

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ  
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ**

***ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΡΩΣΗ-ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ-  
ΕΦΑΡΜΟΓΙΕΣ***

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ**

***ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΜΙΧΑΗΛ-ΙΜΒΡΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ***

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

***ΑΡΓΥΡΙΟΥ ΑΝΔΡΟΚΛΗΣ***



**ΑΕΝ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**2013**

# ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

### ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΡΟΩΣΗ-ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ-  
ΕΦΑΡΜΟΓΙΕΣ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΜΙΧΑΗΛ-ΙΜΒΡΟΣ  
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**

**ΑΜ: 4340-4483**

**ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ:**



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 εναλλασσόμενου ρεύματος, πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής και πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής. Μετά θα αναλύσουμε με ποιες τεχνικές ελέγχουμε ένα κινητήρα Ε.Ρ.: για να ελέγξουμε την ταχύτητα (αλλά και τη ροπή) σε ένα κινητήρα εναλλασσόμενου 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. θα δούμε την τεχνολογία της ηλεκτροπρόωσης. 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, multilevel 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. We will analyze the electronic power converters for driving electric propulsion motors. Finally we will see the electric propulsion technology, application and Advantages Disadvantages for electric propulsion.

## 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. Μετά 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 E.P., τη συνεργασία έλικα και κινητήρα πρόωσης. Επίσης θα εξετάσουμε τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος για την οδήγηση των ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης. Τέλος θα μιλήσουμε για την τεχνολογία και της εφαρμογές της ηλεκτρικής πρόωσης και τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΡΩΣΗΣ-ΙΣΤΟΡΙΚΟΙ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

#### 1.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Γενικά ο όρος πρόωση πλοίου σημαίνει κίνηση του πλοίου. Επικράτησε όμως ν' αναφέρεται μόνο για τα μηχανοκίνητα πλοία, που είναι περισσότερη ελεγχόμενη, έναντι των άλλοτε ιστιοφόρων, ( με ιστιοπλοΐα), και κωπηλατών, (με κωπηλασία).

Η πρόωση των μηχανοκινήτων πλοίων ξεκίνησε αρχικά με τους πλευρικούς ή πρυμναίο τροχό που ονομάζονταν τροχήλατα. Με την επικράτηση όμως της έλικας πρόωση πλοίου ονομάζεται η κίνηση του πλοίου που επιτυγχάνεται με μία ή περισσότερες έλικες οι οποίες και φέρονται επί αξόνων. Οι άξονες περιστροφής των ελίκων συνδέονται με τις κύριες μηχανές που χρησιμοποιούν ατμό που παρέχεται από τους ατμολέβητες, οι οποίοι και λειτουργούν είτε με καύση, αρχικά, κάρβουνου και εξελικτικά με καύση πετρελαίου, στα λεγόμενα ατμόπλοια, είτε ακόμη και με πυρηνική ενέργεια, όπως στα σύγχρονα πυρηνοκίνητα.

Οι ναυτικοί ατμολέβητες που χρησιμοποιούνται για τη πρόωση των πλοίων διακρίνονται σε φλογαυλωτούς και σε υδραυλωτούς. Οι κύριες μηχανές πρόωσης των πλοίων διακρίνονται και αυτές σε παλινδρομικές (μονής, διπλής, τριπλής και τετραπλής εκτόνωσης), σε ατμοστρόβιλους κοινώς τουρμπίνες, σε ηλεκτροκινητήρες, σε μηχανές ντίζελ και σε αεροστρόβιλους (αεροτουρμπίνες). Οι χώροι που βρίσκονται οι κύριες μηχανές και οι ατμολέβητες ονομάζονται μηχανοστάσια και λεβητοστάσια αντίστοιχα.

Η πρόωση μικρότερων μηχανοκινήτων σκαφών γίνεται με πετρελαιομηχανές ή βενζινομηχανές χαρακτηριζόμενες ανάλογα εκ της θέσης τους σε εσωλέμβιες, εσω-εξωλέμβιες και εξωλέμβιες μηχανές.

Κοινά μέσα πρόωσης των πάσης φύσεως μηχανοκινήτων πλοίων και σκαφών είναι η έλικα και το πηδάλιο, με κάποιες εξαιρέσεις όπως τα αερόστρωμα, κοινώς "χόβερκραφτς".

## 1.2 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.

### **1.3 Ναυτικά συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης**

Οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι παρούσες σε οποιοδήποτε σκάφος, από την τροφοδότηση του εξοπλισμού επικοινωνίας και ναυσιπλοΐας, του συναγερμού και του συστήματος παρακολούθησης, των αντλιών, των ανεμιστήρων, των βαρούλκων, μέχρι την εγκατάσταση υψηλής ισχύος για την ηλεκτρική πρόωση. Η ηλεκτρική πρόωση αποτελεί μία αναδυόμενη περιοχή έρευνας για τους κλάδους της μηχανικής. Ναυπηγοί, μηχανολόγοι και ηλεκτρολόγοι μηχανικοί συνεργάζονται γύρω από κατασκευαστικά, λειτουργικά και οικονομικά ζητήματα. Η κοινή γλώσσα επικοινωνίας και η αμοιβαία κατανόηση μεταξύ των μηχανικών είναι απαραίτητα για την επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού μιας εγκατάστασης ηλεκτρικής πρόωσης .

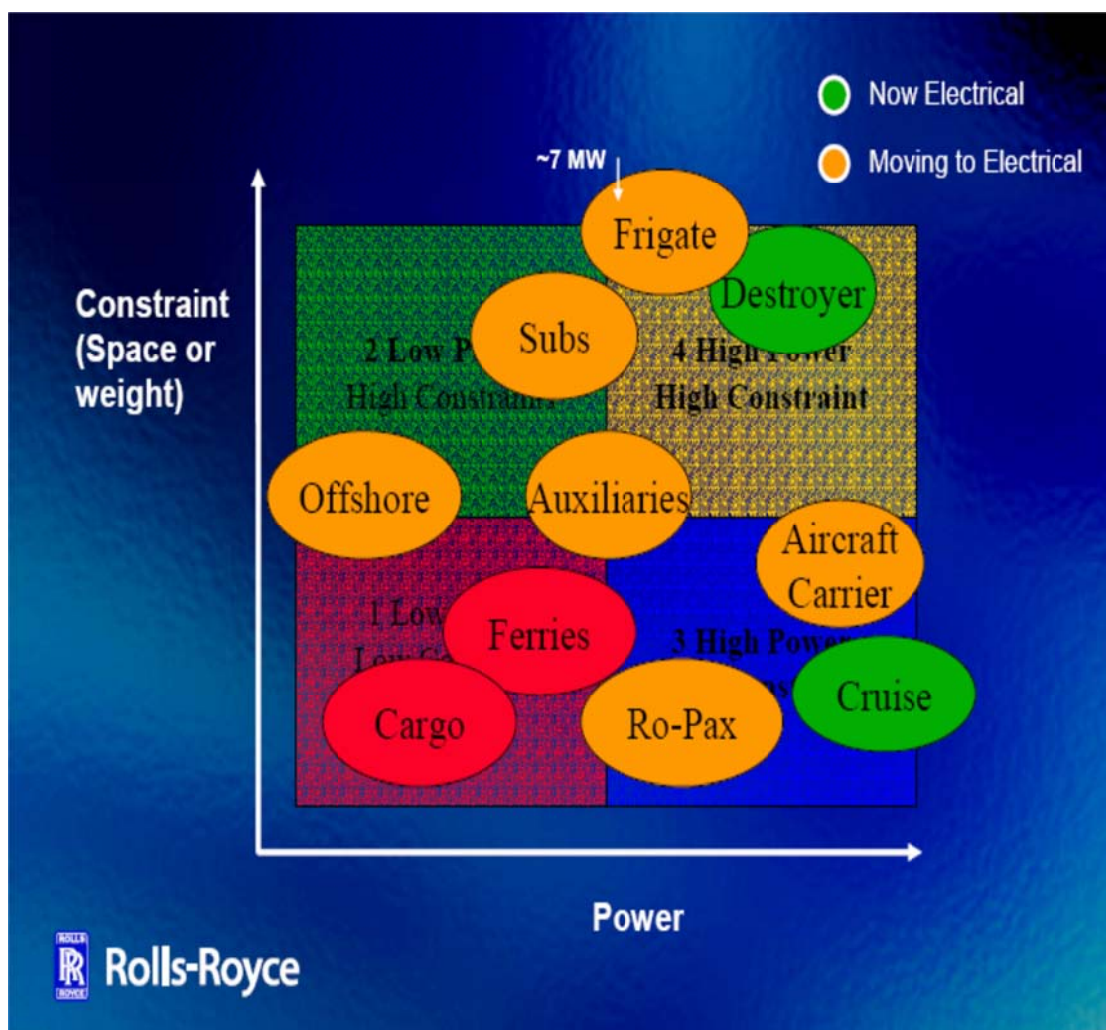
Ως ηλεκτροπρόωση ορίζεται το είδος εκείνο της πρόωσης στο οποίο οι άξονες του πλοίου κινούνται απ' ευθείας (ή και σπανιότερα μέσω μειωτήρων) από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες μηχανές όπως μηχανές Diesel, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους. Οι συμβατικοί κινητήρες εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπρόωσης , αλλά αντί να κινούν απ' ευθείας το αξονικό σύστημα με την έλικα κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες, που με τη σειρά τους τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης. 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 δεν αποτελεί καινούρια έννοια, η ιδέα δημιουργήθηκε περισσότερο από 100 έτη πριν. 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., ελεγχόμενους από διατάξεις με θυρίστωρες. Τα τελευταία 20 έτη η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος έφερε επανάσταση στον έλεγχο των ηλεκτρικών κινητήρων. Η ανάπτυξη διατάξεων και τεχνικών ελέγχου κινητήρων Ε.Ρ., που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της πρόωσης από πλευράς τόσο ευελιξίας όσο και οικονομίας καυσίμου, έδωσε τη δυνατότητα για ευρύτερη διάδοση της ηλεκτρικής πρόωσης σε εμπορικά πλοία και έτσι στις μέρες μας εκατοντάδες πλοίων χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες ως μέσο πρόωσης. 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 (Dynamic Positioning – D.P.) .



Εικόνα 1.1 Σύγκριση αναγκών περιορισμού διαστάσεων (ή βάρους) σε σχέση με την ηλεκτρική ισχύ.

Ενώ παλαιότερα η ηλεκτρική πρόωση έβρισκε μόνον πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές (παγοθραυστικά, ερευνητικά σκάφη, σκάφη πόντισης καλωδίων), κατά τη δεκαετία του '90 παρουσιάζει μια έντονα αυξανόμενη διάδοση σε πλοία όπως μεγάλα επιβατηγά, οχηματαγωγά, κρουαζιερόπλοια, δεξαμενόπλοια, κλπ. (βλ. και Σχ. 1.1). Γενικά, η ηλεκτρική πρόωση μπορεί να αποδειχθεί η καταλληλότερη λύση στις ακόλουθες κατηγορίες εφαρμογών:

α. Σκάφη με υψηλές απαιτήσεις ελκτικών ικανοτήτων. Οχηματαγωγά, παγοθραυστικά, ρυμουλκά, ωκεανογραφικά, σκάφη πόντισης καλωδίων είναι τυπικά παραδείγματα σκαφών αυτής της κατηγορίας. 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 με μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων. Σκάφη με δικά τους μέσα φόρτο – εκφόρτωσης, πυροσβεστικά σκάφη, μεγάλα δεξαμενόπλοια, κ.ά. έχουν μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων, που δε συμπίπτει χρονικά με τη μέγιστη ισχύ πρόωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα 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. Αναφέρεται, π.χ., η Μεταπτυχιακή Εργασία Ν. Γ. Μπαϊραχτάρης περίπτωση δεξαμενοπλοίου 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 – D.P.). Ας σημειωθεί ότι το πλοίο θα πρέπει να μπορεί να φορτώνει ακόμη και με κύματα ύψους 5 – 7 m. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το συγκρότημα ηλεκτρογεννητριών προσφέρει 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. Τέτοιες συνθήκες παρουσιάζονται σε μεγάλα επιβατηγά πλοία και ιδιαίτερα στα κρουαζιερόπλοια, όπου οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις άνεσης και εξυπηρέτησης των επιβατών συντελούν σε αύξηση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος, η οποία αρχίζει να αποτελεί σοβαρό ποσοστό της ισχύος πρόωσης φθάνοντας το 30 – 40 %. 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. Ηλεκτρική ενέργεια αποθηκευμένη σε συσσωρευτές καθώς και συστήματα κυψελών καυσίμου πρόσφατης τεχνολογίας χρησιμοποιούνται για την κίνηση ενός ή περισσότερων κινητήρων πρόωσης του σκάφους με σχετικά χαμηλή ταχύτητα. Σε πολλές από τις προηγούμενες εφαρμογές (π.χ., σε μεγάλα επιβατηγά, κρουαζιερόπλοια, δεξαμενόπλοια, κλπ), είναι ενεργειακά και οικονομικά αποδοτική η συνολική αντιμετώπιση των αναγκών με ένα ολοκληρωμένο σύστημα, που θα παρέχει προϊστορία, ηλεκτρική και θερμική ενέργεια από τις ίδιες τις μηχανές (κινητήρες Diesel ή αεριοστρόβιλους που κινούν γεννήτριες και τα υψηλής θερμοκρασίας καυσαέριά τους προσφέρουν χρήσιμη θερμότητα). Έτσι, π.χ., για το δεξαμενόπλοιο που αναφέρθηκε παραπάνω, 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. Οι αυξημένες απαιτήσεις και οι αυστηρότερες, σε σχέση με τα εμπορικά πλοία, προδιαγραφές του πολεμικού ναυτικού διαφόρων χωρών, τόσο από άποψης περιορισμού χώρου αλλά και απαιτήσεων του προωστήριου συστήματος, προϋποθέτουν περισσότερη ανάπτυξη και τελειοποίηση υποσυστημάτων για να πραγματοποιηθούν τα εν δυνάμει πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης. Οι κύριες αιτίες της αναζωπύρωσης του ενδιαφέροντος των πολεμικών ναυτικών για τη χρήση της ηλεκτροπρόωσης είναι:

α. Η αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία και η τάση για την « ηλεκτροποίηση » των πλοίων με αποκορύφωση το πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship – A.E.S.), δηλαδή η τάση όλες οι

λειτουργίες, κύριες και βοηθητικές, να στηρίζονται σε ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας.

β. Η ανάγκη για περισσότερο «αθόρυβη» λειτουργία των πλοίων.

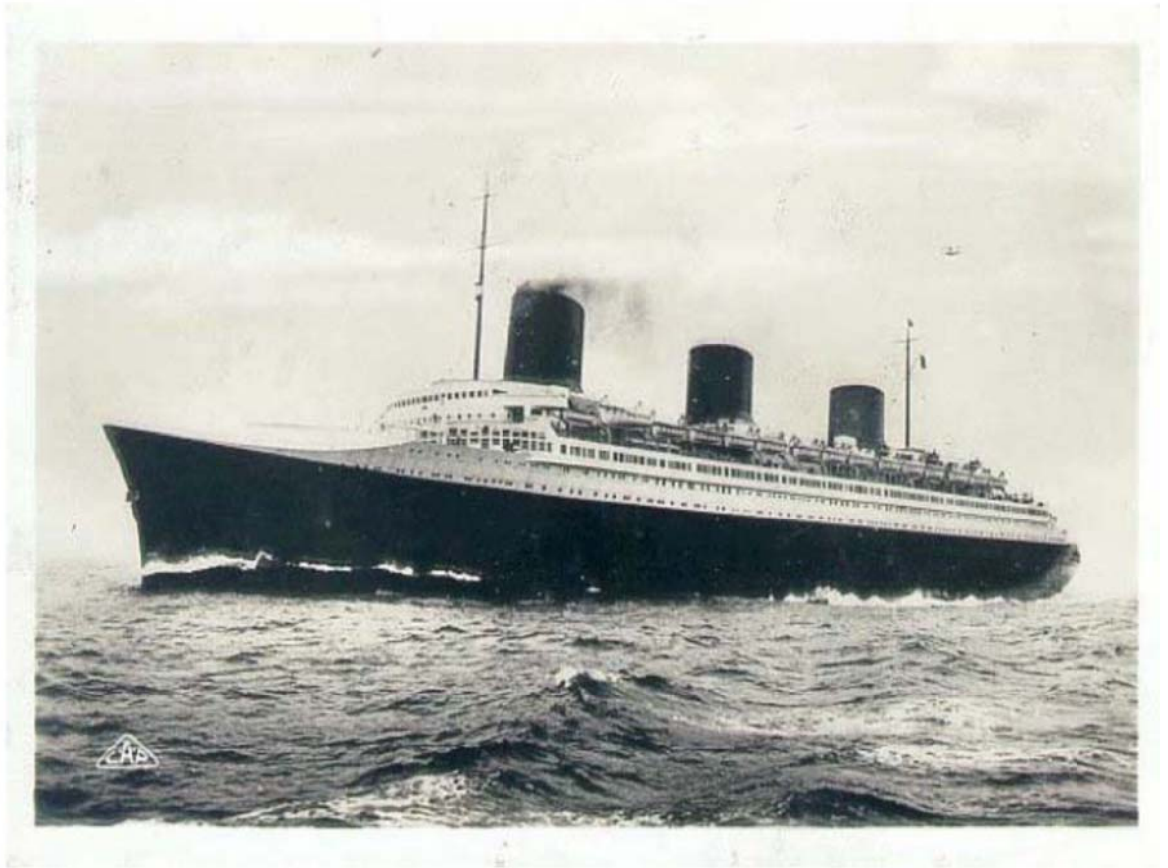
γ. Η αναζήτηση συστημάτων πρόωσης με χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και μειωμένων απαιτήσεων προσωπικού.

δ. Και κυρίως 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. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή συστήματος ηλεκτροπρόωσης για ένα πλοίο, προσφέρει περισσότερη ελευθερία στη σχεδίαση και στην επιλογή των υποσυστημάτων και της διάταξης όλης της προωστήριας και ηλεκτρικής εγκατάστασης. Σε κάθε περίπτωση αξίζει να σημειωθεί, ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι η μόνη λύση για τη βοηθητική πρόωση (δηλ. το σύστημα των πλευρικών προωστήρων που επαυξάνουν την ελκτική ικανότητα των σκαφών ιδίως εντός των λιμένων) με αξιοποίηση κυρίως επαγωγικών κινητήρων μεγάλης ισχύος (0.5 – 2.5 MW).

#### **1.4 Ιστορική Αναδρομή Ηλεκτροπρόωσης**

Μία σειρά πειραματικών εφαρμογών ηλεκτρικής πρόωσης πραγματοποιήθηκαν στο τέλος του 19ου αιώνα σε Ρωσία και Γερμανία όπου ο ηλεκτρικός κινητήρας 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. Η μεγάλες απαιτήσεις σε ισχύ πρόωσης καλύπτονταν τότε από στρόβιλο – ηλεκτρικά συστήματα. Το πλοίο **S/S Normandie** (Εικ. 1.2) χρησιμοποιούσε ένα τέτοιο σύστημα, ήταν το πρώτο σκάφος που διέσχισε τον Ατλαντικό Ωκεανό (1935) κινούμενο με 30 και πλέον κόμβους.

Στρόβιλοι ατμού τροφοδοτούσαν τους σύγχρονους ηλεκτρικούς κινητήρες ισχύος 29 MW σε καθέναν από τους τέσσερις άξονες μετάδοσης κίνησης. Η περιστροφική ταχύτητα δινόταν από την ηλεκτρική συχνότητα των γεννητριών. Σε κανονική λειτουργία οι γεννήτριες τροφοδοτούσαν κάθε μηχανή πρόωσης ξεχωριστά, υπήρχε όμως και η δυνατότητα τροφοδότησης δύο μηχανών από μία γεννήτρια για ταξίδι χαμηλότερης ταχύτητας



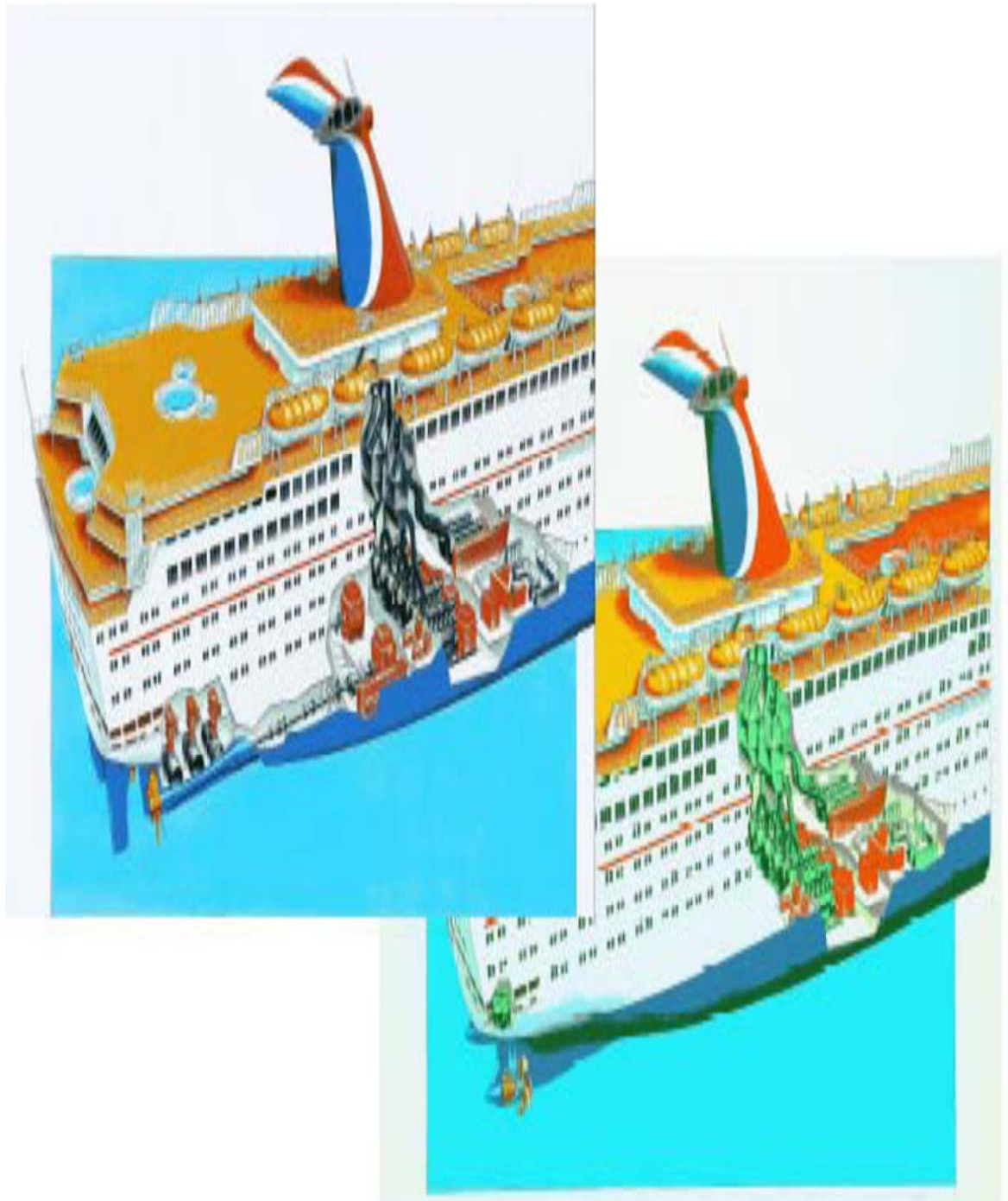
**Εικόνα 1.2 Το πλοίο S/S Normandie (1935)**

Με την εισαγωγή των μηχανών Diesel στο μέσο του 20ου αιώνα, η τεχνολογία ατμοστροβίλων 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 περί 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. Το προωστήριο σύστημα 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). Αυτές οι λύσεις αρχικά χρησιμοποιήθηκαν 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, shuttle tankers κ.α.. Σημειωτέον, 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 έκανε την εμφάνισή του το αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης (roddeed propulsion). Σε αυτό 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 έχει τη δυνατότητα περιστροφής κατά 360ο προσφέροντας στο πλοίο ευκινησία και ευελιξία (maneuverability). Από την πρώτη εφαρμογή στο κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation”, τα αποτελέσματα ήταν τόσο ενθαρρυντικά ώστε να καθιερωθεί η αζιμουθιακή πρόωση στα νέα κρουαζιερόπλοια (Σχ. 1.3).



Εικόνα 1.3 Κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation” με azipod (κάτω δεξιά) με σημαντικό ελεύθερο χώρο.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΟΡΟΛΟΓΙΑ

#### 2.1 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.

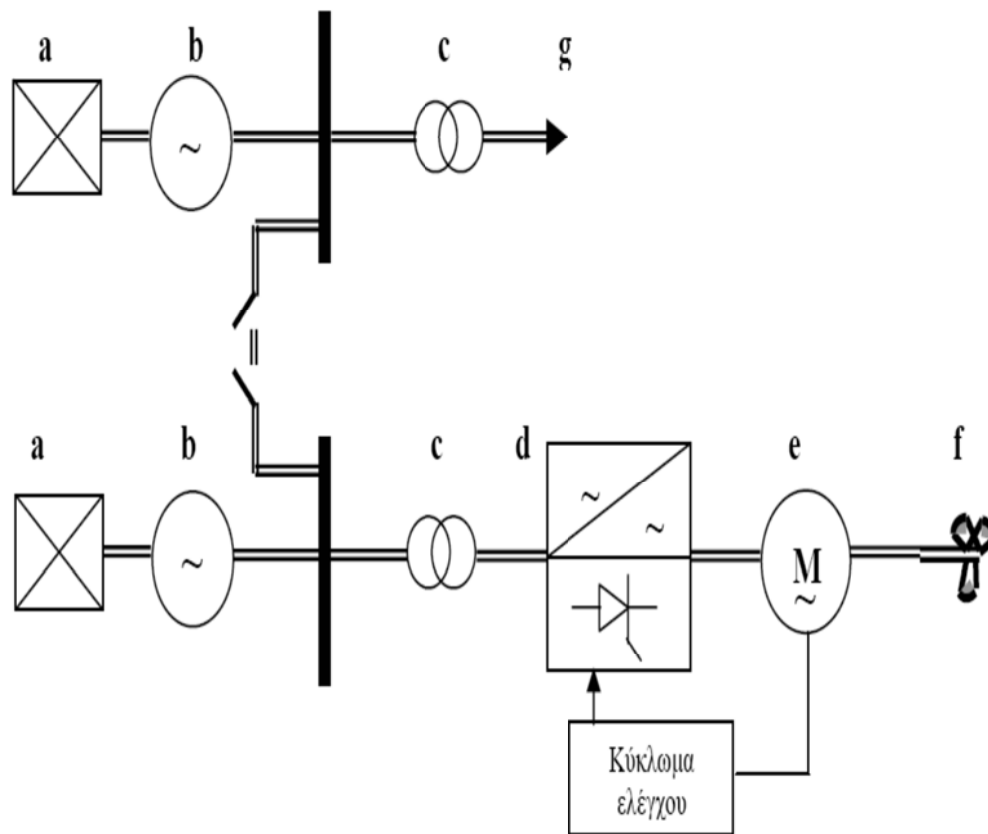
**ε. Ηλεκτρικό δίκτυο χρήσης (Ship Service System).** Είναι το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου, αν εξαιρέσουμε το δίκτυο πρόωσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΔΙΚΤΥΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

#### 3.1 Γενικά χαρακτηριστικά

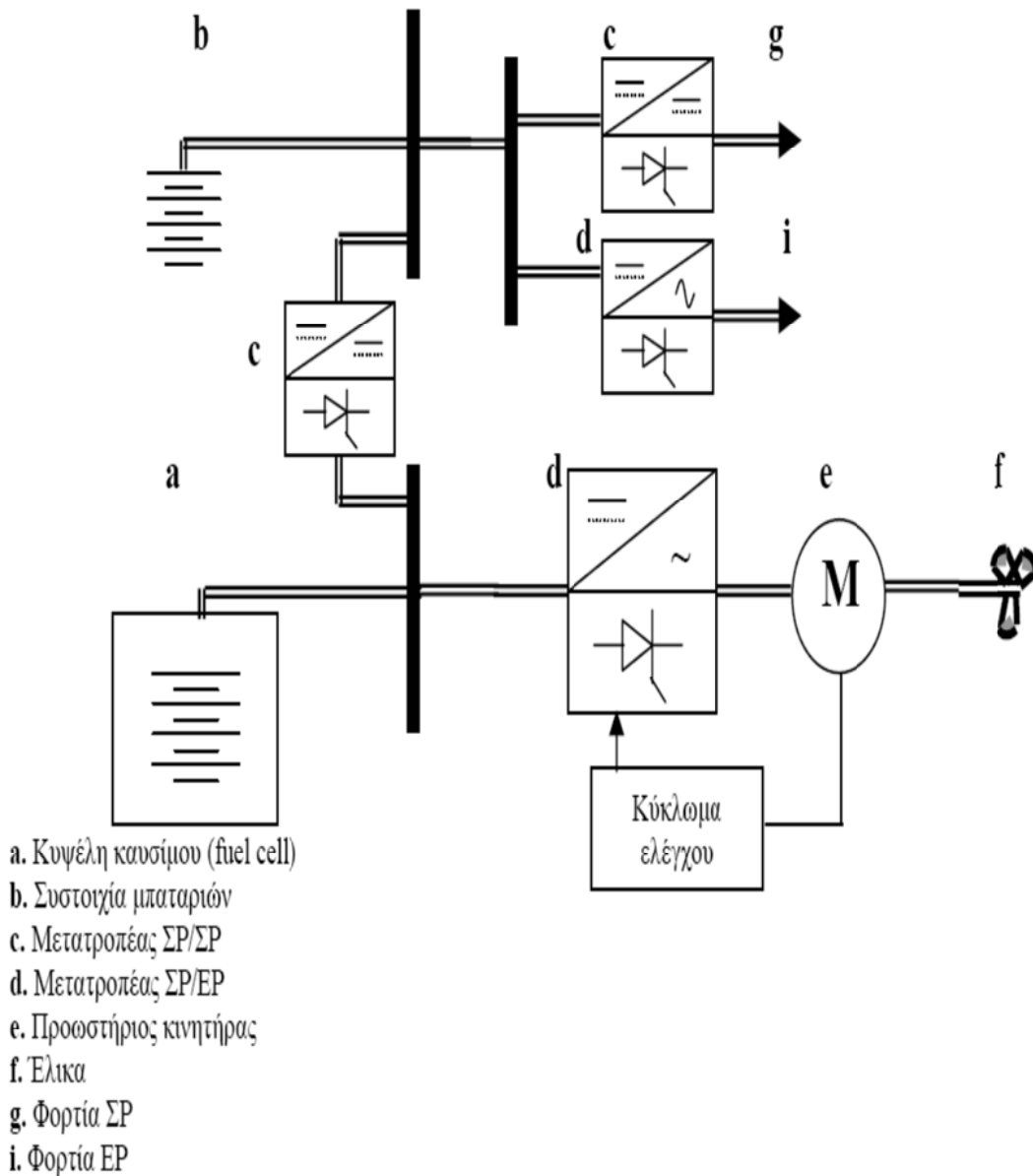
Το γενικευμένο ηλεκτρολογικό διάγραμμα ενός ηλεκτρικού δικτύου πλοίου με ηλεκτρική πρόωση απεικονίζεται στο σχήμα 3.1 Το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να είναι ενιαίο καλύπτοντας όλες τις ηλεκτρικές ενεργειακές ανάγκες ή μπορεί να αποτελείται από δύο επιμέρους υποσυστήματα, αυτό της ηλεκτροπρόωσης κι εκείνο των λοιπών ηλεκτρικών φορτίων. Σε πλοία με συμβατική πρόωση, ειδική υποπερίπτωση αποτελούν τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνουν και γεννήτριες που συνδέονται μηχανικά με τον άξονα της κύριας μηχανής προώσεως, (εξηρητημένες δηλαδή γεννήτριες που στρέφονται από την κύρια ντιζελο-μηχανή πρόωσης του πλοίου). Οι γεννήτριες αυτές μπορεί να συνδέονται με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο με σύνδεσμο ΣΡ (DC link) ή να τροφοδοτούν αυτόνομα μόνο μεγάλα φορτία όπως οι κινητήρες βοηθητικής πρόωσης ( Bow thrusters). Επίσης, σε έκτακτες περιπτώσεις (π.χ. μεγάλης έκτασης ζημιά στην κύρια μηχανή) μπορούν να λειτουργήσουν και αντίστροφα, δηλ. ως ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης (τροφοδοτούμενες από τις άλλες ηλεκτρογεννήτριες) περιορισμένης ισχύος και να οδηγήσουν το σκάφος σε ασφαλή προορισμό.



- a. Κινητήρια μηχανή (ντιζελοκινητήρας ή αεριοστρόβιλος)
- b. Σύγχρονη γεννήτρια
- c. Μετασχηματιστής ισχύος
- d. Μετατροπέας συχνότητας
- e. Προωστήριος κινητήρας
- f. Έλικα
- g. Λοιπά φορτία (αντλίες, συμπιεστές, φωτισμός, εργάτες κλπ)

**Εικόνα 3.1 Γενικό διάγραμμα συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου.**

Σημαντικά διαφορετικό είναι το ηλεκτρικό σύστημα της νέας γενιάς υποβρυχίων σχήμα 3.2, στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από **κυψέλες καυσίμου** (fuel cells) (και αποθηκεύεται σε συστοιχίες συσσωρευτών Σ.Ρ) για να τροφοδοτήσει καταναλώσεις Σ.Ρ αλλά και Ε.Ρ μέσω μετατροπών Σ.Ρ/Ε.Ρ. Ηλεκτρογεννήτριες Ε.Ρ που κινούνται με κινητήρες ντίζελ υφίστανται μεν, αλλά δεν αποτελούν την κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση, όμως, οι κινητήρες πρόωσης είναι Ε.Ρ.



**Εικόνα 3.2** Γενικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου με κυψέλες καυσίμου.

### 3.2 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά

Όπως αναφέρθηκε οι επιλογές για το σχεδιασμό των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτροπρόωσης είναι πολλές και κάθε μία μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες και τον ρόλο του συγκεκριμένου πλοίου. Ο σχεδιασμός ενός σύγχρονου συστήματος ηλεκτροπρόωσης μπορεί να αναλυθεί στην επιλογή λύσεων σε επιμέρους ζητήματα, που είναι :

1. Το είδος των κινητήριων μηχανών. Ντήζελ, Αεριοστρόβιλοι (ειδικά για πιο αθόρυβη λειτουργία), Ατμοστρόβιλοι (ειδικά για πυρηνοκίνητα σκάφη), Συσσωρευτές ή/και Ηλεκτροχημικές Κυψέλες Καυσίμου (Fuel-Cells) (για τα υποβρύχια).

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 προώσεως και τη διαθεσιμότητα παρελκόμενου ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (καλώδια, μονωτικά, διακόπτες πίνακες κ.λπ.)

3. Ο αριθμός και το είδος των γεννητριών.

4. Η παράλληλη ή μη λειτουργία των γεννητριών.

5. Το ποσοστό αυτοματισμού στη λειτουργία, φόρτωση, παραλληλισμό και κράτηση των γεννητριών.

6. Ο αριθμός και το είδος των κινητήρων προώσεως. 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 η αποδοτικότητα (βαθμός αποδόσεως).

7. Το είδος ελέγχου-χειρισμού των κινητήρων προώσεως.

8. Το είδος των στατών μετατροπών.

9. Η σχεδίαση της διάταξης του ηλεκτρικού δικτύου και συγκεκριμένα :

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

α.1. να είναι τελείως ανεξάρτητα, 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» (AES), οπότε και είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της εκμετάλλευσης των πλεονεκτημάτων της ηλεκτροπρόωσης.

**β.** Στην περίπτωση που τα δύο δίκτυα συνδέονται, η επιλογή του τρόπου σύνδεσης (απευθείας μέσω πινάκων, μέσω αντιστροφών (inverters) ή άλλου μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος (converter), μέσω ζεύγους κινητήρα-γεννήτριας, μέσω μετασχηματιστών κ.λπ.).

**γ.** Από ποιο δίκτυο τροφοδοτούνται τα βοηθητικά συστήματα προώσεως (π.χ. τα συστήματα ελέγχου-χειρισμού, ψύξης, λίπανσης ).

**δ.** Ο τρόπος με τον οποίο διασφαλίζεται η 'ποιότητα ισχύος' του ηλεκτρικού δικτύου όσον αφορά την τάση και την συχνότητα, (θόρυβος-αρμονική παραμόρφωση) και ειδικά του δικτύου χρήσεως, όταν αυτό συνδέεται με το δίκτυο προώσεως. Σαν κύρια πηγή δημιουργίας αρμονικών αναφέρονται τα ηλεκτρονικά ισχύος των ηλεκτροκινητήρων. Η ποιότητα των ηλεκτρικών δικτύων (συχνότητα, αρμονικές τάσεως, ταχείες διαταραχές τάσεως κ.λπ.) καθορίζεται από τις διάφορες προδιαγραφές και νηογνώμονες. Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν μόνο το δίκτυο χρήσης του πλοίου, δηλαδή φορτία που δεν σχετίζονται με την πρόωση. Στις περιπτώσεις ανεξαρτήτου δικτύου προώσεως 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 προώσεως να ικανοποιεί τις ίδιες απαιτήσεις ποιότητας, ή να λαμβάνεται μέριμνα, ώστε τυχόν 'διαταραχές' στο δίκτυο προώσεως να μην 'διαδίδονται' στο δίκτυο χρήσεως. Για δίκτυα Συνεχούς Ρεύματος δεν υπάρχουν ακόμη εν γένει ιδιαίτερες απαιτήσεις ποιότητας.

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

**10.** Ελάχιστες απαιτήσεις σε καταστάσεις ανάγκης - Αντιμετώπιση. Για παράδειγμα μπορεί να απαιτείται εκκίνηση κινητήρα προώσεως 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 ή οι γεννήτριες να μπορούν να τροφοδοτούν τα φορτία ανάγκης και ταυτόχρονα να κινήσουν το πλοίο με μια μικρή ταχύτητα (3-5 knots).

**11.** Ο τρόπος έδρασης των μηχανημάτων, καθώς και ο (φυσικός) διαχωρισμός τους, όπως για παράδειγμα των πινάκων ηλεκτρικού δικτύου προώσεως και χρήσεως, των κινητήρων προώσεως και των ηλεκτρονικών διατάξεων οδήγησής τους.

Ως γενικοί κανόνες-απαιτήσεις αναφέρονται :

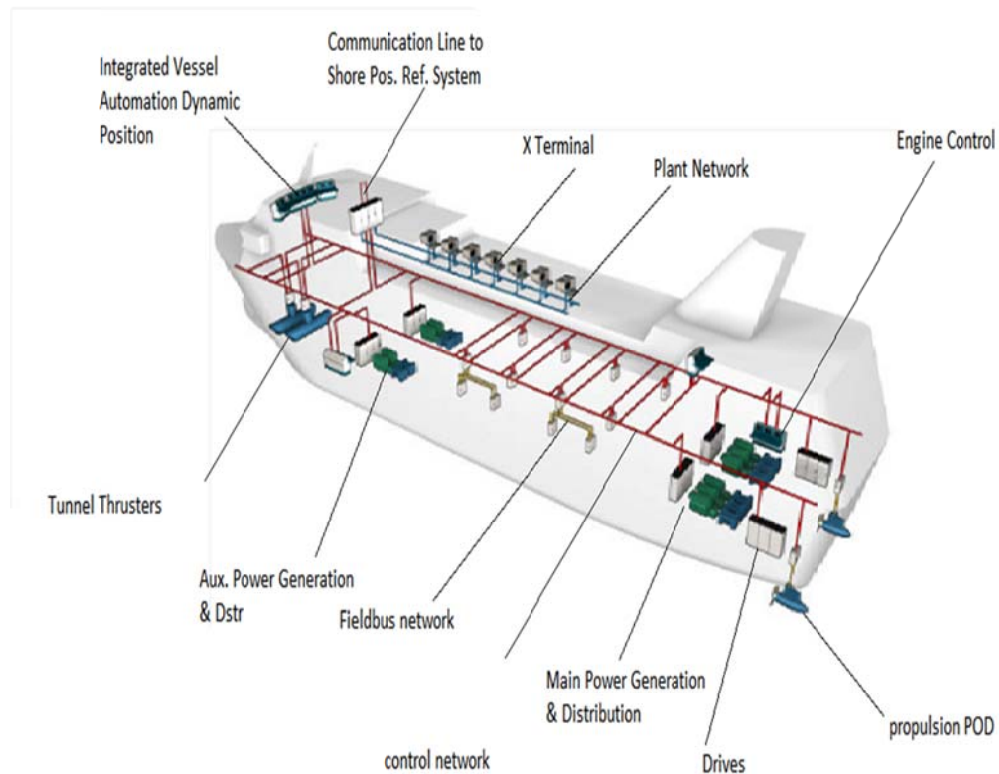
**α.** αν υπάρχει αρκετός χώρος πρέπει οι πίνακες προώσεως και χρήσεως να διαχωρίζονται φυσικά.

**β.** οι κινητήρες και οι αντίστοιχοι αντιστροφείς (inverters) πρέπει να τοποθετούνται σε διαφορετικούς υδατοστεγούς 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 πρίμα γίνεται.

**12.** Όπως αναφέρθηκε ήδη σημαντικό πλεονέκτημα της ηλεκτροπρόωσης είναι η ευχέρεια 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.



Εικόνα 3.1 Παράδειγμα πρόωσης και ελέγχου διάταξη του συστήματος για ένα σκάφος κρουαζιέρας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΟΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΡΟΩΣΗΣ

#### 4.1 Ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης

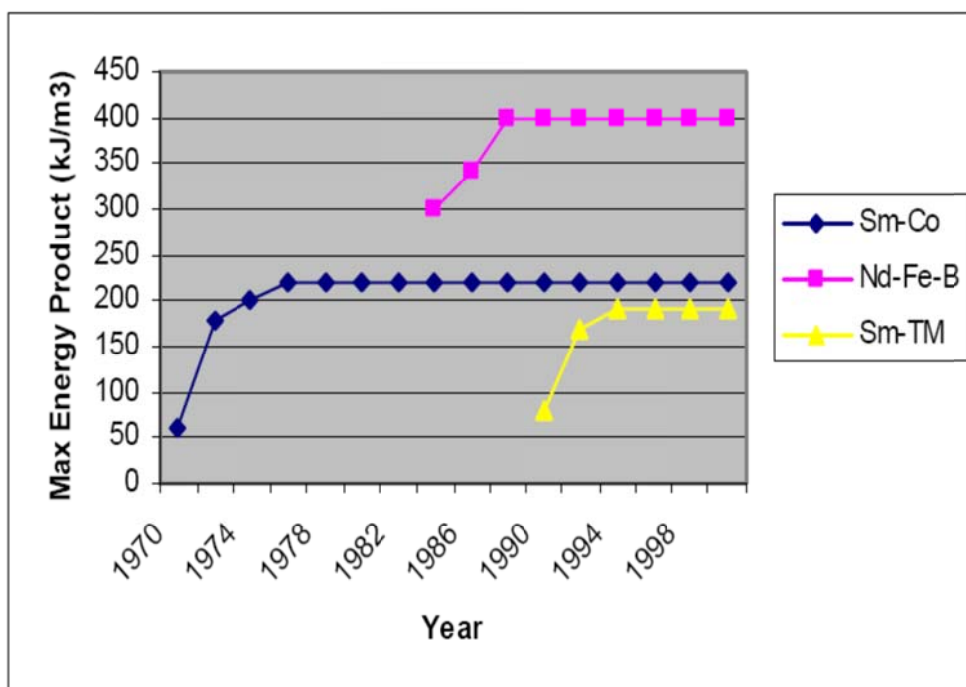
Στις πρώτες εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης χρησιμοποιήθηκε ο ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος Σ.Ρ., ο οποίος και χρησιμοποιείται ακόμα σε πολλά πλοία διαφόρων τύπων. Στις περισσότερες σύγχρονες εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης χρησιμοποιούνται σύγχρονοι κινητήρες με βαθμό απόδοσης 96 – 98 %, 3 – 4 % περισσότερο από τους ασύγχρονους με ονομαστική τάση λειτουργίας τα 3,3 – 6,6 kV.



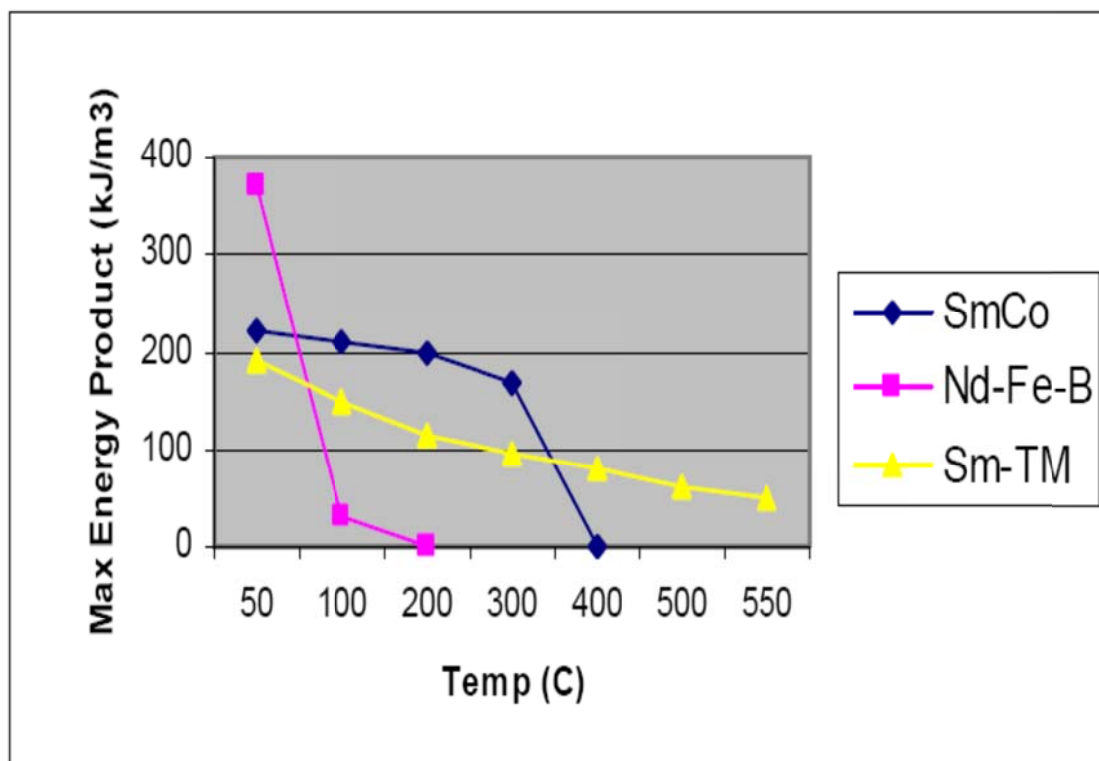
Μια νέα κατηγορία σύγχρονων κινητήρων έρχεται να προστεθεί στους παραπάνω, οι σύγχρονοι κινητήρες μονίμου μαγνήτη με απόδοση πάνω από 98 %. Στους σύγχρονους κινητήρες μονίμου μαγνήτη το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα το οποίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα αντικαθίσταται από μόνιμους μαγνήτες οι οποίοι παράγουν το ίδιο μαγνητικό πεδίο που στρέφεται στο χώρο σύγχρονα με τον δρομέα.

#### 4.2 Σύγχρονος κινητήρας μονίμου μαγνήτη

Οι σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη δεν έχουν ανάγκη από μια έξτρα παροχή Σ.Ρ. για το τύλιγμα διέγερσης, ακόμη μειώνονται και οι συνολικές θερμικές απώλειες (Joule), έτσι εξηγείται και ο μεγάλος βαθμός απόδοσης. Η ιδέα της χρήσης μόνιμων μαγνητών είναι παλιά αλλά η τεχνολογική πρόοδος τα τελευταία χρόνια είναι που κατέστησε δυνατή την κατασκευή κραμάτων μόνιμων μαγνητών (κράματα σαμαρίου – κοβαλτίου, SmCo και νεοβιδίου – σιδήρου – βορείου, NdFeB) που έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή τη μαγνήτιση τους για αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, όπως είναι αυτές που αναπτύσσονται στο εσωτερικό μίας στρεφόμενης μηχανής, βλ. και Σχ. 4.1 – 4.2.

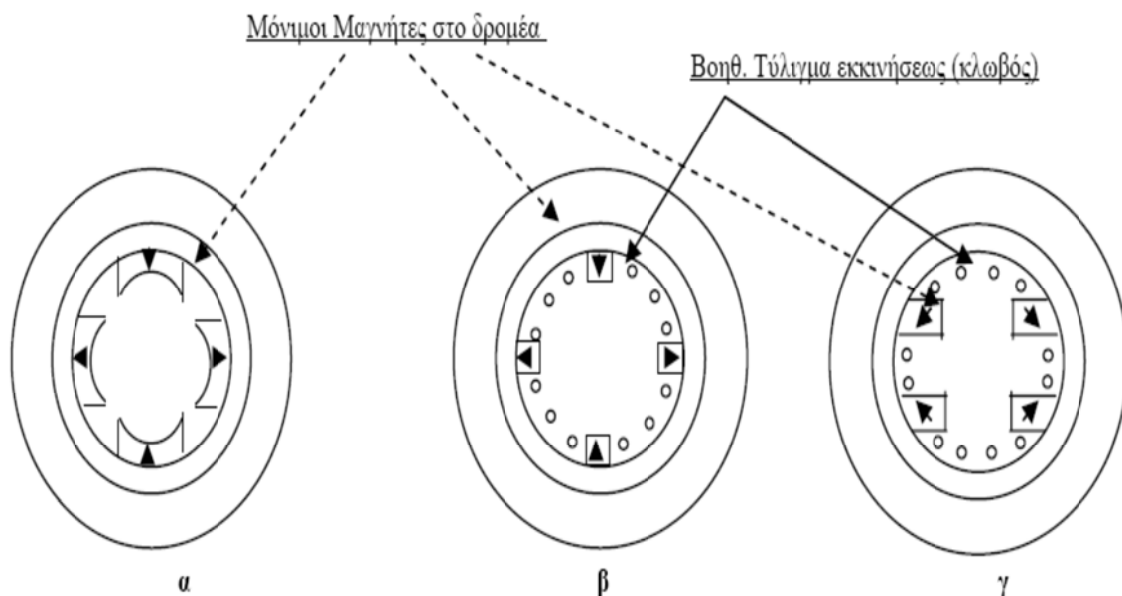


**Εικόνα 4.1 Εξέλιξη τεχνολογίας μόνιμων μαγνητών τα τελευταία 30 χρόνια.**



Εικόνα 4.2 Επιδόσεις μονίμων μαγνητών ως προς τη θερμοκρασία μαγνήτισης.

Οι κινητήρες αυτοί με κατάλληλη επιλογή τυλίγματος στάτη και πόλων δρομέα μπορούν να παράγουν ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, συναγωνίζεται έτσι με μία συμβατική σύγχρονη μηχανή στα χαμηλά επίπεδα απότομων αιχμών ροπής (torque ripples) και μηχανικών δονήσεων (vibrations) (Σχ. 4.2). Τα τελευταία χρόνια ερευνάται η χρησιμοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων με υπεραγώγιμα υλικά ως κινητήρες πρόωσης, κυρίως στην Αμερική. Οι κινητήρες αυτοί, λόγω του ότι το υπεραγώγιμο υλικό παρουσιάζει μηδενική ηλεκτρική αντίσταση σε πολύ 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.



**Εικόνα 4.3 Διατάξεις σύγχρονων κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες.**

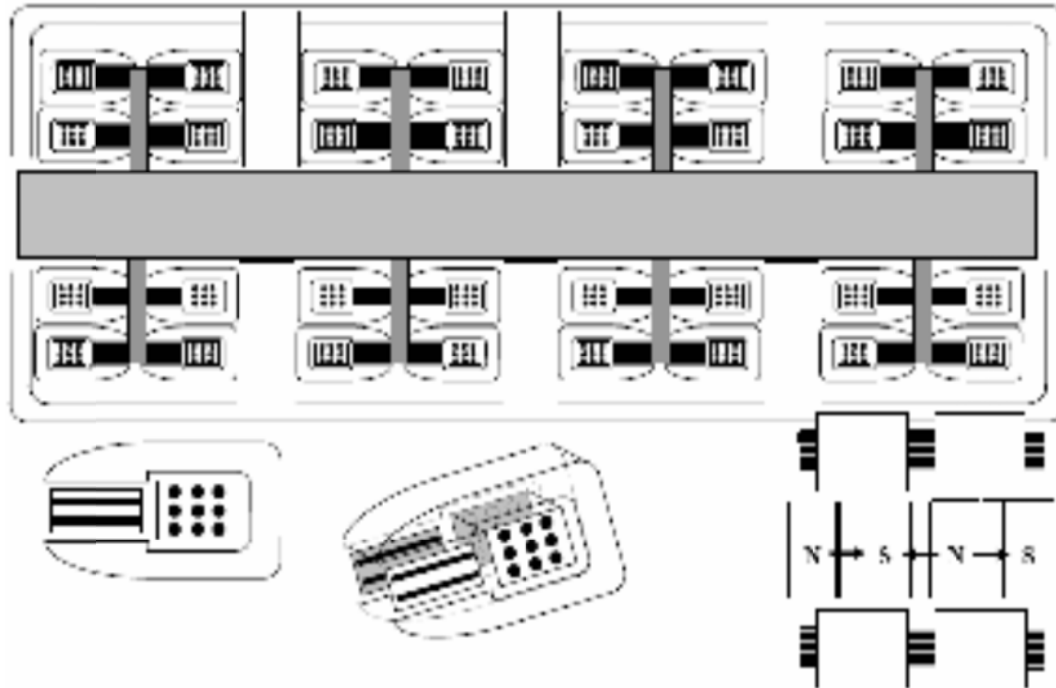
- α) οι μόνιμοι μαγνήτες στην εξωτερική επιφάνεια του δρομέα
- β) οι μόνιμοι μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα
- γ) οι μόνιμοι μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα με διεύθυνση ροής εγκάρσια στον άξονα.

### **4.3 Κινητήρες αξονικής ροής**

Πρόκειται για κινητήρες στους οποίους η ωφέλιμη μαγνητική ροή είναι κατά την ακτινική διεύθυνση δηλαδή όπως στις συνήθεις συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές. Αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις τέτοιων κινητήρων είναι ο κινητήρας PERMASYN της εταιρείας SIEMENS, με μόνιμους μαγνήτες Sm-Co που βρίσκει εφαρμογές πρόωσης μεταξύ άλλων σε υποβρύχια του ΠΝ. Ένας άλλος τύπος ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης είναι ο Εξελιγμένος Επαγωγικός Κινητήρας (Advanced Induction Motor-AIM) της ALSTOM, ο οποίος έχει επιλεγεί για την πρόωση της φρεγάτας (Type 45) του Βρετανικού Πολεμικού Ναυτικού. Προσφέρει υψηλή πυκνότητα ισχύος και ροπής σε σύγκριση με έναν συμβατικό επαγωγικό κινητήρα ίδιας ονομαστικής ισχύος. Η διαφορά με τον κοινό 3-φασικό επαγωγικό κινητήρα είναι ότι προσφέρει την δυνατότητα λειτουργίας με 5, 10 ή 15 φάσεις με τη βοήθεια εξελιγμένων ηλεκτρονικών ισχύος για να αυξηθεί η ισχύς του κινητήρα.

#### **4.4 Πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής (transverse flux motors)**

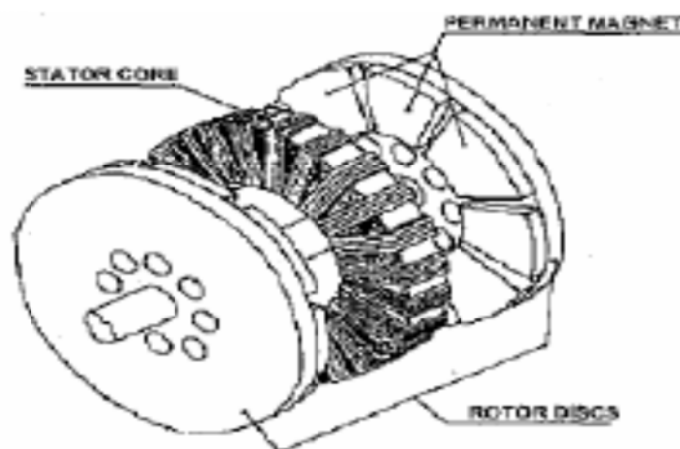
Οι κινητήρες αυτοί έχουν μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, προσανατολισμένους μάλιστα κατά τέτοιο τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει μέσα στο διάκενο σε διεύθυνση εν μέρει κατά την αξονική διεύθυνση και κυρίως κάθετη εγκάρσια προς τον άξονα της μηχανής, (Σχήμα 4.4 ).



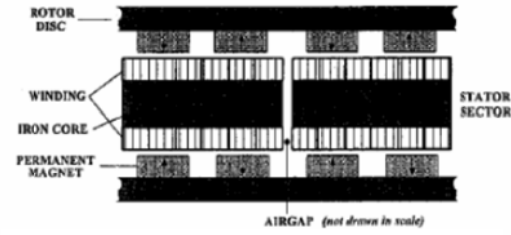
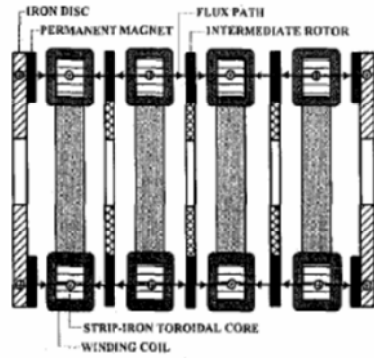
Εικόνα 4.4 Κινητήρας εγκάρσιας ροής.

#### **4.5 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) Σχ. 4.5.



Εικόνα 4.5 Μηχανή αξονικής ροής.



**ΑΡΙΣΤΕΡΑ:** Κάθετη τομή κινητήρα αξονικής ροής με 4 σπονδύλους.

**ΔΕΞΙΑ:** Διάταξη στάτη αποτελούμενου από 4 επιμέρους σπονδύλους κινητήρα αξονικής ροής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

#### 5.1 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος για οδήγηση ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης.

Ο κυρίαρχος τύπος κύριας κίνησης για τις εγκαταστάσεις πρόωσης δυναμικής τοποθέτησης των πλοίων DP (dynamic positioning) είναι η ηλεκτρική κίνηση. Σχεδόν κάθε σύστημα DP που εγκαθίσταται στα σύγχρονα πλοία οδηγείται από μια ηλεκτρική μηχανή.

Στην αρχή της εφαρμογής της τεχνολογίας δυναμικής τοποθέτησης, η οποία συνέπεσε με την εμφάνιση της τεχνολογίας των ανορθωτών με θυρίστορς (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 αντιστροφών (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.

## **5.2 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς συχνότητας**

Στις εγκαταστάσεις E.P., στις οποίες η συχνότητα του παραγομένου ρεύματος είναι σταθερή, 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 αντιστροφείας). Ωστόσο για μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων κατασκευάζονται πιο σύνθετες διατάξεις. Έτσι ένας αντιστροφείας 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.

Ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή ευρέως χρησιμοποιούμενων μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος:

• **Ζεύγη ανορθωτών – αντιστροφών sPWM**

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, όπως εξηγείται στη συνέχεια βλ. και Πίνακα 5.1:

**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 σβήνουν 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.

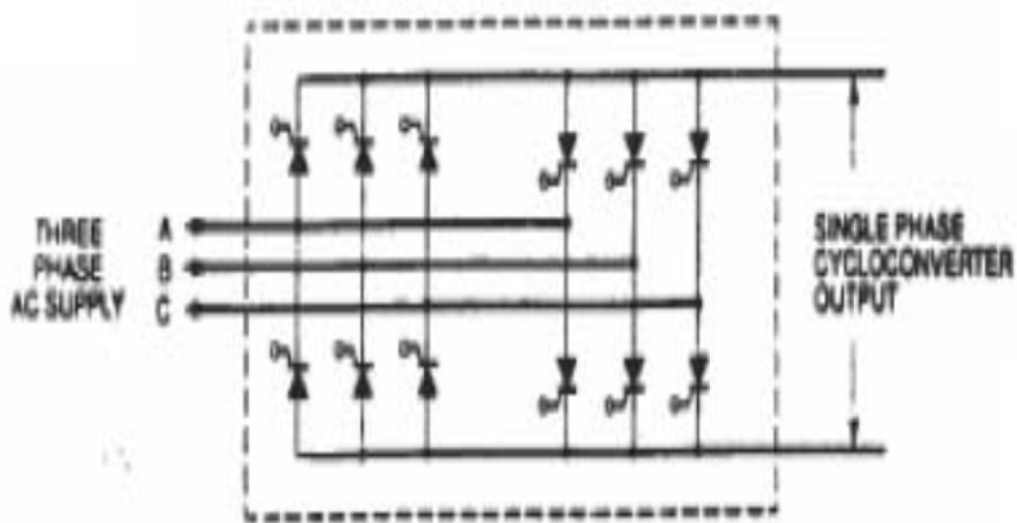
• **Κυκλομετατροπείς (cycloconverters):**

Με τις 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, ( Σχήματα. 5.1 και 5.2). Σε κάθε φάση αντιστοιχούν δύο γέφυρες διακοπών (g και o) με 6 διακόπτες η κάθε μία, ( Σχήμα. 5.2). Η μία γέφυρα είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία της κυματομορφής κατά τη θετική

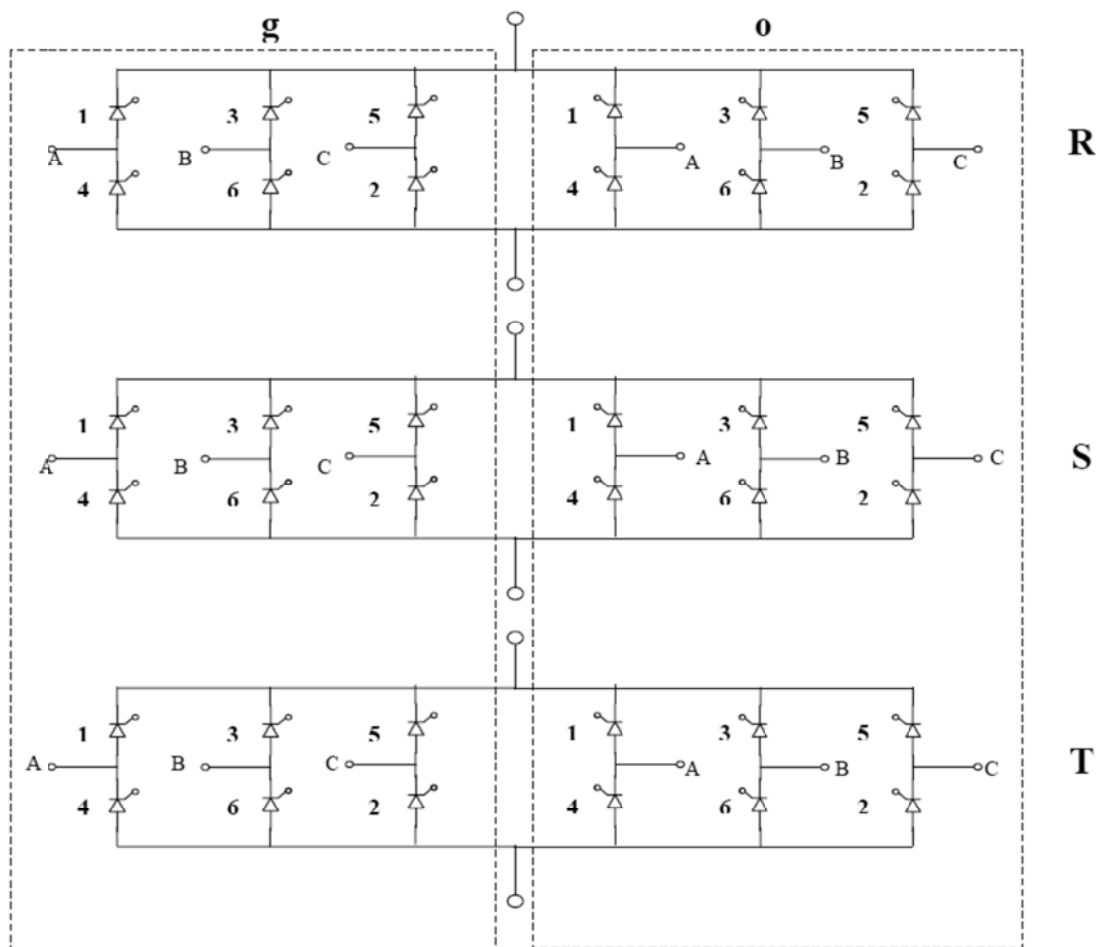
ημιπερίοδο και η άλλη κατά την αρνητική. Στις γέφυρες εισέρχονται όλες οι φάσεις εισόδου. Αντιπαράλληλα προς τους διακόπτες ισχύος, εν γένει, συνδέονται και δίοδοι ισχύος για να κυκλοφορούν αντίστροφης φοράς ρεύματα προστατεύοντας τους ελεγχόμενους διακόπτες (στο σχήμα 5.2 έχουν παραλειφθεί για λόγους απλότητας).

Η τεχνική ελέγχου αγωγής των διακοπών ισχύος μπορεί να ποικίλλει και σε αυτήν την περίπτωση, ωστόσο έχει επικρατήσει μία αντίστοιχη μέθοδος της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών των αντιστροφών 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.



**Εικόνα 5.1 Μονοφασικό κύκλωμα (δομικό στοιχείο) κυκλομετατροπέα.**

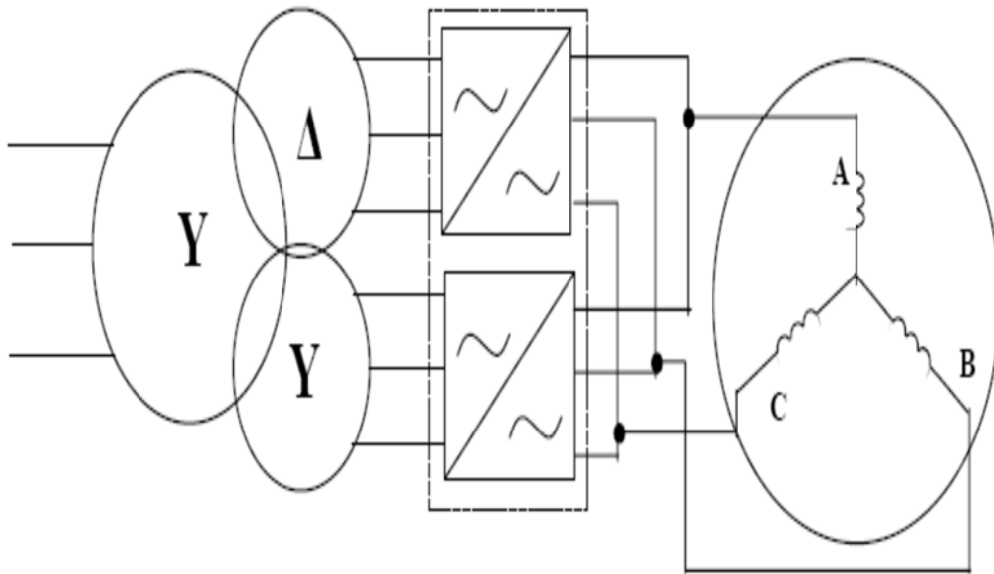




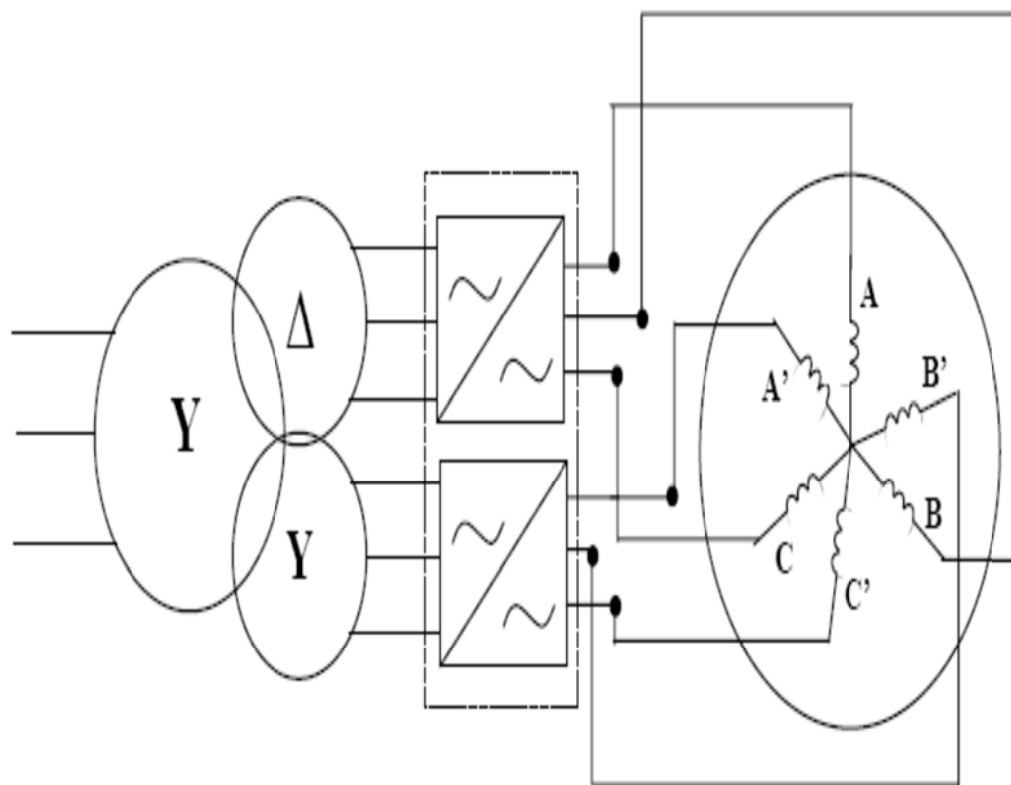
**Εικόνα 5.2** Τυπικός τριφασικός κυκλομετατροπέας 6 παλμών.

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 Υ ή Δ.

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 Υ ενώ το άλλο κατά Δ. Οι έξοδοι του κυκλομετατροπέα 12 παλμών μπορεί να τροφοδοτούν είτε ένα απλό τριφασικό τύλιγμα κινητήρα, (Σχήμα 5.3), είτε το διπλό τριφασικό τύλιγμα ενός ειδικού τύπου κινητήρα (Σχήμα 5.4). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται περαιτέρω μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων.



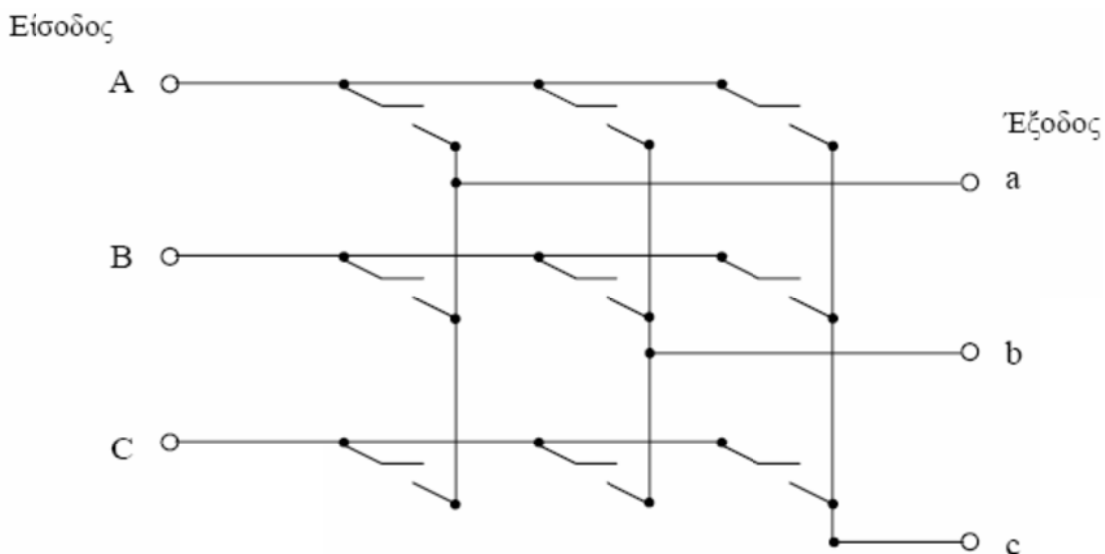
Εικόνα 5.3 Κυκλομετατροπέας 12 παλμών που τροφοδοτεί τριφασικό κινητήρα.



Εικόνα 5.4 Κυκλομετατροπέας 12 παλμών που τροφοδοτεί 2X3φ-κινητήρα.

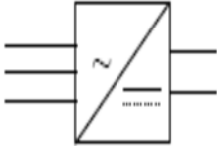
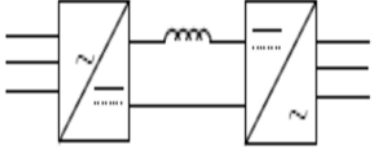
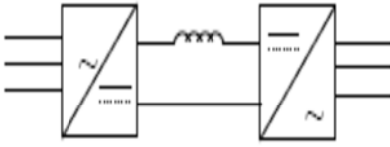


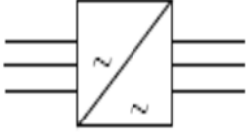
Οι κυκλομετατροπείς πλεονεκτούν στο ότι παράγουν κυματομορφές με πολύ μικρή παραμόρφωση αλλά είναι πολυδάπανες διατάξεις με πολλούς διακόπτες ισχύος ενώ κατά τη μεταγωγή των διακοπών απαιτείται αυξημένη ακρίβεια συντονισμού από τα κυκλώματα ελέγχου.

Μιτροειδείς 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 προωστήριες 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.



**Εικόνα 5.5 Μητροειδής μετατροπέας**

Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτική παρουσίαση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος για ηλεκτρική πρόωση

Μετατροπέας	Διάταξη	Μέγιστη ισχύς	Κυριαρχούσες αρμονικές
Ανορθωτής		>6 MVA	6.n.f <sub>i</sub>
Αντιστροφέας CSI		1 MVA	(3k±1).f <sub>0</sub>
Αντιστροφέας LCI		>30 MVA	(3k±1).f <sub>0</sub>
Αντιστροφέας VSI		2 MVA	(3k±1).f <sub>0</sub>
Αντιστροφέας PWM		2 MVA (IGBT) 6 MVA (GTO)	2.n.f <sub>0</sub>
Κυκλομετατροπέας		>30 MVA	6.n.f <sub>i</sub> ±(2.p+1).f <sub>0</sub>
<i>n=1,2,3,... k=2,4,6,... p=0,1,2,3,... f<sub>i</sub>=συχνότητα εισόδου f<sub>0</sub>=συχνότητα εξόδου</i>			

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

### ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΠΡΩΣΗΣ Ε.Ρ

#### 6.1 Τεχνικές Ελέγχου Κινητήρων Πρόωσης ΕΡ

Ο έλεγχος της ταχύτητας και της ροπής ενός κινητήρα ΕΡ είναι αρκετά πιο σύνθετος από την περίπτωση των κινητήρων ΣΡ, όπου η ροπή, **M**, προκύπτει ως μία ποσότητα ανάλογη του γινομένου του ρεύματος τυλίγματος διεγέρσεως (πεδίου), **IF** και του ρεύματος τυλίγματος τυμπάνου, **IA**:

$$\mathbf{M} = k \mathbf{I}_F \mathbf{I}_A \quad (1.1)$$

όπου k σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής. Στη συνέχεια ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή όλων των μεθόδων ελέγχου κινητήρων ΕΡ 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.

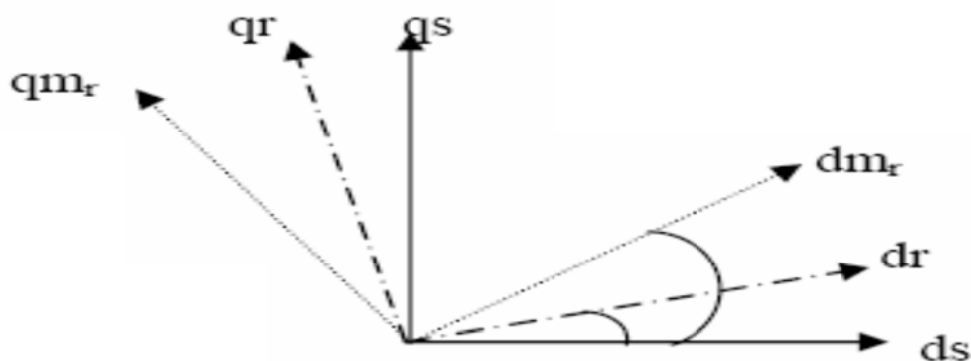
- **Διανυσματικός έλεγχος (vector control):** Όπως προαναφέρθηκε, ο έλεγχος γίνεται όπως στη μηχανή ΣΡ ξένης διεγέρσεως, όπου η ροπή, **M**, προκύπτει ως μία ποσότητα ανάλογη του γινομένου του ρεύματος τυλίγματος διεγέρσεως (πεδίου), **IF** και του ρεύματος τυλίγματος τυμπάνου, **IA** :

$$\mathbf{M} = k \mathbf{I} \mathbf{I} \mathbf{A} \quad (1.1)$$

Στην μηχανή ΣΡ όμως τα δύο ηλεκτρομαγνητικά πεδία είναι σταθερά στο χώρο και σε  $90^\circ$  μεταξύ τους. Αντιθέτως, στις μηχανές ΕΡ, τα πεδία αφενός στρέφονται και αφετέρου η μεταξύ τους γωνία μεταβάλλεται με τις μεταβολές στις φορτίσεις. Είναι όμως μαθηματικά δυνατόν, να αποσυζευχθούν 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,  $\mathbf{d}$ ) και τη συνιστώσα εγκάρσιου άξονα (quadrature axis,  $\mathbf{q}$ ). Οι συνιστώσες αυτές είναι κάθετες μεταξύ τους και διατηρούνται ακίνητες ως προς το στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Σημειώνεται ότι ενώ αυτός ο μαθηματικός μετασχηματισμός αποσύζευξης ήταν γνωστός εδώ και 50 χρόνια τουλάχιστον, η υλοποίησή του, όμως με ηλεκτρονικά κυκλώματα σε πραγματικό χρόνο περιστροφής των κινητήρων κατέστη δυνατή μόλις τα τελευταία 15 χρόνια. Η μεθοδολογία του μετασχηματισμού αποσύζευξης διαφέρει με τον τύπο της μηχανής (σύγχρονη ή ασύγχρονη) όπως εξηγείται και στη συνέχεια. 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)*, που αναλύεται στη συνέχεια.

### Έλεγχος πεδίου (field control)

Ως πλαίσιο αναφοράς εκλέγεται αυτό που στρέφεται με το διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής του δρομέα, ( Σχήμα 1.17).



Εικόνα 6.1 . Πλαίσιο αναφοράς για διανυσματικό έλεγχο κινητήρων ΕΡ.

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

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

*(d<sub>mr</sub>,q<sub>mr</sub>): πλαίσιο αναφοράς μαγνητικής ροής δρομέα (στρεφόμενο με την ταχύτητα της μαγνητικής ροής του δρομέα).*

Στην περίπτωση σύγχρονης μηχανής, τα πλαίσια **(dr,qr)** και **(d<sub>mr</sub>,q<sub>mr</sub>)** συμπίπτουν. Ο διανυσματικός έλεγχος πεδίου του κινητήρα διακρίνεται περαιτέρω σε άμεσο και έμμεσο έλεγχο. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία του άμεσου ελέγχου η μαγνητική ροή προσδιορίζεται είτε με απευθείας μέτρηση της, είτε με χρήση μαθηματικού μοντέλου μαγνητικής ροής.

Αντιθέτως, κατά τον έμμεσο έλεγχο, η μαγνητική ροή υπολογίζεται έμμεσα από μετρήσεις άλλων μεγεθών καθώς μετρώνται τα ρεύματα στο τύλιγμα του στάτη και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Η ροπή του κινητήρα επαγωγής προκύπτει να είναι το γινόμενο δύο συνιστωσών του ρεύματος του στάτη, όπως αυτό αναλύεται στο πλαίσιο αναφοράς **(d<sub>mr</sub>,q<sub>mr</sub>)** που στρέφεται με το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του δρομέα:

$$\mathbf{M} = k \mathbf{i}_s, \mathbf{d}_{mr} \mathbf{i}_{qmr} \quad (1.2)$$

Σημειώνεται ότι η μέτρηση του διανύσματος μαγνητικής ροής (κατά μέτρο και γωνία) και δη στον στρεφόμενο δρομέα είναι εξαιρετικά δύσκολο να γίνει (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):** Πρόκειται για ουσιαστική εξέλιξη της μεθόδου του διανυσματικού ελέγχου πεδίου (vector field control). Έτσι, και σε αυτήν την περίπτωση 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

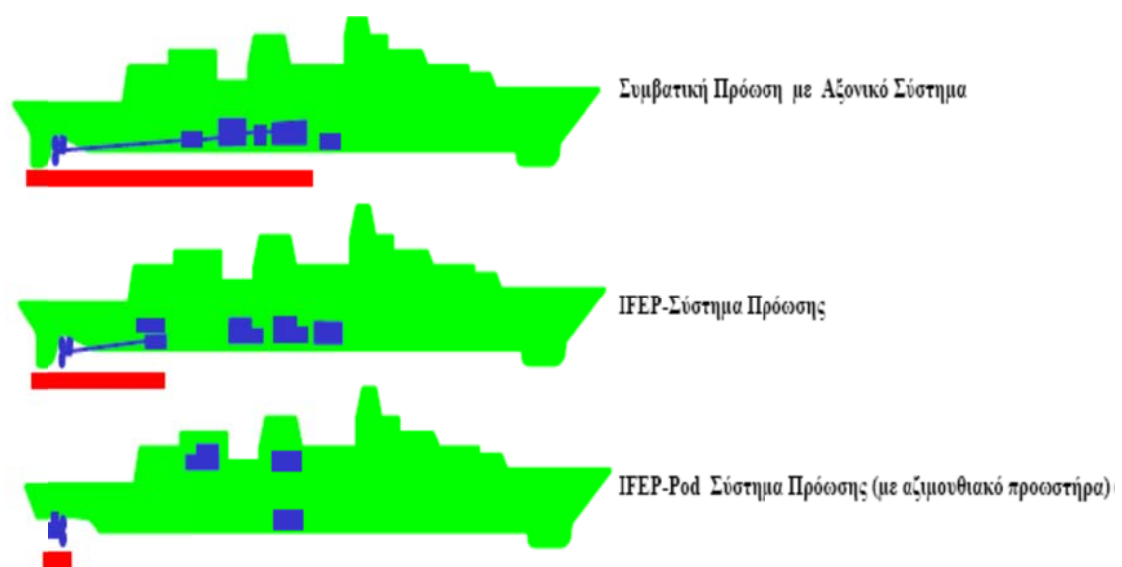
τα σήματα ελέγχου των μετατροπέων (για ένευση και σβέση των διακοπών). Η διαδικασία σύγκρισης στηρίζεται σε μη γραμμικές συναρτήσεις και έχει το πλεονέκτημα ότι αξιοποιεί τη διακριτή στον χρόνο συμπεριφορά των διακοπών ισχύος αυξάνοντας τελικά τη συνολική απόδοση. Η τεχνική αυτή έχει ήδη αρχίσει να εφαρμόζεται σε πλοία με ηλεκτρική πρόωση και πιο συγκεκριμένα με αζιμουθιακό προωστήρια σύστημα σε συνδυασμό με σύγχρονο κινητήρα μονίμων μαγνητών (Azipod, εταιρεία ABB) και κυκλομετατροπείς. Η μέθοδος πλεονεκτεί έναντι του διανυσματικού ελέγχου, καθώς 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).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>

### ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΕΛΗΚΑ-ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΠΡΩΩΣΗΣ

#### 7.1 Συνεργασία έλικας και κινητήρα πρόωσης

Στα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης συγκαταλέγεται και η ουσιαστική μείωση του αξονικού συστήματος των πλοίων, βλ. Σχ. 7.1.



Εικόνα 7.1 Συγκριτική παρουσίαση αξονικών συστημάτων πλοίων.

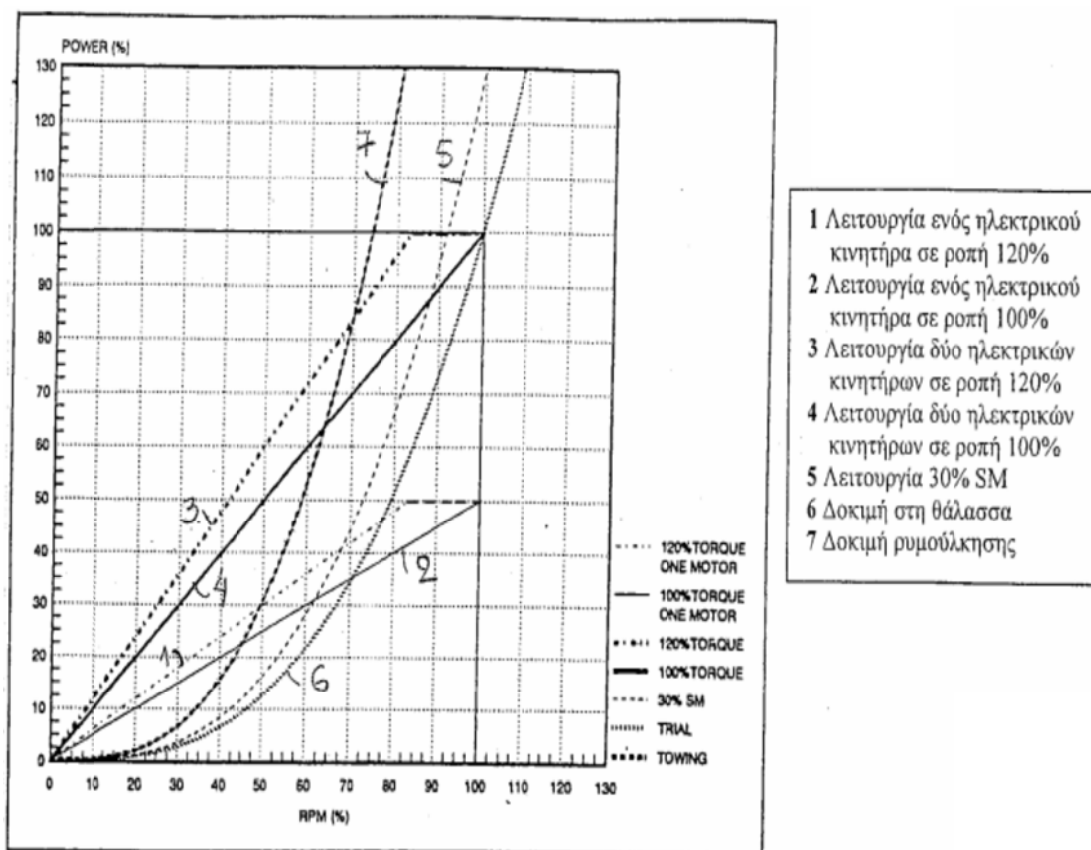


Τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης έχουν το πλεονέκτημα συνεχούς μεταβολής των στροφών σχεδόν σε όλο το διάστημα 0 – 100%. Επιπλέον, το 100% της ροπής μπορεί συνήθως να χρησιμοποιηθεί σε όλο το πεδίο λειτουργίας. Για λόγους ασφαλείας, η έλικα κινείται από δύο (ή και περισσότερους) ηλεκτροκινητήρες ίσης 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).

## **7.2 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 %.

Το Σχ. 7.2 απεικονίζει τις καμπύλες απαιτούμενης ισχύος σε διάφορες καταστάσεις, καθώς και τα όρια του πεδίου λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες συνδεδεμένους στην ίδια έλικα.

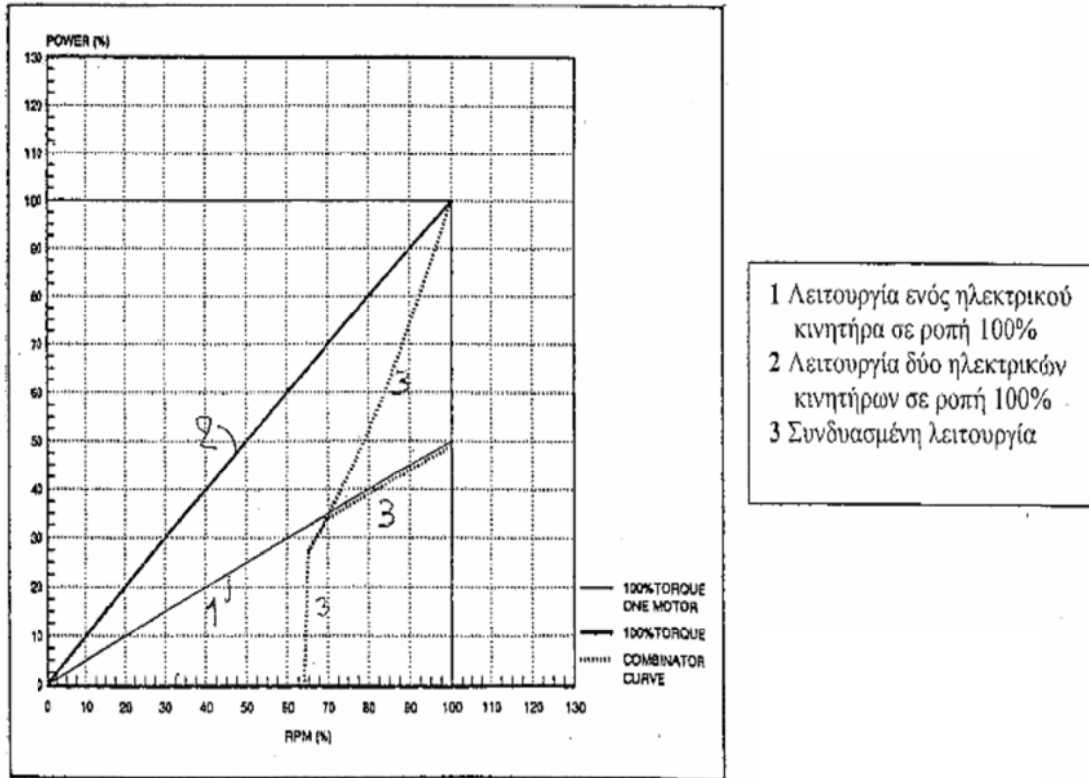


Εικόνα 7.2 Πεδίο λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες πρόωσης και έλικα σταθερού βήματος.

### 7.3 Έλικα ρυθμιζόμενου ή μεταβλητού 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 ρυθμιζόμενου βήματος δεν απαιτείται περιθώριο ροπής, διότι η μέγιστη ισχύς μπορεί σχεδόν πάντοτε να απορροφηθεί με ρύθμιση του βήματος.

Το Σχ. 7.3 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.



Εικόνα 7.3 Πεδίο λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες πρόωσης και έλικα ρυθμιζόμενου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>

### ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

#### 8.1 Κίνηση της έλικας με άξονα (shaft propulsion)

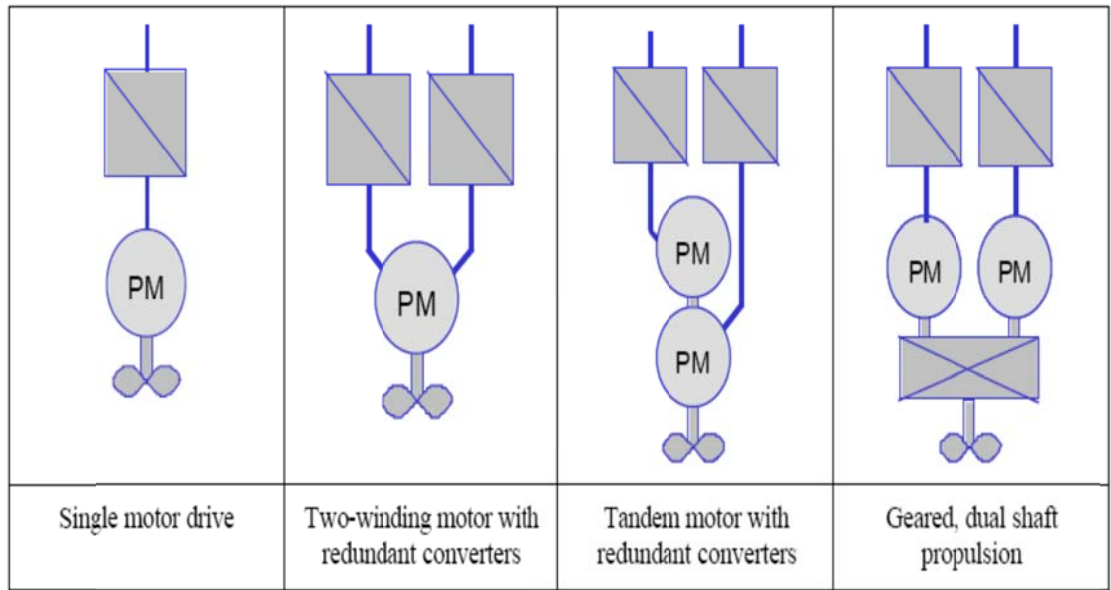
Σε αυτό το είδος πρόωσης οι έλικες ελέγχονται συνήθως από κινητήρες πρόωσης μεταβλητής ταχύτητας (Σχ. 8.1 – 8.2). Οι ηλεκτρικές μηχανές συνδέονται είτε άμεσα στον άξονα της έλικας, τρόπος απλός και στιβαρός, είτε μέσω μειωτήρων. Η χρήση μειωτήρων, οδηγεί στη χρήση μηχανών σχετικά υψηλών ονομαστικών στροφών, άρα και σε πιο συμπαγείς μηχανές. Το μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι ότι περιλαμβάνουν αρκετά μηχανικά υποσυστήματα, οπότε και περισσότερες μηχανικές απώλειες (βλ. Σχ. 8.3).



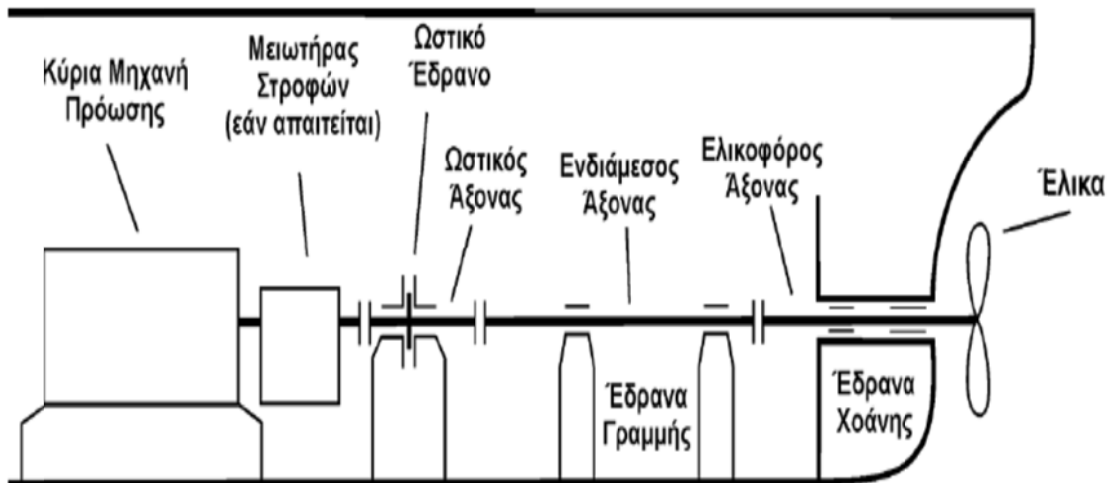
**Εικόνα 8.1 Σύστημα ηλεκτροπρόωσης της Converteam.**

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 ελκτικές 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.



Εικόνα 8.2 Διάφορα είδη αξονικής πρόωσης.



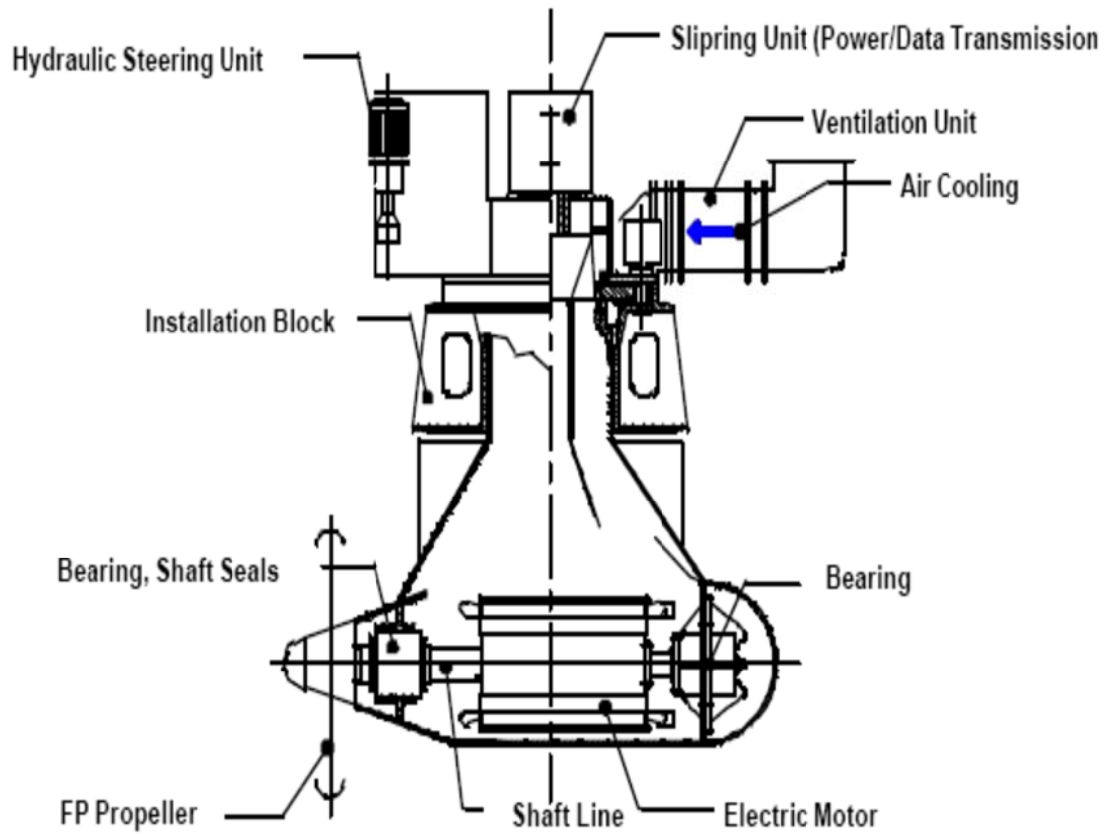
Εικόνα 8.3 Γενική περιγραφή αξονικού συστήματος μεταξύ κύριας μηχανής πρόωσης και έλικας.

## **8.2 Αζιμουθιακοί προωστήρες (azimuth thrusters)**

Αυτό το είδος προωστήριων μέσω της περιστροφής τους παράγουν ώση σε οποιαδήποτε διεύθυνση . Η ώση μπορεί να ελέγχεται είτε από προωστήρες με έλικες ελεγχόμενου βήματος CPP με σταθερή ταχύτητα περιστροφής είτε από προωστήρες με έλικες σταθερού βήματος FPP με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής είτε ακόμα και με προωστήρες μεταβλητού βήματος και στροφών. Οι αζιμουθιακοί προωστήρες αρχικά χρησιμοποιούνταν για να κρατούν σταθερή τη θέση ενός πλοίου και για τους ελιγμούς του. Τα τελευταία χρόνια ο συνδυασμός τους με την ηλεκτρική πρόωση οδήγησε και στην εφαρμογή τους ως κύρια μέσα πρόωσης σε εφαρμογές της τάξης των 6 – 7 MW.

## **8.3 Αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης pod (podded propulsion)**

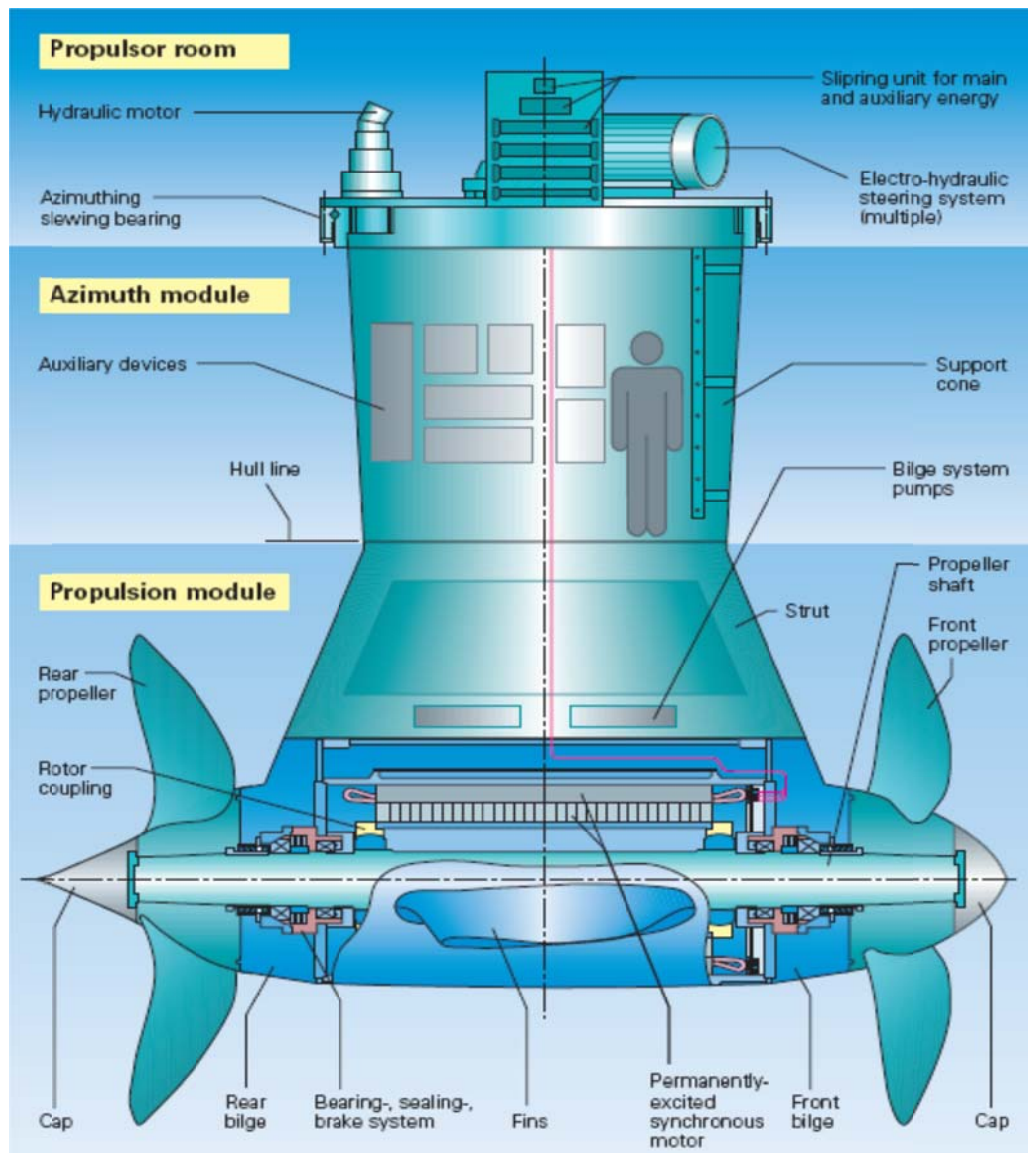
Την τελευταία δεκαετία και παράλληλα με την εισαγωγή της ηλεκτρικής πρόωσης εμφανίστηκε μία εναλλακτική λύση για το προωστήριο σύστημα που έχει πολλαπλά πλεονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα ηλεκτρικού κινητήρα και έλικας είναι μία ενιαία μονάδα, εμβαπτισμένη στο νερό (Εικ. 8.5) στο πρυμναίο μέρος του πλοίου, όπως στις εξωλέμβιες (Σχ. 8.4 και 8.6). Το σύστημα μπορεί να φέρει μία ή δύο έλικες και έχει τη δυνατότητα να στρέφεται σχεδόν κατά 360ο 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.



Εικόνα 8,4 Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα με μία έλικα Azipod της ABB και τα επιμέρους.



Εικόνα 8.5 Azipod thruster, ABB Marine

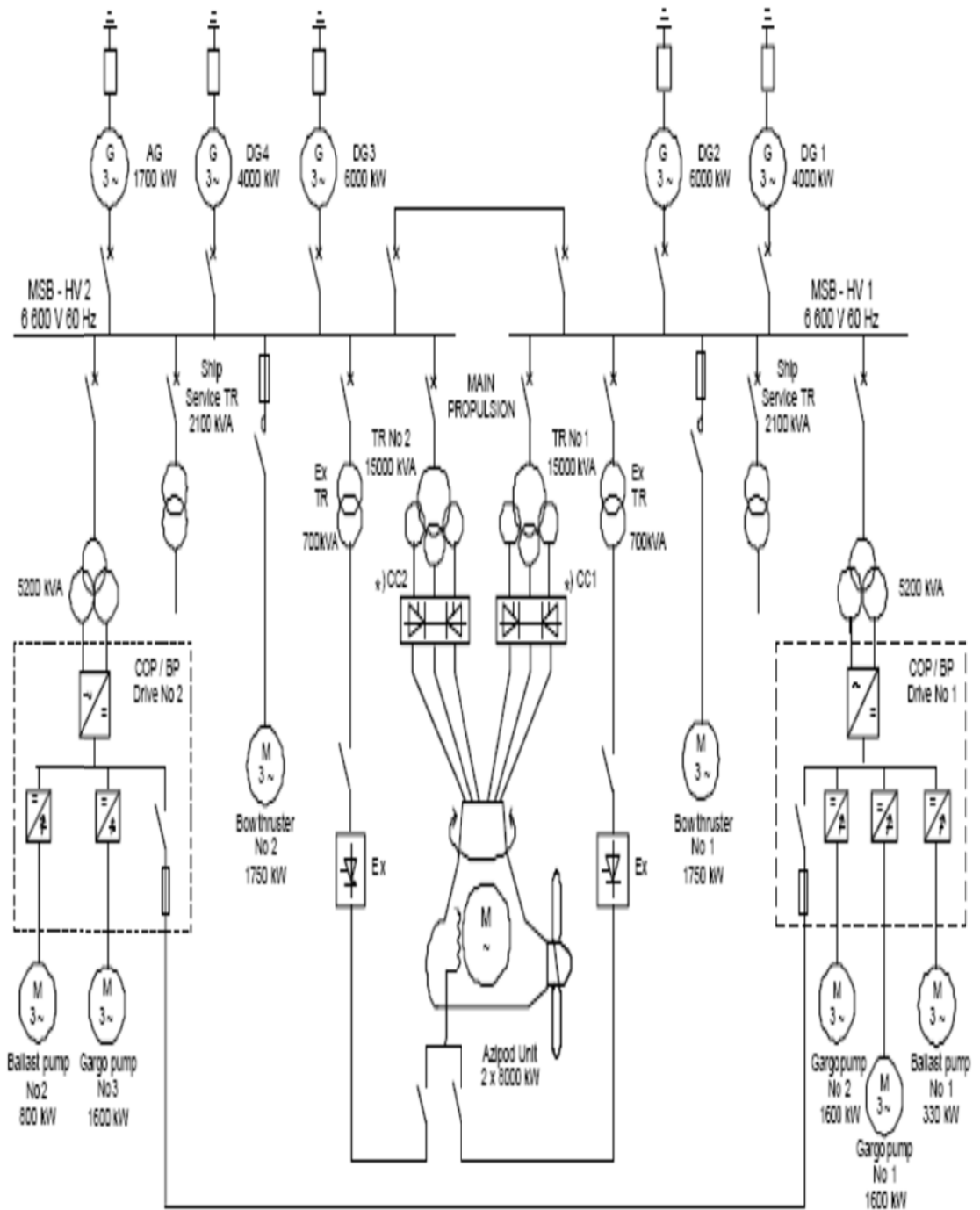


**Εικόνα 8.6 Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα δύο ελίκων SSP (Siemens – Schottel Propulsor).**

Το ενοποιημένο σύστημα κινητήρα – άξονα – έλικα έχει εξαιρετικά μικρούς χρόνους απόκρισης σε εντολές ελιγμών κάτι που ελαχιστοποιεί και τον χρόνο αποφυγής σύγκρουσης (crash – stop time). Ο προωστήριος κινητήρας έχει περιορισμένες ανάγκες ψύξης καθώς ψύχεται από το θαλασσινό νερό στο οποίο είναι εμβαπτισμένος. Το αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης pod χρησιμοποιείται σήμερα σε εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης της τάξης των 1 – 25 MW.

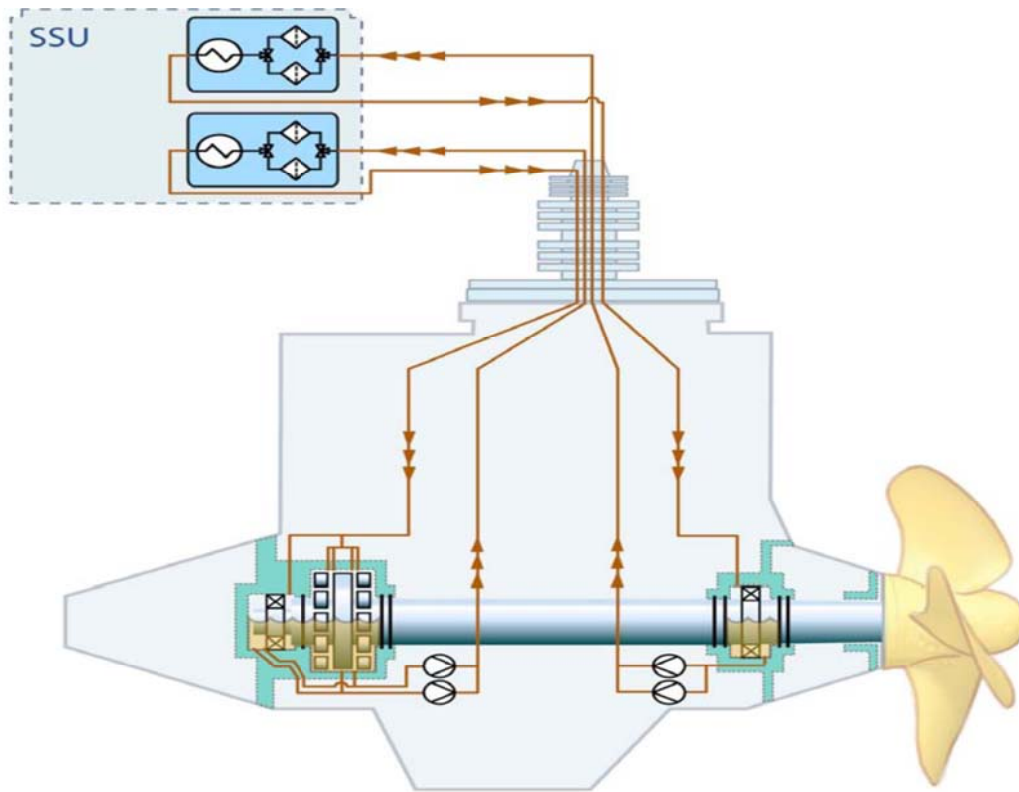
Στο Σχ. 8.6 παρατίθεται σχηματικό της δομής του ηλεκτρικού δικτύου πρόωσης ενός συστήματος με αζιμουθιακό προωστήρι pod.



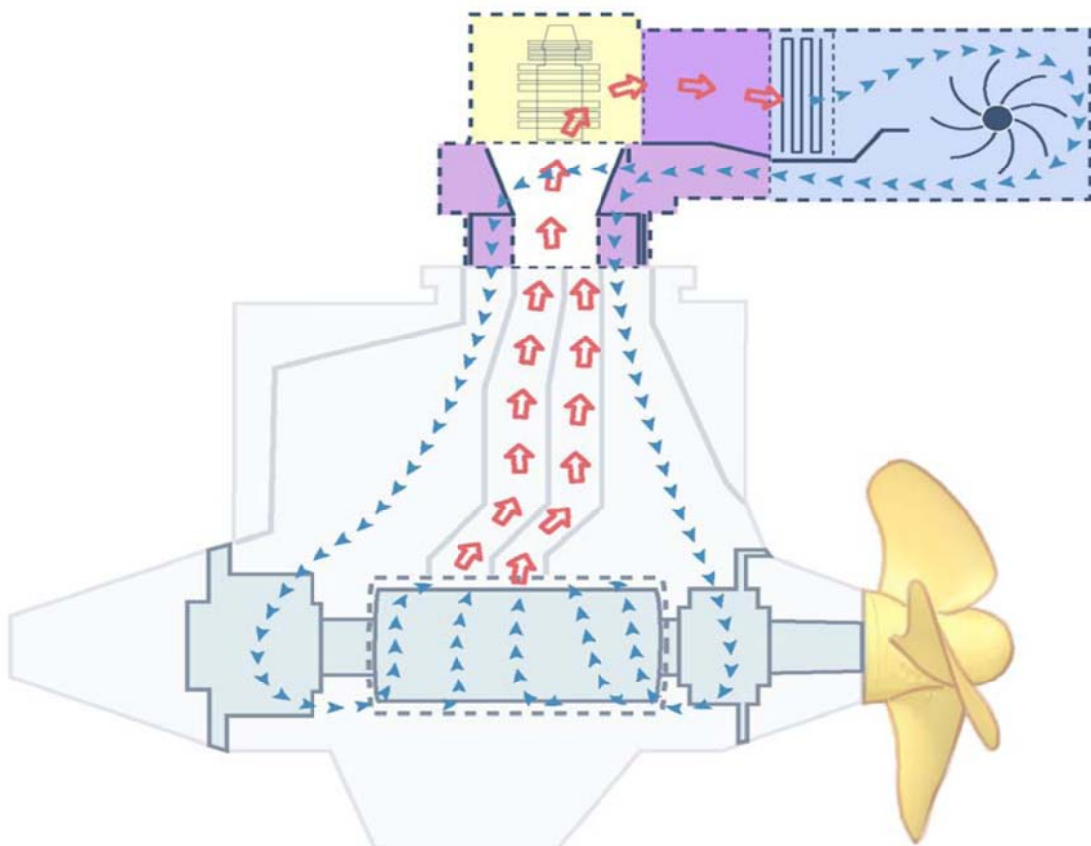


\*) CC1 & CC2 = Cycloconverter Drives

Εικόνα 8.6 Δομή ηλεκτρικού δικτύου πρόωσης και αντλιών μικρού δεξαμενόπλοιου με αζιμουθιακό.



Εικόνα 8.7 Δίκτυο λίπανσης του άξονα.



Εικόνα 8.8 Η διάταξη αέρα ψύξης του κινητήρα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup>

### ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΡΟΩΣΗΣ

#### 9.1 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.

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 ελκτική ικανότητα των σκαφών ιδίως εντός των λιμένων) με αξιοποίηση κυρίως επαγωγικών κινητήρων μεγάλης ισχύος (0.5 – 2.5 MW).



Εικόνα 9.1 τύποι πλοίων όπου εφαρμόζετε η ηλεκτροπρωωση.

## **9.2 Εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης σε μικρά σκάφη.**

Εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης έχουμε όπως είναι φυσικό και σε μικρότερα σκάφη, όπως σε μικρού και μεσαίου μεγέθους σκάφη αναψυχής, σε ιστιοπλοϊκά, σε αλιευτικές βάρκες κ.ά.. Χρησιμοποιούνται σαν βοηθητική αλλά και σαν κύρια πρόωση. Τα συστήματα πρόωσης είναι όμοια με αυτά των ηλεκτροκίνητων πλοίων, βέβαια μειώνεται κατά πολύ η ονομαστική ισχύς λειτουργίας και ο βαθμός πολυπλοκότητας τους.

Τα μικρά σκάφη μέχρι 6 – 7 μέτρα χρησιμοποιούν αμιγώς ηλεκτρική πρόωση, όπου μπαταρίες ή και κυψέλες καυσίμου (ανάλυση σχετικών συστημάτων ακολουθεί σε επόμενο κεφάλαιο) τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος Σ.Ρ/Σ.Ρ ή Σ.Ρ./Ε.Ρ., αναλόγως τον ηλεκτρικό κινητήρα της εφαρμογής, ελέγχουν τις στροφές της έλικας. Η ντιζελοηλεκτρική πρόωση χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερα σκάφη και έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την αντίστοιχή της στα πλοία.

Η χρήση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος Σ.Ρ. είναι ευρέως διαδεδομένη στις εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης χαμηλής ισχύος όπως και των σύγχρονων κινητήρων, κυρίως μονίμου μαγνήτη και για τα δύο είδη κινητήρων. Δε λείπουν όμως και οι ασύγχρονοι κινητήρες. Η μηχανή πρόωσης συνδέεται απευθείας ή μέσω μειωτήρων (τροχαλίες – ιμάντες) με τον άξονα της έλικας. Η αζιμουθιακή πρόωση (azimuth thrusters) σε αυτά τα συστήματα βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην βοηθητική πρόωση (bow thrusters) σκαφών αναψυχής. Διαδεδομένοι είναι και οι εξωλέμβιοι ηλεκτρικοί κινητήρες, στους οποίους ο ηλεκτρικός κινητήρας μπορεί να είναι έξω από το νερό, αντίστοιχα με τους συμβατικούς εξωλέμβιους κινητήρες, αλλά και μέσα στο νερό. Ενδεικτικά, στην Εικ. 9.1 φαίνεται ένα σύστημα ηλεκτροπρόωσης της ολλανδικής εταιρείας Vetus, το οποίο βρίσκει εφαρμογές σε εγκαταστάσεις αμιγώς ηλεκτρικής αλλά και υβριδικής πρόωσης, όπου ο κινητήρας οδηγούμενος από τον κινητήρα Μεταπτυχιακή Εργασία Ν. Γ. Μπαϊραχτάρης Diesel δρα και ως δυναμό, φορτίζοντας τους συσσωρευτές. Ο κινητήρας που χρησιμοποιείται στην εφαρμογή είναι ένας σύγχρονος κινητήρας ονομαστικής τάσης 24 V και ισχύος 2.2 kW με ονομαστικό αριθμό στροφών 1200 rpm. Δοκιμές έγιναν με το παραπάνω σύστημα σε ένα σκάφος 6 μέτρων με

εκτόπισμα 1.2 τόνους (4 άτομα και 4 συσσωρευτές μέσα στο σκάφος). Στα 24 V το ρεύμα που χρειάστηκε για να κινηθεί με 4.8 κόμβους ήταν 50 A. Με ονομαστική χωρητικότητα τα 352 A (24 V –352 A (5 h)) και θεωρώντας ένα βάθος εκφόρτισης 80 % θα μπορούσε να ταξιδεύουμε την ταχύτητα των 4.8 κόμβων για 6 ώρες..



**Εικόνα 9.2 Σύστημα ηλεκτροπρόωσης της Vetus.**



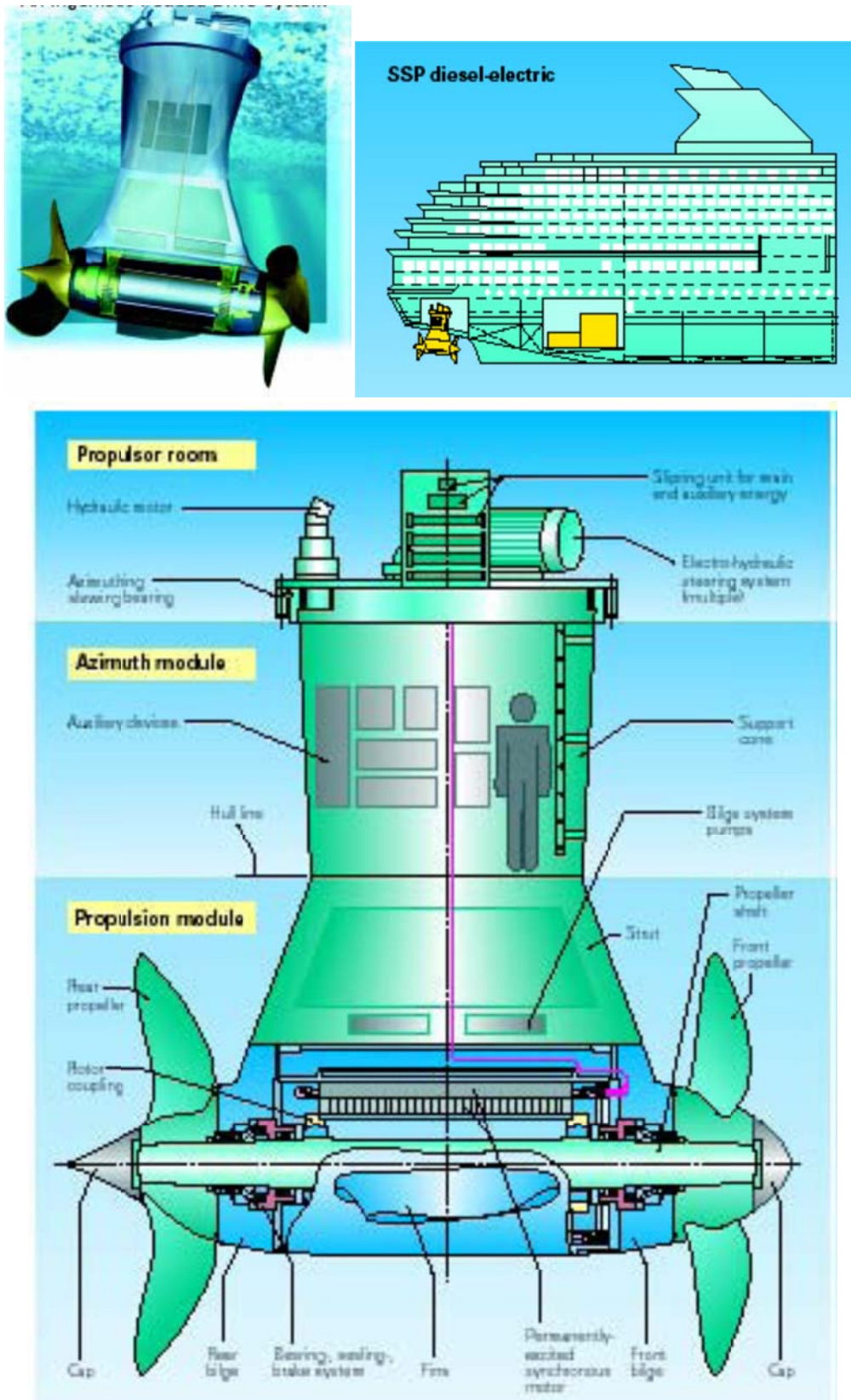
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10<sup>ο</sup>

### ΠΛΕΟΝΟΚΤΗΜΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΡΩΩΣΗ

#### 10.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΩΣΗΣ

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, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως,
  - β. ιδιαίτερα οι εκπομπές  $\text{NO}_x$  είναι αισθητά χαμηλότερες όταν, π.χ., ένας μεσόστροφος κινητήρας Diesel λειτουργεί με σταθερές στροφές, όπως συμβαίνει στα νέα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης.
- Περιορισμός του κινδύνου ρύπανσης του περιβάλλοντος από ατυχήματα όπως αυτά των δεξαμενοπλοίων, χάρη στην ταχύτερη απόκριση του συστήματος κατά τους χειρισμούς και τη δυναμική τοποθέτηση του σκάφους.



Εικόνα 10.1 Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα με δύο έλικες.

**Μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης είναι τα εξής:**

- 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.

- Υψηλότερες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, σε σύγκριση με το μηχανικό σύστημα. Π.χ., σε συμβατικό σύστημα κινητήρα Diesel - έλικα ρυθμιζόμενου 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 ντιζελο-ηλεκτρικής 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.

- Ένα πρόβλημα που προκύπτει από την εκτεταμένη χρησιμοποίηση των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είναι ότι εμφανίζονται προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας, [44], καθώς πέραν των χρήσιμων συχνοτήτων αναπτύσσεται και μεγάλο πλήθος αρμονικών συνιστωσών ρεύματος και τάσεως. 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 για 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.

Σε πολλές εφαρμογές, η συνισταμένη πλεονεκτημάτων - μειονεκτημάτων είναι θετική, οπότε η ηλεκτρική πρόωση είναι η ενδεδειγμένη λύση, οδηγώντας σε χαμηλότερο κόστος λειτουργίας (μειωμένο πλήρωμα, οικονομικότερη συντήρηση, γρηγορότερα ταξίδια, μη αναγκαιότητα ρυμούλκησης κοκ).

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΙΛΟΓΟΣ**

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.

Σε πολλές εφαρμογές, η συνισταμένη πλεονεκτημάτων μειονεκτημάτων είναι θετική, οπότε η ηλεκτρική πρόωση είναι η ενδεδειγμένη λύση, οδηγώντας σε χαμηλότερο κόστος λειτουργίας (μειωμένο πλήρωμα, οικονομικότερη συντήρηση, γρηγορότερα ταξίδια, μη αναγκαιότητα ρυμούλκησης κ.ο.κ.).

Η ηλεκτροπρόωση αποτελεί μία αρκετά δελεαστική επιλογή για τα πλοία και τα μικρότερα σκάφη που συνεχώς κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια μεταξύ των άλλων λόγω και της γενικά εντατικής εξέλιξης όλων των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων.

Η έρευνα κατά την τρέχουσα περίοδο επικεντρώνεται στη μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης αλλά και στην αύξηση των επιδόσεων του συνολικού συνδυασμού των διατάξεων που αξιοποιούνται από συστήματα 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. Ι. Κ. Χατζηλάου, Ι. Μ. Προυσαλίδης, Γ. Αντωνόπουλος, Ι. Κ. Γύπαρης, Π. Βαλλιανάτος, «Εξελίξεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο», Διήμερο ΤΕΕ: «Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς στην Ελλάδα – Υφιστάμενη Κατάσταση και Προοπτικές», Αθήνα, 12 – 13 Ιανουαρίου 2006.
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. ABB company. Manual for electric propulsion system.
7. Cooper N. (1994), "Electric Drives become Cruise Ship Standard," The Motor Ship, October.
8. Αθανάσιος Ν. Σαφάκας, «Ηλεκτρονικά Ισχύος, Θυρίστορ, Μετατροπείς, Εφαρμογές», Τμήμα εκτυπώσεων τυπογραφείου Πανεπιστημίου Πατρών, 2006.
9. Εμμανουήλ Κ. Τατάκης, «Σημειώσεις μαθήματος, Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές», Πανεπιστήμιο Πατρών, 2003.
10. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία του Νικολάου Μπαϊραχτάρη του Γεωργίου «Ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα πρόωσης κυψελών καυσίμου για ναυτικές εφαρμογές – Μελέτη και σχεδιασμός των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος του συστήματος»

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	-3-
Abstract.....	-4-
Πρόλογος.....	-5-
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΡΩΣΗΣ-ΙΣΤΟΡΙΚΟΙ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.</b>	
1.1 Γενικά Χαρακτηριστικά.....	-6-
1.2 Περιγραφή του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης.....	7-8
1.3 Ναυτικά συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης.....	8-13
1.4 Ιστορική αναδρομή ηλεκτροπρόωσης.....	13-16
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΟΡΟΛΟΓΙΑ.</b>	
2.1 Ορολογία ηλεκτροπρόωσης.....	-17-
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΔΙΚΤΥΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.</b>	
3.1 Γενικά χαρακτηριστικά .....	18-21
3.2 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά.....	20-24
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΟΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΡΩΣΗΣ.</b>	
4.1 Ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης.....	24-25
4.2 Σύγχρονος κινητήρας μονίμου μαγνήτη.....	25-27
4.3 Κινητήρες αξονικής ροής.....	-27-
4.4 Πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής (transverse flux motors).....	-28-
4.5 Πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής (axial flux motors).28-29	
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.</b>	
5.1 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος για οδήγηση ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης.....	29-30
5.2 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς συχνότητας.....	30-36
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΠΡΩΣΗΣ Ε.Ρ.</b>	
6.1 Τεχνικές Ελέγχου Κινητήρων Πρόωσης ΕΡ.....	37-40
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>: ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΕΛΗΚΑ-ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΠΡΩΣΗΣ.</b>	
7.1 Συνεργασία έλικας και κινητήρα πρόωσης.....	40-41

7.2 Έλικα σταθερού βήματος.....	41-42
7.3 Έλικα ρυθμιζόμενου ή μεταβλητού βήματος.....	42-43
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>: ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ.</b>	
8.1 Κίνηση της έλικας με άξονα (shaft propulsion).....	43-45
8.2 Αζιμουθιακοί προωστήρες (azimuth thrusters).....	-46-
8.3 Αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης pod (podded propulsion).....	46.50
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup>: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΡΟΩΣΗΣ</b>	
9.1 Εφαρμογές της ηλεκτροπρόωσης.....	51-54
9.2 Εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης σε μικρά σκάφη.....	55-56
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10<sup>ο</sup>: ΠΛΕΟΝΟΚΤΗΜΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΠΡΟΩΣΗΣ.</b>	
10.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΟΩΣΗΣ.....	57-59
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	-60-
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	-61-