

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΩΣΕΩΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΤΣΙΟΛΑΣ ΠΑΥΛΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ : ΠΕΡΙΒΟΛΗ ΠΑΣΧΑΛΙΝΑ**

ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ

2012

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΩΣΕΩΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΤΣΙΟΛΑΣ ΠΑΥΛΟΣ

ΑΜ : 4002

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ : ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2012

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Η καθηγήτρια

Περίληψη

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 κατα βάση ατμό που παρέχεται από τους ατμολέβητες, οι οποίοι και λειτουργούν συνήθως με καύση πετρελαίου.

Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος προώσεως για ένα συγκεκριμένο σκάφος είναι μια πολύπλοκη διαδικασία. Στην παρούσα εργασία γίνεται μία αναφορά στις κλασικές μεθόδους πρόωσης στο πρώτο κεφάλαιο αλλά και οι νεότερες τεχνολογίες όπως η ηλεκτρική πρόωσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζεται με ποιό τρόπο μπορούν να υπάρξουν εναλλακτικές διαμορφώσεις των ηλεκτρικών δικτύων πλοίων και γίνεται μια αναφορά στα στοιχεία των ηλεκτρικών δικτύων στο πλοίο, όπως οι γεννήτριες, οι μετασχηματιστές, τα δίκτυα διανομής κλπ.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση των σύγχρονων τάσεων σχεδίασης και κατασκευής των ηλεκτρικών κινητήρων και των κυκλωμάτων οδήγησής τους, αφού σε ένας AC drive, μετατροπέας συχνότητας χρησιμοποιείται για να ελέγξει την ταχύτητα και την ροπή στον κινητήρα. Η ταχύτητα σε ένα κινητήρα μπορεί να ελεγχθεί με τη μεταβολή της τάσης και της συχνότητας τροφοδότησης. Ο μετατροπέας συχνότητας μετατρέπει τη σταθερή συχνότητα του δικτύου σε μεταβαλλόμενη συχνότητα εξόδου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται ένα νεότερο σύστημα παράλληλα με την ηλεκτρική πρόωση το Azipod, μία εναλλακτική λύση για το προωστήριο σύστημα που έχει πολλαπλά πλεονεκτήματα. Το σύστημα μπορεί να φέρει μία ή δύο έλικες και έχει τη δυνατότητα να στρέφεται σχεδόν κατά 360° κατά την αζιμουθιακή διεύθυνση, δηλ. στο οριζόντιο επίπεδο, αυξάνοντας σε μεγάλο βαθμό τις δυνατότητες ελιγμών του πλοίου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης.

Abstract

Marine propulsion is the mechanism or system used to generate thrust to move a ship or boat across water. While paddles and sails are still used on some smaller boats, most modern ships are propelled by mechanical systems consisting a motor or engine turning a propeller, or less frequently, in jet drives, an impeller.

Marine engineering is the discipline concerned with the design of marine propulsion systems. In the first chapter the common traditional propulsion systems are described.

The second chapter describes the main components as they are applied in a marine electric installation like electric power generation, electric power distribution, variable speed drives propulsion.

The third chapter describes the new systems that used to generate thrust to move a ship. Functionally the propulsion drive can be divided into following parts : supply transformer, propulsion motor and frequency converter. In an AC drive, a frequency converter is used to control the speed and torque of electric motor. The speed of the AC electric motor can be controlled by varying the voltage and frequency of its supply.

The fourth chapter describes the Azipod CO propulsion and steering system. Azipod is a podded electric main propulsion and steering device driving a fixed-pitch propeller at a variable speed setting. Azipod CO propulsion is designed for the preferential use of the (directly driven) pulling propeller when driving in the ahead direction. Azipod CO is azimuthing infinitely by 360° and is available in three different frame sizes for propeller power ratings of up to 4,5 MW.

The fifth chapter describes advantages and disadvantages of the electric propulsion system.

Πρόλογος

Την τελευταία δεκαετία οι λειτουργικές απαιτήσεις των διαφόρων τύπων πλοίων (εμπορικών και πολεμικών) σε συνδυασμό με τις σύγχρονες εξελίξεις των ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος φαίνεται να διαμορφώνουν μια νέα τάση στην ναυτική τεχνολογία με σημαντικές προοπτικές: το λεγόμενο Πλήρως Εξηλεκτρισμένο πλοίο. Πρόκειται για ένα πλοίο, το οποίο κινείται αποκλειστικά από ηλεκτρικούς κινητήρες, στο οποίο οι διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις ισχύος των διαφόρων λειτουργιών του εξυπηρετούνται από ηλεκτρικά συστήματα και στο οποίο τα ίδια ζεύγη κινητηρίων μηχανών - γεννητριών, τροφοδοτούν τόσο τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως, όσο και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία.

Η ηλεκτρική πρόωση έχει αρχίσει να εφαρμόζεται πριν από περίπου 60 χρόνια. Για μεγάλο διάστημα, τα συστήματα ήταν του τύπου Σ.Ρ./Σ.Ρ., συχνά συστήματα Ward-Leonard, δηλ. παραγωγή συνεχούς ρεύματος και κίνηση με συνεχές ρεύμα. Το εναλλασσόμενο ρεύμα άρχισε να χρησιμοποιείται στα πλοία στις αρχές της δεκαετίας του 1950, αλλά τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης εξακολουθούσαν να στηρίζονται σε κινητήρες Σ.Ρ.. Κατά την τελευταία εικοσαετία, η ανάπτυξη διατάξεων και τεχνικών ελέγχου κινητήρων Ε.Ρ (ηλεκτρονικά ισχύος), 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.

Ως ηλεκτρική πρόωση ή 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 diesel, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους. Φυσικά οι κινητήρες diesel, αεριοστρόβιλοι και ατμοστρόβιλοι 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 (κινητήριες μηχανές), οπότε και αναφέρονται στη βιβλιογραφία σαν "prime movers".

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.

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, κ.λπ.

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

- α. Σκάφη με υψηλές απαιτήσεις ελικτικών ικανοτήτων.
- β. Σκάφη με μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων.
- γ. Σκάφη με μεγάλα φορτία ενδιαίτησης και έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης.
- δ. Σκάφη εξοπλισμένα με πολλές ταχύστροφες μη αναστρέψιμες μηχανές.
- ε. Υποβρύχια και βαθυσκάφη.

Κεφάλαιο 1

Συστήματα προώσεως

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 αλλοτε ιστιοφόρων, (με ιστιοπλοΐα), και κωπήλατων, (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 παλιδρομικές (μονής, διπλής, τριπλής και τετραπλής εκτόνωσης), σε ατμοστροβίλους κοινώς τουρμπίνες, σε ηλεκτροκινητήρες, σε μηχανές ντήζελ και σε αεροστροβίλους (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 αερόστρομνα, κοινώς "χόβερκραφτς".

1.2 Κριτήρια και επιλογή του συστήματος προώσεως

Η εύρεση του καταλληλότερου συστήματος προώσεως για κάθε πλοίο απαιτεί την λεπτομερή εξέταση των διάφορων εναλλακτικών λύσεων σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη

πλοίου. Σε αντίθεση με το παρελθόν που οι επιλογές περιορίζονταν μεταξύ των δίχρονων αργόστροφων πετρελαιομηχανών ή των τετράχρονων μεσόστροφων, σήμερα υπάρχουν πολλές εναλλακτικές λύσεις. Πλέον εκτός από τις Μ.Ε.Κ. (δίχρονες και τετράχρονες) είναι δυνατή και η ηλεκτρική πρόωση. Η σωστή επιλογή του συστήματος προώσεως έχει μεγάλη σημασία αν ληφθεί υπ' όψη, ότι το κόστος κτήσεως αντιστοιχεί στο $\frac{1}{4}$ του συνολικού κόστους του πλοίου. Βέβαια πολύ μεγαλύτερο είναι το κόστος λειτουργίας και συνεπώς η επιλογή συστήματος προώσεως με μικρό κόστος λειτουργίας είναι πολύ σημαντικότερη από την επιλογή συστήματος με μικρό κόστος κτήσεως. Ωστόσο τα κόστη κτήσεως και λειτουργίας δεν αποτελούν αποκλειστικά κριτήρια επιλογής.

Η ορθή επιλογή του καταλληλότερου συστήματος προώσεως πρέπει να είναι αποτέλεσμα αντικειμενικής εξέτασης διαφόρων τεχνοοικονομικών κριτηρίων. Το ζητούμενο είναι, το σύστημα προώσεως να ικανοποιεί όσο το δυνατό περισσότερο τα παρακάτω κριτήρια:

- Να καταλαμβάνει το μικρότερο δυνατό χώρο στο πλοίο και να έχει το μικρότερο δυνατό βάρος.
- Να οδηγεί στο μικρότερο δυνατό κόστος λειτουργίας και συντηρήσεως.
- Να είναι δυνατή η καύση χαμηλής ποιότητας πετρελαίου, χωρίς σημαντικές επιπτώσεις στην αξιοπιστία της εγκατάστασης κ στο κόστος συντήρησης.
- Να είναι η απλούστερη δυνατή, για αύξηση της αξιοπιστίας και μείωση του κόστους συντήρησης.
- Να απαιτεί το μικρότερο δυνατό αριθμό εκπαιδευμένου προσωπικού.
- Να κινεί έλικα με την βέλτιστη δυνατή σχεδίαση για τον τύπο του πλοίου και στη βέλτιστη περιοχή στροφών και ροπής.
- Να έχει σχετικά χαμηλό κόστος κτήσεως.

Τα παραπάνω κριτήρια δεν είναι πάντα εφικτό να ικανοποιούνται, γιατί υπάρχουν περιορισμοί που τίθενται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του προς μελέτη πλοίου.

Σε ότι αφορά το πρώτο κριτήριο, (με δεδομένο το μέγεθος του πλοίου) όσο μικρότερα είναι ο όγκος και το βάρος της προωστήριας εγκαταστάσεως τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του φορτίου που μπορεί να μεταφερθεί. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες κατηγορίες πλοίων ο σκοπός λειτουργίας τους (π.χ. μεταφορά οχημάτων, επιβατών, αναψυχή) θέτει σημαντικούς περιορισμούς για τον όγκο και το βάρος του συστήματος πρόωσης.

Το δεύτερο κριτήριο αφορά το συνολικό κύκλο ζωής του πλοίου, δηλαδή την διάρκεια και το είδος των δρομολογίων που πρόκειται να εκτελέσει. Επιδιώκεται βασικά ο κινητήρας να καίει την μικρότερη δυνατή ποσότητα του φθηνότερου διαθέσιμου καυσίμου, έχοντας την ελάχιστη φθορά και με απόλυτη αξιοπιστία. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να διατηρεί την μέγιστη δυνατή διαθεσιμότητα και ταυτόχρονα να περιστρέφει την έλικα με την βέλτιστη ταχύτητα και ροπή για τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε πλοίου. Δεδομένου ότι το καύσιμο και τα ανταλλακτικά αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των εξόδων λειτουργίας και συντήρησης της εγκατάστασης, αυτά είναι βασικοί παράγοντες για την σωστή επιλογή. Σημειώνεται ωστόσο ότι το κόστος και η ποιότητα του καυσίμου επηρεάζουν την αξιοπιστία και το κόστος συντήρησης των μηχανών.

Στην διαδικασία επιλογής λαμβάνονται υπ' όψη, εκτός από ποσοτικά κριτήρια, κάποιιοι ποιοτικοί και υποκειμενικοί παράγοντες, όπως η αποδεδειγμένη αξιοπιστία, η εξοικείωση του προσωπικού, το δίκτυο προμήθειας και τα αποθέματα ανταλλακτικών, η σχέση πλοιοκτήτριας και προμηθεύτριας εταιρείας κ.α.

Αναφορικά με το τρίτο κριτήριο, η ανάγκη καύσης πετρελαίου διαφορετικών ποιοτήτων (ως πολύ χαμηλής ποιότητας) χωρίς πτώση της απόδοσης προέκυψε ουσιαστικά μετά την δεκαετία του '70 (αύξηση τιμής πετρελαίου) όπου το κόστος λειτουργίας του πλοίου ξεπέρασε το 50% του συνολικού κόστους. Παράλληλα αυξήθηκαν οι αναξιόπιστες πηγές ανεφοδιασμού με καύσιμα διαφορετικών ποιοτήτων.

Στο τέταρτο και στο πέμπτο κριτήριο υπεισέρχεται ο ανθρώπινος παράγοντας , ο οποίος είναι σημαντικός λόγω της ανάγκης μείωσης του εργατικού κόστους. Συνεπώς είναι προτιμότερο η εγκατάσταση να είναι η απλούστερη δυνατή καθώς έτσι απαιτεί μικρότερο αριθμό εκπαιδευμένου προσωπικού και εξαρτημάτων, ενώ η συντήρηση είναι γενικά ευκολότερη.

Σε ότι αφορά την απόδοση της έλικας αυτή μεγιστοποιείται όσο μεγαλύτερη είναι η έλικα (σε συνάρτηση με το μέγεθος και το βύθισμα του πλοίου) και με όσο χαμηλότερη ταχύτητα περιστρέφεται.

Το κριτήριο του χαμηλού κόστους κτήσεως έχει δευτερεύουσα σημασία καθώς οι μηχανές με χαμηλότερο κόστος χαρακτηρίζονται συνήθως από μεγαλύτερη πολυπλοκότητα, μικρότερη ικανότητα καύσεως χαμηλής ποιότητας καυσίμου και γενικότερα μεγαλύτερο κόστος συντηρήσεως. Ωστόσο το κόστος κτήσεως παραμένει ένας παράγοντας που επηρεάζει την επιλογή του βέλτιστου συστήματος προώσεως.

Οι προωστήριες μηχανές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις δίχρονες αργόστροφες, τετράχρονες μεσόστροφες και τετράχρονες αργόστροφες. Κάθε κατηγορία χαρακτηρίζεται από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι δίχρονες αργόστροφες μηχανές έχουν την ικανότητα καύσεως κακής ποιότητας καυσίμου χωρίς προβλήματα και είναι απλούστερες στην κατασκευή, απαιτούν όμως μεγαλύτερο χώρο και ύψος μηχανοστασίου και είναι πιο ακριβές. Οι τετράχρονες μεσόστροφες μηχανές απαιτούν μικρότερο ύψος, είναι ελαφρύτερες, έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και μπορούν να κατασκευαστούν-συναρμολογηθούν γρηγορότερα. Ωστόσο αυτές είναι πολυπλοκότερες (αναγκαστική η χρήση μειωτήρα) και ευπαθής στην καύση χαμηλής ποιότητας καυσίμου. Οι τετράχρονες αργόστροφες πετρελαιομηχανές, αν και έχουν περιορισμένη κατασκευή και χρήση στην αγορά, δεν απαιτούν την χρήση μειωτήρα, προσφέρουν αυξημένη αξιοπιστία, λιγότερο θόρυβο και ταλαντώσεις, μικρότερη κατανάλωση καυσίμου και λιπαντικών και έχουν μεγάλη ικανότητα απροβλημάτιστης καύσεως βαρέων πετρελαίων.

1.3 Τρόποι μετάδοσης κίνησης προς έλικα

Υπάρχουν δυο τρόποι μετάδοσης της κίνησης προς την έλικα, ο μηχανικός και ο ηλεκτρικός. Στην περίπτωση μηχανικής μετάδοσης αυτή διακρίνεται σε άμεση ή έμμεση.

Η άμεση μετάδοση εφαρμόζεται στις αργόστροφες μηχανές, χωρίς παρεμβολή μειωτήρα, μέσω ωστικού τριβέα με συνέπεια λιγότερες απώλειες και μεγαλύτερη απόδοση της έλικας λόγο του χαμηλού αριθμού στροφών. Η μηχανή τοποθετείται στο στενότερο σημείο της πρύμνης προς κατάληψη λιγότερου εμβαδού-όγκου, αλλά το πλεονέκτημα αυτό αντισταθμίζεται από την κάλυψη άνω χώρων λόγο μεγαλύτερου ύψους και μήκους. Η άμεση μετάδοση από μια αργόστροφη δίχρονη πετρελαιομηχανή προς μια μοναδική έλικα μειονεκτεί λόγω της απουσίας επιλογής στην περίπτωση βλάβης της μηχανής. Η έλικα είναι μεγάλου διαμετρήματος και σταθερού βήματος. Η αναπόδιση γίνεται με αναστροφή της μηχανής.

Η έμμεση μετάδοση εφαρμόζεται κυρίως σε μεσόστροφες μηχανές συνδεδεμένων μέσω μειωτήρα με την έλικα. Η έλικα μπορεί να είναι σταθερού ή μεταβλητού βήματος και άρα δεν υπάρχει ανάγκη αντιστροφής της φοράς περιστροφής. Η ύπαρξη μειωτήρα επιτρέπει την περιστροφή της έλικας στην βέλτιστη περιοχή στροφών (βέλτιστη απόδοση έλικας), όμως η αυξημένες απώλειες λόγο τριβών μειώνουν τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης. Η χρησιμοποίηση περισσότερων μεσόστροφων πετρελαιομηχανών δίνει στο πλοίο την δυνατότητα κίνησης, έστω και με μικρότερες επιδόσεις, σε περίπτωση βλάβης μιας μηχανής.

Στην περίπτωση της ηλεκτρικής μετάδοσης διακρίνονται τρεις κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο γεννητριών και κινητήρων: εναλλασσόμενου/εναλλασσόμενου, συνεχούς/συνεχούς και εναλλασσόμενου/συνεχούς ρεύματος. Αυτή βασίζεται οι πετρελαιοκινητήρες χρησιμοποιούνται ως ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, την ισχύ των οποίων παραλαμβάνουν ηλεκτροκινητήρες που κινούν τις έλικες πρόκειται για μεσόστροφες και ταχύστροφες τετράχρονες πετρελαιομηχανές. Ο συγκεκριμένος τρόπος μετάδοσης προσφέρει ακριβή έλεγχο της ταχύτητας, ικανότητα γρήγορης αναστροφής, μικρότερο θόρυβο μηχανών, υψηλή ροπή στρέψεως σε χαμηλές στροφές της έλικας, ευελιξία ως προς το μέγεθος και τον χώρο του μηχανοστασίου. Επίσης με την ηλεκτρική μετάδοση αντιμετωπίζονται οι αυξημένες ανάγκες σε ηλεκτρική ισχύ που έχουν ορισμένοι τύποι πλοίων. Ωστόσο τα συστήματα αυτά είναι βαρύτερα και ακριβότερα, ενώ έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης.

1.4 Συνεργασία έλικα – κινητήρα πρόωσης

Στα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης συγκαταλέγεται και η ουσιαστική μείωση του αξονικού συστήματος των πλοίων, όπως φαίνεται καθαρά και στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 : Συγκριτική παρουσίαση αξονικών συστημάτων πλοίων[1]

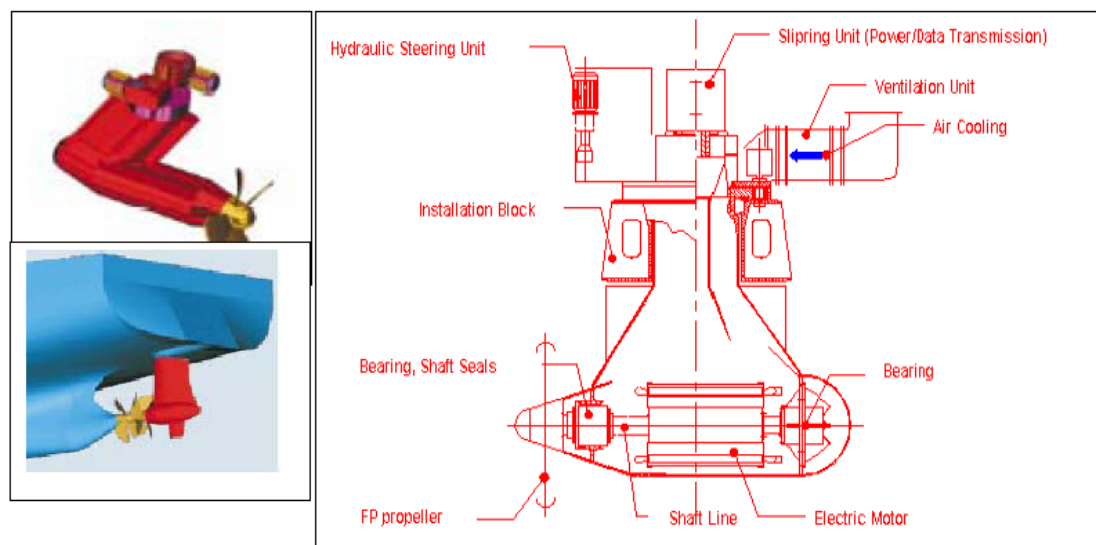
Τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης έχουν το πλεονέκτημα συνεχούς μεταβολής των στροφών σχεδόν σε όλο το διάστημα 0-100%. Επιπλέον, το 100% της ροπής μπορεί συνήθως να χρησιμοποιηθεί σε όλο το πεδίο λειτουργίας. Για λόγους ασφαλείας, η έλικα κινείται από δύο (ή και περισσότερους) ηλεκτροκινητήρες ίσης ισχύος.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

Έλिका Σταθερού Βήματος

Καθώς η υπερτάχυνση δεν είναι δυνατή, η έλিকা 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 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, (Σχήμα 1.2). 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.



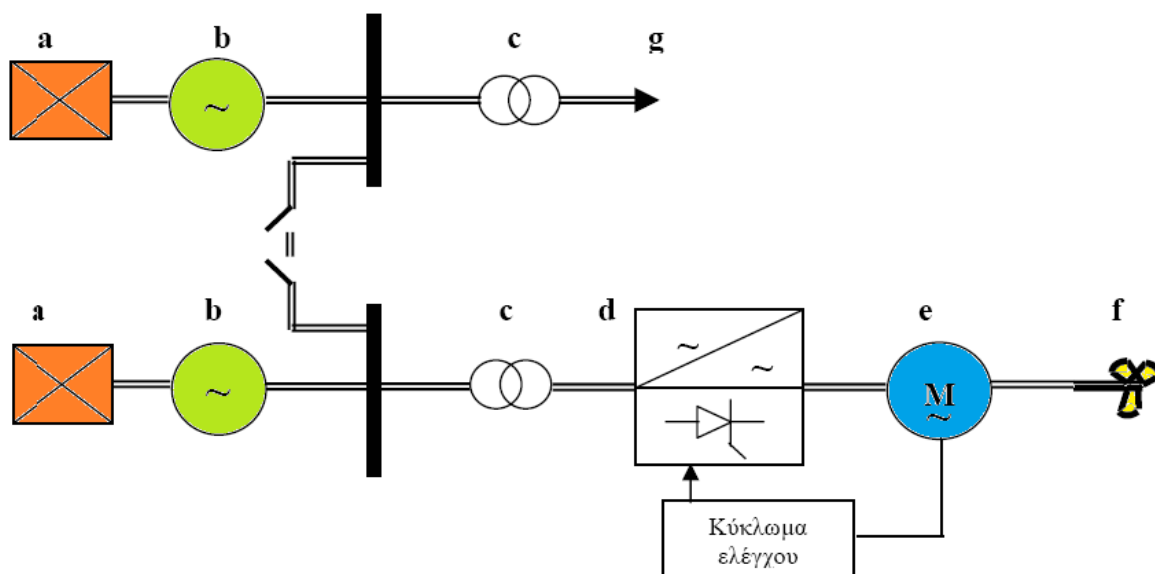
Σχήμα 1.2: Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα με μία έλিকা[1]

Κεφάλαιο 2

Εναλλακτικές διαμορφώσεις ηλεκτρικών δικτύων πλοίων

2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Το γενικευμένο ηλεκτρολογικό διάγραμμα ενός ηλεκτρικού δικτύου πλοίου με ηλεκτρική πρόωση απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1 Το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να είναι ενιαίο καλύπτοντας όλες τις ηλεκτρικές ενεργειακές ανάγκες ή μπορεί να αποτελείται από δύο επιμέρους υποσυστήματα, αυτό της ηλεκτρικής πρόωσης κι εκείνο των λοιπών ηλεκτρικών φορτίων.



- a. Κινητήρια μηχανή (ντιζελοκινητήρας ή αεριοστρόβιλος)
- b. Σύγχρονη γεννήτρια
- c. Μετασχηματιστής ισχύος
- d. Μετατροπέας συχνότητας
- e. Προωστήριος κινητήρας
- f. Έλικα

Σχήμα 2.1 : Γενικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου [1]

Σε πλοία με συμβατική πρόωση, ειδική υποπερίπτωση αποτελούν τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνουν και γεννήτριες άξονα-shaft generators. Οι γεννήτριες αυτές στρέφονται από την κύρια ντιζελομηχανή πρόωσης του πλοίου και μπορεί να συνδέονται με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο με σύνδεσμο ΣΡ (DC link) ή να τροφοδοτούν ανεξάρτητα μόνο μεγάλα φορτία όπως οι κινητήρες βοηθητικής πρόωσης (thrusters).

Τα συστήματα thrusters ηλεκτρικής οδήγησης με σταθερή προπέλα, διατίθενται σε ισχείς από 250 έως 10.750HP (8.0MW). Είναι σχεδιασμένα για διαφορετικές και ρυθμιζόμενες ισχείς εισόδου ηλεκτρικών κινητήρων, είτε ΣΡ με SRC control, είτε για κινητήρες EP με κίνηση μεταβλητής συχνότητας. Τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται σε σκάφη που απαιτείται μεγάλη ισχύς.

Ενίοτε, σε έκτακτες περιπτώσεις (π.χ. μεγάλης έκτασης ζημία 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.

2.2 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά

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

- Το είδος των κινητήριων μηχανών: Diesel, Αεριοστρόβιλοι (ειδικά για πιο αθόρυβη λειτουργία), Ατμοστρόβιλοι (ειδικά για πυρηνοκίνητα σκάφη)
- Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου: 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.λ.π.)
- Ο αριθμός και το είδος των γεννητριών.
- Η παράλληλη ή μη λειτουργία των γεννητριών.
- Το ποσοστό του αυτοματισμού στη λειτουργία, φόρτωση, παραλληλισμό και κράτηση των γεννητριών.
- 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 ο βαθμός αποδόσεως.
- Το είδος ελέγχου-χειρισμού των κινητήρων προώσεως.
- Το είδος των στατών μετατροπέων.

Η σχεδίαση της διάταξης του ηλεκτρικού δικτύου και συγκεκριμένα :

- Θα υπάρξει 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 :

a) 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.

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

c) 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 ηλεκτρικής πρόωσης.

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

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

- 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.λ.π.) 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.

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

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 οι (η) γεννήτριες(α) να μπορούν(εί) να τροφοδοτούν(εί) τα φορτία ανάγκης και ταυτόχρονα να κινήσουν(ει) το πλοίο με μια μικρή ταχύτητα (3-5 knots).

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 :

- αν υπάρχει αρκετός χώρος πρέπει οι πίνακες προώσεως και χρήσεως να διαχωρίζονται φυσικά.
- οι κινητήρες και οι αντίστοιχοι αντιστροφείς (inverters) πρέπει να τοποθετούνται σε διαφορετικούς υδατοστεγανούς τομείς.
- οι μετατροπείς (converters) πρέπει να τοποθετούνται κοντά στους κινητήρες για να μειώνεται το μήκος των καλωδίων.
- τοποθέτηση των κινητήρων (που φυσικά υπαγορεύεται από την διάταξη των αξόνων) όσο πιο πρύμα γίνεται.

Όπως αναφέρθηκε ήδη σημαντικό πλεονέκτημα της ηλεκτρικής πρόωσης 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.

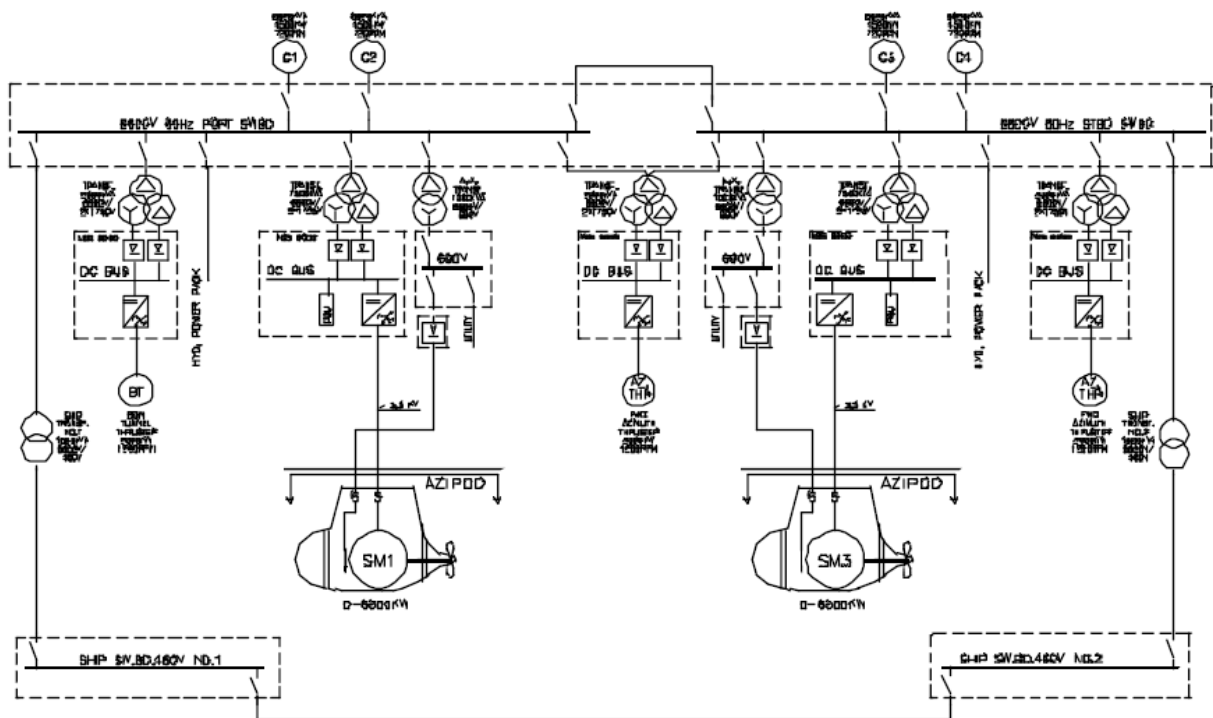
2.3 Επισκόπηση ηλεκτρολογικής εγκατάστασης

2.3.1 Γενικά

Η κύρια διαφορά μεταξύ των θαλάσσιων και χερσαίων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι το γεγονός ότι το θαλάσσιο συστήματα παραγωγής ενέργειας είναι ένα απομονωμένο σύστημα με μικρές αποστάσεις από την παραγόμενη ενέργειας για τους καταναλωτές, σε αντίθεση με ότι είναι φυσιολογικό σε χερσαία συστήματα, όπου μπορεί να υπάρξουν εκατοντάδες χιλιόμετρα μεταξύ της παραγωγής ενέργειας και το φορτίο, με μεγάλες

γραμμές μεταφοράς τάσης και αρκετούς μετασχηματισμούς μεταξύ τους. Η εγκατεστημένη ισχύς στα πλοία μπορεί να είναι μεγάλη και αυτό δίνει ιδιαίτερες προκλήσεις για τη μηχανική των συστημάτων αυτών. Υψηλού επιπέδου κυκλώματα και ισχυρές δυνάμεις πρέπει να αντιμετωπίζονται με τρόπο ασφαλή. Το συνολικά σύστημα ελέγχου σε ένα χερσαίο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι χωρισμένο σε διάφορα μέρη που και αυτά χωρίζονται σε υποσυστήματα, ενώ σε ένα πλοίο υπάρχουν δυνατότητες για πολύ καλύτερη ολοκλήρωση και συντονισμό.

Ο σχεδιασμός της ενέργειας, πρόωσης και ελέγχου για ένα πλοίο έχει υποστεί σημαντικές αλλαγές και προόδους το τελευταίο χρονικό διάστημα. Λόγω της ταχείας επέκτασης των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών, των μικροεπεξεργαστών και των δικτύων επικοινωνιών, η ενσωμάτωση των συστημάτων που παραδοσιακά ήταν ξεχωριστά και αυτόνομα συστήματα, είναι σήμερα όχι μόνο εφικτή, αλλά όλο και περισσότερο απαραίτητη σύμφωνα με τα βιομηχανικά πρότυπα. Οι διασυνδέσεις των διαφόρων συστημάτων σε ένα σκάφος έχουν γίνει όλο και πιο περίπλοκη διαδικασία, ώστε ο σχεδιασμός, η μηχανική και η κατασκευή ενός σκάφους γίνεται μια πιο ολοκληρωμένη προσπάθεια.



Σχήμα. 2.2: Ενιαία διάγραμμα της γραμμής για ένα πλοίο με podded ηλεκτρικής πρόωσης. G1-G4:

Γεννήτριες, SWBD: πίνακας διανομής, TRANSF: μετασχηματιστές, BT: Πηδάλιο Πλώρης,

AZ THR: azimuthing Πηδάλιο, Azipod®: Podded πρόωσης. [2]

Το Σχήμα 2.2 παρουσιάζει τα σχέδια της τις κύριες εγκαταστάσεις ισχύος σε ένα σκάφος με ηλεκτροκίνηση σε ένα μονογραμμικό διάγραμμα. Τα κύρια στοιχεία, όπως εφαρμόζονται σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση είναι τα παρακάτω:

- παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
- Drives Μεταβλητής Ταχύτητας
- μονάδες πρόωσης / Thruster

2.3.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Κύριες μηχανές

Η πηγή που παράγει ισχύ είναι η πιο συχνά μια γεννήτρια που οδηγείται από μια μηχανή εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιεί ως καύσιμο ντίζελ ή βαρύ μαζούτ. Μερικές φορές μπορεί κανείς να βρει κινητήρες φυσικού αερίου, καθώς επίσης και αεριοστρόβιλους, αμοιοστρόβιλους ή συνδιασμένων κύκλων τουρμπίνες, ιδίως για υψηλότερες απαιτήσεις ενέργειας, όπως η παροχή ενέργειας των ταχύπλοων πλοίων, ή όπου το φυσικό αέριο είναι μια φθηνή εναλλακτική λύση (π.χ. προϊόν αποβλήτων στην παραγωγή πετρελαίου, σε πλοία μεταφοράς LNG, κλπ.).

Στη ντίζελοηλεκτροκίνητη πρόωση οι μηχανές diesel είναι συνήθως μέσης και υψηλής ταχύτητας μηχανές. Έχουν χαμηλότερο βάρος και κόστος με τους παρόμοιους κινητήρες χαμηλών στροφών που χρησιμοποιούνται για την απευθείας μηχανική πρόωση.

Η διαθεσιμότητα της παραγόμενης ενέργειας είναι είναι μεγάλο πρόβλημα, και σε ένα ντίζελ-ηλεκτρικό σύστημα με ένα αριθμό μηχανών diesel σε ένα τέτοιο δίκτυο αυτό σημαίνει υψηλή αξιοπιστία, αλλά και εξελιγμένες διάγνωση και σύντομους χρόνους επισκευής.

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης αναπτύσσονται συνεχώς για μεγαλύτερη απόδοση και μειωμένες εκπομπές ρύπων. Σήμερα, ένας μεσαίου ταχύτητας πετρελαιοκινητήρας έχει κατανάλωση καυσίμου μικρότερη από 200 γραμμάρια ανά kWh που παράγεται κατά την βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Ακόμα κι αν αυτό θεωρείται ότι είναι ένας υψηλός συντελεστής χρησιμοποίησης των καυσίμων, αντιπροσωπεύει μόνο περίπου το 40% της ενέργειας του καυσίμου, το υπόλοιπο της ενέργειας αφερείται από την εξάτμιση ή την θερμότητα απαγωγής.

Επιπλέον, η απόδοση πέφτει πιο γρήγορα όταν το φορτίο να είναι λιγότερο από το 50% του ελάχιστου απαιτούμενου. Σε αυτή τη συνθήκη λειτουργίας, η καύση είναι αναποτελεσματική, και περιέχει υψηλά επίπεδα NOx και Sox, και με υψηλό βαθμό sooting που αυξάνει την ανάγκη για συντήρηση. Σε ένα ντίζελ-ηλεκτρικό σύστημα που διαθέτει αρκετές ντιζελομηχανές σκοπός είναι να κρατήσει τις μηχανές ντίζελ φορτωμένες στις ιδανικές συνθήκες λειτουργίας τους. Αυτό είναι εφικτό να γίνει με την έναρξη και τη διακοπή τους που εξαρτάται από το φορτίο, όπως φαίνεται στο σχήμα, με στόχο να κρατήσει τη μέση φόρτιση της κάθε ντιζελομηχανής όσο το δυνατόν πιο κοντά στο βέλτιστο σημείο του φορτίου του.

Γεννήτριες

Η πλειοψηφία των νέων κτιρίων και όλα τα εμπορικά πλοία έχουν εναλλασσόμενου ρεύματος μονάδα παραγωγής με AC διανομής. Οι γεννήτριες είναι σύγχρονων μηχανών, με μια περιέλιξη μαγνήτισης στο ρότορα που φέρει DC ρεύμα, και μια τριφασική περιέλιξη του στάτη, όπου το μαγνητικό πεδίο από το ρότορα τρέχον προκαλεί μια τριφασική ημιτονοειδή τάση όταν ο ρότορας περιστρέφεται από την κινητήρια μηχανή. Η συχνότητα f [Hz] της που προκαλείται από τις τάσεις ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής n [RPM] και ο αριθμός p πόλο στην σύγχρονη μηχανή:

$$f = \frac{p}{2} \cdot \frac{n}{60}$$

Μια γεννήτρια δύο πόλων θα δώσει 60Hz στα 3600RPM, μία τεσσάρων πόλων στα 1800RPM, μία έξι πόλων στα 1200RPM, κλπ. Ενώ 50Hz θα δώσει στα 3000 RPM, 1500 RPM και 1000 RPM μια γεννήτρια δύο, τεσσάρων και έξι πόλων. Ένας μεγάλος αριθμός μέσόστροφων μηχανών κανονικά εργάζεται στο 720RPM για 60Hz δίκτυο (10 γεννήτρια πόλων) ή 750RPM για 50Hz δίκτυο (8 γεννήτρια πόλων).

Παλιότερα χρησιμοποιούσαν το συνεχές ρεύμα προκειμένου να μαγνητιστούν οι περιελίξεις στο ρότορα και χρησιμοποιούσαν ψήκτρες και δακτυλίδια. Οι σημερινές σύγχρονες γεννήτριες είναι εξοπλισμένες με διέγερσης χωρίς ψήκτρες για μειωμένη συντήρηση και διακοπής λειτουργίας. Αυτές είναι μια αντίστροφη σύγχρονη μηχανή με μαγνήτιση DC του στάτη και περιστρεφόμενη τριφασική περιέλιξη και ένα περιστρεφόμενο ανορθωτής διόδων. Το ανορθωμένο ρεύμα τροφοδοτεί στη συνέχεια με μαγνήτιση τις περιελίξεις.

Η διέγερση ελέγχεται από ένα αυτόματο ρυθμιστή τάσης (AVR), το οποίο ανιχνεύει την τελική τάση της γεννήτριας και την συγκρίνει με μια τιμή αναφοράς. Απλοποιημένα, ο ελεγκτής έχει PID χαρακτηριστικά, και δίνει μια πτώση τάσης πτώση, ανάλογα με το φορτίο της γεννήτριας. Η τάση

εξασφαλίζει την ίση κατανομή της αέργου ισχύος σε παράλληλη σύνδεση γεννητριών. Σύμφωνα με την πλειοψηφία των κανονισμών, η σταθερή διακύμανση τάσης στους ακροδέκτες της γεννήτριας δεν πρέπει να υπερβαίνει το $\pm 2,5\%$ της ονομαστικής τάσης. Επίσης, η μεγαλύτερη παροδική μεταβολή του φορτίου δεν πρέπει να υπερβαίνει διακύμανση της τάσης -15% ή $+20\%$ της ονομαστικής τάσης, εκτός αν έχει προκαθορισθεί κάτι τέτοι και συνυπολογίζεται στο συνολικό σχεδιασμό του συστήματος. Το AVR είναι συνήθως επίσης εξοπλισμένο με ένα τροφοδότη προς τα εμπρός λειτουργία ελέγχου που βασίζεται σε μέτρηση του ρεύματος στάτη.

Εκτός από τις περιέλιξης μαγνήτισης, ο ρότορας διαθέτει επίσης με μια διάταξη περιέλιξης απόσβεσης που αποτελείται από αξονικές μπάρες χαλκού που διαποτίζουν την εξωτερική περιφέρεια των πόλων του ρότορα, βραχυκυκλώνεται από έναν δακτύλιο από χαλκού και στα δύο άκρα. Ο κύριος σκοπός αυτής της περιέλιξης είναι να πετύχει την ηλεκτρομαγνητική απόσβεση στη δυναμική του στάτη και του ρότορα. Μια σύγχρονη μηχανή χωρίς αυτή την απόσβεση θα έχει μεγάλες ταλαντώσεις σε συχνότητα και επιμερισμό φορτίου για κάθε μεταβολή του φορτίου.

Συχνά, οι γεννήτριες συνδέονται με άξονα έναν κινητήρα πρόωσης, δηλαδή μια γεννήτρια άξονα. Οι γεννήτριες άξονα είναι σε ορισμένες απαιτήσεις που υποβάλλονται σε αμφίδρομης ροής ισχύος, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να λειτουργούν και ως κινητήρες. Οι γεννήτριες άξονα έχουν το μειονέκτημα της υποχρέωσης της περιστροφής της κύριας έλικας σε σταθερή ταχύτητα, αν η έξοδος της γεννήτριας έχει και αυτή σταθερή συχνότητα. Αυτό θα μειώσει την αποτελεσματικότητα της έλικας ιδιέταιρα σε συνθήκες λειτουργίας μικρού φορτίου. Μπορούν να εγκατασταθούν στατικοί μεταλλάκτες για να κρατήσουν σταθερή τη συχνότητα ενώ η ταχύτητα μεταβάλλεται.

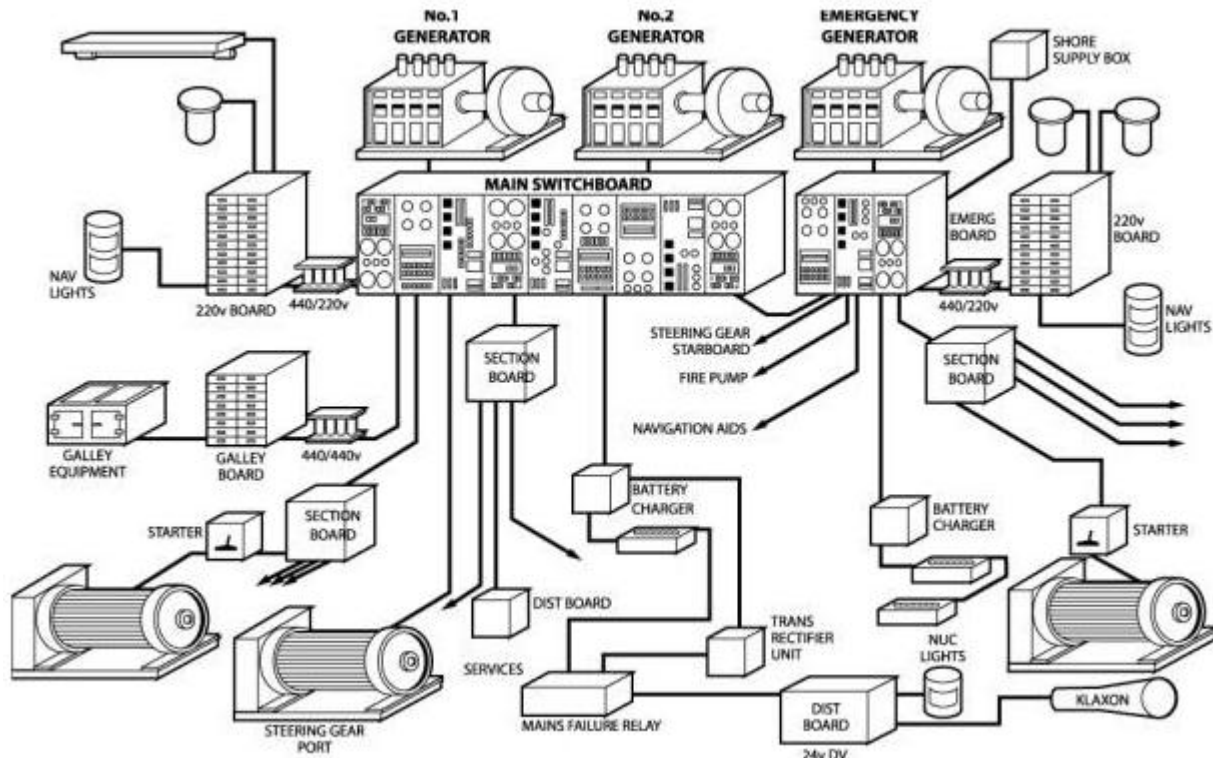
2.3.3 Διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Πίνακες διανομής

Το καθήκον του πίνακα είναι η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται εκεί που χρειάζεται. Οι πίνακες στα πλοία συνήθως κατατάσσονται, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3, ως ένα από τα παρακάτω:

- Κύριοι πίνακες, με τους οποίους συνδέονται οι γεννήτριες.
- Πίνακες έκτακτης ανάγκης, στους οποίους η γεννήτρια έκτακτης ανάγκης ή η μπαταρία είναι συνδεδεμένη.
- Πίνακες, που τροφοδοτούνται άμεσα ή μέσω μετασχηματιστών από τον κύριο πίνακα ή τον πίνακα έκτακτης ανάγκης.
- Πίνακες διανομής.

Οι πίνακες διανομής συνήθως χωρίζονται σε δύο, τρία, ή τέσσερα τμήματα, έτσι ώστε να μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις εφεδρείας του πλοίου. Σύμφωνα με τους κανονισμούς για ηλεκτροκίνηση, ο ένας πίνακας πρέπει να αντέχει να τροφοδοτίσει κάποιο τμήμα, π.χ. όταν υπάρχει βραχυκύκλωμα.



Σχήμα. 2.3: Τυπικό διάγραμμα γενικού πίνακα διανομής σε πλοίο [10]

Σε δύο ίδιας χωρητικότητας γεννήτριες και φορτίο στις δύο πλευρές το ίδιο το ποιά δυσμενές σενάριο είναι να χαθεί το 50% της χωρητικότητας της γεννήτριας και των φορτίων. Προκειμένου να αποφευχθεί μια μεγάλη εγκατάσταση με υψηλό κόστος, το σύστημα συχνά θα χωρίζεται σε τρία από τα τέσσερα, η οποία μειώνει τις απαιτούμενες πρόσθετες εγκαταστάσεις.

Χρησιμοποιώντας τα επίπεδα τάσης IEC τις ακόλουθες εναλλακτικές λύσεις είναι πιο συχνή επιλογή για την κύρια διανομή συστήματος, με τις οδηγίες εφαρμογής από NORSOK:

- 11kV: Μέση τάσης παραγωγή και διανομής. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται όταν η συνολική εγκατεστημένη γεννήτρια ισχύς υπερβαίνει 20 MW. Θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για κινητήρες από 400 kW και άνω.

- 6.6kV: Μέση τάσης παραγωγή και διανομής. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται όταν η συνολική εγκατεστημένη γεννήτρια παραγωγικής ικανότητας κυμαίνεται μεταξύ 4-20MW. Θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για κινητήρες από 300kW και πάνω.

- 690V: Χαμηλή παραγωγή τάσης και διανομής. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται όταν η συνολική εγκατεστημένη ικανότητας της γεννήτριας είναι κάτω 4MW. Θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τους καταναλωτές κάτω από 400 kW και ως κύρια τάση για μετατροπείς για γεώτρηση κινητήρες.

- Για τη διανομή χρησιμότητα χαμηλότερη τάση χρησιμοποιείται, π.χ. 400/230V.

Μετασχηματιστές

Ο σκοπός του μετασχηματιστή είναι να απομονώσουμε τα διάφορα μέρη του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλά τμήματα, κανονικά προκειμένου να λάβει διαφορετικά επίπεδα τάσης και μερικές φορές και για την διαφορά φάσης. Μετατόπισης φάσης μετασχηματιστές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τροφοδότηση των μετατροπέων συχνότητας, π.χ. για συστήματα μετάδοσης μεταβλητής ταχύτητας πρόωσης, με σκοπό να μειώσουν την παραμόρφωση των ρευμάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο, καταργώντας το πιο βασικό τις αρμονικές ρευμάτων. Αυτό μειώνει την τάση παραμόρφωσης για τις γεννήτριες και τους άλλους καταναλωτές. Οι μετασχηματιστές, επίσης, έχουν απόσβεση των υψηλών συχνοτήτων, ειδικά αν ο μετασχηματιστής είναι εξοπλισμένος με ένα θωράκισμένο, γειωμένο χαλκού μεταξύ των δυο περιελίξεων. Υπάρχουν πολλά είδη μετασχηματιστή που χρησιμοποιούνται, και τα πιο κοινά είδη είναι ξηρού τύπου και λαδιού.

Ο μετασχηματιστής είναι τριφασικός, με τρία πρωτεύοντα πηνία και τρία δευτερεύοντα τοποθετημένα γύρω από ένα κοινό μαγνητικό πυρήνα. Το μαγνητικό πυρήνα σιδήρου αποτελεί μια κλειστή διαδρομή μαγνητικής ροής, συνήθως κατασκευάζεται με τρεις κάθετους κορμούς και δύο οριζόντιους ζυγούς τοποθετημένους ένας στο κάτω μέρος και ένας στο πάνω μέρος. Η εσωτερική περιέλιξη αποτελεί την χαμηλή τάση ή δευτερεύουσα περιελίξεις και το εξωτερικό είναι η περιέλιξη υψηλής τάσης. Ο λόγος ανάμεσα στον αριθμό των σπειρών στη περιέλιξη του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος δίνει το λόγο μετασχηματισμού. Τα πηνία μπορούν να συνδεθούν ως Y-σύνδεση ή D-σύνδεση. Η σύνδεση μπορεί να είναι διαφορετική στο πρωτεύον και διαφορετική στο δευτερεύον, και σε τέτοιους μετασχηματιστές, όχι μόνο το πλάτος τάσης θα μετατραπεί, αλλά θα υπάρξει επίσης και μια αλλαγή στη φάση ανάμεσα στο πρωτεύον στο δευτερεύον. Η αλλαγή φάσης μπορεί επίσης να ρυθμιστεί με τη χρήση του Z-συνδεδεμένο συνήθως στον πρωτεύον, όπου η γωνία μετατόπισης φάσης μπορεί να προσδιοριστεί επακριβώς από το λόγο

των σπειρών στα τμήματα των περιελίξεων Z. Επίσης χρησιμοποιούνται τριών ή τεσσάρων περιελίξεων μετασχηματιστές με πολλαπλές περιελίξεις στο δευτερεύον, π.χ. για multi-παλμών drive εφαρμογές.

Ένας μετασχηματιστής με D συνδεση στο πρωτεύον και Y-συνδεση στο δευτερεύον ονομάζεται τύπου Dy μετασχηματιστής. Το πρώτο κεφαλαίο γράμμα περιγράφει την κύρια περιέλιξη, και το δεύτερο μικρό γράμμα περιγράφει τη δευτερεύουσα περιέλιξη. Το γράμμα n χρησιμοποιείται για να περιγράψει εάν το κοινό σημείο σε μια Y-σύνδεση είναι γειωμένο, π.χ. Dyn ή Ynyn.

Οι Μετασχηματιστές σχεδιάζονται σύμφωνα με το πρότυπο IEC. Για μετατροπέα ο μετασχηματιστής, είναι σημαντικό να ληφθεί κατά το σχεδιασμό υπόψη ότι θα έχει πρόσθετες θερμικές απώλειες λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των αρμονικών ρευμάτων. Το IEC δίνει επίσης κανόνες σχεδιασμού και κατευθυντήριες γραμμές για τέτοιες εφαρμογές.

2.3.4 Drives κινητήρων για την πρόωση και Thrusters

2.3.4.1 Γενικά

Το ηλεκτρικό μοτέρ είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη συσκευή για τη μετατροπή από ηλεκτρική σε μηχανική ενέργεια και είναι χρησιμοποιείται για την ηλεκτροπρόωση και άλλα επί του σκάφους φορτία όπως βαρούλκα, αντλίες, ανεμιστήρες, κλπ. Συνήθως, το 80-90% των φορτίων στις εγκαταστάσεις του πλοίου θα είναι κάποιοι ηλεκτρικοί κινητήρες. Ακολουθεί μια σύντομη επισκόπηση των διαφόρων κινητήρων και των εφαρμογών τους στις εγκαταστάσεις του πλοίου. Οι ηλεκτροκινητήρες που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

Κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Το μοτέρ συνεχούς ρεύματος πρέπει να τροφοδοτείται από την παροχή συνεχούς ρεύματος, και δεδομένου ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και το σύστημα διανομής κανονικά είναι ένα τριφασικό σύστημα, αυτό σημαίνει ότι με κινητήρα συνεχούς ρεύματος πρέπει να τροφοδοτείται από έναν ανορθωτή θυρίστορ. Αυτό δίνει επίσης τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα.

Ασύγχρονοι (επαγωγικοί) κινητήρες.

Ο ασύγχρονος κινητήρας ή επαγωγικός είναι η κινητήριος δύναμη στο κλάδο της βιομηχανίας. Η στιβαρή και απλή σχεδίαση του εξασφαλίζει στις περισσότερες περιπτώσεις, μεγάλη διάρκεια ζωής με ελάχιστες βλάβες και περιορισμένη συντήρηση. Ο ασύγχρονος κινητήρας χρησιμοποιείται σε όλες τις εφαρμογές, είτε σαν σταθερής ταχύτητας κινητήρας άμεσα συνδεδεμένος με το δίκτυο, ή ως μεταβλητών στροφών κινητήρας που τροφοδοτείται από ένα στατικό μετατροπέα συχνότητας.

Σύγχρονοι κινητήρες.

Οι σύγχρονοι κινητήρες συνήθως δεν χρησιμοποιείται ως κινητήρια δύναμη σε εφαρμογές του πλοίου, με εξαίρεση τα μεγάλα drives πρόωσης, συνήθως > 5MW άμεσα συνδεδεμένοι με τον άξονα της έλικας, ή > 8-10MW με μια σύνδεση μετάδοσης. Ο σχεδιασμό ενός σύγχρονου κινητήρα είναι παρόμοιος με εκείνο μιας σύγχρονης γεννήτριας. Συνήθως δεν χρησιμοποιείται χωρίς παροχή μετατροπέα συχνότητας για μεταβλητό έλεγχο ταχύτητας σε εφαρμογές του πλοίου.

Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.

Σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές για λίγα kW drives, και για τις απευθείας on-line εφαρμογές. Τα τελευταία χρόνια, έχει εισαχθεί και για τις μεγάλες εφαρμογές για αρκετά MW drives πρόωσης, πρώτον σε ναυτικό εφαρμογές, αλλά τώρα επίσης σε podded εφαρμογές πρόωσης. Το όφελος αυτού του σχεδίου είναι υψηλή απόδοση με μικρές διαστάσεις, καθιστώντας το ιδιαίτερα ενδιαφέρον για podded πρόωσης όπου οι διαστάσεις πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες, επίσης η άμεση ψύξη του νερού θα εξαλείψει την ανάγκη για αέρα ψύξης του rod κινητήρα και έτσι απλοποιείται της κατασκευή και οι εργασίες εγκατάστασης.

Άλλοι κινητήρες.

Μια σειρά άλλων κινητήρων χρησιμοποιούνται σε εμπορικές ή πειραματικές εφαρμογές. Λίγοι από αυτούς έχουν αποκτήσει ένα υψηλό μερίδιο της αγοράς, και ιδιαίτερα όχι σε θαλάσσιες εφαρμογές.

2.3.4.2. Η σταθερή ταχύτητα, Direct-on-Line κινητήρα

Ένα ηλεκτρικό μοτέρ μπορεί να συνδεθεί απευθείας με το δίκτυο. Κάθε απευθείας on-line κινητήρας είναι κανονικά τριφασικός ασύγχρονος, ή επαγωγικός κινητήρας. Ο ασύγχρονος κινητήρας έχει ένα στιβαρό και απλό σχεδιασμό, όπου η τριφασική περιέλιξη του στάτη είναι παρόμοια με την περιέλιξη του στάτη μιας γεννήτριας. Ο ρότορας είναι κυλινδρικός, με πυρήνα κατασκευασμένο με ελλάσματα σιδήρου και βραχυκυκλωμένο τύλιγμα παρόμοιο με το τύλιγμα απόσβεσης σε μια σύγχρονη γεννήτρια. Σε κανένα φορτίο, η τάση που επιβάλλεται με την τροφοδοσία του στάτορα θα δημιουργήσει ένα μαγνητικό πεδίο στον κινητήρα, ο οποίος διασχίζει το κενό αέρα και θα περιστρέφεται με ταχύτητα που δίνεται από τη συχνότητα του επιβάλλει η τάση, που ονομάζεται σύγχρονη συχνότητα f_s . Η σύγχρονη ns ταχύτητα είναι ως εκ τούτου:

$$n_s = \frac{f_s \cdot 60}{p/2} \text{ [RPM]}$$

Δεδομένου ότι ο άξονας παίρνει φορτίο, η ταχύτητα του δρομέα θα μειωθεί, και θα υπάρχουν ρεύματα επαγόμενα στα τύλιγματα του ρότορα δεδομένου ότι είναι περιστρέφονται σχετικά με το σύγχρονο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο από τα τυλίγματα του στάτη. Ένας οριζμός της ολίσθησης s σε σχέση με τη σχετική υστέρηση της ταχύτητας του κινητήρα με την σύγχρονη n_s είναι:

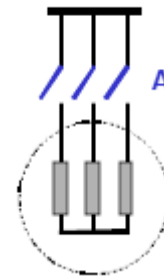
$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Εξου και η ολίσθηση κυμαίνεται από 0 (χωρίς φορτίο) έως 1 (μπλοκάρει ρότορα). Η ολίσθηση στο ονομαστικό φορτίο είναι συνήθως μικρότερη του 0,05 (5%) για περισσότερα σχέδια κινητήρων, και ακόμη χαμηλότερη (2-3%) για τις μεγάλες μηχανές. Λόγω των υψηλών ρευμάτων εκκίνησης των ασύγχρονων μηχανών, συχνά θα είναι απαραίτητο να εγκατασταθούν συσκευές για ομαλή εκκίνηση. Οι ομαλοί εκκινητές τυπικά μειώνουν το ρεύμα του ρότορα από 5 φορές για 2-3 φορές την ονομαστική ένταση, και αυτόν τον τρόπο επίσης να μειώνεται και η πτώση τάσης. Οι ομαλοί εκκινητές πρέπει πάντα να προσαρμόζονται στα χαρακτηριστικά φορτίου, όπως η αρχή τους βασίζεται στη μείωση της τάσης του κινητήρα κατά την εκκίνηση, μειώνοντας έτσι την ικανότητα ροπή του κινητήρα. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι είναι οι εξής:

Απευθείας On-Line (ΔΟΛ):

Έναρξη και λειτουργία: Α κλειστό.

Χρησιμοποιείται για κινητήρα σχετικά μικρό ή όπου η ηλεκτρική εκκίνηση γίνεται σταδιακά εντός αποδεκτών ορίων και το φορτίο επιτρέπει μεταβολή της ροπής εκκίνησης σταδιακά.



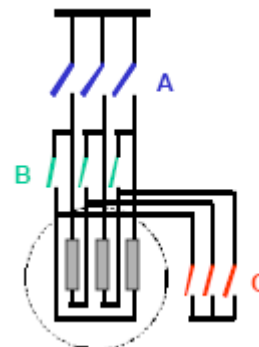
Σήμα 2.4: Απ' ευθείας εκκίνηση κινητήρα. [2]

Star-Delta (Y-Δ) ή Wye-Δέλτα σύζευξης:

Έναρξη: Α και Γ κλειστό, ανοιχτό Β

Λειτουργία: Α και Β κλειστό, Γ ανοικτού

Μειώνει το ρεύμα εκκίνησης στο περίπου 1 / 3 της άμεσης on line εκκίνησης, αλλά μειώνει και την αρχική ροπή παρομοίως. Η αρχική ροπή του φορτίου πρέπει να είναι χαμηλή για να διασφαλιστεί αποδεκτή επιτάχυνση.



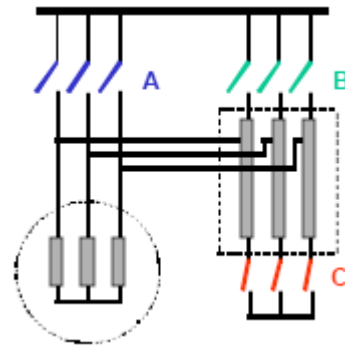
Σήμα 2.5: Εκκίνηση κινητήρα αστέρα-τρίγωνο [2]

Αυτομετασηματιστή ξεκίνημα:

Έναρξη: Β και Γ κλειστό, Α ανοιχτό

Λειτουργία: Α κλειστό, Β και Γ ανοικτό

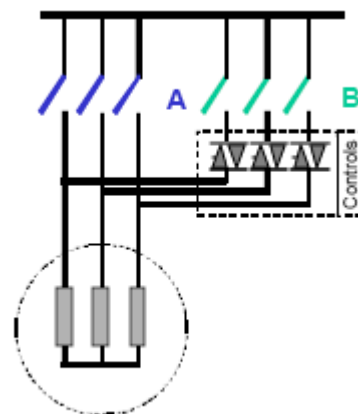
Μειώνει το ρεύμα εκκίνησης, εξαρτάται από το λόγο μετασηματισμού. Το ρεύμα του δικτύου είναι μικρότερο από το ρεύμα του μοτέρ, προκύπτει από το λόγο του μετασηματιστή. Η αρχική ροπή μειώνεται και πρέπει να ελέγχεται για να εξασφαλίζεται αποδεκτή επιτάχυνση του φορτίου.



Σήμα 2.6: Απ' ευθείας εκκίνηση κινητήρα [2]

(Thyristor) soft-drives

Έναρξη: Β κλειστό, ο ομαλός εκκινητής χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της τάσης του κινητήρα. Λειτουργία: Κανονικά ένας by-pass διακόπτης Α για τη μείωση των απωλειών. Χρησιμοποιείται για να μειώσει τις ηλεκτρικές αρχικές υπερτάσεις του δικτύου. Ο έλεγχος των ομαλών εκκινητών δύναται να αξιοποιηθεί για να προγραμματίσουμε διάφορες ομαλές επιτάχυνσεις και να προσαρμοστούν στους πιθανούς περιορισμούς του του φορτίου. Καθώς η αρχική ροπή μειώνεται σε σχέση με το τετράγωνο της τάσης κινητήρα, τα χαρακτηριστικά εκκίνησης πρέπει προσεκτικά να ρυθμιστούν για να εξασφαλιστεί μια αποδεκτή επιτάχυνση. Κατά τη διάρκεια της εκκίνησης, ο ομαλός εκκινητής παράγει 6-παλμών αρμονικές παραμόρφωση της τάσης τροφοδοσίας.



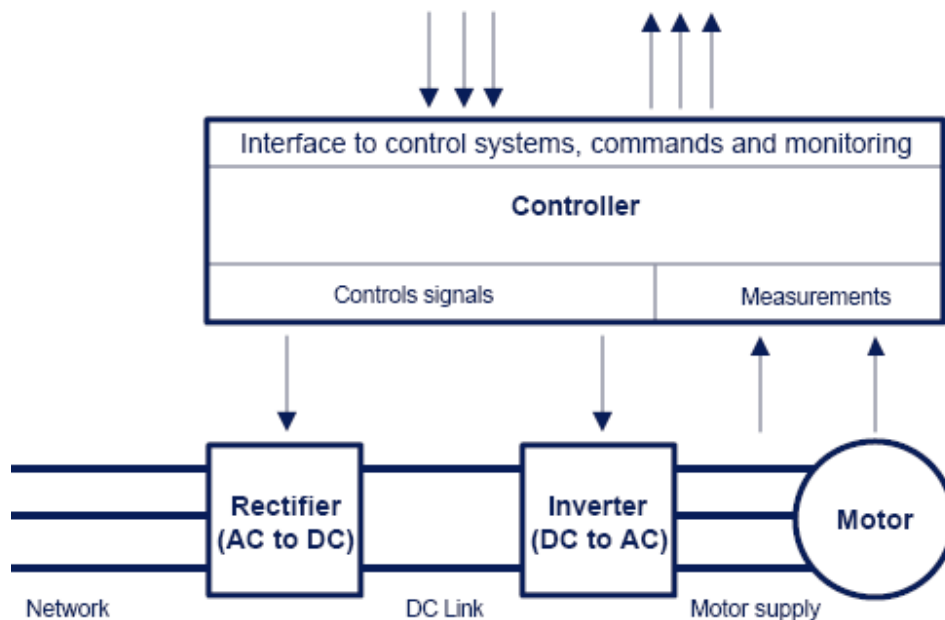
Σήμα 2.7: Εκκίνηση κινητήρα με ομαλούς εκκινητές [2]

2.3.4.3 Drives κινητήρα μεταβλητής ταχύτητας

Ο άμεσος on line κινητήρας θα περιστρέφεται με ταχύτητα που προσδιορίζεται άμεσα με βάση τη συχνότητα του δικτύου. Για την πρόωση, προωστήρες, αντλίες, βαρούλκα, κλπ., θα μπορούσε να υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας ή κατανάλωσης καυσίμων μειώνοντας τις άνευ

φορτίου απώλειες που εξαρτώνται από τη λειτουργία. Επίσης, η τη δυνατότητα ελέγχου του οδηγητή φορτίου θα ενισχυθεί σημαντικά με τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα. Το αποτέλεσμα είναι κυρίως οικονομικό, με την εισαγωγή πρόσθετων επενδύσεων κόστους, καθώς επίσης και εξαρτήματα που απαιτούν συντήρηση. Μειώνοντας το λειτουργικό κόστος ή αυξάνοντας τις αποδοχές πρέπει πληρώσει πίσω τις πρόσθετες επενδύσεις, εάν η επένδυση πρέπει να αιτιολογείται. Με το κόστος της ενέργειας (συμπεριλαμβανομένων των καυσίμων, συντήρησης, φόροι, κλπ.) του 1NOK ανά kWh για την ενέργεια που παράγουν πάνω σε ένα σκάφος, το ένα θα εξοικονομήσει 8.760.000 NOK (περίπου 1,1 εκατομμύρια δολάρια) ετησίως για ένα 1MW μείωσης της ισχύος κατά μέσο όρο.. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι κινητήρες είναι οι εξής:

- Αντιστροφείας πηγής τάσης (VSI) τύπος μετατροπέων για AC κινητήρες, δηλαδή ασύγχρονους, σύγχρονους και σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.
- Αντιστροφείας πηγής ρεύματος (CSI) τύπος μετατροπέα για AC κινητήρες, συνήθως σύγχρονους κινητήρες
- Κυκλομετατροπείς (Cyclo) για AC κινητήρες, συνήθως για σύγχρονους κινητήρες
- DC μετατροπείς, ή SCR (ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου) για κινητήρες συνεχούς ρεύματος



Σχήμα 2.8: Σκαρίφωμα ενός κινητήρα μεταβλητής ταχύτητας που δίδει ένα αναστροφέα συχνότητας με DC σύνδεσμο, τυπικά για VSI και CSI τύπους μετατροπέων. [2]

Στα πλοία, τα πλέον χρησιμοποιούμενα συστήματα μετάδοσης μεταβλητής ταχύτητας χρησιμοποιούν κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι περισσότεροι Drives, εκτός από το κυκλομετατροπέα, θα αποτελείται από έναν ανορθωτή, ο οποίος ανορθώνει την τάση της γραμμής, και αναστροφέα, ο οποίος παράγει η μεταβλητή συχνότητα και μεταβλητή τάσης τροφοδοσίας για τον κινητήρα. Πιο λεπτομερής περιγραφή αυτών των εννοιών θα ακολουθήσει σε επόμενη ενότητα. Ένας ελεγκτής κινητήρα όπως φαίνεται και στο παραπάνω Σχήμα 2.8 περιλαμβάνει τον έλεγχο της ταχύτητας, καθώς και τον έλεγχο των ρευμάτων του κινητήρα με τον έλεγχο της διακοπής των στοιχείων του ανορθωτή και / ή αναστροφέα. Μια διασύνδεση απαιτείται κανονικά για ένα επιτακτικό σύστημα ελέγχου, διαχείρισης πλοίων, για τον έλεγχο των ελιγμών, ή το δυναμικό έλεγχο της θέσης. Ο ελεγκτής του κινητήρα αποκτά σήματα μετρήσεων και σήματα ανάδρασης από τους αισθητήρες στο drive, και στο κινητήρα. Συνήθως τα ρεύματα του κινητήρα οι στροφές, και σε ορισμένες περιπτώσεις θερμοκρασίες και τάσεις μετριοούνται.

2.3.5. Μονάδες πρόωσης

2.3.5.1. Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι αρχές των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων μονάδων πρόωσης σε πλοία με ηλεκτροκίνηση. Η εικόνα δεν είναι πλήρης, δεδομένου ότι υπάρχουν και άλλες εναλλακτικές λύσεις, π.χ. πίδακες νερού ωστόσο, μόνο για ειδικές και περιορισμένες εφαρμογές.

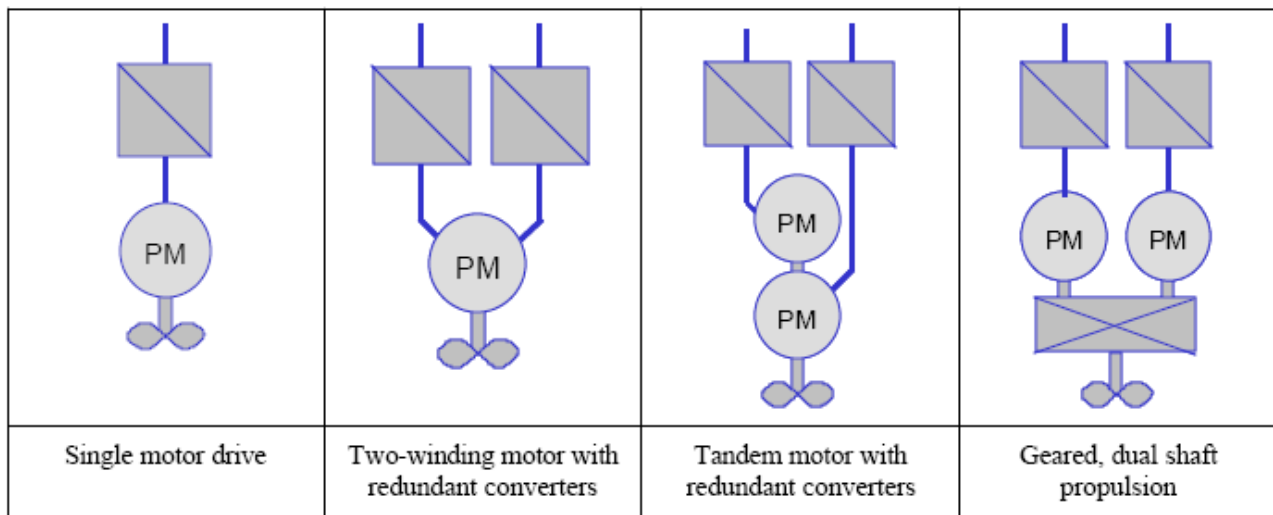
3.5.2. Κίνηση της έλικας με άξονα

Σε αυτό το είδος του συστήματος πρόωσης η προπέλα του άξονα, οδηγείται συνήθως από ηλεκτρικούς κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας. Οι ηλεκτρικές μηχανές συνδέονται είτε άμεσα στον άξονα της έλικας, τρόπος απλός και στιβαρός, είτε μέσω μειωτήρων. Η χρήση μειωτήρων, οδηγεί στην 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

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. Η προπέλα είναι συνήθως ελεγχόμενης ταχύτητας τύπος FPP (έλικα σταθερού βήματος), η οποία δίνει απλή και ισχυρή σε σχεδιασμό προπέλα. Σε ορισμένες εφαρμογές, η προπέλα μπορεί να είναι τύπος CPP (αυτοδιευθυνόμενη προπέλα), ακόμα κι αν είναι ελεγχόμενων

στροφών. Ως ένα βαθμό, ταχύτητα και βήμα μπορούν να βελτιστοποιηθούν για υψηλότερη απόδοση, καθώς και ταχύτερη απόκριση απ' ό,τι με μία μόνο παράμετρο ελέγχου. Τα οφέλη αυτά κανονικά δεν δικαιολογούν τις πρόσθετες επενδύσεις για να αποκτήσουν συνδυασμό ταχύτητας και έλεγχο βήματος

Το Σχήμα 2.9 δείχνει μερικές τυπικές διαμορφώσεις οδήγησης για το σύστημα πρόωσης του άξονα γραμμής. Αυτά μπορούν να εγκατασταθούν σε μια ενιαία έλικα άξονα, ή διπλή σχέδια άξονα.



Σχήμα 2.9: Μερικά παραδείγματα των συνδέσεων του άξονα. [2]

2.3.5.3. Αζιμουθιακοί προωθητήρες

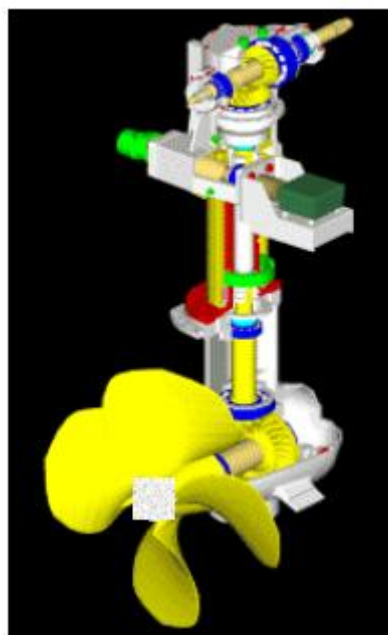
Αζιμουθιακοί προωθητήρες είναι οι προωθητήρες που μπορούν να περιστραφούν για να παράγουν ώση προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Η ώση είναι ελεγχόμενη είτε με σταθερή ταχύτητα και CPP σχεδιασμό, είτε μεταβλητής ταχύτητας και FPP σχεδιασμό, ή σε σπάνιες περιπτώσεις με συνδυασμό ταχύτητας και έλεγχο βήματος. Ο μεταβλητής ταχύτητας σχεδιασμός FPP έχει σημαντικά απλούστερη μηχανική υποβρύχια κατασκευή με μειωμένες, σε χαμηλή ώσης, απώλειες, σε σύγκριση με σταθερής ταχύτητας, CPP προπέλες.

Σε σκάφη με αυστηρό περιορισμό του ύψους του σκάφους στο δωμάτιο της προπέλας, ο ηλεκτροκινητήρας θα είναι κανονικά οριζόντιος, και η azimuthing προπέλα στη συνέχεια θα αποτελείται από ένα Z-τύπου κιβώτιο ταχυτήτων. Χάρη σε μια απλούστερη κατασκευή με λιγότερες απώλειες στη μετάδοση της ισχύος, όταν το ύψος στο δωμάτιο της έλικας το επιτρέπει αυτό καλό είναι να επιλέγεται η χρήση κάθετα τοποθετημένων ηλεκτροκινητήρων και κιβώτιο ταχυτήτων σχήματος L.

Ένας περιορισμός στους αζιμούθιους προωστήρες είναι η περιορισμένη δυνατότητά τους για να παράγουν ώση σε αρνητικό βήμα ή RPM, επειδή έχουν σχεδιαστεί και βελτιστοποιηθεί για

μονόδρομη κατεύθυνση. Αν έχουν κάποια αρνητική ικανότητα ώσης αυτή πρέπει να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να διατηρηθεί η δυναμική ικανότητα ώσης, χωρίς την άσκηση συνεχούς αζιμουθιακής περιστροφής.

Το συμβατικό αζιμουθιακό πηδάλιο χρησιμοποιήθηκε ναίτερα για την κατάσταση της διατήρησης και για τους ελιγμούς, αλλά έχουν επίσης πρόσφατα δοθεί σε χρήση και ως κύρια συσκευή πρόωσης σε σκάφη με ηλεκτροκίνηση. Προκειμένου να βελτιωθεί η υδροδυναμική ικανότητα και καθοδήγηση που απαιτούνται για την πρόωση, η μορφή της προπέλας έχει προσαρμοστεί, όπως η «μηχανική rod». Πρόκειται για μια azimuthing προπέλα, η οποία τροφοδοτείται συνήθως από ένα οριζόντιο κινητήρα, και η μηχανική ενέργεια μεταφέρεται στη συνέχεια με την προπέλα με Z κιβώτιο ταχυτήτων. Το υποβρύχιο σχήμα έχει βελτιστοποιηθεί να έχει χαμηλή αντίσταση για υδροδυναμική στην μεγαλύτερη ταχύτητα πλοίου και για μεγαλύτερη αποδοτικότητα πρόωσης. Μερικοί κατασκευαστές μπορεί να παρέχουν trusters με διπλή προπέλα, είτε στο ίδιο άξονα, ή με κόντρα περιστρώμενες προπέλες.



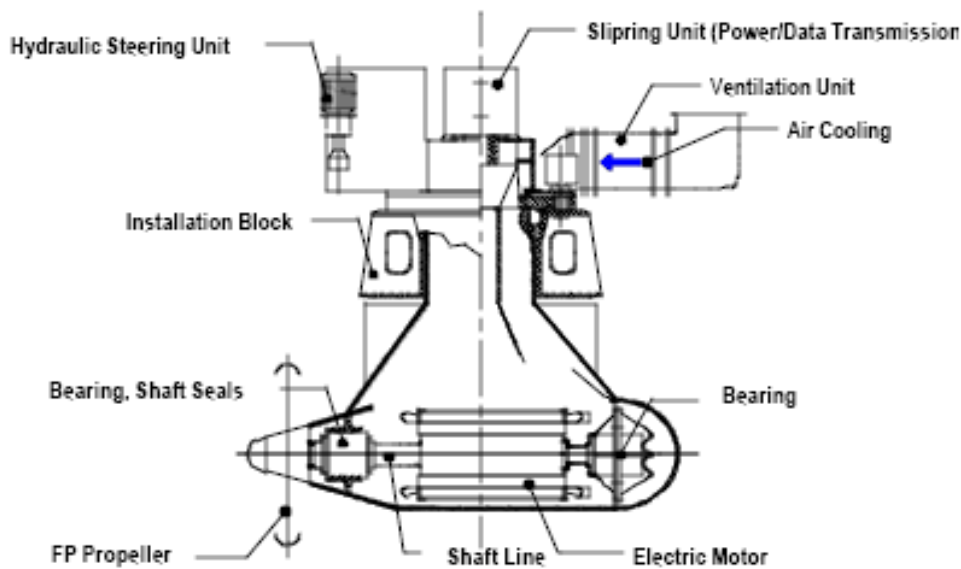
Σχήμα 2.10: Πηδάλιο αζιμούθιο, που δείχνει τα κύρια στοιχεία, όπως, προπέλα, άξονες και τουλάχιστον έξι ρουλεμάν του άξονα. [2]

2.3.5.4. Podded πρόωση

Το σύστημα ηλεκτρικού κινητήρα και έλικας είναι μία ενιαία μονάδα, εμβαπτισμένη στο νερό (Σχήμα 2.11) στο πρυμναίο μέρος του πλοίου. 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.

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 αξιμουθιακό σύστημα πρόωσης pod χρησιμοποιείται σήμερα σε εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης της τάξης των 1 – 25 MW.



Σχήμα 2.11: Podded propulsion. [2]

Κεφάλαιο 3

Σύγχρονη τεχνολογία

3.1 Ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα προώσεως είναι σύγχρονοι. Οι σύγχρονοι κινητήρες έχουν ένα πολυφασικό τύλιγμα στον στάτη και ένα τύλιγμα διέγερσης που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα και βρίσκεται στον δρομέα. Υπάρχουν δύο μαγνητοηλεκτρεγερτικές δυνάμεις. Η μία οφείλεται στο ρεύμα διέγερσης και η άλλη στο ρεύμα του στάτη. Η σύνθεση των mmf παράγουν την ροπή. Ο στάτης είναι ίδιος με αυτών των επαγωγικών κινητήρων, αλλά δεν υπάρχει επαγωγή στον δρομέα. Μια σύγχρονη μηχανή έχει σταθερή ταχύτητα και πάντοτε περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα, η οποία εξαρτάται από την συχνότητα και τον αριθμό των πόλων. Μια σύγχρονη μηχανή μπορεί να λειτουργήσει σαν κινητήρας ή γεννήτρια. Ο συντελεστής ισχύος μπορεί να ελεγχθεί με την μεταβολή του ρεύματος πεδίου. Οι κύκλομετατροπείς και οι αντιστροφείς χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές των σύγχρονων κινητήρων με οδηγούς μεταβλητής ταχύτητας. Οι σύγχρονοι κινητήρες μπορούν να ενταχθούν σε έξι κατηγορίες.

- 1) Κινητήρες κυλινδρικού δρομέα
- 2) Κινητήρες πόλου
- 3) Κινητήρες μαγνητικής αντίστασης
- 4) Κινητήρες μόνιμου μαγνήτη
- 5) Κινητήρες διακοπτόμενης μαγνητικής αντίστασης
- 6) DC και AC κινητήρες χωρίς ψήκτρες.

Η ονομαστική τάση λειτουργίας σε εγκαταστάσεις μέσης και μεγάλης ισχύος είναι 3,3-6,6 kV. Οι σύγχρονοι κινητήρες έχουν βαθμό απόδοσης κατά 3-4% υψηλότερο από τον βαθμό απόδοσης κινητήρων επαγωγής, δηλαδή ο βαθμός απόδοσης τους είναι 96-98%.

Η απόδοση τους σύμφωνα με τους κατασκευαστές υπερβαίνει το 98% αν χρησιμοποιηθούν μόνιμοι μαγνήτες. Σε αυτές τις σύγχρονες μηχανές, το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα, το οποίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, έχει αντικατασταθεί από μόνιμους μαγνήτες επιτυγχάνοντας έτσι τη δημιουργία ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σταθερής τιμής που στρέφεται στο χώρο με την ταχύτητα του δρομέα, ότι ακριβώς γίνεται όταν τροφοδοτούμε το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα με συνεχή τάση. Αφού λοιπόν εκλείπει η ανάγκη παροχής σε ΣΡ αυξάνεται η συνολική απόδοση δεδομένου ότι μειώνονται οι συνολικές απώλειες Joule στα τυλίγματα. Η τεχνολογική πρόοδος τα

τελευταία χρόνια κατέστησε δυνατή την κατασκευή κραμάτων “μονίμων μαγνητών” (κράματα σαμαρίου-κοβαλτίου [Sm-Co] και νεοβιδίου-σιδήρου-βορείου [NdFeB]). Αυτά έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή τη μαγνήτισή τους για αρκετά υψηλές θερμοκρασίες όπως είναι αυτές που αναπτύσσονται στο εσωτερικό ενός κινητήρα. Οι κινητήρες αυτοί με κατάλληλη επιλογή τυλίγματος στάτη και πόλων δρομέα μπορούν να παράγουν ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Οι σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες υπερτερούν έναντι των συμβατικών σύγχρονων κινητήρων στα χαμηλά επίπεδα απότομων αιχμών ροπής και μηχανικών δονήσεων.

Οι κινητήρες αξονικής ροής είναι κινητήρες στους οποίους η ωφέλιμη μαγνητική ροή είναι κατά την ακτινική διεύθυνση δηλαδή όπως στις συνήθεις συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές.

Οι πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής έχουν μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα, οι οποίοι είναι προσανατολισμένοι ώστε η μαγνητική ροή να ρέει σε διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα της μηχανής (αξονική).

Οι πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής 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.

3.2 Εκκίνηση Σύγχρονων Κινητήρων

Δεν μπορούμε να εκκινήσουμε ένα σύγχρονο κινητήρα απλώς και μόνο συνδέοντάς τον στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, από τη χρονική στιγμή που θα συνδέσουμε τον κινητήρα το μαγνητικό πεδίο του στάτη θα κινείται με την ονομαστική του ταχύτητα, δηλαδή πολύ γρήγορα για να μπορέσει να το παρακολουθήσει ο ακινητοποιημένος δρομέας. Το αποτέλεσμα θα είναι η ανάπτυξη ροπής στο δρομέα, η οποία θα είναι μεταβαλλόμενη και κατά μέτρο, αλλά και κατά κατεύθυνση, και η οποία μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του κινητήρα. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί ειδικοί τρόποι Εκκίνησης. Οι τρόποι εκκίνησης ενός σύγχρονου κινητήρα είναι:

- Εκκίνηση με μείωση της συχνότητας τροφοδοσίας. Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας, οπότε με τη λύση αυτή ουσιαστικά περιστρέφουμε το μαγνητικό πεδίο του στάτη πιο αργά κατά την εκκίνηση, ώστε να μπορεί να το ακολουθήσει ο ακίνητος δρομέας.
- Εκκίνηση με βοήθεια εξωτερικής κινητήριας μηχανής.

- Τυλίγματα απόσβεσης στο δρομέα. Πρόκειται για την ενσωμάτωση στο δρομέα ενός βραχυκυκλωμένου κλωβού. Η ροπή που αναπτύσσεται στον κλωβό από την απευθείας σύνδεση του κινητήρα στο δίκτυο είναι μεταβαλλόμενη κατά μέτρο, αλλά όχι κατά κατεύθυνση, οπότε ο δρομέας μπορεί να εκκινήσει κανονικά. Η λύση αυτή προσφέρει το επιπλέον πλεονέκτημα της καλύτερης αντίδρασης του κινητήρα σε μεταβατικά φαινόμενα, όπου ο βραχυκυκλωμένος κλωβός βοηθά στην απόσβεση τυχόν ταλαντώσεων.

3.3 Διακοπτικές Συναρτήσεις

Η ενσωμάτωση ενός βραχυκυκλωμένου κλωβού στο δρομέα για διευκόλυνση της διαδικασίας εκκίνησης ενός σύγχρονου κινητήρα αποδείχτηκε τελικά καλύτερη λύση από ότι αναμενόταν. Οι διακοπτικές συναρτήσεις αξιοποιούνται κυρίως στη φάση σχεδίασης διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος. Σύμφωνα με τη βασική τους αρχή, ο ηλεκτρονικός διακόπτης θεωρείται ότι είναι ιδανικός με δύο διακριτές καταστάσεις : ON και OFF, όπου:

- ON (λογικό 1), όπου η έξοδος (τάση ή ρεύμα) ισούται με την είσοδο, και
- OFF (λογικό 0), όπου η έξοδος (τάση ή ρεύμα) ισούται με 0.

Η λογική αυτή θεώρηση μπορεί να συμπυκνωθεί σε μία εξίσωση, π.χ. για τάση:

$$V_{out} = Sw * V_{in}$$

Όπου Sw είναι η διακοπτική συνάρτηση που αναπαριστά την κατάσταση του διακόπτη με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που ορίζει η λογική άλγεβρα (Bool):

- ON : $V_{out} = V_{in}$ και $Sw = 1$
- OFF : $V_{out} = 0$ και $Sw = 0$

3.4 Μετατροπείς Συχνότητας

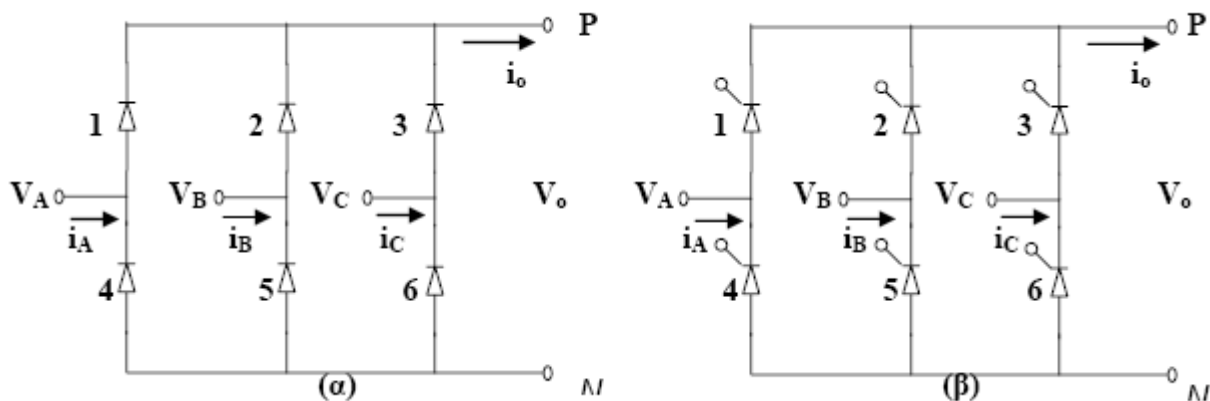
Οι οδηγοί μεταβλητής ταχύτητας έχουν βιομηχανική χρήση εδώ και πολλές δεκαετίες, πρωτοχρησιμοποιήθηκαν στο τέλος της δεκαετίας του 1960 με τη χρήση των ημιαγωγών ηλεκτρισμού. Στην αρχή, κινητήρες χρησιμοποιήθηκαν για συνεχούς ρεύματος που ήταν η πλέον εφικτή και ιδανική λύση για τον έλεγχο της πρόωσης, αλλά κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, οι ρυθμιστές στροφών κινητήρα έγιναν βιομηχανικά διαθέσιμοι, και εμπορικά ανταγωνιστικοί. Από τότε, σχεδόν όλες οι νέες παραδόσεις ηλεκτρικής πρόωσης βασίζονται σε μία από τις τοπολογίες ρεύματος AC.

Στις εγκαταστάσεις Ε.Ρ., 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 αντιστροφέας). Ωστόσο για μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων κατασκευάζονται πιο σύνθετες διατάξεις. Έτσι για την καλύτερη κατανόηση των διατάξεων γίνεται μία αναφορά στα συστήματα αυτά των ηλεκτρονικών ισχύος.

3.5 Διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος

3.5.1 Ανορθωτές (AC/DC rectifiers): μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Μία ανορθωτική διάταξη μπορεί να είναι ελεγχόμενη ή και μη ελεγχόμενη. Με τον τρόπο αυτόν στη διακοπτική συνάρτηση ενσωματώνονται οι μεταγωγές του διακόπτη από τη μία κατάσταση στην άλλη. Επιπλέον, είναι εύκολο να γίνουν μαθηματικές πράξεις μεταξύ των σχέσεων εισόδου-εξόδου και μάλιστα και με τη βοήθεια άλγεβρας πινάκων.



Σχήμα 3.1 : Ανορθωτές 6 παλμών: (α) μη ελεγχόμενος (με διόδους) (β) ελεγχόμενος
Είσοδοι οι ακροδέκτες Α,Β,С και έξοδοι οι ακροδέκτες Ρ,Ν. [9]

Η σχέση τάσης εξόδου με τις τάσεις εισόδου είναι:

$$V_o = [(S_{w1} - S_{w4}) \quad (S_{w2} - S_{w5}) \quad (S_{w3} - S_{w6})] \begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix}$$

Παρόμοια, αντίστοιχη σχέση των ρευμάτων εισόδου με το ρεύμα εξόδου είναι:

$$i_A = [(S_{w1} - S_{w4}) - (S_{w3} - S_{w6})][i_o]$$

$$i_B = [(S_{w2} - S_{w5}) - (S_{w1} - S_{w4})][i_o]$$

$$i_C = [(S_{w3} - S_{w6}) - (S_{w2} - S_{w5})][i_o]$$

Επιπλέον, οι διακοπτικές συναρτήσεις στις εξισώσεις (5) και (6) συσχετίζονται μεταξύ τους βάσει φασικών διαφορών $\pm 120^\circ$ και $\pm 180^\circ$ μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$S_{w2}(\omega t) = S_{w1}(\omega t - 120^\circ)$$

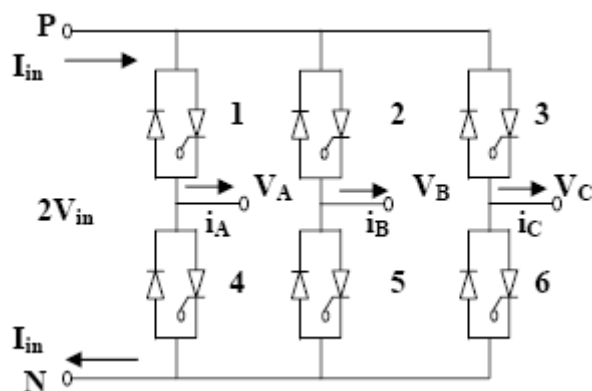
$$S_{w3}(\omega t) = S_{w1}(\omega t - 240^\circ)$$

$$S_{w4}(\omega t) = S_{w1}(\omega t - 180^\circ)$$

$$S_{w5}(\omega t) = S_{w2}(\omega t - 180^\circ) = S_{w1}(\omega t - 300^\circ)$$

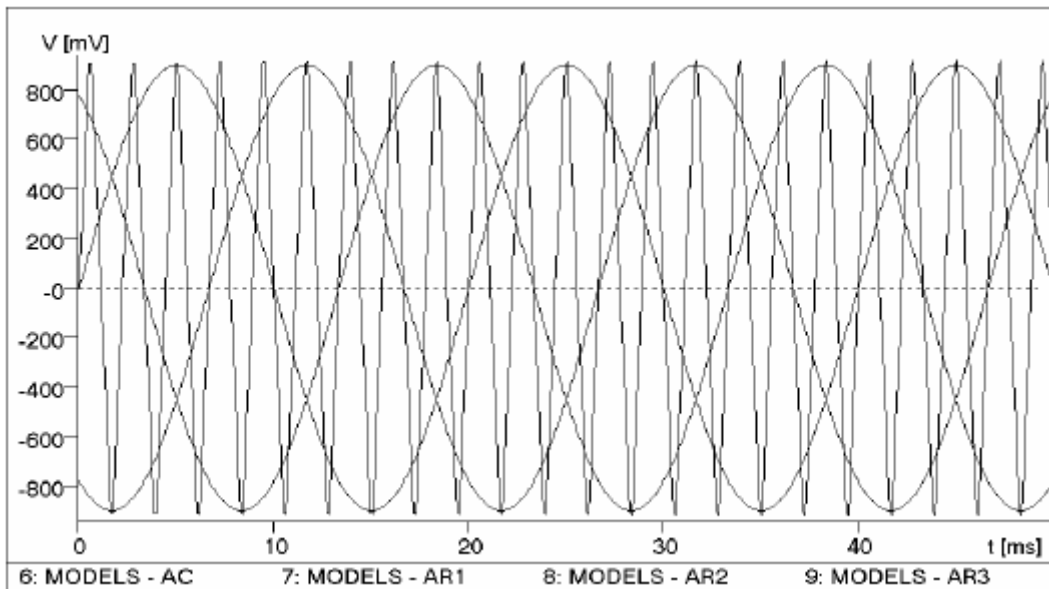
$$S_{w6}(\omega t) = S_{w3}(\omega t - 180^\circ) = S_{w1}(\omega t + 60^\circ)$$

3.5.2 Αντιστροφείς με τεχνική SPWM (inverters) : μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο κατά αυστηρά ελεγχόμενο τρόπο. Η περίπτωση ενός αντιστροφέα 6 παλμών (6-παλμικός) αποτελείται από 6 ελεγχόμενους διακόπτες ισχύος, 2 για κάθε φάση. Σε κάθε φάση αντιστοιχεί ένας διακόπτης θετικού ρεύματος κι ένας αρνητικού ρεύματος. Αντιπαράλληλα προς τους διακόπτες ισχύος συνδέονται και δίοδοι ισχύος για να κυκλοφορούν αντίστροφης φοράς ρεύματα προστατεύοντας τους ελεγχόμενους διακόπτες. Η τεχνική ελέγχου αγωγής των διακοπών ισχύος μπορεί να ποικίλλει, αν και η πλέον διαδεδομένη είναι η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation SPWM).

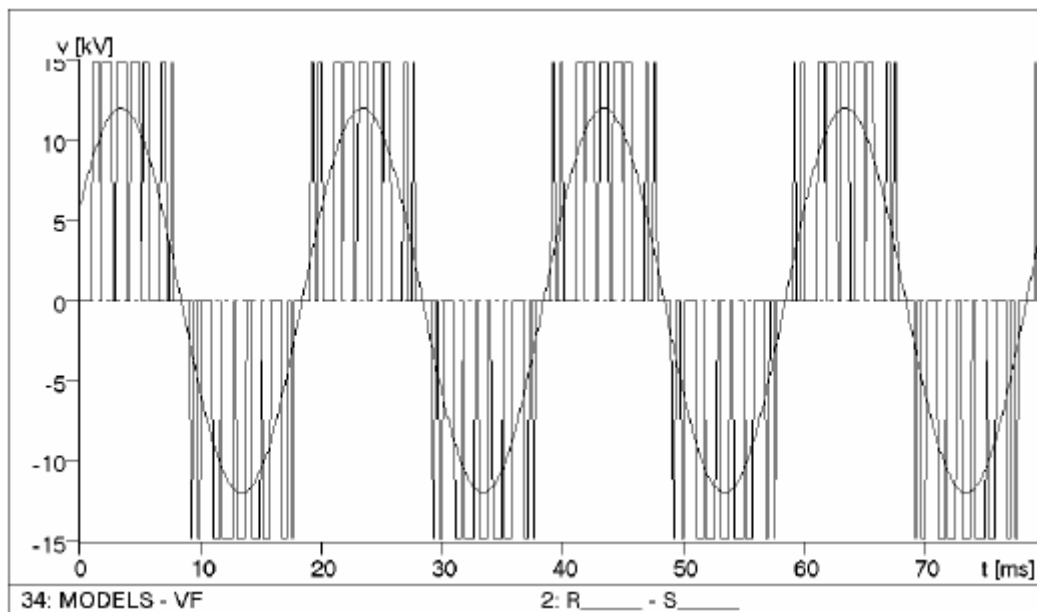


Σχήμα 3.2 : Αντιστροφέας 6 παλμών. Είσοδοι οι ακροδέκτες P,N και έξοδοι οι ακροδέκτες A,B,C. [9]

Ένα σύστημα τριών τάσεων αναφοράς (μία για κάθε φάση εξόδου) συγκρίνεται με ένα υψίσυγχο σήμα τριγωνικής μορφής. Σε κάθε εξίσωση των τιμών της κάθε φάσης με τον τριγωνικό παλμό, παράγεται σήμα αλλαγής κατάστασης των διακοπών ισχύος της συγκεκριμένης φάσης.



Σχήμα 3.3 : Τεχνική ελέγχου SPWM (ένας τριγωνικός παλμός συγκρίνεται με τρεις τάσεις αναφοράς εξόδου) [9]



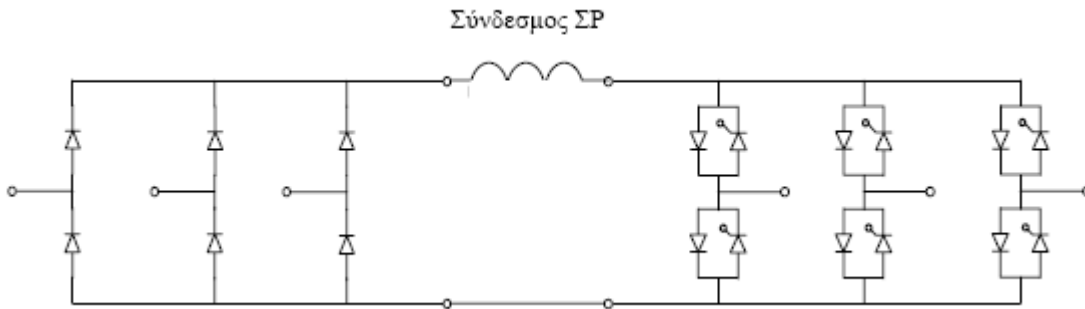
Σχήμα 3. 4 : Τάση εξόδου αντιστροφέα με τεχνική SPWM (στο εσωτερικό φαίνεται η θεμελιώδης συνιστώσα) [9]

Ένας αντιστροφέας 12 παλμών αποτελείται από δύο αντιστροφείς 6 παλμών, των οποίων οι αντίστοιχες φάσεις έχουν γωνιακή διαφορά 30ο. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων.

3.5.3 Ζεύγη ανορθωτών – αντιστροφέων SPWM :όπου στις διατάξεις αυτές, αρχικά γίνεται ανόρθωση από EP σε SP και στη συνέχεια αντιστροφή από SP σε EP. Στον σύνδεσμο SP (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:

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.



Σχήμα 3.5: Γενική διαμόρφωση ενός 6-παλμικού CSI. [9]

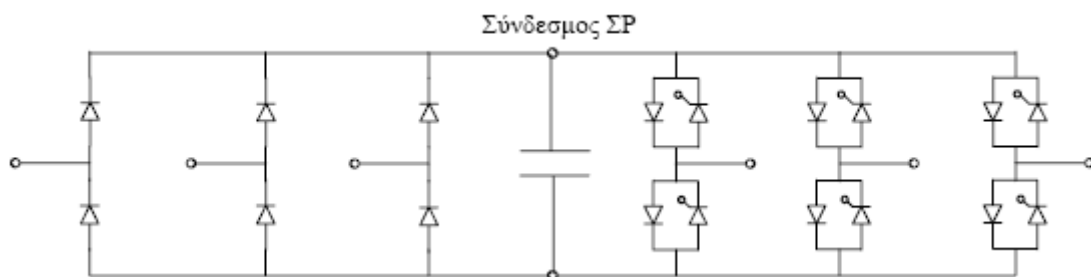
Σε αυτήν την περίπτωση, βλ. Σχήμα 3.6, η σχέση ρευμάτων εισόδου-εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S_{w1} - S_{w4}) \\ (S_{w2} - S_{w5}) \\ (S_{w3} - S_{w6}) \end{bmatrix} * [I_{in}]$$

Η αντίστοιχη σχέση τάσεων εισόδου-εξόδου είναι:

$$V_{in} = V_P - V_N = \begin{bmatrix} S_{w1} - S_{w4} & S_{w2} - S_{w5} & S_{w3} - S_{w6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$$

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



Σχήμα 3.6 : Τυπική διάταξη μετατροπέα VSI [9]

Στην περίπτωση του VSI, βλ. Σχήμα 3.6, η σχέση τάσεων εισόδου-εξόδου είναι:

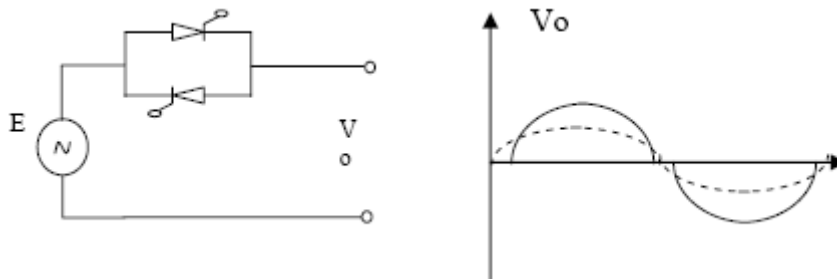
$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S_{w1} - S_{w4}) - (S_{w2} - S_{w5}) \\ (S_{w2} - S_{w5}) - (S_{w3} - S_{w6}) \\ (S_{w3} - S_{w6}) - (S_{w1} - S_{w4}) \end{bmatrix} * [V_m]$$

Επιπλέον, η σχέση ρευμάτων εισόδου-εξόδου είναι:

$$I_m = I_1 + I_2 + I_3 = \begin{bmatrix} S_{w1} & S_{w2} & S_{w3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

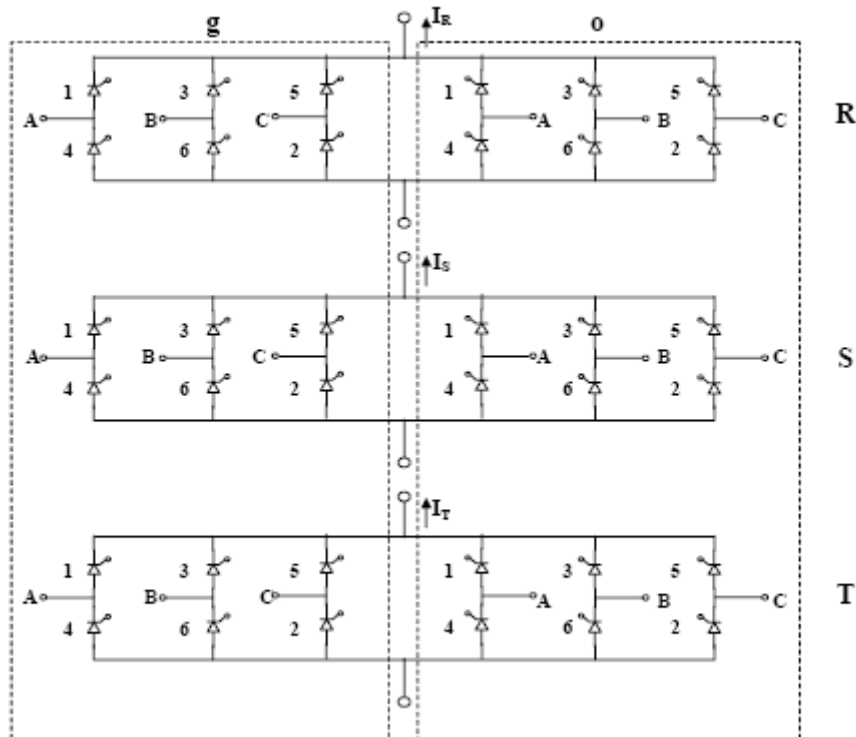
γ) συγχρομετατροπείς (synchro-converters) ή LCI (Load Commutated Inverters, LCI): πρόκειται για ειδική περίπτωση μετατροπέα πηγής ρεύματος (CSI) στην οποία όμως οι διακόπτες ισχύος σβήνουν μόνον με τη βοήθεια του φορτίου τους. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί το κύριο πλεονέκτημά τους καθώς δεν απαιτούνται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

3.5.4 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).



Σχήμα 3.7 : Μονοφασική διάταξη κυκλομετατροπέα [9]

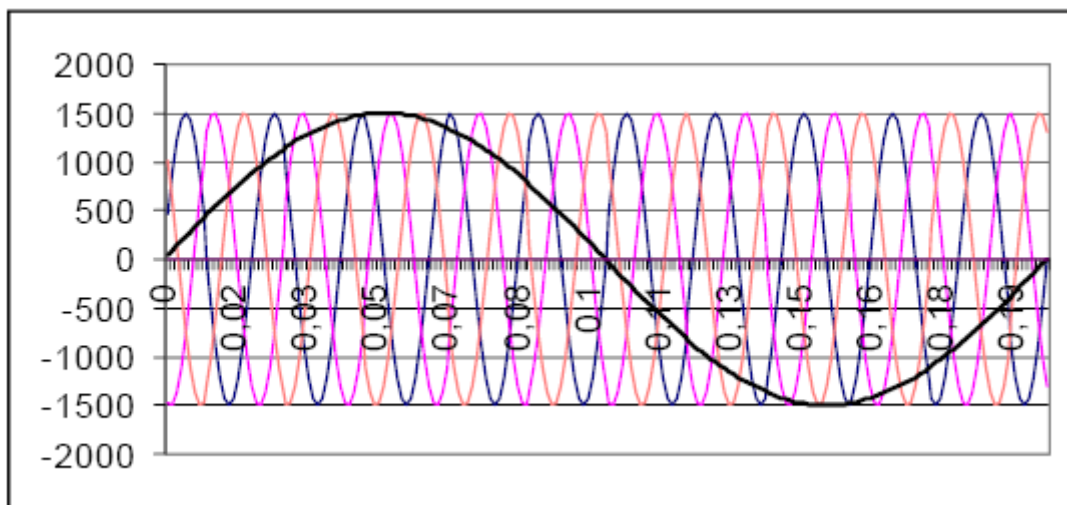
Η απλή περίπτωση ενός τριφασικού κυκλομετατροπέα 6 παλμών (6-παλμικός) αποτελείται από 36 ελεγχόμενους διακόπτες ισχύος, 12 για κάθε φάση. Σε κάθε φάση αντιστοιχούν δύο γέφυρες διακοπών (g και o) με 6 διακόπτες η κάθε μία. Η μία γέφυρα είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία της κυματομορφής κατά τη θετική 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 3.8 έχουν παραλειφθεί για λόγους απλότητας).



Σχήμα 3.8 : Κυκλομετατροπέας 6 παλμών [9]

(Με A,B,C συμβολίζονται οι τρεις φάσεις εισόδου, ενώ με R,S,T οι τρεις φάσεις εξόδου)

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 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 βλ. Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 : Τεχνική SPWM για κυκλομετατροπέα [9]

(οι τρεις τάσεις εισόδου συγκρίνονται με την τάση αναφοράς εξόδου)

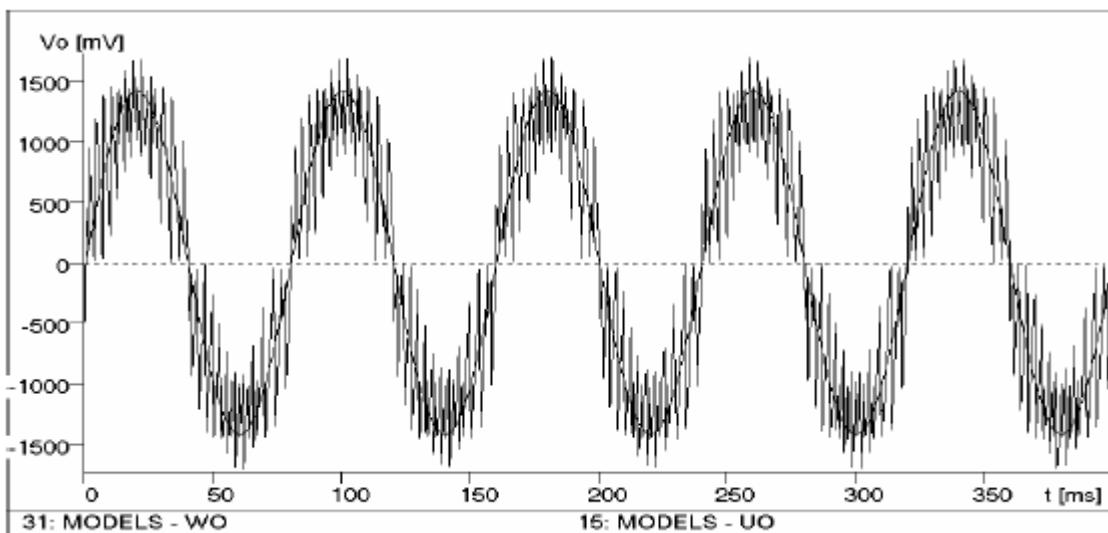
Οι σχέσεις τάσεων εισόδου-εξόδου είναι:

$$\begin{aligned}
 V_{RN} &= V_R - V_N = (S_{wRg1} + S_{wRo1} - S_{wRg4} - S_{wRo4})^* V_A + (S_{wRg3} + S_{wRo3} - S_{wRg6} - S_{wRo6})^* V_B \\
 &\quad + (S_{wRg5} + S_{wRo5} - S_{wRg2} - S_{wRo2})^* V_C \\
 V_{SN} &= V_S - V_N = (S_{wSg1} + S_{wSo1} - S_{wSg4} - S_{wSo4})^* V_A + (S_{wSg3} + S_{wSo3} - S_{wSg6} - S_{wSo6})^* V_B \\
 &\quad + (S_{wSg5} + S_{wSo5} - S_{wSg2} - S_{wSo2})^* V_C \\
 V_{TN} &= V_T - V_N = (S_{wTg1} + S_{wTo1} - S_{wTg4} - S_{wTo4})^* V_A + (S_{wTg3} + S_{wTo3} - S_{wTg6} - S_{wTo6})^* V_B \\
 &\quad + (S_{wTg5} + S_{wTo5} - S_{wTg2} - S_{wTo2})^* V_C
 \end{aligned}$$

Παρόμοια οι σχέσεις ρευμάτων εισόδου- εξόδου είναι:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S_{wRg1} - S_{wRg4}) + (S_{wRo1} - S_{wRo4}) & (S_{wSg1} - S_{wSg4}) + (S_{wSo1} - S_{wSo4}) & (S_{wTg1} - S_{wTg4}) + (S_{wTo1} - S_{wTo4}) \\ (S_{wRg3} - S_{wRg6}) + (S_{wRo3} - S_{wRo6}) & (S_{wSg3} - S_{wSg6}) + (S_{wSo3} - S_{wSo6}) & (S_{wTg3} - S_{wTg6}) + (S_{wTo3} - S_{wTo6}) \\ (S_{wRg5} - S_{wRg2}) + (S_{wRo5} - S_{wRo2}) & (S_{wSg5} - S_{wSg2}) + (S_{wSo5} - S_{wSo2}) & (S_{wTg5} - S_{wTg2}) + (S_{wTo5} - S_{wTo2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix}$$

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.



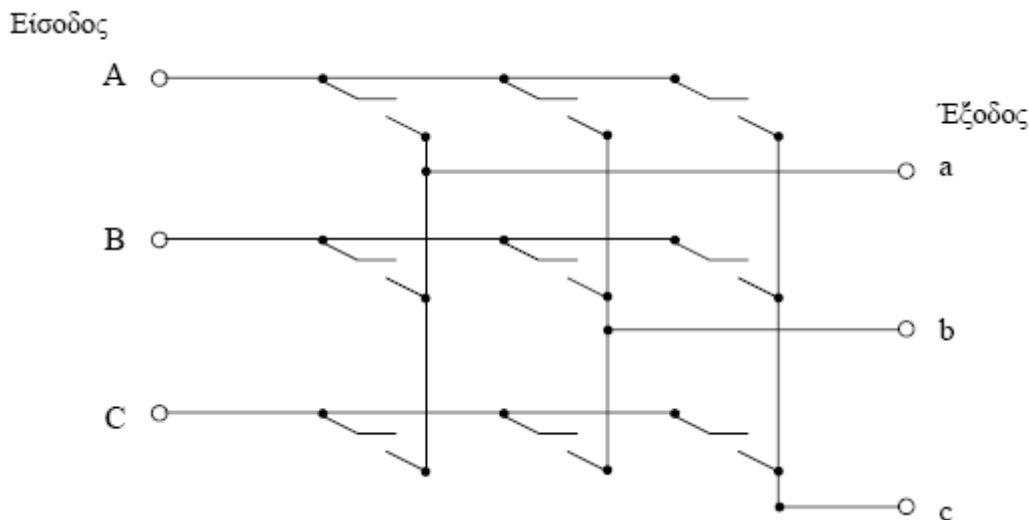
Σχήμα 3.10 : Τάση εξόδου κυκλομετατροπέα 6-παλμών
(στο εσωτερικό φαίνεται η θεμελιώδης συνιστώσα) [9]

Οι έξοδοι του κυκλομετατροπέα 12 παλμών μπορεί να τροφοδοτούν είτε ένα απλό τριφασικό τύλιγμα κινητήρα, είτε το διπλό τριφασικό τύλιγμα ενός ειδικού τύπου κινητήρα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται περαιτέρω μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων.

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.

3.5.5 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.



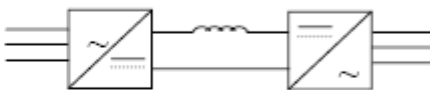
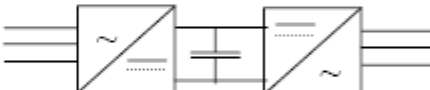
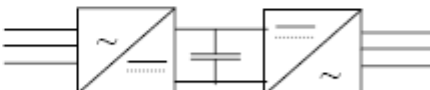

Παρόμοια με τους κυκλομετατροπείς, οι μεταγωγές καταστάσεων (από αγωγή σε σβέση και το αντίστροφο) των ηλεκτρονικών διακοπών ενέχουν τον κίνδυνο βραχυκυκλωμάτων μεταξύ των φάσεων.



Σχήμα 3.11 : Μητροειδής μετατροπέας [1]

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.

Πίνακας 3.1 Συγκεντρωτική παρουσίαση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος για ηλεκτρική πρόωση. [1]

Μετατροπέας	Διάταξη	Μέγιστη ισχύς	Κυριαρχούσες αρμονικές
Ανορθωτής		>6 MVA	$6.n.f_i$
Αντιστροφέας CSI		1 MVA	$(3k\pm 1).f_o$
Αντιστροφέας LCI		>30 MVA	$(3k\pm 1).f_o$
Αντιστροφέας VSI		2 MVA	$(3k\pm 1).f_o$
Αντιστροφέας PWM		2 MVA (IGBT) 6 MVA (GTO)	$2.n.f_o$
Κοκκιομετατροπέας		>30 MVA	$6.n.f_i \pm (2.p+1).f_o$

$n=1,2,3,\dots$ $k=2,4,6,\dots$ $p=0,1,2,3,\dots$ f_i =συχνότητα εισόδου f_o =συχνότητα εξόδου

3.6 Τεχνικές Ελέγχου Κινητήρων Πρόωσης EP

Ο έλεγχος της ταχύτητας και της ροπής ενός κινητήρα EP 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), 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. Στη συνέχεια ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή όλων των μεθόδων ελέγχου κινητήρων EP με έμφαση σε αυτές που εφαρμόζονται σε κινητήρες ηλεκτρικής πρόωσης.

3.6.1 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), I_f και του ρεύματος τυλίγματος τυμπάνου, I_A :

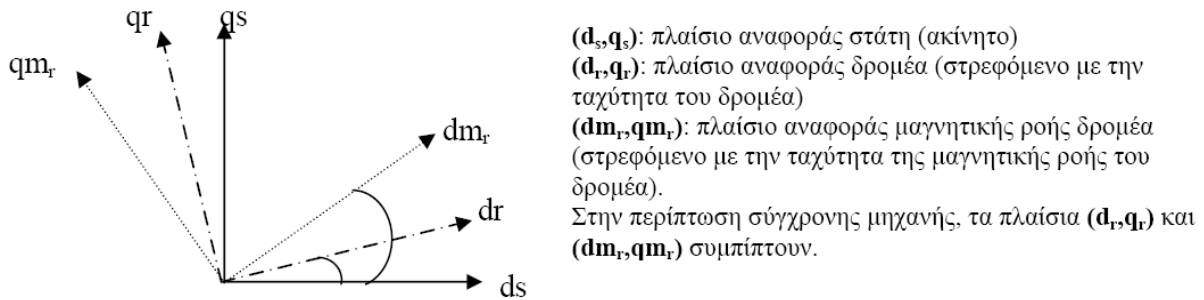
$$M = k \cdot I_f \cdot I_A$$

Στην μηχανή ΣΡ όμως τα δύο ηλεκτρομαγνητικά πεδία είναι σταθερά στο χώρο και σε 90ο 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, d) και τη συνιστώσα εγκάρσιου άξονα (quadrature axis, 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, βλ. Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12 : Πλαίσια αναφοράς για διανυσματικό έλεγχο κινητήρων ΕΡ [1]

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_{mr}, q_{mr}) που στρέφεται με το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του δρομέα:

$$M = k \cdot i_{s,dmr} \cdot i_{s,qmr}$$

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 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. 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).

Κεφάλαιο 4

Μονάδα Azipod

4.1 Γενικά για την μονάδα Azipod

4.1.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Η κατοχυρωμένη ευρεσιτεχνία του συστήματος πρόωσης της ABB είναι μία αρθρωτή μονάδα η οποία είναι προσαρμοσμένη εξωτερικά του πλοίου και έχει δυνατότητα περιστροφής πάνω από 360°. Προσφέρει δε μεγάλη δυνατότητα ελιγμών και σημαντική μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, θορύβου, δονήσεων και εσωτερικών χώρων σε περίπτωση που χρειάζονται να τοποθετηθούν συμβατικά συστήματα οδήγησης. Πρόκειται για ένα rod προώσεως, που η ABB πρότεινε, ένα σύστημα στο οποίο μια πηδαλιουχούμενη Azipod μονάδα τοποθετείται αμέσως πίσω από τον κύριο έλικα.

Τοποθετημένο στον ίδιο άξονα, αλλά χωρίς καμία φυσική σύνδεση, το σύστημα rod περιστρέφεται ανάποδα σε σχέση με την κύρια έλικα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ρύθμιση σε βελτίωση κατά 10% περίπου στην υδροδυναμική απόδοσης της πρόωσης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τελικά με τη χρήση του Azipod η έλικα μπορεί να έχει ευέλικτη προσαρμογή. Η κύρια έλικα έχει 60 - 70% του φορτίου και η έλικα Azipod το 40 - 30% φορτίο. Η διάμετρος της έλικας του Azipod είναι μικρότερη από αυτή της κύριας έλικας για να αποτρέψει μια πιθανή δίνη από σπηλαίωση. Ο αριθμός των λεπίδων της έλικας είναι διαφορετικός από αυτόν της κύριας έλικας, η ταχύτητα της έλικας Azipod είναι μεγαλύτερη από αυτή της κύριας έλικας, η γωνία περιστροφής της έλικας Azipod είναι 100 βαθμοί (μια άλλη επιλογή είναι ελεύθερη περιστροφή 360°).

Ο πρώτος υπερπληρωτής ABB μπήκε σε παραγωγή το 1923. Αποτέλεσμα της συνεχούς έρευνας και ανάπτυξης είναι οι καινούργιοι τύποι υπερπληρωτών οι οποίοι υπερέχουν σε τομείς όπως ο εντυπωσιακά αυξημένος βαθμός απόδοσης και η μεγάλη δυνατότητα εφαρμογών τους με ταυτόχρονη μείωση των ανταλλακτικών από τα οποία αποτελούνται. Για τον χρήστη αυτό μεταφράζεται σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, απλούστερη και σπανιότερη συντήρηση δηλαδή μείωση των λειτουργικών εξόδων. Στα πλεονεκτήματα συμπεριλαμβάνονται:

- Υψηλή απόδοση στη πρόωση που προσφέρει μεγαλύτερη οικονομία καυσίμου.
- Το ναυπηγικό κόστος είναι λογικό, καθώς απαιτείται λιγότερη εγκατεστημένη ισχύς.
- Καλύτερο χρόνο ελλιμενισμού (είσοδο – έξοδο από το λιμάνι), καθώς οι ελιγμοί είναι ευκολότεροι και απαιτείται λιγότερη βοήθεια ρυμουλκού.

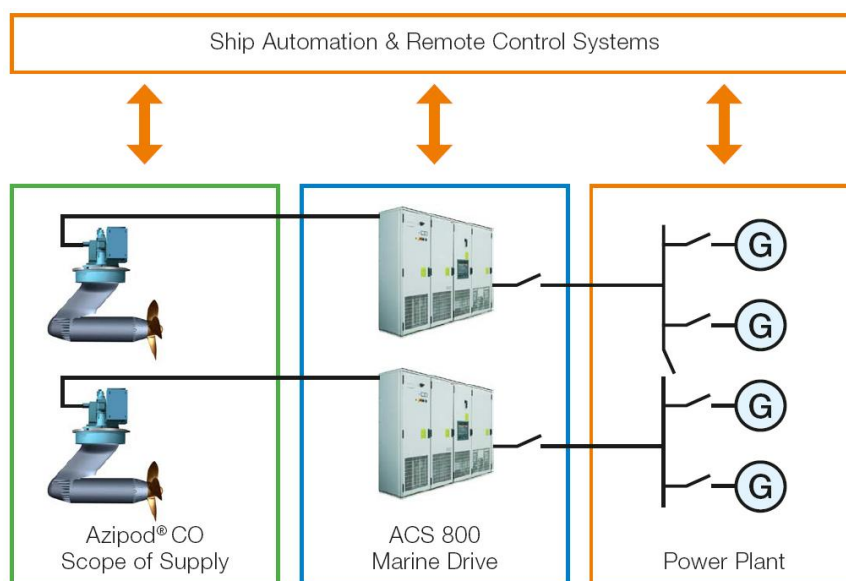
- Αύξηση της ικανότητας μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (τόσο σε χώρο όσο και σε βάρος).

4.1.2 Προώθηση Azipod και οδήγηση

Το κύριο σύστημα προώθησης και οδήγησης Azipod CO αναπτύχθηκε αρχικά με τις εμπειρίες που αποκτήθηκαν από την ήδη υπάρχουσα οικογένεια των μεγαλύτερων προϊόντων Azipod. Το Azipod είναι μια rodded ηλεκτρική κύρια συσκευή προώθησης και οδήγησης, που οδηγεί έναν σταθερού βήματος προωστήρα με μια μεταβλητή ρύθμιση ταχύτητας. Η μονάδα Azipod CO έχει σχεδιαστεί για άμεση ώθηση του προωστήρα προς τα εμπρός. Το Azipod CO μπορεί να περιστραφεί γύρω από τον κάθετο άξονά του κατά 360°. Το πλήρες σύστημα αποτελείται από τον απαραίτητο αριθμό προωστήρων οδήγησης Azipod CO, και ενός οδηγητή για κάθε Azipod. Επιπλέον τους μετασχηματιστές ανεφοδιασμού προώθησης (εάν είναι απαραίτητο) και τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας (γεννήτριες, δίκτυο επικοινωνίας).

4.1.3 Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις προώθησης και παραγωγής ενέργειας.

Προκειμένου να οδηγηθεί το σύστημα προώθησης Azipod το σκάφος χρειάζεται εγκαταστάσεις ηλεκτρικής δύναμης. Ο μετατροπέας τροφοδοτεί την εγκατάσταση με τάση τροφοδοσίας των 50 ή 60 Hz που πρόκειται να τροφοδοτήσει όλα τα ηλεκτρικά φορτία συμπεριλαμβανομένης της μονάδας Azipod. Το βασικό εργαλείο για το σχέδιο εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι το αποκαλούμενο μονογραμμικό διάγραμμα (Σχήμα 4.1). Η πραγματική εν πλω διαμόρφωση μπορεί να συζητηθεί αποτελεσματικά ήδη στα πρώτα στάδια της εργασίας με τη χρησιμοποίηση αυτής της σαφούς οπτικής αντιπροσώπευσης.



Σχήμα 4.1: Απλουστευμένο μονογραμμικό διάγραμμα εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας με ένα σύστημα προώθησης. [3]

4.2 Τροφοδοσία

Η μονάδα οδήγησης προορίζεται για τη σύνδεση στο σκάφος hull, και ενεργεί ως δομικό διασυνδετικό στοιχείο με τον μηχανισμό πρόωσης. Η μονάδα οδήγησης περιλαμβάνει τους πλήρως ηλεκτρομηχανικούς μηχανισμούς οδήγησης καθώς επίσης και τα λειτουργικά εξαρτήματα και τα σημεία σύνδεσης για την πρόωση και την οδήγηση.

Η μονάδα πρόωσης του CO περιλαμβάνει ένα σύγχρονο κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες με έναν σταθερό προωστήρα που τοποθετείται άμεσα επάνω στον άξονα του κινητήρα. Ο κινητήρας ψύχεται άμεσα μέσω της μεταφοράς στο περιβάλλον θαλάσσιου νερού, χωρίς τη χρήση οποιονδήποτε πρόσθετων μέσων ψύξης. Η μονάδα πρόωσης συνδέεται με τη μονάδα οδήγησης με τη βοήθεια μιας κοιλοδοκού από χυτοχάλυβα.

Η κοιλοδοκός ενεργεί επομένως ως συνδετικό συστατικό στη δομή του CO. Τα καλώδια ελέγχου, καθώς επίσης και οι μπάρες τροφοδότησης παροχής ηλεκτρικού ρεύματος και η διοχέτευση με σωλήνες βρίσκονται μέσα σε αυτήν την κοιλοδοκό.

4.3 Στοιχεία κατασκευής του Azipod.

Κάθε Azipod CO αποτελείται από έξι (6) χωριστά στοιχεία για την εγκατάσταση του στο σκάφος:

Μια (1) μονάδα οδήγησης (σε σύνδεση με το σκάφος)

Μια (1) μονάδα πρόωσης (κοιλοδοκός, μηχανή και προπέλα)

Δύο (2) Drive μονάδες (ηλεκτρονικός θαλαμίσκος ισχύος)

Δύο (2) μονάδες φρένων (εξάρτημα εργαλείων οδήγησης)

Στοιχεία σκάφους.

Εκτός από τα παραπάνω, περιλαμβάνονται όλα ή τα περισσότερα από τα ακόλουθα στοιχεία:

A. Ένα Drive δύναμης πρόωσης ανά κάθε Azipod CO

B. Απομακρυσμένο σύστημα ελέγχου

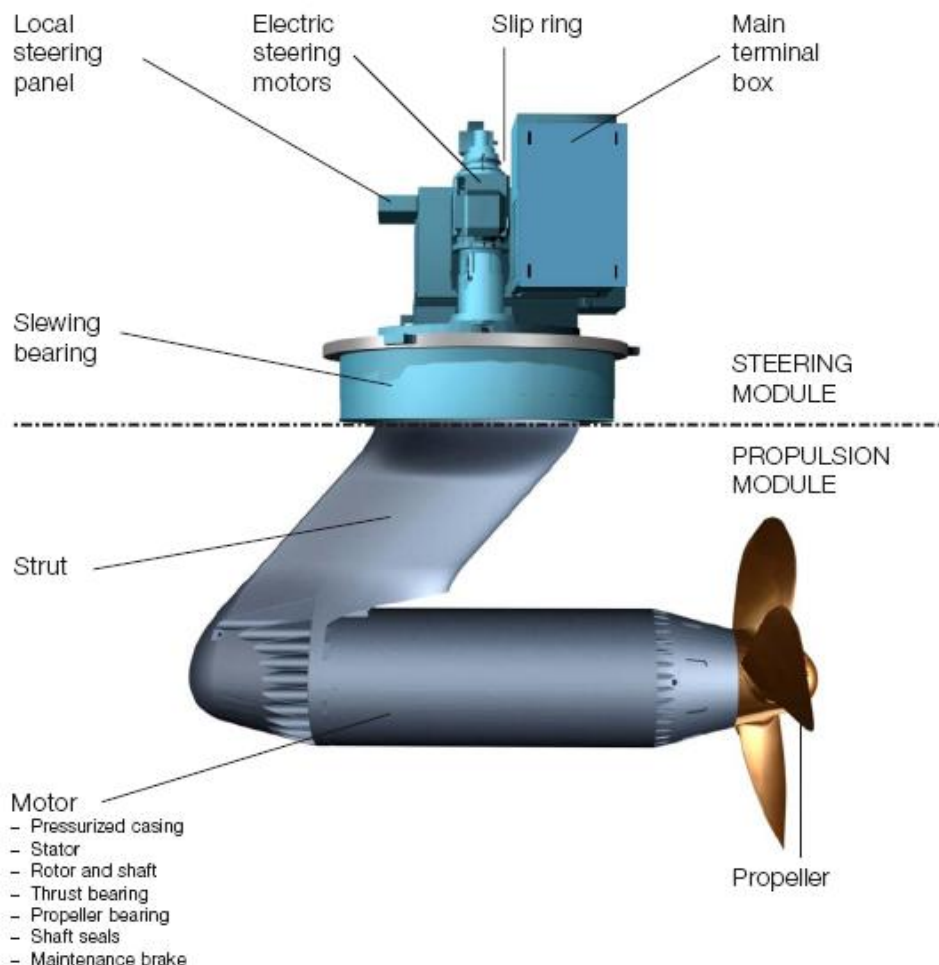
Γ. Δικτύο επικοινωνίας γεννητριών ισχύος και πίνακα διανομής.

Μηχανισμός οδήγησης.

Ο μηχανισμός οδήγησης αποτελείται από τα τοπικά κιβώτια ελέγχου, δακτύλιους ολίσθησης, κινητήρες οδήγησης με μειωτήρες και το σύστημα περιστροφής.

Μηχανισμός πρόωσης.

Ο κινητήρας και η κοιλοδοκός τοποθετούνται μαζί με τον προωστήρα για να διαμορφώσουν την μηχανισμό πρόωσης (Σχήμα 4.2). Η μονάδα πρόωσης συνδέεται στο ναυπηγείο με τον μηχανισμό οδήγησης. Ο μηχανισμό πρόωσης περιλαμβάνει ένα σύγχρονο κινητήρα με μόνιμους μαγνήτες, με έλικα σταθερού βήματος που τοποθετείται άμεσα επάνω στον άξονα του κινητήρα. Το τμήμα του μηχανισμού πρόωσης επομένως περιλαμβάνει την πλήρη ηλεκτρική μηχανή με τα ρουλεμάν, τις τσιμούχες αξόνων και το φρένο συντήρησης. Η εγκατάσταση μόνιμων μαγνητών έχει διάφορα πλεονεκτήματα. Το σχέδιο επιτρέπει στη μηχανή για να ψύχεται άμεσα μέσω της μεταφοράς στο περιβάλλον θαλάσσιου νερού χωρίς τη χρήση οποιωνδήποτε πρόσθετων μέσων ψύξης. Η εξωτερική διάμετρος της μηχανής μπορεί έτσι να μειωθεί. Οι τσιμούχες αξόνων προωστήρων στεγανοποιούν τους άξονες μεταφοράς κίνησης, ώστε να μην έρχονται σε επαφή με το νερό. Η καθορισμένη πίεση αέρα μέσα στη μηχανή αποτρέπει το νερό θάλασσας από την είσοδο στην μηχανισμό πρόωσης. Η κοιλοδοκός σχεδιάζεται για να ενισχύσει την υδροδυναμική απόδοση της μονάδας οδήγησης και ενεργεί επίσης ως συνδετικό στοιχείο στη δομή το Azipod CO. Οι μπάρες τροφοδότησης Τα καλώδια ελέγχου και τροφοδοσίας, οι σωλήνες και οι bus μπάρες του δικτύου του ηλεκτρικού ρεύματος για τον κινητήρα πρόωσης βρίσκονται μέσα στην κοιλοδοκό.



Σχήμα 4.2: Βασικά λειτουργικά στοιχεία του Azipod. [3]

Οδηγοί μονάδων κίνησης.

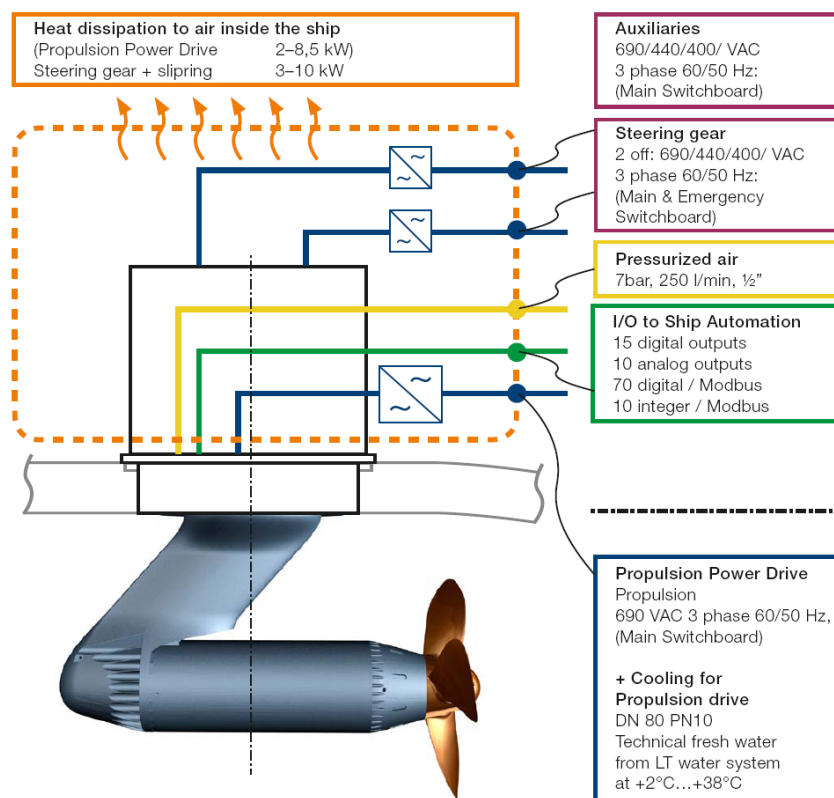
Ο ηλεκτρικός μηχανισμός πιδάλιου του Azipod CO οδηγείται από δύο (συνήθως) μονάδες Drive. Αυτές οι μονάδες οδήγησης λειτουργούν μαζί με την αρχή master-slave. Σε περίπτωση δυσλειτουργίας σε μια από τις μονάδες, άλλη μπορεί να οδηγήσει το Azipod με μια χαμηλότερη ροπή διεύθυνσης. Οι μονάδες οδήγησης βρίσκονται εγκατεστημένες στο δωμάτιο Azipod. Το μέγιστο διαθέσιμο ποσοστό οδήγησης είναι 12 (δώδεκα) βαθμοί ανά δευτερόλεπτο.

Μονάδες φρένων αντίστασης (για το μηχανισμό οδήγησης).

Δύο μονάδες φρένων αντίστασης απαιτούνται ως εξαρτήματα για κάθε μηχανισμό οδήγησης Azipod CO. Το κύκλωμα αντιστατών απορροφά τη λειτουργική αντίστροφη δύναμη από την αντίστοιχη ηλεκτρική μηχανή οδήγησης. Οι μονάδες αντιστατών φρένων εγκαθίστανται στο δωμάτιο Azipod.

4.4 Εγκατάσταση στο σκάφος

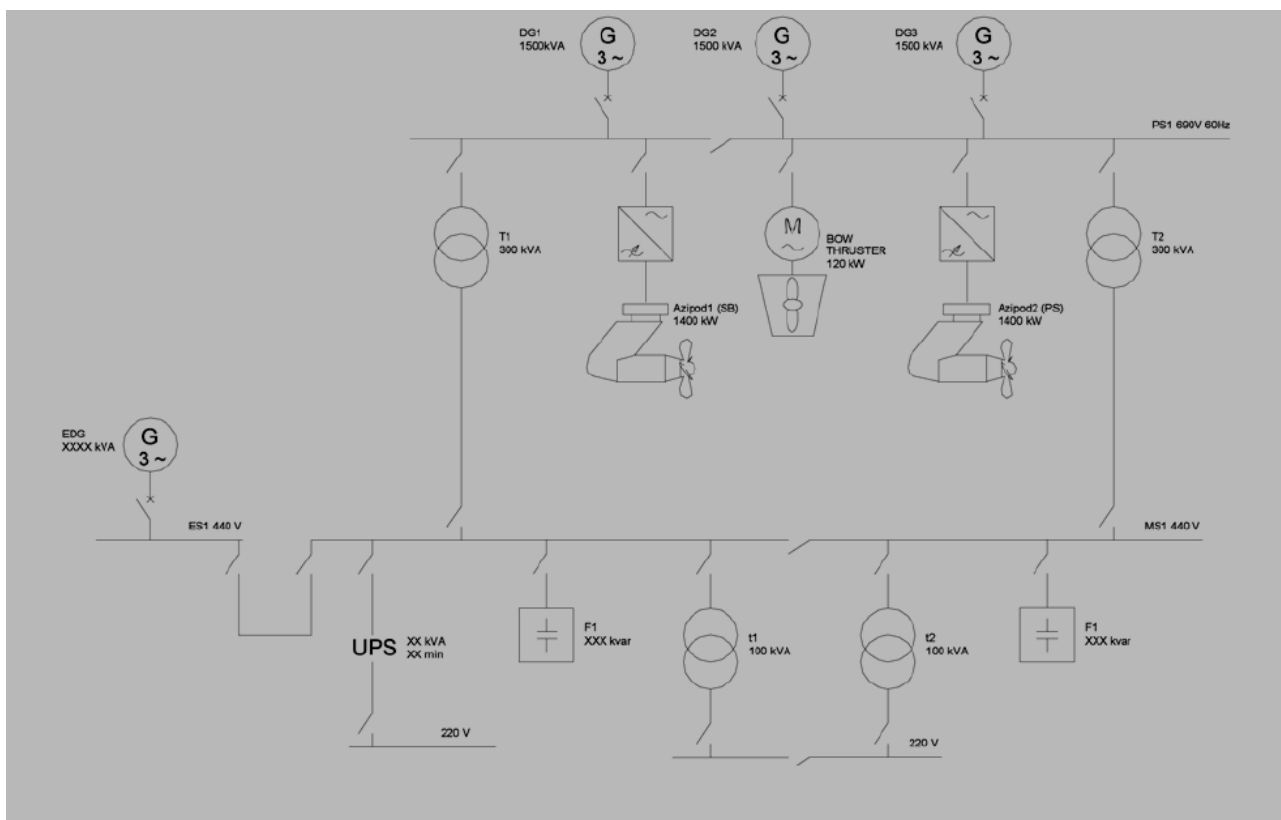
Ο έλεγχος στη πρόωση με Azipod CO μπορεί να κατασκευαστεί ώστε να λειτουργήσει με ή χωρίς το σύστημα αυτοματισμού του πλοίου. Το σύστημα αυτοματισμού του πλοίου απαιτείται για τον ωστόσο για την οπτική παρακολούθηση του συστήματος πρόωσης. Πρέπει επίσης να ελέγξει τους βοηθητικούς μηχανισμούς πρόωσης, π.χ. τη ροή του νερού ψύξης. Η σύνδεση του αυτοματισμού του πλοίου πραγματοποιείται με ένα σειριακό καλώδιο δεδομένων και με ενσύρματες συνδέσεις.



Σχήμα 4.3 : Σκαρίφιμα διαγράμματος σύνδεσης πλοίου με Azipod [3]

4.5 Παραδείγματα τυπικών εγκαταστάσεων

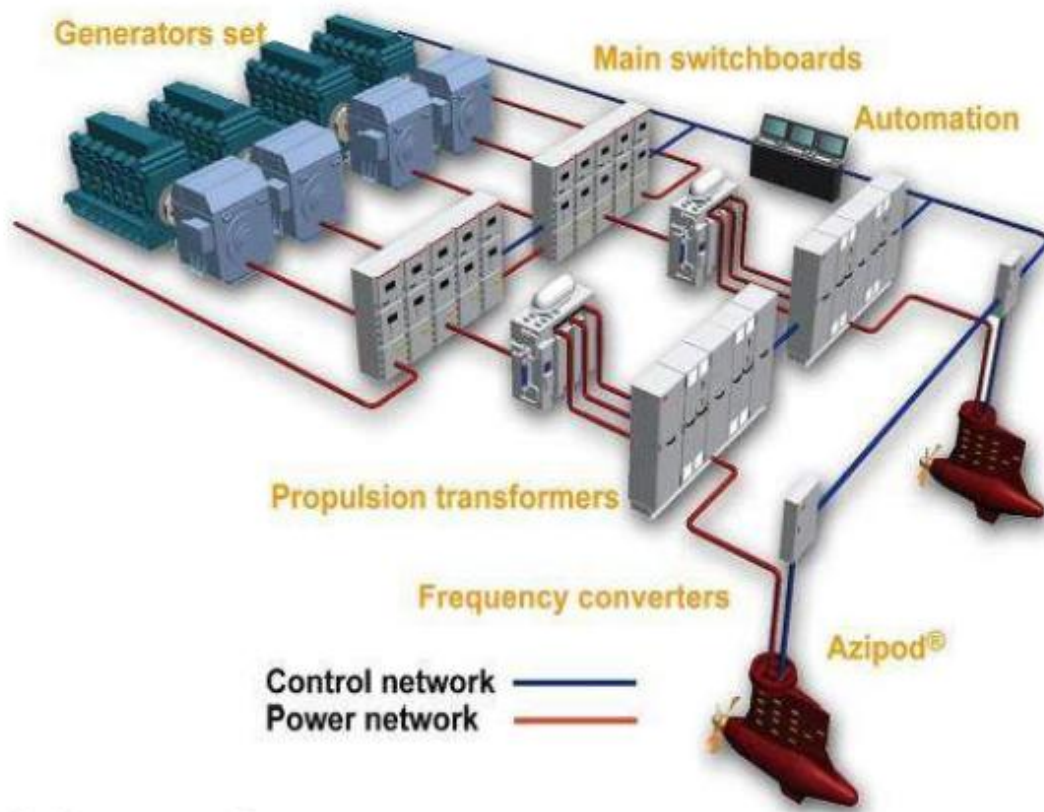
Η ηλεκτρολογική εγκατάσταση προσφέρει ουσιαστικά σε όλα τα ηλεκτρομηχανολογικά δίκτυα. Αυτό επιτυγχάνεται με σύνδεση των γεννητριών με το δίκτυο μόνο σε υψηλές απαιτήσεις φορτίων. Πράγματι μπορεί να λειτουργήσει τις κύριες μηχανές με υψηλά φορτία όλη την ώρα αφού κρατά το σύστημα πρόωσης έτσι αυξάνει τα επίπεδα της αποτελεσματικότητας του. Το ακόλουθο μονογραμμικό διάγραμμα (Σχήμα 4.4) δείχνει την αρχή της ρύθμισης και την ευελιξία διαμόρφωσης του ηλεκτρικού συστήματος πρόωσης.



Σχήμα 4.4: Παράδειγμα χαρακτηριστικών εγκαταστάσεων ηλεκτρικής δύναμης [3]

Σε αυτό το χαρακτηριστικό παράδειγμα οι τρεις κύριες γεννήτριες συνδέονται με τον κύριο πίνακα διανομής και ο γενικός πίνακας χαμηλής τάσης τροφοδοτείται από μετασχηματιστές. Η παραμόρφωση των συνολικών αρμονικών (THD) περιορίζεται στο επιθυμητό επίπεδο με τη χρήση των φίλτρων. Ο κύριος πίνακας διανομής μπορεί να διαιρεθεί σε δύο χωριστά δίκτυα με τη βοήθεια του διακόπτη για να αυξήσει το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ισχύς. Μια χαρακτηριστική διαμόρφωση συστήματος με την χρήση Azipod CO αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- Τρεις κύριες γεννήτριες
- Πίνακα διανομής ηλεκτρικής πρόωσης 690 V με έναν διακόπτη
- Δύο ACS 800 Drive μετατροπείς ισχύος συχνότητας
- Δύο propulsors οδήγησης Azipod CO1400
- Πηδάλιο πλώρης με ηλεκτροκίνητο μοτέρ
- Δύο μετασχηματιστές για παροχή στα φορτία του πλοίου 690V/440V
- Ηλεκτρικό πίνακα 440V
- Φίλτρα για συνολικές αρμονικές παραμόρφωσεις (THD)
- UPS και ηλεκτρικό πίνακα παροχής UPS
- Δύο μετασχηματιστές χαμηλής τάσης 440V/220V
- Ηλεκτρικό πίνακα 220V
- Γεννήτρια εκτάκτου ανάγκης
- Ηλεκτρικό πίνακα διανομής φορτίων έκτακτης ανάγκης



Σχήμα 4.5: Το ηλεκτρικό κύκλωμα του Azipod [3]

Κεφάλαιο 5

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης

5.1 Πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης, είναι τα ακόλουθα:

- Περιορισμός των εκπεμπόμενων ρύπων. Αφενός η κατανάλωση καυσίμου είναι μικρότερη, αφ' ετέρου οι εκπομπές NOx (ιδιαίτερα) είναι αισθητά χαμηλότερες όταν λόγω χάρη ένας μεσόστροφος κινητήρας Diesel λειτουργεί με σταθερές στροφές πράγμα που 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.
- Συνεχής μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της έλικας
- Συνεχής μεταβολή της ταχύτητας και της ταχύτητας του πλοίου σε όλο το πεδίο 0- 100 %.
- Γρήγορη απόκριση κατά τη διάρκεια των χειρισμών
- Χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών.
- Οικονομία καυσίμου αφού η κάθε μια μηχανή μπορεί να λειτουργεί κοντά στο βέλτιστο σημείο αν γίνει σωστή επιλογή.
- Εξοικονόμηση ωφέλιμου χώρου, άρα ευελιξία στον σχεδιασμό του σκάφους αφού υπάρχει 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.

5.1 Μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης

Τα μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης είναι λιγότερα έναντι των πλεονεκτημάτων.

Μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης είναι τα εξής:

- Υψηλό κόστος επένδυσης αφού το κόστος των κινητήρων και των διατάξεων ελέγχου τους δεν δείχνει να υπερκερνάται εύκολα, παρόλο που ένας μεγάλος αριθμός επιστημόνων στην ερευνητική κοινότητα ασχολούνται με τη δυνατότητα μείωσης του.
- Υψηλότερες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, σε σύγκριση με το μηχανικό σύστημα. 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.
- Προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της χρησιμοποίησης των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, αφού πέραν των χρήσιμων συχνοτήτων αναπτύσσεται και μεγάλο πλήθος αρμονικών συνιστωσών ρεύματος και τάσεως. Έτσι ο "ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος" που παράγεται επηρεάζει αρνητικά όλες τις ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις – πρωτίστως τα κυκλώματα ελέγχου των ίδιων των ηλεκτρονικών ισχύος. Τέλος, είναι δυνατόν οι αρμονικές παραμορφώσεις των ηλεκτρικών μεγεθών να διεγείρουν ιδιοσυχνότητες, όπως είναι τα φαινόμενα σιδηροσυντονισμού στους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

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).

Επίλογος - Συμπεράσματα

Η ηλεκτρική πρόωση αποτελεί μία ιδιέταιρα αξιόλογη επιλογή για τα πλοία η οποία συνεχώς κερδίζει έδαφος. Η εντατική εξέλιξη όλων των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων και κυρίως στον τομέα των διατάξεων ελέγχου των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος είναι ο βασικότερος λόγος που η ηλεκτροπρόωση κερδίζει περισσότερο έδαφος μέρα με τη μέρα στις αγορές του κόσμου. Πλέον παράγονται και χρησιμοποιούνται όλο και φθηνότεροι κινητήρες, που χρειάζονται όλο και φθηνότερη συντήρηση.

Η έρευνα εστιάζει στη μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης αλλά και στην αύξηση των επιδόσεων του συνολικού συνδυασμού των διατάξεων που αξιοποιούνται από συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης. Δεδομένου ότι η τεχνολογία των ηλεκτρονικών και των υπολογιστικών συστημάτων αναπτύσσεται με γεωμετρική πρόοδο, αλλά και ότι υπάρχει πίεση για λιγότερους ρίπους στον πλανήτη και για μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων και παραγώγων τους, εικάζεται ότι σε ελάχιστα χρόνια η ηλεκτρική πρόωση θα είναι η νούμερο ένα επιλογή στα πλοία.

Βιβλιογραφία

- [1] 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", Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς στην Ελλάδα: υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές, Δήμερο TEE, 12-13 Ιανουαρίου 2006.
- [2] ABB, A. K. Adnanes, «Maritime electrical installations and diesel – electric propulsion», Tutorial Report/Textbook, ABB Marine AS, Oslo, Norway, 2003.
- [3] ABB, “Azipod® CO Product Introduction technical Guide”.
- [4] ABB Marine, “Azipod propulsion-Azimuthing Electric Propulsion Drive” .
- [5] N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins, «Power Electronics, Converters, Applications and Design», John Wiley & Sons, Inc, 1995, μεταφρασμένο στην ελληνική γλώσσα με τίτλο: «Ηλεκτρονικά Ισχύος, Μετατροπείς, Εφαρμογές, Σχεδίαση, Δεύτερη Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 1996, ISBN 960-7219-42-2.
- [6] Stephen J. Chapman «Electric Machinery Fundamentals», McGraw-Hill, 2000, μεταφρασμένο στην ελληνική γλώσσα με τίτλο: «Ηλεκτρικές μηχανές AC-DC», Τρίτη Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003, ISBN 960-8129-11-7.
- [7] Α.Κλιάνη, Ι. Νικολού, Ι. Σιδέρη «Μηχανές εσωτερικές καυσεως», Ίδρυμα Ευγενίδου, Πρώτη Έκδοση, 2003, ISBN 960-337-047-9.
- [8] Δεληγιάννης Θεόδωρος, «Ηλεκτρονικά», Ίδρυμα Ευγενίδου, Πρώτη Έκδοση, 2004, ISBN 960-337-053-3.
- [9] Σημειώσεις Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογία.,
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Ηλεκτρονικά ισχύος.
- [10] Engineering Knowledge Seamanship International – demo.

Ιστοσελίδες

- 1. www.abb.com
- 2. www.el.wikipedia.org
- 3. ww.translate.google.gr
- 4. www.wikipedia.org

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	4
Πρόλογος	5
Κεφάλαιο 1: Συστήματα πρόωσης.....	7
Κεφάλαιο 2: Εναλλακτικές διαμορφώσεις ηλεκτρικών δικτύων πλοίων	13
Κεφάλαιο 3: Σύγχρονη τεχνολογία	32
Κεφάλαιο 4: Μονάδα Azipod	47
Κεφάλαιο 5: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης.....	54
Επίλογος - Συμπεράσματα	56
Βιβλιογραφία.....	57