταση του ρεύματος του αγωγού Α και ℓ_A το ενεργό μήκος του αγωγού Α.

Η δύναμη \vec{F}_A τείνει να περιστρέψει τον αγωγό στη φορά των δεικτών του ρολογιού. Αντίστοιχα, η δύναμη Laplace \vec{F}_B η οποία ασκείται στον αγωγό Β όταν αυτός βρεθεί στον νότιο πόλο (S) τείνει να περιστρέψει τον αγωγό στη φορά των δεικτών του ρολογιού. Το ζευγάρι των δυνάμεων (\vec{F}_A , \vec{F}_B) ασκεί



Σχ. 5.7α

Στοιχειώδης διπολικός κινητήρας ΣΡ.

ροπή στην σπείρα, την οποία περιστρέφει στην φορά των δεικτών του ρολογιού.

Όταν οι αγωγοί Α και Β βρεθούν στον ουδέτερο άξονα της μηχανής δεν δέχονται καμία δύναμη. Όταν περιστραφούν κατά 180° οι αγωγοί θα αλλάξουν θέση: ο αγωγός Α βρίσκεται στον νότιο πόλο, ενώ ο αγωγός Β στον βόρειο πόλο. Η φορά της ροπής στη σπείρα θα είναι εκείνη των δεικτών του ρολογιού, γιατί η παρουσία του συλλέκτη αλλάζει τόσο την φορά του μαγνητικού πεδίου όσο και την φορά του ρεύματος.

Ο συλλέκτης στους κινητήρες ΣΡ εξασφαλίζει μια ροπή στρέψεως σταθερής φοράς. Προκειμένου να αλλάξει η φορά περιστροφής των κινητήρων ΣΡ αρκεί να αλλάξει η φορά του ρεύματος στους αγωγούς του επαγωγικού τυμπάνου ή στο ρεύμα διεγέρσεως της μηχανής.

5.7.2 Ροπή στρέψεως των κινητήρων ΣΡ.

Ροπή στρέψεως ονομάζεται η ροπή, η οποία εξασφαλίζει την περιστροφική κίνηση του κινητήρα και δημιουργεί μηχανικό έργο.

Στον αγωγό Α (σχ. 5.7α), ασκείται δύναμη $F_L = B_\mu I'_A \ell_A$, ενώ η ροπή αυτής της δυνάμεως είναι:

$$T_A = F_A r \quad (5.61)$$

όπου: B_μ η μέση τιμή της μαγνητικής επαγωγής του μαγνητικού πεδίου, I'_A η ένταση του ρεύματος του αγωγού Α, ℓ_A το ενεργό μήκος του αγωγού Α και r η ακτίνα της περιφέρειας του δρομέα.

Αν $B_\mu = \frac{\Phi}{\tau_p \cdot A}$, όπου $\tau_p = \frac{2\pi r}{P}$ το πολικό βήμα της μηχανής, τότε η ροπή στον αγωγό Α είναι:

$$T_A = \frac{P}{2\pi} \Phi I'_A \quad (5.62)$$

όπου P ο αριθμός των μαγνητικών πόλων.

Αν $2a$ είναι ο αριθμός των παραλλήλων κλάδων της μηχανής, I_a το ρεύμα του επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα είναι: $I_a = \frac{I'_A}{2a}$

$$\text{και} \quad T_A = \frac{P}{2a\pi} \Phi I_a \quad (5.63)$$

είναι η ροπή στρέψεως στον αγωγό Α.

Αν Z είναι ο συνολικός αριθμός των αγωγών του επαγωγικού τυμπάνου, η ροπή στρέψεως όλων των αγωγών καθορίζει τη συνολική ροπή στρέψεως, η οποία ονομάζεται ροπή στρέψεως του κινητήρα (T).

Είναι: $T = Z I_a$ και τελικά:

$$T = K \Phi I_a \quad (5.64)$$

$$\text{με } K = \frac{P Z}{2a 2\pi}$$

μια σταθερή ροπή, η οποία είναι χαρακτηριστική για κάθε κινητήρα. Η ωφέλιμη (κύρια) μαγνητική ροή ανά πόλο είναι συνάρτηση του ρεύματος διεγέρσεως και του ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα. Οπότε, η ροπή στρέψεως του κινητήρα ΣΡ είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της μαγνητικής ροής Φ και του ρεύματος τυμπάνου.

5.7.3 Μηχανική ισχύς κινητήρα ΣΡ.

Η μηχανική ισχύς του κινητήρα ΣΡ δίδεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_{\text{out}} = T_{\alpha\epsilon} \omega \quad (5.65)$$

όπου: P_{out} η ισχύς εξόδου του κινητήρα, $T_{\alpha\epsilon}$ η ροπή στον άξονα του κινητήρα και ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.

Απόδειξη: Από το σχήμα 5.7α, προκύπτει ότι η στοιχειώδης ενέργεια dw , κατά την στοιχειώδη μετακίνηση dx , του αγωγού Α στην κατεύθυνση της δυνάμεως F_A είναι $dw = F_A dx$.

Σε αυτήν τη στοιχειώδη ενέργεια αντιστοιχεί η στοιχειώδης ισχύς:

$$P^* = F_A \frac{dx}{dt} = F_A v$$

όπου v η γραμμική ταχύτητα του αγωγού Α.

Στην περίπτωση της περιστροφικής κινήσεως ισχύει $v = \omega r$, οπότε $P^* = P_{\text{out}} = F_A \omega r$:

$$\text{όπου:} \quad P^* = T_{\alpha\epsilon} \omega \quad (5.66)$$

$$\text{και:} \quad \omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ rad/s.}$$

Η μηχανική ισχύς στην έξοδο του κινητήρα είναι:

$$P_{\text{out}} = T_{\alpha\epsilon} \frac{2\pi n}{60} \text{ σε HP.} \quad (5.67)$$

5.7.4 Αντιληκτρογενετική δύναμη κινητήρα ΣΡ (αντι-ΗΕΔ, E_a).

Οι αγωγοί Α και Β, που παρουσιάζονται στο σχήμα 5.7α μετακινούνται στη φορά των δεικτών του ρολογιού. Σε αυτούς τους αγωγούς αναπτύσσονται

τάσεις από επαγωγή, οι οποίες αντιτίθενται στις αιτίες που τις προκαλούν. Οι τάσεις αυτές είναι οι αντι-ΗΕΔ δυνάμεις, που αντιτίθενται στην κίνηση των αγωγών και έχουν ως προορισμό την ελάττωση του ρεύματος που δημιουργεί την κίνηση της μηχανής.

$$\text{Ισχύει: } E_a = K\Phi n \quad (5.68)$$

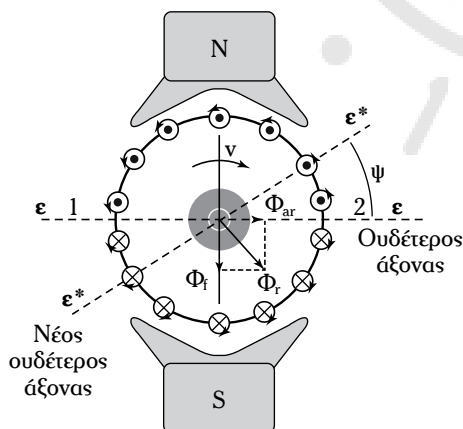
όπου K η σταθερά του κινητήρα, n οι στροφές ανά λεπτό (RPM ή ΣΑΛ) του κινητήρα και Φ η κύρια μαγνητική ροή ανά πόλο.

Η αντι-ΗΕΔ, δημιουργεί μια ροπή αντιστάσεως ή πεδήσεως. Η ροπή αυτή εξουδετερώνεται από τον κινητήρα, ο οποίος αναπτύσσει μια ίση και αντίθετη ροπή στρέψεως. Η αντι-ΗΕΔ ενός κινητήρα αποτελεί 85–95% της τάσεως τροφοδοσίας του κινητήρα.

5.7.5 Αντίδραση τυμπάνου των κινητήρων ΣΡ.

Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου του επαγωγικού τυμπάνου στο μαγνητικό πεδίο του στάτη δημιουργεί το φαινόμενο αντιδράσεως τυμπάνου (σχ. 5.7β).

Στους κινητήρες ΣΡ ενισχύονται μαγνητικά τα άκρα εισόδου των πεδίων των μαγνητικών πόλων και απομαγνητίζονται τα αντίστοιχα άκρα εξόδου. Ο ουδέτερος άξονας, $\epsilon-\epsilon$, μετατοπίζεται αντίθετα, $\epsilon^*-\epsilon^*$, προς τη φορά περιστροφής του κινητήρα. Οι κύριες επιπτώσεις του φαινομένου αντιδράσεως τυμπάνου είναι ο κορεσμός των μαγνητικών πόλων, οι απώλειες ισχύος, οι σπινθηρισμοί και η φθορά του συλλέκτη.



V : Περιφερειακή ταχύτητα
 Φ_{ar} : Μαγνητική ροή αντιδράσεως τυμπάνου
 Φ_r : Συνολική μαγνητική ροή
 Φ_r : Μαγνητική ροή διεγέρσεως

Σχ. 5.7β

Σχηματική παράσταση του φαινομένου αντιδράσεως τυμπάνου σε στοιχειώδη κινητήρα ΣΡ.

Στη λειτουργία χωρίς φορτίο η αντίδραση του επαγωγικού τυμπάνου είναι ελάχιστη. Στη λειτουργία με φορτίο, όταν το ρεύμα τυμπάνου αυξάνεται, τότε αυξάνεται και η γωνία μετατοπίσεως, ψ , του ουδέτερου άξονα, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται οι προαναφερόμενες δυσμενείς επιπτώσεις στον κινητήρα.

Η αντιμετώπιση του φαινομένου αντιδράσεως τυμπάνου πραγματοποιείται με την τοποθέτηση βοηθητικών πόλων. Προορισμός των βοηθητικών μαγνητικών πόλων είναι να εξουδετερωθεί η μαγνητική ροή Φ_{ar} του επαγωγικού τυμπάνου (σχ. 5.7β). Στη θέση 2 του ουδέτερου άξονα $\epsilon-\epsilon$, τοποθετείται ένας βόρειος βοηθητικός πόλος, ενώ στη θέση 1 του ουδέτερου άξονα, $\epsilon-\epsilon$, τοποθετείται ένας νότιος βοηθητικός πόλος.

Κατά την περιστροφή του κινητήρα, μετά από έναν βόρειο κύριο μαγνητικό πόλο ακολουθεί ένας βόρειος βοηθητικός και μετά από έναν νότιο κύριο μαγνητικό πόλο ακολουθεί ένας νότιος βοηθητικός. Τα πηνία των βοηθητικών πόλων συνδέονται σε σειρά με το τυλίγμα τυμπάνου του κινητήρα και διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα. Για κινητήρες μεγάλης ισχύος τα αποτελέσματα της αντιδράσεως τυμπάνου εξουδετερώνονται τοποθετώντας τυλίγματα αντισταθμίσεως στα πλέγματα των κυρίων μαγνητικών πόλων.

5.8 Είδη κινητήρων ΣΡ – Εισαγωγή.

Τα κυκλωματικά στοιχεία ενός κινητήρα ΣΡ δεν διαφέρουν απ' τα αντίστοιχα των γεννητριών ΣΡ, γιατί πρόκειται για την ίδια περιστροφική μηχανή ΣΡ.

Ανάλογα με τον τρόπο συνδέσεως των τυλιγμάτων διεγέρσεως του κινητήρα με το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού του τυμπάνου διακρίνονται τα ακόλουθα είδη των κινητήρων ΣΡ.

1) Κινητήρες ΣΡ με **ανεξάρτητη διεγερση**, όταν το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα διεγέρσεως δεν συνδέεται με το αντίστοιχο του επαγωγικού τυμπάνου.

2) Κινητήρες ΣΡ με **παράλληλη διεγερση**, όταν το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα διεγέρσεως συνδέεται παράλληλα με το αντίστοιχο του επαγωγικού τυμπάνου.

3) Κινητήρες ΣΡ με **διεγερση σειράς**, όταν το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα διεγέρσεως συνδέεται σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο.

4) Κινητήρες ΣΡ με **σύνθετη διεγερση**, όταν ένα μέρος του τυλίγματος διεγέρσεως συνδέεται σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο και το υπόλοιπο παράλληλα.

Στη μελέτη των κινητήρων ΣΡ παρουσιάζουν ενδιαφέρον οι χαρακτηριστικές καμπύλες οι οποίες

εκφράζουν την σχέση της ροπής στον άξονα του κινητήρα και της ταχύτητας περιστροφής του σε συνάρτηση με τα ηλεκτρικά μεγέθη τα οποία υπάρχουν στο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα ΣΡ.

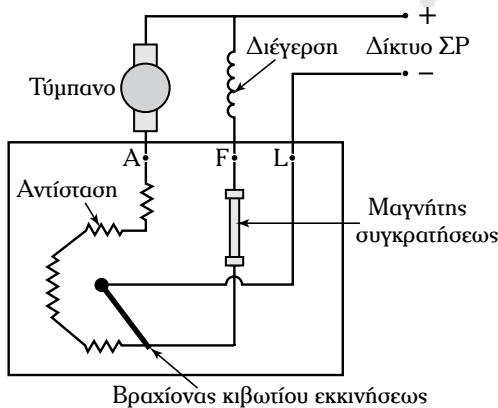
Δύο σημαντικά μεγέθη χαρακτηρίζουν τη λειτουργία των κινητήρων ΣΡ, η ταχύτητα, και η ροπή στον άξονά του $T_{αξ}$.

Η εφαρμογές στην βιομηχανία απαιτούν σταθερή ροπή για διάφορες τιμές της ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων ΣΡ. Υπάρχουν, όμως, εφαρμογές στις οποίες απαιτείται σταθερή μηχανική ισχύς όταν μεταβάλλεται η ταχύτητα περιστροφής.

Ακολουθεί η ανάλυση λειτουργίας των κινητήρων ΣΡ οι οποίοι χρησιμοποιούνται, συνήθως, σε βιομηχανικές εφαρμογές.

5.8.1 Εκκίνηση των κινητήρων ΣΡ.

Την χρονική στιγμή της εκκινήσεως ο κινητήρας ΣΡ απορροφά ρεύμα, η τιμή του οποίου είναι 30 φορές μεγαλύτερη του ονομαστικού ρεύματος λειτουργίας του κινητήρα. Η αναπτυσσόμενη ροπή του κινητήρα λαμβάνει μεγάλες τιμές, με αποτέλεσμα να επιταχύνεται επικίνδυνα. Στον άξονά του δημιουργούνται ισχυρές φυγοκεντρικές δυνάμεις με καταστροφικές συνέπειες για τον κινητήρα. Η τιμή του ρεύματος εκκινήσεως μειώνεται συνδέοντας σε σειρά έναν εκκινητή με το επαγωγικό τύμπανο (σύστημα αντιστάσεων χειροκίνητης εκκινήσεως) (σχ. 5.8α). Η αντίσταση εκκινήσεως μειώνεται βαθμιαία, καθώς ο βραχίονας του κιβωτίου στρέφεται προς τα δεξιά. Τέλος, κρατείται στη θέση λειτουργίας από τον μαγνήτη συγκρατήσεως. Ο μαγνήτης συγκρατήσεως τροφοδοτείται από το ρεύμα του κυκλώματος διεγέρσεως και ενεργεί σαν διακόπτης στην περίπτωση



Σχ. 5.8α

Σύστημα αντιστάσεως χειροκίνητης εκκινήσεως (εκκινητής).

κατά την οποία μηδενίζεται το ρεύμα διεγέρσεως.

Αν το κύκλωμα διεγέρσεως διακοπεί, ο μαγνήτης συγκρατήσεως απελευθερώνει τον βραχίονα, ο οποίος επιστρέφει στη θέση εκκινήσεως. Με αυτόν τον τρόπο προστατεύεται ο κινητήρας γιατί όταν διακοπεί το κύκλωμα διεγέρσεως αναπτύσσεται υπερβολικός αριθμός στροφών με καταστρεπτικά αποτελέσματα για τον κινητήρα.

5.8.2 Κινητήρες ΣΡ με παράλληλη διεγερση.

Στο σχήμα 5.8β παρουσιάζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διεγερση.

Σε αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα αντιστοιχούν οι ακόλουθες εξισώσεις λειτουργίας του κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διεγερση:

$$E_a = K\Phi n \tag{5.69}$$

$$V_t = E_a + I_a R_a \tag{5.70}$$

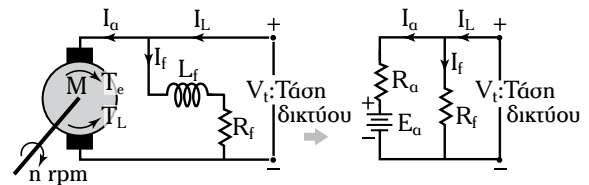
$$I_L = I_a + I_f \tag{5.71}$$

$$T \equiv T_e = K_1 (\equiv K) \Phi I_a \tag{5.72}$$

$$\Phi = \lambda I_f \tag{5.73}$$

όπου: E_a η αντι-ΗΕΔ του κινητήρα, K η κατασκευαστική σταθερή του κινητήρα, Φ η ωφέλιμη ροή ανά πόλο, n η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, V_t η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, I_a το ρεύμα τυμπάνου του κινητήρα, R_a η ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων, I_L το ρεύμα γραμμής, I_f το ρεύμα διεγέρσεως, T η αναπτυσσόμενη ροπή του κινητήρα, $K_1 \equiv K$ σταθερή και T_e , η ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα.

Ισχύει $\Phi = \lambda I_f$ όταν ο κινητήρας λειτουργεί στο γραμμικό τμήμα της μαγνητικής χαρακτηριστικής του, εκεί όπου η μαγνητική ροή είναι ευθέως ανάλογη του ρεύματος διεγέρσεως. Το λ είναι ένας συντελεστής αναλογίας.



Σχ. 5.8β

Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα με παράλληλη διεγερση.

Η συμπεριφορά του κινητήρα σε παράλληλη διέγερση αναλύεται μελετώντας τις ακόλουθες χαρακτηριστικές καμπύλες.

1) Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ρεύματος τυμπάνου:

$$T = f(I_a) \quad (5.74)$$

όπου: $V_t = \text{σταθ.}$ και $I_f = \text{σταθ.}$

Από τις εξισώσεις 5.72 και 5.73 προκύπτει:

$$T = K (\equiv K_1) \Phi I_a \quad (5.75)$$

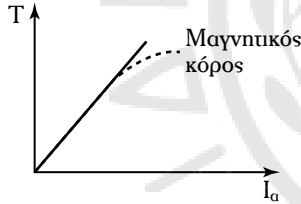
Αν ληφθούν υπόψη οι περιοριστικές συνθήκες $V_t = \text{σταθ.}$ και $I_f = \text{σταθ.}$ η εξίσωση 5.75, γράφεται ως εξής:

$$T = \mu I_a \quad (5.76)$$

όταν $\mu = K \lambda I_f = \text{σταθ.}$

Η γραφική παράσταση της εξισώσεως 5.76 είναι μια ευθεία γραμμή, η οποία διέρχεται από την αρχή των αξόνων (σχ. 5.8γ).

Για μεγάλες τιμές του I_a η ευθεία εκφυλίζεται σε καμπύλη (διακεκομμένες γραμμές) γιατί ενεργοποιείται ο κορεσμός του σιδηρομαγνητικού υλικού του δρομεία.



Σχ. 5.8γ

Γραφική παράσταση της συναρτήσεως $T = f(I_a)$,
όπου: $V_t = \text{σταθ.}$ και $I_f = \text{σταθ.}$

2) Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας περιστροφής:

$$T = f(n)$$

όπου: $V_t = \text{σταθ.}$ και $I_f = \text{σταθ.}$

Από τις εξισώσεις 5.69, 5.70 και την 5.73 προκύπτει:

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a} = \frac{V_t - K\Phi n}{R_a} = \frac{V_t - K\lambda I_f n}{R_a} \quad (5.77)$$

Η εξίσωση 5.72 με βάση τις εξισώσεις 5.73 και 5.77 με $K = K_1$ γίνεται:

$$T = K\lambda I_f \left(\frac{V_t - K\lambda I_f n}{R_a} \right)$$

$$\text{ή} \quad T = \frac{K\lambda I_f V_t}{R_a} - \frac{K^2 \lambda^2 I_f^2}{R_a} n \quad (5.78)$$

Η εξίσωση 5.78 είναι μία ευθεία γραμμή:

$$T = \beta - \alpha n \quad \text{με} \quad \beta \equiv T_0 = \frac{K\lambda I_f V_t}{R_a}$$

$$\alpha = \frac{K^2 \lambda^2 I_f^2}{R_a} \quad (5.79)$$

Στο σχήμα 5.8δ, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της συναρτήσεως

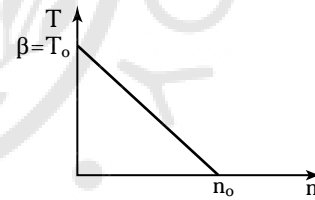
$$T = f(n)$$

όπου: $V_t = \text{σταθ.}$ και $I_f = \text{σταθ.}$

Στην περίπτωση κατά την οποία η ροπή $T = 0$ (λειτουργία χωρίς φορτίο) από την εξίσωση 5.78 προκύπτει η ταχύτητα περιστροφής κατά τη λειτουργία του κινητήρα χωρίς φορτίο:

$$n_0 = \frac{V_t}{K\lambda I_f} \quad (5.80)$$

Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα όταν λειτουργεί χωρίς φορτίο είναι ευθέως ανάλογη της τάσεως τροφοδοσίας του και αντιστρόφως ανάλογη του ρεύματος διεγέρσεως (μαγνητική ροή).



Σχ. 5.8δ

Γραφική παράσταση της $T = f(n)$
με $V_t = \text{σταθ.}$ και $I_f = \text{σταθ.}$

3) Χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας περιστροφής ρεύματος τυμπάνου:

$$n = f(I_a)$$

όπου: $V_t = \text{σταθ.}$ και $I_f = \text{σταθ.}$

Από τις εξισώσεις 5.69, 5.70 και 5.73 προκύπτει:

$$n = \frac{E_a}{K\Phi} = \frac{E_a}{K\lambda I_f} = \frac{V_t - I_a R_a}{K\lambda I_f} \quad (5.81)$$

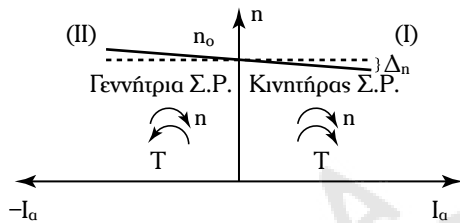
$$\text{ή} \quad n = \frac{V_t}{K\lambda I_f} - \frac{R_a}{K\lambda I_f} I_a \quad (5.82)$$

Η γραφική παράσταση της εξίσωσης 5.82, είναι μια ευθεία γραμμή με αρνητική κλίση (σχ. 5.8ε).

Επειδή ο παράγοντας $\frac{R_a}{K\lambda I_f}$ είναι πολύ μικρός,

ο κινητήρας ΣΡ με παράλληλη διέγερση θεωρείται στην πράξη κινητήρας σταθερών στροφών.

Η χαρακτηριστική καμπύλη της εξίσωσης 5.82, συνεχίζεται στο II τεταρτημόριο και εκφράζει την σχέση της ταχύτητας περιστροφής και ρεύματος τυμπάνου στην περίπτωση της γεννήτριας ΣΡ.



Σχ. 5.8ε

Γραφική παράσταση (πρώτο τεταρτημόριο) της συνάρτησης $n = f(I_a)$ όπου: $V_t = \text{σταθ.}$ και $I_f = \text{σταθ.}$

- Ενστάθεια λειτουργίας του κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διέγερση.

Έστω ότι ο κινητήρας λειτουργεί σε κάποιο φορτίο, στην κανονική ταχύτητα περιστροφής του. Σε κάποια χρονική στιγμή το φορτίο στον άξονα της μηχανής αυξάνεται (αυξάνεται η $T_{αξ}$).

Ο κινητήρας παρουσιάζει ένα έλλειμμα ροπής στρέψεως T_e , σε σχέση με την **ανθιστάμενη ροπή**⁹ T_r , του φορτίου: $T_e < T_r$ και $T_e - T_r < 0$. Οπότε, η ταχύτητα περιστροφής γίνεται μικρότερη της ονομαστικής του τιμής. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μείωση της αντι-ΗΕΔ, η οποία εξαρτάται από τον αριθμό στροφών της μηχανής. Στη συνέχεια αυξάνεται το ρεύμα τυμπάνου και αυξάνεται η ροπή στρέψεως T_e . Η ισορροπία αποκαθίσταται όταν $T_e = T_r$, ενώ αυξάνονται λίγο οι στροφές του κινητήρα. Αντίστροφη αντίδραση παρουσιάζει ο κινητήρας όταν μειωθεί το φορτίο στον άξονά του.

Ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο μικρότερη ισχύ έτσι, ώστε να πραγματοποιηθεί, πάλι, η ισορροπία ροπών. Όταν στον άξονα του κινητήρα δεν συνδέεται φορτίο (λειτουργία χωρίς φορτίο) ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο μια ισχύ για να εξισορροπήσει τις απώλειες πυρήνα και τις απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού, ενώ η ταχύτητα περιστροφής του είναι μεγαλύτερη απ' την ονομαστική της τιμή.

5.8.3 Κινητήρας ΣΡ με διέγερση σειράς.

Στο σχήμα 5.8στ, παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα ΣΡ με διέγερση σειράς.

Οι εξισώσεις λειτουργίας του κινητήρα είναι:

$$E_a = K\Phi n \quad (5.83)$$

$$V_t = E_a + I_a (R_a + R_s) \quad (5.84)$$

$$I_L = I_a = I_s \quad (5.85)$$

$$T = K (\equiv K_t) \Phi I_a \quad (5.86)$$

$$\Phi = \lambda I_a (\equiv I_s \equiv I_L). \quad (5.87)$$

Ο κινητήρας λειτουργεί στο γραμμικό τμήμα της μαγνητικής χαρακτηριστικής του.

Η συμπεριφορά του κινητήρα ΣΡ με διέγερση σειράς αναλύεται μελετώντας τις ακόλουθες χαρακτηριστικές καμπύλες.

1) Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος τυμπάνου-στροφών:

$$I_a = f(n)$$

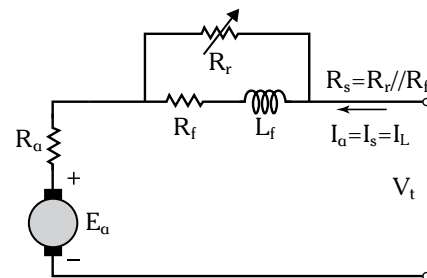
όπου: $V_t = \text{σταθ.}$ και $I_f = \text{σταθ.}$

Η εξίσωση 5.84 με βάση τις εξισώσεις 5.83 και 5.87 γίνεται:

$$V_t = K\Phi n + I_a (R_a + R_s) = K\lambda I_a + I_a (R_a + R_s) \quad (5.88)$$

Από την εξίσωση 5.88, προκύπτει:

$$I_a = \frac{V_t}{K\lambda n + (R_a + R_s)}. \quad (5.89)$$



Σχ. 5.8στ

Κινητήρας ΣΡ με διέγερση σειράς.

⁹ T_r είναι η ανθιστάμενη ροπή, η οποία αναπτύσσεται από το φορτίο στον άξονα του κινητήρα.

- Διερεύνηση της εξίσωσης 5.89.

Τη στιγμή της εκκίνησης του κινητήρα με $V_t = \text{σταθ.}$, $R_r = \text{σταθ.}$ και αμελητέα πώση τάσεως από το φαινόμενο της αντιδράσεως τυμπάνου, η ταχύτητα περιστροφής του n , και η αντι-ΗΕΔ E_a , είναι μηδενικά αντίστοιχα.

Σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας (λειτουργία χωρίς φορτίο), από την εξίσωση 5.89 για $n=0$, ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο μεγάλο ρεύμα (ρεύμα εκκίνησης $I_{\alpha\epsilon\kappa\kappa}$) το οποίο είναι:

$$I_a = \frac{V_t}{(R_a + R_s)}. \quad (5.90)$$

Από τις εξισώσεις 5.90 και 5.86, όταν το ρεύμα εκκίνησης $I_{\alpha\epsilon\kappa\kappa}$, είναι μεγάλο, είναι μεγάλη και η ροπή T .

Όταν, όμως, ολοκληρωθεί η διαδικασία εκκίνησης του κινητήρα, η ταχύτητα αυξάνεται, η αντι-ΗΕΔ αυξάνεται και το ρεύμα το οποίο απορροφά από το δίκτυο μειώνεται. Η μείωση του ρεύματος προκαλεί μείωση της μαγνητικής ροής Φ , οπότε μειώνεται και η ροπή μέχρι να μηδενιστεί (λειτουργία χωρίς φορτίο). Τότε έχουμε:

$$\left. \begin{aligned} T &= K\Phi I_a \\ T &= K\Phi \left(\frac{V_t - K\Phi n}{R_a + R_s} \right) \\ T &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow n_{x,\phi} = \frac{V_t}{K\Phi}$$

και $E_a(n_{x,\phi}) = V_t$

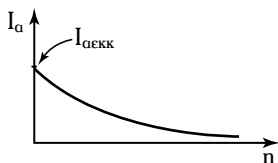
και $I_a = 0 \text{ A}, I_s = 0 \text{ A}, \Phi = 0 \text{ Wb}$

και $n_{x,\phi} = \infty. \quad (5.91)$

όπου $n_{x,\phi}$ η ταχύτητα περιστροφής χωρίς φορτίο.

Αυτός είναι ο λόγος, για τον οποίο ο κινητήρας με διέγερση σειράς πρέπει να εκκινείται, πάντοτε, με το φορτίο συνδεδεμένο στους ακροδέκτες του.

Στο σχήμα 5.8ζ, παρουσιάζεται η γραφική παρά-



Σχ. 5.8ζ

Γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής ρεύματος τυμπάνου-οροφών ενός κινητήρα ΣΡ με διέγερση σειράς.

σταση της συναρτήσεως: $I_a = f(n)$.

Στην κατάσταση χωρίς φορτίο και όταν $I_a = 0 \text{ A}$, στο εσωτερικό του κινητήρα, πρακτικά, υπάρχει η μαγνητική ροή, η οποία οφείλεται στην παραμένουσα μαγνήτιση.

2) Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας περιστροφής:

$$T = f(n)$$

όπου: $V_t = \text{σταθ.}$.

Η εξίσωση 5.86 με βάση την εξίσωση 5.87, γίνεται:

$$T = K\lambda I_a^2$$

και $I_a = \sqrt{\frac{T}{K\lambda}}. \quad (5.92)$

Η εξίσωση 5.84 με βάση τις εξισώσεις 5.83, 5.86, 5.87 και 5.92, γίνεται:

$$\begin{aligned} V_t &= E_a + I_a(R_a + R_s) = \\ &= K\Phi n + \sqrt{\frac{T}{K\lambda}}(R_a + R_s) \end{aligned}$$

η οποία με κατάλληλη μαθηματική επεξεργασία δίνει:

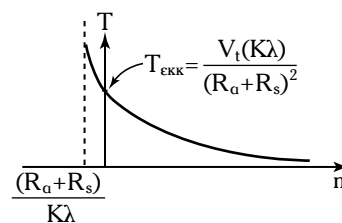
$$V_t = K\sqrt{\frac{\lambda}{K}}\sqrt{T} \cdot n + \sqrt{\frac{T}{K\lambda}} \cdot (R_a + R_s). \quad (5.93)$$

Λύνοντας την εξίσωση 5.93, ως προς n , έχουμε:

$$n = \frac{V_t}{\sqrt{K\lambda} \cdot \sqrt{T}} - \frac{1}{K\lambda} \cdot (R_a + R_s). \quad (5.94)$$

Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι αντίστροφως ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της ροπής. Στο σχήμα 5.8η, δίδεται η γραφική παράσταση της σχέσεως ροπής-ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.

Από την εξίσωση 5.94, όταν $T \rightarrow 0$ τότε $n \rightarrow \infty$.



Σχ. 5.8η

Γραφική παράσταση της σχέσεως ροπής-ταχύτητας ενός κινητήρα ΣΡ με διέγερση σειράς.

5.8.4 Κινητήρας ΣΡ με σύνθετη διέγερση.

Στο σχήμα 5.8θ, παρουσιάζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα κινητήρων ΣΡ με σύνθετη διέγερση μακρινής διακλαδώσεως και βραχείας διακλαδώσεως αντίστοιχα.

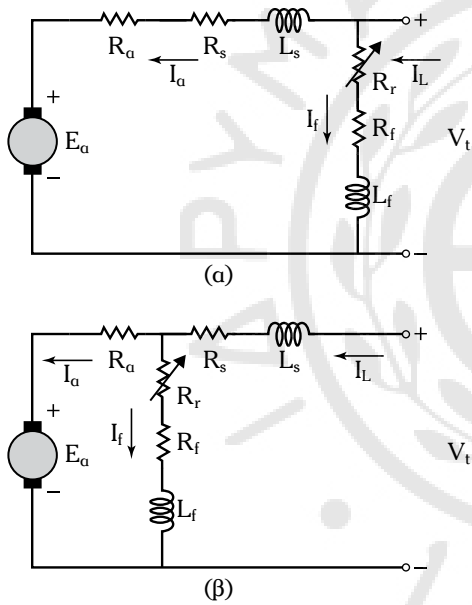
Εφαρμόζοντας τους Κανόνες του Kirchhoff για τον κινητήρα ΣΡ με σύνθετη διέγερση γενικά προκύπτει:

$$V_t = E_a + I_a (R_a + R_s). \quad (5.95)$$

και
$$I_a = I_L - I_f. \quad (5.96)$$

Για το κύκλωμα διεγέρσεως ισχύει ο Νόμος του Ohm.

$$I_f = \frac{V_t}{R_c + R_f}. \quad (5.97)$$



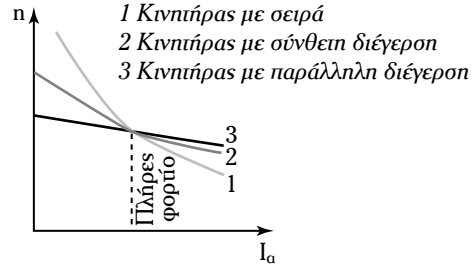
Σχ. 5.8θ

Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα με σύνθετη διέγερση (α) μακρινής και (β) βραχείας διακλαδώσεως.

Στο σχήμα 5.8ι δίδεται η χαρακτηριστική $n = f(I_a)$ του κινητήρα ΣΡ με σύνθετη διέγερση.

Η επιβαλλόμενη τάση V_t είναι σταθερή, όπως είναι σταθερό και το ρεύμα διεγέρσεως I_f . Το ρεύμα στο τύλιγμα σειράς αυξάνεται με το φορτίο, ώστε η ροή ανά πόλο αυξάνεται με το φορτίο, αλλά όχι τόσο γρήγορα όσο στον κινητήρα σειράς.

Στο σχήμα 5.8ι περιλαμβάνονται οι καμπύλες ενός κινητήρα σειράς κι ενός με παράλληλη διέγερση με την ίδια ροπή και στροφές ανά λεπτό στο πλήρες



Σχ. 5.8ι

Χαρακτηριστική $n = f(I_a)$ του κινητήρα με σύνθετη διέγερση.

φορτίο, οι οποίες συγκρίνονται με την αντίστοιχη χαρακτηριστική του κινητήρα με σύνθετη διέγερση.

Σε πολλές περιπτώσεις η μαγνητική ροή της παράλληλης διεγέρσεως είναι αρκετή για να εξασφαλίσει έναν ανεκτό αριθμό στροφών στη λειτουργία χωρίς φορτίο.

5.8.5 Κατανομή ισχύος στους κινητήρες ΣΡ.

Οι κινητήρες ΣΡ απορροφούν ηλεκτρική ισχύ P_{in} , από το δίκτυο:

$$P_{in} = V_t I_L [W] \quad (5.98)$$

όπου: V_t η τάση τροφοδοσίας σε [V] και I_L το ρεύμα γραμμής σε [A].

Η P_{in} κατανέμεται σε τρία μέρη:

- 1) Στις σταθερές απώλειες P_c , οι οποίες είναι οι απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού και οι απώλειες πυρήνα.
- 2) Στις μεταβλητές απώλειες, οι οποίες είναι οι απώλειες χαλκού P_{cu} .
- 3) Στην ωφέλιμη ισχύ n οποία είναι η ισχύς εξόδου P_{out} του κινητήρα.

Γενικά, η ηλεκτρική ισχύς την οποία απορροφά από το δίκτυο ένας κινητήρας ΣΡ με παράλληλη διέγερση είναι:

$$V_t I_L = V_t I_f + I_a^2 R_a + E_a I_a. \quad (5.99)$$

Η εξίσωση δίνει τη διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ισχύος σε μηχανική. Η ηλεκτρική ισχύς, την οποία απορροφά ο κινητήρας $V_t I_L$ κατανέμεται ως εξής:

- 1) Ένα μέρος της καλύπτει τις απώλειες στο τύλιγμα διεγέρσεως $P_{cu} = V_t I_f$ κι ένα μέρος τις απώλειες χαλκού του επαγωγικού τυμπάνου του δρομέα $P_{cua} = I_a^2 R_a$.
- 2) Το υπόλοιπο μέρος μεταφέρεται ηλεκτρομαγνητικά στο επαγωγικό τύμπανο:

$$P_e = E_a I_a \quad (5.100)$$

όπου: P_e η μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος σε μηχανική.

$$P_e = P_{\ell} + P_{out} \quad (5.101)$$

Η απόδοση του κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διέγερση είναι:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P + \sum P_{cu}} \quad (5.102)$$

όπου $\sum P_{cu}$ οι συνολικές ηλεκτρικές απώλειες.

5.9 Ρύθμιση ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων ΣΡ – Εισαγωγή.

Η συμπεριφορά των κινητήρων ΣΡ χαρακτηρίζεται από δύο θεμελιώδη χαρακτηριστικά μεγέθη, την ταχύτητα και την ροπή στρέψεως. Στις βιομηχανικές εφαρμογές απαιτείται σταθερή ροπή για διάφορες ταχύτητες περιστροφής όπως και σε άλλες εφαρμογές απαιτείται η ισχύς να διατηρείται σταθερή όταν μεταβάλλεται η ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων.

Στη συνέχεια, δίδονται οι βασικές μέθοδοι ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής, κυρίως των κινητήρων ΣΡ με παράλληλη διέγερση.

5.9.1 Τρόποι ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων ΣΡ.

Απ' τον συνδυασμό των εξισώσεων 5.69 και 5.70 προκύπτουν οι ακόλουθοι τέσσερις τρόποι ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων ΣΡ:

1) Ρύθμιση της τάσεως V_a στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου.

Σε αυτόν τον τρόπο ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα μεταβάλλεται η τάση V_a , ενώ οι τιμές της αντιστάσεως τυμπάνου και του ρεύματος διεγέρσεως διατηρούνται σταθερές. Το ρεύμα διεγέρσεως διατηρείται σταθερό στην ονομαστική του τιμή, ώστε να αναπτύσσεται η μεγαλύτερη τιμή της ροπής.

Στο σχήμα 5.9α, παρουσιάζεται η διαδικασία μεταβολής της τάσεως τυμπάνου μέσω ενός ηλεκτρικού μετατροπέα, ο οποίος μετασχηματίζει την ισχύ συνεχούς ρεύματος με σταθερή τάση σε ισχύ συνεχούς ρεύματος με μεταβαλλόμενη τάση.

Αυτή η μέθοδος μεταβολής της τάσεως τυμπάνου,

ισχύει για κινητήρες ΣΡ με ανεξάρτητη ή παράλληλη διέγερση.

Όταν η τάση V_a αυξάνεται, τότε αυξάνεται και το ρεύμα I_a του επαγωγικού τυμπάνου:

$$I_a \uparrow = \frac{V_a \uparrow - E_a}{R_a} \quad (5.103)$$

Στη συνέχεια αυξάνεται η ροπή T:

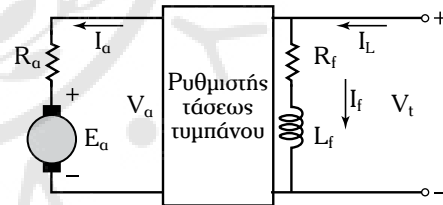
$$T \uparrow = K\Phi I_a \uparrow \quad (5.104)$$

Οπότε ισχύει $T > T_r$ (ανθιστάμενη ροπή του κινητήρα) και ο κινητήρας επιταχύνεται. Αντίστοιχα, προκαλείται αύξηση της αντι-ΗΕΔ, $E_a : E_a \uparrow = K\Phi n \uparrow$, η οποία προκαλεί μείωση του ρεύματος τυμπάνου με αποτέλεσμα να μειωθεί η ροπή T και να γίνει ίση με την ροπή T_r σε μια ταχύτητα περιστροφής, η, μεγαλύτερη από την αρχική (σχ. 5.9β).

Τα βήματα της διαδικασίας ρυθμίσεως στροφών ενός κινητήρα ΣΡ με παράλληλη (ή ανεξάρτητη) διέγερση, ρυθμίζοντας την τάση στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου, είναι τα ακόλουθα:

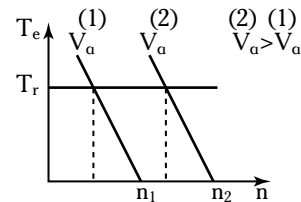
Βήμα 1°: Αυξάνεται η τάση V_a , οπότε προκαλείται αύξηση του ρεύματος I_a :

$$I_a \uparrow = \frac{V_a \uparrow - E_a}{R_a}$$



Σχ. 5.9α

Έλεγχος της τάσεως τυμπάνου για κινητήρα με ανεξάρτητη ή παράλληλη διέγερση.



Σχ. 5.9β

Έλεγχος στροφών κινητήρα ΣΡ με παράλληλη ανεξάρτητη διέγερση, μεταβάλλοντας την τάση στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου.

Βήμα 2°: Όταν το I_a αυξάνεται, τότε αυξάνεται η ροπή T : $T \uparrow = K\Phi I_a \uparrow$

Βήμα 3°: Ισχύει $T > T_r$, οπότε ο κινητήρας επιταχύνεται.

Βήμα 4°: Προκαλείται αύξηση των στροφών n και αύξηση της αντι-ΗΕΔ E_a : $E_a \uparrow = K\Phi n \uparrow$.

Βήμα 5°: Η αύξηση της E_a προκαλεί μείωση του I_a :

$$I_a \downarrow = \frac{V_a - E_a \uparrow}{R_a}$$

Βήμα 6°: Προκαλείται μείωση της ροπής T μέχρι να ισχύει $T = T_r$ σε ταχύτητα μεγαλύτερη της αρχικής.

2) Ρύθμιση της μαγνητικής ροής Φ .

Η ρύθμιση της μαγνητικής ροής Φ επιτυγχάνεται με ρύθμιση του ρεύματος διεγέρσεως, ειδικά στους κινητήρες ΣΡ με παράλληλη διέγερση.

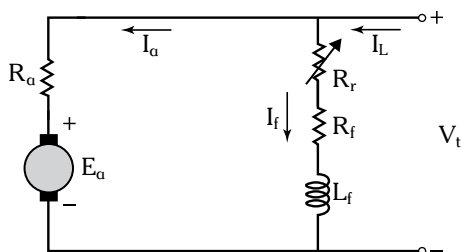
Η μέθοδος ρυθμίσεως της ταχύτητας του κινητήρα (ρυθμίζοντας τη μαγνητική ροή Φ) απαιτεί την σταθερότητα της τιμής της αντιστάσεως τυμπάνου R_a και της τάσεως τροφοδοσίας V_t . Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα μεταβάλλεται με κατάλληλη ρύθμιση του ρεύματος διεγέρσεως (σχ. 5.9γ).

Από τις εξισώσεις 5.69, 5.70 και 5.72 προκύπτει ότι η σχέση μεταξύ ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διέγερση και της ροπής T είναι:

$$n = \frac{V_t}{K\Phi} - \frac{R_a}{K^2\Phi^2} T. \quad (5.105)$$

Αυξάνοντας την τιμή της αντιστάσεως διεγέρσεως R_f , μειώνεται το ρεύμα διεγέρσεως I_f ($I_f \downarrow = \frac{V_t}{R_f \uparrow}$), οπότε μειώνεται η μαγνητική ροή Φ .

Στη συνέχεια, μειώνεται στιγμιαία η E_a ($E_a \downarrow = K\Phi \downarrow n$) με αποτέλεσμα να αυξηθεί η τιμή του ρεύματος τυμπάνου I_a : $I_a \uparrow = \frac{V_a - E_a \downarrow}{R_a}$.



Σχ. 5.9γ

Ρύθμιση του ρεύματος διεγέρσεως.

Καθώς αυξάνεται το I_a αυξάνεται η ροπή T ($T \uparrow = K\Phi I_a \uparrow$) γιατί το ποσοστό αυξήσεως του ρεύματος τυμπάνου είναι μεγαλύτερο απ' το ποσοστό μείωσης της μαγνητικής ροής. Όταν αυξάνεται η ροπή T τότε ισχύει $T > T_r$ και η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται.

Τελικά, από την εξίσωση 5.105, όσο μειώνεται η μαγνητική ροή Φ τόσο αυξάνεται το σημύνος των καμπυλών με παράμετρο την μαγνητική ροή Φ .

Οι ευθείες στο σχήμα 5.9δ, δεν είναι παράλληλες γιατί στο δεύτερο μέλος της εξισώσεως 5.105, ο παρονομαστής περιλαμβάνει το τετράγωνο της μαγνητικής ροής.

Τα βήματα της διαδικασίας ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής ενός κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διέγερση, παρεμβαίνοντας στο κύκλωμα διεγέρσεως της μηχανής, είναι:

Βήμα 1°: Αύξηση της R_f προκαλεί μείωση της εντάσεως του ρεύματος διεγέρσεως I_f .

Βήμα 2°: Μείωση του I_f προκαλεί μείωση της μαγνητικής ροής Φ .

Βήμα 3°: Μείωση της μαγνητικής ροής Φ σημαίνει μικρότερη τιμή της αντι-ΗΕΔ, E_a .

Βήμα 4°: Μείωση της αντι-ΗΕΔ, προκαλεί αύξηση του ρεύματος τυμπάνου.

Βήμα 5°: Αύξηση του I_a προκαλεί αύξηση της ροπής T .

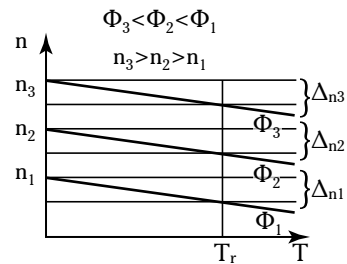
Βήμα 6°: Αύξηση της ροπής T ($T > T_r$) αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής, οπότε ο κινητήρας επιταχύνεται.

Βήμα 7°: Επιτάχυνση του κινητήρα προκαλεί αύξηση της αντι-ΗΕΔ, E_a .

Βήμα 8°: Το ρεύμα I_a μειώνεται.

Βήμα 9°: Από το βήμα 8 η ροπή T μειώνεται μέχρι να συμβεί $T = T_r$, αλλά τώρα έχουμε μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής από την αρχική.

Αυτή η μέθοδος ρυθμίσεως στροφών ισχύει για μεταβολή στροφών σε περιοχή μεγαλύτερη των αντιστοίχων ονομαστικών. Το διάστημα ρυθμίσεως είναι



Σχ. 5.9δ

Ρύθμιση της μαγνητικής ροής Φ .

1:3 ή 1:4. Για πολύ μεγάλο αριθμό στροφών αναπτύσσονται, μεγάλης τιμής, φυγοκεντρικές δυνάμεις με έντονη παρουσία του φαινομένου αντιδράσεως τυμπάνου.

3) Ρύθμιση της αντιστάσεως του τυλίγματος τυμπάνου R_a .

Σε αυτήν την μέθοδο ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής, κυρίως, των κινητήρων ΣΡ με παράλληλη διέγερση, η τάση τροφοδοσίας τους και το ρεύμα διεγέρσεώς τους διατηρούνται σταθερά στις ονομαστικές τους τιμές. Η ταχύτητα περιστροφής ρυθμίζεται συνδέοντας σε σειρά με το επαγωγικό μια κατάλληλη αντίσταση R_L (σχ. 5.9ε).

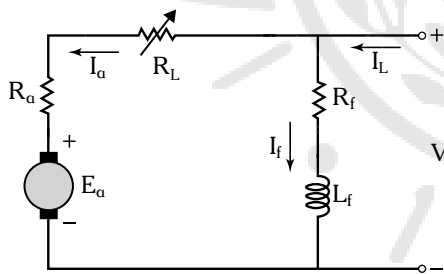
Η εξίσωση 5.72, με βάση τις εξισώσεις 5.69 και 5.70, γίνεται:

$$T = \frac{K\Phi V_t}{R_a + R_L} - \frac{K^2\Phi^2}{R_a + R_L} n. \quad (5.106)$$

Αν Φ και V_t είναι σταθερά μεγέθη, τότε η εξίσωση 5.106 γίνεται:

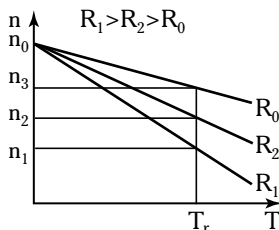
$$T = \frac{K}{R_a + R_L} - \frac{K\Phi}{R_a + R_L} n. \quad (5.107)$$

Μεταβάλλοντας την τιμή της αντιστάσεως R_L , μεταβάλλεται απότομα η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης $n = f(T)$ (σχ. 5.9στ).



Σχ. 5.9ε

Ρύθμιση ταχύτητας περιστροφής κινητήρα ΣΡ μεταβάλλοντας την αντίσταση τυμπάνου.



Σχ. 5.9στ

Χαρακτηριστικές καμπύλες $n = f(T)$, όταν μεταβάλλεται η τιμή της αντιστάσεως R_L .

Η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διέγερση, μεταβάλλοντας την τιμή της R_L , είναι απλή, αλλά δεν είναι αποτελεσματική γιατί δημιουργούνται μεγάλες απώλειες Joule.

4) Συνδυασμός της μεθόδου ρυθμίσεως της τάσεως στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου με τη μέθοδο ρυθμίσεως της ροής διεγέρσεως Φ .

Όταν ένας κινητήρας ΣΡ λειτουργεί στα ονομαστικά του μεγέθη, τότε θα περιστρέφεται με την ονομαστική του ταχύτητα.

Στην μέθοδο ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής μεταβάλλοντας την ροή διεγέρσεως Φ , όσο μικρότερη είναι η τιμή του ρεύματος διεγέρσεως, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής και αντίστροφα. Επειδή η αύξηση της τιμής του ρεύματος διεγέρσεως προκαλεί μείωση της ταχύτητας περιστροφής, υπάρχει ένα ελάχιστο όριο της ταχύτητας περιστροφής, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του ρεύματος διεγέρσεως, το οποίο δίδεται στις τεχνικές προδιαγραφές του κινητήρα.

Στη μέθοδο ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής με αύξηση της τάσεως στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου προκαλείται αύξηση της ταχύτητας περιστροφής, οπότε υπάρχει ένα μέγιστο όριο της τιμής της ταχύτητας περιστροφής, η οποία αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή της τάσεως στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου.

Η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής μεταβάλλοντας το ρεύμα διεγέρσεως χρησιμοποιείται για την επίτευξη τιμών της ταχύτητας μεγαλύτερων της αντίστοιχης ονομαστικής, αλλά όχι για ταχύτητα μικρότερη της ονομαστικής γιατί σ' αυτήν την περίπτωση η τιμή του ρεύματος διεγέρσεως ξεπερνά την αντίστοιχη μέγιστη τιμή της.

Η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής, μεταβάλλοντας την τάση στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου χρησιμοποιείται για τιμές της ταχύτητας μικρότερες της αντίστοιχης ονομαστικής, αλλά όχι για τιμές μεγαλύτερες της ονομαστικής, γιατί τότε απαιτείται τάση στα άκρα του τυμπάνου μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ονομαστική.

Οι δύο μέθοδοι ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής λειτουργούν συμπληρωματικά:

- 1) Η μεταβολή της τιμής της τάσεως στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου πραγματοποιείται για τιμές της ταχύτητας περιστροφής μικρότερες της αντίστοιχης ονομαστικής, και
- 2) η μεταβολή του ρεύματος διεγέρσεως πραγ-

ματοποιείται για τιμές της ταχύτητας μεγαλύτερες της αντίστοιχης ονομαστικής.

Έχει ενδιαφέρον να μελετήσουμε τις γραφικές παραστάσεις των συναρτήσεων $T_{\max} = f(n)$ και $P_{\text{out}}^{(\max)} = f(n)$ όταν το ρεύμα του επαγωγικού τυμπάνου έχει μέγιστη τιμή $I_a^{(\max)}$. Αναφερόμαστε, κυρίως, στην περίπτωση ενός κινητήρα ΣΡ παράλληλης ή ανεξάρτητης διεγέρσεως.

Όταν μεταβάλλεται η τάση στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου, η μαγνητική ροή στο εσωτερικό του κινητήρα είναι σταθερή, ενώ η μέγιστη ροπή του κινητήρα δίδεται ως εξής:

$$T_{\alpha\zeta}^{(\max)} = K\Phi I_a^{(\max)}. \quad (5.108)$$

Αυτή η μέγιστη ροπή είναι σταθερή, ανεξάρτητα από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Η ισχύς στον άξονα του κινητήρα είναι $P_{\text{out}} = T_{\alpha\zeta}\omega$, οπότε η μέγιστη ισχύς του κινητήρα, για τιμές της ταχύτητας μικρότερες της αντίστοιχης ονομαστικής, είναι:

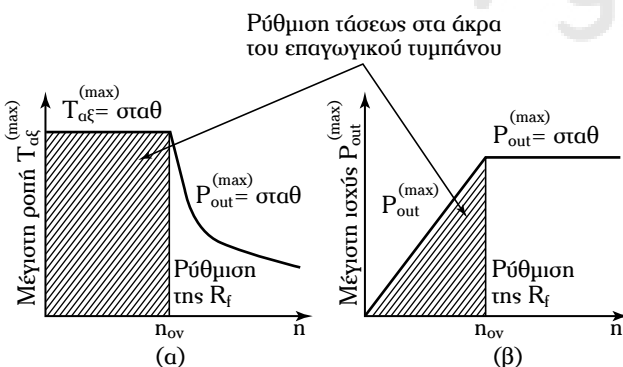
$$P_{\text{out}}^{(\max)} = T_{\alpha\zeta}^{(\max)}\omega \quad (5.109)$$

με $\omega = 2\pi \frac{n}{60} \text{ rad/s}$.

Η $P_{\text{out}}^{(\max)}$ είναι ευθέως ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.

Μεταβάλλοντας την τάση στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου ο κινητήρας λειτουργεί στη μέγιστη ροπή, ενώ η μέγιστη ισχύς μεταβάλλεται γραμμικά.

Μεταβάλλοντας το ρεύμα διεγέρσεως έχουμε αύξηση της ταχύτητας περιστροφής όταν μειώνεται η μαγνητική ροή, ενώ η τάση στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου είναι σταθερή στην ονομαστική της τιμή (σχ. 5.9ζ).



Σχ. 5.9ζ

Μελέτη (α) της μέγιστης ισχύος και (β) της μέγιστης ροπής σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής ενός κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διεγέρση.

Θεωρώντας μέγιστη την τιμή του ρεύματος τυμπάνου έχουμε:

$$\Phi = \frac{V_a - R_a I_a^{(\max)}}{K n} \approx \frac{1}{n}. \quad (5.110)$$

Η εξίσωση 5.110, εκφράζει τον τρόπο μείωσης της ροής διεγέρσεως Φ για τιμές της ταχύτητας περιστροφής μεγαλύτερες της αντίστοιχης ονομαστικής.

Από τις εξισώσεις λειτουργίας του κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διεγέρση προκύπτει ότι:

$$T_{\alpha\zeta}^{(\max)} \approx \frac{1}{n} \quad (5.111)$$

όταν το ρεύμα τυμπάνου θεωρείται ότι έχει τη μέγιστη τιμή.

Με αυτόν τον τρόπο ο κινητήρας, για τιμές της ταχύτητας περιστροφής μεγαλύτερες της αντίστοιχης ονομαστικής, λειτουργεί με σταθερή μέγιστη ισχύ στον άξονά του: $P_{\text{out}}^{(\max)} = T_{\alpha\zeta}^{(\max)}\omega$.

Τελικά, όταν μεταβάλλεται το ρεύμα διεγέρσεως η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς του κινητήρα είναι σταθερή, ενώ η μέγιστη ροπή είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής.

5.9.2 Σύστημα Ward-Leonard.

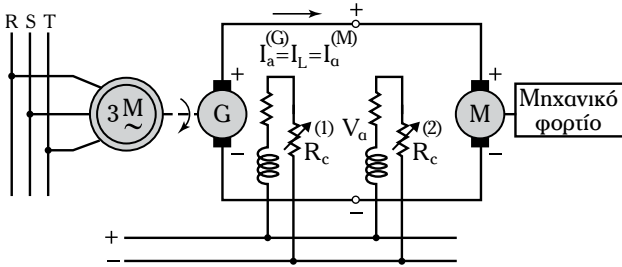
Η ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων ΣΡ με ανεξάρτητη διεγέρση, με παράλληλη διεγέρση και με σύνθετη διεγέρση ρυθμίζεται με τις ακόλουθες μεθόδους:

- 1) Τη μέθοδο ρυθμίσεως της τάσεως στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα.
- 2) Τη μέθοδο ρυθμίσεως του ρεύματος διεγέρσεως του κινητήρα ΣΡ.
- 3) Τη μέθοδο ρυθμίσεως της ωμικής αντιστάσεως του επαγωγικού τυμπάνου.

Η αποτελεσματικότερη μέθοδος ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα είναι η μέθοδος ρυθμίσεως της τάσεως στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου, για μεγάλο διάστημα τιμών της ταχύτητας, χωρίς να επηρεάζεται η μέγιστη ροπή.

Πριν την ανακάλυψη και εφαρμογή των ηλεκτρονικών ισχύος, η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής ενός κινητήρα ΣΡ πραγματοποιούνταν με το σύστημα Ward-Leonard (σχ. 5.9η).

Το σύστημα αυτό είναι μια μέθοδος ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα ΣΡ ρυθμίζοντας την τάση στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου. Το σύστημα Ward-Leonard αποτελείται από έναν τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα, μία γεννήτρια



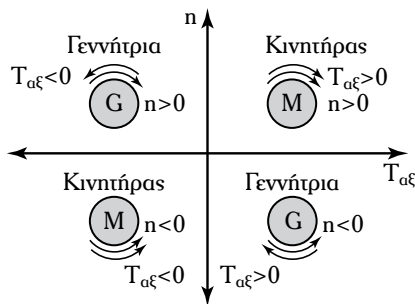
Σχ. 5.9n
Σύστημα Ward-Leonard.

ΣΡ με ανεξάρτητη διέγερση κι έναν κινητήρα ΣΡ ανεξάρτητης διεγέρσεως. Ο ασύγχρονος κινητήρας περιστρέφει την γεννήτρια ΣΡ η οποία τροφοδοτεί με συνεχή τάση τον κινητήρα ΣΡ.

Τα τυλίγματα διεγέρσεως των μηχανών ΣΡ τροφοδοτούνται από ένα δίκτυο συνεχούς τάσεως. Η τάση στους ακροδέκτες του επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα ΣΡ μεταβάλλεται ρυθμίζοντας το ρεύμα διεγέρσεως της γεννήτριας ΣΡ. Μεταβάλλοντας την τάση στους ακροδέκτες του επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα ΣΡ επιτυγχάνονται μεταβολές της ταχύτητας του από πολύ μικρές τιμές μέχρι την ονομαστική του τιμή. Για τιμές μεγαλύτερες της ονομαστικής ταχύτητας, η ταχύτητα του κινητήρα ΣΡ ρυθμίζεται με μείωση της τιμής του ρεύματος διεγέρσεώς του (σχ. 5.9θ).

Αντιστρέφοντας τη φορά του ρεύματος διεγέρσεως της γεννήτριας, αντιστρέφεται η πολικότητα της τάσεως στους ακροδέκτες του τυμπάνου του κινητήρα. Αν το ρεύμα διεγέρσεως του κινητήρα δεν αλλάξει φορά, τότε αντιστρέφεται τόσο η φορά περιστροφής του, όσο και η φορά της ροπής του.

Η ταχύτητα και η ροπή στον άξονα θεωρούνται θετικές ποσότητες αν έχουν φορά εκείνης των δεικτών του ρολογιού ($n > 0, T_{αξ} > 0$) και αρνητικές



Σχ. 5.9θ
Περιοχές λειτουργίας του συστήματος Ward-Leonard.

ποσότητες αν έχουν αντίθετη φορά ($n < 0, T_{αξ} < 0$). Εάν η n και η $T_{αξ}$ έχουν την ίδια φορά, τότε, γενικά, η μηχανή ΣΡ λειτουργεί σαν κινητήρας ΣΡ, ενώ αν έχουν αντίθετη φορά λειτουργεί σαν γεννήτρια ή πέδη.

Τα **πλεονεκτήματα** του συστήματος Ward-Leonard είναι ότι:

1) Επιτυγχάνεται μεγάλο διάστημα ρυθμίσεως των τιμών της ταχύτητας και προς τις δύο κατευθύνσεις, και ότι

2) επανακτάται ενέργεια. Στην περίπτωση, κατά την οποία ο κινητήρας ανυψώνει ένα μεγάλο φορτίο και στην συνέχεια το κατεβάζει, τότε λειτουργεί σαν γεννήτρια οπότε προσφέρει ισχύ στο σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι ένα μέρος της ενέργειας, η οποία καταναλώθηκε στη διαδικασία ενεργοποίησης ενός φορτίου μπορεί να αναπαραχθεί. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε μείωση του κόστους λειτουργίας της μηχανής.

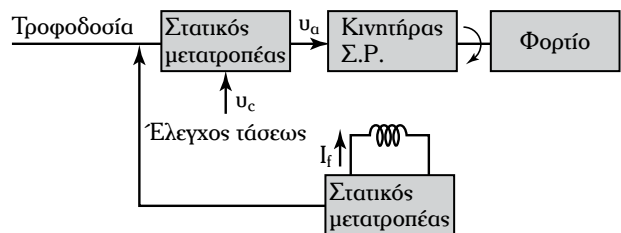
Τα **μειονεκτήματα** του συστήματος Ward-Leonard είναι:

1) Ο χαμηλός βαθμός αποδόσεως του συστήματος λόγω των απωλειών των τριών μηχανών του συστήματος και

2) η περιορισμένη ταχύτητα ελέγχου λόγω της μεγάλης αυτεπαγωγής των κυκλωμάτων διεγέρσεως.

5.9.3 Έλεγχος ταχύτητας κινητήρων ΣΡ μέσω στατών μετατροπών¹⁰.

Η ταχεία ανάπτυξη και εφαρμογή των ηλεκτρονικών ισχύος συντέλεσε καθοριστικά, στο να ξεπεραστεί ο έλεγχος ταχύτητας των κινητήρων ΣΡ με την μέθοδο Ward-Leonard. Στο σχήμα 5.9i παρουσιάζεται το διάγραμμα βαθμίδων ενός συστήματος, το οποίο χρησιμοποιεί στατούς μετατροπείς. Οι μετατροπείς είναι ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις και **ψαλιδιστές** (τεμαχιστές) (choppers).



Σχ. 5.9i
Διάγραμμα βαθμίδας για τον έλεγχο της ταχύτητας κινητήρων ΣΡ.

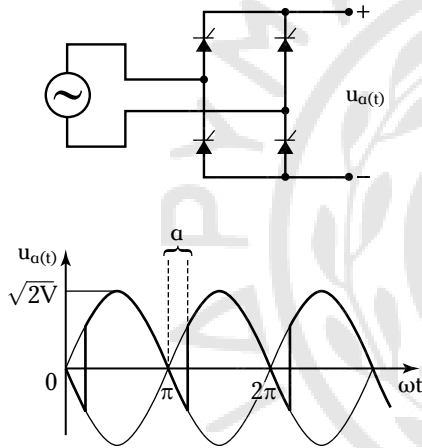
¹⁰ Η παράγραφος αυτή αποτελεί μία εισαγωγή στον έλεγχο της ταχύτητας των κινητήρων ΣΡ μέσω στατών μετατροπών.

1) Ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις.

Αν τροφοδοτήσουμε το σύστημα με ανορθωτική διάταξη μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση πλάτους και συχνότητας σταθερής σε μια μεταβλητή συνεχή τάση. Αν η ανορθωτική διάταξη αποτελείται από θυρίστορς, τότε η διάταξη είναι πλήρως ελεγχόμενη. Αν κάποιες συνιστώσες είναι δίοδοι η ανορθωτική διάταξη είναι ημιελεγχόμενη.

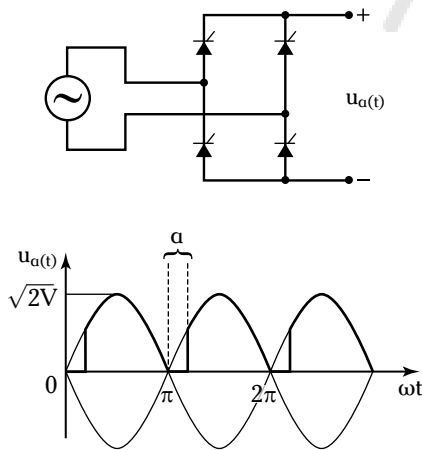
Η γωνία εναύσεως (α) των θυρίστορ καθορίζει τη μέση τιμή \bar{V}_a της τάσεως εξόδου $u_a(t)$ (σχ. 5.9ια). Η τάση u_c (σχ. 5.9ι) καθορίζει την γωνία α , οπότε και την τάση \bar{V}_a . Με την υπόθεση ότι i_a είναι πάντα διαφορετική του μηδενός (συνεχής αγωγή), οι σχέσεις μεταξύ της μέσης τιμής της τάσεως εξόδου \bar{V}_a και της γωνίας εναύσεως α δίδονται ως εξής:

Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα:



Σχ. 5.9ια

Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα.



Σχ. 5.9ιβ

Μονοφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα.

$$\bar{V}_a = \frac{2\sqrt{2}V}{\pi} \cos\alpha = \frac{2\hat{V}_f}{\pi} \cos\alpha \quad (5.112)$$

Μονοφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα (σχ. 5.9ιβ):

$$\bar{V}_a = \frac{\sqrt{2}V}{\pi} (1 + \cos\alpha) = \frac{\hat{V}_f}{\pi} (1 + \cos\alpha) \quad (5.113)$$

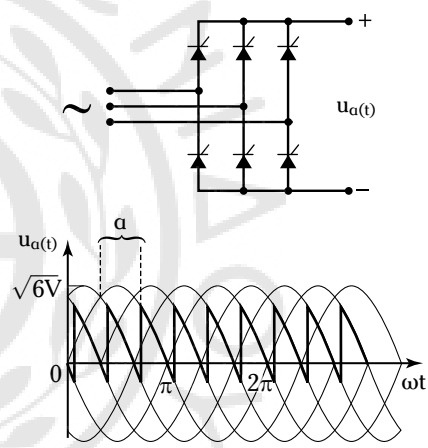
Πλήρως ελεγχόμενη τριφασική γέφυρα (σχ. 5.9ιγ):

$$\bar{V}_a = \frac{3\sqrt{6}V}{\pi} \cos\alpha = \frac{3\hat{V}_l}{\pi} \cos\alpha \quad (5.114)$$

Τριφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα (σχ. 5.9ιδ):

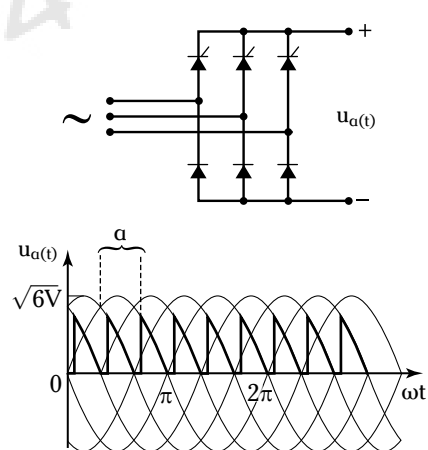
$$\bar{V}_a = \frac{3\sqrt{6}V}{2\pi} [1 + \cos\alpha] = \frac{3\hat{V}_l}{2\pi} [1 + \cos\alpha] \quad (5.115)$$

όπου V είναι η ενεργός τιμή της φασικής τάσεως τρο-



Σχ. 5.9ιγ

Πλήρως ελεγχόμενη τριφασική γέφυρα.



Σχ. 5.9ιδ

Τριφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα.

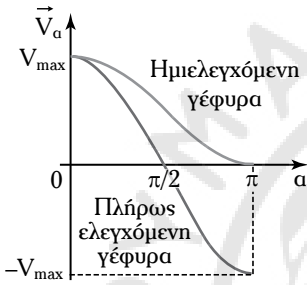
φοδοσίας, \hat{V}_f και \hat{V}_ℓ είναι οι μέγιστες τιμές τάσεων στο μονοφασικό και στο τριφασικό, αντίστοιχα, σύστημα τάσεων.

Η μεταβολή της τάσεως \bar{V}_α σε συνάρτηση με την γωνία εναύσεως α , δίδεται στο σχήμα 5.9ιε, για γέφυρα πλήρως ελεγχόμενη και ημιελεγχόμενη αντίστοιχα. Οι στιγμιαίες τιμές της τάσης τυμπάνου, $u_\alpha(t)$ και του ρεύματος τυμπάνου, $i_\alpha(t)$ μεταβάλλονται στον χρόνο.

Για μέσες τιμές ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\bar{V}_\alpha = E_\alpha + R_\alpha \bar{I}_\alpha, \quad E_\alpha = K\Phi n, \quad T = K\Phi \bar{I}_\alpha \quad (5.116)$$

Αν αμεληθεί η πτώση τάσεως $R_\alpha \bar{I}_\alpha$, τότε η τάση τροφοδοσίας ισούται με την αντι-ΗΕΔ ($\bar{V}_\alpha \cong E_\alpha$).

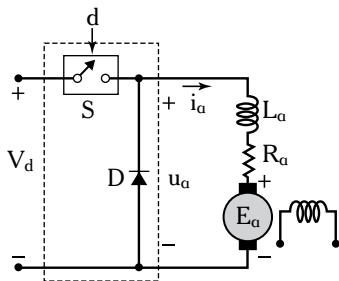


Σχ. 5.9ιε
Μεταβολή της \bar{V}_α σε συνάρτηση με τη γωνία εναύσεως α .

2) Ψαλιδοστής (τεμαχιστής) (chopper).

Ο τεμαχιστής είναι μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε συνεχή μεταβαλλόμενη τάση (ακολουθία θετικών παλμών). Ο τεμαχιστής είναι ένας διακόπτης μέσω του οποίου η μετάβαση του ρεύματος γίνεται σε υψηλή συχνότητα (σχ. 5.9ιστ).

Ο ημιαγωγικός διακόπτης S, είτε λειτουργεί στην περιοχή κορεσμού είτε στην περιοχή αποκοπής, υλοποιείται με MOSFET, τρανζίστορ ισχύος, θυρίστορ,



Σχ. 5.9ιστ
Έλεγχος τάσεως μέσω τεμαχιστή.

GTO ή IGBT ανάλογα με τις απαιτήσεις ισχύος του κινητήρα ΣΡ.

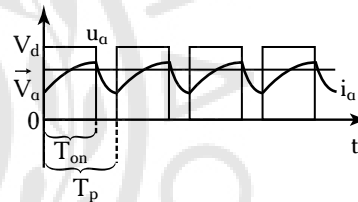
Όταν η διάταξη άγει (on) $u_\alpha = V_d$, το ρεύμα του κινητήρα αυξάνεται. Όταν η διάταξη δεν άγει (off), ο διακόπτης S είναι ανοικτός, το ρεύμα i_α περνά στην δίοδο ελεύθερης ροής D. Στο σχήμα 5.9ιζ, δίδονται οι κυματομορφές τάσεως-ρεύματος τυμπάνου.

Η μέση τάση στην οποία είναι ανάλογη η ταχύτητα του κινητήρα, είναι:

$$\bar{V}_\alpha = \frac{T_{on}}{T} V_d = \rho V_d \quad (5.117)$$

όπου: T_{on} η περίοδος αγωγής του τεμαχιστή, T_p η περίοδος chopping, $\rho = \frac{T_{on}}{T}$ ο λόγος χρησιμοποίησης (duty cycle) του τεμαχιστή.

Από την εξίσωση 5.117 προκύπτει ότι η μέση τάση στους ακροδέκτες του επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα είναι ευθέως ανάλογη του λόγου χρησιμοποίησης.



Σχ. 5.9ιζ
Κυματομορφή της τάσεως και του ρεύματος τυμπάνου, αντίστοιχα.

5.10 Κινητήρες ΣΡ με μόνιμους μαγνήτες.

Οι μόνιμοι μαγνήτες κατασκευάζονται από μαγνητικά κράματα, που αποτελούνται από μη μαγνητικά μέταλλα ή ελαφρώς μαγνητικά που παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες.

Ένα πολύ σημαντικό μαγνητικό κράμα είναι το λεγόμενο «Αλνίκο» (Alnico), όνομα το οποίο προέρχεται από τα αρχικά των στοιχείων: αλουμίνιο (Al), νικέλιο (Ni) και κοβάλτιο (Co). Οι μαγνήτες που αποτελούνται από τα χημικά στοιχεία σμαρτίο (Sm) και κοβάλτιο (Co) είναι ισχυρότεροι από τους μαγνήτες από κράμα Alnico.

Οι μόνιμοι μαγνήτες δημιουργούν μαγνητικό πεδίο χωρίς να καταναλωθεί ενέργεια.

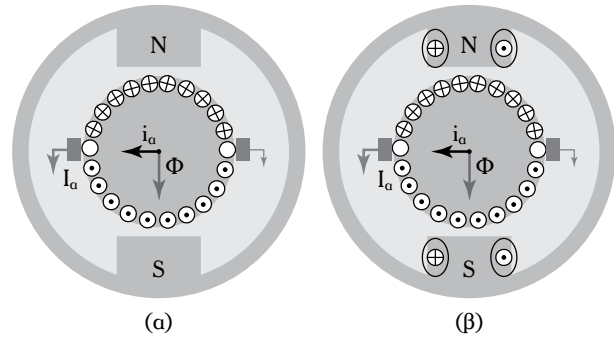
Στους κινητήρες ΣΡ με μόνιμους μαγνήτες [σχ. 5.10(α)], το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από τους μαγνητικούς πόλους οι οποίοι είναι μόνιμοι μαγνήτες. Στους συμβατικούς κινητήρες ΣΡ, το μαγνητικό

πεδίο δημιουργείται από το τύλιγμα διεγέρσεως, το οποίο είναι τοποθετημένο στους μαγνητικούς πόλους [σχ. 5.10(β)].

Οι κινητήρες ΣΡ με μόνιμους μαγνήτες αναπτύσσουν μεγάλη ροπή, ενώ η σχέση ροπής-ταχύτητας είναι γραμμική.

5.11 Βλάβες, αιτίες και επισκευές των μηχανών ΣΡ.

Στον πίνακα 5.11 παρουσιάζονται οι βλάβες, οι αιτίες και οι τρόποι επισκευής τους.



Σχ. 5.10

Κινητήρας ΣΡ (α) με μόνιμους μαγνήτες και (β) με τυλίγματα διεγέρσεως στους μαγνητικούς πόλους.

Πίνακας 5.11

Βλάβες, πιθανές αιτίες και τρόποι επισκευής μηχανών ΣΡ.

A/A	Βλάβη	Πιθανή αιτία	Επισκευή (ή τι πρέπει να κάνουμε)
1.	Η γεννήτρια ΣΡ δεν δίνει τάση.	α) Βλάβη στο μαγνητικό πεδίο.	Έλεγχος αντιστάσεως κυκλώματος διεγέρσεως.
		β) Λάθος σύνδεση των τυλιγμάτων διεγέρσεως.	Σωστή σύνδεση των ακροδεκτών των πηνίων διεγέρσεως.
		γ) Αντίστροφη φορά περιστροφής.	Αλλαγή φοράς περιστροφής (συνήθως δεν γίνεται). Αλλαγή της πολικότητας του μαγνητικού πεδίου ή του δρομέα μόνον.
		δ) Ο παραμένον μαγνητισμός είναι ασθενικός.	Ενίσχυση του παραμένοντος μαγνητισμού με τροφοδότηση του τυλιγματος διεγέρσεως από εξωτερική πηγή. (βλ. όμως και 1γ).
		ε) Βραχυκύκλωμα στην κατανάλωση.	Απομόνωση της γεννήτριας, ώστε να δώσει τάση. Έλεγχος των φορτίων.
		στ) Το τύλιγμα του δρομέα έχει διακοπεί ή έχει γίνει βραχυκύκλωμα στο εσωτερικό της μηχανής.	Έλεγχος του τυλιγματος. Επισκευή της γεννήτριας σε ειδικό συνεργείο για νέα περιέλιξη.
2.	Η γεννήτρια έχει μεγάλη πτώση τάσεως όταν φορτισθεί.	α) Μεγάλη πτώση αριθμού στροφών της κινητήριας μηχανής.	Ρύθμιση της κινητήριας μηχανής στην ονομαστική ταχύτητα.
		β) Λάθος σύνδεση της σύνθετης διεγέρσεως.	Σωστή σύνδεση των δύο τυλιγμάτων διεγέρσεως.
		γ) Λάθος θέση ψηκτρών.	Διόρθωση (μετάθεση) των ψηκτρών. (βλ. όμως και 3β).
3.	Σπινθηρισμός των ψηκτρών κατά τη φόρτιση.	α) Ρύπανση ή ανωμαλίες στην επιφάνεια του συλλέκτη.	Καθαρισμός ή λείανση.
		β) Λάθος θέση ψηκτρών.	Διόρθωση (μετάθεση) των ψηκτρών, (βλ. και 2γ).

A/A	Βλάβη	Πιθανή αιτία	Επισκευή (ή τι πρέπει να κάνουμε)
3.	Σπινθηρισμός των ψηκτρών κατά τη φόρτιση.	γ) Μεγάλη εκκεντρότητα στον συλλέκτη.	Τορνάρισμα.
		δ) Η μίκα είναι ψηλά (< 0,8 mm) ή προεξέχει.	Τοποθέτηση της μίκας σε βάθος περίπου 0,8 mm κάτω από την επιφάνεια του συλλέκτη.
		ε) Μικρή πίεση ψηκτρών.	Αύξηση της πίεσεως (στα 180–220 p/cm ²). Ερώτηση στον κατασκευαστή. Ελατήρια.
		στ) Φθορά ψηκτρών.	Αντικατάσταση με νέες (ίδιο υλικό).
		ζ) Ακατάλληλη ποιότητα ψηκτρών.	Ερώτηση στον κατασκευαστή για αλλαγή ποιότητας.
		η) Κραδασμοί των ψηκτρών (μη ομαλή περιστροφή).	Έλεγχος κεντραρίσματος δρομέα. Ευθυγράμμιση με κόμπλερ. Ζυγοστάθμιση δρομέα.
		θ) Βραχυκύκλωμα στο πηνίο του βοηθητικού ή αντισταθμιστικού πόλου.	Επισκευή ή αλλαγή πηνίου.
		ι) Υπερφόρτιση.	Ελάττωση φορτίου, έλεγχος φορτίων.
		ια) Υπέρβαση του ορίου ταχύτητας.	Έλεγχος αριθμού στροφών.
		ιβ) Χαλασμένο ρουλεμάν.	Αλλαγή ρουλεμάν.
		ιγ) Βραχυκύκλωμα τομέων ή πηνίου τυλίγματος.	Επισκευή σε ειδικό συνεργείο.
		ιδ) Αποσύνδεση ή σπάσιμο της συνδέσεως.	Επισκευή από ειδικό (απαιτείται εμπειρία).
4.	Υπερθέρμανση μηχανής.	α) Υπερφόρτιση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.	Έλεγχος μεταβολής φορτίου, εν ανάγκη μετατόπιση φορτίων σε άλλες ώρες ή μείωση φορτίου.
		β) Ανεπάρκεια ψύξεως.	Έλεγχος κυκλώματος ψύξεως, θέσεως μηχανής.
		γ) Εσωτερικό βραχυκύκλωμα τυλίγματος.	Έλεγχος τυλίγματος και τομέων συλλέκτη. Έλεγχος πηνίων μαγνητικού πεδίου.
		δ) Ρύπανση.	Καθάρισμα.
5.	Υπερθέρμανση εδράνων.	α) Υπερβολική τριβή (διάφορες κακώσεις).	Ακουστικός έλεγχος κατά το σταμάτημα της μηχανής.
		β) Κακή λίπανση.	Πρόσθεση πολύ ή λίγου γράσου στα ρουλεμάν.
		γ) Μεγάλη αξονική καταπόνηση.	Ελάττωση της συσφίξεως.
6.	Ο κινητήρας δεν ξεκινά (ούτε χωρίς φορτίο).	α) Το κύκλωμα τροφοδοσίας έχει διακοπή.	Έλεγχος γραμμών συνδέσεων (βίδες, συγκολλήσεις διακοπών, γεννήτριας-δίκτυο ασφαλειών, θερμικών, ρελέ υπερεντάσεως κ.λπ.).
		β) Ο εκκινητής δεν λειτουργεί.	Έλεγχος για διακοπή ή για λανθασμένη σύνδεση. Έλεγχος επαφών-συνδέσεων εκκινητή.
		γ) Οι ψήκτρες δεν κάνουν επαφή.	Έλεγχος ψηκτρών.

A/A	Βλάβη	Πιθανή αιτία	Επισκευή (ή τι πρέπει να κάνουμε)
6.	Ο κινητήρας δεν ξεκινά (ούτε χωρίς φορτίο).	δ) Διακοπή στο κύκλωμα.	Έλεγχος τυλιγμάτων διεγέρσεως και ρυθμιστικής αντιστάσεως.
		ε) Διακοπή ή βραχυκύκλωμα δρομέα.	Έλεγχος, επισκευή από ειδικό.
		στ) Μπλοκάρισμα δρομέα.	Έλεγχος κεντραρίσματος, εδράνων κινητήρα ή φορτίων.
		ζ) Χαμηλή τάση δικτύου.	Μέτρηση τάσεως και ρύθμιση.
7.	Ο κινητήρας ξεκινά δύσκολα.	α) Το ρεύμα διεγέρσεως είναι μικρό.	Μέτρηση και ρύθμιση ρεύματος διεγέρσεως: έλεγχος της ρυθμιστικής αντιστάσεως η οποία τοποθετείται σε σειρά με το τύλιγμα διεγέρσεως.
		β) Το τύλιγμα διεγέρσεως συνδέθηκε λάθος.	Έλεγχος της πολικότητας συνδέσεως του τυλίγματος διεγέρσεως.
8.	Ο κινητήρας ξεκινά απότομα.	γ) Διακοπή τμήματος της αντιστάσεως εκκινήσεως.	Μέτρηση της αντιστάσεως, αποκατάσταση της βλάβης.
		δ) Η αντίσταση εκκινήσεως υπολογίστηκε μικρή.	Αύξηση της αντιστάσεως εκκινήσεως κατόπιν συνεννοήσεως με τον κατασκευαστή.
		ε) Λάθος στη σύνδεση της αντιστάσεως εκκινήσεως.	Σωστή σύνδεση σύμφωνα με το σχέδιο.
		στ) Βραχυκύκλωμα στο τύλιγμα δρομέα.	Μέτρηση αντιστάσεως τυλίγματος. Επισκευή από ειδικό.
		ζ) Βραχυκύκλωμα τομέων συλλέκτη.	Έλεγχος συλλέκτη, αποκατάσταση βραχυκυκλώματος.
9.	Ο κινητήρας στρέφεται με χαμηλή ταχύτητα.	α) Υπερφόρτωση.	Έλεγχος εδράνων φορτίου (γενικά όλων των τριβών).
		β) Χαμηλή τάση.	Μέτρηση τάσεως.
		γ) Παρέμεινε «εντός» (σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου) ένα μέρος του εκκινήτη.	Έλεγχος στο κύκλωμα αυτοματισμού της αντιστάσεως εκκινήσεως.
		δ) Οι ψήκτριες δεν είναι στην ουδέτερη ζώνη.	Έλεγχος, μετατόπιση ψηκτρών.

– Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Δίδεται κινητήρας ΣΡ με παράλληλη διέγερση, 230 V, ο οποίος έχει αντίσταση τυμπάνου 0,21 Ω. Ο κινητήρας τροφοδοτείται με 40 A και περιστρέφεται με 760 ΣΑΛ. Αν η μαγνητική ροή μειωθεί κατά 15%, ποια είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα; Θεωρήστε ότι η ροπή στον δρομέα διατηρείται σταθερή.

Λύση.

Διακρίνουμε δύο καταστάσεις λειτουργίας για

τον κινητήρα:

1) Πριν τη μείωση της μαγνητικής ροής: Δίδονται:

$$V_t = 230 \text{ V}, I_a^{(1)} = 40 \text{ A}, R_a = 0,21 \text{ } \Omega, n_1 = 760 \text{ } \Sigma\text{A}\Lambda$$

$$T_1 = K_1 \Phi_1 I_a^{(1)}.$$

Η αντι-ΗΕΔ είναι:

$$E_a^{(1)} = V_t - I_a^{(1)} R_a = 230 - 40 \cdot 0,21 = 221,6 \text{ V}.$$

2) Μετά τη μείωση της μαγνητικής ροής έχουμε:

$$V_t = 230 \text{ V}, \quad \Phi_2 = 0,85 \Phi_1$$

Υπολογισμός του $I_a^{(2)}$:

Ισχύει: $T_2 = K_1 \Phi_2 I_a^{(2)}$.

Είναι $T_1 = T_2$

και $K_1 \Phi_1 I_a^{(1)} = K_1 \Phi_2 I_a^{(2)}$

ή $I_a^{(1)} = 0,85 I_a^{(2)}$

και $I_a^{(2)} = \frac{I_a^{(1)}}{0,85}$.

Είναι $I_a^{(1)} = 40 \text{ A}$, οπότε ισχύει:

$$I_a^{(2)} = \frac{40}{0,85} \cong 47 \text{ A}.$$

Η αντ-ΗΕΔ είναι:

$$E_a^{(2)} = V_t - I_a^{(2)} R_a = 230 - 47 \cdot 0,21 \cong 220 \text{ V}.$$

Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα πριν τη μείωση της μαγνητικής ροής είναι:

$$n_1 = \frac{E_a^{(1)}}{K \Phi_1} \quad (1)$$

Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα μετά τη μείωση της ροής είναι:

$$n_2 = \frac{E_a^{(2)}}{K \Phi_2} = \frac{E_a^{(2)}}{K \cdot 0,85 \Phi_1} \quad (2)$$

Διαιρούμε κατά μέλη την εξίσωση 1 και την εξίσωση 2, οπότε έχουμε:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\frac{E_a^{(1)}}{K \Phi_1}}{\frac{E_a^{(2)}}{K \cdot 0,85 \Phi_1}} = \frac{0,85 E_a^{(1)}}{E_a^{(2)}}$$

ή $\frac{760}{n_2} = \frac{0,85 E_a^{(1)}}{E_a^{(2)}} = \frac{0,85 \cdot 221 \cdot 6}{220}$

και $n_2 \cong 888 \text{ ΣΑΛ}$.

Άσκηση 2.

Κινητήρας ΣΡ αναπτύσσει ροπή 30 N-m. Να υπολογίσετε τη ροπή του κινητήρα όταν το ρεύμα τυμπάνου αυξηθεί κατά 50% και η μαγνητική ροή μειωθεί κατά 10%.

Λύση.

Έστω T_1 και Φ_1 η τιμή της ροπής και της μαγνητικής ροής πριν την αύξηση του ρεύματος τυμπάνου και τη μείωση της μαγνητικής ροής αντίστοιχα. T_2 και Φ_2 είναι οι τιμές της ροπής και της μαγνητικής ροής μετά την αύξηση του ρεύματος τυμπάνου και της αντίστοιχης μείωσης της μαγνητικής ροής.

Έχομε:

$$T_1 = K \Phi_1 I_a^{(1)} \quad (1)$$

$$T_2 = K \Phi_2 I_a^{(2)}. \quad (2)$$

Διαιρούμε κατά μέλη τις εξισώσεις 1 και 2:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \cdot \frac{I_a^{(1)}}{I_a^{(2)}}$$

Προκύπτει λοιπόν: $I_a^{(2)} = 1,5 I_a^{(1)}$ και $\Phi_2 = 0,9 \Phi_1$.

οπότε: $\frac{T_1}{T_2} = \frac{\Phi_1}{0,9 \Phi_1} \cdot \frac{I_a^{(1)}}{1,5 I_a^{(1)}}$

και $T_2 = 30 \cdot 0,9 \cdot 1,5 = 40,5 \text{ N-m}$.

Άσκηση 3.

Δίδεται κινητήρας ΣΡ με παράλληλη διέγερση 25 kW (ισχύς εισόδου), 250 V ο οποίος έχει:

$$R_a = 0,25 \Omega \quad \text{και} \quad R_f = 125 \Omega.$$

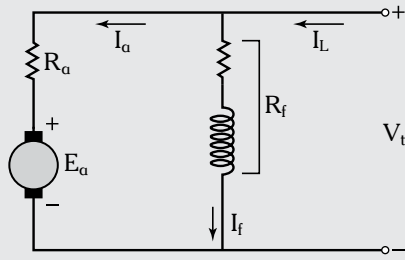
Όταν τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση, απορροφά ρεύμα 12 A και περιστρέφεται με 1.000 ΣΑΛ. Να υπολογίσετε:

1) Την αντ-ΗΕΔ.

2) Την ταχύτητα περιστροφής, τη ρύθμιση της ταχύτητας και τη ροπή στη λειτουργία πλήρους φορτίου.

Λύση.

Το ισodύναμο κύκλωμα του κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διέγερση δίδεται στο σχήμα 5.11α.



Σχ. 5.11α

Ισχύει: $E_a = K\Phi n$

$$V_t = E_a + I_a R_a$$

$$I_L = I_f + I_a$$

$$T = K\Phi I_a$$

$$\Phi = \lambda I_f$$

1) Η αντι-ΗΕΔ είναι: $E_a = V_t - I_a R_a$. Ισχύει:

$$I_a = I_L - I_f = I_L - \frac{V_t}{R_f} = 12 - \frac{250}{125} = 12 - 2 = 10 \text{ A.}$$

Οπότε: $E_a = 250 - 10 \cdot 0,25 = 247,5 \text{ V.}$

2) Στο πλήρες φορτίο ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο ρεύμα:

$$I'_L = \frac{25.000}{250} = 100 \text{ A.}$$

Το ρεύμα τυμπάνου είναι: $I'_a = 100 - 2 = 98 \text{ A.}$

Η αντι-ΗΕΔ είναι:

$$E'_a = V_t - I'_a R_a = 250 - 98 \cdot 0,25 = 225,5 \text{ V.}$$

Ισχύει: $E_a = K\Phi n$. (1)

Στη λειτουργία πλήρους φορτίου είναι:

$$E'_a = K\Phi n'. \quad (2)$$

Διαιρούμε κατά μέλη την εξίσωση 1 και την

εξίσωση 2 για να υπολογίσουμε την ταχύτητα περιστροφής στη λειτουργία πλήρους φορτίου:

$$\frac{E_a}{E'_a} = \frac{K\Phi n}{K\Phi n'}$$

$$n' = \frac{E'_a n}{E_a} = \frac{225,5 \cdot 1.000}{247,5} \cong 911 \text{ ΣΑΛ.}$$

$$\text{Ρύθμιση ταχύτητας} = \frac{1.000 - 911}{911} \cdot 100 \cong 9,77\%.$$

Η ροπή στο πλήρες φορτίο είναι:

$$E'_a I'_a = T_e \omega$$

με $\omega = 2\pi \frac{911}{60} = 95,35 \text{ rad/s.}$

Είναι:

$$T \cong T_e \cong \frac{E'_a I'_a}{\omega} = \frac{225,5 \cdot 98}{95,35} = 231,76 \text{ N-m.}$$

Άσκηση 4.

Δίδεται κινητήρας ΣΡ διεγέρσεως σειράς 460 V, ο οποίος περιστρέφεται με 1.100 ΣΑΛ, ενώ απορροφά ρεύμα 40 A. Η συνολική αντίσταση του επαγωγικού τυμπάνου και τυλίγματος διεγέρσεως σειράς είναι 0,9 Ω. Να υπολογίσετε την τιμή της ωμικής αντιστάσεως, η οποία συνδέεται σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο, ώστε η ταχύτητα περιστροφής να είναι 550 ΣΑΛ, αν η ηλεκτρομαγνητική ροπή, T_e , είναι:

1) Σταθερή.

2) Ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής ($\propto n$)¹¹ και

3) ανάλογη της τρίτης δυνάμεως της ταχύτητας ($\propto n^3$)¹².

Ο κινητήρας λειτουργεί στο γραμμικό τμήμα της μαγνητικής του χαρακτηριστικής.

Λύση.

1) Για τον κινητήρα ΣΡ διεγέρσεως σειράς ισχύει:

$$T_e = K\Phi I_a$$

¹¹ Το σύμβολο $\propto n$ σημαίνει ανάλογο της ταχύτητας περιστροφής n.

¹² Το σύμβολο $\propto n^3$ σημαίνει ανάλογο της τρίτης δυνάμεως της ταχύτητας περιστροφής n.

$$\Phi = \lambda I_f$$

$$I_f = I_a.$$

Οπότε έχουμε: $T_e = K\lambda I_a^2$ (1)

Αν T_e είναι σταθερή, πρέπει να είναι σταθερό το I_a και η μαγνητική ροή Φ .

Η αντι-ΗΕΔ πριν τη σύνδεση της αντιστάσεως είναι:

$$E_a^{(1)} = V_t - I_a^{(1)} R_a = 460 - 40 \cdot 0,9 = 424 \text{ V}.$$

Ισχύει: $E_a^{(1)} = K\Phi_1 n_1$ (2)

και $\Phi_1 = \lambda I_f^{(1)}$

$$I_f^{(1)} = I_a^{(1)}.$$

Τελικά έχουμε: $E_a^{(1)} = K\lambda I_a^{(1)} n_1$ (3)

Η αντι-ΗΕΔ όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι 550 ΣΑΛ δίδεται ως εξής:

$$E_a^{(2)} = K\lambda I_a^{(1)} n_2. \quad (4)$$

Διαιρώντας τις εξισώσεις 3 και 4 κατά μέλη, έχουμε:

$$\frac{E_a^{(1)}}{E_a^{(2)}} = \frac{n_1}{n_2} \quad (5)$$

γιατί η ροπή T_e είναι σταθερή, οπότε σταθερό θα είναι το ρεύμα τυμπάνου.

Από την εξίσωση 5, έχουμε:

$$E_a^{(2)} = E_a^{(1)} \frac{n_2}{n_1}$$

ή $E_a^{(2)} = 424 \cdot \frac{550}{1.100} = 212 \text{ V}.$

Όταν ο κινητήρας περιστρέφεται με 550 ΣΑΛ τότε:

$$I_a^{(2)} R_a = V_t - E_a^{(2)} = 460 - 212 = 248 \text{ V}.$$

Η αντίσταση R_a είναι:

$$R_a = \frac{248}{40} = 6,2 \Omega.$$

Η τιμή της αντιστάσεως R' , η οποία συνδέεται

σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο είναι:

$$R' = 6,2 - 0,9 = 5,3 \Omega.$$

2) Σε αυτήν την περίπτωση ($T_e \propto n$), η ροπή T_e είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής ($T_e \propto n$), όταν η ταχύτητα είναι $\frac{1}{2}$ της αρχικής, οπότε και η ροπή είναι $\frac{1}{2}$ της αρχικής. Είναι:

$$I_a^2 = \frac{1}{2} \cdot 40^2$$

$$I_a = \sqrt{800} = 28,28 \text{ A}.$$

Η αντι-ΗΕΔ E_a είναι ανάλογη του γινομένου Φn , οπότε:

$$E_a = 424 \cdot \frac{550}{1.100} \cdot \frac{28,28}{40} = 149,88 \text{ V}.$$

Είναι: $I_a R_a = V_t - E_a = 460 - 149,88 = 310,12 \text{ V}$

ή $R_a = \frac{310,12}{28,28} = 10,96 \Omega.$

Η αντίσταση R' , η οποία συνδέεται σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο, είναι:

$$R' = 10,96 - 0,9 = 10,06 \Omega.$$

3) Όταν η ροπή T_e είναι ανάλογη της τρίτης δυνάμεως της ταχύτητας περιστροφής ($T_e \propto n^3$) του κινητήρα, τότε η ταχύτητα είναι $\frac{1}{2}$ της αρχικής, ενώ η ροπή είναι το $\frac{1}{8}$ της αρχικής (πριν τη σύνδεση της αντιστάσεως):

$$I_a^2 = \frac{1}{8} \cdot 40^2$$

ή $I_a = \frac{40}{\sqrt{8}} = 14,14 \text{ A}.$

Η αντι-ΗΕΔ, E_a , σε αυτήν την περίπτωση είναι:

$$E_a = 424 \cdot \frac{550}{1.100} \cdot \frac{14,14}{40} = 74,94 \text{ V}$$

και $I_a R_a = V_t - E_a = 460 - 74,94 = 385,06 \text{ V}$

ή $R_a = \frac{385,06}{14,14} = 27,23 \Omega.$

Η αντίσταση R' είναι: $R' = 27,23 - 0,9 = 26,33 \Omega$.

Άσκηση 5.

Δίδεται κινητήρας ΣΡ με παράλληλη διέγερση 460 V, ο οποίος περιστρέφεται με 650 ΣΑΛ και απορροφά ρεύμα 50 A από δίκτυο συνεχούς ρεύματος. Ο κινητήρας έχει: $R_a = 0,5 \Omega$ και $R_f = 220 \Omega$. Να υπολογίσετε:

1) Την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα στη λειτουργία χωρίς φορτίο, όταν το συνολικό ρεύμα το οποίο απορροφά σε αυτήν τη λειτουργική κατάσταση είναι 5 A.

2) Την τιμή της αντιστάσεως R' , την οποία πρέπει να συνδέσουμε σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο, ώστε η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα να είναι 500 ΣΑΛ με συνολικό ρεύμα 45 A.

3) Την επί τοις εκατό μείωση της μαγνητικής ροής, ώστε η ταχύτητα του κινητήρα να είναι 800 ΣΑΛ. Το ρεύμα τυμπάνου είναι 30 A χωρίς τη σύνδεση της αντιστάσεως σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο.

Λύση.

1) Το ρεύμα διεγέρσεως του κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διέγερση είναι:

$$I_f^{(1)} = \frac{460}{220} = 2,09 \text{ A.}$$

Το ρεύμα τυμπάνου, $I_a^{(1)}$, είναι:

$$I_a^{(1)} = I_L^{(1)} - I_f^{(1)} = 50 - 2,09 = 47,91 \text{ A}$$

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο απορροφά ρεύμα 5 A. Το ρεύμα τυμπάνου στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι: $I_a^{(2)} = 5 - 2,09 = 2,91 \text{ A}$.

Η αντι-ΗΕΔ $E_a^{(1)}$ είναι:

$$E_a^{(1)} = V_t - I_a^{(1)} R_a = 460 - 47,91 \cdot 0,5 = 436,04 \text{ V.}$$

Η αντι-ΗΕΔ $E_a^{(2)}$, στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι: $E_a^{(2)} = V_t - I_a^{(2)} R_a = 460 - 2,91 \cdot 0,5 = 458,54 \text{ V}$.

Διαιρώντας τις εξισώσεις της αντι-ΗΕΔ με φορτίο και της αντι-ΗΕΔ χωρίς φορτίο έχουμε:

$$\frac{E_a^{(1)}}{E_a^{(2)}} = \frac{K\lambda I_f^{(1)} n_1}{K\lambda I_f^{(2)} n_2}$$

$$\text{και} \quad \frac{436,04}{458,54} = \frac{2,09 \cdot 650}{5n_2}.$$

Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι $n_2 \cong 286 \text{ ΣΑΛ}$.

2) Η αντι-ΗΕΔ E_a^* , όταν συνδέουμε σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο την αντίσταση R' είναι:

$$E_a^* = K\Phi n_2.$$

Διαιρούμε με αυτήν την εξίσωση την εξίσωση της αντι-ΗΕΔ $E_a^{(1)} = K\Phi n_1$, οπότε προκύπτει:

$$\frac{E_a^{(1)}}{E_a^*} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Λύνοντας ως προς E_a^* , έχουμε: $E_a^* = E_a^{(1)} \frac{n_2}{n_1}$.

$$\text{ή} \quad E_a^* = 436,04 \cdot \frac{500}{650} = 335,41 \text{ V.}$$

$$\text{Είναι:} \quad I_a^{(1)} R_a = 460 - 335,41 = 124,59 \text{ V}$$

$$\text{και} \quad R_a = \frac{124,59}{I_a^{(1)}} = \frac{124,59}{47,91} = 2,60 \Omega.$$

Η αντίσταση R' , η οποία συνδέεται σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο είναι:

$$R' = 2,60 - 0,5 = 2,1 \Omega.$$

3) Έστω $I_a^{(3)}$ το ρεύμα τυμπάνου ίσο με 30 A.

Έχουμε: $E_a^{(1)} = V_t - I_a^{(3)} R_a = 460 - 30 \cdot 0,5 = 445 \text{ V}$

Έστω Φ_1 η μαγνητική ροή όταν ο κινητήρας περιστρέφεται στις 650 ΣΑΛ, και Φ_2 είναι η μαγνητική ροή όταν ο κινητήρας περιστρέφεται στις 800 ΣΑΛ.

$$\text{Ισχύει:} \quad E_a^{(1)} = K\Phi_1 n_1 \quad (1)$$

Η αντι-ΗΕΔ όταν ο κινητήρας απορροφά 50 A.

$$E_a^{(3)} = K\Phi_2 n_2 \quad (2)$$

η αντι-ΗΕΔ όταν το ρεύμα τυμπάνου είναι 30 A.

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις 1 και 2 έχουμε:

$$\frac{E_a^{(1)}}{E_a^{(3)}} = \frac{K\Phi_1 n_1}{K\Phi_2 n_2}$$

$$E_a^{(1)} \Phi_2 n_2 = E_a^{(3)} \Phi_1 n_1$$

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{E_a^{(3)} n_1}{E_a^{(1)} n_2} = \frac{445 \cdot 650}{436,04 \cdot 800} = 0,829.$$

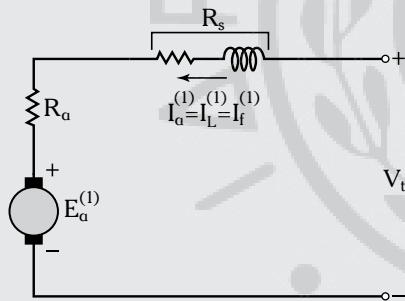
Η επί τοις εκατό μείωση της μαγνητικής ροής είναι: $(1 - 0,829) \cdot 100 = 17,1\%$.

Άσκηση 6.

Δίδεται κινητήρας ΣΡ διεγέρσεως σειράς (σχ. 5.11β), ο οποίος περιστρέφεται με 550 ΣΑΛ. Ο κινητήρας τροφοδοτείται με τάση 230 V και απορροφά 45 A. Η αντίσταση του επαγωγικού τυμπάνου είναι 0,1 Ω και η αντίσταση του τυλίγματος διεγέρσεως είναι 0,01 Ω. Να υπολογίσετε την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα αν συνδεθεί παράλληλα στο τύλιγμα διεγέρσεως αντίσταση 0,12 Ω. Θεωρήστε ότι η ροπή στον δρομέα διατηρείται σταθερή, ενώ ο κινητήρας λειτουργεί στο γραμμικό τμήμα της μαγνητικής χαρακτηριστικής του.

Λύση.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα πριν τη σύνδεση της αντιστάσεως των 0,12 Ω, παράλληλα προς την αντίσταση του τυλίγματος διεγέρσεως είναι:



Σχ. 5.11β

Οι εξισώσεις λειτουργίας είναι:

$$E_a^{(1)} = K\Phi_1 n_1 \quad (1)$$

$$V_t = E_a^{(1)} + I_a^{(1)} (R_a + R_s) \quad (2)$$

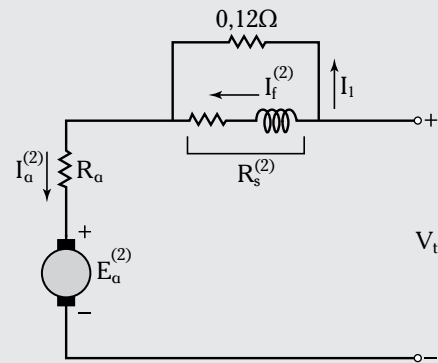
$$I_L^{(1)} = I_f^{(1)} = I_a^{(1)} \quad (3)$$

$$T_1 = K\Phi_2 I_a^{(2)} \quad (4)$$

$$\Phi_1 = \lambda I_f^{(1)}. \quad (5)$$

Μετά τη σύνδεση της αντιστάσεως των 0,12 Ω παράλληλα προς την R_s , το ισοδύναμο κύκλωμα

του κινητήρα δίδεται στο σχήμα 5.11γ.



Σχ. 5.11γ

Οι εξισώσεις λειτουργίας είναι:

$$E_a^{(2)} = K\Phi_2 n_2 \quad (6)$$

$$V_t = E_a^{(2)} + I_a^{(2)} R_a + I_f^{(2)} R_s \quad (7)$$

$$I_1 + I_f^{(2)} = I_a^{(2)} \quad (8)$$

$$T_2 = K\Phi_2 I_a^{(2)} \quad (9)$$

$$\Phi_2 = \lambda I_f^{(2)}. \quad (10)$$

Διαιρούμε κατά μέλη την εξίσωση 1 και την εξίσωση 6. Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις 5 και 10, αντίστοιχα, έχουμε:

$$\frac{E_a^{(1)}}{E_a^{(2)}} = \frac{K\lambda I_f^{(1)} n_1}{K\lambda I_f^{(2)} n_2}$$

$$\frac{E_a^{(1)}}{E_a^{(2)}} = \frac{I_a^{(1)} n_1}{I_a^{(2)} n_2}. \quad (11)$$

ή

$$\text{Είναι:} \quad I_f^{(1)} = I_a^{(1)} = 45 \text{ A}$$

$$\text{και} \quad E_a^{(1)} = V_t - I_a^{(1)} (R_a + R_s) = 230 - 45 \cdot (0,1 + 0,01) = 225,05 \text{ V.}$$

$$\text{Η } E_a^{(2)} \text{ δίδεται:} \quad E_a^{(2)} = V_t - (I_a^{(2)} \cdot 0,1 + I_f^{(2)} \cdot 0,01).$$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα, με την αντίσταση 0,12 Ω συνδεμένη παράλληλα στο τύλιγμα διεγέρσεως, προκύπτει ότι η τάση στα άκρα της παράλληλης συνδέσεως των αντιστάσεων 0,12 Ω και 0,01 Ω είναι ίδια. Αν I_1 είναι το ρεύμα, το οποίο διαρρέει την αντίσταση 0,12 Ω και $I_f^{(2)}$ την αντίστα-

ση $0,01 \Omega$, ισχύει:

$$I_f^{(2)} \cdot 0,01 = I_1 \cdot 0,12$$

και
$$I_1 = \frac{0,01}{0,12} I_f^{(2)}. \quad (12)$$

Η εξίσωση 8 με βάση την εξίσωση 12 γίνεται:

ή
$$\frac{0,01}{0,12} I_f^{(2)} + I_f^{(2)} = I_a^{(2)}$$

$$I_f^{(2)} \left(\frac{0,01}{0,12} + 1 \right) = I_a^{(2)}$$

ή
$$I_f^{(2)} \frac{0,13}{0,12} = I_a^{(2)}$$

και
$$I_f^{(2)} = \frac{0,12 I_a^{(2)}}{0,13}. \quad (13)$$

Η ροπή στο δρομέα διατηρείται σταθερή.

Πριν τη σύνδεση της αντιστάσεως των $0,12 \Omega$ έχουμε:

$$T_1 = K\lambda I_f^{(1)} I_a^{(1)} \text{ με } I_f^{(1)} = I_a^{(1)} \Rightarrow T_1 = K\lambda (I_a^{(1)})^2. \quad (14)$$

Μετά τη σύνδεση της αντιστάσεως των $0,12 \Omega$ έχουμε: $T_2 = K\lambda I_f^{(2)} I_a^{(2)}$

ή
$$T_2 = K\lambda \frac{0,12}{0,13} I_a^{(2)} I_a^{(2)} \quad (15)$$

$$T_2 = K\lambda \frac{0,12}{0,13} (I_a^{(2)})^2.$$

Από τις εξισώσεις 14 και 15 έχουμε:

$$T_1 = T_2$$

ή
$$K\lambda (I_a^{(1)})^2 = K\lambda \frac{0,12}{0,13} (I_a^{(1)})^2$$

ή
$$45^2 = \frac{0,12}{0,13} (I_a^{(1)})^2$$

ή
$$2.193,75 = (I_a^{(1)})^2$$

και
$$I_a^{(2)} = \sqrt{2.193,75} = 46,83 \text{ A}. \quad (16)$$

Η εξίσωση 13 με βάση την εξίσωση 16 γίνεται:

$$I_f^{(2)} = \frac{0,12}{0,13} \cdot 46,83 = 43,22 \text{ A}. \quad (17)$$

Η εξίσωση 7 με βάση την εξίσωση 17 γίνεται:

$$E_a^{(2)} = V_t - I_a^{(2)} R_a + I_f^{(2)} R_s$$

ή
$$E_a^{(2)} = 230 - (46,83 \cdot 0,1 + 43,22 \cdot 0,01) = 230 - 5,11 = 224,89 \text{ V}.$$

Τελικά, η εξίσωση 11 γίνεται:

$$\frac{225,05}{224,89} = \frac{45 \cdot 550}{43,22 \cdot n_2}$$

και
$$n_2 = 572 \text{ ΣΑΛ}.$$

Άσκηση 7.

Δίδεται εξαπολικός κινητήρας ΣΡ, ο οποίος τροφοδοτείται με τάση 240 V , ενώ απορροφά από το δίκτυο 45 A . Η αντίσταση του επαγωγικού τυμπάνου είναι $0,24 \Omega$. Ο κινητήρας περιστρέφεται με 610 ΣΑΛ . Να υπολογίσετε την ηλεκτρομαγνητική ροπή, T_e , του κινητήρα.

Λύση.

Θα υπολογίσουμε την εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e . Ισχύει:

$$P_e = E_a I_a = T_e \omega$$

και
$$T_e = \frac{E_a I_a}{\omega}.$$

Είναι: $E_a = V_t - I_a R_a = 240 - 45 \cdot 0,24 = 229,2 \text{ V}.$

Είναι: $\omega = 2\pi \frac{n}{60} = \frac{6,28 \cdot 610}{60} = 63,84 \text{ rad/s}.$

Η ροπή T_e είναι: $T_e = \frac{229,2 \cdot 45}{63,84} = 162 \text{ N-m}.$

Άσκηση 8.

Δίδεται κινητήρας ΣΡ με παράλληλη διέγερση, ο οποίος απορροφά 25 A από το δίκτυο, όταν τροφοδοτείται με τάση 220 V . Οι απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού είναι 450 W . Η αντίσταση του επαγωγικού τυμπάνου είναι $0,25 \Omega$ και η αντίσταση του τυλίγματος διεγέρσεως 110Ω . Να υπολογίσετε την απόδοση του κινητήρα.

Λύση.

Το ρεύμα διεγέρσεως είναι:

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} = \frac{220}{110} = 2 \text{ A.}$$

Οι ηλεκτρικές απώλειες στο τύλιγμα διεγέρσεως είναι: $I_f^2 R_f = 2^2 \cdot 110 = 440 \text{ W.}$

Οι ηλεκτρικές απώλειες στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου είναι: $I_a^2 R_a = I_a^2 \cdot 0,25.$

Έχομε: $I_a = I_L - I_f = 25 - 2 = 23 \text{ A}$

και $I_a^2 R_a = 23^2 \cdot 0,25 = 132,25 \text{ W}$

Οι συνολικές απώλειες ΣP_{an} είναι:

$$\Sigma P_{an} = 440 + 132,25 + 450 = 1.022,25 \text{ W.}$$

Η ισχύς εξόδου P_{out} είναι:

$$P_{out} = P_{in} - \Sigma P_{an} = 220 \cdot 25 - 1.022,25 = 4.477,75 \text{ W.}$$

Η ισχύς εισόδου του κινητήρα είναι:

$$P_{in} = V_t I_L = 220 \cdot 25 = 5.500 \text{ W.}$$

Η απόδοση του κινητήρα είναι:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{4.477,75}{5.500} \cdot 100 = 81,41\%$$

Άσκηση 9.

Δίδεται κινητήρας ΣΡ με παράλληλη διέγερση, ο οποίος απορροφά ρεύμα 30 A από το δίκτυο ΣΡ, όταν τροφοδοτείται με 220 V. Η ταχύτητα περιστροφής του είναι 1.100 ΣΑΛ. Η αντίσταση επαγωγικού τυμπάνου και η αντίσταση του τυλίγματος διεγέρσεως είναι 0,24 Ω και 120 Ω αντίστοιχα. Οι απώλειες λόγω τριβής και ανεμισμού είναι 250 W. Να υπολογίσετε:

1) Την εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e .

2) Την ροπή στον άξονα του κινητήρα.

3) Την απόδοση του κινητήρα.

Λύση.

1) Η εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e δίδεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$E_a I_a = T_e \omega \quad (1)$$

όπου $\omega = 2\pi \frac{n}{60}$ (2)

είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα σε rad/s.

Η εξίσωση 1 με βάση την εξίσωση 2 γίνεται:

$$T_e = \frac{E_a I_a}{2\pi \frac{n}{60}} \quad (3)$$

Η αντι-ΗΕΔ E_a δίδεται: $E_a = V_t - I_a R_a.$

Το ρεύμα το οποίο απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο είναι:

$$I_L = I_a + I_f = I_a + \frac{V_t}{R_f} \quad (4)$$

Από τα δεδομένα, η εξίσωση 4 γίνεται:

$$30 = I_a + \frac{220}{120}.$$

Λύνοντας ως προς I_a έχομε: $I_a = 28,16 \text{ A.}$

Η αντι-ΗΕΔ δίδεται:

$$E_a = 220 - 28,16 \cdot 0,24 = 213,24 \text{ V.}$$

Η εξίσωση 3 γίνεται:

$$T_e = \frac{213,24 \cdot 28,16}{6,28 \cdot 1.100} = 52,15 \text{ N-m.}$$

2) Η ισχύς στην έξοδο του κινητήρα, P_{out} , είναι:

$$P_{out} = T_{αξ} \omega$$

ή $P_{out} = P_e - P_\ell = 213,24 \cdot 28,16 - 250 = 5.755 \text{ W}$

όπου P_ℓ οι απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού.

Η ροπή στον άξονα, $T_{αξ}$, είναι:

$$T_{αξ} = \frac{P_{out}}{\omega} = \frac{5.755}{2\pi \cdot \frac{1.100}{60}} = 50 \text{ N-m.}$$

3) Η απόδοση η του κινητήρα είναι:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - \Sigma P_{an}}{P_{in}} = 1 - \frac{\Sigma P_{an}}{P_{in}}$$

$$\begin{aligned} \Sigma P_{an} &= I_a^2 R_a + I_f^2 R_f + P_\ell = \\ &= 190,32 + 402 + 250 = 842,32 \text{ W.} \end{aligned}$$

Ισχύει ότι $I_a = 28,16 \text{ A}$ και $R_a = 0,24 \Omega$. Οπότε

$$I_a^2 R_2 = (28,16)^2 \cdot 0,24 = 190,32 \text{ W.}$$

Το ρεύμα διεγέρσεως I_f είναι:

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} = \frac{220}{120} = 1,83 \text{ A,}$$

οπότε $I_f^2 R_f = (1,83)^2 \cdot 120 \cong 402 \text{ W.}$

Είναι: $\eta = 1 - \frac{842,32}{220 \cdot 30} = 1 - \frac{842,32}{6.600} = 0,87.$

Η ισχύς εξόδου P_{in} , είναι:

$$P_{in} = V_t I_L = 220 \cdot 30 = 6.600 \text{ W.}$$

Άσκηση 10.

Κινητήρας ΣΡ περιστρέφεται με 800 ΣΑΛ και τροφοδοτείται με τάση 230 V. Να υπολογιστεί η ταχύτητα του κινητήρα όταν τροφοδοτείται με τάση 200 V. Θεωρήστε ότι η μαγνητική ροή είναι 65% της αρχικής, ενώ αμελούνται οι πώσεις τάσεως στα κυκλώματα του επαγωγικού τυμπάνου.

Λύση.

Έστω Φ_1 η αρχική μαγνητική ροή. Η νέα μαγνητική ροή είναι $\Phi_2 = 0,65 \Phi_1$. Διακρίνουμε δύο καταστάσεις λειτουργίας του κινητήρα:

1) Όταν η τάση τροφοδοσίας είναι 230 V, η αντι-ΗΕΔ σε αυτήν την κατάσταση είναι:

$$E_a^{(1)} = K\Phi_1 n_1. \quad (1)$$

2) Όταν η τάση τροφοδοσίας είναι 200 V, η αντι-ΗΕΔ σε αυτήν την κατάσταση είναι:

$$E_a^{(2)} = K\Phi_2 n_2. \quad (2)$$

Είναι $I_a \cdot R_a = 0$ οπότε ισχύει:

$$V_t^{(1)} \equiv E_a^{(1)}, V_t^{(2)} \equiv E_a^{(2)}.$$

Διαιρώντας κατά μέλη την εξίσωση 1 με την εξίσωση 2:

$$\frac{V_t^{(1)}}{V_t^{(2)}} \equiv \frac{K\Phi_1 n_1}{K 0,65 \Phi_1 n_2}$$

$$\frac{230}{200} = \frac{800}{0,65 \cdot n_2}$$

$$n_2 = 1.070 \text{ ΣΑΛ.}$$

5.12 Ερωτήσεις – Εργασίες.

5.12.1 Μηχανές ΣΡ.

1) Ποια είναι η αρχή λειτουργίας μιας μηχανής ΣΡ;

2) Ποιος είναι ο ρόλος των κυρίων μαγνητικών πόλων μιας μηχανής ΣΡ;

3) Τι εννοούμε με τον όρο επαγωγικό τύμπανο σε μια μηχανή ΣΡ;

4) Σε ποιο μέρος μιας μηχανής ΣΡ τοποθετείται ο συλλέκτης και σε τι χρησιμεύει στις μηχανές ΣΡ;

5) Ποια είναι η διαφορά των βροχοτυλιγμάτων από τα κυματουλίγματα;

6) Περιγράψτε το φαινόμενο αντιδράσεως τυμπάνου. Πώς επηρεάζει τη συμπεριφορά της μηχανής ΣΡ;

7) Τι είναι η μεταγωγή;

8) Τι είναι οι βοηθητικοί πόλοι, σε ποιο μέρος μιας μηχανής ΣΡ τοποθετούνται και ποια είναι η προέλευση του ρεύματος τροφοδοσίας τους;

9) Τι είναι τα τυλίγματα αντισταθμίσεως και σε ποιο μέρος της μηχανής ΣΡ τοποθετούνται;

10) Για ποιον λόγο ο πυρήνας του δρομέα, μιας μηχανής ΣΡ, ελασματοποιείται;

5.12.2 Γεννήτριες ΣΡ.

1) Σε ποιες κατηγορίες κατατάσσονται οι γεννήτριες ΣΡ, ανάλογα με την προέλευση του ρεύματος διεγέρσεως;

2) Σχεδιάστε το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας γεννήτριας ΣΡ με ανεξάρτητη διέγερση. Ποιες είναι οι εξισώσεις λειτουργίας του;

3) Τι εκφράζει η σιατική χαρακτηριστική μίας γεννήτριας ΣΡ;

4) Σχεδιάστε την εξωτερική χαρακτηριστική μιας γεννήτριας ΣΡ με ανεξάρτητη διέγερση. Τι συμπεράσματα βγάξετε;

5) Σχεδιάστε το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση και τις αντίστοιχες εξισώσεις λειτουργίας.

6) Περιγράψτε τον μηχανισμό αυτοδιεγέρσεως μιας γεννήτριας με παράλληλη διέγερση.

7) Με ποιους τρόπους χάνεται ο παραμένον μαγνητισμός σε μια γεννήτρια ΣΡ με παράλληλη διέγερση;

8) Σχεδιάστε την εξωτερική χαρακτηριστική μιας γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση και να τη συγκρίνετε με την αντίστοιχη χαρακτηριστική της γεννήτριας με ανεξάρτητη διέγερση. Τι συμπεράσματα βγάξετε;

9) Μια γεννήτρια ΣΡ με διέγερση σειράς μπορεί

να λειτουργήσει χωρίς φορτίο;

10) Να σχεδιαστούν και να επεξηγηθούν τα ισοδύναμα κυκλώματα των γεννητριών με σύνθετη διέγερση.

11) Ποιες είναι οι συνθήκες παραλληλισμού των γεννητριών ΣΡ; Μπορεί να παραλληλιστεί μια γεννήτρια ΣΡ με παράλληλη διέγερση με μια γεννήτρια ΣΡ με διέγερση σειράς;

12) Σχεδιάστε και επιξηγήστε το διάγραμμα ροής ισχύος των γεννητριών ΣΡ. Ποια είναι η συνθήκη μέγιστης αποδόσεως μιας γεννήτριας ΣΡ;

5.12.3 Κινητήρες ΣΡ.

1) Ποιο είναι το πρόβλημα των κινητήρων ΣΡ κατά την εκκίνησή τους;

2) Σχεδιάστε το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διέγερση και τις αντίστοιχες εξισώσεις λειτουργίας.

3) Να σχεδιάσετε τη χαρακτηριστική $n = f(T)$ για $V_i = \text{σταθ.}$ και $R_a = \text{σταθ.}$, ενός κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διέγερση. Τι συμπεράσματα βγάζετε;

4) Να σχεδιάσετε και να επεξηγήσετε τη χαρακτηριστική $n = f(T)$ για $V_i = \text{σταθ.}$

5) Να σχεδιάσετε και να επεξηγήσετε τη χαρακτηριστική $n = f(I_a)$ για $V_i = \text{σταθ.}$ μιας γεννήτριας ΣΡ με διέγερση σειράς.

6) Να σχεδιάσετε και να επεξηγήσετε τη χαρακτηριστική $n = f(I_a)$ για $V_i = \text{σταθ.}$ και $R_a = \text{σταθ.}$ μιας γεννήτριας ΣΡ με παράλληλη διέγερση.

7) Να σχεδιάσετε και να επεξηγήσετε το διάγραμμα ροής ισχύος ενός κινητήρα ΣΡ.

8) Πώς συμπεριφέρεται ένας κινητήρας ΣΡ με παράλληλη διέγερση όταν κατά την εκκίνησή του διακοπεί το κύκλωμα διεγέρσεως;

9) Ποιοι είναι οι τρόποι ρυθμίσεως της ταχύτητας περιστροφής ενός κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διέγερση;

10) Ποια είναι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κινητήρων ΣΡ με μόνιμους μαγνήτες σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες ΣΡ;

5.13 Προτεινόμενες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Κινητήρας ΣΡ με παράλληλη διέγερση τροφοδοτείται με τάση 20 V, περιστρέφεται με 850 ΣΑΛ, ενώ το ρεύμα τυμπάνου είναι 50 A. Αν το φορτίο αυξηθεί με αποτέλεσμα την αύξηση της αναπτυσσόμενης ροπής κατά 25% και της μαγνητικής κατά 15%, να

υπολογίσετε την ταχύτητα περιστροφής στην οποία θα λειτουργεί ο κινητήρας. Δίδεται: $R_a = 0,025 \Omega$.

Άσκηση 2.

Κινητήρας ΣΡ λειτουργεί στις 750 ΣΑΛ με ρεύμα γραμμής 80 A και η τάση τροφοδοσίας 230 V. Η αντίσταση τυμπάνου είναι $0,14 \Omega$ και η αντίσταση τυλίγματος διεγέρσεως είναι $0,11 \Omega$. Υποθέστε ότι η ροή, η οποία αντιστοιχεί σε ρεύμα 20 A είναι 40% αυτής που αντιστοιχεί σε ρεύμα 80 A.

Να υπολογίσετε την ταχύτητα του κινητήρα για ρεύμα γραμμής 20 A.

Άσκηση 3.

Δίδεται κινητήρας ΣΡ με παράλληλη διέγερση, 230 V, ο οποίος απορροφά ρεύμα 40 A. Ο κινητήρας αναπτύσσει ισχύ 7 kW όταν περιστρέφεται με 6.500 ΣΑΛ. Αν η αντίσταση τυμπάνου είναι $0,4 \Omega$, να υπολογίσετε:

1) Την ροπή στον άξονα του κινητήρα.

2) Τις ηλεκτρικές απώλειες στο επαγωγικό τύμπανο.

3) Την ονομαστική απόδοση του κινητήρα και

4) τη σταθερά της ροπής.

Άσκηση 4.

Δίδεται κινητήρας ΣΡ με ανεξάρτητη διέγερση, 90 V, ο οποίος έχει $R_a = 31 \Omega$. Όταν η μαγνητική ροή Φ είναι η μεγαλύτερη δύναμη, στη λειτουργία χωρίς φορτίο περιστρέφεται με 3.822 ΣΑΛ. Ο κινητήρας πρέπει να συνδεθεί σε φορτίο, το οποίο ασκεί ροπή $T_L = 2,5 \text{ N}\cdot\text{m}$ στην ταχύτητα 3.822 ΣΑΛ.

Να καθορίσετε:

1) Τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα ώστε να λειτουργεί κανονικά με αυτό το φορτίο συνδεδεμένο στον άξονά του.

2) Το ρεύμα τυμπάνου στο σημείο λειτουργίας του κινητήρα, και

3) την ισχύ εισόδου και τις ηλεκτρικές απώλειες στο επαγωγικό τύμπανο.

Άσκηση 5.

Δίδεται κινητήρας ΣΡ διεγέρσεως σειράς, ο οποίος περιστρέφεται με 500 ΣΑΛ όταν τροφοδοτείται με τάση 200 V και απορροφά ρεύμα 25 A. Ο κινητήρας έχει: $R_a = 0,2 \Omega$ και $R_s = 0,6 \Omega$. Σε ποια ταχύτητα περιστροφής θα λειτουργήσει ο κινητήρας αν αναπτύσσει την ίδια ροπή όταν συνδεθεί παράλληλα προς το επαγωγικό τύμπανο αντιστάσεως 10Ω .

Άσκηση 6.

Δίδεται διπολικός κινητήρας ΣΡ, ο οποίος όταν λειτουργεί στο πλήρες φορτίο τροφοδοτείται με τάση 500 V, περιστρέφεται με 600 ΣΑΛ και απορροφά 10 A από δίκτυο συνεχούς. Αν το επαγωγικό τύμπανο αποτελείται από 500 αγωγούς και η μαγνητική ροή ανά πόλο εκφράζεται από τη σχέση $\Phi = 0,03\sqrt{I_a}$ Weber, όπου I_a το ρεύμα του κινητήρα, να υπολογίσετε την ταχύτητα του κινητήρα όταν η τάση τροφοδοσίας και η ροπή φορτίου ισούται με $\frac{1}{2}$ της αρχικής τιμής τους.

Άσκηση 7.

Κινητήρας ΣΡ με παράλληλη διέγερση τροφοδοτείται με τάση 220 V και περιστρέφεται με 850 ΣΑΛ, ενώ το ρεύμα τυμπάνου είναι 50 A. Αν το φορτίο αυξηθεί με αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής αναπτυσσόμενης ροπής κατά 25% και της μαγνητικής ροπής κατά 15%.

Να υπολογίσετε την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Είναι $R_a = 0,25 \Omega$.

Άσκηση 8.

Κινητήρας ΣΡ με διέγερση σειράς 500 V περιστρέφεται με 870 ΣΑΛ όταν απορροφά ρεύμα 25 A. Η συνολική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου και του τυλίγματος διεγέρσεως είναι 0,9 Ω. Ποια είναι η τιμή της ωμικής αντιστάσεως, R_x , η οποία πρέπει να συνδεθεί σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο, ώστε η ταχύτητα του κινητήρα να μειωθεί στις 500 ΣΑΛ, όταν η ροπή:

- 1) Διατηρείται σταθερή.
- 2) Είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής.
- 3) Είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας περιστροφής.

Άσκηση 9.

Η τάση τυμπάνου ενός κινητήρα ΣΡ με ανεξάρτητη διέγερση μεταβάλλεται από 0 μέχρι και 600 V. Στην

ονομαστική τάση τυμπάνου η ταχύτητα του κινητήρα είναι 1.600 ΣΑΛ. Αμελώντας όλες τις απώλειες:

1) Ποια είναι η τιμή του ρεύματος τυμπάνου όταν η ροπή στον άξονα του κινητήρα είναι 420 N-m (με σταθερή τάση τυμπάνου 600 V);

2) Αν η τάση τυμπάνου διατηρείται σταθερή και το ρεύμα διεγέρσεως μειώνεται μέχρι η ταχύτητα του κινητήρα να πάρει την τιμή 4.000 ΣΑΛ, ποια είναι η τιμή της ροπής στον άξονά του;

Άσκηση 10.

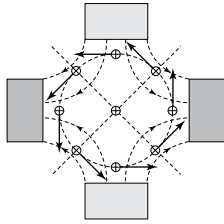
Ένας κινητήρας ΣΡ τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση 250 V, και απορροφά 6% της ισχύος την οποία απορροφά στις συνθήκες πλήρους φορτίου (15 kW). Υποθέτοντας ότι η μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή, όταν ο κινητήρας περνάει από τη λειτουργία χωρίς φορτίο στη λειτουργία με φορτίο, ενώ οι απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού είναι το 1% της ισχύος, την οποία απορροφά από το δίκτυο, να υπολογίσετε:

- 1) Το ρεύμα τυμπάνου.
- 2) Την ταχύτητα στη λειτουργία χωρίς φορτίο.
- 3) Την ταχύτητα στη λειτουργία με πλήρες φορτίο.
- 4) Την απόδοση του κινητήρα στη λειτουργία με πλήρες φορτίο.
- 5) Τη ροπή στον άξονα στη λειτουργία με πλήρες φορτίο.
- 6) Τη ροπή στον άξονα στη λειτουργία χωρίς φορτίο.

Άσκηση 11.

Η τάση τροφοδοσίας ενός κινητήρα ΣΡ με παράλληλη διέγερση είναι 400 V. Η αντίσταση τυμπάνου είναι 1,2 Ω και η αντίσταση του τυλίγματος διεγέρσεως είναι 300 Ω. Όταν περιστρέφεται με ροπή 70 N-m απορροφά ρεύμα 20 A.

Να υπολογίσετε την ταχύτητα του κινητήρα θεωρώντας ότι η ηλεκτρική ισχύς μετατρέπεται 100% σε μηχανική.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

6.1 Εισαγωγή.

Ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας έχουμε όταν η πεπλεγμένη μαγνητική ροή (βλ. παράγρ. 4.2) συνδέεται με μηχανική κίνηση. Τάση σε ένα κύκλωμα δημιουργείται, όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ κυκλώματος και μαγνητικού πεδίου. Όταν η πεπλεγμένη ροή μεταβάλλεται περιοδικά, τότε παράγεται ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ).

Στις σύγχρονες γεννήτριες οι πηγές παραγωγής μαγνητικής ροής είναι τα τυλίγματα διεγέρσεως, τα οποία τοποθετούνται στο περιστρεφόμενο μέρος τους που ονομάζεται **δρομέας**. Το σύνολο των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, μέσα στα οποία δημιουργούνται εναλλασσόμενες ημιτονοειδείς τάσεις, ονομάζεται **επαγωγικό τύμπανο**. Αυτό τοποθετείται στο ακίνητο μέρος της γεννήτριας που ονομάζεται **στάτης**.

Βασική προϋπόθεση για να λειτουργεί μια περιστρεφόμενη μηχανή ως σύγχρονη, είναι τα τυλίγματα διεγέρσεως να διαρρέονται από συνεχές ρεύμα. Στο σχήμα 6.1, παρουσιάζεται μια τυπική σύγχρονη γεννήτρια.

Με τον όρο **σύγχρονη γεννήτρια** εννοούμε, γενικά τη μηχανή της οποίας η ταχύτητα του περιστρε-

φόμενου μαγνητικού πεδίου είναι ίση με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

Η **διεγέρτρια** (σχ. 6.1) είναι μια γεννήτρια ΣΡ με παράλληλη διέγερση, η οποία τροφοδοτεί μέσω ενός ζευγαριού χαλκίνων δακτυλιδιών, τα τυλίγματα διεγέρσεως με συνεχές ρεύμα. Το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα με εκείνη του δρομέα, επάγοντας ένα σύστημα τάσεων και ρευμάτων στο επαγωγικό τύμπανο.

6.2 Κατηγορίες συγχρόνων γεννητριών.

Ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα έχουμε δύο κατηγορίες συγχρόνων γεννητριών:

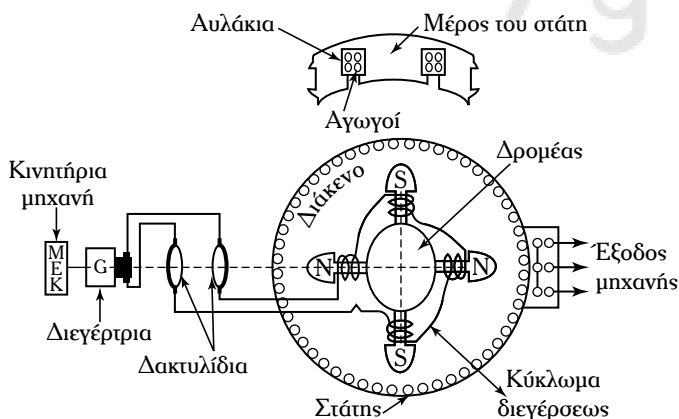
1) Τις **σύγχρονες γεννήτριες με εκτύπους** (προεξέχοντες) **μαγνητικούς πόλους** (σχ. 6.1). Οι αντίστοιχες γεννήτριες συνδέονται με κινητήρες μηχανές ντίζελ ή υδροστρόβιλο (σχ. 6.2α), και

2) τις **σύγχρονες γεννήτριες με κυλινδρικό δρομέα** (σχ. 6.2β). Οι αντίστοιχες γεννήτριες συνδέονται με στροβιλοκινητήρες (σχ. 6.2γ).

Στις ακόλουθες παραγράφους μελετάται η σύγχρονη μηχανή με κυλινδρικό δρομέα.

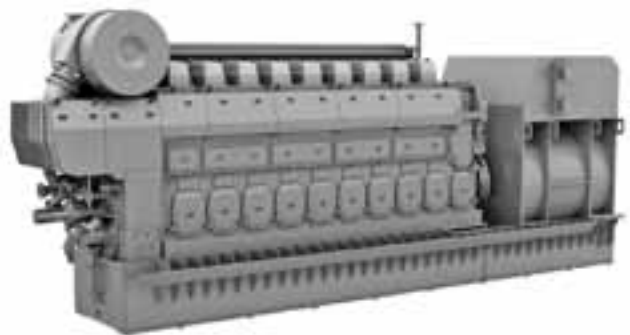
6.3 Συστήματα διεγέρσεως συγχρόνων γεννητριών.

Τα κυκλώματα διεγέρσεως του δρομέα τροφοδο-



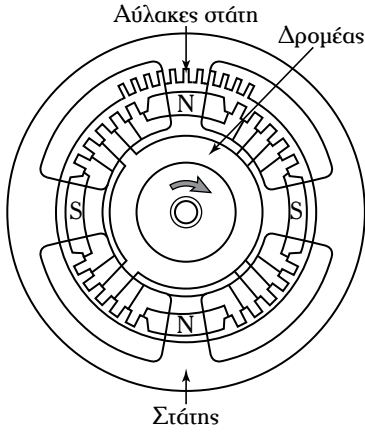
Σχ. 6.1

Σχηματική παράσταση σύγχρονης γεννήτριας, με προεξέχοντες μαγνητικούς πόλους.



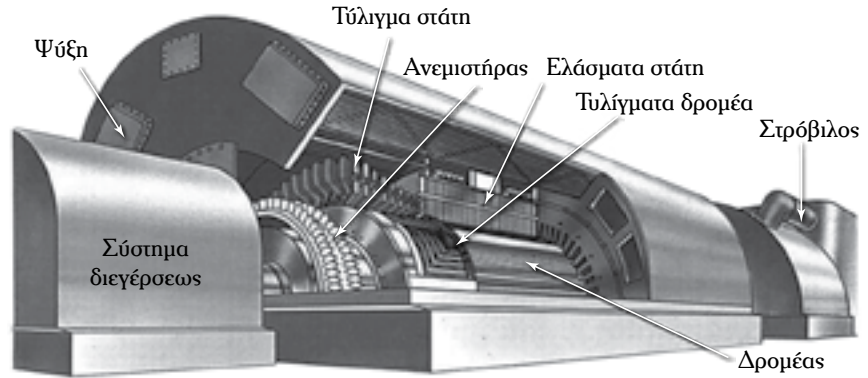
Σχ. 6.2α

Ντιζελογεννήτρια.



Σχ. 6.2β

Δρομέας και στάτης γεννήτριας με κυλινδρικό δρομέα.



Σχ. 6.2γ

Στροβιλογεννήτρια.

τούνται με συνεχές ρεύμα από:

- 1) Τη διεγέρτρια (σχ. 6.1 και παράγρ. 5.5.2).
- 2) Το στατό σύστημα διεγέρσεως (σχ. 6.3α).
- 3) Το περιστρεφόμενο σύστημα διεγέρσεως άνευ ψηκτρών (brushless) (σχ. 6.3β).

6.3.1 Στατό σύστημα διεγέρσεως.

Το ρεύμα διεγέρσεως παράγεται τροφοδοτώντας τα τυλίγματα διεγέρσεως της γεννήτριας με ένα σύστημα συνεχούς τάσεως, την οποία παίρνουμε από μία ανορθωτική διάταξη (γέφυρα Graetz ή από γέφυρα θυρίστορ). Το συνεχές ρεύμα στην έξοδο της γέφυρας διέρχεται ένα ζευγάρι ψηκτρών-δακτυλιδιών και στη συνέχεια κυκλοφορεί στο κύκλωμα διεγέρσεως της γεννήτριας (σχ. 6.3α).

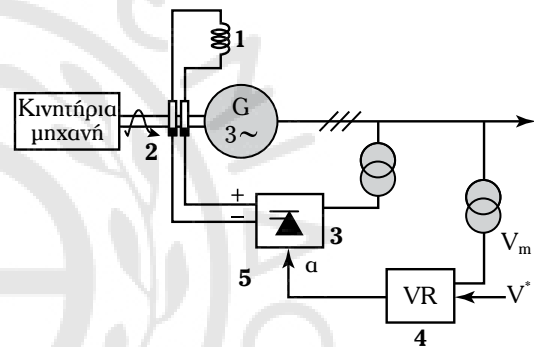
Το στατό σύστημα διεγέρσεως (σχ. 6.3α) περιλαμβάνει:

- Το κύκλωμα διεγέρσεως της γεννήτριας (1).
- Το σύστημα ψηκτρών-δακτυλιδιών (2).
- Την γέφυρα θυρίστορ (3).
- Τον ρυθμιστή τάσεως (4) και
- την γωνία ρυθμίσεως των θυρίστορ (5).

Με τον όρο στατό σύστημα διεγέρσεως εννοούμε ότι το ρεύμα διεγέρσεως παράγεται από κυκλωματικά στοιχεία και διατάξεις, οι οποίες δεν είναι περιστρεφόμενες.

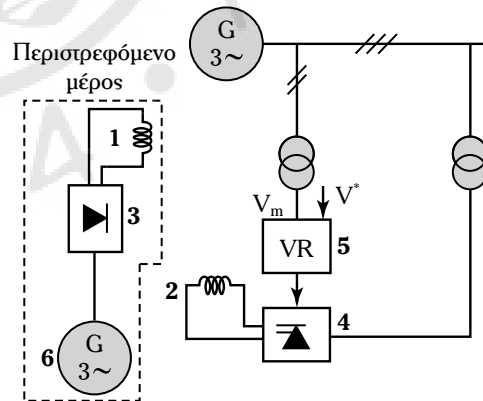
Ο ρυθμιστής τάσεως (VR) συγκρίνει την πραγματική παραγόμενη τάση της γεννήτριας και τη συγκρίνει με μία τάση αναφοράς V^* .

Το σφάλμα που προκύπτει απ' την παραπάνω σύγκριση προσδιορίζει την γωνία εναύσεως α , των θυρίστορ για να παραχθεί η κατάλληλη τάση διεγέρσεως.



Σχ. 6.3α

Στατό σύστημα διεγέρσεως.



Σχ. 6.3β

Σύστημα διεγέρσεως brushless.

Ένα μειονέκτημα του στατού συστήματος διεγέρσεως είναι η παρουσία των ψηκτρών και των δακτυλιδιών που περιορίζουν την ποσότητα ρεύματος και αυξάνουν το κόστος συντηρήσεως.

Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος στους ακρο-

δέκτες της γεννήτριας, η διέγερση μηδενίζεται. Προκειμένου να εξασφαλιστεί κατάλληλη διέγερση, στη σύγχρονη γεννήτρια, στη διάρκεια του βραχυκυκλώματος επιλέγεται μία κατάλληλη διάταξη, η οποία τροφοδοτεί τη γέφυρα των θυρίστορ έτσι, ώστε να παράγεται το ονομαστικό ρεύμα διεγέρσεως ακόμα και όταν η παραγόμενη τάση της γεννήτριας είναι μειωμένη (50% της ονομαστικής τάσεως).

6.3.2 Σύστημα διεγέρσεως άνευ ψηκτρών (brushless).

Τα μειονεκτήματα της παρουσίας των ψηκτρών και δακτυλιδιών, μέσω των οποίων το ρεύμα διεγέρσεως τροφοδοτεί το κύκλωμα διεγέρσεως της γεννήτριας εξαλείφονται όταν χρησιμοποιείται το περιστρεφόμενο σύστημα διεγέρσεως (σχ. 6.3β).

Ένα περιστρεφόμενο σύστημα διεγέρσεως περιλαμβάνει:

- Το κύριο τύλιγμα διεγέρσεως (1).
- Το βοηθητικό τύλιγμα διεγέρσεως (2).
- Το σύστημα περιστρεφόμενων διόδων (3).
- Την γέφυρα θυρίστορ (4).
- Τον ρυθμιστή τάσεως (5).
- Την βοηθητική γεννήτρια (6).

Ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο με το επιθυμητό ρεύμα διεγέρσεως στέλνεται στο βοηθητικό τύλιγμα διεγέρσεως της βοηθητικής γεννήτριας, με αποτέλεσμα να παράγεται ένα τριφασικό σύστημα τάσεων αναλόγων του ρεύματος διεγέρσεως. Το σύστημα των τριφασικών τάσεων ανορθώνεται από ένα σύστημα διόδων, και η παραγόμενη συνεχής τάση τροφοδοτεί τα κυκλώματα διεγέρσεως της σύγχρονης γεννήτριας.

6.4 Αρχή λειτουργίας της στοιχειώδους σύγχρονης γεννήτριας.

Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (βλ. παράγρ. 1.7) είναι η βασική αρχή λειτουργίας των συγχρόνων γεννητριών. Όταν υπάρχει σχετική κίνηση ενός αγωγού και μαγνητικού πεδίου, τότε επάγεται στον αγωγό μια ΗΕΔ. Η ίδια αρχή λειτουργίας ισχύει για τις γεννήτριες ΣΡ. Η διαφορά μεταξύ της σύγχρονης γεννήτριας και της γεννήτριας ΣΡ είναι ότι ο αγωγός τοποθετείται στο ακίνητο μέρος της μηχανής, ενώ το μαγνητικό πεδίο είναι περιστρεφόμενο.

Στο σχήμα 6.4α(α), θεωρούμε την σχετική κίνηση ενός αγωγού ως προς το μαγνητικό πεδίο, το οποίο προέρχεται από ένα ζευγάρι μαγνητικών πόλων.

Ο αγωγός, αρχικά, τοποθετείται στη θέση 1. Αυ-

τήν τη χρονική στιγμή η ταχύτητα v είναι παράλληλη στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές, και ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής ισούται με μηδέν:

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0.$$

Στη θέση 2 η ταχύτητα v είναι κάθετη στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές, οπότε επάγεται τάση στον αγωγό. Στη θέση 3 η ταχύτητα v είναι παράλληλη στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές και ισχύει:

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0.$$

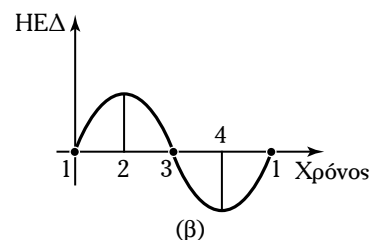
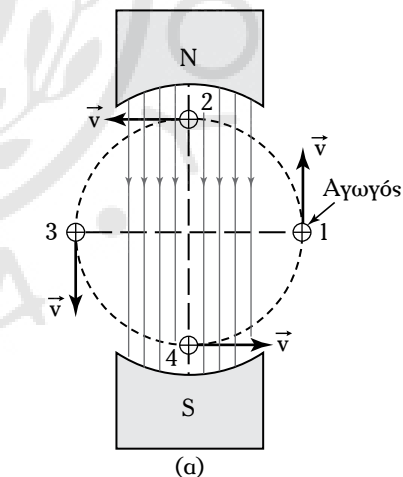
Στη θέση 4 η ταχύτητα v είναι κάθετη στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές και επάγεται τάση στον αγωγό.

Όταν ο αγωγός περιστρέφεται κατά 360 ηλεκτρικές μοίρες, η ΗΕΔ [σχ. 6.4α(β)] μεταβάλλεται με εναλλασσόμενο ημιτονοειδή νόμο.

6.4.1 Μηχανικές και ηλεκτρικές μοίρες.

Μηχανικές μοίρες ονομάζονται οι μοίρες, τις οποίες συμπληρώνει ο δρομέας, γενικά, μιας περιστρεφόμενης ηλεκτρικής μηχανής.

Ηλεκτρικές μοίρες ονομάζονται οι μοίρες τις



Σχ. 6.4α

(α) Στοιχειώδης γεννήτρια.
(β) Εναλλασσόμενο ημιτονοειδές τάση.

οποίες συμπληρώνουν τα διανύσματα των παραγομένων τάσεων και ρευμάτων σε μια περιστρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή. Στο σχήμα 6.4β, δίδεται μια 4-πολική γεννήτρια.

Η επαγόμενη τάση στον αγωγό για τις αντίστοιχες θέσεις δίδεται στο σχήμα 6.4γ.

Για την 4-πολική γεννήτρια ισχύει:

$$360 \text{ μηχανικές μοίρες} = 720 \text{ ηλεκτρικές μοίρες.}$$

Γενικά, αν P είναι ο αριθμός των μαγνητικών πόλων μιας γεννήτριας ισχύει:

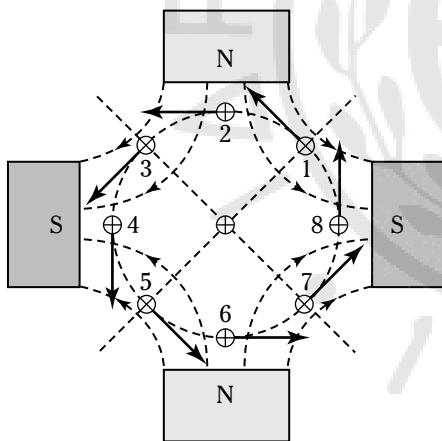
$$360 \text{ μηχανικές μοίρες} = 360 \frac{P}{2} \text{ ηλεκτρικές μοίρες.}$$

Αν θ_e είναι οι ηλεκτρικές μοίρες, θ_m οι μηχανικές μοίρες και P ο αριθμός των μαγνητικών πόλων, τότε ισχύει:

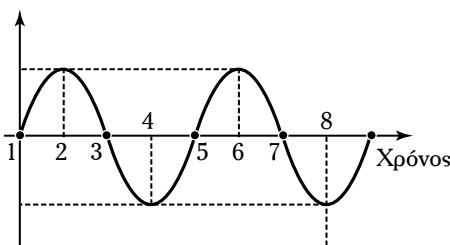
$$\theta_e = \left(\frac{P}{2}\right) \theta_m.$$

6.4.2 Συχνότητα της επαγόμενης τάσεως.

Αν P ο αριθμός των μαγνητικών πόλων, n η ταχύ-



Σχ. 6.4β
4-πολική γεννήτρια.



Σχ. 6.4γ
Εναλλασσόμενη ημιονοειδής τάση για την 4-πολική γεννήτρια.

τητα περιστροφής του δρομέα σε ΣΑΛ και f η συχνότητα της επαγόμενης τάσεως (ΗΕΔ), τότε ισχύει:

$$f = \frac{Pn}{120} \text{ Hz.}$$

Πράγματι, μια πλήρης μηχανική περιστροφή του δρομέα αντιστοιχεί σε $\frac{P}{2}$ ηλεκτρικές περιόδους της ΗΕΔ. Αν n η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ανά λεπτό, τότε ο δρομέας συμπληρώνει $\frac{n}{60}$ πλήρεις περιστροφές. Αλλά ισχύουν τα εξής:

Αν περίοδος/s = συχνότητα = f , τότε:

Συχνότητα f = (αριθμός περιόδων ανά πλήρη περιστροφή) · (αριθμός περιστροφών ανά δευτερόλεπτο)

$$f = \frac{P}{2} \cdot \frac{n}{60} \quad \text{ή} \quad f = \frac{Pn}{120} \text{ Hz.}$$

Υπάρχει μια σταθερή σχέση μεταξύ του αριθμού των μαγνητικών πόλων, της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και της συχνότητας των επαγομένων τάσεων (ΗΕΔ).

6.4.3 Σύγχρονη ταχύτητα (n_s).

Σε μία σύγχρονη γεννήτρια η ταχύτητα περιστροφής του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου ισούται με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, καλείται σύγχρονη ταχύτητα n_s , και είναι: $n_s = \frac{120f}{P}$.

Στον πίνακα 6.4, δίδεται η σχέση μεταξύ των αριθμών των μαγνητικών πόλων και της σύγχρονης

Πίνακας 6.4
Σχέση μεταξύ αριθμού μαγνητικών πόλων και σύγχρονης ταχύτητας για $f = 50 \text{ Hz}$ και 60 Hz .

Αριθμός μαγνητικών πόλων	2	4	8	12	24
Σύγχρονη ταχύτητα n_s σε ΣΑΛ για 50 Hz	3.000	1.500	750	500	250
Σύγχρονη ταχύτητα n_s σε ΣΑΛ για 60 Hz	3.600	1.800	900	600	300

ταχύτητας μιας σύγχρονης γεννήτριας για συχνότητα 50 Hz και 60 Hz.

6.5 Επαγωγικό τύμπανο σύγχρονης γεννήτριας.

Το επαγωγικό τύμπανο των συγχρόνων γεννητριών τοποθετείται στο στάτη και διαφέρει από το αντίστοιχο των μηχανών ΣΡ. Το ηλεκτρικό κύκλωμα μέσα στο οποίο δημιουργούνται τάσεις και ρεύματα αποτελείται από τρεις φάσεις, κάθε μια από τις οποίες αποτελείται από ένα σύνολο πηνίων συνδεδεμένων σε σειρά. Οι άξονες των τριών φάσεων σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 120° . Στις μηχανές ΣΡ υπάρχουν δύο τερματικοί ακροδέκτες, ενώ στις τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες έχουμε έξι ακροδέκτες των φάσεων, οι οποίες συνδέονται σε αστέρα ή τρίγωνο. Όταν το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο της σύγχρονης γεννήτριας «σαρώνει» τις τρεις φάσεις του επαγωγικού τυμπάνου, τότε σε κάθε φάση αναπτύσσεται μια ΗΕΔ E_f .

6.5.1 Χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων τυμπάνου.

Το μαγνητικό πεδίο του επαγωγικού τυμπάνου μιας σύγχρονης γεννήτριας παράγεται από τυλίγματα κατάλληλα διατεταγμένα, τα οποία διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Στη συνέχεια μελετώνται τα τυλίγματα τυμπάνου των συγχρόνων γεννητριών και τα βασικά τους χαρακτηριστικά στοιχεία με βάση τη φυσική τους και ηλεκτρολογική τους διάταξη.

Ένα στοιχειώδες τύλιγμα αποτελείται από ενεργούς αγωγούς, σπείρες, πηνία και στοιχεία.

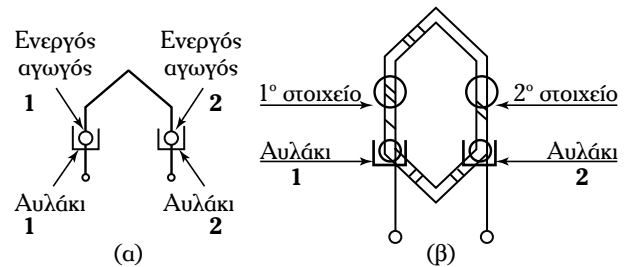
1) **Ενεργός αγωγός** είναι το μέρος του αγωγού, το οποίο όταν βρίσκεται υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου ενός πόλου δημιουργείται ΗΕΔ. Οι ενεργοί αγωγοί τοποθετούνται σε αύλακες (σχ. 6.2β), που διαμορφώνονται κατάλληλα στον στάτη.

2) Η **σπείρα** σχηματίζεται όταν ένας ενεργός αγωγός σε αύλακα συνδέεται με έναν άλλο ενεργό αγωγό σε έναν άλλον αύλακα [σχ. 6.5α(α)].

3) **Ομάδα τυλίγματος (πηνίο)** έχουμε όταν πολλοί ενεργοί αγωγοί συνδέονται σε σειρά [σχ. 6.5α(β)].

4) **Στοιχεία** ονομάζονται οι ενεργές πλευρές μίας ομάδας τυλίγματος, ενός πηνίου [σχ. 6.5α(β)].

4) **Πολικό βήμα**¹ είναι η απόσταση μεταξύ των αξόνων συμμετρίας δύο διαδοχικών μαγνητικών πόλων. Για μια πλήρη περιστροφή του δρομέα, δύο



Σχ. 6.5α

(α) Σπείρα, (β) ομάδα τυλίγματος (πηνίο).

μαγνητικοί πόλοι είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία ΗΕΔ 360 ηλεκτρικών μοιρών, τέσσερις μαγνητικοί πόλοι δημιουργούν ΗΕΔ 720 ηλεκτρικών μοιρών κ.ο.κ.. Ένας μαγνητικός πόλος συμβάλλει στη δημιουργία μίας επαγόμενης ΗΕΔ 180 ηλεκτρικών μοιρών.

Άσκηση.

Πόσα αυλάκια μπορούν να τοποθετούν υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πόλου, ο οποίος συμβάλλει στη δημιουργία 180 ηλεκτρικών μοιρών;

Λύση.

Θεωρούμε μια 2-πολική μηχανή, η οποία αποτελείται από δώδεκα αυλάκια επαγωγικού τυμπάνου. Σε έναν πόλο αντιστοιχούν $\frac{12}{2} = 6$ αυλάκια.

Ένα πολικό βήμα αντιστοιχεί σε έξι αυλάκια.

Έστω m ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο:

Πολικό βήμα = 180 ηλεκτρικές μοίρες = αυλάκια ανά πόλο (αριθμός αυλακιών / P) = m .

Ορίζουμε την γωνία γ , μεταξύ διαδοχικών αυλακιών ως εξής: $\gamma = \frac{180^\circ}{m}$.

$$\text{Αν } m = \frac{12}{2} = 6 \text{ τότε } \gamma = \frac{180^\circ}{6} = 30^\circ.$$

6.5.2 Είδη τυλιγμάτων τυμπάνου.

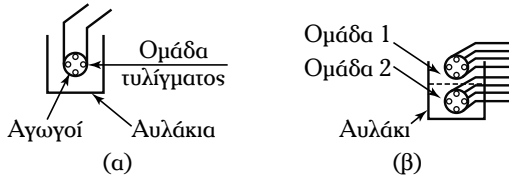
Τα τυλίγματα τυμπάνου μιας σύγχρονης γεννήτριας είναι τα εξής τρία:

1) Τυλίγματα απλής και διπλής στρώσεως.

Όταν σε ένα αυλάκι τοποθετείται μόνο μια ομάδα τυλίγματος, τότε το τύλιγμα ονομάζεται απλής στρώσεως [σχ. 6.5β(α)].

¹ Το πολικό βήμα μετρείται σε μηχανικές μοίρες ή ακτίνια για γεννήτριες με εκτύπους πόλους ή σε αυλάκια για διανεμημένα τυλίγματα.

Όταν ένα αυλάκι περιλαμβάνει δύο ομάδες τυλίγματος (διώροφο τύλιγμα) [σχ. 6.5β(β)] τότε έχουμε τύλιγμα διπλής στρώσεως.



Σχ. 6.5β

(α) Τύλιγμα απλής στρώσεως και
(β) τύλιγμα διπλής στρώσεως.

2) Τυλίγματα πλήρους και κλασματικού πολικού βήματος.

Όταν το βήμα κάθε ομάδας ισούται με το πολικό βήμα (180 ηλεκτρικές μοίρες) τότε έχουμε **τυλίγματα πλήρους βήματος** [σχ. 6.5γ(α)].

Όταν η ομάδα τυλίγματος του στάτη εκτείνεται σε τόξο μικρότερο από ένα πολικό βήμα, τότε το τύλιγμα ονομάζεται **κλασματικού βήματος** [σχ. 6.5γ(β)]. Το κλασματικό βήμα εκφράζεται πολλές φορές, με το ποσοστό του πολικού βήματος, το οποίο καλύπτει. Δίδεται σε ηλεκτρικές μοίρες.

Το τύλιγμα κλασματικού βήματος έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

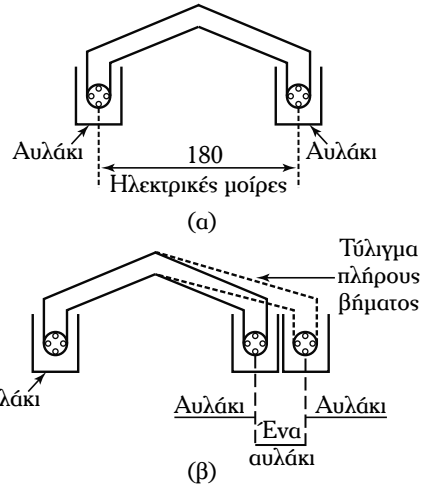
1) Το μήκος των αγωγών, οι οποίοι συνδέουν τα τέλη των ομάδων τυλίγματος είναι μικρότερο από το αντίστοιχο πλήρους βήματος. Οπότε, απαιτείται λιγότερος χαλκός.

1) Με την χρήση τυλιγμάτων κλασματικού βήματος είναι δυνατή η καταστολή της αρμονικής παραμορφώσεως της κυματομορφής του **μαγνητικού πεδίου στο διάκενο της μηχανής**². Αυτό συνεπάγεται μείωση της αρμονικής παραμορφώσεως και των επαγομένων τάσεων και ρευμάτων.

3) Συγκεντρωμένα και διανεμημένα τυλίγματα.

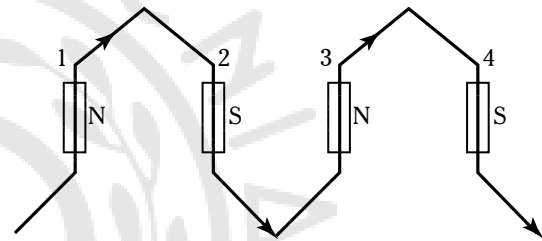
Τα τυλίγματα, ανεξάρτητα αν τοποθετούνται στο περιστρεφόμενο μέρος ή στο ακίνητο μέρος μιας σύγχρονης γεννήτριας, διακρίνονται σε **συγκεντρωμένα** και **διανεμημένα**.

Συγκεντρωμένα τυλίγματα έχουμε εκεί όπου ο αριθμός των αυλακιών του επαγωγικού τυμπάνου είναι ίσος με τον αριθμό των μαγνητικών πόλων. Στο



Σχ. 6.5γ

(α) Τύλιγμα πλήρους και (β) κλασματικού βήματος.



Σχ. 6.5δ

Ανάπτυγμα ενός απλού μονοφασικού συγκεντρωμένου τυλίγματος.

σχήμα 6.5δ δίδεται το ανάπτυγμα ενός απλού μονοφασικού συγκεντρωμένου τυλίγματος.

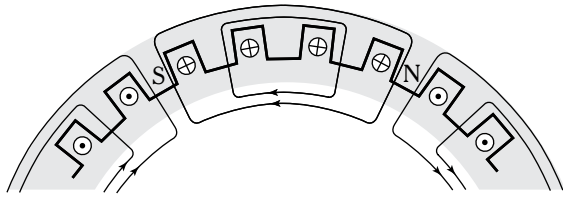
Μία πλευρά ενός πηνίου τοποθετείται σε ένα αυλάκι, το οποίο βρίσκεται υπό την επίδραση ενός πόλου, ενώ η άλλη πλευρά του πηνίου στο άλλο αυλάκι, το οποίο βρίσκεται υπό την επίδραση του επόμενου πόλου.

Σε μια σύγχρονη γεννήτρια, όταν το τύλιγμα τυμπάνου είναι συγκεντρωμένο, η τάση στους ακροδέκτες της είναι η μεγαλύτερη δυνατή, αλλά όχι ακριβώς ημιτονοειδής.

Τα διανεμημένα τυλίγματα διανέμονται σε περισσότερα αυλάκια ανά φάση και πόλο (σχ. 6.5ε).

Η διανομή των τυλιγμάτων γίνεται για να επιτευχθεί μορφή τάσεως ακροδεκτών της γεννήτριας, η οποία πρέπει να πλησιάζει στην ημιτονοειδή κύμανση.

²Όταν το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της γεννήτριας είναι μία εναλασσόμενη κυματομορφή, αυτή περιλαμβάνει μία εναλασσόμενη ημιτονοειδή κυματομορφή (βασική) και ένα πλήθος αρμονικών πολλαπλάσιας συχνότητας. Αυτές οι αρμονικές προκαλούν απώλειες πυρήνα, απώλειες λόγω δινορρευμάτων κ.λπ..



Σχ. 6.5ε

Διανεμημένα τυλίγματα σε αυλάκια.

6.5.3 Τρόποι συνδεσμολογίας των φάσεων μιας γεννήτριας πλοίου.

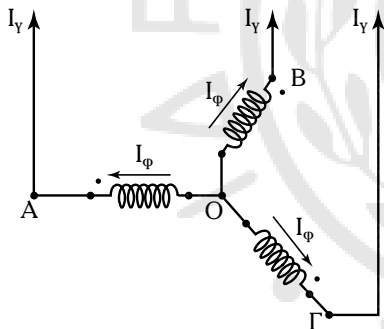
Η σύνδεση των φάσεων μιας γεννήτριας πλοίου γίνεται σε αστέρα ή τρίγωνο.

1) Σύνδεση φάσεων σε αστέρα.

Οι τρεις φάσεις της γεννήτριας τοποθετούνται έτσι, ώστε οι μαγνητικοί τους άξονες να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 120° (σχ. 6.5στ) και έναν συμμετρικό αστέρα.

Το σημείο Ο ονομάζεται **ουδέτερος κόμβος** της συνδεσμολογίας.

Γενικά, σε μία τριφασική συνδεσμολογία διακρίνουμε φασικά και πολικά μεγέθη τάσεων και ρευμάτων.



Σχ. 6.5στ

Συνδεσμολογία φάσεων σε αστέρα.

- Ρεύματα.

Φασικό ρεύμα, $I_φ$, ονομάζομε το ρεύμα το οποίο ρέει σε κάθε φάση.

Πολικό ρεύμα ή ρεύμα γραμμής, $I_γ$, ονομάζομε το ρεύμα το οποίο ρέει στους αγωγούς μεταφοράς. Στη συνδεσμολογία σε αστέρα το ρεύμα γραμμής ισούται με το ρεύμα φάσεως: $I_γ = I_φ$

- Τάσεις.

Στη συνδεσμολογία σε αστέρα διακρίνομε δύο τύπους τάσεων:

1) Την **πολική τάση** ($V_π$), η οποία εμφανίζεται στους ακροδέκτες των φάσεων και την

2) Την **φασική τάση** ($V_φ$), η οποία εμφανίζεται μεταξύ ενός ακροδέκτη φάσεως και του ουδέτερου κόμβου.

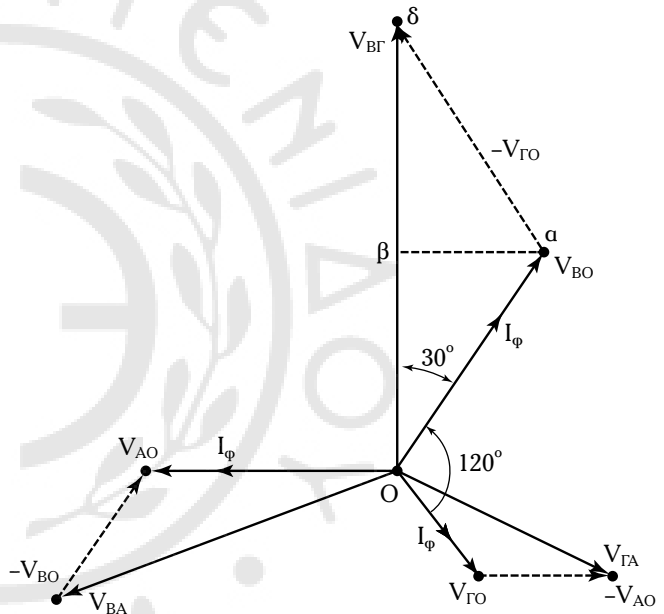
Η σχέση της πολικής και φασικής τάσεως προκύπτει από το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων, της συνδεσμολογίας αστέρα (σχ. 6.5ζ).

Έστω ότι αβ είναι η κάθετος στο διάνυσμα $V_{βΓ}$ οπότε διαμορφώνονται τα εξής δύο ίσα ορθογώνια τρίγωνα Οβα και βαδ.

Η πολική τάση $V_{βΓ}$ έχει μέτρο:

$$V_{βΓ} = Oδ = Oβ + βδ = 2(Oα) \text{ συν}30^\circ = \sqrt{3}(Oα) = \sqrt{3} V_{βΟ}.$$

Οπότε $V_{\text{πολική}} = \sqrt{3} V_{\text{φασική}}$.



Σχ. 6.5ζ

Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων συνδεσμολογίας αστέρα.

2) Σύνδεση φάσεων σε τρίγωνο.

Στο σχήμα 6.5η, δίδεται η συνδεσμολογία φάσεων σε τρίγωνο. Σε αυτήν τη συνδεσμολογία η πολική τάση είναι ίση με τη φασική:

$$V_{\text{πολική}} = V_{\text{φασική}}$$

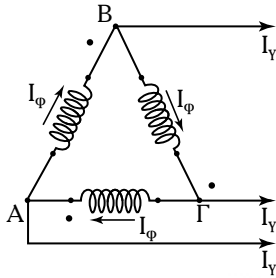
Στη συνδεσμολογία σε τρίγωνο υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι ρευμάτων: το φασικό ρεύμα ($I_φ$) και το ρεύμα γραμμής ($I_γ$).

Η σχέση μεταξύ φασικού και ρεύματος γραμμής προκύπτει από την ακόλουθη διανυσματική κατα-

σκευή τάσεων-ρευμάτων, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.5θ.

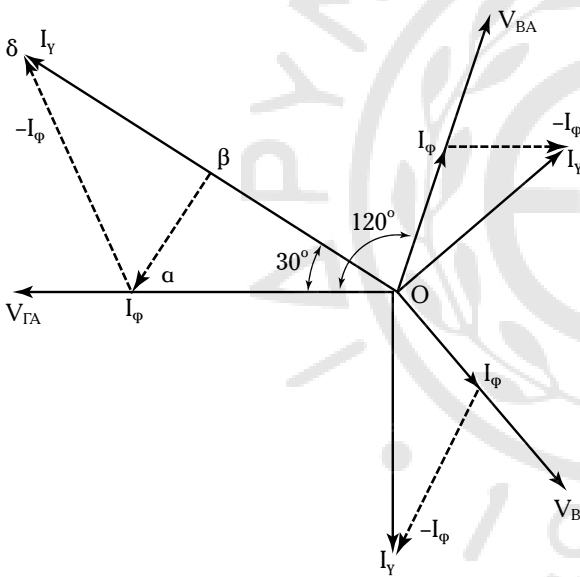
Είναι: $I_Y = O\delta = O\beta + \beta\delta = 2(O\alpha) \text{ συν}30^\circ = \sqrt{3} I_\phi$.

Οπότε ισχύει: $I_Y = \sqrt{3} I_\phi$.



Σχ. 6.5η

Συνδεσμολογία φάσεων σε τρίγωνο.



Σχ. 6.5θ

Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων συνδεσμολογίας τριγώνου.

6.6 Ανάπτυξη τάσεως σε μια σύγχρονη γεννήτρια.

Ακολουθούν διάφοροι τρόποι υπολογισμού της αναπόξεως της τάσεως σε μια σύγχρονη γεννήτρια.

6.6.1 Τρόπος 1^{ος}.

Έστω ότι Φ είναι η μαγνητική ροή ανά πόλο σε Wb, P ο αριθμός μαγνητικών πόλων, n_s ο σύγχρονος αριθμός στροφών σε ΣΑΛ, f η συχνότητα επαγο-

μένων ΗΕΔ σε Hz, Z ο συνολικός αριθμός αγωγών και Z_{ph} ο αριθμός αγωγών ανά φάση συνδεδεμένων σε σειρά.

Είναι: $Z_{ph} = \frac{Z}{3}$ αριθμός φάσεων = 3.

Έστω αγωγός ο οποίος τοποθετείται σε αυλάκι. Η μέση τιμή της επαγόμενης ΗΕΔ είναι: $e_{av} = \frac{d\Phi}{dt}$.

Για μια πλήρη περιστροφή του αγωγού έχουμε:

$$e_{av} = \frac{\text{Μαγνητική ροή σε μια πλήρη περιστροφή του δρομέα}}{\text{χρόνος}}$$

Για μια πλήρη περιστροφή του δρομέα n συνολική μαγνητική ροή είναι ΦΡ.

Ο χρόνος για μια πλήρη περιστροφή είναι $\frac{60}{n_s}$ s.

Έχουμε: $e_{av}/\text{αγωγός} = \frac{\Phi P}{(60/n_s)} = \Phi \frac{P n_s}{60}$. (6.1)

Αλλά, είναι: $f = \frac{P n_s}{120}$ και $\frac{P n_s}{60} = 2f$. (6.2)

Η εξίσωση 6.1 με βάση την εξίσωση 6.2 γίνεται:

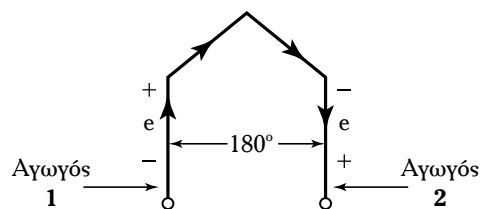
$$e_{av}/\text{αγωγός} = 2f\Phi \text{ V.} \quad (6.3)$$

Θεωρούμε ένα τύλιγμα πλήρους βήματος. Ένας αγωγός συνδέεται με έναν άλλο σε «απόσταση» 180 ηλεκτρικών μοιρών (σχ. 6.6α). Σε κάθε αγωγό αναπτύσσονται ρεύματα, τα οποία έχουν την ίδια διεύθυνση. Οι αγωγοί αποτελούν μία σπείρα, οπότε:

$$\begin{aligned} \text{ΗΕΔ}/\text{σπείρα} &= 2 (\text{ΗΕΔ}/\text{αγωγός}) = \\ &= 2 (2f\Phi) = 4f\Phi \text{ V.} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Έστω ότι T_{ph} είναι ο συνολικός αριθμός σπειρών ανά φάση, συνδεδεμένες σε σειρά. Η συνολική ΗΕΔ ανά φάση θα είναι το αλγεβρικό άθροισμα των ΗΕΔ ανά σπείρα:

1) Μέση τιμή E_{ph} = T_{ph} (μέση τιμή ΗΕΔ/σπείρα).



Σχ. 6.6α

Σπείρα πλήρους βήματος.

$$2) \text{ Μέση τιμή } E_{ph} = T_{ph} 4 f \Phi. \quad (6.5)$$

Στο εναλλασσόμενο ρεύμα χρησιμοποιείται η ενεργός τιμή του ρεύματος και της αντίστοιχης τάσεως. Ισχύει:

$$\text{Ενεργός τιμή της } E_{ph} = K_f \cdot \text{μέση τιμή της } E_{ph}.$$

Ο **συντελεστής κυματομορφής** K_f , είναι:

$$K_f = \frac{\text{Ενεργός τιμή}}{\text{Μέση τιμή}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$

Ισχύει: Ενεργός τιμή της $E_{ph} = 1,11 \cdot 4 f \Phi T_{ph}$ και τελικά η τάση που επάγεται σε μία φάση είναι:

$$E_{ph} = 4,44 f \Phi T_{ph} V. \quad (6.6)$$

- Συντελεστής βήματος K_p .

Στην πράξη επιλέγονται τα τυλίγματα κλασματικού βήματος. Μια πλευρά μιας ομάδας τυλίγματος (πηνίο) συνδέεται με την πλευρά μιας άλλης πλευράς ομάδας τυλίγματος σε απόσταση μικρότερη του πλήρους πολικού βήματος ή μικρότερη. Το πλήρες πολικό βήμα αντιστοιχεί σε 180 ηλεκτρικές μοίρες.

Θεωρούμε ένα πηνίο του οποίου τα στοιχεία απέχουν ένα βήμα ($180^\circ - \alpha$) μικρότερο από το πολικό βήμα 180° . Η ηλεκτρική γωνία α , μεταθέσεως των δύο στοιχείων ονομάζεται **γωνία κλασματικού βήματος** (σχ. 6.6β).

Έστω ότι οι ομάδες τυλίγματος κλασματικού βήματος αντιστοιχούν σε αριθμό αυλακιών. Αν γ είναι η γωνία μεταξύ δύο αυλακιών, τότε η γωνία κλασματικού βήματος α είναι ένα πολλαπλάσιο της γωνίας γ .

Η ηλεκτρική γωνία α είναι:

$$\alpha = 180^\circ - \text{πραγματική απόσταση ομάδων τυλιγμάτων.}$$

Έστω μία ομάδα τυλίγματος πλήρους βήματος με E τις αναπτυσσόμενες ΗΕΔ (σχ. 6.6γ).

$$\text{Ισχύει: } E_{ολ.} = E + E = 2E$$

όπου $E_{ολ.}$ η συνολική ΗΕΔ της ομάδας τυλίγματος πλήρους βήματος. Θεωρούμε τώρα ένα πηνίο με γωνία κλασματικού βήματος α .

Στο σχήμα 6.6δ δίδεται το διανυσματικό διάγραμμα των επαγομένων τάσεων (E) στα δύο στοιχεία ενός πηνίου κλασματικού βήματος χωριστά και σε όλο το πηνίο ($E_{ολ.}$). Από το σχήμα 6.6δ προκύπτει ότι $A\Gamma \perp OB$, οπότε:

$$\overline{O\Gamma} = \overline{GB} = \frac{E_{ολ.}}{2} \quad \text{και} \quad \angle BO\Delta = \frac{\alpha}{2}$$

$$\text{ή} \quad \text{συν}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{\overline{O\Gamma}}{\overline{OA}} = \frac{E_{ολ.}}{2E}.$$

Για τα τυλίγματα κλασματικού βήματος ισχύει:

$$E_{ολ.} = 2E \text{ συν}\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (6.7)$$

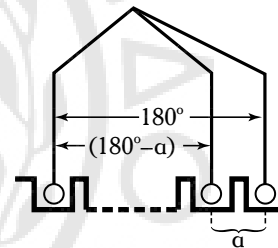
Η εξίσωση 6.7 εκφράζει τη συνολική ΗΕΔ στην περίπτωση τυλιγμάτων κλασματικού βήματος, που εξαρτάται απ' τη γωνία κλασματικού βήματος α .

Ο συντελεστής βήματος K_p είναι ο λόγος των επαγομένων ΗΕΔ όταν το τυλίγμα είναι κλασματικού βήματος και των επαγομένων ΗΕΔ όταν το τυλίγμα είναι πλήρους βήματος:

$$K_p = \frac{E_{ολ.} \text{ για κλασματικό βήμα}}{E_{ολ.} \text{ για πλήρες βήμα}} = \frac{2E \text{ συν}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2E}$$

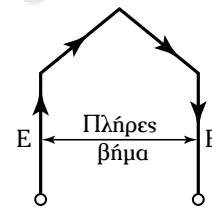
$$\text{ή} \quad K_p = \text{συν}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (6.8)$$

όπου α η γωνία κλασματικού βήματος.



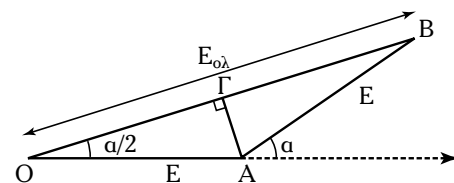
Σχ. 6.6β

Γωνία κλασματικού βήματος.



Σχ. 6.6γ

Ομάδα τυλίγματος πλήρους βήματος.



Σχ. 6.6δ

Διανυσματικό άθροισμα δύο ΗΕΔ.

- Συντελεστής κατανομής Kd.

Τα τυλίγματα πλήρους βήματος και τα συγκεντρωμένα αντίστοιχα τυλίγματα σπάνια χρησιμοποιούνται στην πράξη.

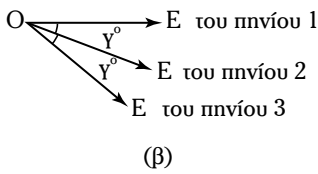
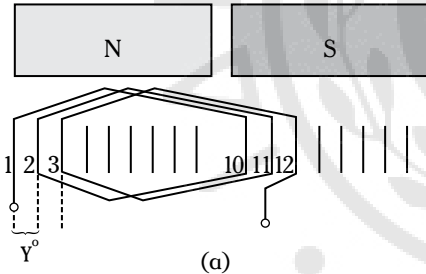
Θεωρούμε 18 αυλάκια μιας 2-πολικής σύγχρονης γεννήτριας. Τα αυλάκια ανά πόλο είναι $n = \frac{18}{2} = 9$.

Έστω ότι m, είναι τα αυλάκια ανά πόλο ανά φάση. Κάθε φάση περιλαμβάνει τρία (3) πηνία.

Οπότε ισχύει:
$$\gamma = \frac{180^\circ}{2} = 90^\circ.$$

Έστω ότι E είναι η επαγόμενη ΗΕΔ ανά πηνίο, όταν κάθε φάση περιλαμβάνει τρία πηνία. Έστω ότι όλες οι πλευρές των πηνίων είναι συγκεντρωμένες σε ένα αυλάκι, το οποίο βρίσκεται υπό την επίδραση ενός πόλου. Στα πηνία επάγονται ΗΕΔ. Η συνολική ΗΕΔ είναι το αλγεβρικό άθροισμα όλων των ΗΕΔ, οι οποίες επάγονται στα πηνία της φάσεως.

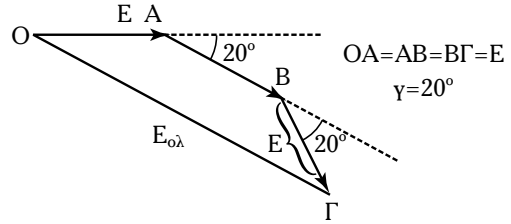
Θεωρούμε ένα διανεμημένο τύλιγμα (σχ. 6.6ε), με τρεις ομάδες τυλίγματος, κάθε πλευρά της οποίας τοποθετείται σε τρία αυλάκια ανά φάση και υπό την επίδραση ενός πόλου.



Σχ. 6.6ε

(α) Διανεμημένο τύλιγμα και
(β) διαφορά φάσεως των επαγομένων ΗΕΔ.

Στο σχήμα 6.6στ δίδεται το διανυσματικό διάγραμμα των επαγομένων ΗΕΔ και η συνολική ΗΕΔ στο διανεμημένο τύλιγμα. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η συνολική ΗΕΔ σε διανεμημένα τυλίγματα μειώνεται. Ο συντελεστής, ο οποίος εκφράζει τη μείωση της συνολικής ΗΕΔ σε διανεμημένα τυλίγματα, ονομάζεται **συντελεστής κατανομής Kd**.



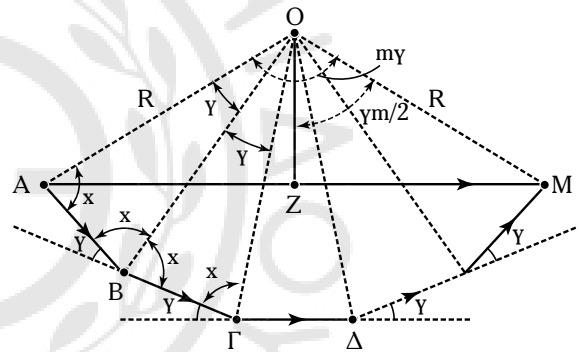
Σχ. 6.6στ

Διανυσματικό διάγραμμα ΗΕΔ σε διανεμημένο τύλιγμα.

Πρόταση.

Έστω, n αυλάκια ανά πόλο και m αυλάκια ανά πόλο ανά φάση. Έστω, m διανεμημένα πηνία υπό την επίδραση ενός πόλου ανά φάση, συνδεδεμένα σε σειρά. Θεωρούμε E την επαγόμενη ΗΕΔ ανά πηνίο.

Τότε όλες οι m ΗΕΔ, οι οποίες επάγονται στα πηνία έχουν διαφορά φάσεως $\gamma = \frac{180^\circ}{n}$. Να υπολογίσετε τη συνολική ΗΕΔ, E_{ολ}, στα άκρα AM (σχ. 6.6ζ).



Σχ. 6.6ζ

Διανυσματικό άθροισμα των m ΗΕΔ.

Απόδειξη.

Όλα τα τρίγωνα: OAB, OBG, ... είναι όμοια και ισοσκελή. Είναι $AB = BG = \Gamma\Delta = \dots = E$ και $E_{ολ} = AM$.

Έστω x η γωνία της βάσεως των τριγώνων,

είναι: $\angle OAB = \angle OBA = \angle OBG = \dots = x$

και $\angle AOB = \angle BO\Gamma = \dots = y.$

Για το τρίγωνο OAB ισχύει: $2x + y = 180^\circ.$

Είναι: $\angle OBA + \angle OBG + \angle \gamma = 180^\circ. \tag{6.9}$

Ισχύει: $2x + \gamma = 180^\circ. \tag{6.10}$

Από τις εξισώσεις 6.9 και 6.10 προκύπτει: $y = \gamma.$ Οπότε, έχουμε:

$\angle AOB = \angle BO\Gamma = \angle \Gamma O\Delta = \dots = \gamma.$

Αν Μ είναι το τελευταίο σημείο του πολυγώνου των διανυσμάτων, τότε:

$$\angle AOM = m\gamma \text{ και } AM = E_{\text{ολ}}.$$

Θεωρούμε το τρίγωνο AOB (σχ. 6.6n):

Έστω ΟΣ η κάθετος (και διχοτόμος) στην πλευρά AB.

$$\text{Είναι: } \ell(AB) = E, \ell(A\Sigma) = \frac{E}{2} \text{ και } \ell(OA) = R.$$

$$\text{Ισχύει: } n\mu\left(\frac{\gamma}{2}\right) = \frac{A\Sigma}{OA} = \frac{\frac{E}{2}}{R}$$

$$\text{και: } E = 2Rn\mu\left(\frac{\gamma}{2}\right). \quad (6.11)$$

Θεωρούμε το τρίγωνο OAM (σχ. 6.6ζ), όπου η ΟΖ είναι κάθετος στην AM. Τότε έχουμε:

$$\angle A O Z = \angle Z O M = \frac{m\gamma}{2}$$

$$\ell(AM) = E_{\text{ολ}}$$

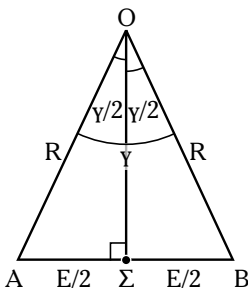
$$\angle(AZ) = \frac{E_{\text{ολ}}}{2}$$

$$n\mu\left(\frac{m\gamma}{2}\right) = \frac{AZ}{OA} = \frac{\frac{E_{\text{ολ}}}{2}}{R}$$

$$E_{\text{ολ}} = 2Rn\mu\left(\frac{m\gamma}{2}\right). \quad (6.12)$$

Η εξίσωση 6.12, δίνει τη συνολική επαγόμενη ΗΕΔ, όταν τα πηνία είναι διανεμημένα. Όταν όλα τα m πηνία αποτελούν ένα συγκεντρωμένο τύλιγμα, τότε: $E_{\text{ολ}} = mE$. Οπότε λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση 6.11 έχουμε:

$$E_{\text{ολ}} = 2mRn\mu\left(\frac{\gamma}{2}\right). \quad (6.13)$$



Σχ. 6.6n
Τρίγωνο OAB.

Αυτή είναι η συνολική επαγόμενη τάση σε συγκεντρωμένο τύλιγμα.

Ο συντελεστής κατανομής K_d , είναι ο λόγος της συνολικής ΗΕΔ όταν τα πηνία είναι διανεμημένα και της συνολικής ΗΕΔ όταν τα πηνία είναι συγκεντρωμένα:

$$K_d = \frac{E_{\text{ολ, όταν τα πηνία είναι διανεμημένα}}}{E_{\text{ολ, όταν τα πηνία είναι συγκεντρωμένα}}} = \frac{2Rn\mu\left(\frac{m\gamma}{2}\right)}{2mRn\mu\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \quad \text{ή} \quad K_d = \frac{n\mu\left(\frac{m\gamma}{2}\right)}{m\mu\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \quad (6.14)$$

όπου: m τα αυλάκια ανά πόλο και ανά φάση, γ η γωνία αυλακίου $= \frac{180^\circ}{n}$ και n τα αυλάκια ανά πόλο.

Η επαγόμενη ΗΕΔ ανά φάση στην περίπτωση των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων πλήρους βήματος είναι: $E_{\text{ph}} = 4,44 f \Phi T_{\text{ph}} V$.

Στην περίπτωση των διανεμημένων τυλιγμάτων κλασματικού βήματος έχουμε:

$$E_{\text{ph}} = 4,44 K_p K_d f \Phi T_{\text{ph}} V. \quad (6.15)$$

Για τύλιγμα πλήρους βήματος: $K_p = 1$.

Για συγκεντρωμένο τύλιγμα: $K_d = 1$.

- Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Το επαγωγικό τύμπανο μιας τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας έχει 120 αυλάκια. Η γεννήτρια είναι 8-πολική. Να υπολογίσετε τον συντελεστή κατανομής K_d .

Λύση.

$$\text{Έχομε } n = \frac{\text{αυλάκια}}{\text{πόλοι}} = \frac{120}{8} = 15$$

$$m = \frac{\text{αυλάκια/πόλοι/φάση}}{3} = \frac{15}{3} = 5$$

$$\gamma = \frac{180^\circ}{n} = \frac{180^\circ}{15} = 12^\circ$$

και
$$K_d = \frac{n\mu \left(\frac{m\gamma}{2}\right)}{m\eta\mu \left(\frac{\gamma}{2}\right)} = \frac{n\mu \left(5 \frac{12}{2}\right)}{5\eta\mu \left(\frac{12}{2}\right)} = 0,957.$$

Άσκηση 2.

Δίδεται τριφασική 4-πολική σύγχρονη γεννήτρια, η οποία έχει 36 αυλάκια στο επαγωγικό τύμπανο. Η γεννήτρια χρησιμοποιεί τυλίγματα κλασματικού βήματος με διαφορά ένα αυλάκι από εκείνα του πλήρους βήματος. Να υπολογίσετε τον συντελεστή K_p .

Λύση.

Είναι:
$$n = \frac{\text{αυλάκια}}{\text{πόλοι}} = \frac{36}{4} = 9$$

$$\gamma = \frac{180^\circ}{9} = 20^\circ.$$

Αν $\alpha = 20^\circ$ τότε:

$\alpha =$ γωνία κλασματικού βήματος $= 20^\circ$

$$K_p = \text{συν}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \text{συν}(10^\circ) = 0,9848.$$

6.6.2 Τρόπος 2^{ος}: Ανάπτυξη τάσεως σε συγκεντρωμένο τυλίγμα.

Για τον υπολογισμό της επαγόμενης τάσεως στα συγκεντρωμένα τυλίγματα μιας σύγχρονης γεννήτριας γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές.

1) Θεωρούμε τη στοιχειώδη σύγχρονη γεννήτρια με κυλινδρικό δρομέα. Πράγματι, θεωρούμε μηχανές με μικρό μήκος διακένου και σταθερό σε σχέση με την διάμετρο του δρομέα, οπότε η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι σταθερή κατά μήκος του διακένου.

2) Θεωρούμε το συγκεντρωμένο τυλίγμα με πλευρές (a, a') (σχ. 6.6θ), οι οποίες απέχουν μεταξύ τους 180 ηλεκτρικές μοίρες.

3) Το μαγνητικό πεδίο υφίσταται αποκλειστικά στον διάκενο χώρο της μηχανής.

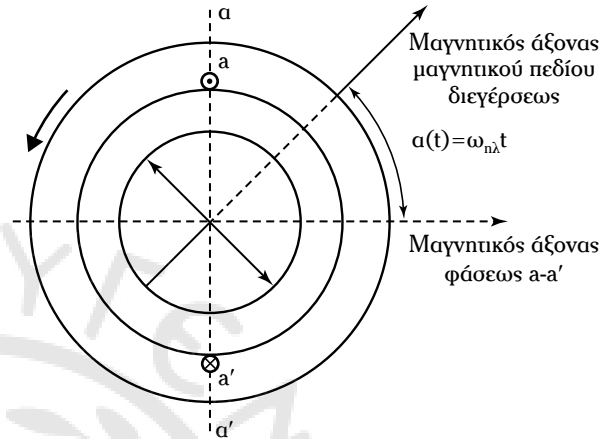
4) Η μαγνητική ροή στο διάκενο χώρο είναι ακτινική.

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής B, θεωρείται ημιτο-

νοειδής (σχ. 6.6ι), στον διάκενο χώρο της μηχανής.

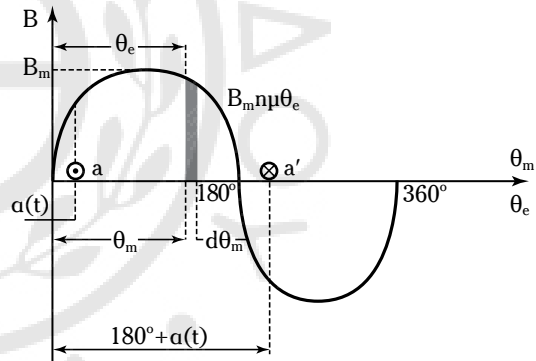
- Υπολογισμός της μαγνητικής ροής $\Phi(t)$.

Η μαγνητική ροή εμπλέκει το τυλίγμα a-a' τη χρονική στιγμή την οποία η πλευρά a βρίσκεται στη θέση $\alpha(t)$ (σχ. 6.6ια).



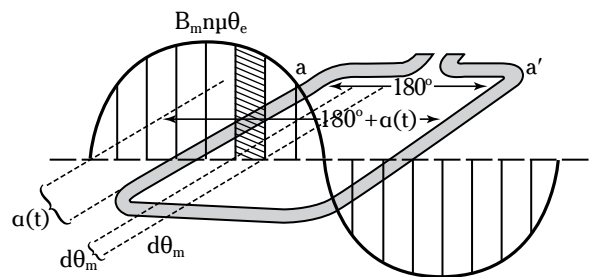
Σχ. 6.6θ

Στοιχειώδης σύγχρονη γεννήτρια.



Σχ. 6.6ι

Πυκνότητα μαγνητικής ροής B, η οποία σαρώνει το τυλίγμα a-a' του επαγωγικού τυμπάνου.



Σχ. 6.6ια

Θέση του τυλίγματος a-a' την χρονική στιγμή t ως προς την πυκνότητα μαγνητικής ροής B.

Η στοιχειώδης μαγνητική ροή $d\Phi$ στην περιοχή της θέσεως θ_m είναι:

$$d\Phi = B(\theta_m) dA. \quad (6.16)$$

$$\text{Είναι:} \quad dA = \frac{1}{2} l D d\theta_m \quad (6.17)$$

όπου: l το αξονικό μήκος του στάτι (οι ενεργές πλευρές του τυλίγματος $a-a'$), D η διάμετρος της μηχανής και θ_m οι μηχανικές μοίρες, τις οποίες διαγράφει ο δρομέας της μηχανής.

$$\text{Ισχύει:} \quad d\theta_m = \frac{2}{P} d\theta_e. \quad (6.18)$$

Η εξίσωση 6.16, με βάση τις εξισώσεις 6.17 και 6.18, γίνεται:

$$d\Phi = B(\theta_e) \frac{1}{2} l D d\theta_e. \quad (6.19)$$

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής B είναι ημιτονοειδής:

$$B = B(\theta_e) = B_m \eta \mu \theta_e. \quad (6.20)$$

Η εξίσωση 6.19, με βάση την εξίσωση 6.20 γίνεται:

$$d\Phi = B_m \eta \mu \theta_e \frac{1}{2} l D \frac{2}{P} d\theta_e \quad (6.21)$$

όπου B_m η μέγιστη τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής B .

Από την εξίσωση 6.21, προκύπτει:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{B_m l D}{P} \int_a^{a+180^\circ} \eta \mu \theta_e d\theta_e = \frac{B_m l D}{P} (-\sigma \nu \theta_e) \Big|_a^{a+180^\circ} = \\ &= \frac{B_m l D}{P} \{-[\sigma \nu(a+180^\circ) - \sigma \nu a]\} = \frac{B_m l D}{P} 2 \sigma \nu a. \end{aligned} \quad (6.22)$$

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής B είναι μια ημιτονοειδής κύμανση, η οποία περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα ω_s . Είναι $a = \omega_s t$, οπότε η εξίσωση 6.22 γίνεται:

$$\Phi(t) = \frac{2B_m l D}{P} \sigma \nu \omega_s t$$

$$\text{ή} \quad \Phi(t) = \Phi \sigma \nu \omega_s t \quad (6.23)$$

όπου $\Phi = \frac{2B_m l D}{P}$ η συνολική μαγνητική ροή ανά πόλο.

- Υπολογισμός της επαγόμενης τάσεως στα άκρα του τυλίγματος $a-a'$.

Σύμφωνα με τον Νόμο του Faraday, η επαγόμενη

τάση στα άκρα του τυλίγματος $a-a'$ N σπειρών είναι:

$$e(t) = - \frac{Nd\Phi(t)}{dt}. \quad (6.24)$$

Η εξίσωση 6.24, με βάση την εξίσωση 6.23, γίνεται:

$$e(t) = N\omega_s \Phi \eta \mu \omega_s. \quad (6.25)$$

Η μέγιστη τιμή E_m της $e(t)$ είναι:

$$E_m = N\omega_s \Phi. \quad (6.26)$$

Η ενεργός τιμή της $e(t)$ είναι:

$$E_{ev} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 4,44 N \Phi f. \quad (6.27)$$

$$\text{Είναι:} \quad \omega_s = 2\pi f \text{ rad/s.}$$

6.7 Αντίδραση τυμπάνου σύγχρονης γεννήτριας.

Το φαινόμενο αντιδράσεως τυμπάνου στις μηχανές ΣΡ μπορεί να εξουδετερωθεί τελείως ή κατά το μεγαλύτερο μέρος.

Στις σύγχρονες γεννήτριες το φαινόμενο αντιδράσεως τυμπάνου δημιουργεί αντιδράσεις που δεν μπορούν να αμεληθούν.

Η αντίδραση τυμπάνου στις σύγχρονες γεννήτριες εξαρτάται από τη φύση του φορτίου που τροφοδοτούν.

Η αντίδραση τυμπάνου περιγράφεται με την εισαγωγή μιας ΗΕΔ \dot{E}_{ar} , που προστίθεται διανυσματικά στην ΗΕΔ \dot{E}_f του κυκλώματος διεγέρσεως του δρομέα.

Αν $\dot{\Phi}_{ar}$ η μαγνητική ροή αντιδράσεως τυμπάνου και $\dot{\Phi}_f$ η μαγνητική ροή του κυκλώματος διεγέρσεως της γεννήτριας, τότε η συνολική μαγνητική ροή $\dot{\Phi}$ είναι:

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_f + \dot{\Phi}_{ar}.$$

Τελικά, επειδή το μαγνητικό πεδίο αντιδράσεως τυμπάνου είναι ανάλογο του ρεύματος τυμπάνου I_a , και το επαγωγικό τύμπανο έχει πηνία μπορούμε να υποθέσουμε ότι η ΗΕΔ \dot{E}_{ar} προέρχεται από επαγωγή από ένα πηνίο με υποθετική αντίδραση $X_{ar} = \omega L_{ar}$, όπου L_{ar} ο συντελεστής αυτεπαγωγής του υποθετικού πηνίου.

Η συνολική ΗΕΔ \dot{E} , η οποία αναπτύσσεται στο εσωτερικό της σύγχρονης γεννήτριας όταν λειτουργεί με φορτίο είναι:

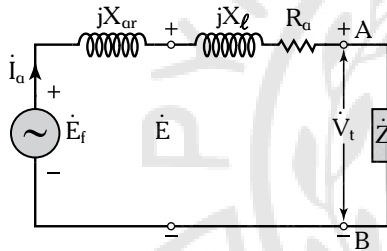
$$\dot{E} = \dot{E}_f + \dot{E}_{ar}.$$

6.8 Ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας.

Στο σχήμα 6.8α δίδεται το πλήρες ανά φάση ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας. Σε αυτό το κύκλωμα εκπροσωπούνται όλα τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα τα οποία αναπτύσσονται σε μια σύγχρονη γεννήτρια όταν αυτή λειτουργεί με φορτίο.

Τα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη του κυκλώματος του σχήματος 6.8α είναι τα ακόλουθα:

\dot{E}_f η τάση διεγέρσεως η οποία παράγεται από τα κυκλώματα διεγέρσεως, των περιστρεφόμενων μαγνητικών πόλων του δρομέα, X_{ar} η αντίδραση τυμπάνου, \dot{E} η ολική ΗΕΔ της γεννήτριας, X_ℓ η αντίδραση σκεδάσεως του επαγωγικού τυμπάνου που οφείλεται στο φαινόμενο της ροής σκεδάσεως του στάτη, R_a η ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων του επαγωγικού τυμπάνου, \dot{I}_a το ρεύμα τυμπάνου και \dot{V}_t η τερματική τάση στους ακροδέκτες Α και Β της γεννήτριας.



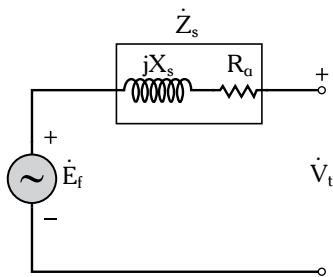
Σχ. 6.8α

Πλήρες ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας.

Από το κύκλωμα του σχήματος 6.8α προκύπτει το απλοποιημένο, ανά φάση, ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας (σχ. 6.8β).

Με το σύμβολο X_s (σύγχρονη αντίδραση) περιστάνομε το άθροισμα των αντιδράσεων X_{ar} και X_ℓ .

Είναι $\dot{Z}_s = R_a + jX_s$ η **σύγχρονη σύνθετη** αντίσταση της σύγχρονης γεννήτριας.



Σχ. 6.8β

Απλοποιημένο ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας.

6.9 Ισοζύγιο ισχύων και απόδοση της σύγχρονης γεννήτριας.

Η ισχύς εισόδου P_{in} , μιας σύγχρονης γεννήτριας είναι μηχανική, ενώ η ισχύς εξόδου P_{out} , είναι ηλεκτρική.

Η διαφορά αυτών των ισχύων είναι οι απώλειες P_a :

$$P_a = P_{in} - P_{out} \tag{6.28}$$

Οι απώλειες P_a , άθροισμα των ακολούθων τύπων απωλειών:

1) **Μηχανικές απώλειες** ή **απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού** (P_m), οι οποίες είναι σταθερές γιατί εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας που είναι σταθερή.

2) **Απώλειες πυρήνα** (P_c), οι οποίες παράγονται, σχεδόν αποκλειστικά, στον στάτη.

3) **Κατανεμημένες απώλειες** (P_{stray}), που είναι πρόσθετες απώλειες, οι οποίες οφείλονται στην αύξηση των ροών σκεδάσεως σε συνάρτηση με το φορτίο και τις μεγάλες τιμές της συχνότητας. Αυτές οι απώλειες προσδιορίζονται δύσκολα και λαμβάνονται, συνήθως, ίσες με το 1% του ονομαστικού φορτίου της γεννήτριας.

Στο σχήμα 6.9 που δίδεται το τυπικό **διάγραμμα ροής ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας** παρουσιάζονται οι απώλειες χαλκού του στάτη P_{cust} , οι οποίες αναπτύσσονται στα τυλιγμάτα του στάτη:

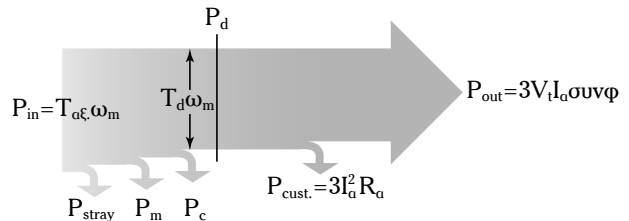
$$P_{cust} = 3I_a^2 R_a$$

όπου: I_a το ρεύμα τυμπάνου ανά φάση και R_a η ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων ανά φάση της γεννήτριας.

P_d είναι η εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ισχύς.

Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας P_{out} , δίδεται σε συνάρτηση των φασικών μεγεθών των τάσεων και ρευμάτων, ως εξής:

$$P_{out} = 3V_t I_a \cos\phi \tag{6.29}$$



Σχ. 6.9

Διάγραμμα ροής ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας.

Οι κατανεμημένες απώλειες, οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες πυρήνα θεωρούνται σταθερές απώλειες, ενώ οι απώλειες χαλκού του στάτη είναι μεταβλητές απώλειες και οφείλονται στο φαινόμενο Joule, το οποίο αναπτύσσεται στις φάσεις της γεννήτριας όταν διαρρέονται από το ρεύμα τυμπάνου.

Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας σε συνάρτηση με τα πολικά μεγέθη των τάσεων και των ρευμάτων είναι:

$$P_{\text{out}} = \sqrt{3}V_{\text{π}}I_{\text{γ}}\cos\varphi \quad (6.30)$$

όπου: $V_{\text{π}}$ η πολική τάση και $I_{\text{γ}}$ το ρεύμα γραμμής.

Η απόδοση της γεννήτριας επί τοις εκατό δίδεται ως εξής:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \cdot 100 \quad (6.31)$$

$$\hat{\eta} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{\sqrt{3}V_{\text{π}}I_{\text{γ}}\cos\varphi}{\sqrt{3}V_{\text{π}}I_{\text{γ}}\cos\varphi + \sum P_{\alpha}} \quad (6.32)$$

όπου $\sum P_{\alpha}$ οι συνολικές απώλειες της σύγχρονης γεννήτριας.

6.10 Εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ισχύς και ροπή σε σύγχρονη γεννήτρια.

Η μηχανική ισχύς (σχ. 6.9), η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική (εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ισχύς, P_d) δίδεται ως εξής:

$$P_d = T_d\omega_m = 3E_f I_a \cos\psi \quad (6.33)$$

όπου: ψ η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων E_f και I_a και T_d είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή.

Πρόταση.

Δίδεται τριφασική σύγχρονη γεννήτρια, για την οποία αμελείται η ωμική αντίσταση ανά φάση, που τροφοδοτεί ωμικο-επαγωγικό φορτίο.

Να αποδειχθεί ότι:

$$P_d = \frac{3V_t E_f}{X_s} \eta \mu\delta. \quad (6.34)$$

Απόδειξη.

Στο σχήμα 6.10α(α), δίδεται το απλοποιημένο, προσεγγιστικό κύκλωμα (αμελείται η ωμική αντίσταση R_a) ανά φάση της σύγχρονης γεννήτριας.

$$\text{Ισχύει: } \dot{E}_f = \dot{V}_t + \dot{I}_a jX_s. \quad (6.35)$$

Το διανυσματικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στην

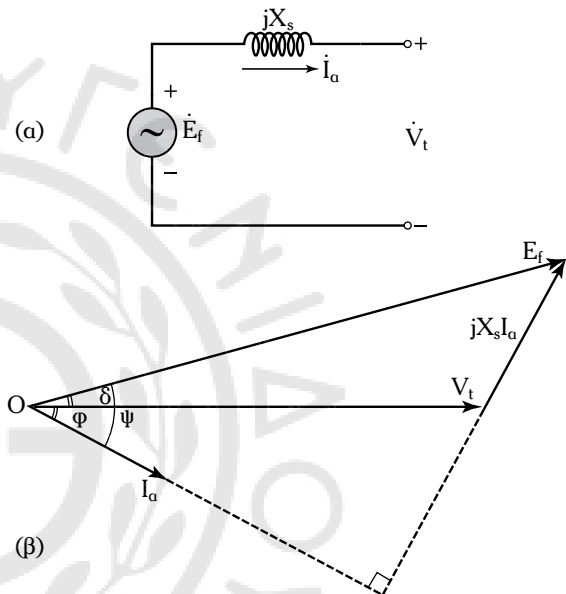
εξίσωση 6.35, παρουσιάζεται στο σχήμα 6.10α(β).

Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας (όταν $R_a = 0 \Omega$) είναι:

$$P_{\text{out}} \equiv P_d = 3V_t I_a \cos\varphi. \quad (6.36)$$

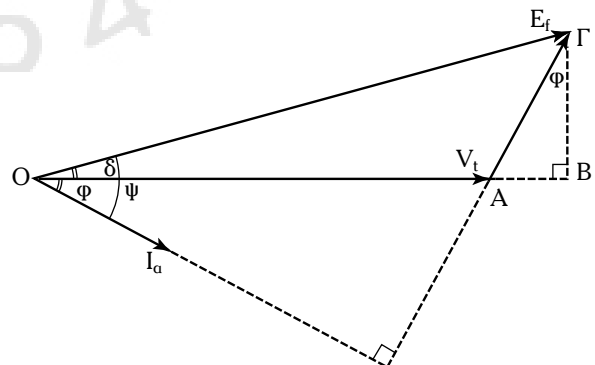
Αν προεκτείνουμε το διάνυσμα της τερματικής τάσεως, V_t , και προβάλουμε στην προέκταση το διάνυσμα της τάσεως διεγέρσεως, E_f , προκύπτει το διάγραμμα του σχήματος 6.10β.

Στο διάγραμμα του σχήματος αυτού, έχουμε δύο ορθογώνια τρίγωνα: το ΟΒΓ και το ΑΒΓ, τα οποία έχουν την πλευρά ΒΓ κοινή.



Σχ. 6.10α

(α) Απλοποιημένο, προσεγγιστικό κύκλωμα ανά φάση της σύγχρονης γεννήτριας και (β) το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων του.



Σχ. 6.10β

Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων του απλοποιημένου προσεγγιστικού ισοδύναμου κυκλώματος, ανά φάση, της σύγχρονης γεννήτριας, στο οποίο προεκτείνουμε το διάνυσμα V_t και προβάλουμε το διάνυσμα E_f .

Ισχύει ότι:

Τρίγωνο ΟΒΓ: $ΓΒ = E_f \eta \mu \delta$. (6.37)

Τρίγωνο ΑΒΓ: $ΓΒ = X_s I_a \cos \varphi$. (6.38)

Από τις εξισώσεις 6.37 και 6.38, προκύπτει:

$$E_f \eta \mu \delta = X_s I_a \cos \varphi \quad \eta \quad I_a \cos \varphi = \frac{E_f \eta \mu \delta}{X_s}. \quad (6.39)$$

Η εξίσωση 6.36 με βάση την εξίσωση 6.39, γίνεται:

$$P_d = \frac{3V_t E_f}{X_s} \eta \mu \delta. \quad (6.40)$$

Η γωνία δ ονομάζεται **γωνία ισχύος** ή **γωνία ροπής** η οποία εξαρτάται από τον ρυθμό εγχύσεως του καυσίμου στην κινητήρια μηχανή. Η γραφική παράσταση της εξίσωσης 6.40, δίδεται στο σχήμα 6.10γ.

Αν $\delta = 90^\circ$ τότε $\eta \mu \delta = 1$, οπότε η εξίσωση 6.40, γίνεται:

$$P_{dmax} = \frac{3V_t E_f}{X_s}. \quad (6.41)$$

Η εξίσωση 6.41, προσδιορίζει το όριο ευστάθειας της γεννήτριας. Η γωνία ισχύος στην κατάσταση πλήρους φορτίου των πρακτικών μηχανών είναι 15° με 20° .

Από τις εξισώσεις 6.33 και 6.40, προκύπτει:

$$T_d = \frac{3V_t E_f}{\omega_m X_s} \eta \mu \delta. \quad (6.42)$$

Η εξίσωση 6.42, εκφράζει την εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή σε συνάρτηση με τα ηλεκτρικά μεγέθη της μηχανής.

6.11 Ρύθμιση της πραγματικής και αέργου ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας.

Όταν μία σύγχρονη γεννήτρια φορτίζεται επαγωγικά (αμελείται η ωμική αντίσταση R_a , ανά φάση), τότε δημιουργείται ένα διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων όπως αυτό που δίδεται στο σχήμα 6.11α.

Η **πραγματική ισχύς** P και η **αέργου ισχύς** Q σε φασικά μεγέθη τάσεων-ρευμάτων δίδονται ως εξής:

$$P = 3 V_t I_a \cos \varphi, \quad Q = 3 V_t I_a \eta \mu \varphi.$$

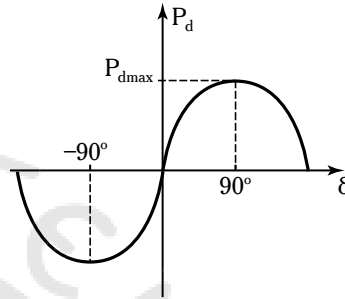
Στο σχήμα 6.11α, δίδονται δυο ευθύγραμμα τμήματα: το τμήμα $\overline{ΒΓ}$, που είναι ανάλογο της πραγματικής ισχύος P , ($I_a \cos \varphi$) και το τμήμα $\overline{ΑΓ}$, που είναι ανάλογο της αέργου ισχύος Q ($I_a \eta \mu \varphi$).

Για την ρύθμιση της αέργου ισχύος Q , με την προ-

ϋπόθεση ότι η πραγματική ισχύς P , παραμένει σταθερή, πρέπει να μεταβληθεί το ρεύμα διεγέρσεως, οπότε και το μέτρο της E_f αντίστοιχα.

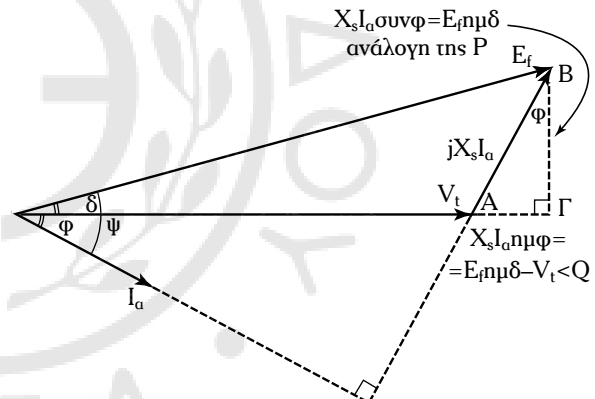
Στο σχήμα 6.11β, δίδεται το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων της γεννήτριας, για αύξηση της αέργου ισχύος ($Q^1 > Q$).

Για τη ρύθμιση της πραγματικής ισχύος P , την όποια παρέχει η σύγχρονη γεννήτρια, διατηρώντας σταθερό το ρεύμα διεγέρσεως, πρέπει να μεταβλη-



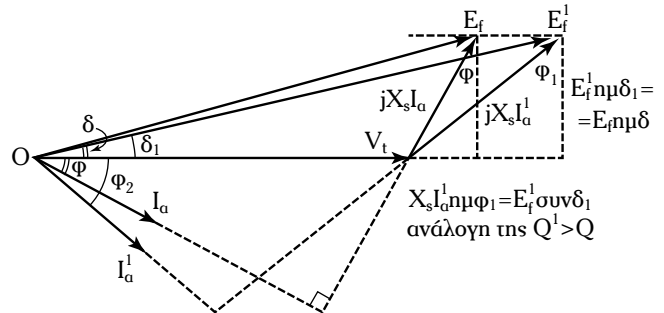
Σχ. 6.10γ

Γραφική παράσταση της εσωτερικής αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής ισχύος σε συνάρτηση με τη γωνία ισχύος.



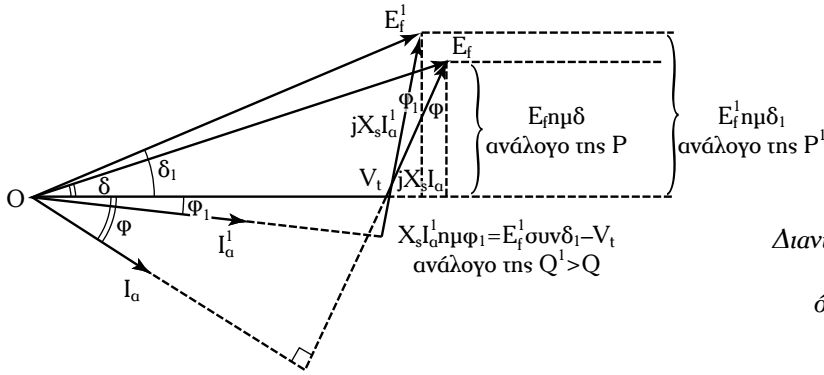
Σχ. 6.11α

Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων σύγχρονης γεννήτριας για επαγωγική φόρτιση.



Σχ. 6.11β

Διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων σύγχρονης γεννήτριας όταν $Q^1 > Q$.



Σχ. 6.11γ
 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων μιας σύγχρονης γεννήτριας, όταν η πραγματική ισχύς αυξάνεται.

θεί το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος $E_f \sin \delta$ (σχ. 6.11β), οπότε πρέπει να μεταβληθεί η ηλεκτρομαγνητική ροπή $T_d = \frac{3V_t I_a I_f}{\omega_s X_s} \sin \delta$.

Διατηρώντας σταθερό το ρεύμα διεγέρσεως I_f , δεν μεταβάλλεται το μέτρο του διανύσματος E_f .

Στο σχήμα 6.11γ, παρουσιάζεται το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων μιας σύγχρονης γεννήτριας στην περίπτωση αύξησης της πραγματικής ισχύος ($P^1 > P$). Όταν η πραγματική ισχύς αυξάνεται, $P^1 > P$, το διάνυσμα E_f περιστρέφεται στην αντίθετη φορά των δεικτών του ρολογιού κατά την γωνία ισχύος δ .

Η αύξηση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής T_d , οπότε και της πραγματικής ισχύος, αντίστοιχα, συνοδεύονται από μείωση της αέργου ισχύος $Q^1 < Q$ (σχ. 6.11γ).

6.12 Πειραματικός προσδιορισμός των κυκλωματικών στοιχείων του απλοποιημένου ισοδυναμίου, ανά φάση, ηλεκτρικού κυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας.

Για τον πειραματικό προσδιορισμό των κυκλωματικών στοιχείων R_a και Z_s , μιας σύγχρονης γεννήτριας, πραγματοποιείται **δοκιμή συνεχούς ρεύματος** (ΣΡ), για τον προσδιορισμό της ωμικής αντίστασης των φάσεων, **δοκιμή χωρίς φορτίο** για να προσδιοριστεί η στατική χαρακτηριστική της σύγχρονης γεννήτριας και **δοκιμή σε βραχυκύκλωμα** για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής βραχυκυκλώσεως. Οι δοκιμές χωρίς φορτίο και σε βραχυκύκλωμα προσδιορίζουν το κυκλωματικό στοιχείο Z_s της γεννήτριας.

6.12.1 Δοκιμή συνεχούς ρεύματος (ΣΡ).

Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται για τον προσδιορισμό της R_a . Στο σχήμα 6.12α, δίδεται η συνδεσμολογία για την δοκιμή ΣΡ.

Η ένταση ηλεκτρικού ρεύματος (ένδειξη του αμπερομέτρου) στο κύκλωμα πρέπει να είναι ίση με την ονομαστική τιμή του ρεύματος της γεννήτριας.

Η αντίσταση ΣΡ, R_{DC} , των δύο φάσεων σε σειρά (σχ. 6.12α) είναι:

$$R_{DC} = \frac{V_{DC}}{I}$$

Η αντίσταση R_{DC} , κάθε φάσεως είναι:

$$R_{DC} = \frac{V_{DC}}{2I}$$

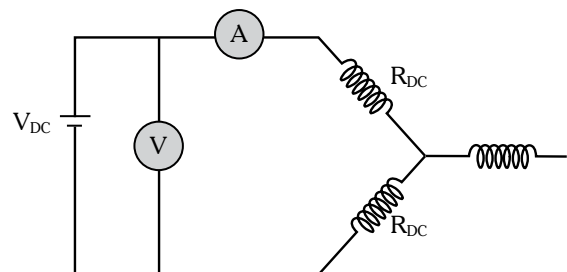
Η αντίσταση R_a της κάθε φάσεως στο εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) R_{AC} είναι από 1,2 μέχρι 1,8 της τιμής της R_{DC} :

$$R_{AC} = (1,2 \text{ έως } 1,8) R_{DC} \tag{6.43}$$

Η τιμή του διαστήματος [1,2 έως 1,8] εξαρτάται από τη **συχνότητα της παραγόμενης τάσεως** της γεννήτριας, τη **μόνωση των τυλιγμάτων** του επαγωγικού τύμπανου, το **μέγεθος της γεννήτριας**, αλλά και από άλλες κατασκευαστικές παραμέτρους.

Για συχνότητα 50 Hz και για γεννήτριες μεσαίου μεγέθους ισχύει:

$$R_a = 1,5R_{DC} = \frac{1,5V_{DC}}{2I} = 0,75 \frac{V_{DC}}{I}$$



Σχ. 6.12α
 Συνδεσμολογία δοκιμής ΣΡ.

6.12.2 Δοκιμή χωρίς φορτίο.

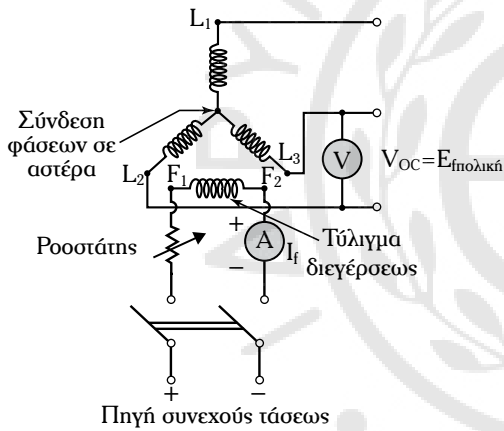
Η δοκιμή χωρίς φορτίο, όπως και η δοκιμή σε βραχυκύκλωμα, πραγματοποιούνται για να προσδιοριστεί πειραματικά το κυκλωματικό στοιχείο Z_s της σύγχρονης γεννήτριας. Στο σχήμα 6.12β, δίδεται η σχηματική παράσταση της συνδεσμολογίας της δοκιμής χωρίς φορτίο της σύγχρονης γεννήτριας.

Για διάφορες τιμές του ρεύματος διεγέρσεως I_f , το βολτόμετρο δίδει την πολική τάση ανοικτού κυκλώματος (λειτουργία χωρίς φορτίο) $V_{OC} = \sqrt{3}E_f$. Τελικά, η **χαρακτηριστική χωρίς φορτίο**, $V_{OC} = f(I_f)$ δίδεται στο σχήμα 6.12γ.

Η χαρακτηριστική χωρίς φορτίο ακολουθεί τη μαγνητική χαρακτηριστική της γεννήτριας.

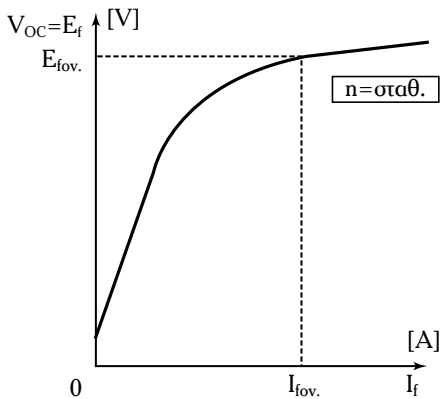
6.12.3 Δοκιμή σε βραχυκύκλωμα.

Στο σχήμα 6.12δ, δίδεται η σχηματική παράσταση της συνδεσμολογίας της δοκιμής σε βραχυκύκλωμα της γεννήτριας.



Σχ. 6.12β

Συνδεσμολογία δοκιμής χωρίς φορτίο.



Σχ. 6.12γ

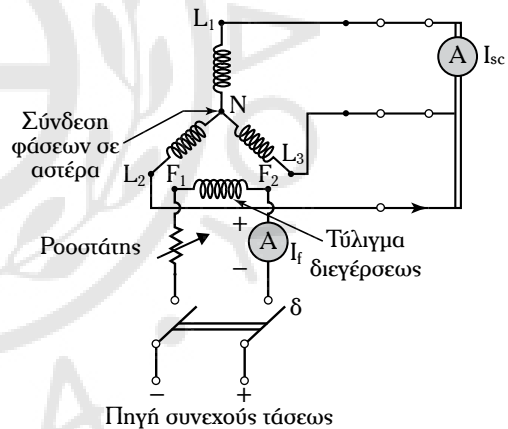
Χαρακτηριστική χωρίς φορτίο σύγχρονης γεννήτριας.

Εκκινούμε την γεννήτρια δίδοντας τις ονομαστικές στροφές, αλλά με μηδενικό ρεύμα διεγέρσεως, I_f , (διακόπτης δ ανοικτός στο σχ. 6.12δ). Στη συνέχεια κλείνουμε τον διακόπτη δ και αυξάνουμε σταδιακά το ρεύμα διεγέρσεως, I_f μέχρι να πάρουμε το ονομαστικό ρεύμα στο επαγωγικό τύμπανο της γεννήτριας. Το ονομαστικό ρεύμα το δηλώνουμε με το σύμβολο I_{sc} (ρεύμα στην κατάσταση βραχυκυκλώσεως της γεννήτριας). Στη δοκιμή σε βραχυκύκλωση δεν ξεπερνάμε το ονομαστικό ρεύμα διεγέρσεως I_{fov} .

Υπάρχει, λοιπόν, περίπτωση να χρησιμοποιήσουμε ρεύμα διεγέρσεως I_f , μικρότερο από εκείνο το οποίο αντιστοιχεί στο ονομαστικό ρεύμα φορτίου της γεννήτριας. Παίρνουμε μια σειρά αντιστοίχων τιμών ρεύματος διεγέρσεως I_f και ρεύματος βραχυκυκλώσεως I_{sc} . Η **χαρακτηριστική βραχυκυκλώσεως** παρουσιάζεται στο σχήμα 6.12ε.

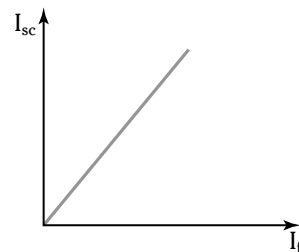
Αν τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων τα τοποθετήσουμε σε δύο άξονες, παίρνουμε την καμπύλη $I_{sc} = f(I_f)$ (σχ. 6.12στ).

Παρατηρούμε ότι η καμπύλη $I_{sc} = f(I_f)$ είναι ευθεία γραμμή. Η εξήγηση είναι απλή.



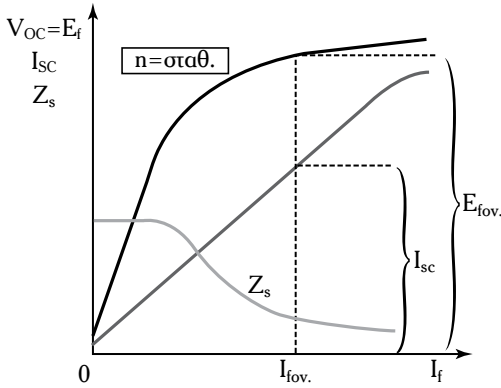
Σχ. 6.12δ

Συνδεσμολογία δοκιμής σε βραχυκύκλωση της σύγχρονης γεννήτριας.



Σχ. 6.12ε

Χαρακτηριστική βραχυκυκλώσεως της σύγχρονης γεννήτριας.



Σχ. 6.12στ

Χαρακτηριστική χωρίς φορτίο και σε βραχυκύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας.

Στη δοκιμή σε βραχυκύκλωση το ρεύμα διεγέρσεως δεν είναι μεγάλο και το ρεύμα I_{sc} στο επαγωγικό τύμπανο δημιουργεί ένα ισχυρό απομαγνητιστικό αποτέλεσμα, ώστε η γεννήτρια να λειτουργεί στο γραμμικό τμήμα της μαγνητικής χαρακτηριστικής της, εκεί όπου η σχέση μεταξύ του I_{sc} και του I_f είναι γραμμική.

Συνδέοντας τα διαγράμματα των σχημάτων 6.12γ και 6.12ε προκύπτει η σύνθετη αντίσταση τυλίγματος ανά φάση γραφική παράσταση (σχ. 6.12στ), η οποία δίδει την μεταβολή της Z_s .

Στην περίπτωση κατά την οποία $R_a = 0 \Omega/\text{φάση}$ ισχύει:

$$X_s = \frac{E_{fov.}}{I_{sc}} \quad (6.44)$$

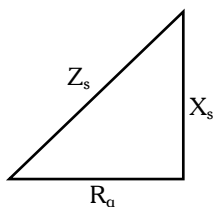
Αν $R_a \neq 0 \Omega/\text{φάση}$, τότε:

$$Z_s = \frac{E_{fov.}}{I_{sc}} \quad (6.45)$$

Όταν είναι γνωστή η τιμή της $R_a/\text{φάση}$ και της $Z_s/\text{φάση}$, τότε η τιμή της X_s δίδεται εφαρμόζοντας το Πυθαγόρειο Θεώρημα στο χαρακτηριστικό **τρίγωνο αντιστάσεων** (σχ. 6.12ζ).

Πράγματι, ισχύει:

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2} \quad (6.46)$$



Σχ. 6.12ζ

Χαρακτηριστικό τρίγωνο αντιστάσεων.

6.13 Ρύθμιση και έλεγχος τάσεως στις σύγχρονες γεννήτριες. Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσεως.

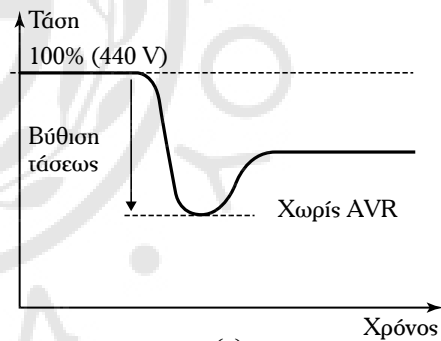
Όταν εκκινούνται ισχυρά επαγωγικά φορτία, προκαλούνται μεταβολές της τάσεως εξόδου στις σύγχρονες γεννήτριες. Αυτό οφείλεται στην πώση τάσεως, η οποία δημιουργείται στα κυκλώματα τυμπάνου των γεννητριών, ενώ το φαινόμενο ονομάζεται **βύθιση τάσεως**.

Εξάλλου όταν αποσυνδέονται φορτία απ' τον κύριο πίνακα, τότε εμφανίζονται υπερτάσεις στους ζυγούς του πίνακα.

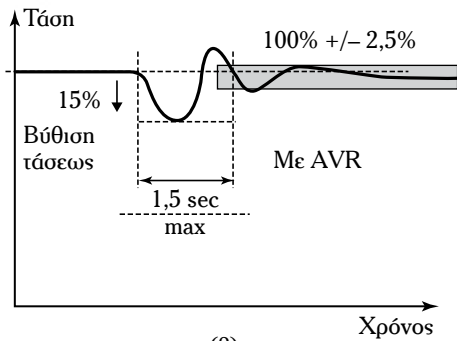
Όταν το πλοίο βρίσκεται εν πλώ είναι απαραίτητη η ρύθμιση και ο έλεγχος της τάσεως εξόδου των συγχρόνων γεννητριών, ώστε αυτή να διατηρείται σταθερή. Οπότε, είναι αναγκαία η παρουσία του **Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσεως** (Automatic Voltage Regulator – AVR).

Στο σχήμα 6.13α, δίδεται η μεταβολή της τάσεως εξόδου μιας σύγχρονης γεννήτριας, ονομαστικής τάσεως 440 V, όταν μεταβάλλεται το φορτίο χωρίς την παρουσία του AVR.

Ο AVR ελέγχει την τάση των γεννητριών όταν



(α)



(β)

Σχ. 6.13α

Μεταβολή της τάσεως εξόδου μίας σύγχρονης γεννήτριας (α) χωρίς AVR και (β) με AVR.

αυτή υπερβαίνει το $\pm 2,5\%$ της ονομαστικής τους τάσεως. Ο AVR περιορίζει μια παροδική βύθιση τάσεως στο 15% [σχ. 6.13α(β)], ενώ η ανάκτηση της ονομαστικής τάσεως της μηχανής γίνεται σε 1,5 s.

Στο σχήμα 6.13β δίδεται το διάγραμμα ενός AVR για μια τριφασική σύγχρονη γεννήτρια 440 V, 60 Hz.

Το σύστημα καταγραφής τάσεως περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες διατάξεις για τον υποβιβασμό, την ανόρθωση και την εξομάλυνση της τάσεως εξόδου της σύγχρονης γεννήτριας. Οπότε, παράγεται ένα σήμα χαμηλής συνεχούς τάσεως ανάλογο της παραγόμενης εναλλασσόμενης ημιτονοειδούς τάσεως. Το σήμα συνεχούς τάσεως, συγκρίνεται με μια τάση αναφοράς συνεχούς η οποία παράγεται από ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει διόδους Zener και ωμικές αντιστάσεις. Ένα σήμα-σφάλμα στην έξοδο του συγκριτή ενισχύεται και ενεργοποιεί την πύλη ενός θυρίστορ. Το θυρίστορ ανορθώνει και ρυθμίζει το ρεύμα διεγέρσεως της σύγχρονης γεννήτριας, με σκοπό να σταθεροποιηθεί η τάση εξόδου της μηχανής.

6.14 Ψύξη, βλάβες, λίπανση και συντήρηση των συγχρόνων γεννητριών.

6.14.1 Ψύξη συγχρόνων γεννητριών.

Οι απώλειες ισχύος σε μία σύγχρονη γεννήτρια παράγουν θερμότητα, η οποία δεν πρέπει να εγκλωβίζεται στο εσωτερικό της μηχανής γιατί κινδυνεύουν οι μονώσεις. Η θερμότητα πρέπει να απάγεται στον εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο της γεννήτριας. Αυτό γίνεται με την μεσολάβηση συστημάτων ψύξεως.

Σήμερα κατασκευάζονται πολύ καλά συστήματα ψύξεως γιατί υπάρχει ανάγκη κατασκευής γεννητριών όλο και πιο μεγάλης ισχύος με μεγάλο βαθμό

αποδόσεως και με μικρότερες διαστάσεις.

Τα συστήματα ψύξεως, τα οποία χρησιμοποιούνται είναι με αέρα, ενώ στα κέντρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην ξηρά, ο δρομέας στα συστήματα στροβιλογεννητριών, μέχρι 200 MW, ψύχεται μέσω της κυλινδρικής επιφάνειας με υδρογόνο, χωρίς ειδικά κανάλια.

6.14.2 Βλάβες συγχρόνων γεννητριών.

Στον πίνακα 6.14 δίδονται οι βασικές αιτίες βλαβών και οι αντίστοιχες επισκευές για μία σύγχρονη γεννήτρια.

6.14.3 Λίπανση των συγχρόνων γεννητριών.

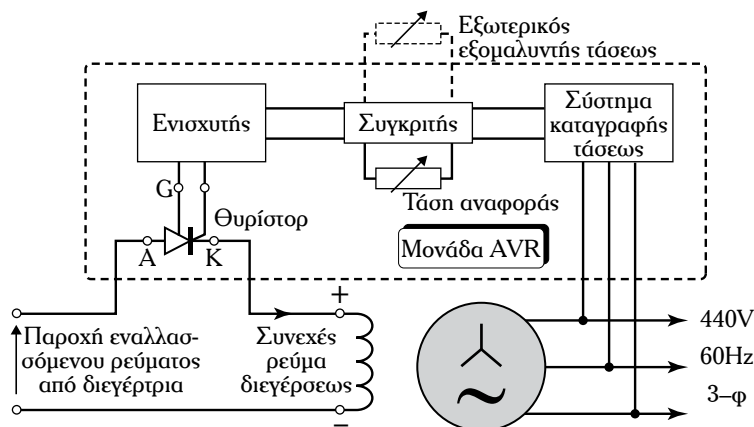
Τα μέρη που απαιτούν λίπανση, στις σύγχρονες γεννήτριες είναι κυρίως τα έδρανα, μέσα στα οποία περιστρέφεται ο άξονας της μηχανής. Υπάρχουν δύο ειδών έδρανα:

1) Τα **έδρανα τριβής** (κουζινέτα) με δακτυλίδια ελαίου. Κατά τη λειτουργία της μηχανής τα δακτυλίδια πρέπει να περιστρέφονται και να παρασύρουν το λιπαντικό έλαιο. Το λιπαντικό έλαιο πρέπει να φθάνει μέσα στην προβλεπόμενη δεξαμενή του εδράνου μέχρι την κανονική στάθμη, οπότε το $\frac{1}{3}$ του δακτυλιδιού βρίσκεται μέσα στο έλαιο. Το έλαιο λίπανσεως πρέπει να αντικαθίσταται σε τακτά χρονικά διαστήματα ανάλογα με τη χρήση της μηχανής, γιατί δημιουργούνται αλλοιώσεις κατά τη λειτουργία της. Για να αντικαταστήσουμε το έλαιο, αφαιρούμε, πρώτα, όλο το παλιό και καθαρίζουμε τη δεξαμενή του εδράνου.

2) Τα **έδρανα με ένοφαιρους τριβείς** (ρουλεμάν). Αυτά τα έδρανα λιπαίνονται με γράσο.

6.14.4 Συντήρηση.

Ο προληπτικός έλεγχος και η συντήρηση αυξάνουν τη διάρκεια ζωής και περιορίζουν τις βλάβες



Σχ. 6.13β
Διάγραμμα ενός Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσεως (AVR).

των συγχρόνων γεννητριών. Συνήθως, η κατασκευαστική εταιρεία καθορίζει και το πρόγραμμα ελέγχων και συντηρήσεως αυτών, που περιλαμβάνει:

1) Την εξωτερική καθαριότητα των διόδων αερισμού και του ανεμιστήρα, καθώς και τον καθαρισμό

των εδράνων, του συλλέκτη και των ψηκτρών και των δακτυλιδιών, όπου υπάρχουν.

2) Την λίπανση των εδράνων.

3) Την συντήρηση των βοηθητικών συσκευών (π.χ. των διακοπών).

Πίνακας 6.14

Βασικές αιτίες βλαβών μίας σύγχρονης γεννήτριας και οι αντίστοιχες θεραπείες.

Βλάβη	Πιθανή αιτία	Επισκευή
Ανωμαλίες στην τάση της σύγχρονης γεννήτριας	1) Αν πρόκειται για συμβατή σύγχρονη γεννήτρια με διεγέρτρια, έστω ότι η διεγέρτρια δεν δίδει τάση για τους εξής λόγους:	
	α) Εξασθένηση του παραμένουτος μαγνητισμού.	α) Τροφοδότηση με συνεχές ρεύμα των τυλιγμάτων των πόλων.
	β) Διακοπή του κυκλώματος διεγέρσεως (τυλίγματα πόλων).	β) Εντόπιση και επισκευή της βλάβης.
	γ) Διακοπή του ροοστάτη διεγέρσεως.	γ) Εντόπιση και επισκευή της βλάβης.
	δ) Κακή επαφή των αγωγών με τους ακροδέκτες.	δ) Σύσφιξη των κοχλιών.
	ε) Η μαγνητική ροή των πόλων είναι αντίθετη από τον παραμένουτα μαγνητισμό.	ε) Αντιστροφή της τροφοδοτήσεως των πόλων.
	στ) Αντίστροφη φορά της εντάσεως σε έναν πόλο.	στ) Η βλάβη εμφανίζεται μετά την επισκευή του τυλίγματος ενός πόλου. Γίνεται ορθή σύνδεση.
	ζ) Κακή επαφή των ψηκτρών.	ζ) Ρύθμιση της τάσεως των ελατηρίων και αντικατάσταση των ψηκτρών, αν είναι φθαρμένες.
	η) Ακάθαρτος συλλέκτης.	η) Σε ένα μικρό κομμάτι ξύλου τοποθετούμε ένα πολύ λεπτό γυαλόχαρτο, το πιέζουμε ελαφρά στο συλλέκτη, ενώ η μηχανή περιστρέφεται. Μπορεί στο συλλέκτη να υπάρχει συσσωρευμένη σκόνη. Την αφαιρούμε με ένα κομμάτι υφάσματος ή χρησιμοποιούμε πεπεσμένο αέρα, στον οποίο δεν υπάρχει υγρασία. Για τον καθαρισμό του συλλέκτη δεν χρησιμοποιούμε ποτέ σμιριδόπανο, λιπαντικό λάδι, βενζίνη ή άλλο αναφλέξιμο υγρό.
	2) Διακοπή στο τύλιγμα του στάτη.	Αποκατάσταση της διακοπής ή μερική αντικατάσταση του τυλίγματος.
	3) Μη συμμετρική φόρτιση.	Φόρτιση περίπου συμμετρική.
	4) Δυσλειτουργία του ρυθμιστή στροφών.	Επισκευή ή αντικατάσταση του ρυθμιστή στροφών.

– Λυμένες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Δίδεται τριφασική σύγχρονη γεννήτρια 490 V, 180 kVA, 60 Hz, συντελεστής ισχύος 0,8 επαγ. με σύνδεση φάσεων σε αστέρα η οποία έχει: $X_s = 1,2 \Omega/\text{φάση}$ και $R_a = 0,02 \Omega/\text{φάση}$. Στη γεννήτρια έγινε δοκιμή χωρίς φορτίο και οι ενδείξεις των οργάνων είναι οι ακόλουθες:

$E_f [V]$	120	240	360	450	490	540	550
$I_f [A]$	1	2	3	4	5	6	7

Οι απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού είναι 5 kW και οι απώλειες πυρήνα είναι 3 kW. Να υπολογίσετε:

1) Την τιμή του ρεύματος διεγέρσεως, ώστε η τερματική τάση της γεννήτριας να είναι ίση με 490 V, στη λειτουργία χωρίς φορτίο.

2) Την τιμή της τάσεως διεγέρσεως ανά φάση όταν η γεννήτρια λειτουργεί στα ονομαστικά της στοιχεία.

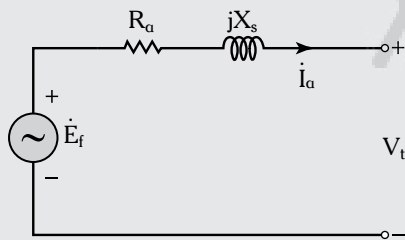
3) Την τιμή του ρεύματος διεγέρσεως, ώστε η τερματική τάση να είναι 490 V όταν η γεννήτρια λειτουργεί στα ονομαστικά της στοιχεία.

4) Την τιμή της ισχύος εισόδου της γεννήτριας.

Λύση.

1) Από τις τιμές (E_f , I_f) του πίνακα, το ρεύμα διεγέρσεως πρέπει να είναι 5 A.

2) Το ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας ανά φάση δίδεται στο σχήμα 6.14α:



Σχ. 6.14α

Είναι:
$$E_f = V_t + I_a R_a + jX_s I_a.$$

Το ονομαστικό ρεύμα είναι:

$$I_a = \frac{180 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 490} \cong 212 \text{ A.}$$

Η ανά φάση τάση είναι:

$$V_t = \frac{490}{\sqrt{3}} \cong 283 \text{ V/φάση.}$$

Η τιμή της τάσεως διεγέρσεως είναι:

$$\begin{aligned} E_f &= 283 + 212 \angle -36,87^\circ (0,02 + j1,2) = \\ &= 482,81 \angle 24,22^\circ \text{ V/φάση.} \end{aligned}$$

3) Για $|\dot{E}_f| = 482,81 \text{ V}$, απ' τον πίνακα τιμών (E_f , I_f) έχουμε:

$$I_f \cong 4,9 \text{ A.}$$

4) Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας είναι:

$$P_{\text{out}} = \text{kVA} \cdot \text{συνφ} \quad \text{ή} \quad P_{\text{out}} = 180 \cdot 0,8 = 144 \text{ kW.}$$

Οι απώλειες του χαλκού του στάτη P_{cust} , είναι:

$$P_{\text{cust}} = 3 I_a^2 R_a = 3 (212)^2 \cdot 0,02 \cong 2,697 \text{ kW.}$$

Οι μηχανικές απώλειες ή οι απώλειες λόγω τριβών και ανεμισμού είναι: $P_\ell = 5 \text{ kW}$.

Οι απώλειες πυρήνα είναι: $P_c = 3 \text{ kW}$.

Η ισχύς εισόδου της γεννήτριας είναι:

$$\begin{aligned} P_{\text{in}} &= P_{\text{out}} + P_{\text{cust}} + P_\ell + P_c = \\ &= 144 + 2,697 + 5 + 3 = 2,849 \text{ kW.} \end{aligned}$$

Άσκηση 2.

Δίδεται τριφασική σύγχρονη γεννήτρια 1.000 kVA, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα. Στην δοκιμή σε βραχυκύκλωση ένα ρεύμα διεγέρσεως 50 A δίνει το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας. Η τάση διεγέρσεως στην δοκιμή χωρίς φορτίο είναι 1.750 V/φάση για το ίδιο ρεύμα διεγέρσεως. Αν η ωμική αντίσταση ανά φάση της γεννήτριας είναι 1,4 Ω, να υπολογίσετε την διακύμανση τάσεως (συντελεστής ρυθμίσεως τάσεως)³ της γεννήτριας όταν ο συντελεστής ισχύος είναι 0,8 επαγ..

³ Η διακύμανση τάσεως επί τοις εκατό (ε%) ή συντελεστής ρυθμίσεως τάσεως επί τοις εκατό (VR%, Voltage Regulation) είναι:

$$\varepsilon\% \text{ ή } VR\% = \frac{\text{ονομαστική τάση χωρίς φορτίο} - \text{ονομαστική τάση στο πλήρες φορτίο}}{\text{ονομαστική τάση στο πλήρες φορτίο}} \cdot 100 \quad \text{ή} \quad \varepsilon\% \text{ ή } VR\% = \frac{E_{\text{fo}} - V_{\text{to}}}{V_{\text{to}}} \cdot 100.$$

Λύση.

Η ονομαστική τερματική τάση της γεννήτριας είναι: $V_t = 1.750 \text{ V/φάση}$.

Το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας είναι:

$$I_a = \frac{1.000 \cdot 10^3}{3 \cdot 1.750} = 190,47 \text{ A.}$$

Η σύγχρονη σύνθετη αντίσταση Z_s είναι:

$$Z_s = \frac{\text{τάση/φάση στη δοκιμή χωρίς φορτίο}}{\text{ρεύμα/φάση στη δοκιμή σε βραχυκύκλωση}} \Omega$$

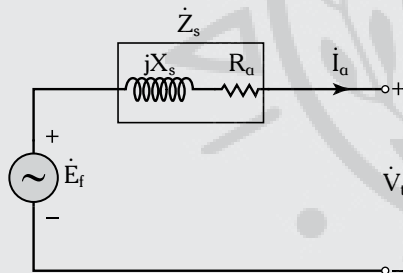
για το ίδιο ρεύμα διεγέρσεως.

$$Z_s = \frac{1.750}{190,47} = 9,187 \Omega$$

Από το τρίγωνο των αντιστάσεων έχουμε:

$$X_s = \sqrt{(Z_s)^2 - (R_a)^2} = \sqrt{(9,187)^2 - (1,4)^2} = 9,079 \Omega.$$

Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας είναι αυτό του σχήματος 6.14β.



Σχ. 6.14β

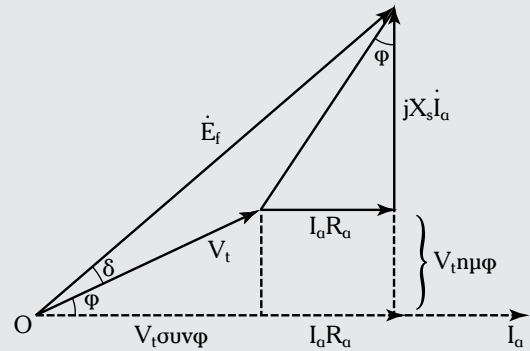
Ισχύει: $V_t = E_f - \dot{I}_a Z_s.$

Το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων της γεννήτριας όταν πάρουμε σαν διάνυσμα αναφοράς το ανά φάση ρεύμα τυμπάνου I_a , απεικονίζεται στο σχήμα 6.14γ.

Από το διανυσματικό διάγραμμα προκύπτει:

$$E_f = \sqrt{(V_t \cos \phi + I_a R_a)^2 + (V_t \sin \phi + I_a X_s)^2} \text{ ή}$$

$$E_f = \sqrt{(1.750 \cdot 0,8 + 1,4 \cdot 190,47)^2 + (1.750 \cdot 0,6 + 190,47 \cdot 9,079)^2} = 3.240,70 \text{ V.}$$



Σχ. 6.14γ

Η διακύμανση τάσεως είναι:

$$\begin{aligned} \varepsilon\% &= \frac{E_f - V_t}{V_t} \cdot 100 = \\ &= \frac{3.240,70 - 1.750}{1.750} \cdot 100 = 85,18\%. \end{aligned}$$

Όταν η γεννήτρια λειτουργεί με επαγωγικό φορτίο, η διακύμανση τάσεως έχει αρκετά μεγάλη θετική τιμή. Όταν λειτουργεί με ωμικό φορτίο, η γεννήτρια εμφανίζει μια μικρή και θετική τιμή διακυμάνσεως τάσεως, ενώ όταν λειτουργεί με χωρητικό φορτίο η διακύμανση τάσεως είναι αρνητική.

Άσκηση 3.

Η σχέση μεταξύ τερματικής τάσεως και ρεύματος φορτίου, μιας τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, είναι ευθεία γραμμή με αρνητική κλίση. Η τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας, στην λειτουργία χωρίς φορτίο είναι 3.500 V, ενώ στην λειτουργία με πλήρες φορτίο είναι 3.300 V και παρέχει ρεύμα σε φορτίο 2.280 kW. Να υπολογίσετε την τερματική τάση της γεννήτριας όταν συνδέεται σε φορτίο, με σύνδεση σε αστέρα, με ανά φάση σύνθετη αντίσταση: $Z_L = 8 + j6 \Omega$.

Θεωρήστε σταθερή την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας και σταθερό το ρεύμα διεγέρσεως.

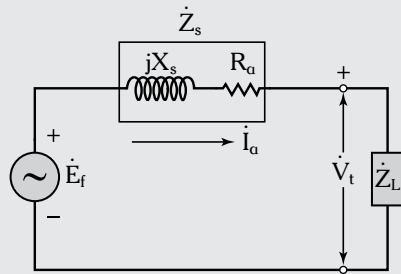
Λύση.

Το ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας δίδεται στο σχήμα 6.14δ.

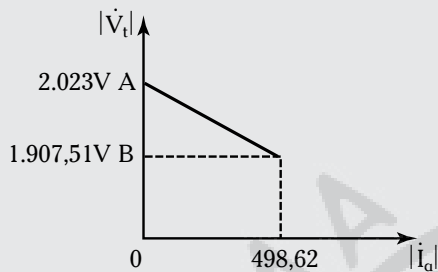
Η σχέση τερματικής τάσεως και ρεύματος φορτίου δίδεται στο σχήμα 6.14ε.

Ο συντελεστής ισχύος του φορτίου, όπως είναι γνωστό, υπολογίζεται ως εξής:

$$\varepsilon \phi = \frac{6}{8} = 0,75 \text{ και } \phi = 36,87^\circ \text{ και}$$



Σχ. 6.14β



Σχ. 6.14ε

$$\text{συνφ} = \text{συν}(36,87^\circ) = 0,8.$$

Η ανά φάση τερματική τάση της γεννήτριας χωρίς φορτίο είναι: $\frac{3.500}{\sqrt{3}} = 2.023 \text{ V}$.

Η ανά φάση τάση στη λειτουργία με πλήρες φορτίο είναι: $\frac{3.300}{\sqrt{3}} = 1.907,51 \text{ V}$.

Το ρεύμα το οποίο παρέχει η γεννήτρια στο πλήρες φορτίο είναι: $\sqrt{3} V_{\pi} I_a \text{συνφ} = 2.280 \cdot 1.000 \text{ W}$

$$\text{ή} \quad I_a = \frac{2.280 \cdot 1.000}{\sqrt{3} \cdot 3.300 \cdot 0,8} = 498,62 \text{ A}.$$

Η πώση τάσεως, ανά φάση, στη σύγχρονη γεννήτρια είναι: $AB = 2.023 - 1.907,51 = 115,49 \text{ V}$.

Έστω $x \text{ A}$ το ρεύμα που παρέχει η γεννήτρια στο φορτίο $Z_L = 8 + j6 \Omega/\text{φάση}$ με συντελεστή ισχύος:

$$\text{συνφ} = \frac{R_L}{|Z_L|} = \frac{8}{\sqrt{8^2 + 6^2}} = 0,8.$$

Η πώση τάσεως ανά φάση της γεννήτριας στα $498,62 \text{ A}$ είναι $115,49 \text{ V}$.

Όταν η γεννήτρια παρέχει $x \text{ A}$, η πώση τάσεως ανά φάση είναι:

$$\frac{115,49 x}{498,62} = 0,231x.$$

Η τάση τροφοδοσίας σε κάθε φάση του φορτίου είναι $10x$. Ισχύει: $10x = 2.023 - 0,231x$

$$\text{ή} \quad x = \frac{2.023}{(10,231)} = 197,73 \text{ A}.$$

Οπότε η τερματική τάση, ανά φάση, είναι:

$$|V_t| = (2.023 - 0,231 \cdot 197,73) = 1.977,32 \text{ V}.$$

Η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας είναι:

$$1.977,32 \cdot \sqrt{3} \cong 3.421 \text{ V}.$$

Άσκηση 4.

Όταν το ρεύμα διεγέρσεως μίας σύγχρονης γεννήτριας, στη λειτουργία χωρίς φορτίο, είναι 100 A τότε στους ακροδέκτες της μετράμε την ονομαστική της τάση.

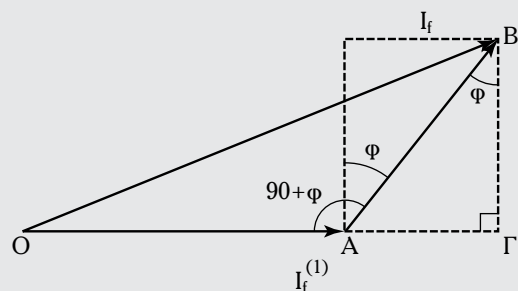
Στη δοκιμή σε βραχυκύκλωση, το ονομαστικό ρεύμα κυκλοφορεί όταν το ρεύμα διεγέρσεως είναι 80 A . Να υπολογίσετε το ρεύμα διεγέρσεως όταν η γεννήτρια λειτουργεί στο πλήρες φορτίο με συντελεστή ισχύος $0,8 \text{ επαγ.}$

Λύση.

Το ρεύμα διεγέρσεως $I_f^{(1)}$, για την ονομαστική τάση στη λειτουργία χωρίς φορτίο είναι: $I_f^{(1)} = 100 \text{ A}$.

Το ρεύμα διεγέρσεως $I_f^{(2)}$, το οποίο απαιτείται για την κυκλοφορία του ονομαστικού ρεύματος στη δοκιμή σε βραχυκύκλωση είναι: $I_f^{(2)} = 80 \text{ A}$.

Για να υπολογίσουμε το ρεύμα διεγέρσεως, το οποίο απαιτείται για να δώσει η γεννήτρια το ονομαστικό ρεύμα, με ονομαστική τάση και συντελεστή $0,8 \text{ επαγ.}$, δημιουργούμε την διανυσματική κατασκευή του σχήματος 6.14στ.



Σχ. 6.14στ

Έστω OA το διάνυσμα, το οποίο αντιστοιχεί στο $I_f^{(1)}$ μέτρου 100 A .

Είναι $\vec{O\bar{B}}$ το διάνυσμα, το οποίο αντιστοιχεί στο $I_f^{(2)}$ μέτρου 80 A, με γωνία $90^\circ + \varphi$ ως προς το διάνυσμα $I_f^{(1)}$.

Προεκτείνουμε το διάνυσμα $O\bar{A}$ και προβάλλουμε το σημείο B του διανύσματος $O\bar{B}$ στην προέκταση του διανύσματος $O\bar{A}$. Προσδιορίζουμε το σημείο Γ.

Έχομε το ορθογώνιο τρίγωνο ΟΓΒ, στο οποίο εφαρμόζουμε το Πυθαγόρειο Θεώρημα:

$$\begin{aligned} OB &= \sqrt{(OA + A\Gamma)^2 + (\Gamma B)^2} = \\ &= \sqrt{(OA + AB\eta\mu\varphi)^2 + (AB\sigma\upsilon\eta\varphi)^2} = \\ &= \sqrt{(100 + 80 \cdot 0,6)^2 + (80 \cdot 0,8)^2} = 161,2 \text{ A.} \end{aligned}$$

Άσκηση 5.

Τριφασική σύγχρονη γεννήτρια με σύνδεση φάσεων σε αστέρα έχει πολική τάση, στη λειτουργία χωρίς φορτίο, 3.000 V. Όταν λειτουργεί με φορτίο τροφοδοτεί μία εγκατάσταση με 403 A με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ., ενώ η τάση μειώνεται στα 40%. Να υπολογίσετε την σύγχρονη αντίδραση ανά φάση της γεννήτριας αμελώντας την ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων.

Λύση.

Η διακύμανση της τάσεως $\varepsilon\%$ της γεννήτριας δίδεται: $\varepsilon\% = 100 \cdot \frac{E_f - V_t}{V_t}$.

Λύνοντας ως προς V_t , έχουμε:

$$V_t = \frac{100 \cdot E_f}{100 + \varepsilon\%} = \frac{100 \cdot 3.000}{100 + 40} = 1.235 \text{ V.}$$

Από το ανά φάση ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα (σχ. 6.8α) προκύπτει η εξίσωση τάσεων-ρευμάτων:

$$\dot{V}_t = \dot{E}_f - I_a j X_s. \quad (1)$$

Το διανυσματικό διάγραμμα της εξισώσεως 1 είναι αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.8α.

Από το διάγραμμα αυτό έχουμε:

$$E_f^2 = (V_t + X_s I_a \eta\mu\varphi)^2 + (X_s I_a \sigma\upsilon\eta\varphi)^2.$$

Τελικά είναι:

$$162,4 \cdot 103 X_s^2 + 598 \cdot 103 X_s - 1.470 \cdot 103 = 0.$$

Λύνοντας την δευτεροβάθμια εξίσωση παίρνουμε:

$$X_s = 1,665 \Omega/\text{φάση}.$$

Άσκηση 6.

Δίδεται τριφασική σύγχρονη γεννήτρια, 6 kVA, 220 V, 6-πολική, 60 Hz με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, η οποία συνδέεται με κύριο πίνακα πλοίου, 3-φ, 220 V, 60 Hz. Η γεννήτρια έχει: $X_s = 7 \Omega/\text{φάση}$.

1) Να υπολογίσετε την τάση διεγέρσεως όταν η γεννήτρια παρέχει τα ονομαστικά kVA με ονομαστική τάση σε φορτία με $\sigma\upsilon\eta\varphi = 0,8$ επαγ..

2) Αυξάνουμε το ρεύμα διεγέρσεως κατά 21%, ενώ η ισχύς εισόδου της γεννήτριας διατηρείται σταθερή, να υπολογίσετε το ρεύμα επαγωγικού τυμπάνου, τον συντελεστή ισχύος και την άεργο ισχύ της γεννήτριας.

3) Όταν το ρεύμα διεγέρσεως διατηρείται σταθερό όπως στο ερώτημα (1), να υπολογίσετε την ισχύ, την οποία παρέχει η γεννήτρια στο **όριο ευστάθειας**⁴, το αντίστοιχο ρεύμα και τον συντελεστή ισχύος της γεννήτριας.

Λύση.

1) Από το ισοδύναμο, ανά φάση, κύκλωμα της γεννήτριας (σχ. 6.8α) έχουμε:

$$V_t = E_f - I_a j X_s.$$

$$\text{Είναι: } \dot{V}_t = |\dot{V}_t| = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V/φάση}.$$

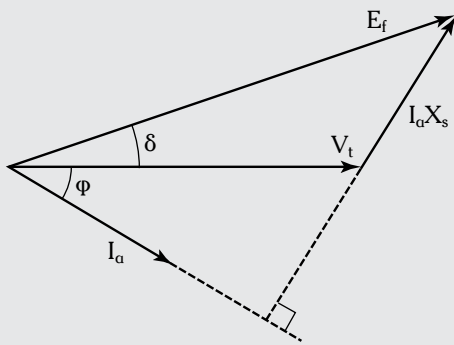
Το ρεύμα το οποίο παρέχει η γεννήτρια προκύπτει από την εξίσωση της φαινομένης ισχύος:

$$P_\varphi = \sqrt{3} V_\pi I_\gamma (\equiv I_a).$$

$$\text{Οπότε έχουμε: } I_a = \frac{P_\varphi}{\sqrt{3} V_\pi} = \frac{6.000}{\sqrt{3} \cdot 220} \cong 16 \text{ A.}$$

Το διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων της γεννήτριας είναι αυτό του σχήματος 6.14ζ.

⁴ Το όριο ευστάθειας της γεννήτριας προσδιορίζεται όταν η γωνία ισχύος δ ισούται με 90° .

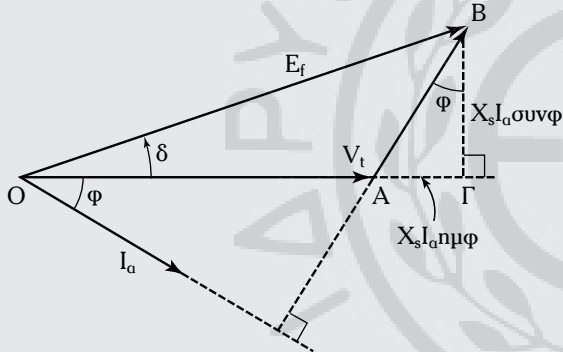


Σχ. 6.14ζ

Υπολογισμός της E_f :

Τροποποιούμε το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων της γεννήτριας ως εξής:

Προεκτείνουμε το διάνυσμα της τερματικής τάσεως V_t και προβάλλουμε το σημείο Β του διανύσματος της τάσεως διεγέρσεως, E_f , σε αυτήν την προέκταση. Προσδιορίζουμε το σημείο Γ (σχ. 6.14η).



Σχ. 6.14η

Η γωνία φ είναι: $\cos^{-1} 0,8 = 36,87^\circ$.

Εφαρμόζουμε το Πυθαγόρειο Θεώρημα στο τροποποιημένο διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων:

$$E_f^2 = (V_t + X_s I_a \eta\mu\varphi)^2 + (X_s I_a \sigma\upsilon\nu\varphi)^2$$

$$\hat{\eta} \quad E_f = \sqrt{(127 + 7 \cdot 16 \cdot 0,6)^2 + (7 \cdot 16 \cdot 0,8)^2}$$

$$\hat{\eta} \quad E_f \cong 214 \text{ V.}$$

Η γωνία ισχύος δ είναι:

$$\delta \cong \varepsilon\varphi^{-1} \frac{X_s I_a \sigma\upsilon\nu\varphi}{V_t + X_s I_a \eta\mu\varphi} = \varepsilon\varphi^{-1} \frac{89,6}{194} = \varepsilon\varphi^{-1} 0,46$$

$$\delta \cong 25^\circ.$$

2) Αυξάνοντας το ρεύμα διεγέρσεως κατά 21% αυξάνεται αντίστοιχα η τάση διεγέρσεως κατά 21%. Έχομε: $E_f' = 1,21 \cdot 214 \cong 259 \text{ V}$.

Η νέα γωνία ισχύος δ' , η οποία αντιστοιχεί στην E_f' βρίσκεται ως εξής:

Η εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ισχύς, πριν την αύξηση του ρεύματος διεγέρσεως είναι:

$$P_d = \frac{3E_f V_t}{X_s} \eta\mu\delta. \quad (1)$$

Η εσωτερική αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ισχύς μετά την αύξηση του ρεύματος διεγέρσεως είναι:

$$P_d = \frac{3E_f' V_t}{X_s} \eta\mu\delta'. \quad (2)$$

Από τις εξισώσεις 1 και 2 έχομε:

$$\eta\mu\delta' = \frac{E_f'}{E_f} \eta\mu\delta = \frac{214}{259} \eta\mu 25^\circ = 0,35$$

$$\delta' = \eta\mu^{-1} 0,35 = 20,48^\circ.$$

Το διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων πριν και μετά την αύξηση του ρεύματος διεγέρσεως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.14θ.

Από το τρίγωνο OAB έχομε:

$$X_s I_a' \sigma\upsilon\nu\varphi' = E_f' \eta\mu\delta'$$

$$\hat{\eta} \quad I_a' \sigma\upsilon\nu\varphi' = \frac{E_f' \eta\mu\delta'}{X_s} = \frac{259 \eta\mu 20,48^\circ}{7} = 12,94 \quad (3)$$

Από το διανυσματικό διάγραμμα προκύπτει:

$$V_t + X_s I_a' \sigma\upsilon\nu\varphi' = E_f' \sigma\upsilon\nu\delta'. \quad (4)$$

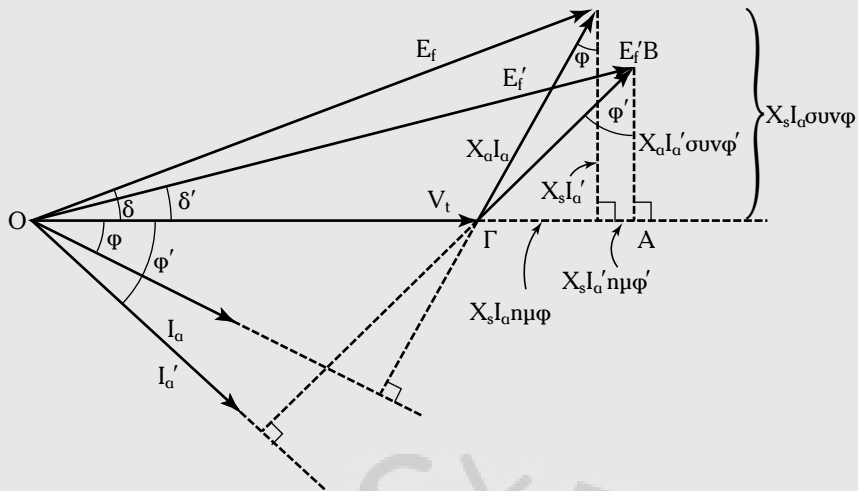
$$\text{Από τις 3 και 4 έχομε: } I_a' \sigma\upsilon\nu\varphi' = 12,94 \quad (5)$$

$$\text{και} \quad X_s I_a' \sigma\upsilon\nu\varphi' = E_f' \sigma\upsilon\nu\delta' - V_t.$$

$$\hat{\eta} \quad \sigma\upsilon\nu\varphi' = \frac{243 - 127}{7} = \frac{116}{7} = 16,51. \quad (6)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις 5 και 6 έχομε:

$$\frac{I_a' \sigma\upsilon\nu\varphi'}{I_a' \eta\mu\varphi'} = \frac{12,94}{16,51}$$



Σχ. 6.140

$$\acute{\eta} \frac{\text{συν}\phi'}{\eta\mu\phi'} = \frac{12,94}{16,51} \acute{\eta} \sigma\phi\phi' = 0,78.$$

$$\text{Είναί: } \sigma\phi\phi' = \frac{1}{\epsilon\phi\phi} = 0,78 \acute{\eta} \epsilon\phi\phi' = \frac{1}{0,78} = 1,28$$

$$\epsilon\phi^{-1}1,28 = 52^\circ \equiv \phi'.$$

Το ρεύμα I'_a απ' την εξίσωση 5 είναι:

$$I'_a \text{ συν}\phi' = 12,94 \acute{\eta} I'_a = \frac{12,94}{\text{συν}52^\circ} = 21,21 \text{ A.}$$

Η άεργος ισχύς είναι:

$$Q = 3V_t I'_a \eta\mu\phi' = 3 \cdot 127 \cdot 21,21 \cdot 0,78 = 6,368 \text{ kVar}$$

Ο συντελεστής ισχύος $\text{συν}\phi'$ είναι:

$$\text{συν}52^\circ = 0,61 \text{ επαγ.}$$

3) Το όριο ευστάθειας της γεννήτριας είναι $\delta = 90^\circ$. Η ισχύς στο όριο ευστάθειας είναι:

$$P_{\text{dmax}} = \frac{3V_t E_f}{X_s} \eta\mu 90^\circ = \frac{3 \cdot 127 \cdot 214 \cdot 1}{7} = 11,648 \text{ kW.}$$

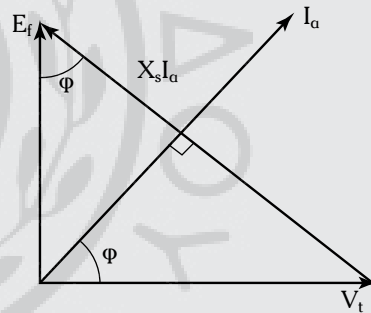
Στο όριο ευστάθειας ισχύει το ακόλουθο διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων της γεννήτριας (σχ. 6.141):

Οπότε:

$$I_a = \frac{\sqrt{E_f^2 + V_t^2}}{X_s} = \frac{\sqrt{(214)^2 + (127)^2}}{7} = 35,55 \text{ A}$$

$$\epsilon\phi\phi = \frac{V_t}{E_f} = 0,59 \text{ χωρ.} \acute{\eta} \epsilon\phi^{-1}0,59 = \phi = 30,54^\circ$$

$$\text{και } \text{συν}\phi = \text{συν}30,54 = 0,86 \text{ χωρ.}$$



Σχ. 6.141

Άσκηση 7.

Δίδεται τριφασική σύγχρονη γεννήτρια, 1.000 kVA, 3.300 V, με σύνδεση φάσεων σε αστέρα. Η ανά φάση ωμική αντίσταση τυμπάνου και η ανά φάση σύγχρονη αντίδραση είναι $0,2 \Omega$ και 5Ω αντίστοιχα. Η γεννήτρια παρέχει τα ονομαστικά kVA με ονομαστική τάση σε φορτία με συντελεστή ισχύος $0,8 \text{ επαγ.}$

Να υπολογίσετε την τερματική τάση, ανά φάση, της γεννήτριας όταν παρέχει τα ονομαστικά της στοιχεία, με το ίδιο ρεύμα διεγέρσεως σε φορτία με συντελεστή ισχύος $0,8 \text{ χωρ.}$

Λύση.

Το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας είναι:

$$I_a = \frac{P_a}{\sqrt{3}V_n} = \frac{1.000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 3.300} \cong 175 \text{ A.}$$

Το ισodύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της γεννήτριας, ανά φάση, είναι αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.14α.

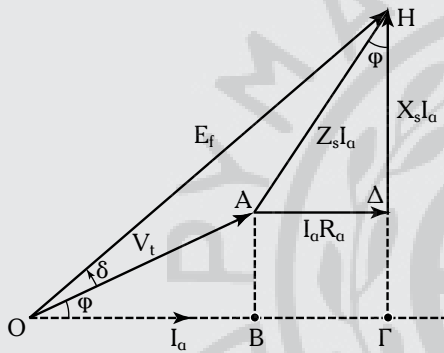
Η εξίσωση τάσεων-ρευμάτων του κυκλώματος είναι:

$$\vec{V}_t = \vec{E}_f - \vec{I}_a(R_a + jX_s). \quad (1)$$

Η ανά φάση τερματική τάση της γεννήτριας είναι:

$$V_t = \frac{3.300}{\sqrt{3}} = 1.907,51 \text{ V.}$$

Στην εξίσωση 1 αντιστοιχεί το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων του σχήματος 6.14α.



Σχ. 6.14α

Εφαρμόζουμε το Πυθαγόρειο Θεώρημα στο τρίγωνο ΟΗΓ:

$$(\overline{OH})^2 = (\overline{OG})^2 + (\overline{HG})^2. \quad (2)$$

$$\text{Είναι: } \overline{OH} = E_f \quad (3)$$

$$\overline{OG} = OB + BG = V_t \cos \phi + I_a R_a \quad (4)$$

$$\overline{HG} = H\Delta + \Delta\Gamma = X_s I_a + V_t \sin \phi. \quad (5)$$

Η εξίσωση 2, με βάση τις εξισώσεις 3, 4 και 5 γίνεται:

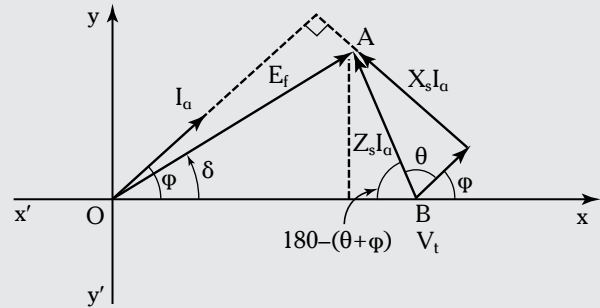
$$E_f^2 = (V_t \cos \phi + I_a R_a)^2 + (X_s I_a + V_t \sin \phi)^2$$

$$\text{ή } E_f = \sqrt{(1.907,51 \cdot 0,8 + 175 \cdot 0,2)^2 + (5 \cdot 175 + 1907,51 \cdot 0,60)^2}$$

$$\text{ή } E_f = 2.552 \text{ V.}$$

Στην περίπτωση κατά την οποία η γεννήτρια παρέχει τα ονομαστικά της στοιχεία, με το ίδιο

ρεύμα διεγέρσεως, σε φορτία με συντελεστή ισχύος 0,8 χωρ., το διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων είναι αυτό του σχήματος 6.14β.



Σχ. 6.14β

$$\text{Είναι: } \theta = \cos^{-1} \frac{X_s}{R_a} = \cos^{-1} \frac{5}{0,2} = 87,70^\circ$$

$$\phi = \cos^{-1} 0,8 = 36,87^\circ$$

$$\text{είναι: } \vec{Z}_s = 0,2 + j5\Omega$$

$$\text{και } |\vec{Z}_s| = \sqrt{(0,2)^2 + (5)^2} \cong 5 \Omega.$$

Από το τρίγωνο ΟΑΒ έχουμε:

$$E_f^2 = V_t^2 + (Z_s I_a)^2 - 2V_t Z_s I_a \cos [180^\circ - (\theta + \phi)]$$

$$6.512.704 = V_t^2 + 765.625 - 993 V_t$$

$$\text{ή } V_t^2 - 993 V_t - 5.747.079 = 0$$

Η δεκτή ρίζα είναι: $V_t = 1.951,5 \text{ V.}$

6.15 Ερωτήσεις.

- 1) Τι εννοούμε με τον όρο σύγχρονη μηχανή;
- 2) Ποια είναι η αρχή λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας;
- 3) Σχεδιάστε τον πρακτικό και θεωρητικό αστέρα και δώστε τη σχέση μεταξύ τάσεων και ρευμάτων. Κάντε το ίδιο για την συνδεσμολογία των φάσεων σε τρίγωνο. Πώς πρέπει να συνδεθούν οι φάσεις μιας γεννήτριας πλοίου, ώστε η γεννήτρια να παράγει περισσότερο πραγματική ισχύ;
- 4) Πόσων ειδών σύγχρονες γεννήτριες έχουμε ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα;
- 5) Τι εννοούμε με τον όρο αντίδραση τυμπάνου; Από τι εξαρτάται και πώς αντιμετωπίζεται σε μια σύγχρονη γεννήτρια;

6) Σχεδιάστε και εξηγήστε το πλήρες, ανά φάση, ισοδύναμο πλεκτρικό κύκλωμα μιας σύγχρονης γεννήτριας. Με ποιον τρόπο παρουσιάζεται στο ισοδύναμο κύκλωμα το φαινόμενο αντιδράσεως τυμπάνου;

7) Σχεδιάστε το απλοποιημένο, ανά φάση, ισοδύναμο πλεκτρικό κύκλωμα και γράψτε την εξίσωση τάσεων και ρευμάτων, για μια σύγχρονη γεννήτρια. Ποια είναι η χρησιμότητα του απλοποιημένου ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος;

8) Χαράξτε τις χαρακτηριστικές φορτίσεως μιας σύγχρονης γεννήτριας:

α) Τι συμπεράσματα προκύπτουν;

β) Σχεδιάστε και εξηγήστε το διάγραμμα ροής ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας.

γ) Τι είναι η γωνία ισχύος και πώς ελέγχεται;

δ) Τι εννοούμε με τον όρο όριο ευσιθειας μιας σύγχρονης γεννήτριας;

ε) Ποια είναι η σχέση αναπυσοόμενης πλεκτρομαγνητικής ισχύος και γωνίας ισχύος;

9) Να αποδείξετε ότι για μία σύγχρονη γεννήτρια, στην οποία αμελούμε την ωμική αντίσταση των φάσεων, ισχύει:

$$P_d = \frac{3V_t E_f}{X_s} \cdot \eta \mu \delta$$

Για μια ωμική, επαγωγική και χωρητική φόρτιση, από τι εξαρτάται η εσωτερική αναπυσοόμενη πλεκτρομαγνητική ισχύς (P_d);

10) Πώς προσδιορίζονται πειραματικά τα κυκλωματικά στοιχεία του απλοποιημένου, ανά φάση, ισοδύναμου κυκλώματος μίας σύγχρονης γεννήτριας;

6.16 Προτεινόμενες ασκήσεις.

Άσκηση 1.

Μια τριφασική, σύγχρονη γεννήτρια 50 Hz περιτρέφεται με 1.750 ΣΑΛ. Να υπολογίσετε τον αριθμό των μαγνητικών πόλων της μηχανής.

Άσκηση 2.

Να υπολογίσετε τη σύγχρονη ταχύτητα μιας σύγχρονης γεννήτριας, με τα ακόλουθα δεδομένα:

- 1) 50 Hz, 4-πολική,
- 2) 50 Hz, 6-πολική,
- 3) 25 Hz, 4-πολική.

Άσκηση 3.

Δίδεται τριφασική σύγχρονη γεννήτρια, 11 kV με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, η οποία τροφοδοτεί φορτίο 110 kW με συντελεστή ισχύος 0,85 επαγ..

Αν η ωμική αντίσταση ανά φάση είναι 0,01 Ω και η σύγχρονη αντίδραση ανά φάση είναι 1,2 Ω, να υπολογίσετε την πολική τάση διεγέρσεως.

Άσκηση 4.

Δίδεται τριφασική σύγχρονη γεννήτρια, 700 kVA, 6,6 kV με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, η οποία έχει ωμική αντίσταση ανά φάση 1,2 Ω και σύγχρονη αντίδραση ανά φάση 22 Ω. Να υπολογίσετε την επί τοις εκατό (%) ρύθμιση τάσεως, όταν τροφοδοτεί φορτίο 500 kW με συντελεστή ισχύος 0,75 χωρ..

Άσκηση 5.

Δίδεται τριφασική σύγχρονη γεννήτρια, 10 kVA, 3,3 kV με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, η οποία έχει ωμική αντίσταση 0,2 Ω και σύγχρονη αντίδραση ανά φάση 5,5 Ω. Η γεννήτρια παρέχει τα ονομαστικά kVA με την ονομαστική της τάση σε φορτίο με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγ.. Να υπολογίσετε την τερματική τάση της γεννήτριας όταν το ρεύμα διεγέρσεως και το ρεύμα φορτίου είναι το ίδιο, ενώ το φορτίο έχει συντελεστή ισχύος 0,8 χωρ..

Άσκηση 6.

Δίδεται μονοφασική σύγχρονη γεννήτρια, 500 V, 50 kVA, η οποία έχει ωμική αντίσταση 0,20 Ω. Ένα ρεύμα διεγέρσεως 7 A, παράγει ρεύμα 120 A στα κυκλώματα του δρομέα στην κατάσταση βραχυκυκλώσεως και 320 V στη λειτουργία χωρίς φορτίο. Να υπολογίσετε τη σύγχρονη σύνθετη αντίσταση και τη σύγχρονη αντίδραση, αντίστοιχα της μηχανής.

Άσκηση 7.

Σύγχρονη γεννήτρια με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, παράγει πολική τάση στη λειτουργία χωρίς φορτίο 3.300 V. Η γεννήτρια παρέχει ρεύμα 150 A, σε φορτίο με συντελεστή ισχύος 0,75 επαγ., ενώ η πτώση τάσεως επί τοις εκατό (%) από τη λειτουργία χωρίς φορτίο στη λειτουργία με πλήρες φορτίο είναι 18%. Να υπολογίσετε τη σύγχρονη αντίδραση ανά φάση της γεννήτριας.

Άσκηση 8.

Σε μια σύγχρονη γεννήτρια με ρεύμα διεγέρσεως 5 A, προκαλούμε την κυκλοφορία 100 A στα κυκλώματα διεγέρσεως, ενώ η φασική τάση διεγέρσεως είναι 220 V στη λειτουργία χωρίς φορτίο. Η γεννήτρια συνδέεται με ένα τριφασικό σύστημα αντιστάσεων 0,35 Ω/φάση, συνδεδεμένο σε αστέρα, το οποίο τροφοδοτείται με 300 kW. Η σύνδεση της γεννήτριας με το φορτίο γίνεται με ένα τριφασικό καλώδιο, το οποίο

έχει ωμική αντίσταση και επαγωγική αντίσταση ανά φάση $0,75 \Omega$ και 1Ω αντίστοιχα. Να υπολογίσετε την πολική τάση διεγέρσεως της γεννήτριας.

Άσκηση 9.

Δίδεται τριφασική σύγχρονη γεννήτρια, 10 kVA , $3,3 \text{ kV}$ με σύνδεση φάσεων σε αστέρα, η οποία τροφοδοτεί φορτίο με συντελεστή ισχύος $0,85$ επαγ.. Η γεννήτρια έχει ωμική αντίσταση και σύγχρονη αντίδραση ανά φάση $0,21 \Omega$ και 3Ω αντίστοιχα. Οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες πυρήνα είναι 11 kW και 28 kW αντίστοιχα. Να υπολογίσετε την απόδοση της γεννήτριας στο πλήρες φορτίο.

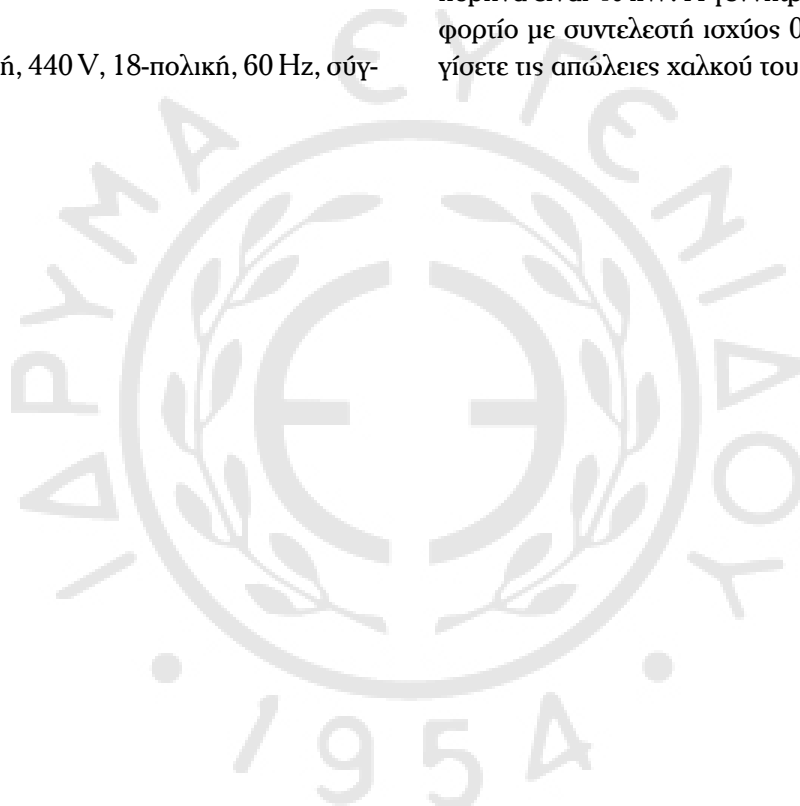
Άσκηση 10.

Δίδεται τριφασική, 440 V , 18-πολική, 60 Hz , σύγ-

χρονη γεννήτρια η οποία έχει ωμική αντίσταση $0,02 \Omega$ και σύγχρονη αντίδραση ανά φάση 3Ω . Η γεννήτρια παρέχει 150 kW σε φορτίο με συντελεστή ισχύος $0,85$ επαγ.. Οι μηχανικές απώλειες είναι 15 kW . Να υπολογίσετε τη ροπή στον άξονα της γεννήτριας.

Άσκηση 11.

Δίδεται τριφασική σύγχρονη γεννήτρια, 440 V , 60 Hz , η οποία έχει ωμική αντίσταση $0,1 \Omega$ και σύγχρονη αντίδραση ανά φάση $0,66 \Omega$. Η γεννήτρια συνδέεται σε κινητήρια μηχανή 6.000 HP . Οι απώλειες πυρήνα είναι 40 kW . Η γεννήτρια παρέχει 250 kW σε φορτίο με συντελεστή ισχύος $0,85$ επαγ.. Να υπολογίσετε τις απώλειες χαλκού του στάτη της μηχανής.



ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Αγγλικά σύμβολα

A:	Αmpere μονάδα μετρήσεως εντάσεως ηλεκτρικού ρεύματος, εμβαδόν διατομής μαγνητικού κυκλώματος, ακροδέκτης τυλίγματος, εμβαδόν επιφάνειας.
a:	Ακροδέκτης τυλίγματος.
A _c :	Επιφάνεια επαφής της ψήκτρας και του τομέα συλλέκτη.
B:	Μαγνητική επαγωγή ή πυκνότητα μαγνητικής ροής, ακροδέκτης τυλίγματος.
B _{max} :	Μέγιστη τιμή μαγνητικής επαγωγής.
b:	Ακροδέκτης τυλίγματος.
C, c:	Ακροδέκτες τυλίγματος.
D:	Διάμετρος.
E:	Ηλεκτρεγερτική δύναμη, ένταση ηλεκτρικού πεδίου.
e:	Στιγμιαία τιμή της ηλεκτρεγερτικής δυνάμεως.
F:	Μαγνητεγερτική δύναμη.
F _L :	Δύναμη Laplace.
f:	Συχνότητα.
G:	Βάρος.
H:	Μαγνητική διέγερση.
I:	Ένταση ρεύματος.
İ:	Διάνυσμα ρεύματος.
i:	Στιγμιαία τιμή του ρεύματος.
J:	Πυκνότητα ρεύματος.
K:	Λόγος μετασχηματισμού.
K _e :	Σταθερή χαρακτηριστική υλικού.
K _d :	Συντελεστής κατανομής.
K _f :	Συντελεστής κυματομορφής.
K _p :	Συντελεστής βήματος.
k:	Χιλιάδες.
L:	Αυτεπαγωγή.
ℓ:	Μήκος.
m:	Μάζα, αυλάκια ανά φάση ανά πόλο.
N:	Βόρειος πόλος.
n:	Αριθμός σπειρών, ταχύτητα περιστροφής δρομέα, αυλάκια ανά πόλο.

n _s :	Σύγχρονη ταχύτητα.
P:	Αριθμός πόλων, είσοδος, έξοδος, ισχύς, απώλειες.
q:	Ηλεκτρικό φορτίο.
R:	Αντίσταση.
R', R'':	Ισοδύναμες αντιστάσεις.
R _m :	Μαγνητική αντίσταση.
r:	Ακτίνα.
S:	Φαινομένη ισχύ, Νότιος πόλος.
T:	Περίοδος χρόνου, Ροπή.
t:	Χρόνος.
U:	Τάση, Όγκος.
V:	Τάση.
Ÿ:	Διάνυσμα τάσεως.
v:	Ταχύτητα.
W:	Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια.
Z:	Σύνθετη αντίσταση.

Ελληνικά σύμβολα

A:	Ακροδέκτης τυλίγματος.
α:	Συλλέκτης, παράλληλος κλάδος, αρχικό τμήμα στατικής χαρακτηριστικής, ηλεκτρική γωνία.
β:	Τμήμα στατικής χαρακτηριστικής, τομέας συλλέκτη.
γ:	Τμήμα στατικής χαρακτηριστικής, γωνία αυλακίου.
Δ:	Διαφορά.
δ:	Γωνία ισχύος.
η:	Απόδοση.
λ:	Σταθερά.
μ:	Μαγνητική διαπερατότητα.
π:	3,14.
Σ:	Άθροισμα.
σ:	Συντελεστής σκεδάσεως.
τ:	Πολικό βήμα.
φ:	Μαγνητική ροή, γωνία μεταξύ διανύσματος τάσεως και ρεύματος.
Ψ:	Πεπλεγμένη ροή.
ψ:	Γωνία μετατοπίσεως του ουδέτερου άξονα.
ω:	Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

A

Αγωγός 2
Άεργος ισχύς 168
Αμφίδρομη δίοδος σκανδαλισμού 75
Αμφίδρομη τρίοδος σκανδαλισμού 75
Ανάπτυξη τάσεως σε μια γεννήτρια ΣΡ 101
Ανάπτυξη τάσεως σε μια σύγχρονη γεννήτρια 160
Αναπυσομένη ηλεκτρομαγνητική ισχύς 167
Ανορθωτές ισχύος 73
Αντίδραση τυμπάνου 102
Απόδοση
 Μ/Σ 40
 γεννήτριας ΣΡ 116
 κινητήρα ΣΡ 149
 σύγχρονης γεννήτριας 166
Απώλειες
 πραγματικών Μ/Σ 39
 γεννητριών ΣΡ 115
 συγχρόνων γεννητριών 166
Αρμονικές Μ/Σ 30
Αυτεπαγωγή 9
Αυτοδιέγερση 109
Αυτόματος ρυθμιστής τάσεως 171
Αυτομετασχηματιστής 64

B

Βασικές αρχές λειτουργίας γραμμικής μηχανής ΣΡ 9
Βλάβες μηχανών ΣΡ 140
Βλάβες συγχρόνων γεννητριών 172
Βοηθητικοί μαγνητικοί πόλοι 104
Βρόχος υστερήσεως 39

Γ

Γεννήτρια ΣΡ ξένης διεγέρσεως 107
 με παράλληλη διέγερση 109
 με διέγερση σειράς 111
 σύνθετης διεγέρσεως 112
Γωνία ισχύος 168

Δ

Δευτερεύον 33
Διάγραμμα ροής ισχύος σύγχρονης γεννήτριας 166
Διάκενο 17
Διακύμανση τάσεως 38
Διανυσματικά διαγράμματα 32, 36, 159-162, 167-168

Διεγέρτρια 153

Δίοδος 73
Δοκιμή συνεχούς ρεύματος 169
Δοκιμή σε βραχύκλωμα 170
Δοκιμή χωρίς φορτίο 170
Δρομέας 96
Δύναμη Laplace 1

Ε

Ελάσματα 140
Ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου 74
Εμπρόσθια μετωπική σύνδεση 97
Επαγωγικό ρεύμα 8
Επαγωγικό τύμπανο 153

Z

Ζυγώματα 26

H

Ηλεκτρεγερτική δύναμη 7
Ηλεκτρικές απώλειες 115
Ηλεκτρικές μοίρες 155

Θ

Θερμική απόκλιση 77
Θερμική καταβόθρα 78
Θεωρία του μαγνητικού πεδίου 1

I

Ιδανικός Μ/Σ 27
Ισοδύναμα κυκλώματα γεννητριών ΣΡ 107, 109, 111-113
Ισοδύναμα κυκλώματα Μ/Σ 31-32, 34-35, 37
Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας 166

K

Κανόνας του Lenz 8
Κατανομή της πραγματικής ισχύος
 στις γεννήτριες ΣΡ 116
Κινητήρας ΣΡ 125
Κρίσιμη αντίσταση 110
Κυλινδρικός δρομέας 153

Λ

Λόγος μετασχηματισμού 27

M

Μαγνητικές απώλειες 115
 Μαγνητεγερτική δύναμη 16
 Μαγνητική αντίσταση 17
 Μαγνητική διαπερατότητα 3
 διέγερση 3
 ροή 2
 τάση 5
 Μαγνητικό κύκλωμα 16
 Μαγνητικό πεδίο 1
 Μεταγωγή 105
 Μετασχηματιστής 25
 Μηχανικές απώλειες 115, 166
 Μηχανικές μοίρες 155

N

Νόμος της αυτεπαγωγής 9
 Νόμος του διαρρέυματος (Ampere) 4
 Νόμος του Faraday 7

O

Ονομαστικό ρεύμα φορτίου 113
 Οπίσθια μετωπική σύνδεση 97

Π

Παραμένων μαγνητισμός 109
 Πειραματικός προσδιορισμός του κυκλώματος μιας
 σύγχρονης γεννήτριας 169
 Πειραματικός προσδιορισμός των παραμέτρων του
 ισοδυνάμου κυκλώματος του πραγματικού Μ/Σ 36
 Πέλμα 96
 Περίβλημα 78
 Πεπλεγμένη ροή 29
 Πολικότητα 159
 Πολικό βήμα 98
 Πολικό ρεύμα 159

Σ

Σιδηρομαγνητικά υλικά 17, 39, 96
 Σκέλη 26
 Στάτης 95, 153
 Σύγχρονη αντίδραση 166

Σύγχρονη γεννήτρια 153
 Συλλέκτης 96
 Συνενέργεια 85
 Συντελεστής βήματος 161
 Συντελεστής κατανομής 162
 Συντελεστής κυματομορφής 161
 Σύστημα Ward-Leonard 136
 Σχετική μαγνητική διαπερατότητα 3

T

Τομείς 96
 Τρίγωνο αντιστάσεων 171
 Τυλίγματα μηχανών ΣΡ 97
 Τυλίγματα τυμπάνου συγχρόνων γεννητριών 157
 Τύπου μανδύα Μ/Σ 25
 Τύπου πυρήνα Μ/Σ 25

Υ

Υπερσύνθετη διέγερση 113
 Υστέρηση 28, 39

Φ

Φαινομένη ισχύς 64
 Φασικό ρεύμα 159
 Φασική τάση 159

X

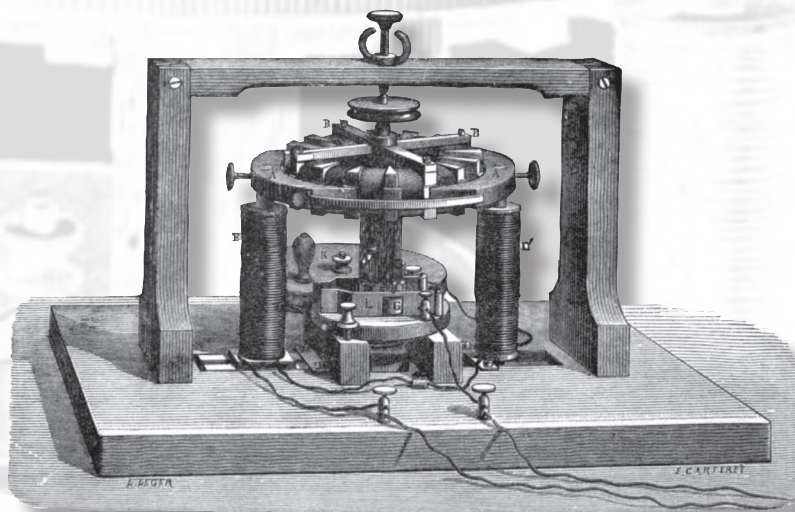
Χαρακτηριστική τάσεως-ρεύματος διόδου 73
 του DIAC 75
 του TRIAC 75
 του τρανζίστορ ισχύος 75
 Χαρακτηριστική κινητήρα ΣΡ με
 σύνθετη διέγερση 132
 Χαρακτηριστική χωρίς φορτίο και
 σε βραχυκύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας 170
 Χαρακτηριστική χωρίς φορτίο
 σύγχρονης γεννήτριας 170

Ψ

Ψαλιδιστής 139
 Ψήκτες 97

Ω

Ωφέλιμη ισχύς 116



Στοιχειώδης ηλεκτρική μηχανή του Pacinotti (1860).