

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**ΘΕΜΑ : ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΡΩΩΣΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΗΝ
ΝΑΥΤΙΑΙΑ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΚΙΑΜΟΥΡΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΠΑΠΑΣΤΑΜΟΥΛΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ

2012

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ : ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΡΩΩΣΗ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΗΝ
ΝΑΥΤΙΑΙΑ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΚΙΑΜΟΥΡΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΑΜ : 4166

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ :

20-09-2012

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Ο καθηγητής

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία θα γίνει μελέτη του συστήματος ηλεκτροπρόωσης. Θα εξειδικεύσουμε τη χρήση του προηγούμενου συστήματος στη ναυτιλία. Πιο συγκεκριμένα, θα ξεκινήσουμε με την γενική περιγραφή του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης. Στη συνέχεια, θα γίνει μία ιστορική αναδρομή για να δούμε πώς εξελίχθηκαν οι κινητήρες ηλεκτροπρόωσης. Μετά θα εξετάσουμε από ποιους παράγοντες καθορίζεται η σχεδίαση ενός συστήματος ηλεκτροπρόωσης. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι το είδος των κινητηρίων μηχανών του πλοίου, οι γεννήτριες του πλοίου και τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού πεδίου. Συνεχίζοντας, θα αναλύσουμε κάποιους επιστημονικούς όρους που χρησιμοποιούνται στην έρευνα που σχετίζεται με την ηλεκτροπρόωση. Στη συνέχεια θα δούμε τις κατηγορίες των κινητήρων ηλεκτρικής πρόωσης: κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, προηγμένοι κινητήρες εναλασσόμενου ρεύματος, πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής και πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής. Μετά θα αναλύσουμε με ποιες τεχνικές ελέγχουμε ένα κινητήρα AC: για να ελέγξουμε την ταχύτητα (αλλά και τη ροπή) σε ένα κινητήρα εναλασσόμενου ρεύματος, απαιτείται περισσότερη προσπάθεια από ότι σε ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Μετά θα γίνει μία σύντομη παρουσίαση του ηλεκτρικού πεδίου των πλοίων. Έπειτα θα εξετάσουμε τη συνεργασία της έλικας – και των κινητήρων πρόωσης. Έπειτα, θα δούμε ότι η ηλεκτροπρόωση έχει εφαρμογές σε πολλά είδη σκαφών: επιβατικά, υποβρύχια, πολεμικά, κ.α. Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος για οδήγηση ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης. Τέλος, θα αναφέρουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης.

Abstract

In the present thesis we are going to study the electric propulsion system. More precisely, we will analyze the way that this system is applied in the maritime industry. More specifically, firstly we will describe the electric propulsion system in general. Next, there will be a historical overview of the electric propulsion systems' evolution. After that, we are going to examine the applications of the electric propulsion in various kinds of ships: passenger ships, submarines, warships. Furthermore, we will examine what factors determine the design of an electric propulsion system. The most important of these factors are the type of the ship's machinery, the ship's generators and the features of the electrical network. Next, we are going to analyze the terminology that is used in the research projects. After that, we will present the electrical network of the ship. Next, we will analyze the kinds of the electric propulsion engines: permanent magnet engines, AC engines, multi-level transverse and axis flux motors. Furthermore, we will present the way that the velocity and the torque of an AC engine is controlled. It's more difficult to control an AC engine than a DC engine. Next, we are going to examine how the propeller and the electric propulsion system interact with each other. Finally, we will analyze the electronic power converters for driving electric propulsion motors.

Πρόλογος

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται το σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης και η χρήση του συστήματος αυτού στην ναυτιλία. Η ηλεκτρική πρόωση είναι ένα θέμα ιδιαίτερα σημαντικό, αφού σήμερα με αυτήν μειώνεται το κόστος της πρόωσης και επίσης μειώνεται η ρύπανση του περιβάλλοντος. Το σύστημα της ηλεκτρικής πρόωσης είναι σήμερα από τα πιο δημοφιλή και χρησιμοποιείται αρκετά συχνά σε σχέση με τις άλλες εναλλακτικές πηγές ισχύος. Αυτό θα φανεί τόσο από την ιστορική αναδρομή που θα κάνουμε όσο και από τις εφαρμογές αυτού του συστήματος που θα αναλυθούν στην παρούσα εργασία.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση, κατανόηση και περιγραφή των ηλεκτρικών συστημάτων πρόωσης. Πιο συγκεκριμένα, ξεκινώντας από την γενική περιγραφή αυτών των συστημάτων, στη συνέχεια θα αναλύσουμε την σχεδίαση του συστήματος ηλεκτροπρόωσης των πλοίων και τη σχετική με την ηλεκτροπρόωση ορολογία. Επιπλέον, για να έχουμε μία πληρέστερη εικόνα σχετικά με το θέμα που εξετάζουμε, θα αναλύσουμε τη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου των πλοίων και στη συνέχεια έχοντας κάνει όλη αυτή την ανάλυση θα μπορούμε να προχωρήσουμε στις κατηγορίες αυτών των κινητήρων. Τέλος, θα εξετάσουμε και κάποια πιο εξειδικευμένα θέματα που σχετίζονται με την ηλεκτροπρόωση στα τελευταία κεφάλαια αυτής της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, θα εξετάσουμε τις τεχνικές ελέγχου των κινητήρων AC, τη συνεργασία έλικα και κινητήρα πρόωσης, και τέλος τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος για την οδήγηση των ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης.

Κεφάλαιο 1

1.1 Περιγραφή του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης

Όταν ένα πλοίο κινείται με ηλεκτροπρόωση, τότε κατά την πρόωσή του οι άξονες του πλοίου κινούνται απ' ευθείας (ή και σπανιότερα μέσω μειωτήρων) από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες μηχανές (για παράδειγμα: diesel, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους). Οι άλλες μηχανές ή κινητήρες που αναφέρθηκαν, εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής πρόωσης, αλλά αντί να κινούν απ' ευθείας το αξονικό σύστημα με την έλικα κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες, που με τη σειρά τους τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως, οπότε και αναφέρονται στη βιβλιογραφία σαν "prime movers" ('κινητήριες μηχανές'). Έχουμε δύο ειδών κινητήριες μηχανές:

- Diesel
- Με αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους

Και οι δύο κινητήριες μηχανές ρυπαίνουν λιγότερο το περιβάλλον σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα πρόωσης που χρησιμοποιούνται στα πλοία, στα οποία έχουμε καύση πετρελαίου.

Η προωστήρια εγκατάσταση συμπληρώνεται από κάποιο σύστημα ελέγχου για τον χειρισμό της, δηλαδή την κράτηση-εκκίνηση, την αυξομείωση στροφών και την αλλαγή φοράς περιστροφής των ηλεκτρικών κινητήρων.

Η ηλεκτροπρόωση σαν ιδέα έχει παρουσιαστεί πριν από περίπου 100 χρόνια. Επί μεγάλο διάστημα, τα συστήματα ήταν του τύπου Σ.Ρ./Σ.Ρ. (συχνά συστήματα Ward – Leonard) δηλ. παραγωγή συνεχούς τάσης και κίνηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Το εναλλασσόμενο ρεύμα αρχίζει να χρησιμοποιείται στα πλοία στις αρχές της δεκαετίας του 1950, αλλά τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης εξακολουθούν να στηρίζονται σε κινητήρες Σ.Ρ. Τις δύο τελευταίες δεκαετίες, η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος έφερε επανάσταση στον έλεγχο των ηλεκτρικών κινητήρων. Η ανάπτυξη διατάξεων και τεχνικών ελέγχου κινητήρων Εναλλασσόμενου Ρεύματος, που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της πρόωσης από πλευράς τόσο ευελιξίας όσο και οικονομίας καυσίμου, βοήθησε έτσι ώστε η ηλεκτρική πρόωση να διαδοθεί σε εμπορικά πλοία και έτσι στις μέρες μας πάρα πολλά πλοία για την πρόωση τους διαθέτουν ηλεκτρικούς κινητήρες. Το 2002 η εγκατεστημένη ισχύς συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης ήταν 6 – 7 GW, εκτός των εγκαταστάσεων σε εφαρμογές πολεμικών σκαφών υποβρυχίων και επιφάνειας. Τη δεκαετία του '90, η ανάπτυξη των αζιμουθιακών προωστήρων, προσέφερε στα πλοία ευελιξία στις κινήσεις, ευκολία στις διελεύσεις από περιοχές υψηλής κινητικότητας και επικινδυνότητας και τη δυνατότητα δυναμικής τοποθέτησής τους.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η ηλεκτροπρόωση, σε πειραματικό στάδιο εφαρμόστηκε στο τέλος του 19ου αιώνα σε Ρωσία και Γερμανία. Σε αυτές τις εφαρμογές, ο ηλεκτροκινητήρας πρόωσης τροφοδοτούταν απευθείας από συστοιχίες συσσωρευτών. Η πρώτη γενιά ηλεκτροπρόωσης εφαρμόστηκε περί το 1920. Ήταν αποτέλεσμα του μεγάλου ανταγωνισμού για μείωση του χρόνου των υπερατλαντικών ταξιδιών, μεταξύ των ναυτιλιακών εταιριών επιβατηγών πλοίων. Οι μεγάλες απαιτήσεις σε ισχύ πρόωσης καλύπτονταν τότε από στρόβιλο – ηλεκτρικά συστήματα. Το πλοίο S/S Normandie (Εικόνα 1.2.α) χρησιμοποιούσε ένα τέτοιο σύστημα, ήταν το πρώτο σκάφος που διέσχισε τον Ατλαντικό Ωκεανό (1935) κινούμενο με 30 και πλέον κόμβους.



Εικόνα 1.2.α: Το πλοίο S/S Normandie (1935)

Ατμοστρόβιλοι τροφοδοτούσαν τους σύγχρονους ηλεκτροκινητήρες ισχύος 29 MW σε καθέναν από τους τέσσερις άξονες μετάδοσης κίνησης. Η ταχύτητα περιστροφής δινόταν από την ηλεκτρική συχνότητα των γεννητριών. Σε κανονική λειτουργία οι γεννήτριες τροφοδοτούσαν κάθε μηχανή πρόωσης ξεχωριστά. Σε αρκετές περιπτώσεις, όμως, ήταν δυνατόν να τροφοδοτηθούν δύο μηχανές από μία γεννήτρια για ταξίδι χαμηλότερης ταχύτητας.

Όταν περίπου το 1950 άρχισαν να χρησιμοποιούνται οι μηχανές Diesel, η τεχνολογία ατμοστρόβιλων και η ηλεκτρική πρόωση εξαφανίστηκαν λίγο πολύ από την εμπορική ναυτιλία μέχρι τη δεκαετία του '80. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος και συγκεκριμένα των συστημάτων οδήγησης των ηλεκτρικών κινητήρων, έφεραν τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα πάλι στα πλοία. Αρχικά, αυτό έγινε το 1970 μέσω των ανορθωτών (E.P./Σ.Ρ.) για τον έλεγχο μηχανών

πρόωσης Σ.Ρ. και στη συνέχεια το 1980 με τη χρήση των μετατροπέων E.P./E.P. για τον έλεγχο μηχανών E.P., έχουμε τη δεύτερη γενιά ηλεκτροπρόωσης.

Πιο συγκεκριμένα, σε αυτές τις μηχανές, το σύστημα πρόωσης τροφοδοτείται πλέον από ένα ισχυρό δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότητας. Μέσω του ελέγχου των στροφών των ηλεκτρικών κινητήρων στρέφονται οι έλικες σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propellers – FPP). Το παραπάνω σύστημα εφαρμόστηκε αρχικά σε ειδικές κατηγορίες πλοίων, όπως ερευνητικά και παγοθραυστικά πλοία αλλά και σε κρουαζιερόπλοια. Το S/S Queen Elizabeth II, μετατράπηκε σε ηλεκτροκίνητο περί το 1975, στη συνέχεια ακολούθησαν και άλλα πλοία όπως τα κρουαζιερόπλοια Fantasy και Princess. Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι στην άμεσα οδηγούμενη πετρελαιοκίνητη πρόωση, η ώση συνήθως ελέγχεται μέσω ενός υδραυλικού συστήματος αλλαγής του βήματος των ελίκων. Οι έλικες αυτές είναι γνωστές ως έλικες μεταβλητού βήματος (Controllable Pitch Propellers – CPP).

Το 1990 άρχισε να χρησιμοποιείται το αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης (podded propulsion), στο οποίο ο ηλεκτρικός κινητήρας βρίσκεται μέσα σε μια λοβοειδή κατασκευή ποντισμένη στη θάλασσα. Η έλικα, που είναι απευθείας συνδεδεμένη με τον κινητήρα, είναι σταθερού βήματος και το όλο σύστημα μπορεί να περιστραφεί κατά ένα πλήρη κύκλο, δηλαδή 360° , προσφέροντας στο πλοίο ευκινησία και ευελιξία. Εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στο κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation”, και τα αποτελέσματα ήταν τόσο ενθαρρυντικά ώστε να καθιερωθεί η αζιμουθιακή πρόωση στα νέα κρουαζιερόπλοια (Εικόνα 1.2.β).



Εικόνα 1.2.β: Το κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation” με αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης (κάτω δεξιά) και άλλα πλοία που χρησιμοποιούν το ίδιο σύστημα (αριστερά), με σημαντικό ελεύθερο χώρο

Κεφάλαιο 2

Ορολογία ηλεκτροπρόωσης

Η ηλεκτρική πρόωση χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στις μέρες μας. Στην έρευνα που σχετίζεται με την ηλεκτροπρόωση, συναντάει κανείς κάποιους επιστημονικούς όρους, τους σημαντικότερους από τους οποίους θα αναπτύξουμε σε αυτό το κεφάλαιο.

α. Πλήρης ηλεκτροπρόωση (Full Electric Propulsion – F.E.P.). Σε αυτή την περίπτωση η εγκατάσταση στο πλοίο είναι τέτοια ώστε το πλοίο να κινείται αποκλειστικά από ηλεκτρικούς κινητήρες. Τα ζεύγη κινητηρίων μηχανών – γεννητριών που τροφοδοτούν τους κινητήρες πρόωσης υπάρχουν αποκλειστικά για το σκοπό αυτό καθώς δεν τροφοδοτούν άλλα φορτία. Η ηλεκτρική ισχύς για όλους τους άλλους καταναλωτές του πλοίου παράγεται από άλλες γεννήτριες.

β. Ολοκληρωμένη πλήρης ηλεκτροπρόωση (Integrated Full Electric Propulsion – I.F.E.P.). Η εγκατάσταση ηλεκτροπρόωσης στην οποία τα ίδια ζεύγη κινητηρίων μηχανών – γεννητριών, τροφοδοτούν τόσο τους ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης, όσο και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου.

γ. Πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship – A.E.S.). Το πλοίο που διαθέτει ολοκληρωμένη πλήρη ηλεκτροπρόωση και που επιπλέον σε ευρεία έκταση επιτελεί τις λειτουργίες του μέσω ηλεκτρικών μηχανημάτων και συστημάτων.

δ. Ηλεκτρικό δίκτυο πρόωσης (Propulsion Network). Το τμήμα εκείνο (ανεξάρτητο ή ενσωματωμένο) του ηλεκτρικού δικτύου πλοίου που τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία που σχετίζονται με την πρόωση.

ε. Ηλεκτρικό δίκτυο χρήσης (Ship Service System). Είναι το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου, αν εξαιρέσουμε το δίκτυο πρόωσης.

Κεφάλαιο 3

Σχεδίαση του συστήματος ηλεκτροπρόωσης

Γενικά, υπάρχει μεγάλη ποικιλία όσον αφορά στο σχεδιασμό των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτροπρόωσης. Η επιλογή του κατάλληλου σχεδιασμού του συστήματος ηλεκτροπρόωσης εξαρτάται από το πλοίο στο οποίο θα προσαρμοστεί. Ο σχεδιασμός ενός σύγχρονου συστήματος ηλεκτροπρόωσης εξαρτάται κυρίως από τους παρακάτω παράγοντες:

1. Από τις κινητήριες μηχανές του πλοίου: Diesel, αεριοστρόβιλοι (ειδικά για πιο αθόρυβη λειτουργία), ατμοστρόβιλοι (ειδικά για πυρηνοκίνητα σκάφη), συσσωρευτές ή ηλεκτροχημικές κυψέλες καυσίμου (fuel cells).
2. Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου, όπως το είδος (DC, AC) και η τιμή της τάσης παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ισχύος (που υπαγορεύεται κυρίως από τις απαιτήσεις ισχύος πρόωσης και τη διαθεσιμότητα παρελκόμενου ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (καλώδια, μονωτικά, διακόπτες πίνακες κ.λ.π.)).
3. Τον αριθμό και το είδος των γεννητριών.
4. Την παράλληλη ή τη μη λειτουργία των γεννητριών.
5. Το ποσοστό αυτοματισμού στη λειτουργία, φόρτωση, παραλληλισμό και κράτηση των γεννητριών.
6. Τον αριθμό και το είδος των κινητήρων πρόωσης. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που εξετάζονται είναι η μέγιστη ισχύς, ο όγκος και το βάρος ανά μονάδα ισχύος, ο μέσος χρόνος μεταξύ επισκευών και βλαβών και ο βαθμός απόδοσης.
7. Το είδος ελέγχου – χειρισμού των κινητήρων πρόωσης.
8. Το είδος των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος
9. Τη σχεδίαση της διάταξης του ηλεκτρικού δικτύου και συγκεκριμένα:

α. Εάν θα υπάρχει διάκριση ανάμεσα στα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου, άρα και στα ηλεκτρικά δίκτυα, σε φορτία πρόωσης και στα λοιπά. Το ζήτημα έχει να κάνει και με το βαθμό εξηλεκτρισμού του πλοίου καθώς η σχέση του ηλεκτρικού δικτύου πρόωσης με το ηλεκτρικό δίκτυο χρήσης μπορεί να είναι μία από τις παρακάτω:

α.1. Τα δύο δίκτυα να μην εξαρτώνται το ένα από το άλλο, δηλαδή το καθένα να εξυπηρετείται από δικές του γεννήτριες και να μη συνδέονται μεταξύ τους ή αν υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης, αυτή να είναι μόνο για κατάσταση ανάγκης.

α.2. Να είναι διακριτά, αλλά να υπάρχει σύνδεση μεταξύ τους οπότε το ένα από τα δύο να μπορεί να τροφοδοτείται και από το άλλο.

α.3. Να είναι ενοποιημένα σε ένα κοινό ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε οδηγούμαστε στο «πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο» (All Electric Ship – A.E.S.), οπότε και είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της εκμετάλλευσης των πλεονεκτημάτων της ηλεκτροπρόωσης.

β. Στην περίπτωση που τα δύο δίκτυα συνδέονται, την επιλογή του τρόπου σύνδεσης (απευθείας μέσω πινάκων, μέσω αντιστροφών (inverters) ή άλλου μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος (power converter), μέσω ζεύγους κινητήρα – γεννήτριας, μέσω μετασχηματιστών κλπ).

γ. Από ποιο δίκτυο τροφοδοτούνται τα βοηθητικά συστήματα πρόωσης (π.χ. τα συστήματα ελέγχου – χειρισμού, ψύξης, λίπανσης).

δ. Από τον τρόπο με τον οποίο διασφαλίζεται η ποιότητα ισχύος του ηλεκτρικού δικτύου όσον αφορά την τάση και την συχνότητα, (θόρυβος – αρμονική παραμόρφωση) και ειδικά του δικτύου χρήσης, όταν αυτό συνδέεται με το δίκτυο πρόωσης. Σαν κύρια πηγή δημιουργίας αρμονικών αναφέρονται τα ηλεκτρονικά ισχύος των ηλεκτροκινητήρων. Η ποιότητα των ηλεκτρικών δικτύων (συχνότητα, αρμονικές τάσεως, ταχείες διαταραχές τάσεως κλπ) καθορίζεται από τις διάφορες προδιαγραφές και τους νηογνώμονες. Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν μόνο το δίκτυο χρήσης του πλοίου, δηλαδή φορτία που δεν σχετίζονται με την πρόωση. Στις περιπτώσεις ανεξαρτήτου δικτύου πρόωσης δεν υπάρχουν προς το παρόν ιδιαίτερες απαιτήσεις ποιότητας για τα φορτία της πρόωσης. Αν όμως το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ενοποιημένο πρέπει ή και το δίκτυο της πρόωσης να ικανοποιεί τις ίδιες απαιτήσεις ποιότητας, ή να λαμβάνεται μέριμνα, ώστε τυχόν «διαταραχές» στο δίκτυο πρόωσης να μην επηρεάζουν το δίκτυο χρήσης. Για δίκτυα συνεχούς ρεύματος δεν υπάρχουν ακόμη εν γένει ιδιαίτερες απαιτήσεις ποιότητας.

ε. Τη διάταξη τέλος του ηλεκτρικού δικτύου πρέπει να μεγιστοποιεί την βιωσιμότητα του πλοίου.

10. Ποιες είναι οι ελάχιστες απαιτήσεις σε περίπτωση ανάγκης. Για παράδειγμα μπορεί να απαιτείται εκκίνηση κινητήρα πρόωσης με μια μόνο γεννήτρια σε λειτουργική κατάσταση, η δυνατότητα τροφοδότησης του ενός δικτύου από το άλλο, η δυνατότητα ενός μόνο κινητήρα να μπορεί να κινήσει το πλοίο με μια ελάχιστη ταχύτητα, ή να απαιτείται η γεννήτρια να μπορεί να τροφοδοτεί τα φορτία ανάγκης και ταυτόχρονα να κινήσει το πλοίο με μια μικρή ταχύτητα (3 – 5 κόμβους).

11. Τη τοποθέτηση των μηχανημάτων, καθώς και τον φυσικό διαχωρισμός τους, όπως για παράδειγμα των πινάκων ηλεκτρικού δικτύου πρόωσης και χρήσης, των κινητήρων πρόωσης και των ηλεκτρονικών διατάξεων οδήγησής τους.

Ως γενικοί κανόνες – απαιτήσεις αναφέρονται:

α. Αν υπάρχει αρκετός χώρος πρέπει οι πίνακες πρόωσης και χρήσης να διαχωρίζονται φυσικά.

β. Οι κινητήρες και οι αντίστοιχοι αντιστροφείς (inverters) πρέπει να τοποθετούνται σε διαφορετικούς στεγανούς τομείς.

γ. Οι μετατροπείς (converters) πρέπει να τοποθετούνται κοντά στους κινητήρες για να μειώνεται το μήκος των καλωδίων.

δ. Τοποθέτηση των κινητήρων (που φυσικά υπαγορεύεται από την διάταξη των αξόνων) όσο πιο πύρμα γίνεται.

12. Η ηλεκτροπρόωση έχει το πλεονέκτημα της ευχέρειας που παρέχει στο σχεδιαστή σχετικά με τη διάταξη των υποσυστημάτων της.

Έτσι είναι δυνατό οι γεννήτριες να τοποθετηθούν σε οποιαδήποτε απόσταση από τους κινητήρες, σχεδόν οπουδήποτε στο πλοίο, αρκεί να μην παραβιάζονται κλασσικοί κανόνες που σχετίζονται με την ευστάθεια του πλοίου, την ισοκατανομή των φορτίων στο πλοίο, την ακουστική υπογραφή και την ευκολία επισκευής.

Κεφάλαιο 4

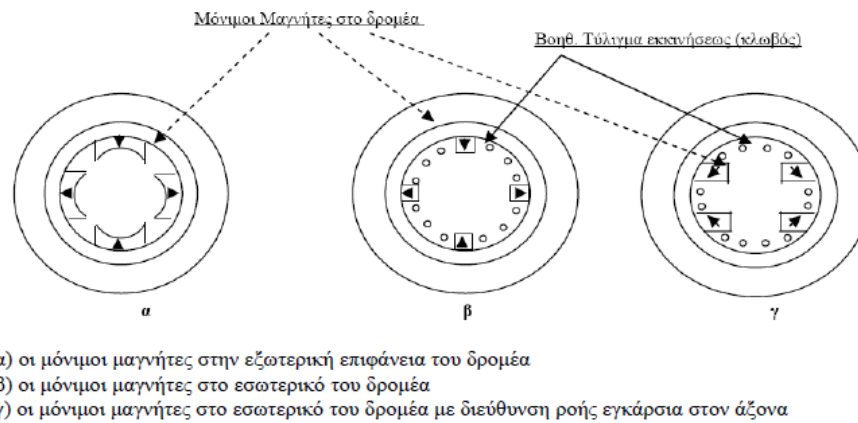
Οι κατηγορίες των κινητήρων ηλεκτρικής πρόωσης

Αρχικά, οι κινητήρες ηλεκτροπρόωσης που χρησιμοποιούνταν ήταν συνεχούς ρεύματος. Αυτός ο κινητήρας συνεχίζει να χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα σε διάφορα πλοία. Στις περισσότερες σύγχρονες εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης χρησιμοποιούνται σύγχρονοι κινητήρες με βαθμό απόδοσης 96 – 98 %, 3 – 4 % περισσότερο από τους ασύγχρονους με ονομαστική τάση λειτουργίας τα 3,3 – 6,6 kV. Μια νέα κατηγορία σύγχρονων κινητήρων έρχεται να προστεθεί στους παραπάνω, οι σύγχρονοι κινητήρες μονίμου μαγνήτη με απόδοση πάνω από 98 %. Στους σύγχρονους κινητήρες μονίμου μαγνήτη το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα το οποίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα αντικαθίσταται από μόνιμους μαγνήτες οι οποίοι παράγουν το ίδιο μαγνητικό πεδίο που στρέφεται στο χώρο σύγχρονα με τον δρομέα. Παρακάτω παρουσιάζουμε τις κυριότερες κατηγορίες των κινητήρων ηλεκτρικής πρόωσης.

4.1 Σύγχρονος κινητήρας μονίμου μαγνήτη

Στους κινητήρες αυτούς (εικόνα 4.1) , δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει τροφοδοσία από μία έξτρα παροχή συνεχούς ρεύματος για το τύλιγμα διέγερσης, ακόμη μειώνονται και οι συνολικές θερμικές απώλειες (Joule), έτσι εξηγείται και ο μεγάλος βαθμός απόδοσης. Η ιδέα της χρήσης μονίμων μαγνητών είναι παλιά αλλά η τεχνολογική πρόοδος τα τελευταία χρόνια είναι που κατέστησε δυνατή την κατασκευή κραμάτων μονίμων μαγνητών (κράματα σαμαρίου – κοβαλτίου, SmCo και νεοβιδίου – σιδήρου – βορείου, NdFeB) που έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή τη μαγνητισή τους για αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, όπως είναι αυτές που αναπτύσσονται στο εσωτερικό μίας στρεφόμενης μηχανής.

Αν επιλέξουμε προσεκτικά τον τρόπο με τον οποίο θα τυλίξουμε το στάτη και τους πόλους του δρομέα, παράγεται ένα ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, συναγωνίζεται έτσι με μία συμβατική σύγχρονη μηχανή στα χαμηλά επίπεδα απότομων αιχμών ροπής (torque ripples) και μηχανικών δονήσεων (vibrations).



Εικόνα 4.1: Διατάξεις σύγχρονων κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες

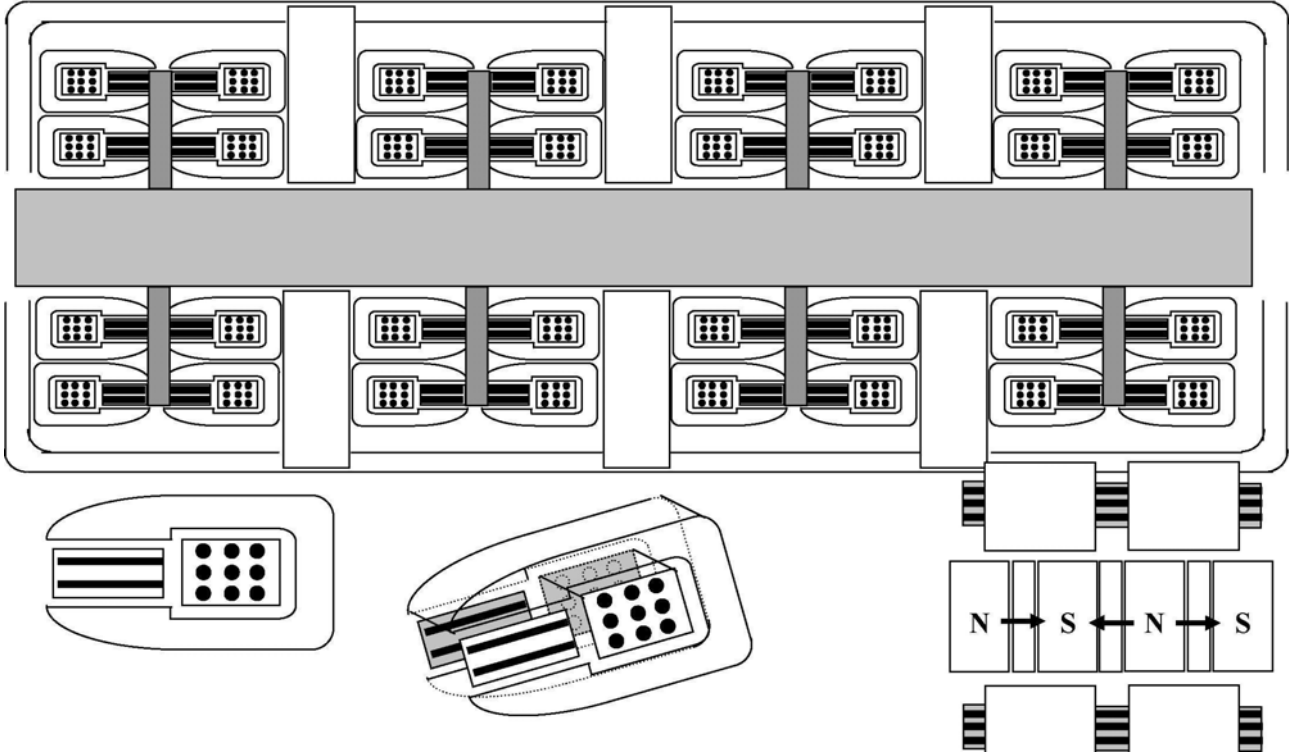
Αξίζει να αναφέρουμε ότι τώρα είναι πολύ συχνή η έρευνα για τη χρησιμοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων με υπεραγώγιμα υλικά ως κινητήρες πρόωσης, κυρίως στην Αμερική. Οι κινητήρες αυτοί, λόγω του ότι το υπεραγώγιμο υλικό έχει αντίσταση που τείνει στο μηδέν για χαμηλές θερμοκρασίες, έχουν πολύ μεγάλη ισχύ ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες. Θεωρούνται έτσι ιδανικοί για την πρόωση πολεμικών πλοίων όπου ο χώρος είναι περιορισμένος σε συνδυασμό με τις αυξημένες ανάγκες ισχύος. Η εταιρεία American Superconductor Inc. χρηματοδοτείται από το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό για να κατασκευάσει έναν κινητήρα πρόωσης ονομαστικής ισχύος 25 MW.

4.2 Προηγμένοι κινητήρες εναλασσόμενου ρεύματος

Σε αυτούς τους κινητήρες η ωφέλιμη μαγνητική ροή είναι κατά την ακτινική διεύθυνση. Αυτό συμβαίνει στις περισσότερες ηλεκτρικές μηχανές. Αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις τέτοιων κινητήρων είναι ο κινητήρας PERMASYN της εταιρείας SIEMENS, με μόνιμους μαγνήτες SmCo που βρίσκει εφαρμογές πρόωσης μεταξύ άλλων σε υποβρύχια του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού. Ένας άλλος τύπος ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης είναι ο εξελιγμένος επαγωγικός κινητήρας (Advanced Induction Motor – AIM) της ALSTOM ο οποίος έχει επιλεγεί για την πρόωση φρεγάτας (Frigate Type 45) του Βρετανικού Πολεμικού Ναυτικού. Σε αυτόν το κινητήρα η πυκνότητα ισχύος και ροπής είναι υψηλή σε σύγκριση με έναν συμβατικό επαγωγικό κινητήρα ίδιας ονομαστικής ισχύος. Η διαφορά με τον κοινό τριφασικό επαγωγικό κινητήρα είναι ότι προσφέρει την δυνατότητα λειτουργίας με 5, 10 ή 15 φάσεις με την βοήθεια εξελιγμένων ηλεκτρονικών ισχύος για να αυξηθεί η ισχύς του κινητήρα.

4.3 Πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής (transverse flux motors)

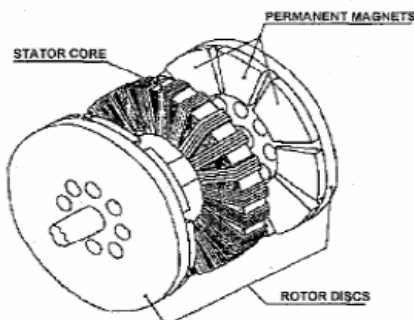
Οι κινητήρες αυτοί έχουν μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, προσανατολισμένους μάλιστα κατά τέτοιο τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει μέσα στο διάκενο σε διεύθυνση εν μέρει κατά την αξονική διεύθυνση και κυρίως κάθετη – εγκάρσια προς τον άξονα της μηχανής.



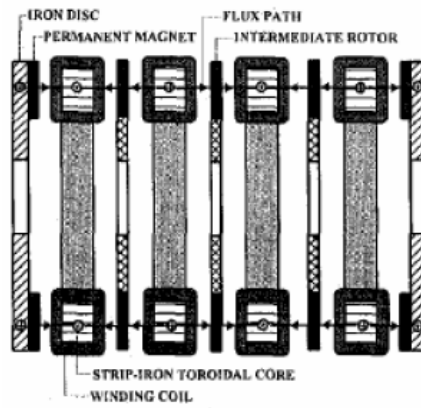
Εικόνα 4.3: Κινητήρας εγκάρσιας ροής

4.4 Πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής (axial flux motors)

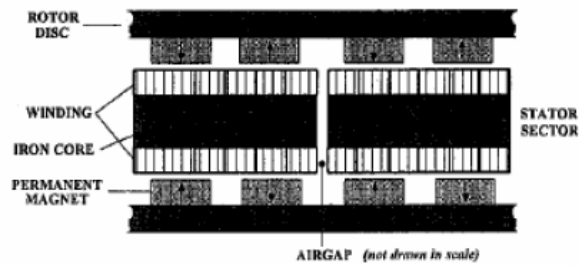
Οι κινητήρες αυτοί έχουν μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα, προσανατολισμένους κατά τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει σε διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα της μηχανής (αξονική).



Εικόνα 4.4: Μηχανή αξονικής ροής.



Εικόνα 4.4.α: Κάθετη τομή κινητήρα αξονικής ροής με 4 σπονδύλους (modules).



Εικόνα 4.4.β: Διάταξη στάτη αποτελούμενου από 4 επιμέρους σπονδύλους κινητήρα αξονικής ροής.

Κεφάλαιο 5

Τεχνικές Ελέγχου Κινητήρων Πρόωσης EP

Για να ελέγξουμε την ταχύτητα (αλλά και τη ροπή) σε ένα κινητήρα εναλασσόμενου ρεύματος, απαιτείται περισσότερη προσπάθεια από ότι σε ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος, όπου η ροπή, M , προκύπτει ως μία ποσότητα ανάλογη του γινομένου του ρεύματος τυλίγματος διεγέρσεως (πεδίου), I_f και του ρεύματος τυλίγματος τυμπάνου, I_A :

$$M=k \cdot I_f \cdot I_A$$

όπου k σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

Παρακάτω παρουσιάζουμε συνοπτικά τις μεθόδους ελέγχου κινητήρων EP με έμφαση σε αυτές που εφαρμόζονται σε κινητήρες ηλεκτροπρόωσης.

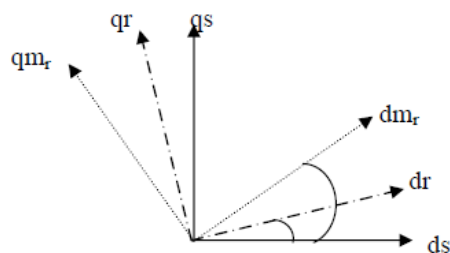
- Βαθμωτός έλεγχος ανοικτού ή κλειστού βρόχου V/F (scalar control): -μη εφαρμόσιμος στην περίπτωση της πρόωσης -: απλά ως αναφορά δίνεται η επιθυμητή μηχανική ταχύτητα χωρίς να λαμβάνεται μέτρηση της πραγματικής ταχύτητας. Η τάση μεταβάλλεται αναλογικά προς την επιθυμητή ταχύτητα σε μία προσπάθεια να μην μεταβάλλεται η ροπή. Σε μία παραλλαγή αυτής της μεθόδου, λαμβάνεται μέτρηση της πραγματικής ταχύτητας που συγκρινόμενη με την επιθυμητή ταχύτητα παράγει ένα σήμα σφάλματος. Το σήμα αυτό οδηγείται σε έναν ελεγκτή PI και παράγεται κατάλληλο σήμα εναύσεως των διακοπών ισχύων. Το ίδιο σήμα ρυθμίζει και την τάση σε μία προσπάθεια να μην μεταβάλλεται η ροπή στον άξονα.
- Έλεγχος με SPWM και CSI (μαζί με συγκριτές υστερήσεως): η στιγμιαία τιμή του ρεύματος εισόδου ελέγχεται συνεχώς ώστε να κυμαίνεται μεταξύ δύο οριακών τιμών κατωφλίου. Σε κάθε προσπάθεια του ρεύματος να υπερβεί τα όρια αυτά, παράγεται σήμα από τον ελεγκτή PWM που δίνει εντολή στους διακόπτες να άγουν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αναιρεθεί η εν λόγω προδιάθεση του ρεύματος.
- Διανυσματικός έλεγχος (vector control): Σε αυτή την περίπτωση ο έλεγχος γίνεται όπως στη μηχανή ΣΡ ξένης διεγέρσεως, όπου η ροπή, M , προκύπτει ως μία ποσότητα ανάλογη του γινομένου του ρεύματος τυλίγματος διεγέρσεως (πεδίου), I_f και του ρεύματος τυλίγματος τυμπάνου, I_A :

$$M=k \cdot I_f \cdot I_A$$

Στην μηχανή ΣΡ όμως τα δύο ηλεκτρομαγνητικά πεδία είναι σταθερά στο χώρο και σε 90° μεταξύ τους. Αντιθέτως, στις μηχανές ΕΡ, τα πεδία αφενός στρέφονται και αφετέρου η μεταξύ τους γωνία αλλάζει όταν γίνονται μεταβολές στις φορτίσεις. Είναι όμως μαθηματικά δυνατόν, να αποσυσζευχθούν τα ρεύματα στάτη και δρομέα σε ένα πλαίσιο αναφοράς που στρέφεται είτε με την ταχύτητα του δρομέα είτε με οποιαδήποτε άλλη ταχύτητα κατά τρόπον ώστε να θεωρηθούν ακίνητα.

Κάθε ρεύμα φάσεως αναλύεται σε δύο επιμέρους διανυσματικές συνιστώσες, τη συνιστώσα ευθέως άξονα (direct axis, d) και τη συνιστώσα εγκαρσίου άξονα (quadrature axis, q). Οι συνιστώσες αυτές είναι κάθετες μεταξύ τους και διατηρούνται ακίνητες ως προς το στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Αυτός ο μετασχηματισμός αποσύζευξης υλοποιήθηκε με ηλεκτρονικά κυκλώματα σε πραγματικό χρόνο περιστροφής των κινητήρων μόλις τα τελευταία 15 χρόνια. Η μεθοδολογία που θα ακολουθήσουμε για την αποσύζευξη εξαρτάται από τον τύπο της μηχανής (σύγχρονη ή ασύγχρονη). Γενικά έχουν αναπτυχθεί διάφορες παραλλαγές, ανάλογα με την εκλογή του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς από τις οποίες η πλέον διαδεδομένη είναι η μέθοδος ελέγχου με προσανατολισμό στο διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής του δρομέα ή έλεγχος πεδίου (field control).

Πιο συγκεκριμένα, στον έλεγχο πεδίου ως πλαίσιο αναφοράς εκλέγεται αυτό που στρέφεται με το διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής του δρομέα, εικόνα 5.



Εικόνα 5: Πλαίσια αναφοράς για διανυσματικό έλεγχο κινητήρων ΕΡ

Επεξήγηση των διάφορων πλαισίων αναφοράς στην εικόνα 5:

(ds,qs): πλαίσιο αναφοράς στάτη (ακίνητο)

(dr,qr): πλαίσιο αναφοράς δρομέα (στρεφόμενο με την ταχύτητα του δρομέα)

(dmr,qmr): πλαίσιο αναφοράς μαγνητικής ροής δρομέα (στρεφόμενο με την ταχύτητα της μαγνητικής ροής του δρομέα).

Στην περίπτωση σύγχρονης μηχανής, τα πλαίσια (dr,qr) και (dmr,qmr) συμπίπτουν.

Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η μέτρηση του διανύσματος μαγνητικής ροής (κατά μέτρο και γωνία) παρουσιάζει μεγάλο βαθμό δυσκολία στην πραγματοποίησή της, επειδή υπεισέρχεται μεγάλο ποσοστό θορύβου, ενώ πρέπει να παρακολουθούνται συνεχώς οι μεταβολές των τιμών

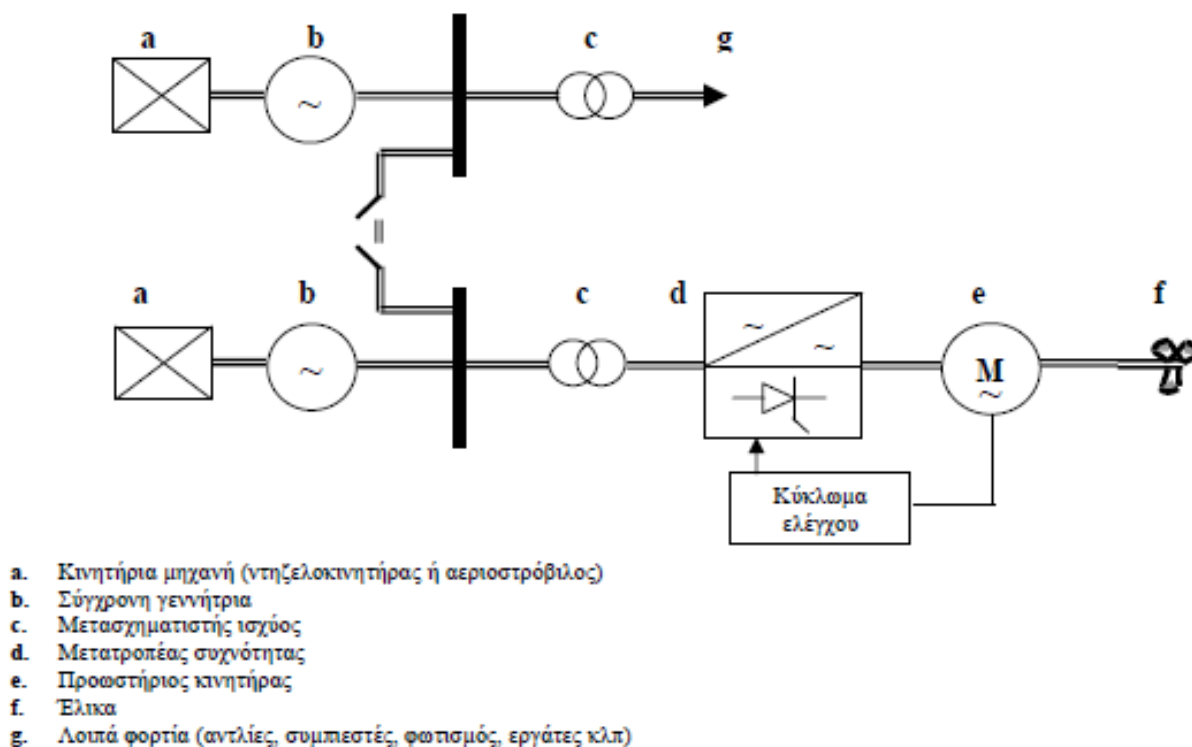
R και L των τυλιγμάτων διότι με την περιστροφή μεταβάλλονται λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών. Ως μειονέκτημα της μεθόδου σημειώνεται ο μεγάλος αριθμός αισθητήρων, μετατροπέων και μετρητικών που πέραν της πολυπλοκότητας που εισάγουν, αυξάνουν το κόστος αλλά και τον χρόνο απόκρισης των διατάξεων ελέγχου. Επιπλέον, με τη μέθοδο του διανυσματικού ελέγχου η ροπή ελέγχεται μόνον με έμμεσο τρόπο χωρίς να αποφεύγονται και κραδασμοί (torque ripples).

Απευθείας έλεγχος ροπής (direct torque control DTC): αυτή η μέθοδος αποτελεί εξέλιξη της μεθόδου του διανυσματικού ελέγχου πεδίου (vector field control). Συνεπώς, όπως και πριν, οι τάσεις και τα ρεύματα του στάτη μετρώνται και μετασχηματίζονται σε στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς, όμως μετράται ή καλύτερα υπολογίζεται η μαγνητική ροή στον στάτη καθώς επίσης και η τιμή της ροπής στον άξονα του κινητήρα. Από τη σύγκριση των μεγεθών μαγνητικής ροής και ροπής με τις επιθυμητές τους τιμές παράγονται τα σήματα ελέγχου των μετατροπέων (για έναυση και σβέση των διακοπών). Η διαδικασία σύγκρισης στηρίζεται σε μη γραμμικές συναρτήσεις και έχει το πλεονέκτημα ότι αξιοποιεί τη διακριτή στον χρόνο συμπεριφορά των διακοπών ισχύος αυξάνοντας τελικά τη συνολική απόδοση. Η τεχνική αυτή έχει ήδη αρχίσει να εφαρμόζεται σε πλοία με ηλεκτρική πρόωση και πιο συγκεκριμένα με αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα σε συνδυασμό με σύγχρονο κινητήρα μονίμων μαγνητών (Azipod, εταιρεία ABB) και κυκλομετατροπείς. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου σε σχέση με το διανυσματικό έλεγχο, είναι ότι ελέγχει απευθείας τη ροπή εξόδου του κινητήρα, έχει πολύ μικρότερες απαιτήσεις σε μετρήσεις και υπολογισμούς μεγεθών (π.χ. δεν είναι απαραίτητη η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής) ενώ η παραγόμενη ροπή είναι πλέον εφικτό να μην εμπεριέχει μεγάλες αιχμές (torque ripples).

Κεφάλαιο 6

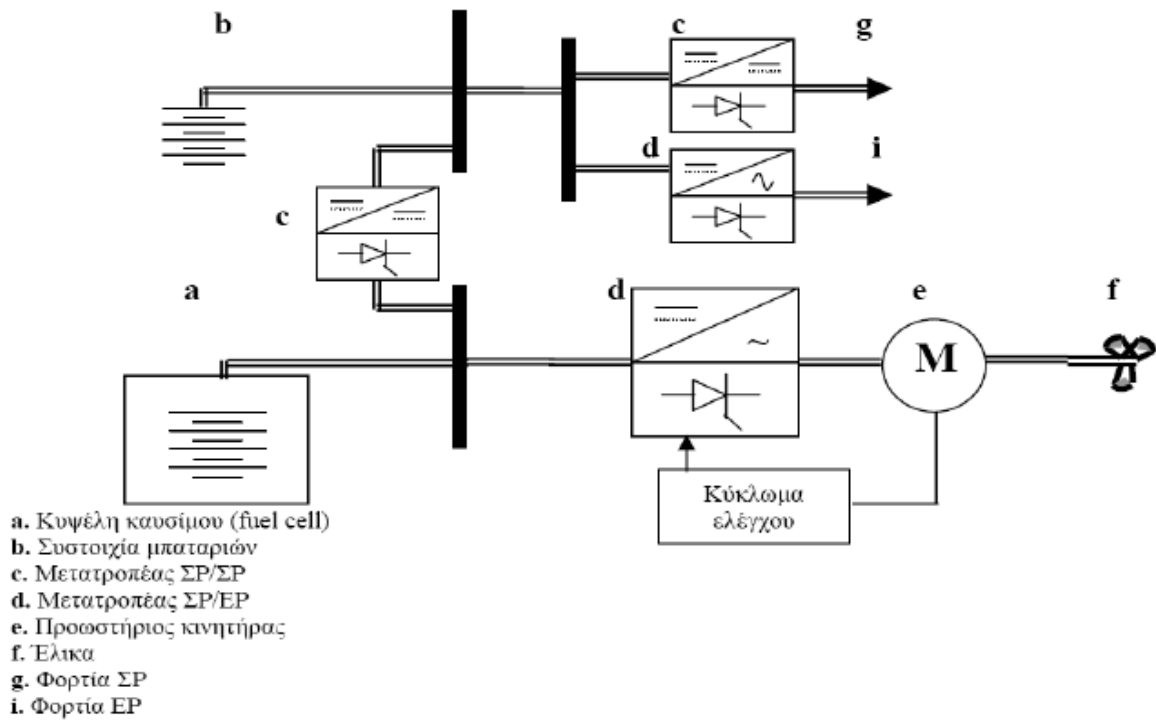
Το ηλεκτρικό δίκτυο των πλοίων

Σε ένα πλοίο το διάγραμμα μίας γενικής μορφής του ηλεκτρολογικού δικτύου απεικονίζεται στην εικόνα 6.1.



Εικόνα 6.1: Γενικό διάγραμμα συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας ενός πλοίου

Στα σύγχρονα υποβρύχια το ηλεκτρικό σύστημα είναι διαφορετικό από αυτό της εικόνας 6.1 Εκεί η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από κυψέλες καυσίμου (fuel cells) (και αποθηκεύεται συστοιχίες συσσωρευτών ΣΡ) για να τροφοδοτήσει καταναλώσεις ΣΡ αλλά και ΕΡ μέσω μετατροπέων ΣΡ/ΕΡ. Ένα τέτοιο σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται στην εικόνα 6.2 . Ηλεκτρογεννήτριες ΕΡ που κινούνται με κινητήρες ντήζελ υφίστανται μεν, αλλά δεν αποτελούν την κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση όμως, οι κινητήρες πρόωσης είναι ΕΡ.



Εικόνα 6.2: Διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου με κυψέλες καυσίμου.

Κεφάλαιο 7

Συνεργασία έλικα – κινητήρα πρόωσης

Το αξονικό σύστημα των πλοίων μειώνεται όταν σε ένα πλοίο έχουμε σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 7.



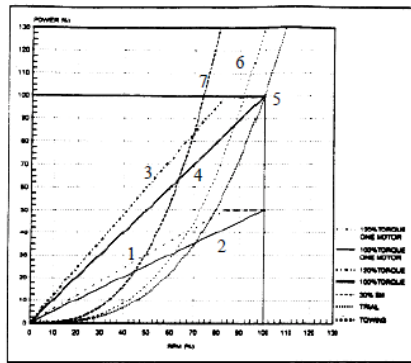
Εικόνα 7: Συγκριτική παρουσίαση αξονικών συστημάτων πλοίων

Το πλεονέκτημα των συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης είναι η συνεχής μεταβολή των στροφών σχεδόν σε όλο το διάστημα 0-100%. Επιπλέον, το 100% της ροπής μπορεί συνήθως να χρησιμοποιηθεί σε όλο το πεδίο λειτουργίας. Για λόγους ασφαλείας, η έλικα κινείται από δύο (ή και περισσότερους) ηλεκτροκινητήρες ίσης ισχύος. Όσον αφορά την έλικα ως μηχανικό φορτίο, ακολουθεί τον λεγόμενο «νόμο της έλικας» δηλ. η μηχανική ροπή ανάλογη του τετραγώνου της μηχανικής ταχύτητας όπως περίπου και οι φυγοκεντρικές αντλίες και οι ανεμιστήρες, αλλά μπορεί η χαρακτηριστική αυτή να είναι σταθερή (έλικα σταθερού βήματος) ή να μεταβάλλεται με αλλαγή της κλίσης των πτερυγίων της (έλικα μεταβλητού βήματος).

7.1 Έλικα Σταθερού Βήματος

Καθώς η υπερτάχυνση δεν είναι δυνατή, η έλικα σχεδιάζεται έτσι ώστε να απορροφά τη μέγιστη συνεχή ισχύ (σημείο MCR) σε κατάσταση δοκιμών, δηλ. πλήρες φορτίο, καθαρή γάστρα και ήρεμο καιρό. Προκειμένου να είναι δυνατή η λειτουργία με πλήρη ισχύ σε δυσμενείς συνθήκες, το σύστημα πρόωσης συνήθως υπολογίζεται για τιμή κατά 10 - 20% μεγαλύτερη της ονομαστικής, χωρίς αύξηση της ισχύος πέρα από τη μέγιστη συνεχή (MCR). Αυτό σημαίνει υπερδιαστασιολόγηση έλικας αξονικού συστήματος - μειωτήρα - κινητήρα - μετατροπέα κατά 10 - 20%.

Η εικόνα 7.1 απεικονίζει τις καμπύλες απαιτούμενης ισχύος σε διάφορες καταστάσεις, καθώς και τα όρια του πεδίου λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες συνδεδεμένους στην ίδια έλικα.

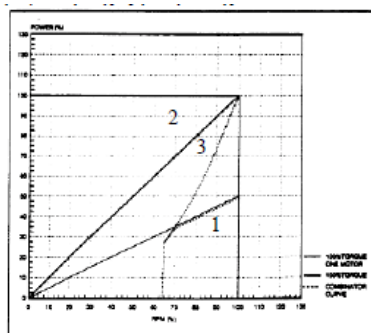


- 1 Λειτουργία ενός ηλεκτρικού κινητήρα σε ροπή 120%
- 2 Λειτουργία ενός ηλεκτρικού κινητήρα σε ροπή 100%
- 3 Λειτουργία δύο ηλεκτρικών κινητήρων σε ροπή 120%
- 4 Λειτουργία δύο ηλεκτρικών κινητήρων σε ροπή 100%
- 5 Λειτουργία 30% SM
- 6 Δοκιμή στη θάλασσα
- 7 Δοκιμή ρυθμολήσεως

Εικόνα 7.1: Πεδίο λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες πρόωσης και έλικα σταθερού βήματος

7.2 Έλικα Ρυθμιζομένου Βήματος

Το σύστημα είναι συχνά (ή θα έπρεπε να είναι) εφοδιασμένο με διάταξη αυτόματης επιλογής του συνδυασμού βήματος - στροφών έλικας στο διάστημα 65 - 100% των στροφών, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη λειτουργία και η καλύτερη δυνατή απόκριση κατά τους χειρισμούς. Όταν η έλικα είναι ρυθμιζομένου βήματος δεν απαιτείται περιθώριο ροπής, διότι η μέγιστη ισχύς μπορεί σχεδόν πάντοτε να απορροφηθεί με ρύθμιση του βήματος. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 7.2.



- 1 Λειτουργία ενός ηλεκτρικού κινητήρα σε ροπή 100%
- 2 Λειτουργία δύο ηλεκτρικών κινητήρων σε ροπή 100%
- 3 Συνδυασμένη λειτουργία

Εικόνα 7.2: Πεδίο λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες πρόωσης και έλικα ρυθμιζομένου βήματος.

Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει την καμπύλη της έλικας που προκύπτει με διάταξη αυτόματης επιλογής του συνδυασμού βήματος - στροφών, καθώς και τα όρια του πεδίου λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες συνδεδεμένους στην ίδια έλικα.

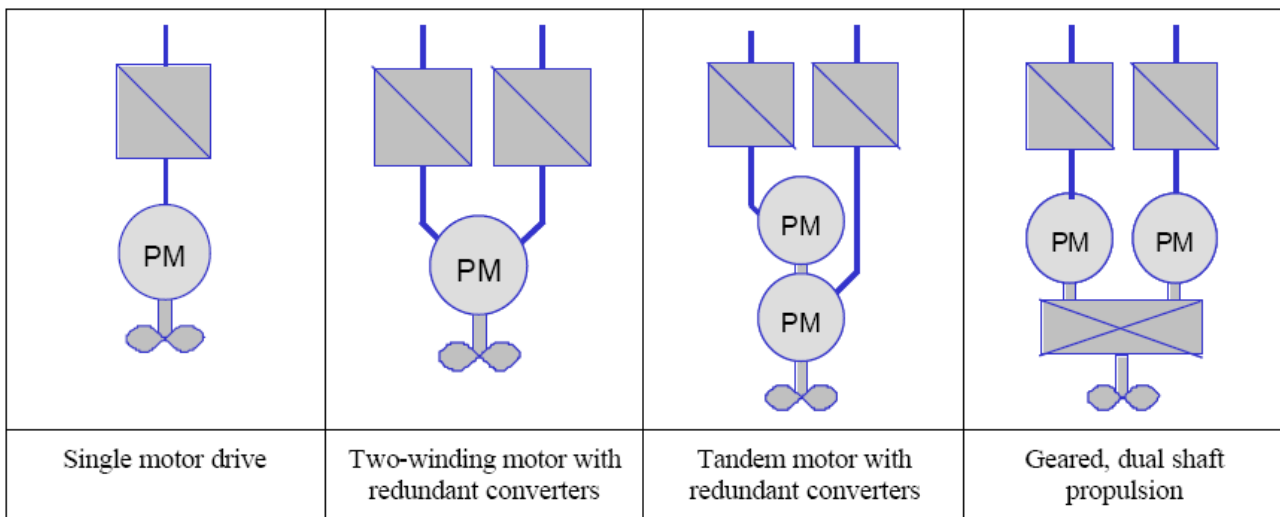
7.3 Κίνηση της έλικας με άξονα (shaft propulsion)

Σε αυτό το είδος πρόωσης οι έλικες ελέγχονται συνήθως από κινητήρες πρόωσης μεταβλητής ταχύτητας (Σχ. 7.3α - 7.3β). Οι ηλεκτρικές μηχανές συνδέονται είτε άμεσα στον άξονα της έλικας, τρόπος απλός και στιβαρός, είτε μέσω μειωτήρων. Η χρήση μειωτήρων, οδηγεί στη χρήση μηχανών σχετικά υψηλών ονομαστικών στροφών, άρα και σε πιο συμπαγείς μηχανές. Το μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι ότι περιλαμβάνουν αρκετά μηχανικά υποσυστήματα, οπότε και περισσότερες μηχανικές απώλειες (βλ. Σχ. 7.3γ).

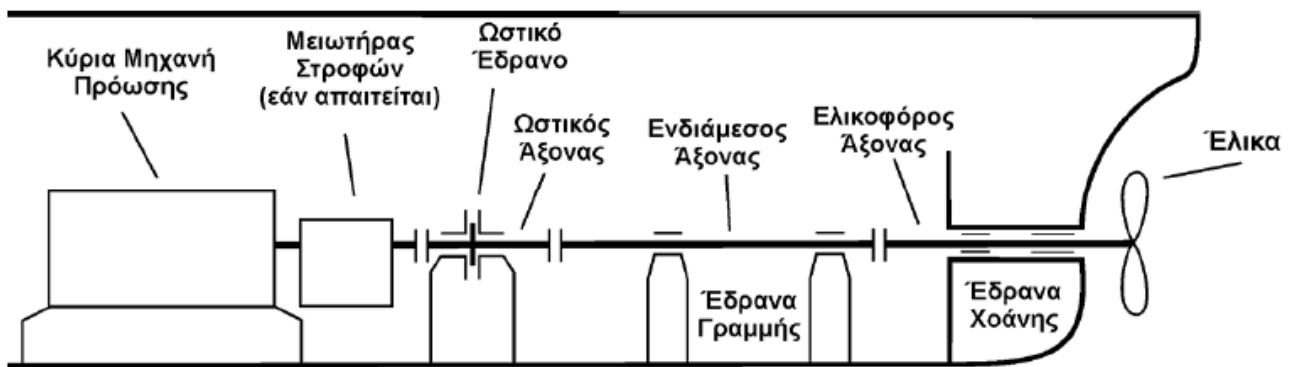


Σχήμα 7.3α Σύστημα ηλεκτροπρόωσης της Converteam

Η κίνηση της έλικας με άξονα (shaft propulsion) εφαρμόζεται σε ντιζελοηλεκτρικά συστήματα πρόωσης όπου η ισχύς τους είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να προσφέρει ένα αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης, μειώνονται όμως οι ελικτικές του ικανότητες και χρειάζονται βοηθητικά μέσα ελιγμών (π.χ. έλικες πλευρικής ώσης). Επίσης είναι απαραίτητη η χρήση πηδαλίων για κάθε έλικα. Συνήθως χρησιμοποιούνται έλικες σταθερού βήματος (FPP). Σε ορισμένες εφαρμογές παρόλο που οι στροφές τις έλικας είναι μεταβλητές χρησιμοποιούνται και έλικες μεταβλητού βήματος (CPP), συνδυασμός ο οποίος οδηγεί σε μεγαλύτερες αποδόσεις έλικας .



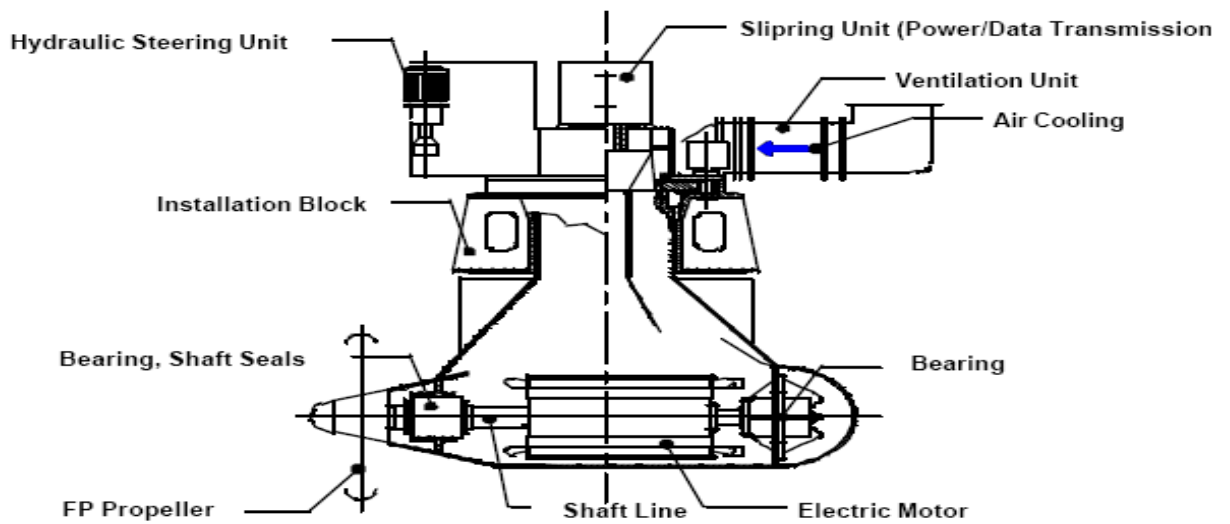
Σχήμα 7.3β Διάφορα είδη αξονικής πρόωσης



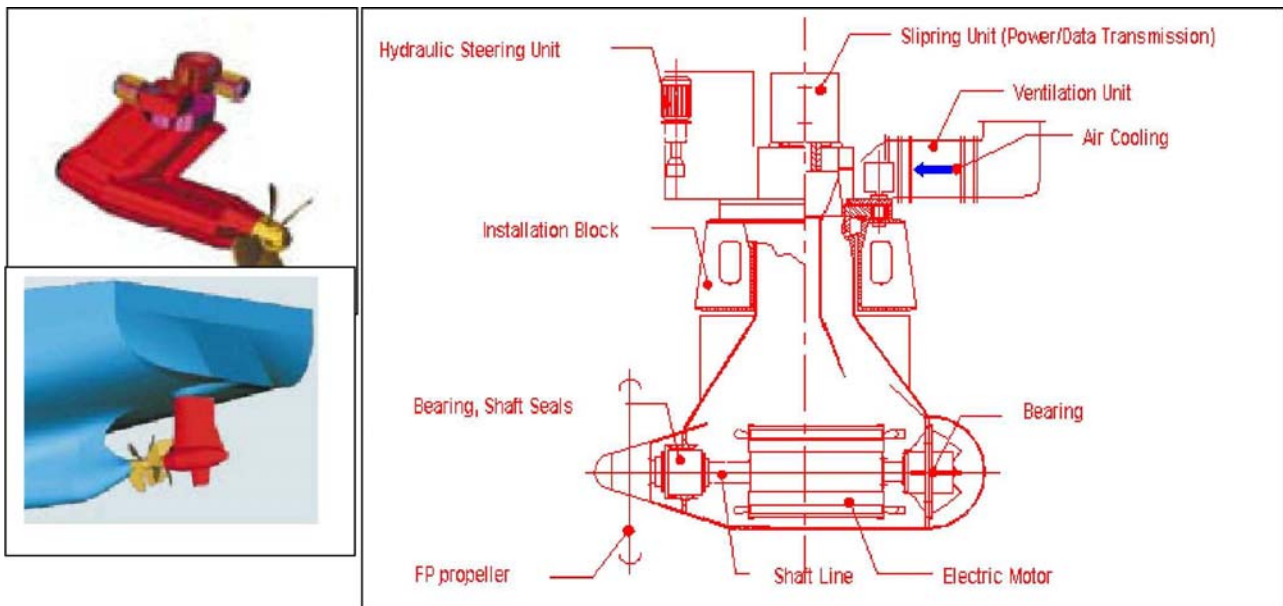
Σχήμα 7.3γ Γενική περιγραφή αξονικού συστήματος μεταξύ κύριας μηχανής πρόωσης και έλικας.

7.4 Το Αζιμουθιακό Προωστήριο Σύστημα (POD)

Την τελευταία δεκαετία και παράλληλα με την εισαγωγή της ηλεκτρικής πρόωσης εμφανίστηκε μία εναλλακτική λύση για το προωστήριο σύστημα που έχει πολλαπλά πλεονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα ηλεκτρικού κινητήρα και έλικας είναι μία ενιαία μονάδα, εμβαπτισμένη στο νερό στο πρυμναίο μέρος του πλοίου, όπως στις εξωλέμβιες. Το σύστημα μπορεί να φέρει μία ή δύο έλικες και έχει τη δυνατότητα να στρέφεται σχεδόν κατά 360° κατά την αζιμουθιακή διεύθυνση (από όπου προέρχεται και το όνομά του), δηλ. στο οριζόντιο επίπεδο, αυξάνοντας σε μεγάλο βαθμό τις δυνατότητες ελιγμών του πλοίου, ενώ αφενός πρακτικά εκμηδενίζεται το αξονικό σύστημα και αφετέρου δεν υφίσταται μηχανισμός πηδαλίου. Επιπλέον, επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση χώρου, καθώς οι κινητήριες μηχανές έχουν μικρές διαστάσεις και το μεγαλύτερο μέρος του είναι εκτός του πλοίου, ενώ και αυτό ακόμη το αξονικό σύστημα ουσιαστικά εκμηδενίζεται οδηγώντας και σε μειωμένες ανάγκες συντήρησης.



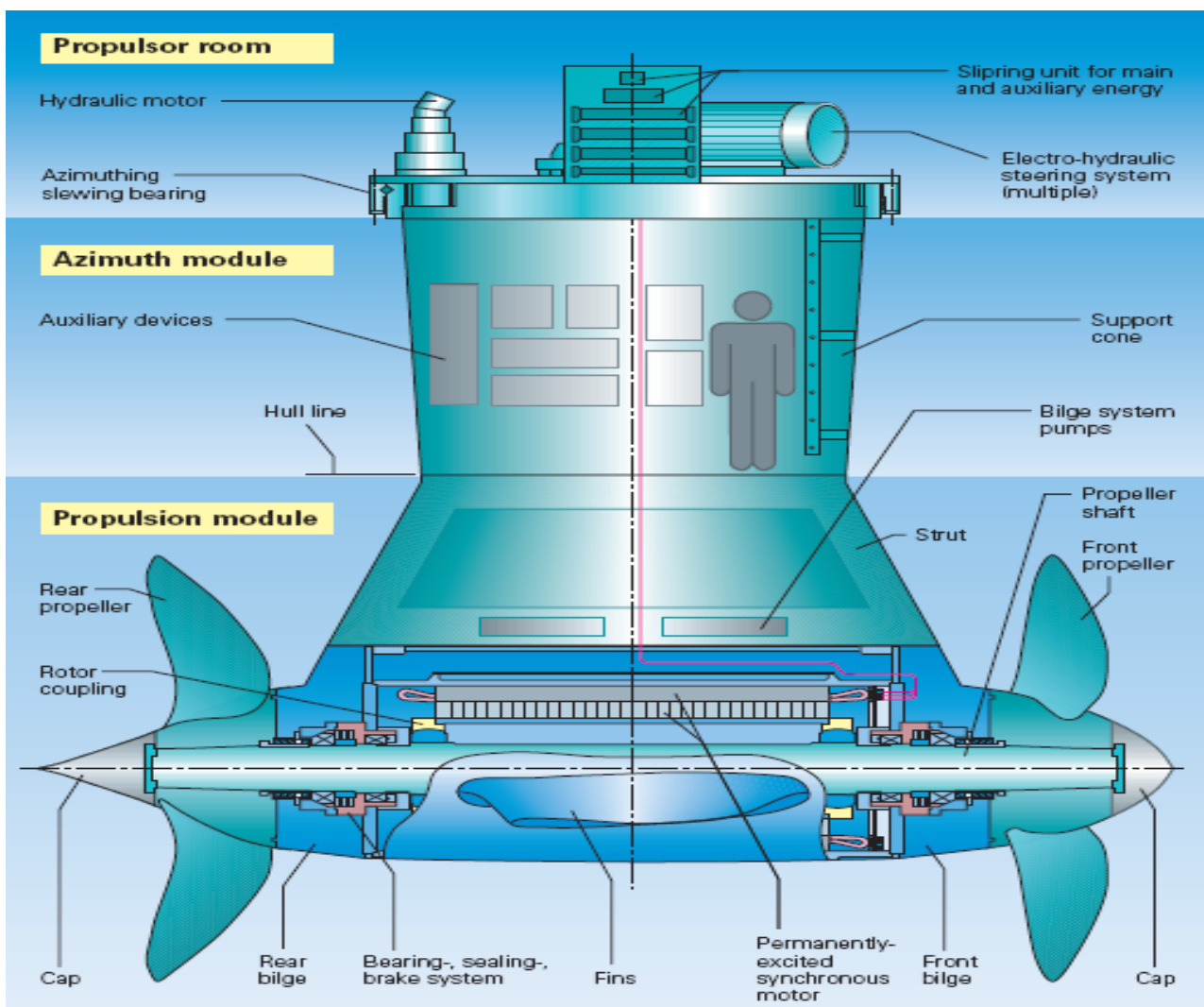
Σχήμα 7.4α Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα με μία έλικα Azipod της ABB και τα επιμέρους στοιχεία του.



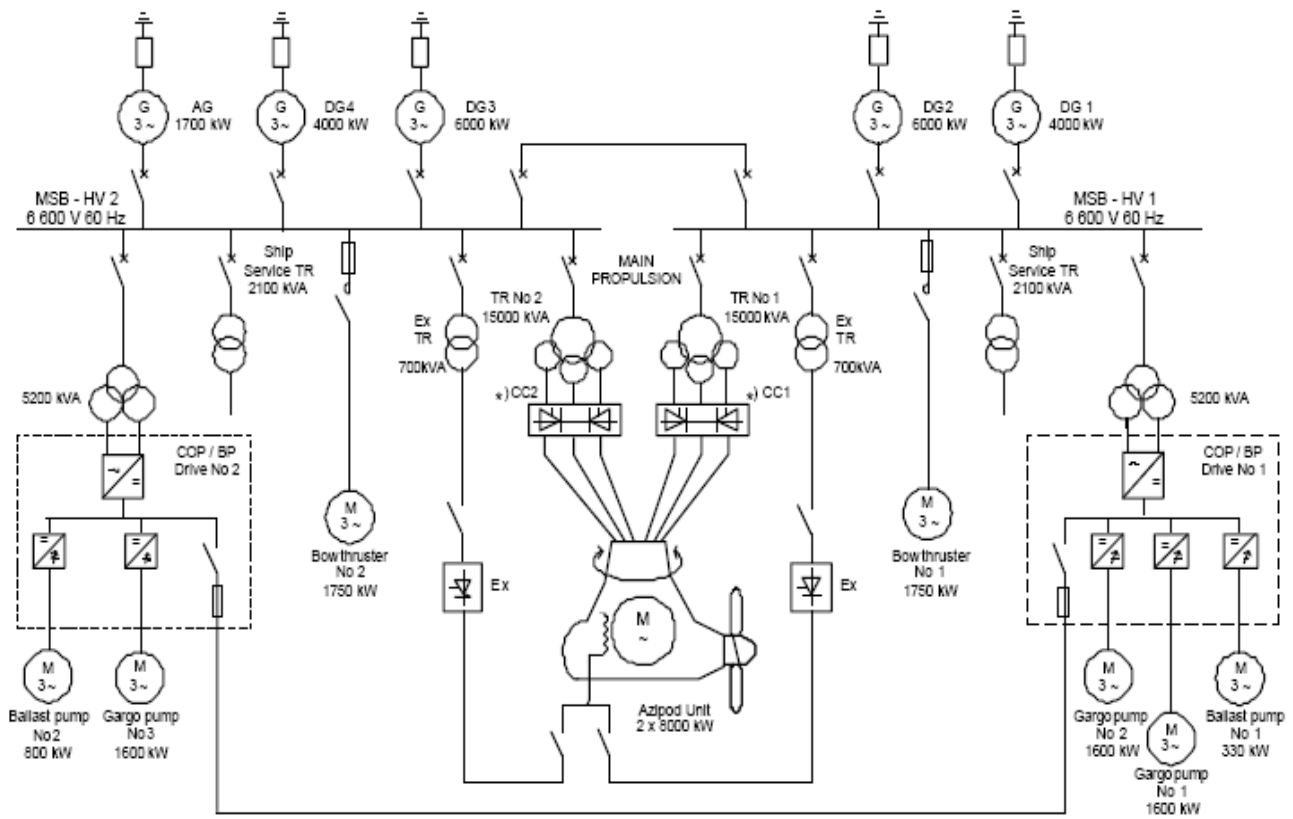
Εικόνα 7.4β: Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα με μία έλικα (Azipod-εταιρία ABB Marine) παρόμοιο είναι και το σύστημα Mermaid των εταιριών Kamewa - Alstom



Εικόνα 7.4γ Azipod thruster, ABB Marine



Σχήμα 7.4δ Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα δύο ελίκων SSP (Siemens – Schottel Propulsor) και τα επιμέρους στοιχεία του.



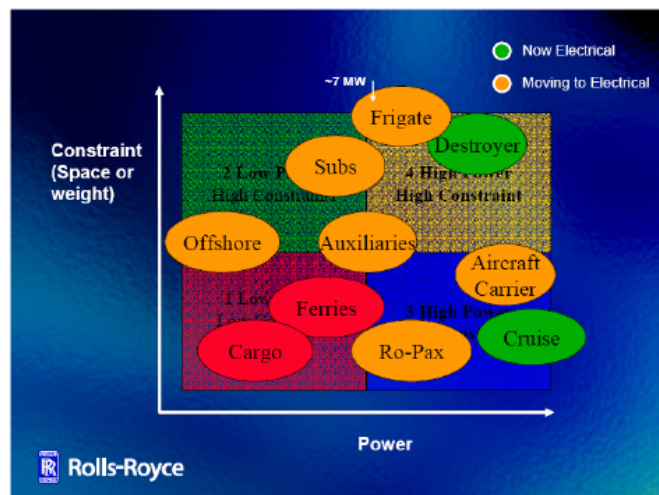
*) CC1 & CC2 = Cycloconverter Drives

Σχήμα 7.4ε Δομή ηλεκτρικού δικτύου πρόωσης και αντλιών μικρού δεξαμενόπλοιου με αξιμουθιακό σύστημα Azipod.

Κεφάλαιο 8

Εφαρμογές της ηλεκτροπρόωσης

Πριν από μερικά χρόνια, η ηλεκτροπρόωση δεν χρησιμοποιούνταν σε πολλά πλοία όπως σήμερα. Πιο συγκεκριμένα, οι εφαρμογές της ήταν εξειδικευμένες σε κάποια είδη πλοίων, όπως τα παγοθραυστικά, τα ερευνητικά σκάφη και τα σκάφη πόντισης καλωδίων. Όμως, τη δεκαετία του '90 παρουσιάζει μια έντονα αυξανόμενη διάδοση σε πλοία όπως μεγάλα επιβατηγά, οχηματαγωγά, κρουαζιερόπλοια, δεξαμενόπλοια, κλπ. Αυτό φαίνεται και στην εικόνα 8.



Εικόνα 8: Στην εικόνα παρουσιάζεται πώς η ανάγκη περιορισμού των διαστάσεων (ή του βάρους) εξαρτάται από την ηλεκτρική ισχύ για διάφορα πλοία (εμπορικά και πολεμικά).

Γενικά, η ηλεκτρική πρόωση μπορεί να αποδειχθεί η καταλληλότερη λύση στις ακόλουθες κατηγορίες εφαρμογών:

α. Σκάφη όπου οι ικανότητες ελιγμών είναι σημαντικές: Οχηματαγωγά, παγοθραυστικά, ρυμουλκά, ωκεανογραφικά, σκάφη πόντισης καλωδίων κλπ. Στις περιπτώσεις αυτές, η μεταβολή της ταχύτητας και της φοράς περιστροφής της έλικας είναι συχνά ζωτικής σημασίας για την επιτυχημένη λειτουργία του σκάφους.

β. Σκάφη στα οποία τα βοηθητικά μηχανήματα έχουν μεγάλη ισχύ. Πιο συγκεκριμένα, τα σκάφη με δικά τους μέσα φόρτο – εκφόρτωσης, τα πυροσβεστικά σκάφη, τα μεγάλα δεξαμενόπλοια, κ.ά. έχουν μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων, που δε συμπίπτει χρονικά με τη μέγιστη ισχύ πρόωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα σε αυτή την κατηγορία, αποτελούν ορισμένα δεξαμενόπλοια (π.χ. εκείνα που μεταφέρουν πετρέλαιο από τις εξέδρες εξόρυξης στη στεριά), τα οποία ξοδεύουν μεγάλο μέρος του χρόνου στη φόρτωση (4 – 10 μέρες) ενώ το ταξίδι είναι σχετικά σύντομο. Κατά τη διάρκεια της

φόρτωσης η ηλεκτρική ισχύς, που απαιτείται για την κίνηση των διαφόρων μηχανημάτων, μπορεί να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ισχύ πρόωσης. Όπως για παράδειγμα, η ηλεκτρική πρόωση είναι η πιο κατάλληλη λύση σε ένα δεξαμενόπλοιο με ισχύ πρόωσης 19000 kW, και απαιτήσεις ισχύος 17000 kW – 22000kW κατά τη διάρκεια της φόρτωσης. Τα 6800 kW απαιτούνται από τις έλικες πλευρικής ώσης (τρεις στην πλώρη και δύο στην πρύμνη), που χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση του σκάφους στην κατάλληλη θέση (δυναμική τοποθέτηση – dynamic positioning –). Ας σημειωθεί ότι το πλοίο θα πρέπει να μπορεί να φορτώνει ακόμη και με κύματα ύψους 5 – 7 m. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι ηλεκτρογεννήτριες δίνουν την απαιτούμενη ισχύ είτε για πρόωση είτε για την κίνηση αντλιών ή μεγάλων μηχανημάτων διακίνησης φορτίου.

γ. Σκάφη με μεγάλα φορτία ενδιαίτησης και έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης: Στα μεγάλα επιβατηγά πλοία και στα κρουαζιερόπλοια, πρέπει να εξυπηρετηθούν πολλοί επιβάτες και συνεπώς η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς είναι μεγάλη και αποτελεί σημαντικό ποσοστό της ισχύος πρόωσης φθάνοντας το 30 – 40 %. Συνεπώς σε αυτή την περίπτωση έχουμε τις συνθήκες που περιγράψαμε παραπάνω (μεγάλα φορτία ενδιαίτησης και έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης). Επιπλέον, τα σύγχρονα κρουαζιερόπλοια έχουν μέγιστη ταχύτητα 21 – 22 κόμβων, στην οποία ταξιδεύουν κατά πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, ενώ κατά το μεγαλύτερο χρόνο κινούνται με ταχύτητα 9 – 14 κόμβων.

δ. Σκάφη εξοπλισμένα με πολλές ταχύστροφες μη αναστρέψιμες μηχανές: Οι αεριοστρόβιλοι και πολλές ταχύστροφες μηχανές Diesel έχουν σταθερή φορά περιστροφής και συχνά εγκαθίστανται δύο, τρεις ή και περισσότερες μονάδες, που παράγουν την απαιτούμενη συνολική ισχύ. Σε τέτοιες περιπτώσεις η ηλεκτρική πρόωση προσφέρει έναν εύκολο τρόπο (ηλεκτρικής και όχι μηχανικής) σύνδεσης ενός κινητήρα πρόωσης με πολλές κύριες μηχανές, καθώς και ρύθμισης της ταχύτητας και της φοράς περιστροφής της έλικας.

ε. Υποβρύχια και βαθυσκάφη: Στα σκάφη που έχουν χαμηλή ταχύτητα, για τη λειτουργία των κινητήρων πρόωσής τους, χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια αποθηκευμένη σε συσσωρευτές καθώς και συστήματα κυψελών καυσίμου πρόσφατης τεχνολογίας. Σε διάφορα είδη σκαφών, όπως τα μεγάλα επιβατηγά, τα κρουαζιερόπλοια, και τα δεξαμενόπλοια, είναι ενεργειακά και οικονομικά αποδοτική η συνολική αντιμετώπιση των αναγκών με ένα ολοκληρωμένο σύστημα, που θα παρέχει προωστήρια, ηλεκτρική και θερμική ενέργεια από τις ίδιες τις μηχανές (κινητήρες Diesel ή αεριοστρόβιλους που κινούν γεννήτριες και τα υψηλής θερμοκρασίας καυσαερίά τους προσφέρουν χρήσιμη

θερμότητα). Έτσι, π.χ., για το δεξαμενόπλοιο που αναφέρθηκε στην δεύτερη κατηγορία εφαρμογών, επιλέχθηκε ηλεκτρική πρόωση με ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος κυκλομετατροπέα (cycloconverter) και ενεργειακό σύστημα αποτελούμενο από τέσσερα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη συνολικής ισχύος 25100 kW και ένα ακόμη ισχύος 1200 kW. Ειδικά, όσον αφορά στα πολεμικά πλοία, η ηλεκτροπρόωση αποτελεί την βασική επιλογή για την κίνηση των υποβρυχίων. Η χρήση της σε πολεμικά πλοία επιφάνειας, που μέχρι σήμερα ήταν σχετικά περιορισμένη, προσελκύει ξανά το έντονο ενδιαφέρον των ναυτικών χωρών που κατασκευάζουν πολεμικά πλοία και εξετάζεται πλέον σαν υποψήφιο σύστημα για την προωστήρια εγκατάσταση της επόμενης γενιάς των μεγάλων πολεμικών πλοίων.

Στα πολεμικά πλοία που κατασκευάζονται σε διάφορες χώρες οι απαιτήσεις είναι αυξημένες και οι προδιαγραφές αυστηρότερες, σε σχέση με τα εμπορικά πλοία. Όσον αφορά την περίπτωση εξοικονόμησης χώρου αλλά και στις απαιτήσεις του προωστήριου συστήματος, κι έτσι απαιτείται περισσότερη ανάπτυξη και τελειοποίηση υποσυστημάτων για να πραγματοποιηθούν τα εν δυνάμει πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης. Οι κύριες αιτίες της αναζωπύρωσης του ενδιαφέροντος για τη χρήση της ηλεκτροπρόωσης στα πολεμικά πλοία είναι:

- α. Τα πλοία καταναλώνουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια και υπάρχει μία τάση για «ηλεκτροποίηση» των πλοίων με αποκορύφωμα το πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship), δηλαδή υπάρχει η τάση όλες οι λειτουργίες, κύριες και βοηθητικές, να στηρίζονται σε ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας.
- β. Την ανάγκη για περισσότερο «αθόρυβη» λειτουργία των πλοίων.
- γ. Την αναζήτηση συστημάτων πρόωσης με χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και μειωμένων απαιτήσεων προσωπικού.
- δ. Η κυριότερη αιτία είναι η ωρίμανση τεχνολογιών που απαιτούνται για να αξιοποιηθούν πλήρως τα πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης. Τέτοιες τεχνολογίες είναι κυρίως των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος για τον έλεγχό τους.

Όταν κάποιος επιλέγει, ανάμεσα σε άλλα το σύστημα ηλεκτροπρόωσης για ένα πλοίο, έχει περισσότερη ελευθερία στη σχεδίαση και στην επιλογή των υποσυστημάτων και της διάταξης όλης της προωστήριας και ηλεκτρικής εγκατάστασης. Αξίζει να αναφέρουμε ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι η μόνη λύση για τη βοηθητική πρόωση (δηλ. το σύστημα των πλευρικών προωστήρων που επαυξάνουν την ελικτική ικανότητα των σκαφών ιδίως εντός των λιμένων) με αξιοποίηση κυρίως επαγωγικών κινητήρων μεγάλης ισχύος (0.5 – 2.5 MW).

Κεφάλαιο 9

Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος για οδήγηση ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης

Η ηλεκτρική κίνηση είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος κύριας κίνησης για τις εγκαταστάσεις πρόωσης δυναμικής τοποθέτησης των πλοίων DP (dynamic positioning). Σχεδόν κάθε σύστημα DP που εγκαθίσταται στα πλοία στη σημερινή εποχή, οδηγείται από μια ηλεκτρική μηχανή. Στην αρχή της εφαρμογής της τεχνολογίας δυναμικής τοποθέτησης, η οποία συνέπεσε με την εμφάνιση της τεχνολογίας των ανορθωτών με θυρίστωρες (SCR –Silicon Controlled Rectifiers), χρησιμοποιούνταν είτε μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος (E.P.) ελέγχοντας προωστήρες με έλικες μεταβλητού βήματος (Controllable Pitch Propellers – CPP) με σταθερή ταχύτητα περιστροφής ή ελεγχόμενες από ανορθωτές (SCR) μηχανές συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.) που με τη σειρά τους ελέγχουν προωστήρες με έλικες σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propellers – FPP) με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής. Τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη των αντιστροφέων (inverters) χρησιμοποιούνται και μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνδυασμό με έλικες σταθερού βήματος οπότε και με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής για τον έλεγχο της ώσης.

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης είναι:

- α. Μετατροπείς Σ.Ρ./Σ.Ρ. ή ελεγχόμενοι ανορθωτές E.P./Σ.Ρ. για οδήγηση κινητήρων Σ.Ρ.
- β. Μετατροπείς Σ.Ρ./E.P. για την οδήγηση ασύγχρονων και σύγχρονων κινητήρων.
- γ. Κυκλομετατροπείς (E.P./E.P.) (cycloconverters ή cyclo) για οδήγηση κυρίως σύγχρονων κινητήρων.

9.1 Μετατροπείς συχνότητας

Όταν έχουμε μία μηχανή E.P., με σταθερή συχνότητα ρεύματος, η συνεχής ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα πρόωσης (και επομένως της έλικας) είναι δυνατή εάν αυτός τροφοδοτηθεί όχι απ' ευθείας από το δίκτυο αλλά από διάταξη μετατροπής της συχνότητας. Η διάδοση της ηλεκτρικής πρόωσης κατά τα τελευταία έτη ίσως δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τους μετατροπείς αυτούς. Η θεμελιώδης διάταξη μετατροπής είναι η γέφυρα 6 παλμών (ανορθωτής αλλά και κυρίως αντιστροφέας). Ωστόσο για μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων κατασκευάζονται πιο σύνθετες διατάξεις. Έτσι ένας αντιστροφέας 12 παλμών αποτελείται από δύο αντιστροφείς 6

παλμών, των οποίων οι αντίστοιχες φάσεις έχουν γωνιακή διαφορά 30° . Σε σύγχρονες ναυπηγήσεις αξιοποιούνται προς το παρόν έως και γέφυρες 24 παλμών.

Στη συνέχεια αναφέρουμε τους περισσότερο χρησιμοποιούμενους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος:

1. Ζεύγη ανορθωτών – αντιστροφών SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation)

Στις διατάξεις αυτές, αρχικά γίνεται ανόρθωση από ΕΡ σε ΣΡ και στη συνέχεια αντιστροφή από ΣΡ σε ΕΡ. Στον σύνδεσμο ΣΡ (DC-link) μεταξύ των δύο μετατροπέων παρεμβάλλεται κάποιο στοιχείο που διατηρεί σταθερή την τάση ή το ρεύμα που παρέχει ο μετατροπέας.

α) πηγές ρεύματος (CSI Current Source Inverters) με SPWM: στο DC-link παρεμβάλλεται πηνίο που διατηρεί το ρεύμα τροφοδοσίας σταθερό με αποτέλεσμα ο μετατροπέας εμφανίζεται να λειτουργεί ως πηγή (σταθερού) ρεύματος.

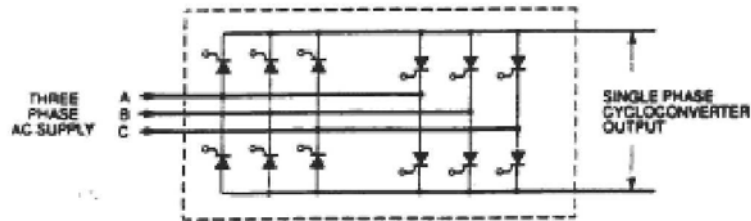
β) πηγές τάσεως (VSI Voltage Source Inverters) με SPWM: στο σύνδεσμο ΣΡ παρεμβάλλεται πυκνωτής που διατηρεί την τάση τροφοδοσίας σταθερή με αποτέλεσμα ο μετατροπέας να εμφανίζεται ότι λειτουργεί ως πηγή (σταθερής) τάσεως,

γ) συγχρομετατροπείς (synchro-converters) ή LCI (Load Commutated Inverters, LCI): πρόκειται για ειδική περίπτωση μετατροπέα πηγής ρεύματος (CSI) στην οποία όμως οι διακόπτες ισχύος κλείνουν μόνον με τη βοήθεια του φορτίου τους. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί το κύριο πλεονέκτημά τους, καθώς δεν απαιτούνται επιπλέον βοηθητικά κυκλώματα σβέσεως. Βρίσκουν εφαρμογή σε προωστήρια συστήματα με σύγχρονους κινητήρες μεγάλης ισχύος.

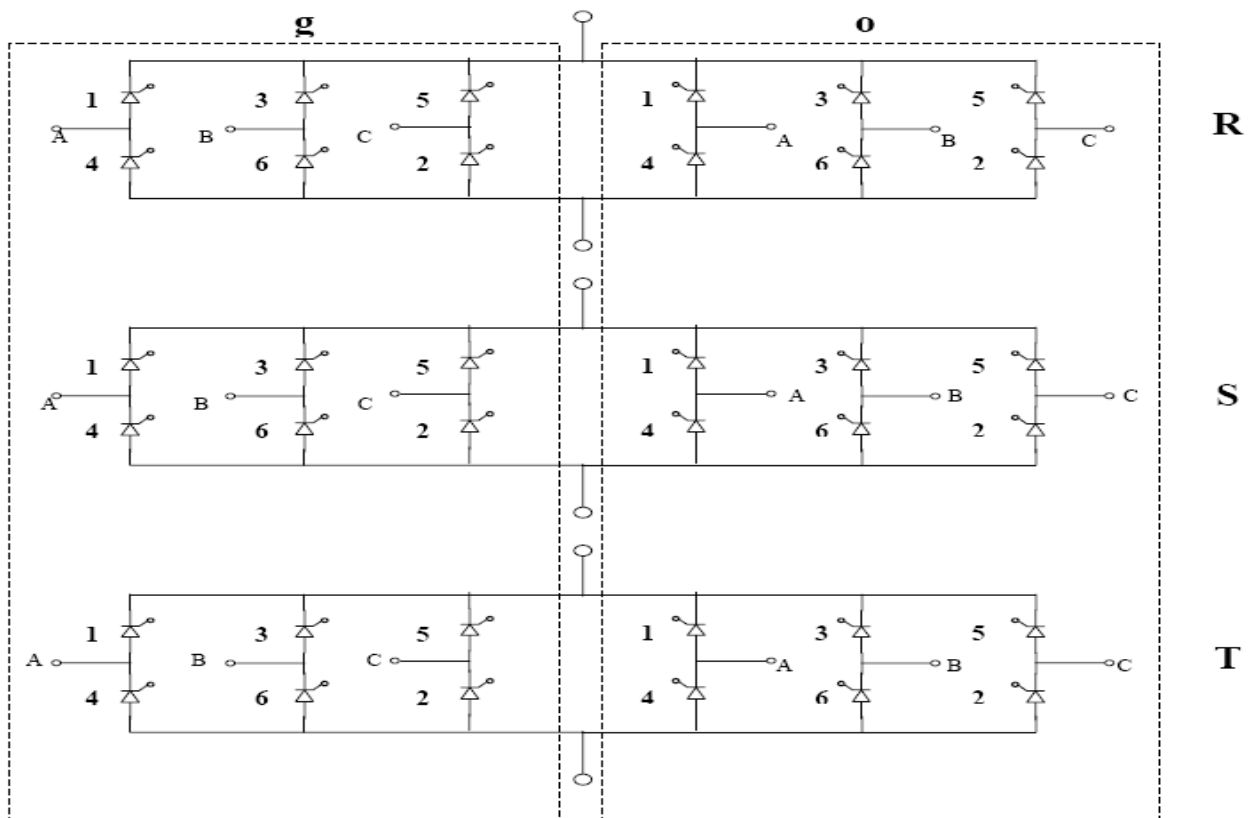
2. Κυκλομετατροπείς (cycloconverters)

Στις διατάξεις αυτές επιτυγχάνεται απευθείας μετατροπή από μία μορφή ΕΡ συγκριμένου πλάτους και συχνότητας σε άλλη μορφή ΕΡ διαφορετικού πλάτους και συχνότητας. Στην περίπτωση των προωστήριων συστημάτων πλοίων, λαμβάνει χώρα υποβιβασμός συχνότητας (από 50/60 Hz σε 2-3 Hz). Η απλή περίπτωση ενός τριφασικού κυκλομετατροπέα 6 παλμών (6-παλμικός) αποτελείται από 36 ελεγχόμενους διακόπτες ισχύος, 12 για κάθε φάση, βλ. Σχ. 9.1α-9.1β. Σε κάθε φάση αντιστοιχούν δύο γέφυρες διακοπών (g και o) με 6 διακόπτες η κάθε μία, βλ. Σχ. 9.1β. Η μία γέφυρα είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία της κυματομορφής κατά τη θετική ημιπερίοδο και η άλλη κατά την αρνητική. Στις γέφυρες εισέρχονται όλες οι φάσεις εισόδου. Αντιπαράλληλα προς τους διακόπτες ισχύος, εν γένει, συνδέονται και δίοδοι ισχύος για να κυκλοφορούν αντίστροφης φοράς ρεύματα, προστατεύοντας τους ελεγχόμενους διακόπτες (στο Σχήμα 9.1β έχουν παραλειφθεί, για λόγους απλότητας). Η τεχνική ελέγχου αγωγής των διακοπών ισχύος μπορεί να ποικίλλει και σε αυτήν την περίπτωση, ωστόσο έχει επικρατήσει μία αντίστοιχη μέθοδος της ημιτονοειδούς διαμόρ-

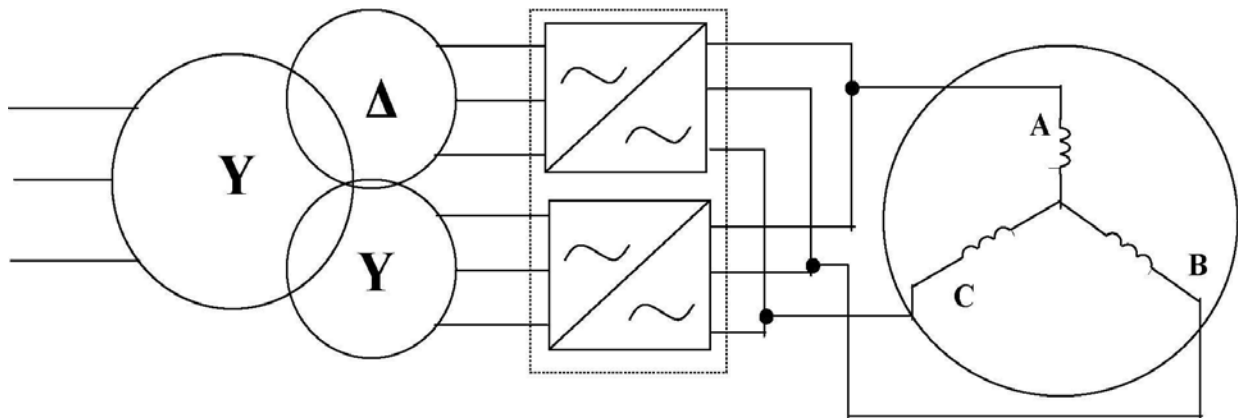
φωσης εύρους παλμών των αντιστροφέων SPWM. Στην περίπτωση αυτή, το επιθυμητό σήμα σε μία φάση εξόδου συγκρίνεται με τις τάσεις όλων των φάσεων εισόδου και στα σημεία που εξισώνονται (σημεία τομής των κυματομορφών), παράγονται σήματα αλλαγής κατάστασης των αντίστοιχων διακοπών ισχύος.



Σχήμα:9.1α



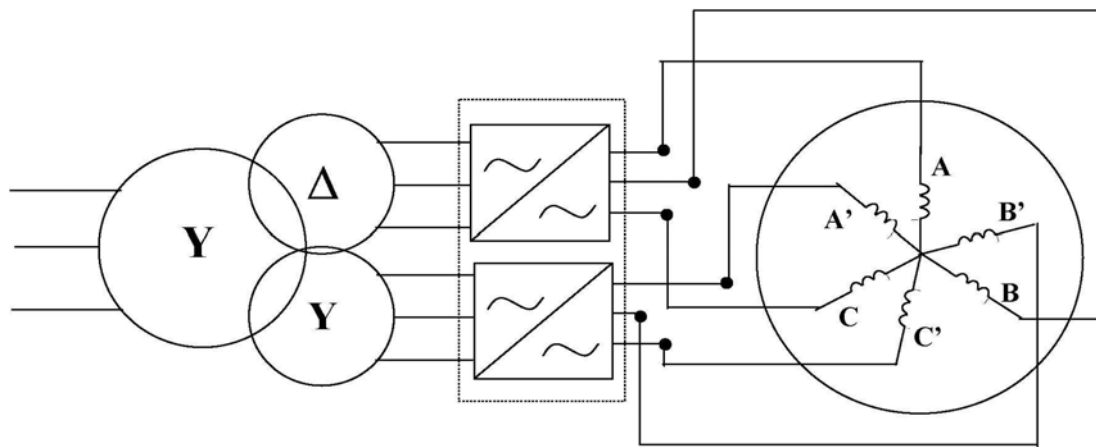
Σχήμα 9.1β τυπικός τριφασικός κυκλομετατροπέας 6 παλμών. Με A,B,C συμβολίζονται οι τρεις φάσεις εισόδου ενώ με R,S,T οι τρεις φάσεις εξόδου.Οι φάσεις εξόδου μπορεί να συνδεθούν στο φορτίο σε συνδεσμολογία Y ή Δ.



Σχήμα 9.1γ

Ένας κυκλομετατροπέας 12 παλμών αποτελείται από δύο κυκλομετατροπείς 6 παλμών των οποίων οι αντίστοιχες φάσεις έχουν γωνιακή διαφορά 30° . Η διαφορά αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός μετασχηματιστή με δύο δευτερεύοντα τυλίγματα, από τα οποία το ένα είναι σε συνδεσμολογία κατά Y ενώ το άλλο κατά Δ . Οι έξοδοι του κυκλομετατροπέα 12 παλμών μπορεί να τροφοδοτούν είτε ένα απλό τριφασικό τυλίγμα κινητήρα, βλ. Σχήμα 9.1γ, είτε το διπλό τριφασικό τυλίγμα ενός ειδικού τύπου κινητήρα,

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται περαιτέρω μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων.



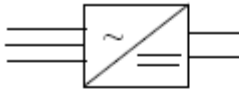
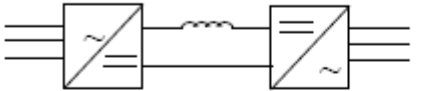
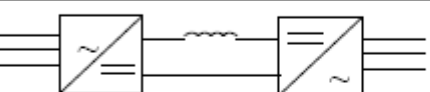
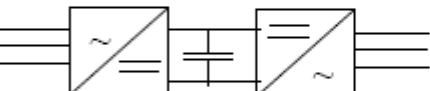
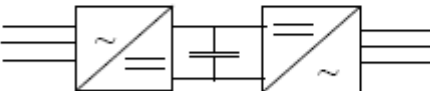
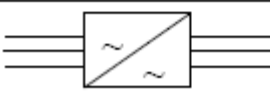
Σχήμα 9.1δ Κυκλομετατροπέας 12 παλμών που τροφοδοτεί 2X3φ-κινητήρα (τα δύο τριφασικά τυλίγματα είναι σε γωνία μεταξύ τους π.χ. 30°) Οι κυκλομετατροπείς πλεονεκτούν στο ότι παράγουν κυματομορφές με πολύ μικρή παραμόρφωση, αλλά είναι πολυδάπανες διατάξεις με πολλούς διακόπτες ισχύος ενώ κατά τη μεταγωγή των διακοπών απαιτείται αυξημένη ακρίβεια συντονισμού από τα κυκλώματα ελέγχου.

3. Μετατροπείς τύπου μήτρας ή μητροειδείς μετατροπείς (matrix converters)

Πρόκειται για εναλλακτική αλλά πιο γενικευμένη διάταξη των κυκλομετατροπέων, που ενδεχομένως να επικρατήσει, καθώς δίνει τη δυνατότητα σε όλες τις φάσεις εξόδου να τροφοδοτηθούν

απευθείας από όλες τις φάσεις εισόδου κατά τρόπο που καθορίζεται με ακρίβεια από το κύκλωμα ελέγχου. Η ουσιαστική διαφορά από τους κυκλομετατροπείς είναι στον αλγόριθμο ελέγχου εναύσεως / σβέσεως, που ακόμη βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο και επιτρέπει σε κάθε στιγμή την αντιστροφή ακολουθίας των φάσεων εξόδου σε σχέση με τις φάσεις εισόδου καθώς και την τροποποίηση των γωνιακών αποκλίσεων μεταξύ των τάσεων εισόδου και εξόδου με σκοπό τη ρύθμιση των συντελεστών ισχύος και στις δύο πλευρές. Προς το παρόν καμιά τέτοια διάταξη δεν έχει ενσωματωθεί σε προγράμματα ανάπτυξης για προωσθήριες διατάξεις ηλεκτρικών κινητήρων, λόγω τεχνολογικών αδυναμιών υλοποίησης, παρόλο που σε διεθνή συνέδρια έχουν προταθεί αξιόλογες μέθοδοι ελέγχου (π.χ. μέθοδος Venturini) με πολύ θετικές προοπτικές. Παρόμοια με τους κυκλομετατροπείς, οι μεταγωγές καταστάσεων (από αγωγή σε σβέση και το αντίστροφο) των ηλεκτρονικών διακοπών ενέχουν τον κίνδυνο βραχυκυκλωμάτων μεταξύ των φάσεων.

Πίνακας 1. Συγκεντρωτική παρουσίαση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος για ηλεκτρική πρόωση .

Μετατροπέας	Διάταξη	Μέγιστη ισχύς	Κυριαρχούσες αρμονικές
Ανορθωτής		>6 MVA	6.n.f _i
Αντιστροφέας CSI		1 MVA	(3k±1).f ₀
Αντιστροφέας LCI		>30 MVA	(3k±1).f ₀
Αντιστροφέας VSI		2 MVA	(3k±1).f ₀
Αντιστροφέας PWM		2 MVA (IGBT) 6 MVA (GTO)	2.n.f ₀
Κυκλομετατροπέας		>30 MVA	6.n.f _i ±(2.p+1).f ₀

n=1,2,3,... k=2,4,6,... p=0,1,2,3,... f_i=συχνότητα εισόδου f₀=συχνότητα εξόδου

9.2 Ημιαγωγικοί διακόπτες ισχύος

Οι διακόπτες ισχύος είναι πολύ σημαντικοί επειδή μπορούν να άγουν και να μην άγουν κατά ελεγχόμενο τρόπο, σύμφωνα δηλαδή με τις εντολές ελέγχου που παράγονται από το κύκλωμα ελέγχου τους. Κατασκευάζονται από ημιαγωγικά υλικά όπως και τα αντίστοιχα στοιχεία χαμηλής ισχύος. Τα τελευταία 30 χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετά είδη διακοπών ισχύος που διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την ισχύ αγωγής τους, τον τρόπο ελέγχου τους, τη διακοπτική συχνότητα λειτουργίας τους και την τεχνολογία κατασκευής τους. Το πρώτο που αναπτύχθηκε ήταν το θυρίστορ. Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι η τεχνολογία των ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος είναι μια συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία με αποτέλεσμα νέες τεχνολογίες ημιαγωγικών στοιχείων να εμφανίζονται στην αγορά για εφαρμογή σε μετατροπείς υψηλής ισχύος αντικαθιστώντας το δύσκολα ελεγχόμενο θυρίστορ. Βέβαια να σημειωθεί ότι με τα σημερινά δεδομένα το θυρίστορ αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο των ηλεκτρονικών μετατροπέων πολύ μεγάλης ισχύος. Έτσι, πέρα από το θυρίστορ, γενικά χρησιμοποιούνται, MOSFET ισχύος (Power MOSFET), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), GTO θυρίστορ (Gate Turn – Off thyristor), MCT (MOSFET Controlled Thyristor), IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor).

Στους μετατροπείς ισχύος χρησιμοποιούνται κυκλώματα προστασίας των ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος (snubbers). Τα snubbers τοποθετούνται παράλληλα στα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος και τα προστατεύουν από υπερτάσεις, υπερρεύματα και υπερθέρμανση. Μπορεί να είναι παθητικά (π.χ. κλάδος RC), ή ενεργά. Δεν αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα της βασικής τοπολογίας ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, αλλά είναι μία προσθήκη, συχνά απαραίτητη, για την καταστολή των ηλεκτρικών καταπονήσεων, που υφίστανται τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος του μετατροπέα. Σκοπός της χρήσης τους είναι η προστασία των στοιχείων και η αύξηση της αξιοπιστίας της όλης διάταξης. Η προσθήκη των κυκλωμάτων αυτών δημιουργεί πρόσθετα προβλήματα, όπως αύξηση κόστους, επιπλέον απώλειες, περιορισμούς στη λειτουργία της διάταξης κ.ά. Υπάρχουν τρία είδη κυκλωμάτων προστασίας ενός ημιαγωγικού στοιχείου ισχύος, ανάλογα με το φαινόμενο που καταστέλλουν. Έτσι έχουμε, κυκλώματα προστασίας κατά την έναυση, κυκλώματα προστασίας κατά τη σβέση και κυκλώματα μείωσης της καταπόνησης από υπερτάσεις. Στις εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης λόγω των υψηλών επιπέδων ισχύος που λειτουργούν οι μετατροπείς τα snubbers είναι απαραίτητα για την ομαλή λειτουργία του μετατροπέα.

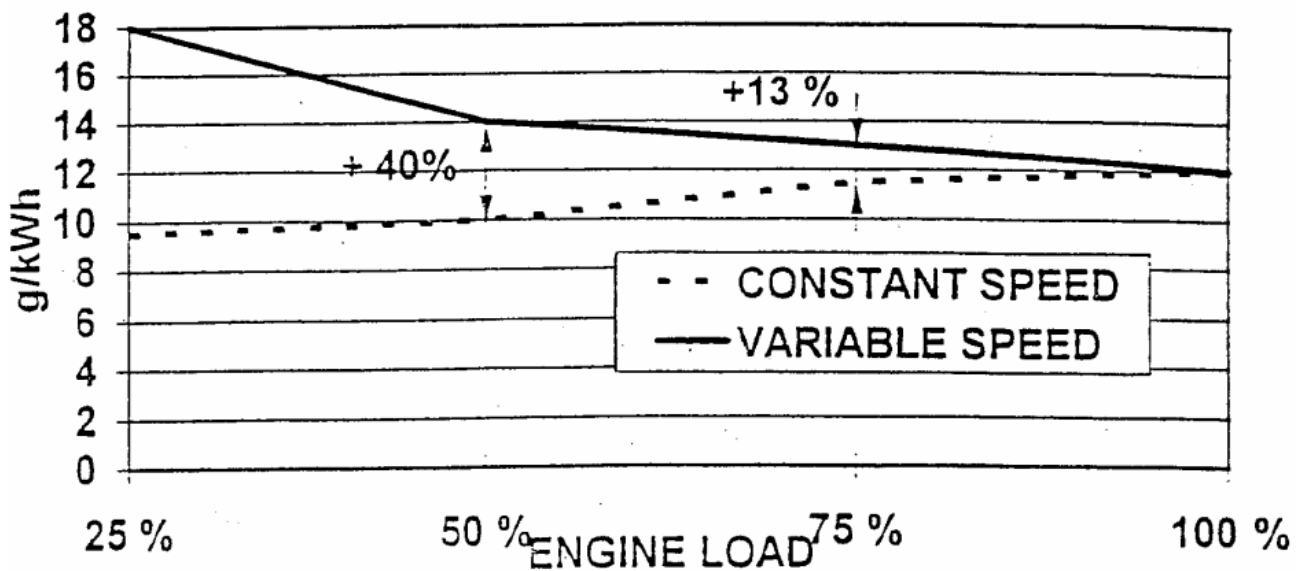
Οι διακόπτες ισχύος χρησιμοποιούνται ως δομικά στοιχεία για τη σύνθεση περίπλοκων διατάξεων που καλούνται μετατροπείς (converters) και που έχουν σκοπό τη μετατροπή Σ.Ρ. σε Σ.Ρ. διαφορετικού επιπέδου τάσης, Σ.Ρ. σε Ε.Ρ. και το αντίστροφο, και τη μετατροπή συχνότητας. Σε εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης οι δυνατότητες αυτές αξιοποιούνται στο έπακρο, καθώς οι απαιτήσεις κίνησης προϋποθέτουν μετατροπή των τάσεων αλλά και των συχνοτήτων.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

Πλεονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης, στα οποία οφείλεται και η διάδοσή της στις εφαρμογές που προαναφέρθηκαν, είναι τα ακόλουθα :

- Συνεχής μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της έλικας και της ταχύτητας του πλοίου σε όλο το πεδίο 0 – 100 %.
- Γρήγορη απόκριση κατά τη διάρκεια χειρισμών και δυναμικής τοποθέτησης του σκάφους.
- Χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών.
- Οικονομία καυσίμου, καθώς είναι δυνατή η επιλογή των μηχανών που θα λειτουργούν έτσι, ώστε η κάθε μια να λειτουργεί κοντά στο βέλτιστο σημείο.
- Ελευθερία στην τοποθέτηση των επιμέρους μηχανημάτων του ενεργειακού συστήματος, που προσφέρει ευελιξία στον σχεδιασμό του σκάφους και εξοικονόμηση ωφέλιμου χώρου.
- Πλήρης εκμετάλλευση της στρεπτικής ροπής σε όλο το πεδίο λειτουργίας.
- Ευκολία αυτοματισμού.
- Αυξημένη αξιοπιστία (πολλά συστήματα συνδεδεμένα παράλληλα) και, επομένως, αυξημένη ασφάλεια.
- Περιορισμός των εκπεμπόμενων ρύπων διότι:
 - α. η κατανάλωση καυσίμου είναι μικρότερη
 - β. ιδιαίτερα οι εκπομπές NOx είναι αισθητά χαμηλότερες όταν, π.χ., ένας μεσόστροφος κινητήρας Diesel λειτουργεί με σταθερές στροφές, όπως συμβαίνει στα νέα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης (βλ. Σχημα).
 - γ. σε εφαρμογές αμιγώς ηλεκτρικής πρόωσης με συσσωρευτές ή κυψέλες καυσίμου δεν υπάρχουν ρύποι ή είναι πολύ λιγότεροι (π.χ. σε εφαρμογές με κυψέλες καυσίμου με καύσιμο διαφορετικό του καθαρού υδρογόνου).
- Περιορισμός του κινδύνου ρύπανσης του περιβάλλοντος από ατυχήματα όπως αυτά των δεξαμενόπλοιων, χάρη στην ταχύτερη απόκριση του συστήματος κατά τους χειρισμούς και τη δυναμική τοποθέτηση του σκάφους.



Σχήμα. Εκπομπές NOx μεσόστροφων κινητήρων Diesel με βαρύ καύσιμο.

Μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

Τα μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης είναι τα εξής :

α. Το υψηλό κόστος επένδυσης. Αυτό γίνεται η προσπάθεια να μειωθεί κατά το δυνατόν, αξιοποιώντας την υπάρχουσα τεχνολογία των ηπειρωτικών ηλεκτρικών δικτύων (Commercial Off The Shelf – COTS), ωστόσο το υψηλό κόστος των κινητήρων και των διατάξεων ελέγχου τους δεν δείχνει να υπερκερνάται εύκολα.

β. Υψηλότερες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, σε σύγκριση με τομηχανικό σύστημα. Π.χ., σε ένα συμβατικό σύστημα κινητήρα Diesel – έλικας ρυθμιζομένου βήματος, οι απώλειες του συστήματος μετάδοσης είναι περίπου 4 %: 2 % στην έλικα και 2 % στον μειωτήρα, όταν η έλικα λειτουργεί στον βέλτιστο συνδυασμό ταχύτητας/βήματος. Σε εγκατάσταση ντιζελοηλεκτρικής πρόωσης, το σύστημα μετάδοσης προκαλεί απώλειες 7 – 8 %: 3 % στις γεννήτριες, 2 % στους μετασχηματιστές και μετατροπείς συχνότητας και 2 – 3 % στους προωστήριους ηλεκτροκινητήρες. Επομένως, ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι υψηλότερος στο σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης μόνον όταν κάθε μηχανή λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής και επί μεγάλα χρονικά διαστήματα στη βέλτιστη περιοχή.

γ. Ένα πρόβλημα που προκύπτει από την εκτεταμένη χρησιμοποίηση των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είναι ότι εμφανίζονται προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς πέραν των χρήσιμων συχνοτήτων αναπτύσσεται και μεγάλο πλήθος αρμονικών συνιστωσών ρεύματος

και τάσης. Οι αρμονικές αυτές αφενός προσαυξάνουν τη συνολική κυκλοφορούσα άεργο ισχύ στο ηλεκτρικό δίκτυο αλλά επιπλέον δημιουργούν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Έτσι ο «ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος» που παράγεται επηρεάζει αρνητικά όλες τις ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις, πρωτίστως τα κυκλώματα ελέγχου των ίδιων των ηλεκτρονικών ισχύος, ενώ σε περιπτώσεις στρατιωτικών εφαρμογών αυξάνει τα επίπεδα της ηλεκτρομαγνητικής υπογραφής των πλοίων. Τέλος, είναι δυνατόν οι αρμονικές παραμορφώσεις των ηλεκτρικών μεγεθών να διεγείρουν ιδιοσυχνότητες ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, όπως είναι τα φαινόμενα σιδηροσυντονισμού στους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η σειρά αυτή των προβλημάτων λόγω της εξηλέκτρισης των συστημάτων του πλοίου αντιμετωπίζεται με εξειδικευμένες αναλύσεις και μελέτες κυρίως κατά της φάση της σχεδίασης τους ηλεκτρολογικού συστήματος.

Επίλογος - Συμπεράσματα

Όπως είδαμε στην παρούσα εργασία, το σύστημα ηλεκτροπρόωσης είναι πολύ σημαντικό για τη ναυτιλία. Έχει μελετηθεί σε πάρα πολλές ερευνητικές εργασίες και η χρήση του στα πλοία της σημερινής εποχής είναι ιδιαίτερα συχνή τόσο σε επιβατικά πλοία αλλά και σε πολεμικά πλοία και υποβρύχια. Η ηλεκτροπρόωση χρησιμοποιούνταν και παλαιότερα στα καράβια, αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό όσο χρησιμοποιείται σήμερα. Η εξέταση όλων των συνιστωσών ενός πλοίου για τη μελέτη της ηλεκτροπρόωσης προϋποθέτει την κατανόηση της σχετικής ορολογίας και της λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου. Για τη σχεδίαση του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου πρέπει να λάβουμε υπόψη πολλούς παράγοντες και για αυτό το λόγο εκτός από την ορολογία και τη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου που είναι πολύ γενικά θέματα, αναλύσαμε και πιο εξειδικευμένα θέματα όπως ο συσχετισμός με την έλικα του πλοίου, οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος και οι τρόποι με τους οποίους ελέγχουμε την ταχύτητα και τη ροπή στο σύστημα ηλεκτροπρόωσης.

Σε ένα θέμα όπως η ηλεκτροπρόωση μπορούμε να αναπτύξουμε πολλά ερευνητικά θέματα. Εμείς κάναμε μια συνοπτική παρουσίαση των κυριότερων από αυτά έτσι ώστε να δώσουμε μία γενική εικόνα του θέματος. Στη βιβλιογραφία μπορεί κανείς να μελετήσει πιο εξειδικευμένα θέματα για την ηλεκτροπρόωση.

Βιβλιογραφία

1. <http://www.greatships.net/normandie.html>, 2/2011.
2. A. K. Adnanes, «Maritime electrical installations and diesel – electric propulsion», Tutorial Report/Textbook, ABB Marine AS, Oslo, Norway, 2003.
3. I. K. Χατζηλάου, I. M. Προυσαλίδης, Γ. Αντωνόπουλος, I. K. Γύπαρης, Π. Βαλλιανάτος, «Εξελίξεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο», Διήμερο TEE: «Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς στην Ελλάδα – Υφιστάμενη Κατάσταση και Προοπτικές», Αθήνα, 12 – 13 Ιανουαρίου 2006.
4. X. A. Φραγκόπουλος, I. M. Προυσαλίδης, «Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου, Τεύχος Α', Ηλεκτρολογικές Εγκαταστάσεις – Εισαγωγή στον Αυτοματισμό», ΕΜΠ, Αθήνα, 2005.
5. Bucknall R. W. G., Doherty K. P., Haines N. A. (1997), "The matrix converter: the ultimate electric drive technology", Proceedings of "Electric Warship: Power, Control, System Protection" Seminar, ImarE, United Kingdom.
6. Caricchi F., Crescimbin F., Honorati O. (1999) "Modular Axial Flux Permanent – Magnet Motor for Ship Propulsion Drives", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp. 673-679, September.
7. Cooper N. (1994), "Electric Drives become Cruise Ship Standard," The Motor Ship, October.
8. Αθανάσιος Ν. Σαφάκας, «Ηλεκτρονικά Ισχύος, Θυρίστρον, Μετατροπείς, Εφαρμογές», Τμήμα εκτυπώσεων τυπογραφείου Πανεπιστημίου Πατρών, 2006.
9. Εμμανουήλ Κ. Τατάκης, «Σημειώσεις μαθήματος, Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές», Πανεπιστήμιο Πατρών, 2003.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	4
Πρόλογος	5
Κεφάλαιο 1: Περιγραφή του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης – Ιστορική Αναδρομή	6
Κεφάλαιο 2: Ορολογία ηλεκτροπρόωσης.....	9
Κεφάλαιο 3: Σχεδίαση του συστήματος ηλεκτροπρόωσης.....	10
Κεφάλαιο 4: Οι κατηγορίες των κινητήρων ηλεκτρικής πρόωσης.....	13
Κεφάλαιο 5: Τεχνικές Ελέγχου Κινητήρων Πρόωσης EP	17
Κεφάλαιο 6: Το ηλεκτρικό δίκτυο των πλοίων.....	20
Κεφάλαιο 7: Συνεργασία έλικα – κινητήρα πρόωσης.....	22
Κεφάλαιο 8: Εφαρμογές της ηλεκτροπρόωσης	29
Κεφάλαιο 9: Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος για οδήγηση ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης.....	32
Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης	38
Επίλογος - Συμπεράσματα	41
Βιβλιογραφία	42