



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**Το πλήρως εξηλεκτρισμένο πολεμικό πλοίο
και η οικονομικοτεχνική προσιτότητα στην
κατασκευή του**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΗΤΑΣ Μιχαήλ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Ι. ΠΡΟΥΣΑΛΙΔΗΣ



ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2007



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Το πλήρως εξηλεκτρισμένο πολεμικό πλοίο και η οικονομικοτεχνική προσιτότητα στην κατασκευή του

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΝΙΚΗΤΑΣ Μιχαήλ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Ι. ΠΡΟΥΣΑΛΙΔΗΣ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

.....
Χρίστος Φραγκόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Προυσαλίδης
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δημήτριος Λυρίδης
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, ΙΟΥΛΙΟΣ 2007

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ηλεκτρική πρόωση στα πολεμικά πλοία είναι μια εναλλακτική πρόταση πρόωσης με αποδεδειγμένα πλεονεκτήματα και υψηλές δυνατότητες. Απαντάται δε σήμερα σε πολλούς τύπους σκαφών, συμβατικών και πολεμικών, και αξιολογείται ως επιλογή σε πολλά προγράμματα ναυπήγησης νέων μονάδων.

Πολλά κράτη δαπανούν αρκετά χρήματα για την διεξαγωγή ερευνών προς αυτή την κατεύθυνση και πρόσφατες μελέτες και συμπεράσματα διεθνών επιστημονικών συνεδρίων καταδεικνύουν την ηλεκτρική πρόωση ως μια πολλά υποσχόμενη λύση πρόωσης πολεμικών πλοίων, που, προς το παρόν, βρίσκεται στην αρχή.



USS NEW MEXICO - BB40
~1918
US Navy's First "All Electric Warship"

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στο τελευταίο συνέδριο που διεξήχθη το 2004 στο Λονδίνο, συμμετείχαν πάνω από 27 κράτη με ερευνητικό και στρατιωτικό προσωπικό, ενώ ήδη επιχειρούν στον παγκόσμιο θαλάσσιο χάρτη πολλά πλοία, εμπορικά και πολεμικά, πλήρως εξηλεκτρισμένα .

Το τελευταίο διάστημα, εκτός από τις ναυπηγήσεις πλήρως εξηλεκτρισμένων πολεμικών πλοίων σε κάποια κράτη, μεγάλος όμιλος Ελληνικών Ναυπηγείων σε συνεργασία με τους αρμόδιους φορείς της πολιτείας, μελετούν τις προϋποθέσεις κατασκευής πολεμικού πλοίου, μεσαίου εκτοπίσματος, πλήρως εξηλεκτρισμένου, από ελληνικά χέρια και τα μηνύματα είναι προς το παρόν ενθαρρυντικά.

Στην παρούσα, γίνεται μια τεχνική περιγραφή χαρακτηριστικών εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των παρελκομένων αυτής, προκειμένου να γνωρίσει ο αναγνώστης τους τύπους και τα χαρακτηριστικά κάθε μηχανήματος που υποστηρίζει το πλήρως εξηλεκτρισμένο σκάφος. Πρόσθετη δε σημασία δίδεται στους μετατροπείς συχνότητας (frequency converters), ο τύπος των οποίων είναι το σημαντικότερο χαρακτηριστικό γνώρισμα των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, γίνεται μια αναφορά στο θέμα της Οικονομικό-Τεχνικής Προσιτότητας στις κατασκευές των

πολεμικών πλοίων και αναλύονται οι τρόποι με τους οποίους μπορεί ένας στόλος πολεμικών πλοίων να γίνει περισσότερο προσιτός οικονομοτεχνικά.

Η ηλεκτρική πρόωση έχει διάφορα πλεονεκτήματα, με την εκμετάλλευση των οποίων τα πολεμικά πλοία μπορούν να καταστούν αποτελεσματικότερα στις ανατιθέμενες αποστολές τους. Εάν αυτά τα χαρακτηριστικά ληφθούν υπόψη, τότε η ηλεκτρική πρόωση, παρά τα μειονεκτήματά της, όπως οι υψηλές ηλεκτρικές απώλειες και σε μερικές περιπτώσεις το υψηλό κόστος κτήσης, είναι σχεδόν ισότιμη ή ακόμα και καλύτερη επιλογή πρόωσης από τις αντίστοιχες συμβατικές εναλλακτικές λύσεις. Σε πολεμικά πλοία, οι έννοιες αυτές αντικαθίστανται από τη γενικότερη έννοια του έργου και της απόδοσης μιας και δίδεται μερικώς έμφαση στο οικονομικό μέρος της κάθε εφαρμογής.

Εκτός από το οικονομικό μέρος της σύγκρισης μεταξύ διάφορων επιλογών πρόωσης, η ηλεκτρική πρόωση προσφέρει μερικές δυνατότητες, οι οποίες δεν μπορούν να μεταφραστούν ποσοτικά άμεσα αλλά είναι πολύ σημαντικές στη λειτουργία του πλήρως εξηλεκτρισμένου πολεμικού πλοίου. Η εφεδρεία (redundancy) και η διαθεσιμότητα, η ευκολία του ελέγχου και οι εξαιρετικές ελικτικές ικανότητες, καθώς επίσης και η ευκολότερη συντήρηση είναι θέματα, τα οποία οι χειριστές και οι πλοιοκτήτες, δηλαδή τα πολεμικά ναυτικά διαφόρων κρατών, πρέπει να εξετάσουν, ακόμα κι αν η ηλεκτρική πρόωση τείνει να είναι ελαφρώς ακριβότερη στην εφαρμογή της από τις αντίστοιχες συμβατικές μορφές πρόωσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2. Η ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Γενική περιγραφή των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	4
2.2 Κύριες μηχανές	
2.2.1 Μηχανές diesel	7
2.2.2 Αεριοστρόβιλοι	8
2.2.3 Συνδυασμένες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας	11
2.3 Γεννήτριες	
2.3.1 Σύγχρονες γεννήτριες χαμηλής τάσης	13
2.3.2 Γεννήτριες υψηλών στροφών	14
2.3.3 Γεννήτριες αξόνων	15
2.3.4 Σύγχρονες γεννήτριες μέσης τάσης	16
2.4 Μετατροπείς συχνότητας	
2.4.1 Γενικά	17
2.4.2 Ηλεκτρονικά ισχύος	18
2.4.3 Ανορθωτής ή Μετατροπέας AC-DC	25
2.4.4 Μετατροπέας DC-AC ή Αντιστροφέας (Inverter)	26
2.4.5 Καταμητής συνεχούς ρεύματος (DC chopper) ή ψαλιδιοτής	27
2.4.6 Κυκλομετατροπέας (cycloconverter) ή μετατροπέας AC-AC	28
2.4.7 Μετατροπέας AC-DC-AC	30
2.4.8 Μητροειδής μετατροπέας (Matrix converter)	31
2.4.9 Κυκλώματα καταστολής (snubber circuits)	32
2.5 Ηλεκτρικοί κινητήρες	
2.5.1 Σύγχρονοι κινητήρες	32
2.5.2 Σύγχρονοι κινητήρες μονίμων μαγνητών	32
2.5.3 Ασύγχρονοι κινητήρες	33
2.6 Πίνακας διανομής ηλεκτρικής ισχύος	34
2.7 Καλώδια	35

2.8 Φίλτρα	35
------------	----

3. ΚΡΙΣΙΜΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΙΑ ΠΛΗΡΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΞΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΠΡΟΩΣΗΣ

3.1 Γενικά	37
3.2 Εφεδρεία (Redundancy)	
3.2.1 Ιστορικό απωλειών	38
3.2.2 Διεθνείς κανόνες νηογνομόνων	39
3.2.3 Μηχανήματα πλήρως εξηλεκτρισμένου σκάφους	40
3.2.4 Μηχανήματα σκάφους συμβατικής πρόωσης (diesel)	42
3.2.5 Τα οφέλη της εγκατάστασης προώσεως με εφεδρεία	47
3.2.6 Τελική δήλωση	48
3.3 Σχέδιο πλοίου και μηχανολογικού εξοπλισμού	
3.3.1 Γενικά	48
3.3.2 Περιορισμός των διαμερισμάτων πρόωσης	49
3.3.3 Βελτιστοποίηση της μορφής της γάστρας	50
3.3.4 Βελτιστοποίηση της έλικας	50
3.3.5 Συστήματα πρόωσης με ‘Pods’ (Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα)	51
3.3.6 Πρόσθετοι λόγοι μείωσης του κόστους	55
3.3.7 Αυξημένο κόστος από το ναυπηγείο	56
3.4 Κόστος λειτουργίας και συντήρησης	57
3.5 Κόστος καυσίμων και λιπαντικών	59
3.6 Ελικτικές ικανότητες	60
3.7 Εκπομπές καυσαερίων	
3.7.1 Γενικά	62
3.7.2 Μηχανές diesel	62
3.7.3 Αεριοστροβίλοι	63

4. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ-ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1 Γενικά	65
4.2 Η οικονομικό-τεχνική προσιτότητα στις κατασκευές πολεμικών πλοίων	65
4.2.1 Ορισμοί και μέτρα οικονομικής προσιτότητας	65
4.2.2 Μεθοδολογία ανάλυσης κόστους	67
4.2.3 Μεθοδολογία ανάλυσης οικονομικής προσιτότητας	72

4.3 Τρόποι αύξησης οικονομικής προσιτότητας	75
4.4 Ενδεικτικά αποτελέσματα και σχολιασμός	76
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
5.1 Τελικά σχόλια	80
5.2 Πρόταση για περαιτέρω μελέτη	81

6. ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΕΙΣ

7. ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΝΑΦΟΡΩΝ

8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Μεμονωμένα αποτελέσματα προσιτότητας σε απαιτούμενες αλλαγές, βελτιωμένες αρχιτεκτονικές και νέες τεχνολογίες.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Αποτελέσματα προσιτότητας συνδυάζοντας απαιτούμενες αλλαγές, βελτιωμένες αρχιτεκτονικές και νέες τεχνολογίες. Επίδραση των αλλαγών αυτών στις επιδόσεις ταχύτητας του πλοίου.

ΜΕΡΟΣ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, με την σχεδίαση και την κατασκευή περισσότερο αξιόπιστων και αποδοτικότερων μετατροπέων συχνότητας (frequency converters), όλα τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν προχωρήσει με αξιοσημείωτα βήματα εμπρός στη ναυπηγική βιομηχανία. Σήμερα η ηλεκτρική πρόωση είναι μια τυποποιημένη λύση σε πολλούς τύπους εμπορικών πλοίων, όπως τα κρουαζιερόπλοια, ενώ μπορεί επίσης να αποτελέσει την επιλογή συστήματος πρόωσης τόσο σε πολεμικά πλοία επιφάνειας όσο και σε εν γένει ειδικών αποστολών πλοία. Είναι επίσης μια εναλλακτική λύση, η οποία συμπεριλαμβάνεται σε όλο και περισσότερες συγκριτικές μελέτες συστημάτων πρόωσης, διαφόρων τύπων πλοίων.

Εντούτοις, πολλοί μελετητές και κατασκευαστές στη ναυπηγική βιομηχανία, αν και γνωρίζουν τις αρχές, τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες της ηλεκτροπρόωσης, συνήθως απορρίπτουν ασυζητητί αυτή την εναλλακτική μορφή πρόωσης, χωρίς συστηματική μελέτη.

Στο **δεύτερο μέρος** της παρούσας διπλωματικής εργασίας, γίνεται μια προσπάθεια εξήγησης της έννοιας της ηλεκτρικής πρόωσης και παρουσιάζονται μερικές εφαρμογές της. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από πολλά συστατικά μέρη όπως τις κύριες μηχανές, τις γεννήτριες, τους κινητήρες, τους μετατροπείς συχνότητας, τους κύριους πίνακες διανομής ισχύος και τον εν γένει δευτερεύοντα εξοπλισμό, για καθέναν από τους οποίους, δίδεται παρακάτω η τεχνική τους περιγραφή. Συγκεκριμένα, προσοχή δίνεται στους τύπους και τις αρχές των μετατροπέων συχνότητας, η επιλογή των οποίων είναι το κύριο χαρακτηριστικό των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Επίσης παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των κυρίων μηχανών που χρησιμοποιούνται σήμερα στις πλήρως εξηλεκτρισμένες εφαρμογές, ενώ δίνεται επίσης μια συνοπτική τεχνική περιγραφή των σύγχρονων γεννητριών μέσης τάσης. Επιπλέον, περιγράφονται οι τύποι κινητήρων, που χρησιμοποιούνται συχνά σε τέτοιες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, αναφέρονται μερικά χαρακτηριστικά του κύριου πίνακα διανομής ισχύος καθώς επίσης και οι τύποι των καλωδίων, των φίλτρων και του λοιπού δευτερεύοντος εξοπλισμού.

Σήμερα θεωρείται ότι η ηλεκτρική πρόωση δεν έχει επιτύχει ακόμα να κερδίσει τη μερίδα της αγοράς[17]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θαλάσσια αγορά είναι είτε καχύποπτη σε κάθε νέα πρόταση είτε λαμβάνει υπόψη μόνο τα μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης, όπως το πρόσθετο κόστος και τις υψηλές ηλεκτρικές απώλειες, παραβλέποντας τα σοβαρά πλεονεκτήματά της.

Στο **τρίτο μέρος**, περιγράφεται μια συγκριτική μελέτη όσον αφορά τον μηχανολογικό εξοπλισμό του συμβατικού και του πλήρως εξηλεκτρισμένου πολεμικού πλοίου, προκειμένου να εξαχθεί ένα αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα.

Ο εφεδρεία προωστήριας ισχύος αρχίζει να διαδραματίζει ένα σημαντικό ρόλο στην επιλογή του τύπου πρόωσης και των λοιπών μηχανημάτων υποστήριξης. Η ηλεκτρική πρόωση προσφέρει έναν υψηλό βαθμό διαθεσιμότητας, ενώ οι συμβατικές μορφές πρόωσης χρειάζονται πρόσθετο κόστος επένδυσης. Επίσης, η σημαντική πολυπλοκότητά της προστίθεται προκειμένου να επιτευχθεί το ίδιο επίπεδο εφεδρείας (redundancy).

Η ηλεκτρική πρόωση παρέχει ευελιξία στο σχεδιασμό της και έτσι είναι δυνατό να σχεδιαστεί ένα μικρότερο διαμέρισμα πρόωσης. Αυτό είναι ένα πολύ κρίσιμο πλεονέκτημα των πλήρως εξηλεκτρισμένων πολεμικών σκαφών, διότι δύναται να ναυπηγηθεί πλοίο με περισσότερο φόρτο πυρομαχικών και καυσίμων ή εναλλακτικά ένα κοντύτερο σκάφος με την ίδια όμως ικανότητα φόρτου πυρομαχικών και καυσίμων.

Προκειμένου να αντισταθμιστούν οι ηλεκτρικές απώλειες των εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ο μελετητής/σχεδιαστής, σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να βελτιστοποιήσει τη μορφή της γάστρας ή να αυξήσει την απόδοση της έλικας, που μειώνει την αντίσταση του σκάφους. Εντούτοις η αποδοτικότερη λύση αυτού του προβλήματος είναι, φυσικά, η εγκατάσταση των pods (αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα με μία έλικα) της εταιρείας ABB Marine. Παρόμοιο είναι και το σύστημα Mermaid των εταιρειών Kamewa – Alstom και το SSP (Siemens Schottel Propulsor) της εταιρείας Siemens AG.

Επίσης, στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται θέματα συντήρησης, όπως είναι η δυνατότητα μείωσης των δαπανών, λόγω της ευελιξίας που προσφέρεται από τα μηχανήματα ηλεκτροπρόωσης.

Η εξαιρετική ελκτική ικανότητα που παρέχει στο πλοίο η ηλεκτροπρόωση, ειδικά όταν εγκαθίστανται τα pods, μπορεί να είναι ένας λόγος να επιτευχθεί το πρόσθετο έργο,

δεδομένου ότι το πλήρως εξηλεκτρισμένο πολεμικό σκάφος χρειάζεται λιγότερο χρόνο κατά τη διάρκεια της αναχώρησης ή της άφιξης από τις αποστολές τους. Επίσης ένα άλλο χαρακτηριστικό των πλήρως εξηλεκτρισμένων πλοίων, κρίσιμο για τα πολεμικά πλοία, είναι ο μειωμένος χρόνος ετοιμότητας απόπλου αυτών.

Προκειμένου να επιτευχθεί μια ρεαλιστική οικονομοτεχνική απόδοση στις κατασκευές πολεμικών πλοίων, αναπτύσσονται στο **τέταρτο μέρος**, στοιχεία και τρόποι ώστε να καταστεί ένας στόλος πολεμικών πλοίων αποδοτικότερος και αποτελεσματικότερος. Ειδικότερα, παρουσιάζονται διάφοροι τρόποι επαύξησης της οικονομικής προσιτότητας, όσον αφορά την κατασκευή και συντήρηση του καταδρομικού DDG-51 του Αμερικανικού Πολεμικού Ναυτικού και μάάλιστα ο αποδοτικότερος εξ αυτών είναι η ηλεκτροπρόωση σε συνδυασμό με εγκατάσταση pods.

Στο **πέμπτο μέρος** παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα της παρούσας μελέτης για την ηλεκτρική πρόωση σε πολεμικά πλοία, ενώ γίνεται επίσης μνεία των μειονεκτημάτων της, τα οποία είναι υπό διερεύνηση.

Στο **έκτο μέρος**, αναφέρονται οι άνθρωποι, που βοήθησαν για την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης και τέλος, στο **έβδομο μέρος**, παρατίθεται κατάλογος των αναφορών, που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να υπάρξει μια σφαιρική προσέγγιση στο θέμα της ηλεκτροπρόωσης.

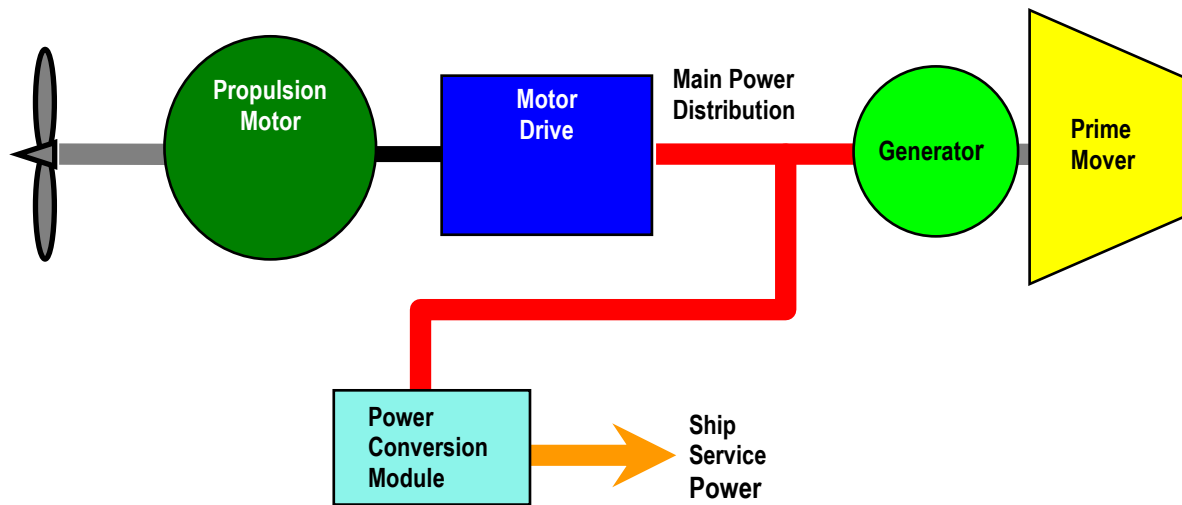
Στα **παραρτήματα Α και Β** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, οι βελτιώσεις στην οικονομική προσιτότητα κατασκευής και η επίδραση στη μέγιστη ταχύτητα του πλοίου DDG-51, εκπεφρασμένες ποσοτικά, όταν εισαχθούν νέες τεχνολογίες και βελτιωμένες αρχιτεκτονικές, απ' όπου φαίνονται σαφώς τα πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης.

ΜΕΡΟΣ 2

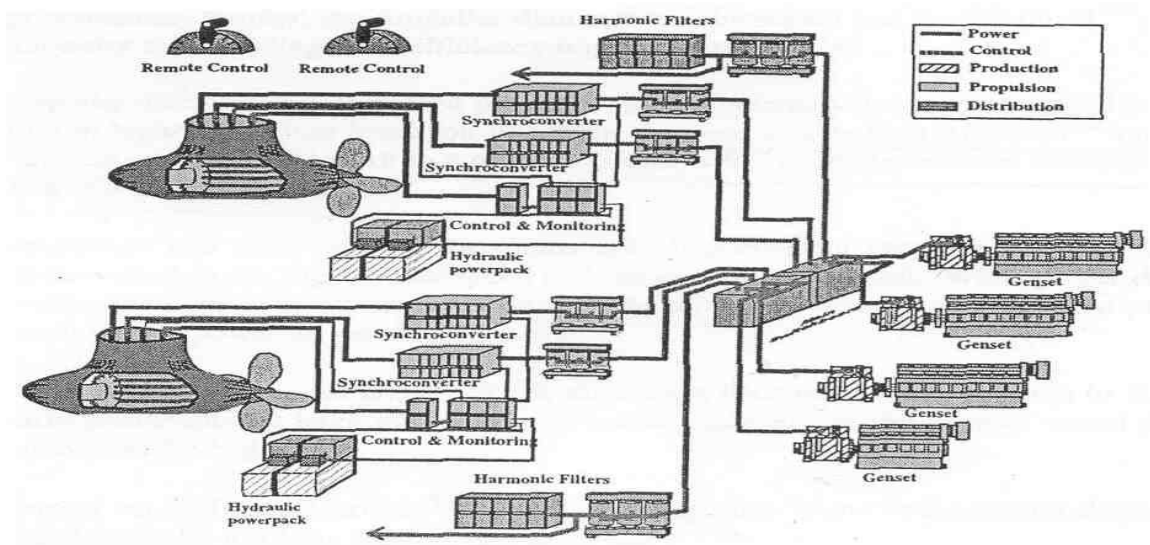
ΤΟ ΣΧΕΔΙΟ ΤΟΥ ΠΛΗΡΩΣ ΕΞΗΛΕΚΤΡΙΣΜΕΝΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Οι εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από πολλά μηχανήματα, όπως φαίνεται στα σχήματα 2.1 και 2.2. Αν και φαίνεται ότι είναι μια πολύ σύνθετη διάταξη, στην πραγματικότητα είναι ένα σύστημα υψηλής απόδοσης, το οποίο σήμερα δοκιμάζεται στις βιομηχανικές, θαλάσσιες και άλλες συγγενείς εφαρμογές.

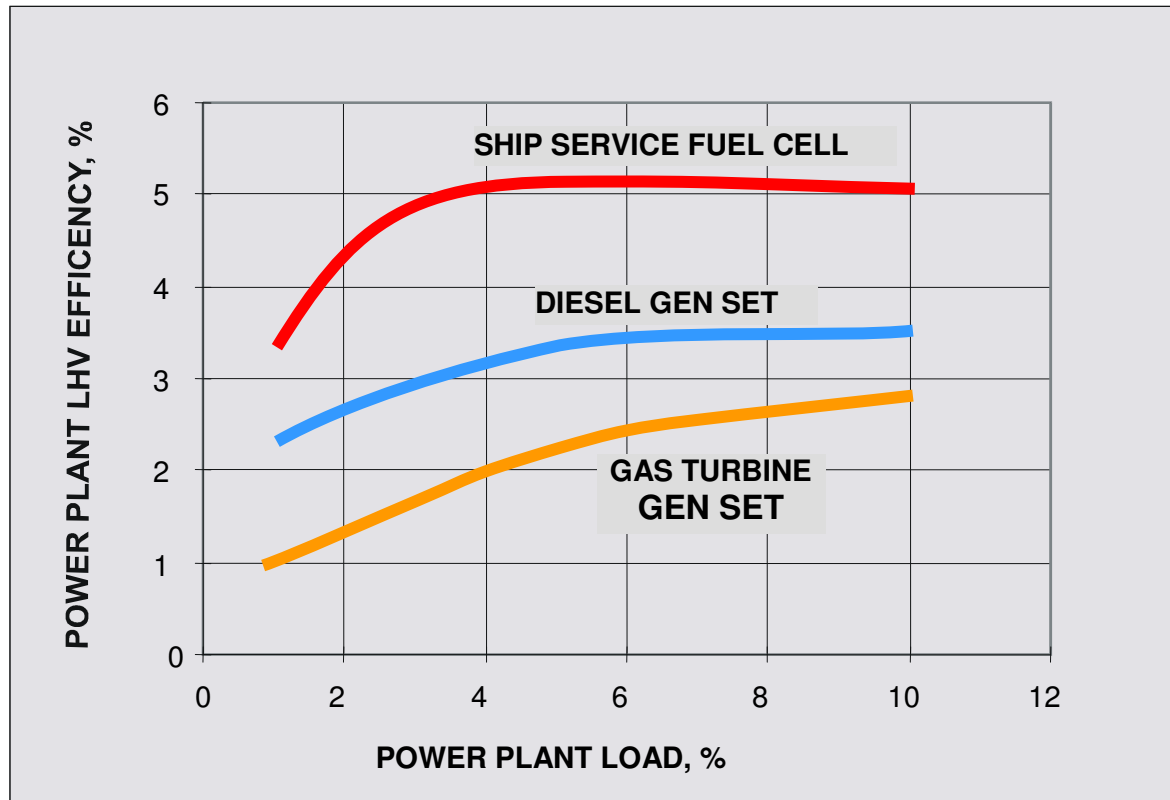


Σχήμα 2.1 : Διάγραμμα διάταξης συστήματος ηλεκτροπρόωσης



Σχήμα 2.2: Χαρακτηριστική διάταξη συστήματος ηλεκτροπρόωσης

Σε όλα τα πλοία, πολεμικά και εμπορικά , η απαιτούμενη ισχύς παράγεται από τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη (μηχανή και γεννήτρια). Πολύ συχνά σε πολεμικά πλοία ως μηχανή υφίσταται είτε μηχανή diesel είτε αεροστρόβιλος , με εξαίρεση τα υποβρύχια όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι κυψέλες καυσίμων ή η πυρηνική ενέργεια.

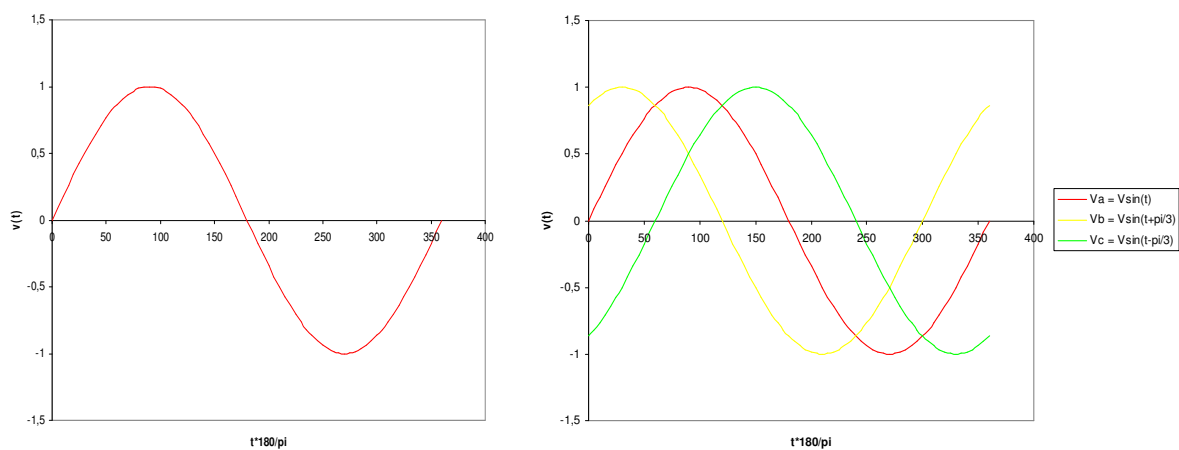


Σχήμα 2.3: Συγκριτικό διάγραμμα β.α συναρτήσεως ισχύος

Οι γεννήτριες είναι σύγχρονες μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, καθεμία εκ των οποίων είναι σε θέση να καλύπτει μεγάλο ποσοστό του μέγιστου φορτίου. Οι γεννήτριες παράγουν τριφασική ισχύ σταθερής συχνότητας (50Hz ή 60Hz). Οι γεννήτριες είναι χαμηλής τάσης (110/440V) ή μέσης-τάσης (3/3.3/6.6kVolts), ενώ υφίστανται και γεννήτριες από μερικά kVA μέχρι 20MVA και περισσότερο.

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τις γεννήτριες, μεταφέρεται μέσω των καλωδίων στον κύριο πίνακα διανομής ισχύος, ο οποίος είναι κατά κύριο λόγο υπεύθυνος για τη διανομή της διαθέσιμης ισχύος σε κάθε ενιαίο φορτίο. Ο κύριος πίνακας διανομής ισχύος είναι επίσης εξοπλισμένος με συστήματα διαχείρισης της ισχύος, για τον έλεγχο και την προστασία γεννητριών καθώς επίσης και για την ισοκατανομή των φορτίων στα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη.

Όλα τα ηλεκτρικά φορτία που υπάρχουν σε ένα πολεμικό σκάφος (σχήμα 2.4), ικανοποιούνται από τον ζυγό σύνδεσης (μπάρα) του κύριου πίνακα διανομής ισχύος, μετά από ένα, κατάλληλο για κάθε περίπτωση, μετασχηματισμό του ρεύματος.



Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστικά ηλεκτρικά φορτία(AC single phase,3_phase(delta- wye) -DC)

Το κύριο φορτίο ενός πλήρως εξηλεκτρισμένου σκάφους προέρχεται από την απαίτηση ισχύος των μηχανών πρόωσης, οι οποίες στρέφουν συνήθως μια έλικα σταθερού βήματος. Ο ακριβής έλεγχος της ταχύτητας της μηχανής είναι ουσιαστικός για αυτές τις εφαρμογές και ολοκληρώνεται τέλεια από τους μετατροπείς συχνότητας, ο τύπος των οποίων είναι ένα τυπικό χαρακτηριστικό της διάταξης. Οι τύποι των μετατροπέων συχνότητας παρουσιάζονται εκτενώς παρακάτω. Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει επίσης η ανάγκη μετασχηματισμού των μετατροπέων προκειμένου να συμπίπτει η τάση παραγωγής του δικτύου με την τάση τροφοδότησης των μετατροπέων συχνότητας.

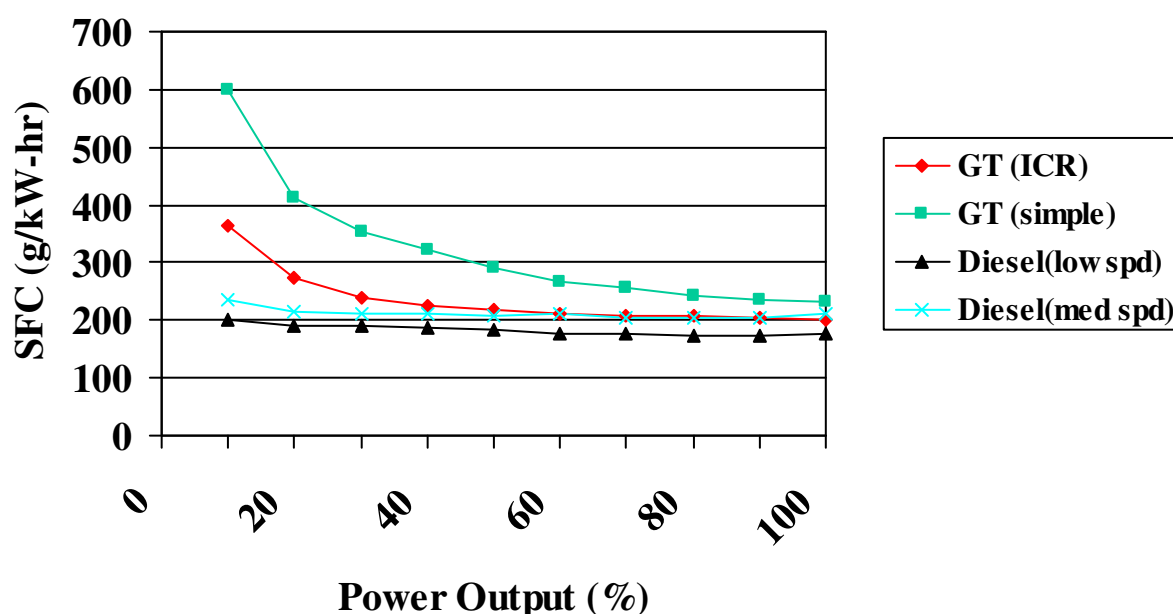
Όσον αφορά στα φορτία ενδιαίτησης ενός πολεμικού πλοίου, τουλάχιστον δύο μετασχηματιστές είναι εγκατεστημένοι προκειμένου να μετασχηματίσουν την τάση (από 6.6kV ή 3.3kV/ 450V/110V) τροφοδοτώντας τις μπάρες χαμηλής τάσης.

Τέλος, τα φίλτρα χρησιμοποιούνται επίσης προκειμένου να βελτιώσουν την ποιότητα της εξαγόμενης ισχύος, εξαλείφοντας την τρέχουσα αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος[22].

2.2 Κινητήριες Μηχανές

2.2.1 Μηχανές diesel

Οι μεσόστροφες μηχανές Diesel, έχοντας κυρίως σχετικά υψηλότερη απόδοση με ειδική κατανάλωση καυσίμου (sfc: specific fuel oil consumption) περίπου 185 gr/KWh και αποδεδειγμένη αξιοπιστία, συναντώνται συχνότερα σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Στο σχήμα 2.5 παρατίθεται το συγκριτικό διάγραμμα όσον αφορά την ειδική κατανάλωση καυσίμου.



Σχήμα 2.5: Συγκριτικό διάγραμμα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου

Το ευρύ φάσμα μηχανών diesel που προσφέρεται από τους διάφορους κατασκευαστικούς οίκους, είναι ένας σημαντικός παράγοντας που δίνει τη δυνατότητα στο σχεδιαστή να επιλέξει τον καλύτερο δυνατό συνδυασμό. Ένα άλλο σοβαρό πλεονέκτημα των μηχανών Diesel, είναι η δυνατότητά τους να χρησιμοποιούν χαμηλής ποιότητας καύσιμο, κάτι το οποίο μειώνει σημαντικά τα λειτουργικά έξοδα. Βέβαια κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στην περίπτωση πολεμικού πλοίου, επειδή ακριβώς η αλληλουχία χειρισμών κατά τη διάρκεια πολεμικών επιχειρήσεων και οι αυξημένες ανάγκες αξιοπιστίας καθιστούν απαγορευτική τη χρησιμοποίηση καυσίμου χαμηλής ποιότητας.

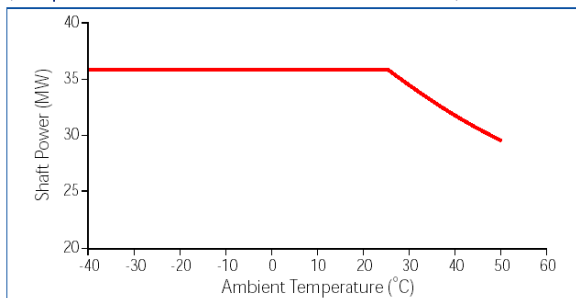
2.2.2 Αεριοστρόβιλοι

Στα πολεμικά πλοία, τα τελευταία έτη, η χρήση των ναυτικών αεριοστροβίλων είναι ευρέως γνωστή, παρά τη μικρή απόδοση αυτών των μηχανών και το γεγονός ότι χρειάζονται υψηλής ποιότητας καύσιμα όπως το marine gas oil (mgo) ή το marine diesel oil (mdo).



MT30 Mechanical drive rating chart

(for up to 100mm WG inlet / 150mm WG exhaust loss)



Performance

(at ISO conditions - no loss)

Power	(MW)	36 @ 26°C
	(MW)	34.1 @ 32°C (mech drive)
	(MW)	30.7 @ 45°C (mech drive)
Specific fuel consumption	(kg/kWhr)	0.207
Exhaust mass flow	(kg/s)	113
Exhaust temperature	(°C)	466

Engine specifications

Compressor stages	IPC	8
	HPC	6
Turbine stages	HPT	1
	IPT	1
Power turbine stages	PT	4
PT nominal speed	(rpm)	3,600 (alternator drive)
	(rpm)	3,300 (mechanical drive)

Weights

GTCU (inc power turbine)	(kg)	6,200 (dry weight)
Packaged module (direct drive)	(kg)	22,000*
Packaged module (inc baseplate and alternator)	(kg)	77,000*

* dependent on options

Σχήμα 2.6: Αεριοστρόβιλος Rolls Royce MT-30

Εντούτοις οι αεριοστρόβιλοι προσφέρουν μερικά πλεονεκτήματα, που τους καθιστούν εφαρμόσιμους στις περιπτώσεις όπου ορισμένες απαιτήσεις πρέπει να καλυφθούν. Παραδείγματος χάριν και συγκρίνοντας τα μεγέθη του πίνακα 2.1, βλέπουμε

ότι στις εφαρμογές όπου η συνολική απαίτηση ισχύος είναι πολύ υψηλή, το συμπαγές μέγεθος των αεριοστροβίλων καθώς επίσης και η μεγάλη πυκνότητα ισχύος τους δίνουν προτεραιότητα. Ο μικρότερος όγκος που προκύπτει, επιτρέπει είτε ένα μικρότερο σκάφος, είτε περισσότερη ικανότητα μεταφοράς φορτίου για το ίδιο μέγεθος σκάφους, δηλαδή στην περίπτωση πολεμικών πλοίων η αύξηση του διατιθέμενου όγκου επιτρέπει την αύξηση οπλικών συστημάτων, δηλαδή αύξηση της ισχύος πυρός.

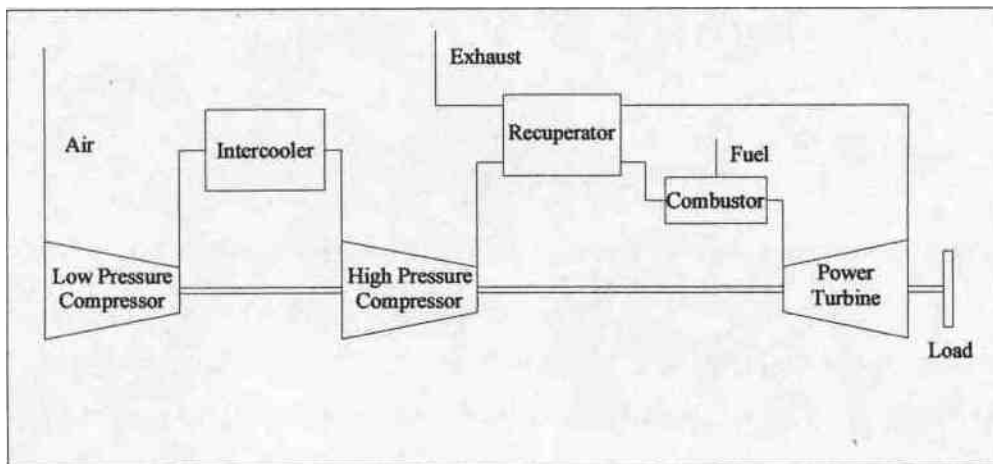
Επιπλέον οι αεριοστροβίλοι χρειάζονται τα λιγότερα βοηθητικά μηχανήματα και προσφέρουν μια απλούστερη διάταξη, που επιτρέπει τη μείωση του πληρώματος, τη χαμηλότερη εν πλώ συντήρηση και την υψηλότερη διαθεσιμότητα του σκάφους για την υπηρεσία.

Πίνακας 2.1: Σύγκριση διαστάσεων και βάρους μεσόστροφων μηχανών Diesel και αεριοστροβίλων

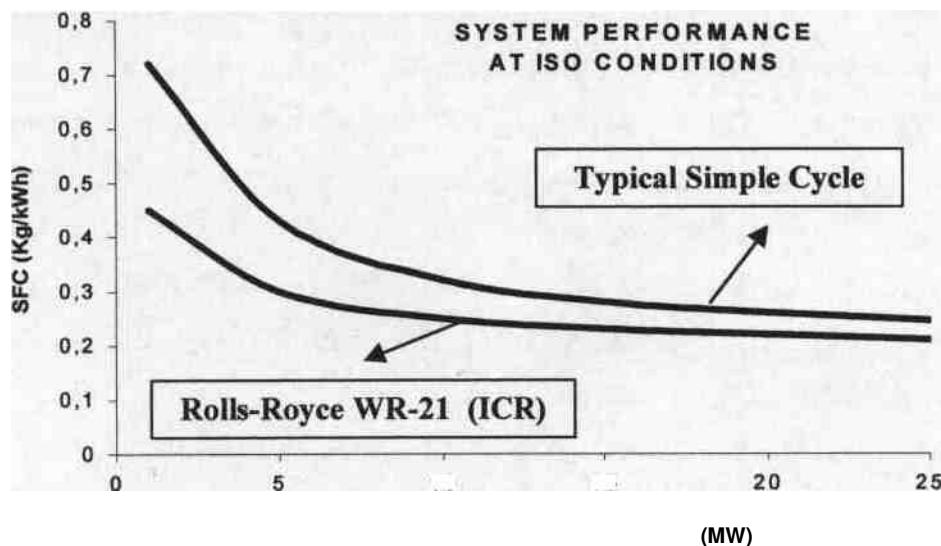
Μέγεθος	Μονάδες	Μεσόστροφος Diesel	Αεριοστρόβιλος
Ισχύς	MW	4,00	4,00
Μήκος	m	8,50	5,56
Πλάτος	m	2,75	2,12
Ύψος	m	4,40	2,62
Όγκος	c.m	102,75	30,88
Βάρος	ton	90,00	14,06

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των αεριοστροβίλων είναι η χαμηλή εκπομπή NOx γεγονός που τους δίνει ένα σοβαρό πλεονέκτημα έναντι των μηχανών Diesel, δεδομένου ότι οι σχετικοί κανονισμοί σχετικά με τις εκπομπές NOx γίνονται όλο και πιο αυστηροί. Επιπλέον, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας των καυσίμων σε θείο, οι εκπομπές σε SOx θεωρούνται αμελητέες.

Μια ενδιαφέρουσα ανάπτυξη, που βελτιώνει την ειδική κατανάλωση καυσίμου, είναι ο κύκλος ICR (Intercooled Compressor and Recuperator -σχήμα 2.7). Το ψυγείο αέρα (Intercooler) ψύχει τον αέρα, που εισάγεται στον συμπιεστή υψηλής πίεσης και έτσι μειώνεται το ποσό ενέργειας που απαιτείται για τη συμπίεση του αέρα. Ο ανακομιστής θερμότητας (Recuperator) προθερμαίνει τον αέρα καύσης με την ανάκτηση της ενέργειας καυσαερίων από την εξαγωγή καυσαερίων, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα κύκλου και τη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμων (Σχήμα 2.8). Η περαιτέρω μείωση ισχύος επιτυγχάνεται με τη χρήση μεταβλητών ακροφυσίων στο στρόβιλο ισχύος.



Σχήμα 2.7 : Κύκλος με intercooler και Recuperator



Σχήμα 2.8 : Σύγκριση ICR με απλό κύκλο αεριοστρόβιλου

2.2.3 Συνδυασμένοι κύκλοι

Όλες οι εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν το κύριο χαρακτηριστικό του διαχωρισμού της παραγόμενης ισχύος από την κινητήρια μηχανή. Αυτό το γεγονός, δίνει την ευκαιρία στο σχεδιαστή να συνδυάσει τους διαφορετικούς τύπους μηχανών, που παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια (μηχανές diesel, αεριοστρόβιλοι, ατμοστρόβιλοι, κυψέλες καυσίμων, ακόμη και μπαταρίες), χωρίς προσθήκη της πολυπλοκότητας. Οι συνδυασμένες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η σημαντικότερη εκ των οποίων παρουσιάζεται παρακάτω, έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα κάθε μηχανής με τον αποδοτικότερο τρόπο.

Στα συμβατικά συστήματα προώσεως, όπου οι μηχανές στρέφουν τον έλικα είτε άμεσα είτε μέσω του μειωτήρα στροφών, αν συμπεριληφθούν οι συνδυασμένοι κύκλοι, είναι περίπλοκες και πολύ ακριβές λύσεις (πάρα πολλές μηχανές στο πρυμναίο τμήμα του σκάφους). Παραδείγματα αποτελούν οι ακόλουθοι συνδυασμοί:

COGAG : COmbined Gas turbine and Gas Turbine Machinery

COGOG : COmbined Gas turbine or Gas Turbine Machinery

CODAG : COmbined Diesel and Gas Turbine Machinery

CODOG : COmbined Diesel Electric or Gas Turbine Machinery

COSAG : COmbined Steam and Gas Turbine Machinery

COGAS : COmbined Gas turbine and Steam Machinery

CONAG : COmbined Nuclear and Gas Turbine Machinery

COGES : COmbined Gas and Steam Turbine Electric Machinery

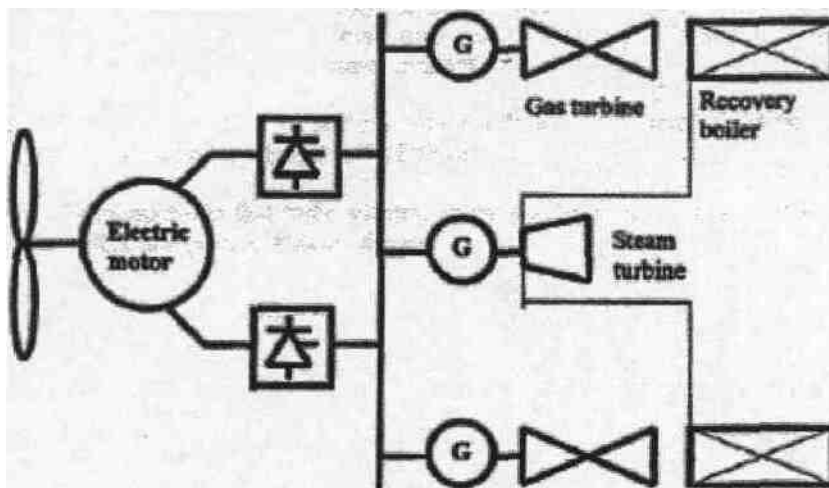
CODLAG : COmbined Diesel Electric and Gas Turbine Machinery

Ο τελευταίος συνδυασμός εκμεταλλεύεται τις μεσόστροφες μηχανές diesel και τους αεριοστρόβιλους. Είναι κατάλληλος για σκάφη με υψηλές ανάγκες ισχύος τόσο για την ισχύ πρόωσης όσο και για τα φορτία ενδιαίτησης. Στις περισσότερες εφαρμογές, υπάρχουν τουλάχιστον δύο μηχανές diesel, οι οποίες χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότερο και ένας αεριοστρόβιλος, ο οποίος λειτουργεί κυρίως συμπληρωματικά, όταν υπερβαίνει η απαίτηση σε ισχύ τη διαθέσιμη ισχύ από τις μηχανές diesel. Ο αεριοστρόβιλος μπορεί επίσης να λειτουργήσει όταν υπάρχει ουσιαστική ανάγκη για

περιορισμό των εκπεμπόμενων καυσαερίων, όταν επί παραδείγματι ένα πολεμικό πλοίο επιχειρεί και θέλει να έχει χαμηλή θερμική υπογραφή . Οι μηχανές Diesel και ο αεριοστρόβιλος στρέφουν τις γεννήτριες για να παραχθεί η ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα CODLAG προσφέρει ένα συνδυασμό χαμηλού βάρους και αυξημένου διατιθέμενου χώρου για υψηλή ισχύ και οικονομία. Αποτελεί το σύστημα πρόωσης για τα Βρετανικά καταδρομικά (UK Royal Navy's Type 45 Destroyer).

Στις στροβιλοηλεκτρικές εγκαταστάσεις συμπαραγωγής ενέργειας (COGES), οι λέβητες διατηρούν σταθερή θερμοκρασία και απαιτούν για να λειτουργήσουν τα καυσαέρια των αεριοστροβίλων. Ο παραχθείς υπέρθερμος ατμός (περίπου 30 bar πίεση) οδηγείται στη στροβιλογεννήτρια ατμού (σχήμα 2.9). Αυτή η διαμόρφωση αλλάζει εντελώς τις ιδιότητες του κύκλου του απλού στροβίλου, λαμβάνοντας υπόψη ότι η αποδοτικότητα αεριοστροβίλων μειώνεται στα χαμηλά φορτία, ενώ ο στρόβιλος ατμού ανακτά τη χαμένη ισχύ, επιστρέφοντας την στο σύστημα.

Επιπλέον, οι ανάγκες θερμότητας των σκαφών λαμβάνονται άμεσα από την εξαγωγή αμοστροβίλων, μειώνοντας κατά συνέπεια την ανάγκη των βοηθητικών λεβήτων. Σε μεγάλα σκάφη (καταδρομικά ή αντιτορπιλικά) αυτό έχει σημαντική επίδραση στους λέβητες, λόγω των σημαντικών αναγκών θερμότητας αυτών των πλοίων.



Σχήμα 2.9: Μηχανολογική διάταξη COGES

2.3.1 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Σύγχρονες γεννήτριες χαμηλής τάσης

Οι γεννήτριες, που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπρόωση, είναι σύγχρονες, χαμηλής τάσης, τριφασικές, με αυτόματο ρυθμιστή τάσης.

Η εξίσωση που περιγράφει μια χαρακτηριστική σύγχρονη γεννήτρια είναι η ακόλουθη:

$$f = \frac{p \cdot N}{120}$$

f, η συχνότητα της γεννήτριας, Hz

N, η ταχύτητα του στροφέα, RPM

p, ο αριθμός πόλων.

Προκειμένου να επιτευχθεί μια συχνότητα 60 Hz ή 50Hz, οι αργόστροφες μηχανές πρέπει να έχουν μεγάλο αριθμό πόλων. Αντίθετα οι μεσόστροφες και οι ταχύστροφες μηχανές χρειάζονται μικρούς αριθμούς πόλων. Ο βαθμός απόδοσης τέτοιων γεννητριών κυμαίνεται από 96% σε 96,5% στο ονομαστικό φορτίο (power factor $\cos\phi = 0.8-0.85$).



Σχήμα 2.10: Γεννήτρια G&M Power Plants PLC(450V-3Φ-60Hz-271KW-cos=0.80)

ΣΤΑΤΗΣ

Ο στάτης αποτελείται από τους πόλους ,το τυλίγμα και το στέλεχος. Το στέλεχος φέρει τους πόλους του στάτη με τα τυλίγματά τους, το κέλυφος αερισμού για την απαγωγή θερμότητας, και τη βάση στήριξης.

ΔΡΟΜΕΑΣ

Ο δρομέας αποτελείται από τον άξονα, που συμπεριλαμβάνει τους πόλους με τα τυλίγματά τους και το σύστημα διέγερσής τους. Η διέγερση των τυλιγμάτων μπορεί να επιτευχθεί είτε με ορειχάλκινους δακτυλίους είτε με μόνιμους μαγνήτες.

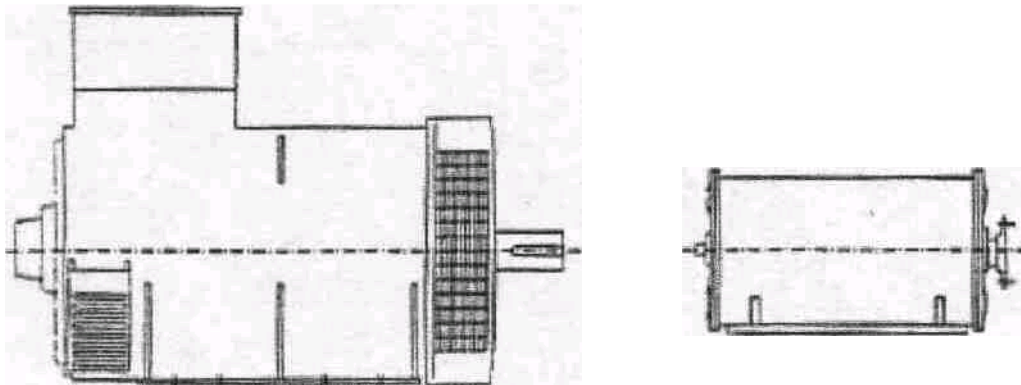
Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο αναπτύσσεται με την εφαρμογή συνεχούς ρεύματος (DC) στα τυλίγματα των πόλων. Η περιστροφή του άξονα προέρχεται από την μηχανή. Από την περιστροφή του μαγνητικού πεδίου αναπτύσσεται εναλλασσόμενη τάση στα τυλίγματα του στάτη. Ο όρος "σύγχρονος" χρησιμοποιείται επειδή η συχνότητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου της διέγερσης είναι η ίδια με τη συχνότητα του παραγόμενου εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως δικαιολογείται και από την εξίσωση 2.1. Από τη χαρακτηριστική καμπύλη τάσης εξόδου και ρεύματος φορτίου προκύπτει ότι μεταβολή στο ρεύμα του φορτίου προκαλεί αντιστρόφως ανάλογη μη γραμμική μεταβολή της τάσης εξόδου στη γεννήτρια. Για το λόγο αυτό τοποθετείται ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης, προκειμένου να διεγείρει κατάλληλα τα τυλίγματα του δρομέα, έτσι ώστε η τάση στα τυλίγματα του στάτη να διατηρείται σε σταθερά επίπεδα, ανεξάρτητα από το ρεύμα του φορτίου.

2.3.2 Γεννήτριες υψηλής ταχύτητας περιστροφής

Πρόσφατα αναπτύχθηκαν τέτοιου είδους γεννήτριες, αυτοδιεγειρόμενες, όπου δεν απαιτείται εξωτερική πηγή για την διέγερση, με ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος. Τέτοιες εφαρμογές υφίστανται για τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από αεριοστροβίλους. Η ταχύτητα αυτών των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών μπορεί να φθάσει τις 18000 RPM, ενώ χρησιμοποιούνται στις υψηλές και στις μέσες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Η παραγόμενη τάση συχνότητας 600Hz, μετατρέπεται στο συνεχές ή το εναλλασσόμενο ρεύμα (50Hz ή 60Hz) με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος.

Ο λόγος για τον οποίο αυτά τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη είναι μια ελκυστική επιλογή, οφείλεται στη στιβαρή κατασκευή και στο σχετικά μικρό βάρος και σχήμα τους (σχ.

2.11). Επιπλέον η απόδοση αυτών των γεννητριών φθάνει σε 98,5%, δηλ. περίπου 2% μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες σύγχρονες χαμηλής τάσης.



3700 Kg

1200 Kg

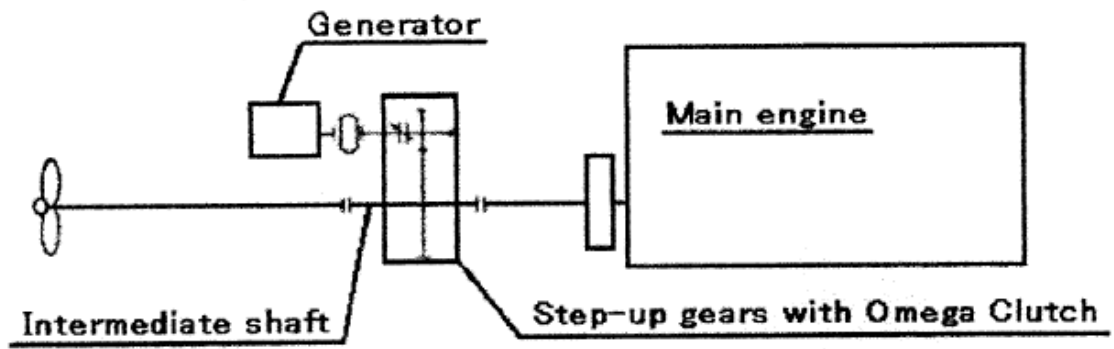
Σχήμα 2.11 : Σύγκριση συνηθισμένης γεννήτριας με γεννήτρια υψηλής ταχύτητας

2.3.3 Γεννήτριες αξόνων

Όταν ένας άξονας γεννήτριας , συνδέεται με μια κύρια μηχανή, η οποία οδηγεί μια έλικα μεταβλητού βήματος, απαιτείται μια συνηθισμένη γεννήτρια, λόγω του ότι οι στροφές της μηχανής παραμένουν σταθερές ελέγχοντας το βήμα της έλικας. Κατά συνέπεια, εφ' όσον η ταχύτητα της γεννήτριας είναι σταθερή, η συχνότητα και η παραγόμενη τάση είναι επίσης σταθερές. Ο τύπος της εγκατάστασης αυτής είναι χαρακτηριστικός και απαντάται σε πολλές εφαρμογές.

Σε μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή, η γεννήτρια μπορεί επίσης να στρέφει από κινητήρα τροφοδοτούμενο με εναλλασσόμενο ρεύμα, που παράγεται από άλλα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη. Αυτή η εφαρμογή απαιτεί την ύπαρξη έλικας μεταβλητού βήματος, προκειμένου να υπάρξει η σταθερή ταχύτητα του άξονα.

Προκειμένου να αποφευχθεί η εγκατάσταση μιας έλικας μεταβλητού βήματος, μπορεί να εγκατασταθεί ένα γρανάζι με σύμπλεξη στρέφοντας έναν ενδιάμεσο άξονα ο οποίος θα στρέψει με τη σειρά του τη γεννήτρια. Αυτή η λύση (σχ. 2.12) μπορεί να παρέχει τη σταθερή ταχύτητα που απαιτεί η γεννήτρια, ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις της κύριας μηχανής ή των μεταβολών στο φορτίο των γεννητριών.



Σχήμα2.12 : Γεννήτρια συνδεδεμένη με κ. μηχανή, γραναζοκιβώτιο και συμπλέκτη

Τελικά η γεννήτρια, μπορεί να λειτουργήσει ακριβώς όπως η ανεμογεννήτρια, αλλά σε αυτήν την περίπτωση, λόγω της μεταβλητής ταχύτητας στον άξονα, πρέπει να τοποθετηθεί ένας μετατροπέας συχνότητας, προκειμένου να σταθεροποιηθεί η παραγόμενη συχνότητα, στα επίπεδα του συνολικού ηλεκτρικού συστήματος (50Hz ή 60Hz). Σε αυτήν την περίπτωση δεν υφίσταται η ανάγκη χρησιμοποίησης προπέλας μεταβλητού βήματος και έτσι η γεννήτρια άξονα μπορεί να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια, σε ποσοστό 40% της ταχύτητας των μηχανών.

2.3.4 Σύγχρονες γεννήτριες μέσης τάσης

Στις σύγχρονες εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης σε πολεμικά πλοία, απαντώνται οι σύγχρονες τριφασικές γεννήτριες μέσης τάσης με αυτόματο ρυθμιστή τάσης. Με το παραγόμενο εναλλασσόμενο ρεύμα τροφοδοτούνται κινητήρες πρόωσης που χρησιμοποιούνται για την ώση και η ταχύτητα περιστροφής της έλικας και τελικά η μεταβολή της ταχύτητας του πλοίου επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της συχνότητας του εναλλασσόμενου ρεύματος του κινητήρα. Στο (σχ. 2.13) απεικονίζεται μια τέτοια γεννήτρια που αποτελεί στοιχείο της πρόωσης ενός πλήρως εξηλεκτρισμένου Βρετανικού καταδρομικού.



- 21 MW - 26.25 MVA
- 4160 V - 3 Phase
- 60 HZ - .8 Pwr Fctr
- 2 Pole - 3600 RPM
- 97 % Efficiency
- 50,050 KG
- 3.4m(H) x 4.7m(L) x 4m(W)
- Mfd. by: Brush Electric Machines Company (UK)

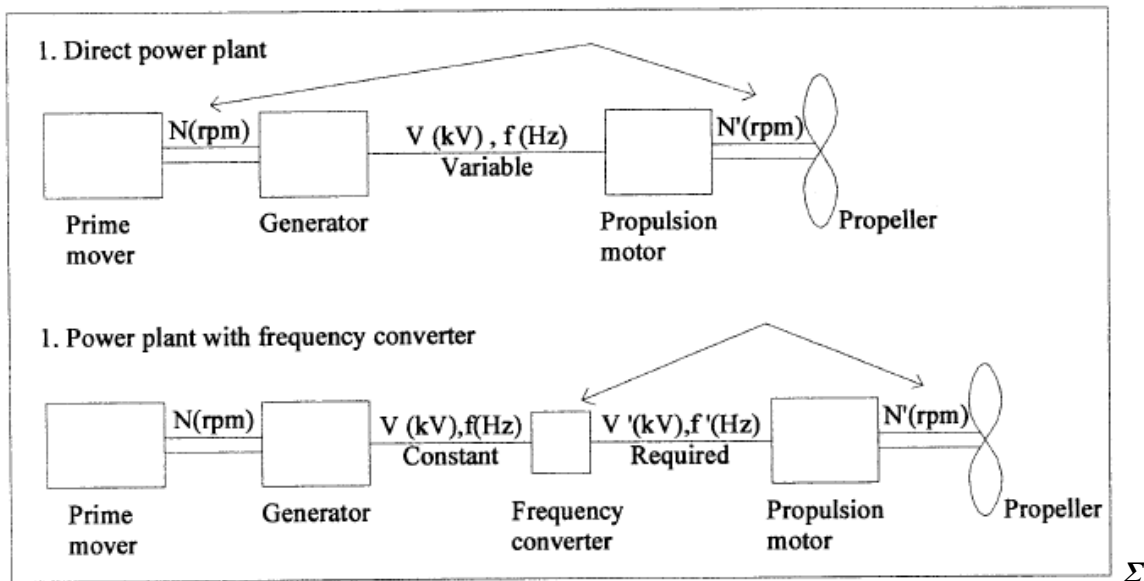
Σχήμα2.13 : Σύγχρονη τριφασική Γεννήτρια μέσης τάσης

2.4 Μετατροπείς συχνότητας (frequency converters)

2.4.1 Γενικά

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος (power electronics) τα τελευταία 25 έτη, είναι ο κύριος λόγος που η ηλεκτροπρόωση έχει γίνει εφικτή και συνάμα αξιόπιστη στις ναυτικές εφαρμογές. Τώρα είναι πλέον εφικτή η διατήρηση της παραγόμενης από τις γεννήτριες συχνότητας σε σταθερά επίπεδα, και η περαιτέρω μετατροπή αυτής από τους μετατροπείς συχνότητας, ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε φορτίου που μπορεί ένα πλοίο να έχει. Σε αντίθετη περίπτωση πριν από τη χρήση των μετατροπέων συχνότητας, ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής των ελίκων απαιτούσε την ανάλογη μεταβολή της ταχύτητας της κύριας μηχανής, έτσι ώστε το παραγόμενο ρεύμα από τη γεννήτρια να έχει την απαιτούμενη για τον κινητήρα συχνότητα. Οι διατάξεις αυτές αποτελούνταν από ένα σύνολο ηλεκτρικών μηχανών (γεννητριών-κινητήρων) που όχι μόνο απαιτούσε υψηλό κόστος, αλλά προκαλούσε και σημαντικές ενεργειακές απώλειες. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος, έγινε δυνατή η κατασκευή στατών μετατροπέων συχνότητας με χαμηλότερο σαφώς κόστος, υψηλότερο ολικό βαθμό απόδοσης και ευχερέστερη ρύθμιση των χαρακτηριστικών του ρεύματος. Σήμερα, η συχνότητα που απαιτείται για τον κινητήρα ελέγχεται επακριβώς και απόλυτα από τους μετατροπείς συχνότητας, καθόσον τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη παράγουν ισχύ με σταθερή συχνότητα 50 ή 60Hz (σχ. 2.13)

[6]



χήμα 2.13 : Ο μετατροπέας συχνότητας στη φιλοσοφία της ηλεκτροπρόωσης

2.4.2 Ηλεκτρονικά ισχύος

Η μεγάλη πρόοδος των ηλεκτρονικών ισχύος είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εξέλιξη των ημιαγωγών στοιχείων. Νέες εφαρμογές αναπτύχθηκαν χάρη στην πρόοδο των ηλεκτρονικών ισχύος. Με την εισαγωγή του θυρίστορ σε συνδυασμό με την βασισμένη στο πυρίτιο τεχνολογία ημιαγωγών αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες στη βελτίωση ελέγχου ισχύος, τάσεων και ρευμάτων. Ταυτόχρονα τα ημιαγωγικά στοιχεία μπόρεσαν να ολοκληρωθούν αρκετά, με αποτέλεσμα τη συρρίκνωση του μεγέθους τους και την εγκατάστασή τους εσωτερικά των κυκλωμάτων. Από τις σπουδαιότερες εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος είναι η ρύθμιση της ταχύτητας των ηλεκτρικών κινητήρων, τα κυκλώματα αδιάλειπτης τροφοδοσίας πολύπλοκων ηλεκτρικών συστημάτων και τα συστήματα ελεγχόμενης μετάδοσης κίνησης. Τα προβλήματα ρύθμισης ισχύος έχουν πλέον εξαλειφθεί λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των ηλεκτρονικών μονάδων οδήγησης (solid-state drive packages) στις οποίες είναι δυνατή η λειτουργία κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος με πηγές συνεχούς τάσης και το αντίστροφο. Επίσης είναι δυνατές οι μετατροπές των ηλεκτρικών μεγεθών της ηλεκτρικής ισχύος καθώς επίσης και οι μετατροπές της ηλεκτρικής ισχύος στις διάφορες μορφές της. Το κόστος των ανωτέρω ηλεκτρονικών μονάδων οδήγησης έχει μειωθεί σημαντικά, σε

αντίθεση με την αξιοπιστία του η οποία έχει βελτιωθεί αισθητά. Οι πολλές δυνατότητες των μονάδων οδήγησης ή ελέγχου σε συνδυασμό με το μικρό κόστος τους είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλών εφαρμογών για τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, τις οποίες στο παρελθόν μπορούσαν να φέρουν σε πέρας μόνο οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Η επιστήμη των ηλεκτρονικών ισχύος συνδυάζει την ηλεκτρική ενεργειακή τεχνολογία και την τεχνολογία της ηλεκτρικής επεξεργασίας και μετάδοσης πληροφοριών. Γι' αυτό μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος αποτελείται από δύο μέρη: το μέρος υψηλής ισχύος και το ηλεκτρονικό μέρος. Το μέρος υψηλής ισχύος περιέχει τα ηλεκτρονικά ισχύος και έχει σκοπό την δημιουργία επιθυμητών κυματομορφών ρεύματος και τάσεων από δεδομένες αντίστοιχες πηγές, δίνοντας έτσι την δυνατότητα μετατροπής της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή και αντίστροφα. Τα ηλεκτρονικά ισχύος παίζουν το ρόλο ηλεκτρικών διακοπών, οι οποίοι ελέγχονται και ενεργοποιούνται από τις πληροφορίες που διοχετεύει το ηλεκτρονικό μέρος, ώστε αυτοί να ανοιγοκλείνουν σε κατάλληλες χρονικές στιγμές και έτσι να ελέγχονται ηλεκτρικά μεγέθη (τάση, ρεύμα και συχνότητα) καθώς και ηλεκτρομηχανικά μεγέθη (στροφές και ροπή). Ελέγχοντας τα μεγέθη αυτά ελέγχεται στην ουσία η μεταφερόμενη ηλεκτρική ισχύς. Ένας ιδανικός διακόπτης ισχύος θεωρείται αυτός ο οποίος παρουσιάζει μηδενική αντίσταση κατά την επαφή του μεταγωγέα με τη θέση ηρεμίας και άπειρη αντίσταση μεταξύ του μεταγωγέα και της ανοιχτής επαφής. Η μετάβαση από τη θέση ηρεμίας στην ανοικτή επαφή εκτελείται ακαριαία ενώ ταυτόχρονα απαιτείται η ελάχιστη δυνατή ενέργεια για την μεταγωγή. Το πυρίτιο είναι ένα φθηνό στοιχείο το οποίο ως ημιαγωγός δεν παρουσιάζει χαρακτηριστικά αγωγού ή αντίθετα μονωτή. Καθίσταται λοιπόν μη εφαρμόσιμο στα ηλεκτρονικά ισχύος, ενώ με τις κατάλληλες προσμίξεις διαμορφώνεται σε ημιαγωγούς τύπου 'n' και τύπου 'p' και δύναται να χρησιμοποιηθεί στα ηλεκτρονικά ισχύος.

Οι πιο σημαντικοί τύποι ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούνται περισσότερο στις διάφορες εφαρμογές είναι η δίοδος, το θυρίστορ δύο επαφών ή δίοδος pnpn, ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου ή θυρίστορ τριών επαφών (Silicon Controlled Rectifier, SCR), το θυρίστορ με διακοπή από την πύλη (Gate Turn Off, GTO), η δίοδος δύο κατευθύνσεως αγωγιμότητας (DIod Alternative Current, DIAC), ο αμφίδρομος ανορθωτής

πυριτίου (TRIAC), το τρανζίστορ ισχύος (Power Transistor, PTR) και το διπολικό τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT).

Τύπος ημιαγωγού	Τάση (V)	Ρεύμα RMS (A)	Ταχύτητα απόκρισης
Δίοδος	5000	7500	300 nsec
Θυρίστορ SCR	5000	5000	1 μsec
TRIAC	1000	200	2 μsec
Power transistor	1400	400	0.2 μsec
GTO	5000	5000	2 μsec
Darlington	1400	400	1 μsec
Δίοδος Zener	500	4	100 μsec

Πίνακας 2.2: Σύγκριση ηλεκτρονικών ισχύος

Οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος έχουν εν γένει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Υψηλότερη απόδοση (όταν συγκριθούν με γραμμικά τροφοδοτικά και διατάξεις ζευγών ηλεκτρικών μηχανών)
- Μικρότερο κόστος, βάρος και μέγεθος
- Αθόρυβη λειτουργία
- Περισσότερες δυνατότητες και παραμετροποίηση λειτουργίας
- Περιορισμένες έως και ανύπαρκτες ανάγκες συντήρησης
- Υψηλή ταχύτητα επανάληψης διακοπών και αποκατάστασης

Παρουσιάζουν δε και τα κάτωθι μειονεκτήματα:

- Δημιουργία αρμονικών ρεύματος και τάσεως στο δίκτυο τροφοδοσίας των, οι οποίες προκύπτουν από τον τρόπο χρησιμοποίησης των ηλεκτρονικών στοιχείων ως διακόπτες σε κυκλώματα ηλεκτρικής ισχύος. Οι αρμονικές προκαλούν μείωση της ποιότητας του δικτύου τροφοδοσίας καθώς και ηλεκτρομαγνητική επίδραση επί των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.
- Προκαλούν μετατόπιση του ρεύματος σε σχέση με την τάση και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή ισχύος και συνεπώς την αύξηση της άεργου ισχύος [40].

Η ΔΙΟΔΟΣ ΙΣΧΥΟΣ

Η δίοδος ισχύος (Power Diode) είναι ένα ηλεκτρονικό στοιχείο δύο εξόδων κατασκευασμένων από ημιαγωγούς τύπου 'n' και τύπου 'p'. Εφαρμόζοντας τάση στη δίοδο διαρρέεται ρεύμα από την άνοδο (+) προς την κάθοδο (-). Οι δίοδοι ισχύος είναι μη-ελεγχόμενα ηλεκτρονικά στοιχεία κατάλληλα για μεγάλο εύρος τάσης και ρεύματος και υψηλή ταχύτητα κατά τη μεταγωγή (σχ. 2.14-1α).

Η ΚΡΥΣΤΑΛΛΟΛΥΧΝΙΑ ΙΣΧΥΟΣ

Η κρυσταλλολυχνία ισχύος (Power Transistor) είναι ένα ηλεκτρονικό στοιχείο από τρεις στρώσεις ημιαγωγών p-n-p ή n-p-n και δύο εξόδους (σχ. 2.14-1b). Έχει διάφορες εφαρμογές, μερικές εκ των οποίων είναι η ενίσχυση, η σταθεροποίηση της τάσης, η διαμόρφωση συχνότητας, η μεταβλητή ωμική αντίσταση και η λειτουργία ως διακόπτης. Μπορεί ανάλογα με την τάση με την οποία πολώνεται να ρυθμίζει τη ροή του ρεύματος που απορροφά από συνδεδεμένη πηγή τάσης. Η λειτουργία του βασίζεται στον έλεγχο ενός εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου με την εφαρμογή εξωτερικού δυναμικού στον έναν από τους τρεις ακροδέκτες που ονομάζεται πύλη (gate). Το πεδίο αυτό ελέγχει την αγωγιμότητα μεταξύ των άλλων δύο ακροδεκτών, που ονομάζονται απαγωγός ή υποδοχή (drain) και πηγή (source). Το ρεύμα που διέρχεται από αυτούς τους δύο ακροδέκτες ελέγχεται από το πεδίο και έτσι, ο έλεγχος γίνεται με το δυναμικό της πύλης.

ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΣ ΑΝΟΡΘΩΤΗΣ ΠΥΡΙΤΙΟΥ (ΘΥΡΙΣΤΟΡ ΤΡΙΩΝ ΕΠΑΦΩΝ)

Ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου ή αλλιώς θυρίστορ (SCR) αποτελείται από διαδοχικά ημιαγωγικά στρώματα p-n. Διαθέτει τρεις ακροδέκτες, την άνοδο, η οποία είναι συνδεδεμένη με τον εξωτερικό ημιαγωγό τύπου -p, την κάθοδο, η οποία είναι συνδεδεμένη με τον εξωτερικό ημιαγωγό τύπου -n και την πύλη που είναι συνδεδεμένη στον ενδιάμεσο ημιαγωγό τύπου -p (σχ. 2.14-1c). Όταν στο SCR εφαρμοστεί τάση κατά την ανάστροφη φορά, δηλαδή η κάθοδος βρίσκεται σε μεγαλύτερο δυναμικό από την άνοδο, το ρεύμα περιορίζεται σε μια μικρή τιμή της τάξης των μA ή και μικρότερο, που ονομάζεται ρεύμα ανάστροφης φοράς. Η λειτουργική αυτή κατάσταση του SCR ονομάζεται αποκοπή. Αν εφαρμοστεί αρκετά μεγάλη ανάστροφη τάση τότε το SCR διασπάται, καταρρέει, δηλαδή χάνει την ιδιότητα της αποκοπής και διέρχεται από αυτό ρεύμα ανάστροφης φοράς πολύ μεγάλης τιμής. Το αποτέλεσμα είναι η καταστροφή της δίοδου. Η τιμή της τάσης, στην οποία συμβαίνει διάσπαση ή κατάρρευση του SCR,

ονομάζεται διάσπασης ή κατάρρευσης. Αν εφαρμοστεί τάση κατά την ορθή φορά δηλαδή ο θετικός πόλος της πηγής συνδέεται στην άνοδο και ο αρνητικός στην κάθοδο, τότε το SCR δεν άγει μέχρι η εφαρμοζόμενη ορθή τάση ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή, η οποία είναι χαρακτηριστική για το SCR και καλείται ορθή τάση κατάρρευσης (V_{BO}). Εάν η τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης ξεπεράσει την V_{BO} , τότε το SCR άγει και διαρρέεται με ρεύμα μεγάλης έντασης, που ονομάζεται ρεύμα ορθής φοράς ή ρεύμα αγωγιμότητας και αυτή η λειτουργική κατάσταση του SCR ονομάζεται αγωγιμότητα.

Το χαρακτηριστικό του SCR, που το κάνει ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές ελέγχου και μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι, ότι η ορθή τάση κατάρρευσης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζεται από το ρεύμα με το οποίο τροφοδοτείται η πύλη του SCR. Το ρεύμα αυτό καλείται ρεύμα πύλης ή ρεύμα σκανδάλισης (I_G). Αντίστοιχα η ορθή τάση κατάρρευσης του SCR μπορεί να ρυθμίζεται με την ορθή τάση που εφαρμόζεται μεταξύ πύλης και καθόδου και καλείται τάση πύλης (V_G). Τόσο το ρεύμα πύλης όσο και η τάση πύλης συνήθως είναι μικρής χρονικής διάρκειας, δηλαδή είναι παλμοί, και καλούνται παλμός ρεύματος πύλης και παλμός τάσης πύλης αντίστοιχα. Όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα πύλης τόσο μικρότερη γίνεται η τάση V_{BO} . Η χρονική στιγμή κατά την οποία τροφοδοτείται η πύλη του SCR καλείται γωνία εκκίνησης ή γωνία σκανδάλισης. Η γωνία αυτή αντιστοιχεί στη φάση της τάσης τροφοδοσίας τη στιγμή της εκκίνησης του SCR και παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του SCR σε ένα κύκλωμα, γιατί μέσω αυτής είναι δυνατή η ρύθμιση της τάσεως, του ρεύματος και κατά συνέπεια της ισχύος εξόδου του κυκλώματος. Από τη στιγμή που το θυρίστορ αρχίζει να άγει, το ρεύμα πύλης δεν προσφέρει τίποτα στη λειτουργία του θυρίστορ και μπορεί να διακοπεί. Το SCR παραμένει σε κατάσταση αγωγιμότητας μέχρις ότου το ρεύμα αγωγιμότητας μειωθεί σε χαμηλά επίπεδα (της τάξης του 1% του ονομαστικού ρεύματος του SCR), οπότε και επανέρχεται στην κατάσταση αποκοπής. Η ελάχιστη τιμή του ρεύματος για την οποία το SCR παραμένει σε κατάσταση αγωγιμότητας, ονομάζεται ρεύμα συγκράτησης (holding current), (I_H). Τόσο για την εκκίνηση όσο και για την αποκοπή του SCR απαιτούνται ιδιαίτερα κυκλώματα, που ονομάζονται κυκλώματα εκκίνησης και κυκλώματα αποκοπής αντίστοιχα. Με κατάλληλη γωνία εκκίνησης του SCR είναι δυνατόν να ρυθμιστεί η ισχύς εξόδου στα επιθυμητά επίπεδα. Το SCR και η λειτουργία του σε κύκλωμα, φαίνεται στο σχήμα 2.15.

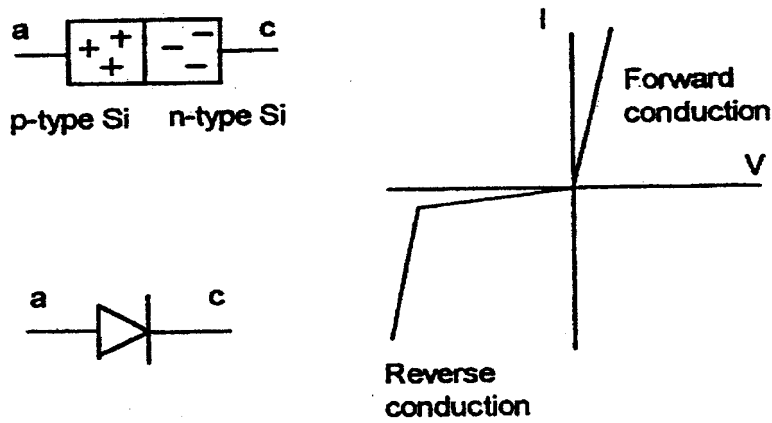


Fig 1(a) Power diode: structure, symbol and v-i characteristics

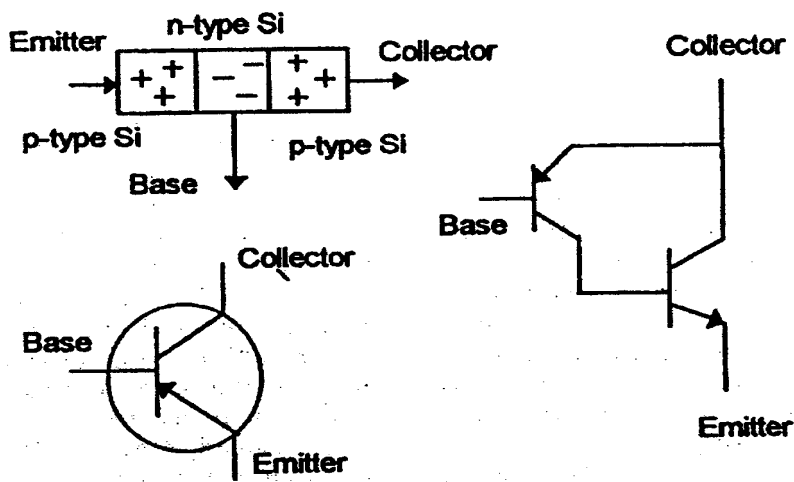


Fig 1(b) Power transistor: structure, symbol and darlington pair

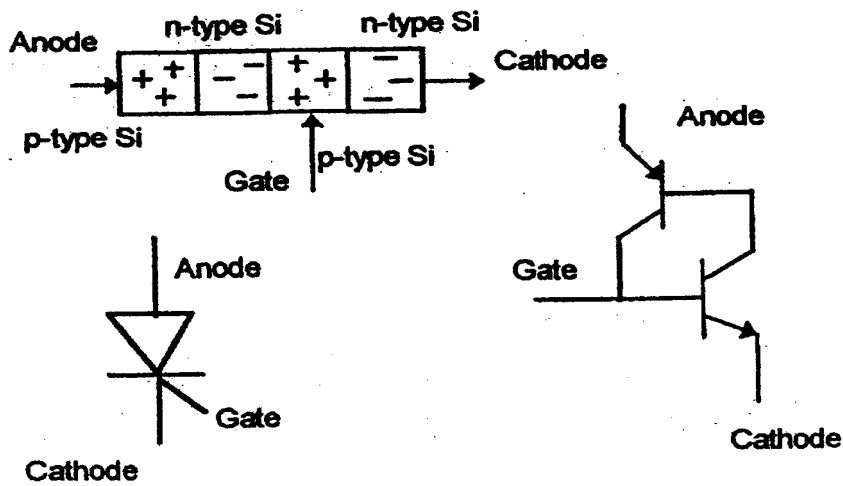
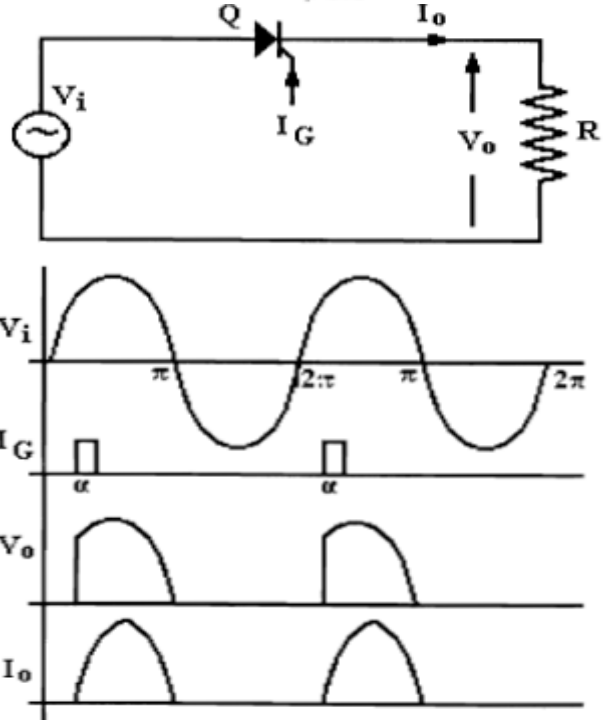
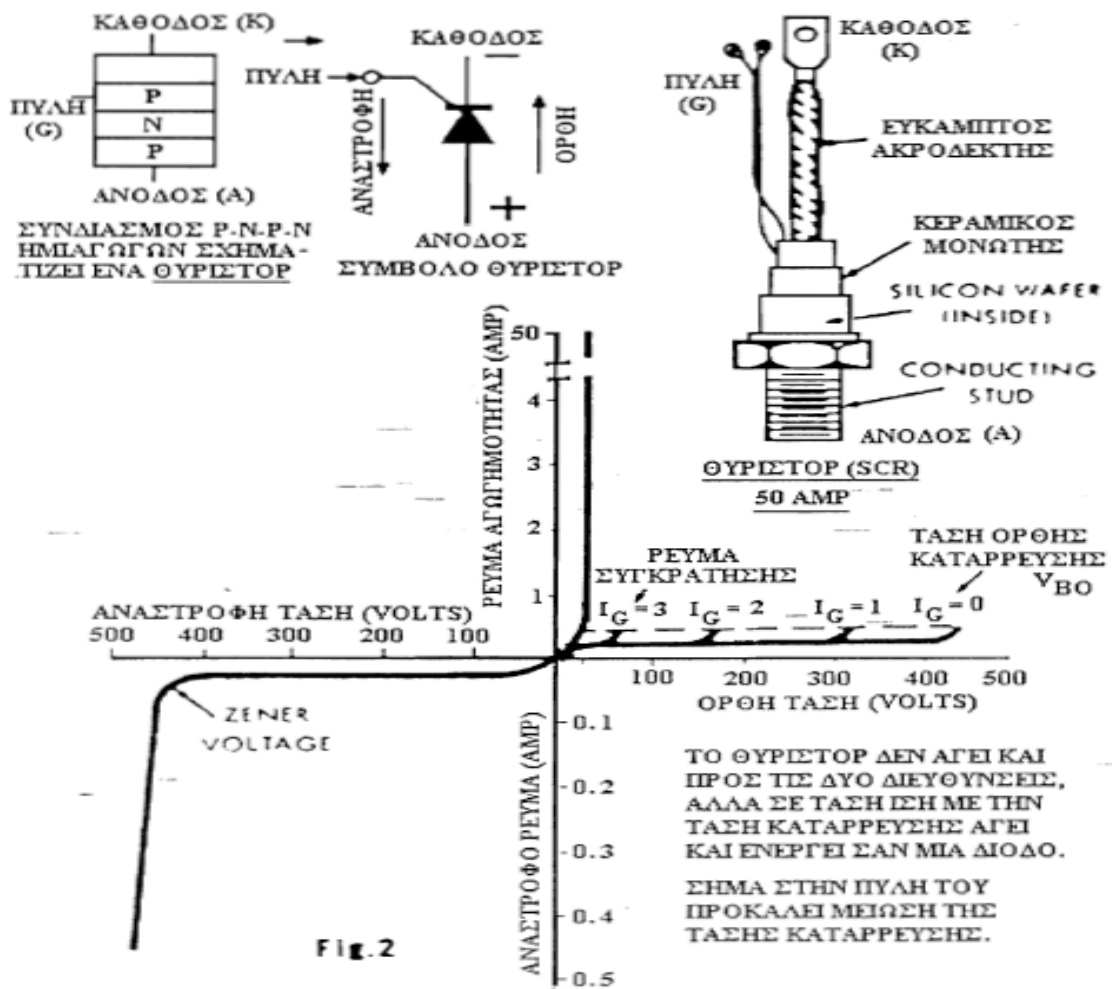


Fig 1(c) Thyristor: structure, symbol and the two transistor analogy

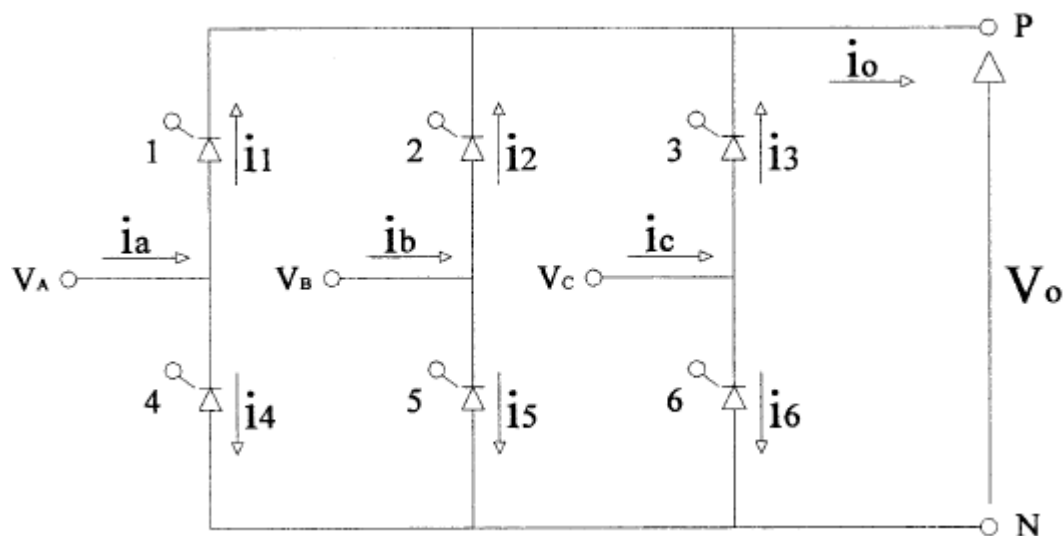
Σχήμα 2.14 : Η διάδος, το τρανζίστορ και το θυρίστορ



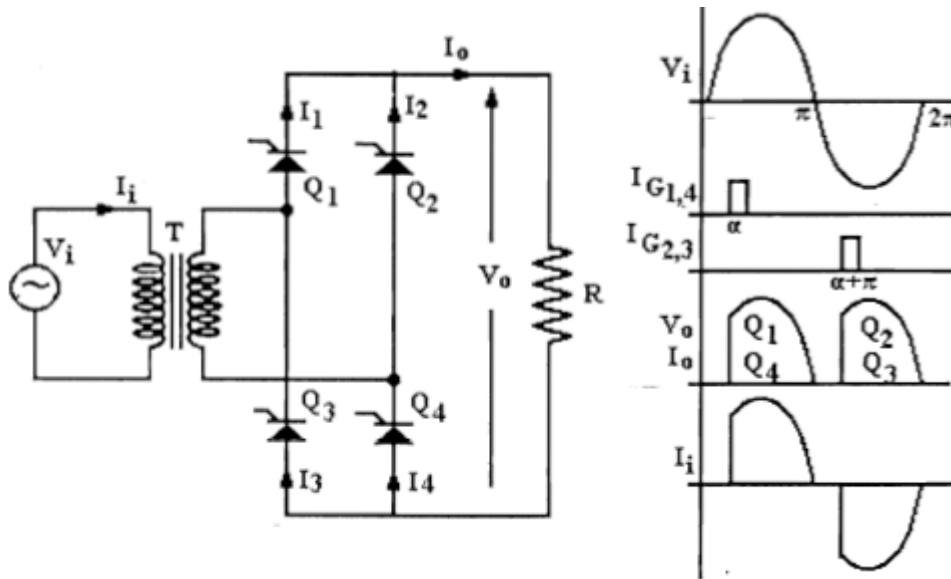
Σχήμα 2.15 : Το θυρίστορ SCR και η λειτουργία του σε κύκλωμα

2.4.3 Ανορθωτής ή Μετατροπέας AC-DC

Υπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί τύποι μετατροπέων ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι, ανεξαρτήτως του σχεδιασμού τους έχουν ως σκοπό τη μετατροπή της εναλλασσόμενης A.C τάσης σε συνεχή D.C, χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος. Οι μετατροπείς γενικά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σε ελεγχόμενους και μη-ελεγχόμενους. Ο μετατροπέας στα κυκλώματά του οποίου χρησιμοποιούνται δίοδοι, είναι μη-ελεγχόμενος, έχοντας μέση τιμή συνεχούς D.C τάσης εξόδου, η οποία καθορίζεται από τον αριθμό φάσεων τροφοδοσίας και το μέγεθος της τάσης εισόδου. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου δηλαδή χρησιμοποιούνται θυρίστορ, GTO, IGBT ή και τρανζίστορ ισχύος, ο μετατροπέας είναι πλήρως ελεγχόμενος και η μέση τιμή συνεχούς D.C τάσης εξαρτάται από τη γωνία εκκίνησης ή γωνία σκανδάλισης των θυρίστορ, όπως αναφέρθηκε προηγούμενα. Ο πλήρως ελεγχόμενος τριφασικός μετατροπέας, παρατίθεται στα σχήματα 2.16 και 2.17. Χρησιμοποιούνται επίσης ημι-ελεγχόμενοι μετατροπείς συνδυάζοντας δίοδους και θυρίστορ, των οποίων το όριο ισχύος είναι περί τα 6 MVA [37].



Σχήμα 2.16 : Το κύκλωμα του πλήρως ελεγχόμενου τριφασικού μετατροπέα

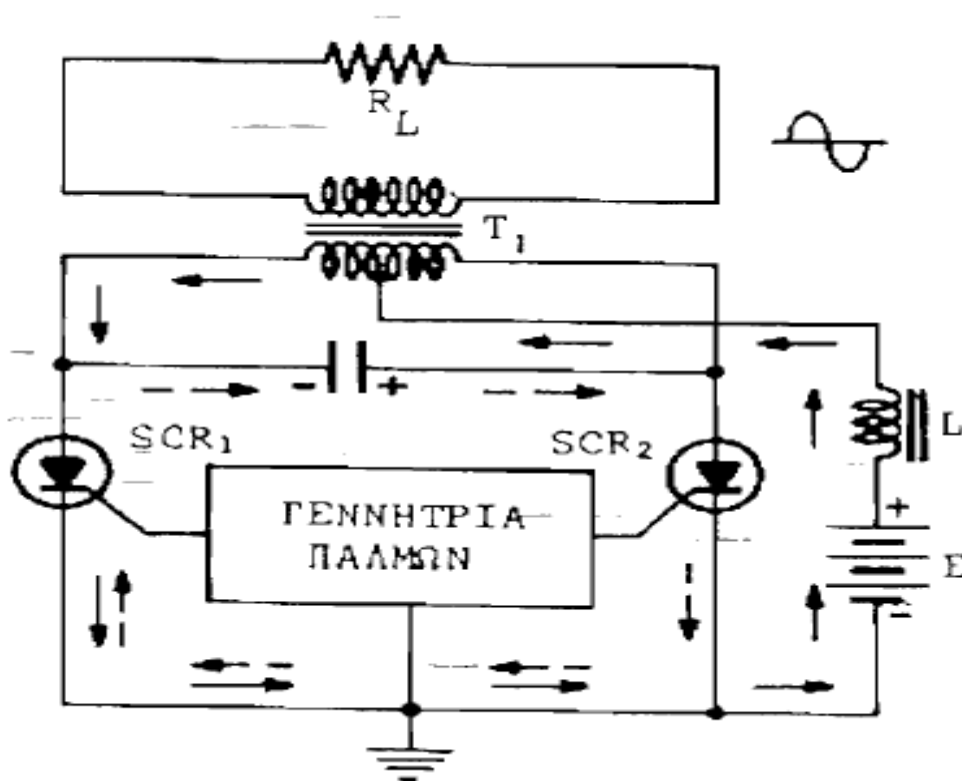


Σχήμα 2.17 : Ο πλήρως ελεγχόμενος τριφασικός μετατροπέας AC-DC

2.4.4 Μετατροπέας DC-AC ή αντιστροφέας (Inverter)

Είναι μια διάταξη η οποία μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη τάση μέσω πλάτους διαφορετικού από τη σταθερή τιμή της τάσεως εξόδου. Οι διατάξεις αυτές απαντώνται συνήθως στα συστήματα ελέγχου ταχύτητας σε ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος. Στο σχήμα 2.18 παρουσιάζεται ένα βασικό κύκλωμα μετατροπέα από DC σε AC. Η γεννήτρια παλμών που παρουσιάζεται στο κύκλωμα μπορεί να είναι είτε ένα κύκλωμα έναυσης αποτελούμενο από flip-flops είτε ένας κλασσικός ταλαντωτής παλμών. Έστω ότι το SCR1 έπειτα από ένα κατάλληλο παλμό έναυσης στην πύλη του, βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας και το SCR2 σε κατάσταση αποκοπής. Το παραγόμενο ρεύμα από την πηγή E μπορεί να τροφοδοτήσει διαμέσου του μισού πηνίου του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή T1 και του SCR1 (αφού το τελευταίο βρίσκεται σε αγωγιμότητα). Επειδή αυτό το ρεύμα είναι αρχικά μεταβαλλόμενο δημιουργείται στα άκρα ολόκληρου του πηνίου του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή τάση από αυτεπαγωγή τιμής $2E$, η οποία φορτίζει τον πυκνωτή και με πολικότητα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18. Την κατάλληλη χρονική στιγμή (η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα της επιθυμητής παραγόμενης EP τάσης) η γεννήτρια παλμών διοχετεύει έναυση στην πύλη του SCR2, ο οποίος τον καθιστά σε κατάσταση αγωγιμότητας. Τότε ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω του SCR2 δημιουργώντας ρεύμα αντίθετης φοράς, αυτό δηλαδή με το οποίο συντηρείται σε αγωγιμότητα το SCR1. Έτσι σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα το SCR1 μεταβαίνει σε αποκοπή. Τη στιγμή αυτή έχει

συμπληρωθεί μια πλήρης ημιπερίοδος της αναπτυσσόμενης εξ επαγωγής τάσης στα άκρα του δευτερεύοντος πηνίου του μετασχηματιστή. Το ρεύμα κυκλοφορώντας αντίθετα φορτίζει τον πυκνωτή ανάστροφα σε σχέση με την προηγούμενη. Στη συνέχεια δίνεται έναυση στο SCR1. Με την εκφόρτιση του πυκνωτή αποκόπτεται το SCR2 με όμοιο τρόπο όπως το SCR1. Τη στιγμή εκείνη έχει ολοκληρωθεί η δεύτερη ημιπερίοδος (αντίθετης πολικότητας) στο δευτερεύον πηνίο του μετασχηματιστή. Έτσι η συνεχής τάση E έχει μετατραπεί σε περίπου ημιτονοειδή εναλλασσόμενη τάση στα άκρα του δευτερεύοντος πηνίου του μετασχηματιστή, η οποία τροφοδοτεί την αντίσταση R_L [40].



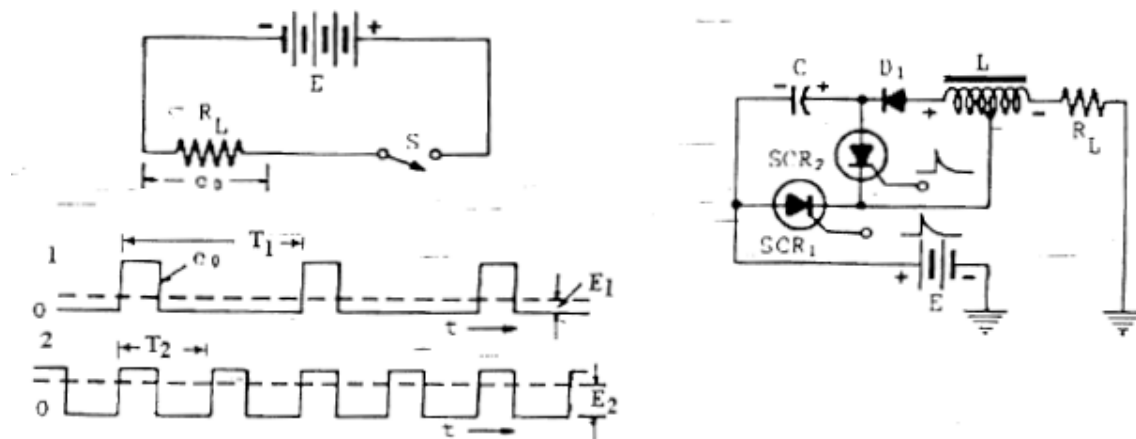
Σχήμα 2.18 : Το κύκλωμα του αντιστροφέα (inverter) DC-AC

2.4.5 Καταμητής συνεχούς ρεύματος (DC chopper) ή ψαλιδοτής

Πρόκειται για διάταξη που μετατρέπει συνεχείς τάσεις (ή συνεχείς διακοπτόμενες τάσεις) σε συνεχείς διακοπτόμενες τάσεις διαφορετικής μέσης τιμής. Οι μετατροπείς αυτοί βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα ελέγχου ταχύτητας ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και τρένα.

Είναι απλά κυκλώματα αποτελούμενα από μια πηγή συνεχούς τάσης που τροφοδοτεί μια αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά με ένα διακόπτη, ο οποίος διακόπτει και αποκαθιστά το κύκλωμα με κάποιο ρυθμό επανάληψης. Όταν η συχνότητα των διακοπών είναι χαμηλή, τότε είναι μικρή και η μέση τιμή E_0 της εναλλασσόμενης τάσης e_0 στα άκρα

της αντίστασης. Η μέση τιμή E_0 της e_0 είναι επίσης ανάλογη και από το χρόνο αγωγιμότητας του διακόπτη. Ένα απλό κύκλωμα καταμητή συνεχούς τάσης φαίνεται στο σχήμα 2.19. Τη θέση του διακόπτη έχουν λάβει τα θυρίστορ SCR1 (πρωτεύον) και SCR2 (δευτερεύον). Έστω ότι το SCR1 έρχεται σε αγωγιμότητα σε κάποια χρονική στιγμή t_1 . Τότε η πηγή E διοχετεύει ρεύμα το οποίο περνά από το SCR1, από τμήμα του πηνίου L και από την αντίσταση R_L . Το ρεύμα αυτό, το οποίο αρχικά είναι μεταβαλλόμενο, δημιουργεί μέσω του πηνίου μια τάση εξ αυτεπαγωγής με θετικότερη τιμή στο άνω άκρο του πηνίου. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο πυκνωτής C φορτίζεται ανάστροφα σε σχέση με την τάση στα άκρα του πηνίου, και με την πολικότητα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.19. Λόγω της διόδου D_1 είναι αδύνατο να εκφορτιστεί ο πυκνωτής. Με την εκκίνηση όμως του δεύτερου θυρίστορ SCR2, ο πυκνωτής εκφορτίζεται δημιουργώντας ρεύμα το οποίο διοχετεύεται μέσω του κυκλώματος προς το πρωτεύον θυρίστορ και επειδή είναι αντίθετης φοράς από τη φορά του ρεύματος αγωγιμότητάς του έχει σαν αποτέλεσμα έπειτα από μικρό χρονικό διάστημα το SCR1 να μεταβεί σε κατάσταση αποκοπής. Ακολουθεί η αποκοπή με τον ίδιο τρόπο του SCR2 και το κύκλωμα παραμένει ανενεργό μέχρι να δοθεί ξανά έναυση στο SCR1, οπότε επαναλαμβάνεται ο παραπάνω κύκλος λειτουργίας.

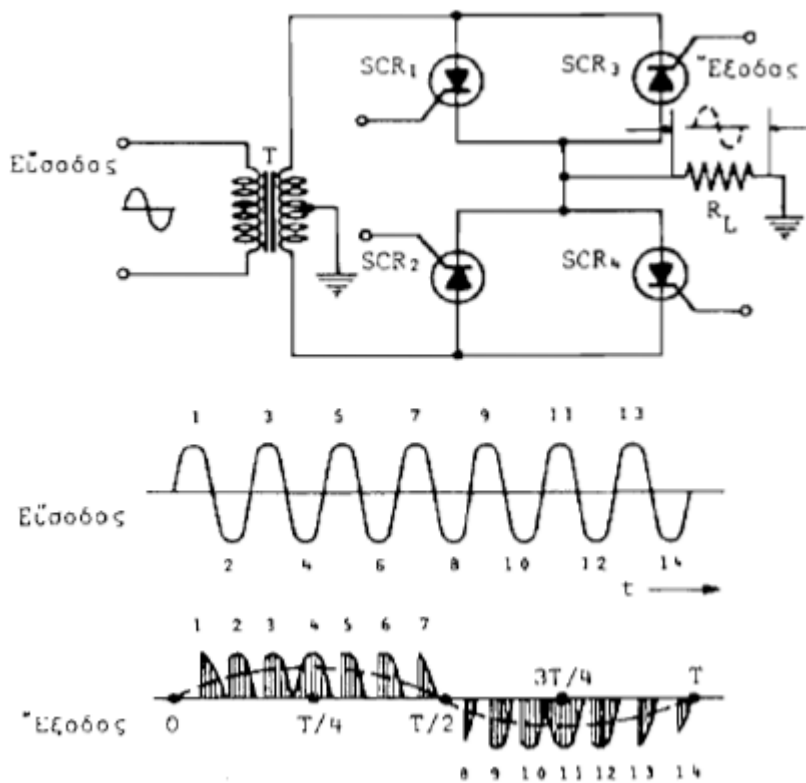


Σχήμα 2.19 : Το κύκλωμα του DC chopper ή ψαλιδοστή

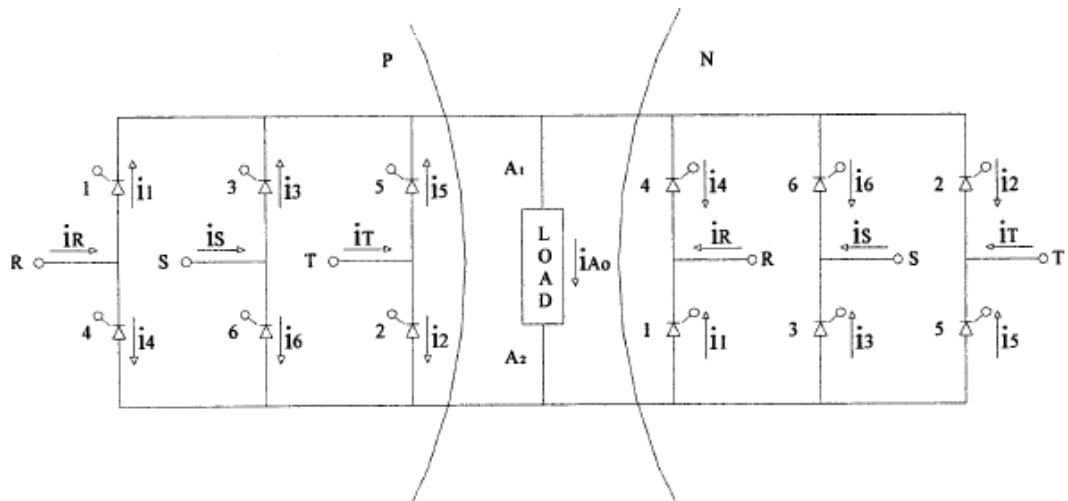
2.4.6 Κυκλομετατροπέας (Cycloconverter) ή μετατροπέας AC-AC

Ο κυκλομετατροπέας είναι μια διάταξη η οποία μετατρέπει μια εναλλασσόμενη τάση ορισμένης συχνότητας και πλάτους σε εναλλασσόμενη τάση, μικρότερης συχνότητας και πλάτους. Η συχνότητα και το πλάτος της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου είναι δυνατόν

να μεταβάλλονται (ρυθμίζονται). Ένα απλό κύκλωμα κυκλομετατροπέα και οι διάφορες κυματομορφές εισόδου-εξόδου παρατίθενται στο σχήμα 2.20. Για τη λήψη της επιθυμητής κυματομορφής εξόδου (διακεκομμένη γραμμή) απαιτείται η λειτουργία ανά ζεύγη των θυρίστωρ SCR₁, SCR₂, SCR₃ και SCR₄. Το πρώτο ζεύγος λειτουργεί κατά τη θετική ημιπερίοδο της επιθυμητής τάσης εξόδου ενώ το δεύτερο κατά την αρνητική ημιπερίοδο (παλμοί 1-7 και 8-14 αντίστοιχα). Έτσι στα άκρα του φορτίου R_L δημιουργούνται παλμοί μονοφασικής πλήρους ανόρθωσης. Η γωνία αγωγιμότητας των παλμών αυτών μεταβάλλεται έτσι ώστε η μέγιστη μέση τιμή να παρουσιάζεται στους χρόνους T/4 και 3T/4 (μέγιστο πλάτος) της περιόδου T της τάσης εξόδου. Η συχνότητα και το πλάτος της παραγόμενης νέας εναλλασσόμενης τάσης καθορίζονται από το κύκλωμα σκανδάλισης των SCRs[27],[40].



Σχήμα 2.20 : Το κύκλωμα του κυκλομετατροπέα και οι κυματομορφές εισόδου-εξόδου

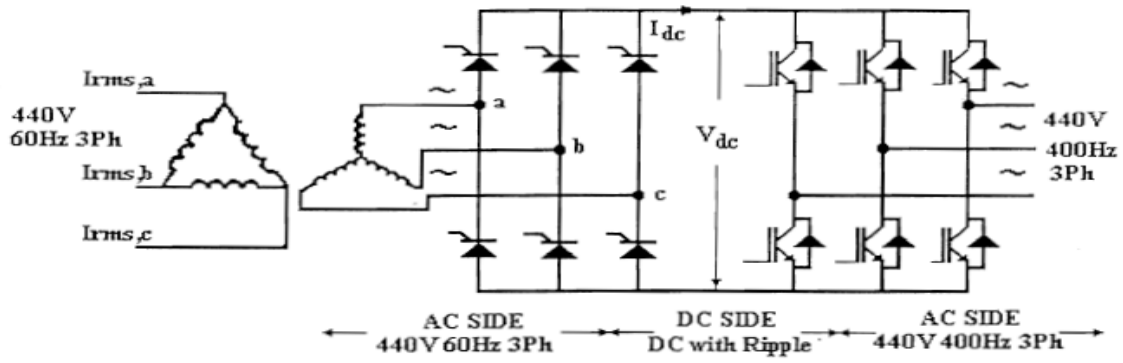


Σχήμα 2.21 : 3φ-1φ,6-pulse,κυκλομετατροπέας

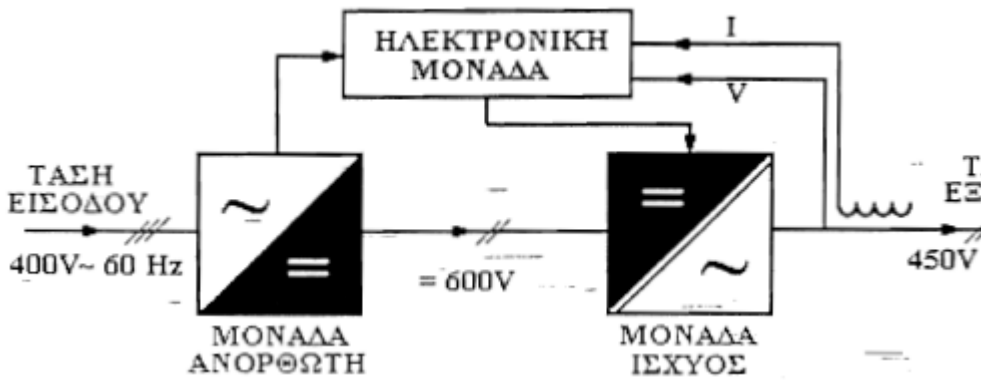
2.4.7 Μετατροπέας AC-DC-AC

Ο μετατροπέας αυτός μετατρέπει αρχικά την AC τάση σε DC και στη συνέχεια την DC τάση σε AC συγκεκριμένης συχνότητας και πλάτους. Η διάταξη αυτή, που είναι ένας συνδυασμός ανορθωτή (rectifier) και ενός αντιστροφέα (inverter) επιτρέπει τη ρύθμιση της συχνότητας και του πλάτους της AC τάσης εξόδου χωρίς κανένα περιορισμό, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του κυκλομετατροπέα. Στο σχήμα 2.22 παρατίθεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός τέτοιου μετατροπέα και στο σχήμα 2.23 η βασική αρχή λειτουργίας του μετατροπέα. Η μετατροπή από ΣΡ σε ΕΡ βασίζεται στην αρχή λειτουργίας της βηματικής διαμόρφωσης.

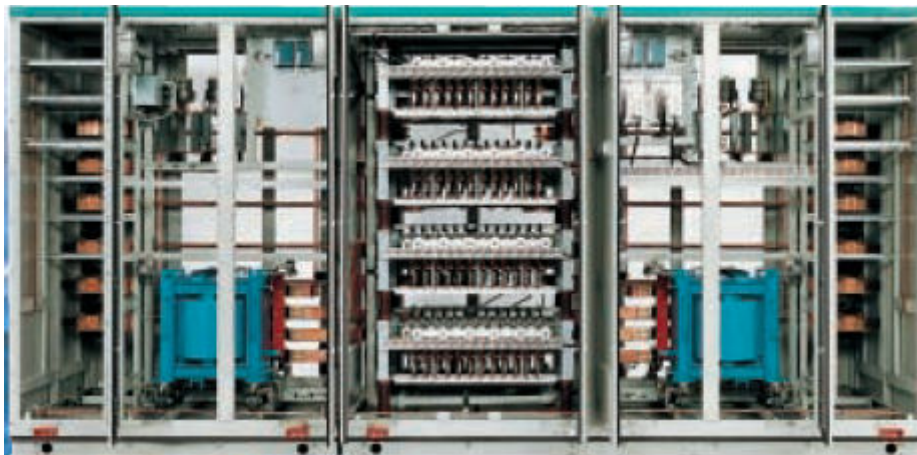
Μια τέτοια εφαρμογή αποτελεί ο στατός μετατροπέας συχνότητας 5WA 400/90, με τον οποίο είναι εφοδιασμένες οι φρεγάτες τύπου 'MEKO'. Σ' αυτόν το μετατροπέα χρησιμοποιούνται ως στοιχεία διακοπών ηλεκτρονικά ισχύος IGBTs (διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης), τα οποία συνδυάζουν τη γρήγορη διακοπή και την απλότητα του κυκλώματος οδήγησης του τρανζίστορ με επίδραση πεδίου και το μεγάλο ρεύμα αγωγιμότητας κατά τη λειτουργία του διπολικού τρανζίστορ. Κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος είναι ο μικρός όγκος, η συμπαγής κατασκευή, το μικρό βάρος, η υψηλή απόδοση, η απλή λειτουργία και συντήρηση (σχήμα 2.24 και 2.25).



Σχήμα 2.22 : Απλοποιημένο διάγραμμα μετατροπέα AC-DC-AC



Σχήμα 2.23 : Η βασική αρχή λειτουργίας του μετατροπέα AC-DC-AC



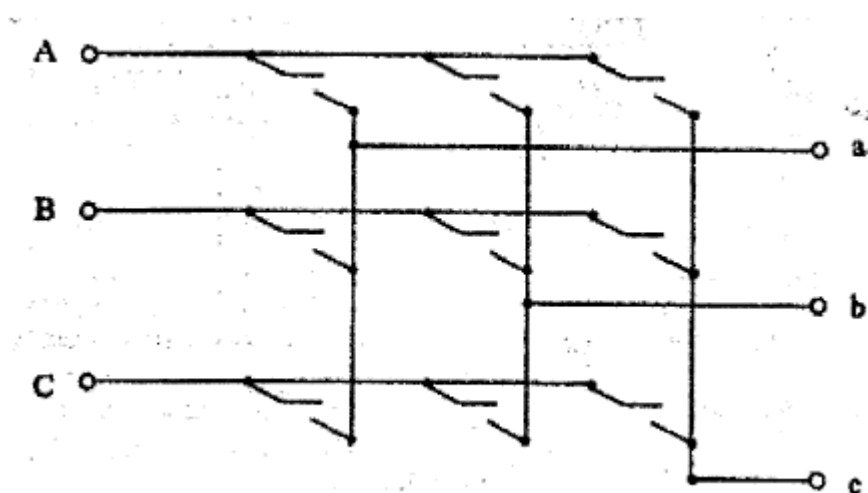
Σχήμα 2.24 : Υδρόψυκτος Converter



Σχήμα 2.25 : Αερόψυκτος Converter

2.4.8 Μητροειδής μετατροπέας (Matrix converter)

Ο μητροειδής μετατροπέας είναι μια εναλλακτική διάταξη κυκλομετατροπέα του οποίου το κύριο χαρακτηριστικό είναι ότι κάθε ενιαία φάση εξόδου μπορεί να τροφοδοτηθεί από την αντίστοιχη φάση εισόδου όπως φαίνεται στο σχήμα 2.26. Αν και οι δυνατότητες της συγκεκριμένης διάταξης είναι πολύ ενθαρρυντικές, δεν υπάρχει καμία εφαρμογή των μητροειδών μετατροπέων μέχρι στιγμής [37],[10].



Σχήμα 2.26 : Ο μητροειδής μετατροπέας (matrix converter)

2.4.9 Κυκλώματα καταστολής (snubber circuits)

Σε όλους τους μετατροπείς με ηλεκτρονικά ισχύος παρεμβάλλονται και κυκλώματα με αντιστάσεις σε σειρά με πυκνωτές (RC), με σκοπό την καταστολή κάποιων ταχέων μεταβατικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κυρίως κατά τη σβέση των διακοπών και καταπονούν την όλη διάταξη. Τα κυκλώματα αυτά έχουν μικρή επίδραση στη συνολική συμπεριφορά των μετατροπέων, ωστόσο αυξάνουν την πολυπλοκότητά τους καθώς επίσης και τη συνολική απόδοση, αφού συνεισφέρουν στις συνολικές απώλειες[37].

2.5 Ηλεκτρικοί κινητήρες

2.5.1 Σύγχρονοι κινητήρες

Η δομή και οι ρυθμίσεις ενός σύγχρονου κινητήρα είναι παρόμοιες με αυτές της σύγχρονης γεννήτριας. Όταν σε μια γεννήτρια το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα και δεν παρέχεται ροπή στρέψης, τότε λειτουργεί ως κινητήρας. Εντούτοις το τύλιγμα πεδίου θα πρέπει να τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς ρεύματος (διέγερση).

2.5.2 Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών

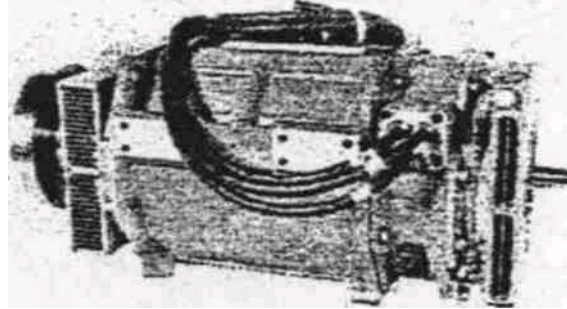
Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των κινητήρων είναι ότι το τύλιγμα πεδίου που συνήθως τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα DC, αντικαθίσταται από μόνιμους μαγνήτες. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός σταθερής έντασης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, το οποίο περιστρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα. Τα πλεονεκτήματα αυτής της καινοτόμου διάταξης είναι ότι δεν υπάρχει πλέον η ανάγκη τροφοδότησης με συνεχές ρεύμα DC και γι' αυτό το λόγο αυξάνεται ο τελικός βαθμός απόδοσης (πάνω από 98%), σε αντίθεση με τους συμβατικούς σύγχρονους κινητήρες των οποίων ο τελικός βαθμός απόδοσης δεν ξεπερνά το 96%. Η ιδέα της χρησιμοποίησης των μόνιμων μαγνητών υπήρξε από παλιά αλλά η τεχνολογική πρόοδος, που εκπληρώθηκε με την κατασκευή μαγνητών ικανών να διατηρούν το μέγεθός τους στις υψηλές θερμοκρασίες, την κατέστησε εφαρμόσιμη και σημαντική. Ένα άλλο σοβαρό πλεονέκτημα αυτών των κινητήρων είναι το συμπαγές μέγεθός τους και το σχετικά μικρό τους βάρος. Στο σχήμα 2.27 παρατίθεται συγκριτικά ένας κινητήρας παραμένουσας μαγνήτισης και ένας ασύγχρονος κινητήρας

ίδιας ονομαστικής ισχύος. Όπως φαίνεται ο κινητήρας μόνιμου μαγνητισμού είναι πολύ μικρότερου μεγέθους και βάρους.

Τέλος, η ανάπτυξη και η εφαρμογή της πρόωσης των πλοίων με την χρήση των PODs (βλ. κεφ. 3.3.5), οφείλεται σε αυτή την τεχνολογία καθόσον οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών αποτελούν την σταθερή επιλογή για τους κινητήρες αυτού του είδους πρόωσης, κάνοντάς την υδροδυναμικά αποδοτικότερη[26],[35].



100 Kg



630Kg

Σχήμα 2.27 : Σύγκριση κινητήρα μόνιμων μαγνητών και ασύγχρονου κινητήρα

2.5.3 Ασύγχρονοι κινητήρες

Στους ασύγχρονους κινητήρες υπάρχει ο ρότορας, ο οποίος έχει ένα κύκλωμα στο τύλιγμά του το οποίο, τις περισσότερες φορές, δεν συνδέεται εξωτερικά. Προκειμένου να αναπτυχθεί ρεύμα στο τύλιγμα, θα πρέπει να υπάρξει ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε αυτό, όσον αφορά στο στρόφείο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διαφορετική ταχύτητα περιστροφής του πεδίου του στάτη από αυτή του δρομέα. Η διαφορά αυτή καλείται 'ολίσθηση'. Έτσι ο ρότορας στρέφει ασύγχρονα σε σχέση με το πεδίο του στάτη. Το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα προκαλεί ένα ρεύμα επαγωγής στο στάτη και στη συνέχεια αυτό το ρεύμα επαγωγής προκαλεί το μαγνητικό πεδίο. Η αλληλεπίδραση των αναπτυχθέντων πεδίων στο στάτη και στο δρομέα αποτελεί και τη βασική αρχή λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα [38].

2.6 Πίνακας διανομής ηλεκτρικής ισχύος

Ο πίνακας διανομής ισχύος είναι σχεδιασμένος για να διανέμει κατάλληλα ηλεκτρική ισχύ μέσης τάσης συνήθως, σε συστήματα και υποπίνακες συστημάτων, κατά μήκος του πλοίου. Περιλαμβάνει τον πίνακα ελέγχου της γεννήτριας, τους πίνακες των φορτίων κατανάλωσης καθώς επίσης και τους πίνακες ελέγχου και διαχείρισης.

Συνήθως οι πίνακες διανομής ισχύος είναι εξοπλισμένοι με το σύστημα διαχείρισης ηλεκτρικής ισχύος, στους σκοπούς του οποίου είναι τα ακόλουθα:

- Αυτόματη εκκίνηση μετά από blackout
- Αυτόματος παραλληλισμός γεννητριών
- Έλεγχος της τάσης εξόδου της γεννήτριας
- Συμμετρική κατανομή των φορτίων
- Μεμονωμένη εκκίνηση/κράτηση φορτίου
- Διασφάλιση της απαιτούμενης ισχύος για μεγάλα φορτία
- Δυνατότητα επείγουσας κράτησης λιγότερο ουσιαστικών ομάδων φορτίων
- Χειροκίνητη λειτουργία ανάγκης (χειροκίνητος παραλληλισμός των γεννητριών και καταμερισμός ισχύος)

Σε κάθε ένα πίνακα διανομής ηλεκτρικής ισχύος ενός πλοίου δίνεται η δυνατότητα στον χειριστή να επιλέξει το συγκεκριμένο επίπεδο λειτουργίας του πλοίου, επιλέγοντας τον αριθμό των γεννητριών που επιθυμεί να τεθούν σε λειτουργία και να παραλληλιστούν ανάλογα με τις απαιτήσεις σε φορτία καθώς επίσης και τη σειρά εκκίνησης-κράτησης αυτών.

Τέλος, οι κύριοι πίνακες διανομής ηλεκτρικής ισχύος είναι τοποθετημένοι σε μεταλλικό σκελετό (σασί) και εδράζονται σε βάσεις σύμφωνα με προδιαγραφές ασφάλειας και προστασίας από διείσδυση ξένων στερεών σωμάτων και ατμοποιημένων υγρών. Σε κάθε πίνακα υπάρχουν εγκατεστημένοι τρεις χάλκινοι ζυγοί υψηλής αγωγιμότητας και ένας ζυγός γείωσης που συνδέεται με το σκάφος. Στο εσωτερικό των πινάκων είναι εγκατεστημένες ηλεκτρικές αντιστάσεις, οι οποίες είναι μονίμως σε λειτουργία, προς αποφυγή δημιουργίας ατμών στο εσωτερικό των πινάκων.

2.7 Καλώδια

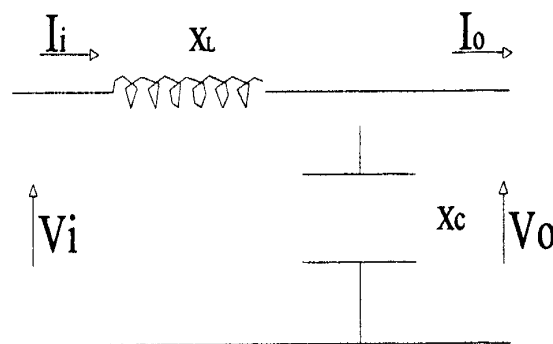
Τα καλώδια τα οποία χρησιμοποιούνται σε ναυτικές εφαρμογές και ειδικά σε πολεμικά πλοία χαρακτηρίζονται από την υψηλή τους θωράκιση και τη δυσκαυστότητά τους. Το πρόβλημα που ανακύπτει για αυτά τα καλώδια, έχοντας αυτές τις υψηλές απαιτήσεις ασφαλείας, είναι ότι αναπτύσσονται πολλά παρασιτικά φαινόμενα τα οποία μεγιστοποιούνται κατά τη διάρκεια των μεταβατικών συνθηκών.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των καλωδίων, το οποίο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι εκείνο των διαστάσεων και του βάρους. Είναι λογικό ότι στα πλοία που η πρόωσή τους είναι ηλεκτρική, ο όγκος που καταλαμβάνουν τα καλώδια είναι μεγάλος και κατά συνέπεια ο σχεδιασμός θα πρέπει να είναι προσεκτικός, έτσι ώστε να καθίσταται προσβάσιμος ο έλεγχος και η τυχόν επισκευή τους.

2.8 Φίλτρα

Όταν σε ένα κύκλωμα ισχύος, που υπάρχει γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος η οποία παράγει ισχύ συχνότητας 60 Hz προστεθεί ένας κινητήρας ως φορτίο, εξαιτίας της μη γραμμικότητας των υλικών από τα οποία αποτελείται ο κινητήρας, αναπτύσσονται στο φάσμα των συχνοτήτων, ως επιστροφές, και άλλες συχνότητες, πολλαπλάσιες των 60 Hz, οι λεγόμενες 2_η και 3_η αρμονική. Η ύπαρξη αυτών, τελικά μειώνουν τη συνολική απόδοση του κυκλώματος, αφού η συνολική μεταφερόμενη ισχύς στα 60 Hz κατανέμεται και στις υπόλοιπες αρμονικές απομειώνοντας κατά ένα ποσοστό, έστω και μικρό, την αντίστοιχη των 60 Hz. Τέλος, αποτέλεσμα της ύπαρξης αρμονικών είναι η παραμόρφωση της τάσης και του ρεύματος στο κύκλωμα.

Τα LC φίλτρα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.28, εγκαθίστανται προκειμένου να περιορίσουν την παραμόρφωση του ρεύματος και της τάσης. Οι αρχές, στις οποίες είναι βασισμένη η λειτουργία των φίλτρων LC, παρουσιάζεται στις παρακάτω εξισώσεις[37].



Σχήμα 2.28 : Το φίλτρο LC

Οι σχέσεις που συνδέουν το ρεύμα και την τάση εισόδου και εξόδου σε ένα φίλτρο LC είναι οι ακόλουθες:

$$\tilde{I}_O^{(n)} = \tilde{I}_i^{(n)} - \frac{\tilde{V}_O^{(n)}}{j^* X_C^{(n)}}$$

$$\tilde{V}_O^{(n)} = \frac{j^* X_C^{(n)}}{j^* X_L^{(n)} + j^* X_C^{(n)}} * V_i^{(n)} \Rightarrow \tilde{V}_O^{(n)} = \frac{j/(n \omega L)}{j^* (n \omega n \omega - j/(n \omega L))} * V_i^{(n)}$$

$$\tilde{V}_O^{(n)} = \frac{1}{n^2 \omega^2 LC - 1} * V_i^{(n)}$$

$$\tilde{I}_O^{(n)} = \tilde{I}_i^{(n)} - \frac{1}{j/(n \omega L)} * \frac{1}{n^2 \omega^2 LC - 1} * \tilde{V}_i^{(n)}$$

ΜΕΡΟΣ 3

ΚΡΙΣΙΜΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΑΞΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΠΡΩΩΣΗΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Προκειμένου να καταστεί ολοκληρωμένη και πλήρης μια συγκριτική μελέτη μεταξύ των διαφόρων συστημάτων πρόωσης θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας όλα τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης. Στις παρακάτω σελίδες παρουσιάζεται τί θα πρέπει να λαμβάνει ο τελικός χρήστης υπόψη του, πριν προβεί στην τελική του απόφαση σχετικά με τη διάταξη των μηχανημάτων πρόωσης, στις νέες κατασκευές πλοίων.

Ο εφεδρεία (redundancy) στη λειτουργία των συστημάτων πρόωσης είναι ένας καινούργιος όρος, που πλέον λαμβάνεται υπόψη σχεδόν από όλους τους νηογνώμονες, αρχίζει δε και παίζει σημαντικό ρόλο στην τελική επιλογή των συστημάτων πρόωσης και αποσκοπεί στην επαύξηση ασφάλειας των πλοίων, κάτι που υιοθετείται και από τον τελικό χρήστη.

Ο σχεδιασμός του πλοίου και της εγκατάστασης προώσεως είναι επίσης πτυχές, οι οποίες συζητούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία, δεδομένου ότι ένα πλήρως εξηλεκτρισμένο σκάφος μπορεί να παρουσιάσει τα πλεονεκτήματά του, μόνο αν υιοθετηθεί μια νέα μέθοδος σχεδιασμού του πλοίου. Το λάθος που γίνεται μερικές φορές είναι το να προσπαθούμε να εγκαταστήσουμε συστήματα ηλεκτροπρόωσης σε συμβατικά πλοία. Κάτι τέτοιο συχνά οδηγεί σε παρανοήσεις και συνήθως καθιστά αναξιοποίητα μερικά πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης.

Το κόστος της συντήρησης είναι επίσης μια παράμετρος, η οποία πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά έτσι ώστε να αποφευχθεί μια άδικη προσέγγιση. Η ηλεκτροπρόωση παρέχει στους τελικούς χρήστες την ευκαιρία ενός ευέλικτου προγράμματος εκτέλεσης περιοδικών επιθεωρήσεων, το οποίο οδηγεί στη μείωση του κόστους λειτουργίας κατά την περίοδο ζωής του πλοίου και κατά μια έννοια στη μείωση του χρόνου απομίσθωσης του πλοίου. Το τελευταίο βέβαια, όταν πρόκειται για πολεμικά πλοία, όπως στην παρούσα, δεν λαμβάνεται και ιδιαίτερα υπόψη, μιας και η άμυνα μιας χώρας και η διαφύλαξη και η προάσπιση των κυριαρχικών της δικαιωμάτων δεν αποτιμώνται σε χρήμα.

Πολλές φορές ο λόγος απόρριψης της ηλεκτροπρόωσης ως εναλλακτικής πρότασης από τον τελικό χρήστη, οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι υψηλές απώλειες

μετάδοσής της οδηγούν στην αυξημένη κατανάλωση καυσίμου. Αυτό είναι ένα αρνητικό της ηλεκτροπρόωσης όσον αφορά στην οικονομία καυσίμου. Αλλά και πάλι διάφοροι παράγοντες όπως για παράδειγμα το κόστος ελαίου λιπάνσεως (Lub oil) ή το κόστος άλλων βοηθητικών μηχανημάτων, είναι ικανοί να περιορίσουν την ανωτέρω διαφορά. Στην περίπτωση δε και εγκατάστασης Αζιμουθιακού Προωστήριου Συστήματος (pods), η οικονομία καυσίμων συνηγορεί υπέρ της ηλεκτροπρόωσης, μιας και επιτυγχάνεται σημαντικά χαμηλότερη αντίσταση του πλοίου.

Οι ελικτικές ικανότητες του πλοίου είναι ένας σημαντικός παράγοντας και δεν θα πρέπει να αγνοείται κατά τη συγκριτική μελέτη. Ένα πολεμικό πλοίο με πολύ καλές ελικτικές ικανότητες μπορεί επιβιώσει σε μια μάχη αλλά και μπορεί να αποπλεύσει γρηγορότερα από ένα άλλο συμβατικό και να αναλάβει την αποστολή του, ειδικά όταν έχουν εγκατασταθεί pods.

Τέλος, αναπτύσσεται το ζήτημα της επίδρασης των εκπομπών και κατά πόσο θα επηρεάσουν στο μέλλον την επιλογή των συστημάτων πρόωσης ενός πλοίου, μιας και η νομοθεσία γίνεται όλο και πιο αυστηρή. Έτσι οι χαμηλές εκπομπές NO_x των αεριοστροβίλων μπορούν να τους καταστήσουν κύρια επιλογή μηχανών, παρά την αδιαμφισβήτητη μεγάλη ειδική κατανάλωση καυσίμου που έχουν.

3.2 Εφεδρεία (Redundancy)

3.2.1 Ιστορικό απωλειών

Το ανθρώπινο λάθος είναι ο κυρίαρχος παράγοντας στην πλειονότητα των ατυχημάτων, τα οποία μπορεί να συμβούν κατά τη διάρκεια ζωής ενός πολεμικού πλοίου. Κατά συνέπεια η συνεχής και αδιάκοπη εκπαίδευση του πληρώματος είναι ουσιαστική και επιβεβλημένη, πλην όμως δεν απαλείφει το πρόβλημα, δεδομένου ότι πάντα θα γίνονται ανθρώπινα λάθη. Η πρόληψη της πρόκλησης πυρκαϊάς για παράδειγμα είναι ο επιδιωκόμενος σκοπός, όμως εξίσου σημαντικός σκοπός είναι όταν και αν προκληθεί πυρκαϊά στο πλοίο, να μην επεκταθεί αυτή και να περιοριστούν στο ελάχιστο δυνατό οι ζημιές. Η εφεδρεία διατιθέμενης ισχύος πρόωσης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον περιορισμό των αποτελεσμάτων μιας αστοχίας, η οποία, κάτω από άλλες συνθήκες, θα μπορούσε να οδηγήσει το πλοίο και το πλήρωμά του αλλά και το ίδιο το θαλάσσιο περιβάλλον, σε επικίνδυνη κατάσταση. Η Βρετανική κυβέρνηση μετά τη λήξη του πολέμου των Falklands και μετά τις μεγάλες σε αριθμό απώλειες πολεμικών της πλοίων,

έδωσε μεγάλη βάση τόσο στην αναδιάρθρωση της παρεχόμενης εκπαίδευσης όσο και στην επανασχεδίαση βασικών συστημάτων και λειτουργιών των πλοίων, με γνώμονα την εφεδρεία. Έτσι δημιούργησε, αφενός μεν εγκαταστάσεις εκπαίδευσης των πληρωμάτων των πολεμικών πλοίων σε αρκετά αντικείμενα, που προσομοιάζουν σε πραγματικές καταστάσεις, όπως την καταπολέμηση εκτεταμένης πυρκαϊάς και διαρροής, αφετέρου δε και ειδικά ερευνητικά και σχεδιαστικά κέντρα, που σκοπό έχουν να σχεδιάζουν συστήματα πλοίων λαμβάνοντας υπόψη την εφεδρεία[16],[7].

3.2.2 Διεθνείς κανόνες Νηογνώμωνων

Είναι εμφανές ότι η αξιοπιστία και η εφεδρεία στην κατασκευή μηχανημάτων των εγκαταστάσεων προώσεως είναι επιβεβλημένη καθώς **πάντα** κρύβεται πίσω από κάθε ατύχημα το **ανθρώπινο λάθος**. Είναι πολύ πιθανό, η έννοια της εφεδρείας των συστημάτων πρόωσης ενός πολεμικού πλοίου, από οδηγία να μετατραπεί σε υποχρέωση δεδομένου ότι όλοι οι κανονισμοί για την ανθρώπινη ζωή και την προστασία του περιβάλλοντος γίνονται όλο και πιο αυστηροί.

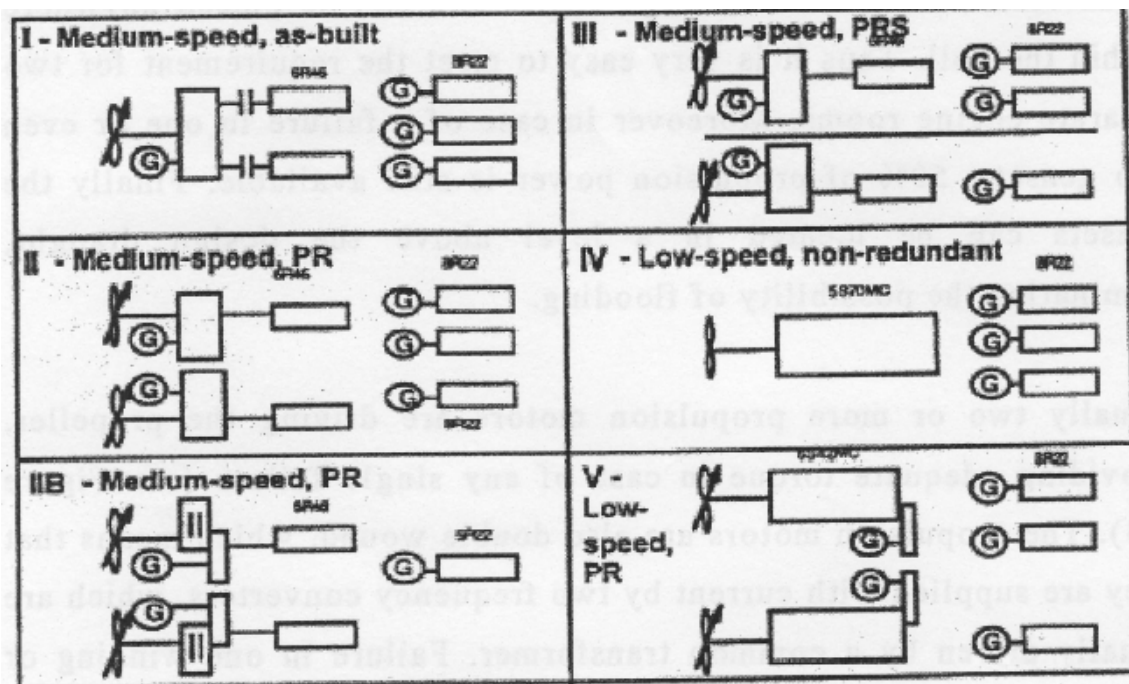
Ένας από τους πιο ενεργούς οργανισμούς όσον αφορά στη διαδικασία εισαγωγής της έννοιας της εφεδρείας στα συστήματα προώσεως ενός πλοίου και η κατάταξή του σε κλάση, είναι ο Νορβηγικός Νηογνώμονας **-Det Norske Veritas- (DNV)** ο οποίος και αναπτύσσει και οδηγίες για την κατάταξη των πλοίων σε κλάσεις προκειμένου να ελέγξει την πραγματική εφεδρεία, όπως το **PR** (propulsion redundant), το **PRS** (Propulsion Redundant and Separate), το **EPR** (Electrical Propulsion Redundant) και το **EPRS** (Electrical Propulsion Redundant and Separate)[13],[9].

Οι οδηγίες για την κατάταξη των πλοίων σε κλάση, όσον αφορά το PRS και EPRS, ισχύουν για πλοία όπου τουλάχιστον το 50% της διατιθέμενης ισχύος είναι διαρκώς διαθέσιμη, τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά από βλάβη στο σύστημα πρόωσης, συμπεριλαμβανομένων και των βλαβών που προκαλούνται από πυρκαϊά ή από διαρροή.

Όσον αφορά στις οδηγίες για το PRS και EPRS, οι τρόποι αστοχίας περιλαμβάνουν όλους εκείνους που καθορίζονται για τα PR και τα EPR, αντίστοιχα, εκτός από οποιαδήποτε αστοχία στα συστήματα πρόωσης και πηδαλιουχίας, που τυχόν προκύψει από πυρκαϊά ή διαρροή. Ως εκ τούτου, τα επί πλέον συστήματα πρόωσης θα πρέπει να διαχωρίζονται σε υδατοστεγανά διαμερίσματα.

Όπως λοιπόν προκύπτει και από τα ανωτέρω, όλοι οι κανονισμοί κλάσης του DNV απαιτούν δύο απολύτως ανεξάρτητα συστήματα πρόωσης, ίσης ισχύος το καθένα. Κατά

συνέπεια για το προωστήριο σύστημα και για το σύστημα πηδαλιουχίας ανακύπτει η απαίτηση ύπαρξης εφεδρείας μηχανών, αξονικών συστημάτων, ελικοφόρων αξόνων, πηδαλίων, συστήματος παροχής πετρελαίου και ελαίου λιπάνσεως καθώς και συστημάτων ύδατος ψύξεως. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζονται διάφορα συμβατικά συστήματα πρόωσης στα οποία υποδεικνύεται αν παρέχουν εναλλαξιμότητα και εφεδρεία ή όχι.



Σχήμα 3.1 : Εφεδρικά και μη-εφεδρικά συστήματα πρόωσης

3.2.3 Μηχανήματα και εξοπλισμός πλήρως εξηλεκτρισμένου σκάφους

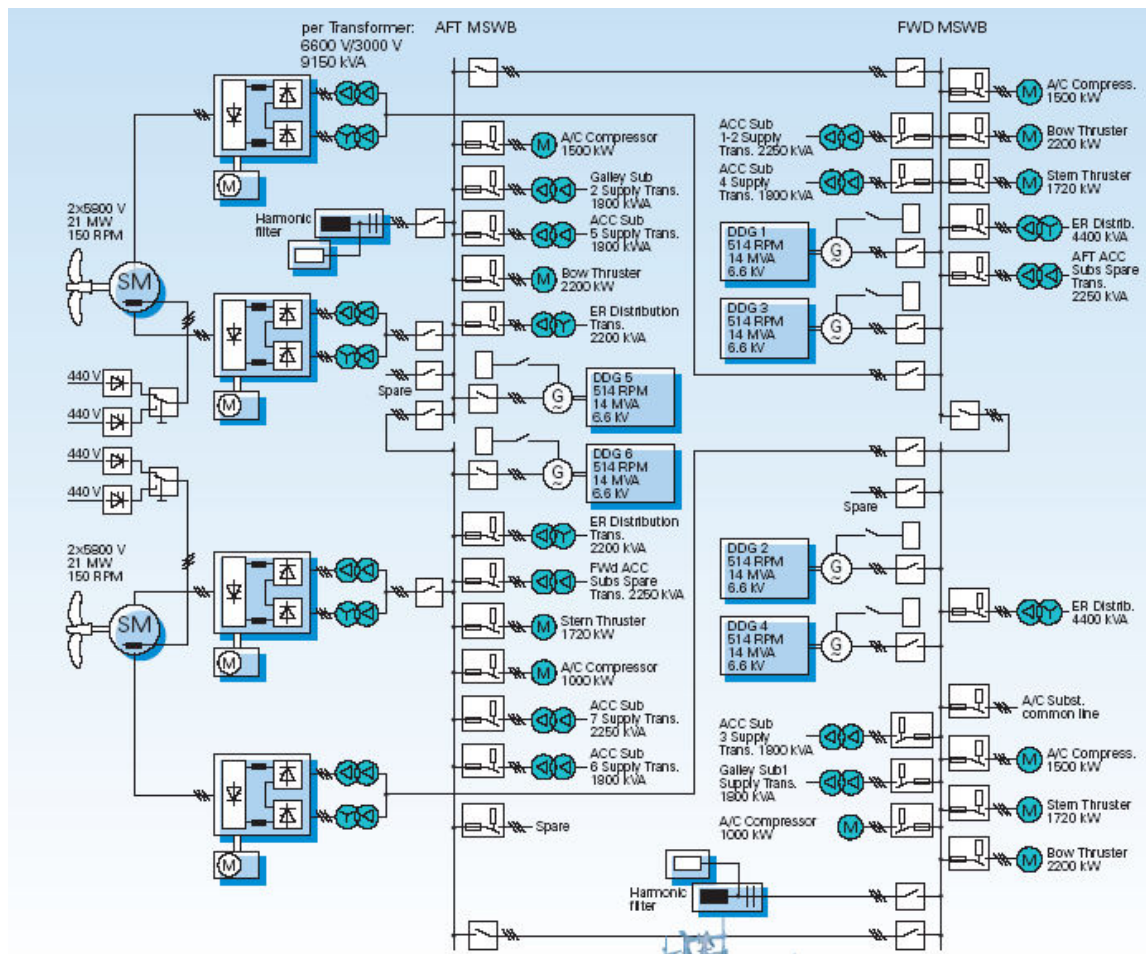
Είναι ευρέως γνωστό, ότι τα ηλεκτρικά μηχανήματα έχουν από τη φύση τους πολύ καλή συμπεριφορά και αρκετά πλεονεκτήματα, όσον αφορά τον πλεονασμό και την επιπλέον διαθεσιμότητα. Η ηλεκτρική διάταξη μπορεί πολύ εύκολα να συμμορφωθεί στις τυχόν επιπλέον απαιτήσεις του μέλλοντος, χωρίς την προσθήκη πολυπλοκότητας ή επιπλέον κόστους. Αυτό οφείλεται στα ακόλουθα:

- Αν και τα συστατικά μέρη μιας εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολυάριθμα, έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης, ο οποίος διαπιστώνεται σε διάφορες ναυπηγικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Οι γεννήτριες, οι κινητήρες των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών, οι μετατροπείς συχνότητας, οι κύριοι πίνακες διανομής ηλεκτρικής ισχύος και όλα τα υπόλοιπα συστατικά μέρη, χρειάζονται μάλλον πολύ καλή επιθεώρηση παρά εκτεταμένη συντήρηση. Για παράδειγμα, ο

εχθρός των ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών συσκευών είναι η σκόνη, η υψηλή θερμοκρασία και η υγρασία. Όσο περιορίζονται αυτοί οι τρεις παράγοντες τόσο αποδοτικότερη και πιο εγγυημένη είναι η λειτουργία τους.

- Όλη η εγκατεστημένη ισχύς, παράγεται από ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, ο ελάχιστος αριθμός των οποίων είναι συνήθως 3. Τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη συνδέονται απευθείας μέσω καλωδίων με τον κύριο πίνακα διανομής ηλεκτρικής ισχύος και δύνανται να τοποθετηθούν οπουδήποτε στη γάστρα. Κατά συνέπεια είναι πολύ εύκολο να καλυφθεί η απαίτηση για δύο ξεχωριστά μηχανοστάσια. Επιπλέον, σε περίπτωση βλάβης σε ένα ή ακόμα και σε δύο ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, το 50% της ισχύος είναι ακόμα διαθέσιμο. Τέλος, τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη μπορούν να εγκατασταθούν λίγο πάνω από το βύθισμα σχεδίασης, ελαχιστοποιώντας κατ' αυτόν τον τρόπο, την πιθανότητα βλάβης μετά από διαρροή.
- Συνήθως δύο ή τρεις κινητήρες πρόωσης κινούν την έλικα, παρέχοντας την επαρκή ροπή σε περίπτωση οποιασδήποτε βλάβης. Ο κάθε κινητήρας πρόωσης τροφοδοτείται με ρεύμα από δύο μετατροπείς συχνότητας, οι οποίοι συνήθως τροφοδοτούνται από κοινό μετασχηματιστή. Η αστοχία ενός στο τύλιγμα ή στη συχνότητα οδηγεί στη μείωση κατά 50% της ονομαστικής ροπής του κινητήρα, ενώ η αστοχία στον κοινό μετασχηματιστή οδηγεί στην απώλεια όλης της ροπής του κινητήρα και κατά συνέπεια η απαιτούμενη ροπή προέρχεται από τους άλλους κινητήρες. Παραδείγματος χάριν, η εγκατάσταση ενός πρόσθετου μετασχηματιστή ή μετατροπέα συχνότητας είναι μια πιο εύκολη και οικονομικώς αποδοτικότερη διαδικασία, έναντι εκείνων που θα πρέπει να ληφθούν σε συμβατικά σχήματα πρόωσης
- Οι κινητήρες πρόωσης μπορεί επίσης να διαχωριστούν εύκολα σε δύο διαφορετικά διαμερίσματα. Ο διαχωρισμός είναι εύκολος διότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι συμπαγείς και δεν καταλαμβάνουν αρκετό όγκο, όπως για παράδειγμα δύο μηχανές Diesel ίσης ονομαστικής ισχύος εξόδου.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειώσουμε ότι το σύστημα πρόωσης που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2 είναι χαρακτηριστικό και αν απαιτηθεί περαιτέρω βελτίωση όσον αφορά στην εφεδρεία, δεν θα επιφέρει σημαντικά επιπλέον κόστος και πολυπλοκότητα στην εγκατάσταση[15].



Σχήμα 3.2 : Τυπική διάταξη πλήρως εξηλεκτρισμένης εγκατάστασης πρόωσης

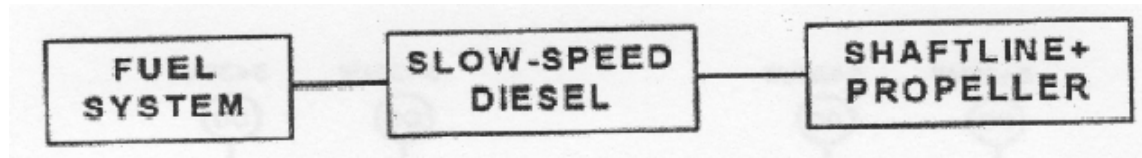
3.2.4 Μηχανήματα και εξοπλισμός συμβατικής πρόωσης (diesel)

Αργόστροφη προωστήρια εγκατάσταση

Η εγκατάσταση πρόωσης, η οποία δεν συμμορφώνεται με κανένα κανονισμό, όσον αφορά στην εφεδρεία και στην εναλλαξιμότητα, είναι εκείνη στην οποία μια αργόστροφη μηχανή diesel κινεί μια έλικα σταθερού βήματος. Αυτού του είδους η εγκατάσταση πρόωσης απαντάται σε παλαιάς τεχνολογίας ναρκαλιευτικά και ρυμουλκά, όπου οι αργόστροφες μηχανές diesel επικρατούν λόγω της υψηλής τους απόδοσης καυσίμου (σχήμα 3.3).

Αξιοσημείωτο εξάλλου είναι και το γεγονός ότι οι αργόστροφες μηχανές diesel είναι εξαιρετικά αξιόπιστες και σπάνια έχουν εμφανιστεί περιπτώσεις ολικής αστοχίας.

Στα περισσότερα περιστατικά αστοχίας ένας από τους κυλίνδρους έχει υποστεί στη χειρότερη περίπτωση σοβαρή βλάβη και μπορεί εύκολα να απομονωθεί από την υπόλοιπη μηχανή, χωρίς να προκαλούνται περαιτέρω προβλήματα στο πλοίο εκτός από μια μειωμένη αποδιδόμενη ισχύς[23].



Σχήμα 3.3 : Τυπική διάταξη αργόστροφης εγκατάστασης προώσεως

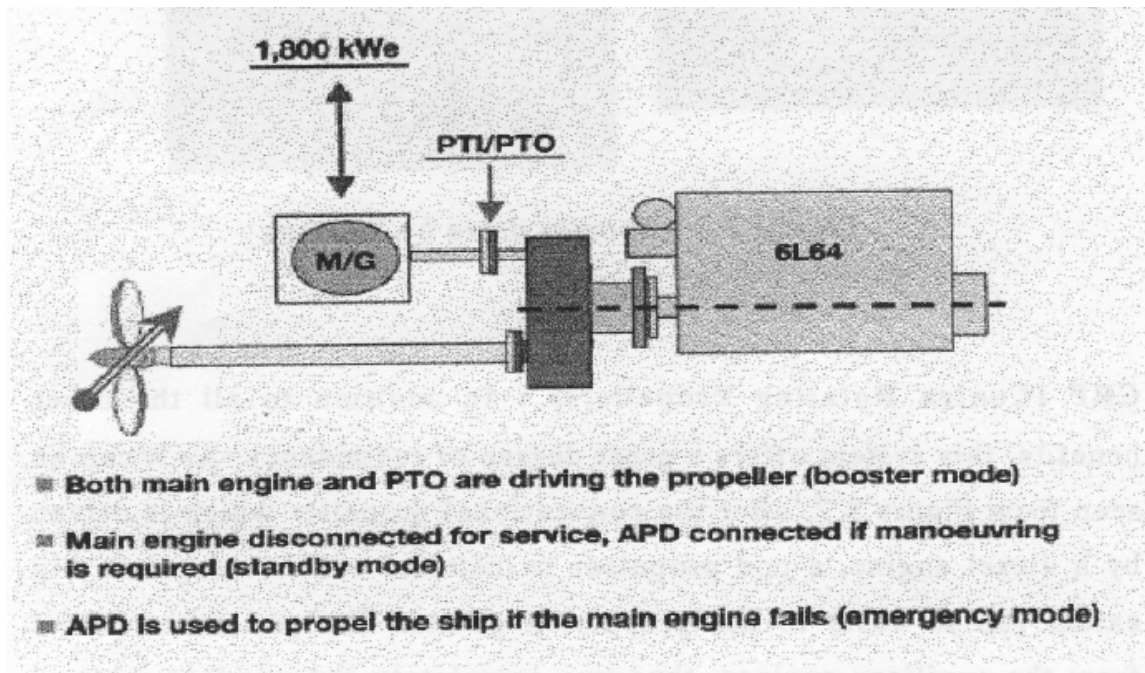
Είναι προφανές, ότι στην περίπτωση εκδήλωσης πυρκαϊάς ή εκτεταμένης διαρροής στο μηχανοστάσιο, προκαλείται ολική απώλεια του συστήματος προώσεως. Έτσι εξηγείται γιατί οι χρήστες και οι νηογνώμονες αναζητούν τρόπους προκειμένου να βελτιώσουν την εφεδρεία και την εναλλαξιμότητα σ' αυτά τα πλοία.

Το πρόβλημα είναι ότι προκειμένου να συμμορφωθεί στους κανόνες του DNV όσον αφορά το PR και PRS, απαιτούνται δύο μεσόστροφες μηχανές diesel, καθιστώντας την εγκατάσταση σύνθετη και προσθέτοντας σημαντικό κόστος. Δεν πρέπει να ξεχνάμε και το γεγονός ότι, εκτός από τις κύριες μηχανές, απαιτούνται και μηχανές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργώντας ένα πολυσύνθετο σύστημα πρόωσης και ενέργειας, αρκετά δαπανηρό όσον αφορά στη συντήρησή του.

Για το λόγο αυτό, οι χρήστες σε ορισμένες περιπτώσεις υιοθετούν τις υβριδικές εναλλακτικές λύσεις, προκειμένου να αυξήσουν την ασφάλεια στα πλοία. Σημειώτεον ότι όλες αυτές οι λύσεις αξιοποιούν σε μεγάλο βαθμό τα πλεονεκτήματα των ηλεκτρονικών. Από αυτά, πιο συχνά συναντάμε τα ακόλουθα:

- **APD (Auxiliary Propulsion Drive)** :Πρόσφατα η Wartsila Marine πρότεινε μια υβριδική εναλλακτική πρόταση εγκατάστασης πρόωσης, προκειμένου να αυξηθεί η ασφάλεια και να μειωθεί το κόστος λειτουργίας. Η πρόταση της Wartsila αποτελείται από μια μεσόστροφη μηχανή diesel να κινεί μια έλικα με μεταβλητό βήμα μέσω μειωτήρα στροφών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Επίσης στο μειωτήρα είναι συνδεδεμένος και ένας κινητήρας-γεννήτρια λειτουργώντας ως PTI (Power Take In) και ως PTO (Power Take Out). Στην περίπτωση του PTO λειτουργεί ως γεννήτρια προσφέροντας ηλεκτρική ισχύ και στην περίπτωση του PTI λειτουργεί ως κινητήρας, ο οποίος τροφοδοτείται από τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, προσφέροντας μια ταχύτητα της τάξης των 6 έως 8 knots στο πλοίο, στην

περίπτωση που πάθει βλάβη η κύρια μηχανή. Ο κινητήρας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια χειρισμών άπαρσης-παραβολής στους λιμένες ή και λειτουργώντας ταυτόχρονα με την κύρια μηχανή οπότε και αυξάνεται η αποδιδόμενη ισχύς.

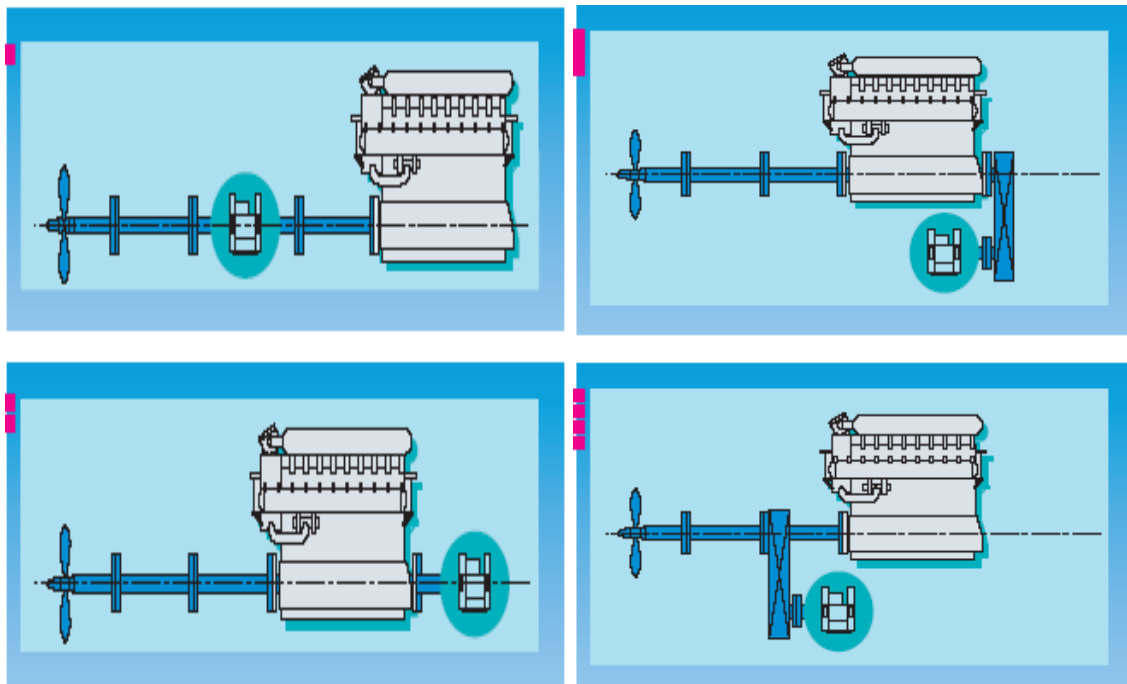


Σχήμα 3.4: Η διάταξη PTI/PTO της Wartsila

- **Ηλεκτρομηχανή άξονα (BOOSTER DRIVE):** Επίσης, η Siemens πρότεινε μια υβριδική εναλλακτική πρόταση, εγκαθιστώντας μια ηλεκτρομηχανή άξονα (booster) (σχήμα 3.5), Έτσι, προστίθεται ένας ανεξάρτητος ‘πρόσθετος κύλινδρος’, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6. Αυτή η ηλεκτρομηχανή μπορεί να χρησιμοποιείται ταυτόχρονα με την κύρια μηχανή ή σε επείγουσα κατάσταση ως πηγή ισχύος πρόωσης (take-me-home propulsion source). Η πρόταση αυτή της Siemens κυμαίνεται από 2MW έως 15MW.



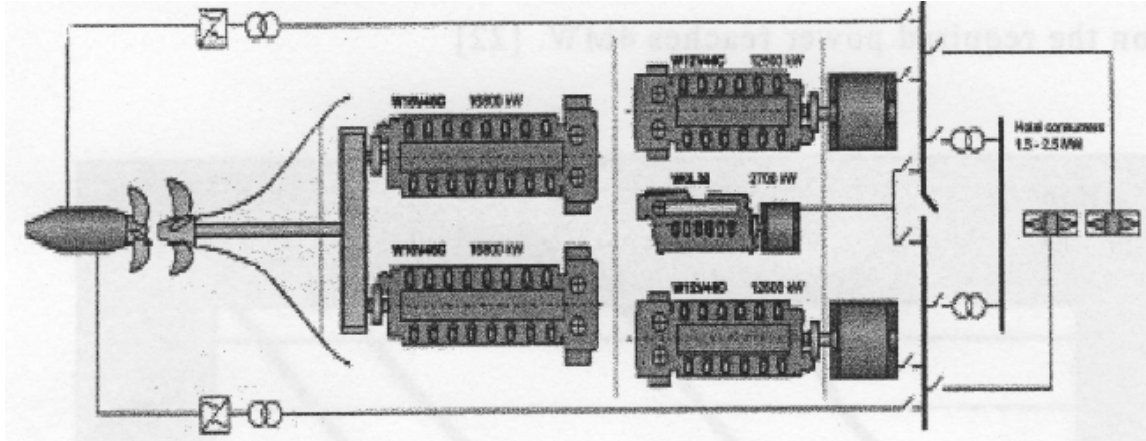
Σχήμα 3.5: Οι πόλοι του δρομέα της ηλεκτρομηχανής (booster) στον άξονα



Σχήμα 3.6: Συνδυασμένες εγκαταστάσεις με ηλεκτρομηχανές άξονα από τη Siemens

- **CRP (Contra Rotating Propellers):** Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, το σύστημα αυτό προσφέρει υψηλό βαθμό εφεδρείας και εναλλαξιμότητας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.7, μετά τη συμβατική έλικα, η οποία κινείται από μια

μηχανή diesel, εγκαθίσταται αντί έλικας το rod συνεισφέροντας σε μεγάλο βαθμό (μεγαλύτερο του 40%) στην προωστήρια ισχύ. Το rod τροφοδοτείται με ισχύ από τις βοηθητικές μηχανές, συνεπώς δύο πλήρως ανεξάρτητα συστήματα μπορούν να παρέχουν ικανοποιητική προωστήρια ισχύ στο πλοίο[8].



Σχήμα 3.7: Εγκατάσταση CRP (Contra Rotating Propellers)

Όλες οι προγενέστερες υβριδικές εναλλακτικές διατάξεις εγκαταστάσεων πρόωσης, με εξαίρεση την CRP προσφέρουν ορισμένου βαθμού ασφάλεια, αλλά σε καμμία περίπτωση δεν προσεγγίζουν τα επίπεδα εφεδρείας και διαθεσιμότητας, που παρέχουν οι εξηλεκτρισμένες προωστήριες εγκαταστάσεις, γεγονός που οφείλεται στα παρακάτω:

1. Η εκδήλωση πυρκαϊάς ή διαρροής στα διαμερίσματα πρόωσης και ενέργειας παραμένει καταστροφική όπως και πριν, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι κύριες και οι δευτερεύουσες συσκευές και μηχανήματα της προωστήριας εγκατάστασης, παραμένουν και πάλι στο ίδιο διαμέρισμα.
2. Εάν για κάποιο λόγο χαλάσει η κύρια μηχανή, προκύπτουν σοβαρά ερωτηματικά αν και κατά πόσο η προωστήρια εγκατάσταση είναι αποτελεσματική και διαθέσιμη.
3. Το αρχικό κόστος της εγκατάστασης αυξάνει κατά πολύ όταν οι εναλλακτικές λύσεις αρχίζουν να απαιτούν άξονες, γεννήτριες, κινητήρες, μειωτήρες, έλικες μεταβλητού βήματος κλπ και καθιστούν την εγκατάσταση σύνθετη.

Στις περιπτώσεις όπου η ηλεκτροπρόωση είναι αρκετά πιο ακριβή συγκρινόμενη με μια τυπική προωστήρια εγκατάσταση με αργόστροφη μηχανή, οι παραπάνω λύσεις μειώνουν τη διαφορά του κόστους ή και την καθιστούν αμελητέα, όταν μιλάμε για υψηλότερη εφεδρεία. Έτσι, είναι πιο σωστό να επιλέξουμε την ηλεκτροπρόωση, η οποία

εξ αρχής προσφέρει περισσότερα όσον αφορά στην εφεδρεία και στην εναλλαξιμότητα, απ' ότι οι προγενέστερες διατάξεις εγκαταστάσεων πρόωσης. Για παράδειγμα, στη συνηθισμένη περίπτωση όπου εγκαθίστανται τέσσερις κινητήριες μηχανές (prime movers), αν χαλάσει για κάποιο λόγο μια μηχανή, δηλαδή απολεστεί το 25% της ισχύος τότε η εναπομείνουσα ισχύς (75%) προσφέρει στο πλοίο το 90% της μέγιστης ταχύτητάς του, όπως προκύπτει και από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
 P &= C * V^3 \\
 P_{MAX} &= C * V_{MAX}^3 \\
 P_1 &= C * V_1^3, P_1 = 0,75P_{MAX}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} P &= C * V^3 \\ P_{MAX} &= C * V_{MAX}^3 \\ P_1 &= C * V_1^3, P_1 = 0,75P_{MAX} \end{aligned}} \right\} \Rightarrow$$

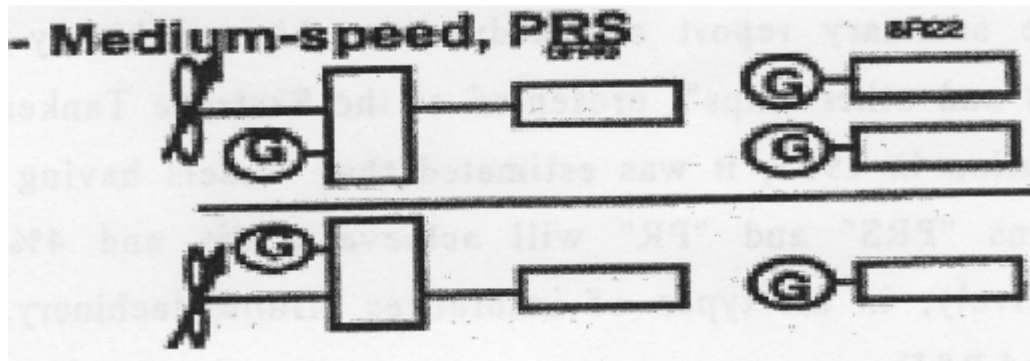
$$\frac{P_1}{P_{MAX}} = \left(\frac{V_1}{V_{MAX}} \right)^3 \Rightarrow V_1 = V_{MAX} * \sqrt[3]{0,75}$$

$$V_1 = 0,908 * V_{MAX}$$

Ως τελικό συμπέρασμα μπορεί να ειπωθεί ότι οι εξηλεκτρισμένες εγκαταστάσεις πρόωσης προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά στην ασφάλεια των πλοίων και είναι σαφές ότι ασφαλέστερα πλοία απαιτούν και οι νομοθέτες αλλά και οι τελικοί χρήστες, δηλαδή τα πολεμικά ναυτικά των κρατών.

Μεσόστροφη προωστήρια εγκατάσταση

Στις εγκαταστάσεις πρόωσης με μεσόστροφες μηχανές είναι ευχερέστερη η συμμόρφωση προς τις απαιτήσεις για εφεδρεία, χωρίς να προστίθεται επιπλέον κόστος ή πολυπλοκότητα στην εγκατάσταση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις περισσότερες εφαρμογές δύο κύριες μηχανές στρέφουν μια έλικα μεταβλητού βήματος μέσω ενός κοινού μειωτήρα στροφών. Επί πλέον, οι μεσόστροφες μηχανές είναι πιο συμπαγείς, επιτρέποντας έτσι την εγκατάσταση δύο ή και περισσότερων μηχανών στο ίδιο μηχανοστάσιο. Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται μια τέτοια εγκατάσταση με μεσόστροφη μηχανή και με PRS (Propulsion Redundant and Separate).

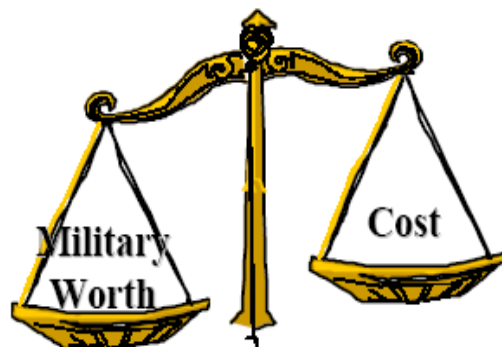


Σχήμα 3.8: Εγκατάσταση πρόωσης με μεσόστροφη μηχανή και PRS.

3.2.5 Τα οφέλη της εγκατάστασης πρόωσης με εφεδρεία (redundant machinery)

Η εγκατάσταση πρόωσης με εφεδρεία (redundancy) μπορεί από τη μια να αυξάνει το αρχικό κόστος για έρευνα και μελέτες, από την άλλη όμως αποφέρει πολλά πλεονεκτήματα στους τελικούς χρήστες. Όταν ιδίως μιλάμε για πολεμικά πλοία και κατ' επέκταση για τα πολεμικά ναυτικά των διαφόρων κρατών, η εφεδρεία και η επιβιωσιμότητα (survivability) είναι πεδία αναπόσπαστα από τη συνολική μελέτη για τη σχεδίαση και κατασκευή τους. Τα πλοία αυτά σε περίπτωση πολεμικής τους εμπλοκής θα κληθούν να επιβιώσουν κάτω από δύσκολες συνθήκες (PBX πόλεμοι, έντονους κραδασμούς από εκρήξεις βομβών), συνεπώς τα οφέλη από την εγκατάσταση πρόωσης με εφεδρεία (redundancy) είναι προφανή και αυξάνουν την αποδοτικότητα των πολεμικών πλοίων στη μάχη και στις εν γένει δύσκολες συνθήκες[16].

Επενδύοντας τα κράτη στην έρευνα και την ανάπτυξη συστημάτων που θα προσδώσουν στα πλοία εφεδρεία, επενδύουν ταυτόχρονα στην άμυνα της χώρας.



3.2.6 Τελική δήλωση

Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει είναι ότι οι σχεδιαστές και οι μελετητές έχουν αρχίσει να θέτουν σε εφαρμογή το ζήτημα της εφεδρείας, αυξάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την ασφάλεια των πλοίων όταν αυτά επιχειρούν κάτω από αντίξοες συνθήκες. Η ηλεκτροπρόωση με τα πλεονεκτήματά της ανταποκρίνεται στις σχεδιαστικές αυτές απαιτήσεις θέτοντας υψηλά τον πήχη στον ανταγωνισμό.

3.3 Σχέδιο πλοίου και μηχανολογικού εξοπλισμού

3.3.1 Γενικά

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της εγκατάστασης προώσεως του πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου είναι οι υψηλές απώλειες (σχεδόν 10%), οφειλόμενες στις πολλαπλές μετατροπές της ισχύος από τις γεννήτριες, τους μετατροπείς συχνότητας και τους κινητήρες πρόωσης) και σε άλλες περιπτώσεις (όπως στην ηλεκτροπρόωση με χρήση pod) το αρχικό κόστος κτήσης, το οποίο είναι μεγάλο. Αυτά τα μειονεκτήματα είναι συνήθως αρκετά έτσι ώστε να αποτρέψουν -αρχικά- τις κυβερνήσεις των διαφόρων κρατών από την κατασκευή πλήρως εξηλεκτρισμένων πολεμικών πλοίων.

Στην πραγματικότητα όμως, συγκριτικές μελέτες έχουν αποδείξει ότι υπάρχουν τρόποι να εξισορροπηθούν τα αποτελέσματα των ανωτέρω μειονεκτημάτων, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα και την ευελιξία της ηλεκτρικής εγκατάστασης πρόωσης.

Παρακάτω παρατίθενται τα προσφερόμενα πλεονεκτήματα στο μελετητή/σχεδιαστή.

3.3.2 Περιορισμός των διαμερισμάτων πρόωσης

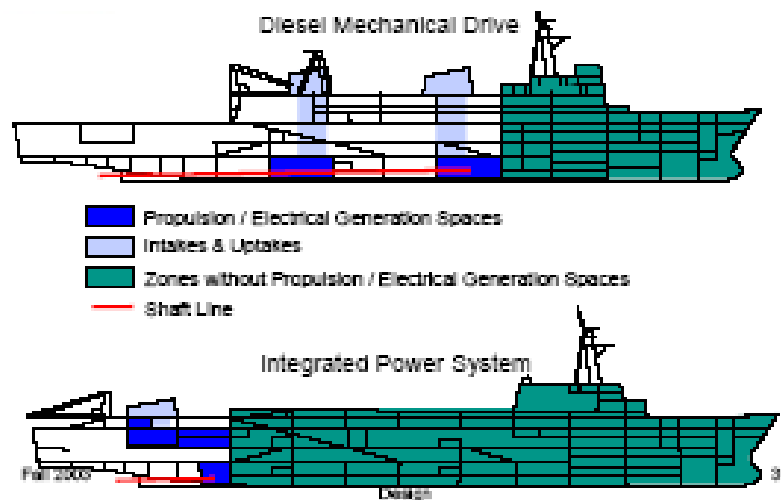
Είναι κατανοητό ότι το μήκος του μηχανοστασίου δύναται να μειωθεί στην περίπτωση της ηλεκτρικής πρόωσης μολονότι το συνολικό απαιτούμενο εμβαδόν της ντήζελ- ηλεκτρικής πρόωσης είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με εκείνο της συμβατικής μορφής ντήζελ. Περαιτέρω δε μείωση επιτυγχάνεται όταν εγκαθίσταται συνδυασμένα συστήματα πρόωσης CODOG (COmbined Diesel Electric or Gas Turbine Machinery).

Ο κύριος λόγος μείωσης του μήκους του μηχανοστασίου είναι ότι στη συμβατική μορφή, η μηχανή συνδέεται άμεσα με τον άξονα ο οποίος κινεί την προπέλλα και συνήθως έχει μια προκαθορισμένη θέση στο πλοίο. Η μηχανή μαζί με τους οχετούς εξαγωγής

καυσαερίων της καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο. Αυτό είναι ένα σοβαρό πρόβλημα, ιδίως στα αρματαγωγά, όπου αποκλείεται η δυνατότητα του να εγκατασταθεί χαμηλότερα το μηχανοστάσιο, προκειμένου να εξασφαλισθεί ο απαιτούμενος χώρος για την εισολκή και εξωλκή αρμάτων μάχης.

Στον αντίποδα, στο πλήρως εξηλεκτισμένο σύστημα πρόωσης, η κύρια μηχανή (ντήζελ, αεριοστρόβιλος ή ακόμη και οι κυψέλες καυσίμου) η οποία κινεί τις γεννήτριες, δύναται να εγκατασταθεί οπουδήποτε στο σκάφος, αρκεί η γεννήτρια για λόγους ασφαλείας να βρίσκεται τουλάχιστον στο ύψος του βυθίσματος σχεδίασης. Όσον αφορά στους κινητήρες πρόωσης οι οποίοι είναι συζευγμένοι μαζί με τις έλικες, αυτοί είναι συμπαγείς και απαιτούν ελάχιστο όγκο για εγκατάσταση. Είναι λοιπόν εύκολο να σχεδιαστεί καλύτερο πρυμναίο τμήμα στο σκάφος, τέτοιο που να μειώνει κατά το δυνατό την αντίστασή του.

Στο σχήμα 3.9 παρουσιάζονται συγκριτικά η συμβατική πρόωση και η πλήρως εξηλεκτισμένη. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι περαιτέρω μείωση του μήκους του μηχανοστασίου μπορεί να επιτευχθεί με την επιλογή των rods, στα οποία τόσο ο κινητήρας όσο και η έλικα είναι εκτός του σκάφους[21].



Σχήμα 3.9 : Συγκριτική απεικόνιση συμβατικής- all electric μορφής πρόωσης

3.3.3 Βελτιστοποίηση της μορφής της γάστρας

Στις σύγχρονες τάσεις σχεδίασης γαστρών όπως για π.χ catamaran, trimaran, swath, πλοία τεχνολογίας stealth και tumblehome, το είδος πρόωσης που ταιριάζει απόλυτα στις σχεδιαστικές αυτές ιδιαιτερότητες, είναι εκείνο της ηλεκτροπρόωσης. Εάν διατηρηθούν σταθερές οι διαστάσεις του σκάφους όπως και στη συμβατική μορφή, τότε έχουμε μια σειρά από βελτιώσεις, που οφείλονται στον επιπλέον όγκο που εξοικονομείται

από τη μείωση του μήκους του μηχανοστασίου που βρίσκεται στο πρυμναίο τμήμα του πλοίου. Με αυτή την αλλαγή, μετακινείται και το LCG (Longitudinal Center of Gravity) επίσης προς τα πρύμα και έχοντας μικρότερο βάρος η ντήζελ- ηλεκτρική πρόωση από την συμβατική, επιτυγχάνονται καλύτερες συνθήκες ευστάθειας[41].

3.3.4 Βελτιστοποίηση της έλικας

Είναι γνωστό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της έλικας και όσο πιο αργά στρέφει τόσο πιο αποδοτική είναι. Επομένως, η προσπάθεια του μελετητή είναι να επιλέξει έλικα με τη μεγαλύτερη διάμετρο προσπαθώντας ταυτόχρονα να συμμορφώνεται με τους κανόνες των νηογνομόνων. Η ηλεκτροπρόωση προσφέρει αυτή τη δυνατότητα της βελτιστοποίησης της έλικας, εξ αιτίας του γεγονότος ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες οι οποίοι κινούν την έλικα δύνανται να στρέφουν με στροφές λιγότερες και από μια αργόστροφη δίχρονη μηχανή diesel, κάνοντάς την αποδοτικότερη. Παρόλα αυτά, σε περιπτώσεις όπου είναι δύσκολη η ταύτιση των βέλτιστων στροφών της έλικας με τις στροφές του κινητήρα απευθείας, εγκαθίσταται μειωτήρας στροφών. Εξ αιτίας αυτής της βελτιστοποίησης της έλικας, από το ποσό της χαμένης ενέργειας λόγω των ηλεκτρικών απωλειών- της τάξης του 10%-,όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, το 3% επιστρέφει στο σύστημα. Το τελευταίο απορρέει και από το γεγονός ότι ο βαθμός απόδοσης της έλικας η_0 , όταν υφίσταται δίχρονη αργόστροφη μηχανή είναι περί το 0.67 ενώ στην περίπτωση του ηλεκτρικού κινητήρα μπορεί να φτάσει και το 0.70[31],[32].

Επίσης, σε μεσόστροφες προωστήριες εγκαταστάσεις diesel είναι σύνηθες να επιλέγεται όχι η μεγαλύτερης διαμέτρου έλικα αλλά η μικρότερης με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Και σε αυτή την περίπτωση πάλι οι ηλεκτρικοί κινητήρες προσφέρουν τη δυνατότητα επιλογής έλικας μεγαλύτερης διαμέτρου και υψηλότερης απόδοσης[41].

3.3.5 Συστήματα πρόωσης με ‘Pods’(Αξιμουθιακό προωστήριο σύστημα)

Ο πλέον κατάλληλος τρόπος, ώστε να δοθεί πίσω στο σύστημα η αποδοτικότητα η οποία χάθηκε εξ αιτίας των ηλεκτρικών απωλειών, είναι η εγκατάσταση συστήματος πρόωσης με pods, αντί της συμβατικής επιλογής. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα

ηλεκτρικό κινητήρα και μία έλικα ενιαία ως μονάδα, εμβαπτισμένη στο νερό, στο πρυμναίο τμήμα του πλοίου. Το σύστημα δύναται να φέρει μία ή δύο έλικες και έχει τη δυνατότητα να περιστρέφεται κατά 360° κατά την αζιμουθιακή διεύθυνση, δηλ. στο οριζόντιο επίπεδο, αυξάνοντας έτσι τις ελικτικές ικανότητες του πλοίου[4].

Συνήθως οι επιπλέον απώλειες του ηλεκτρικού συστήματος οφείλονται στα παρακάτω:

- Γεννήτριες :4.0 %
- Μετασχηματιστές :1.0 %
- Μετατροπείς Συχνότητας :1.0 %

- Κινητήρες Πρόωσης : 4.5 %

Συνολικές Απώλειες :10.5 %

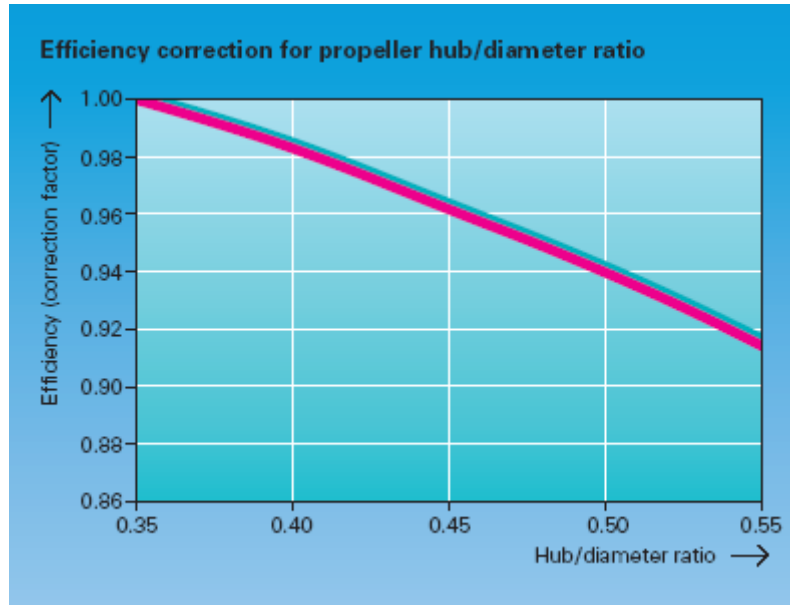
Στα pods συναντάμε σύγχρονους κινητήρες μονίμων μαγνητών, οι οποίοι είναι κατά 2% πιο αποδοτικοί από τους συμβατικούς ηλεκτρικούς κινητήρες. Τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι αποφεύγονται οι ηλεκτρικές απώλειες στο τύλιγμα διέγερσης και οι θερμικές απώλειες οφειλόμενες στο ρεύμα διεγέρσεως. Για το λόγο αυτό αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης στα ηλεκτρικά συστήματα[1].

Επιπλέον, είναι αποδεδειγμένο ότι ο βαθμός απόδοσης σε κινητήρα pod είναι πολύ μεγαλύτερος. Αντίθετα προς τα συμβατικά συστήματα πρόωσης, όπου ο άξονας της έλικας θα πρέπει να είναι λίγο πολύ παράλληλος με το κάτω μέρος της γάστρας του πλοίου, ο άξονας του pod μπορεί να προσαρμόζεται στη βέλτιστη διεύθυνση. Έτσι είναι πολύ πιθανόν να το έχουμε παράλληλο στις πρυμναίες γραμμές του πλοίου και να επιτύχουμε καλύτερη συσχέτιση με τον ομόρρου του πλοίου. Ο υπολογιζόμενος στις δεξαμενές δοκιμών ομόρρους (w) είναι περί το 0.31 (Siemens AG twin SSP) ενώ στη συμβατική μορφή είναι πάνω από 0.40. Καθώς μειώνεται το (w) αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση του συντελεστή μορφής γάστρας n_H και κατά συνέπεια και του βαθμού απόδοσης πρόωσης (P.C).

Επιπλέον, η Siemens AG υποστηρίζει ότι το SSP (Siemens Schottel Propulsor) έχει αυξήσει κατά 10% την απόδοση χάρη στις ακόλουθες βελτιώσεις:

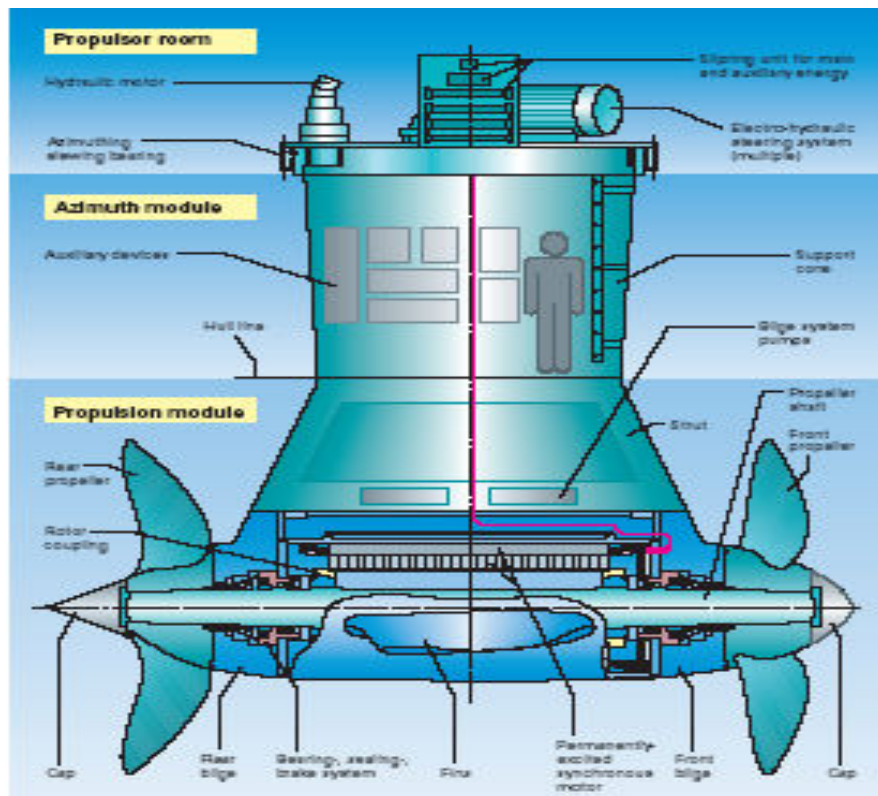
- Βελτιστοποίηση του λόγου των διαμέτρων πλήμνης/ έλικας :Οι σύγχρονοι κινητήρες μονίμων μαγνητών, όπως προαναφέρθηκε, έχουν αρκετά συμπαγή

σχεδιασμό έτσι είναι δυνατό να μειωθεί η διάμετρος του κελύφους στο οποίο είναι εγκατεστημένος ο κινητήρας. Κατά συνέπεια μπορεί να επιτευχθεί μια τιμή από 0.35 έως και 0.40 δίνοντας έτσι ένα καλό αποτέλεσμα στη συνολική απόδοση του pod (σχήμα 3.10) [31],[32] .



Σχήμα 3.10 : Διάγραμμα β.α συναρτήσεϊ του λόγου διαμέτρων πλήμνης/ έλικας

- Διπλέλικη εγκατάσταση: Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.11, το SSP αποτελείται από δύο έλικες εγκατεστημένες σε κοινό άξονα. Αυτός ο σχεδιασμός έχει το πλεονέκτημα του καταμερισμού του φορτίου μεταξύ των δύο ελικών ενώ ταυτόχρονα αποδίδουν τη μέγιστή τους απόδοση. Επίσης τα δύο πτερύγια ευστάθειας, τα οποία είναι εγκατεστημένα ανάμεσα στις έλικες στο κέλυφος του pod, αυξάνουν τη συνολική απόδοση, μαζί με το διάμηκες στήριγμα της εγκατάστασης (strut), ανακτώντας τη χαμένη ενέργεια λόγω στροβιλισμών. Ειδικά για πολεμικά πλοία επιφανείας, όπου οι ειδικές στρατιωτικές προδιαγραφές επιβάλλουν την κατά το δυνατό μείωση της ακουστικής υπογραφής του πλοίου, για την ενδεχόμενη και αποτελεσματικότερη συμπλοκή τους με τα αντίπαλα υποβρύχια, η επιλογή του SSP αποτελεί μια βέλτιστη λύση έναντι των συμβατικών. Όπως αποδείχθηκε και στις δοκιμές (σχήμα 3.12) , το SSP ανταποκρίνεται άριστα στον παραγόμενο θόρυβο και στα όποια φαινόμενα σπηλαίωσης, ελαχιστοποιώντας τα με τον καλύτερο και υδροδυναμικά αποδοτικότερο τρόπο.



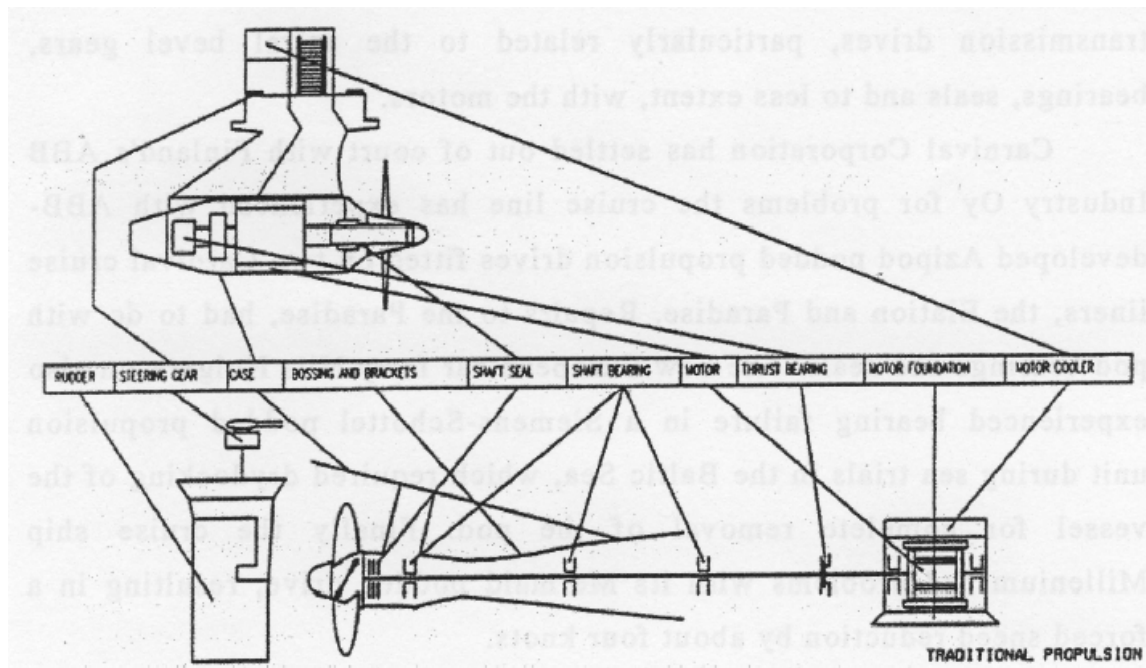
Σχήμα 3.11 : To SSP (Siemens Schottel Propulsor)



Σχήμα 3.12 : Το SSP (Siemens Schottel Propulsor) στις εργαστηριακές δοκιμές

Παρόλα αυτά, ένας από τους λόγους για τον οποίο οι εγκαταστάσεις πρόωσης με rods δεν αποτελούν σταθερή επιλογή για όλα τα είδη των πλοίων είναι το υψηλό αρχικό

κόστος εγκατάστασης, μολονότι σε σύγκριση με τη συμβατική λύση αξονικού συστήματος και έλικας απουσιάζουν το πηδάλιο και τα πτερύγιά του, το αξονικό σύστημα και η έλικα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13 : Συγκριτική απεικόνιση συμβατικής εγκατάστασης και pods

Επίσης ένας άλλος λόγος είναι ότι μια σειρά από αρκετές βλάβες κάνουν τους περισσότερους σκεπτικούς και επιφυλακτικούς. Για παράδειγμα στο 24^ο συνέδριο του Motor Ship Propulsion που διεξήχθη στην Κοπεγχάγη, ο John Carton, επιθεωρητής του Lloyd's Register στο τεχνικό τμήμα ερευνών, υπογραμμίζει ένα σημαντικό αριθμό βλαβών στην παρούσα δεύτερη γενιά pods.

Επίσης ένας άλλος σημαντικός λόγος για τον οποίο οι ερευνητές θα πρέπει να προσπαθήσουν, είναι το γεγονός ότι αναπτύσσεται υψηλός μαγνητισμός γύρω από τα pods, καταστρώνοντας τα πολεμικά πλοία ευάλωτα στο ναρκικό πόλεμο. Παρόλα αυτά όμως και συνεκτιμώντας τα οφέλη από τη χρήση των pods βλέπουμε συχνά την επιλογή των pods σε πολεμικά πλοία βελτιώνοντας ταυτόχρονα με διάφορες τεχνικές το προαναφερθέν μειονέκτημα.

Η ναυπηγική βιομηχανία και αγορά είναι ιδιαίτερα καχύποπτη σε κάθε τι καινούργιο και προτιμά τις κλασικές και ασφαλείς μεθόδους. Η χρήση των pods στις εγκαταστάσεις πρόωσης είναι μια από τις πιο καινοτόμες ιδέες των τελευταίων χρόνων και παρόλα τα μέχρι στιγμής αποδεδειγμένα πλεονεκτήματά τους, καταβάλλεται διαρκής προσπάθεια έτσι ώστε να καταστούν ακόμη πιο αποδοτικά και αξιόπιστα.

3.3.6 Πρόσθετοι λόγοι μείωσης του κόστους

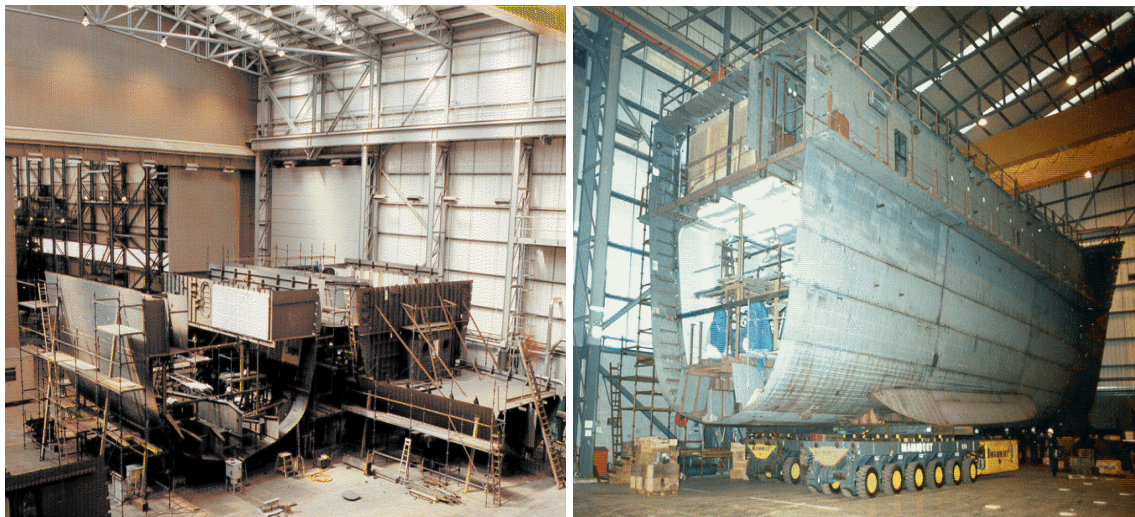
Παρακάτω παρουσιάζονται μια σειρά στοιχείων της ηλεκτροπρόωσης ικανά να μειώσουν το κόστος:

Κόστος δικτύων βοηθητικών μηχανημάτων

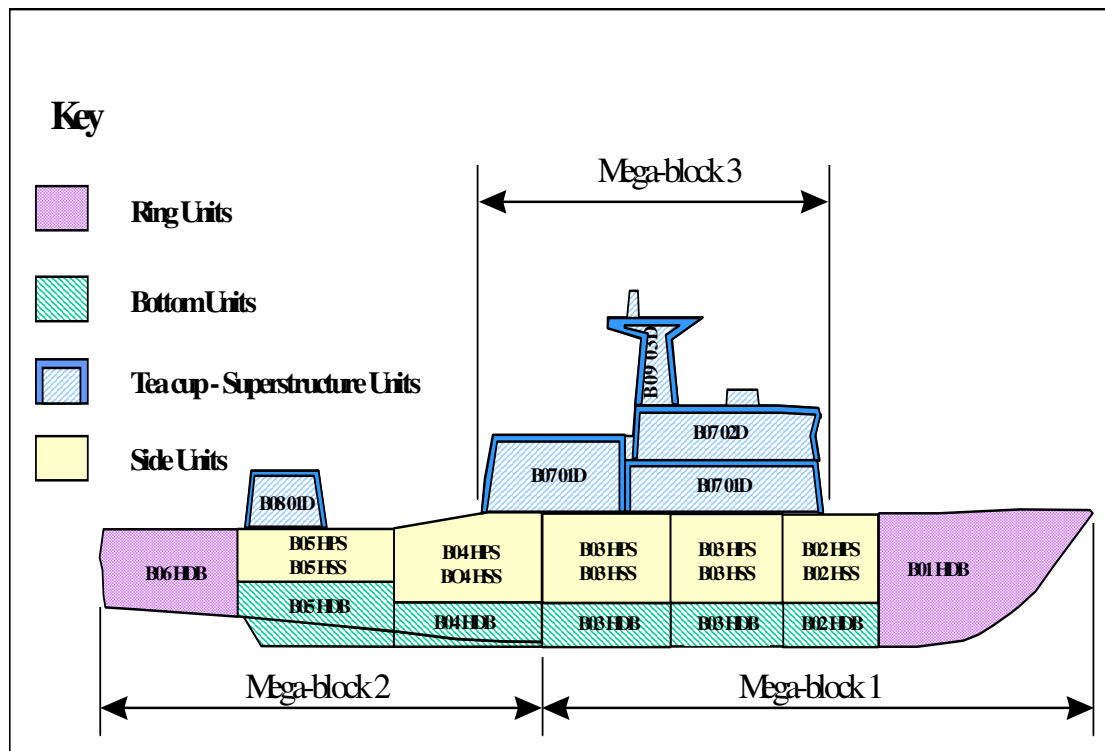
Εξ αιτίας του διαφορετικού τρόπου εγκατάστασης της ντήζελ-ηλεκτρικής εγκατάστασης πρόωσης και της χρήσης των μεσόστροφων μηχανών, τα βοηθητικά συστήματα και μηχανήματα είναι αριθμητικώς λιγότερα και απλούστερα. Παραδείγματος χάριν το σύστημα πετρελαίου, το σύστημα ελαίου λιπάνσεως και το σύστημα ψύξης έχουν μικρότερο βάρος. Επί πλέον, το σύστημα εξαγωγής καυσαερίων είναι απλούστερο και μικρότερο, μιας και οι μηχανές είναι εγκατεστημένες πάνω από το βύθισμα σχεδίασης.

Προκατασκευή και συναρμολογησιμότητα κατασκευής

Στην περίπτωση της ντήζελ-ηλεκτρικής πρόωσης, υφίσταται η δυνατότητα προκατασκευής και συναρμολόγησης αρκετών συστατικών μερών της εγκατάστασης προκειμένου να διευκολυνθεί η πορεία της κατασκευής (σχήμα 3.14) και να μειωθεί ο χρόνος ολοκλήρωσης της ναυπήγησης (σχήμα 3.15). Επί παραδείγματι αναφέρεται ότι τα δίκτυα εξαγωγής καυσαερίων των κυρίων μηχανών είναι πλέον ευθύγραμμα, χωρίς πολύπλοκες καμπύλες και έτσι δύνανται να κατασκευαστούν και να συναρμολογηθούν εύκολα και γρήγορα, εξοικονομώντας κατ' αυτόν τον τρόπο χρόνο και εργατοώρες.



Σχήμα 3.14 : Κατασκευή τομέων (blocks) και υπερτομέων (mega blocks)



Σχήμα 3.15 : Σύνθεση τομέων (blocks) και υπερτομέων (mega blocks)

Επί πλέον οι μηχανές diesel μπορούν να εγκατασταθούν στα πέδιλα στήριξης τους και στη συνέχεια να τοποθετηθούν στο σκάφος έτοιμες για κάθε περαιτέρω διασύνδεση με τα βοηθητικά τους δίκτυα. Επί πλέον, εάν οι κύριες μηχανές εγκατασταθούν σε υψηλότερο κατάστρωμα, αυτό χρονικά δύναται να εκτελεστεί περί το ένα εξάμηνο αργότερα από ότι στην περίπτωση της συμβατικής μορφής πρόωσης. Έτσι λοιπόν εξαιτίας της ελαχιστοποίησης του χρόνου παράδοσης τέτοιων ακριβών μηχανημάτων όπως οι κύριες μηχανές, ελαχιστοποιείται και το απαιτούμενο δεσμευμένο κεφάλαιο για τη ναυπήγηση.

Στον αντίποδα, στη συμβατική μορφή πρόωσης, οι κύριες μηχανές θα πρέπει να εγκατασταθούν κατά τα πρώτα στάδια της ναυπήγησης και απαιτούνται αρκετές εργατοώρες. Το συνολικό βάρος μιας εγκατάστασης προώσεως με μεσόστροφη κύρια μηχανή είναι σχεδόν το μισό της αντίστοιχης σε ισχύ αργόστροφης και κατά πολύ λιγότερο στην περίπτωση εγκατάστασης αεριοστροβίλου.

Οι παραπάνω δυνατότητες εξοικονομούν εργατοώρες κατά την πορεία ναυπήγησης του πλοίου, αφού σημαντικές εργασίες μπορούν να εκτελεστούν στο αντίστοιχο συνεργείο αντί για το πλοίο.

3.3.7 Αυξημένο κόστος από το ναυπηγείο

Σήμερα, πολλά ναυπηγεία ανά την υφήλιο, ναυπηγούν διάφορους τύπους πολεμικών πλοίων, σε γραμμή παραγωγής. Η διαδικασία της όμοιας και μαζικής κατασκευής θα λέγαμε ότι καθιστά την κατασκευή ευκολότερη και φθηνότερη καθώς προχωρά ο χρόνος, μιας και όλοι στην πορεία του χρόνου διδάσκονται από τα λάθη τους. Έτσι λοιπόν κάθε τί καινούργιο που διαφοροποιείται από μια προκαθορισμένη διαδικασία παραγωγής, πολύ πιθανόν να κοστίζει κάτι παραπάνω στο ναυπηγείο. Προκειμένου λοιπόν να αντισταθμίσουν αυτόν τον αστάθμητο παράγοντα κατά την κατασκευή νέων τύπων πλοίων, τα ναυπηγεία επιβάλλουν ένα αυξημένο κόστος. Προς όφελος όχι μόνο των τελικών χρηστών αλλά και των ναυπηγείων είναι όλα τα προαναφερόμενα πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης.

3.4 Κόστος λειτουργίας και συντήρησης

Είναι γενικά γνωστό ότι το κόστος συντήρησης μιας αργόστροφης μηχανής ντήζελ είναι περί τα 1.5 USD/MWh, κόστος σχετικά μικρό σε σύγκριση με αντίστοιχη μεσόστροφη μηχανή ντήζελ που φθάνει τα 2.1 USD/MWh και που συνήθως χρησιμοποιείται στην ηλεκτροπρόωση. Αν το γεγονός αυτό διαχωριστεί από την όλη διαδικασία σύγκρισης, τότε αυτόματα οι αργόστροφες μηχανές έχουν σαφές πλεονέκτημα, πλην όμως θα πρέπει να υπάρξει μια ευρύτερη συγκριτική μελέτη εκτός των προηγούμενων μεγεθών, η οποία θα εστιάζει και σε άλλους παράγοντες, μερικοί εκ των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω:

- Το πιο σημαντικό όφελος της ντήζελ-ηλεκτρικής πρόωσης όσον αφορά στο επιχειρησιακό μέρος ενός πολεμικού πλοίου είναι ότι μικρού ή μεσαίου μεγέθους προγραμματισμένες εργασίες δύνανται να εκτελούνται εν πλω χωρίς να περιορίζεται σημαντικά η μέγιστη ταχύτητα του πλοίου. Εκτός των άλλων, σε εν όρμω κατάσταση εάν μία ή δύο μηχανές απαιτούν προγραμματισμένη εργασία, τούτο εκτελείται εύκολα αφού το απαιτούμενο φορτίο στην εν όρμω κατάσταση εξυπηρετείται και από μια μηχανή. Στην περίπτωση δε εξάρμωσης για γενική επισκευή μιας ή δύο κύριων μηχανών, συμμορφούμενοι ταυτόχρονα στις προκαθορισμένες διατάξεις ασφαλείας, βλέπουμε ότι η απαιτούμενη ενέργεια προσφέρεται από τις υπόλοιπες μηχανές. Έτσι μειώνοντας τις ημέρες που απαιτούνται για μεγάλης έκτασης εργασίες, αυξάνεται η διαθεσιμότητα των πλοίων του εκάστοτε Στόλου και κατ' επέκταση αυξάνεται το 'κέρδος' του αντίστοιχου Πολεμικού Ναυτικού.

- Στην επιλογή της ντήζελ-ηλεκτρικής πρόωσης, τα ενδιάμεσα διαστήματα μερικών επισκευών των μηχανών αλλά και η περίοδος της γενικής τους επισκευής αυξάνεται, διότι οι μηχανές λειτουργώντας συνέχεια στο 90% των στροφών τους έχουν καλύτερη απόδοση. Σε αντίθετη περίπτωση, οι ίδιες μηχανές οι οποίες κινούν σταθερή ή μεταβλητού βήματος έλικα, έχοντας διακυμάνσεις στροφών και φορτίου, απαιτούν συχνότερη περιοδική συντήρηση και επισκευή. Αυτό λοιπόν σημαίνει επιπλέον κόστος.
- Επίσης στην επιλογή της ντήζελ-ηλεκτρικής πρόωσης με μεσόστροφες μηχανές, υπάρχει μια μείωση στο κόστος ανταλλακτικών και συντήρησης της τάξης του 20% εξ αιτίας των σταθερών στροφών σε σχέση με τη συμβατική μορφή πρόωσης, όπου το φορτίο και οι στροφές των ίδιων μηχανών είναι μεταβαλλόμενες. Αυτό λοιπόν από μόνο του είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα της ηλεκτροπρόωσης.
- Στη συμβατική μορφή πρόωσης με μηχανές ντήζελ, για την παροχή ηλεκτρικής ισχύος απαιτούνται και άλλες βοηθητικές μηχανές. Έτσι υπάρχει το ζητούμενο του επί πλέον κόστους συντήρησης για τις μηχανές των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών, το κόστος των οποίων ανέρχεται περίπου στα 3.1 USD/MWh. Ακόμη και στην περίπτωση όπου υπάρχουν γεννήτριες οι οποίες κινούνται από άξονα που παίρνει κίνηση από τις κύριες μηχανές και έλικα μεταβλητού βήματος για πρόωση, το κόστος είναι σημαντικά μεγαλύτερο, σε σχέση με την επιλογή της ηλεκτροπρόωσης και κατ' αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος στην εν όρμω κατάσταση του πλοίου. Αντίθετα, στην ηλεκτροπρόωση δεν υφίσταται η απαίτηση της ύπαρξης βοηθητικών μηχανών μιας και ταυτόχρονα οι ανάγκες πρόωσης και ενέργειας, καλύπτονται από τις ίδιες μηχανές.
- Ένα άλλο ενδιαφέρον ζήτημα αναφορικά με το κόστος συντήρησης είναι εκείνο του συνολικού αριθμού εγκατεστημένων κυλίνδρων οι οποίοι συντηρούνται, ανεξαρτήτως μεγέθους και ισχύος. Επί παραδείγματι, μια πυραυλάκατος 500 DWT, απαιτεί 80 κυλίνδρους ταχύστροφων μηχανών στη συμβατική μορφή πρόωσης, ενώ στην ντήζελ-ηλεκτρική επιλογή 48 κυλίνδρους (βλ. πίνακα 3.1).

Συμβατική μορφή πρόωσης (ταχύστροφες μηχανές)

	Αρ.	Ισχύς (KW)	Κύλινδροι
Κύριες Μηχανές	4	12,500	80
Ηλεκτρομηχανές	3	750	18
Σύνολο		13,250	98

Ντίζελ-ηλεκτρική μορφή πρόωσης (ταχύστροφες μηχανές)

	Αρ.	Ισχύς (KW)	Κύλινδροι
Κύριες Μηχανές	4	13240	48
Ηλεκτρομηχανές	1	100	6
Σύνολο		13,350	54

Πίνακας 3.1: Συγκριτικός πίνακας συντηρούμενων κυλίνδρων ανά μορφή πρόωσης

- Τα πλήρως εξηλεκτρισμένα πολεμικά πλοία μπορούν να κινούνται είτε με μηχανές Diesel αποκλειστικά είτε με συνδυασμό Diesel και αεριοστροβίλων. Στους αεριοστροβίλους απαιτούνται σαφώς λιγότερα βοηθητικά μηχανήματα αν και τελικά η περίοδος των μερικών και των γενικών επισκευών δεν διαφέρουν κατά πολύ από τις diesel.
- Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα ηλεκτρονικά συστατικά μέρη των πλήρως εξηλεκτρισμένων πλοίων όπως μετασχηματιστές, μετατροπείς συχνότητας, φίλτρα, καλώδια κλπ απαιτούν αραιά και πού οπτική επιθεώρηση και όχι εκτεταμένη συντήρηση. Αντίθετα, οι γεννήτριες και οι κινητήρες πρόωσης απαιτούν προγραμματισμένη συντήρηση.
- Τέλος, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ενεργειακή εξοικονόμηση στην περίπτωση των μεσόστροφων μηχανών από ότι στις αργόστροφες. Παρόλα αυτά, στην επιλογή της ντίζελ-ηλεκτρικής πρόωσης δεν απαιτούνται λέβητες μικρής ισχύος ή ηλεκτρικοί θερμαντήρες για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης/ζεστού νερού όπως στη συμβατική μορφή πρόωσης, επειδή μπορεί να υπάρξει εύκολα διάταξη ανάκτησης της θερμότητας και χρησιμοποίησή της για το σκοπό αυτό.

3.5 Κόστος καυσίμων και λιπαντικών

Η ειδική κατανάλωση καυσίμου σε δίχρονη μηχανή ντίζελ είναι περί τα 172 gr/kWh, ενώ η αντίστοιχη τετράχρονης μηχανής ντίζελ 186 gr/KWh και του αεριοστροβίλου ακόμη μεγαλύτερη. Αυτό είναι ένα ισχυρό κίνητρο για την επιλογή κατά περίπτωση συμβατικής μορφής πρόωσης με χρήση αργόστροφης μηχανής ντίζελ.

Στον αντίποδα, σε πολλές περιπτώσεις, η ειδική κατανάλωση ελαίου λιπάνσεως μιας δίχρονης μηχανής ντίζελ (περί τα 1.2 gr/KWh) είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη

της τετράχρονης μηχανής ντήζελ (0.7 gr/KWh). Επίσης στις δίχρονες μηχανές ντήζελ υπάρχει και η κατανάλωση ελαίου του στροφαλοθαλάμου (περί τα 9.0 kg/cyl.day).

Εάν υποθέσουμε ότι η τιμή του κόστους ελαίου λιπάνσεως είναι περίπου δεκαπλάσια από την αντίστοιχη τιμή του πετρελαίου F-76, τότε θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η παραπάνω διαφοροποίηση της δίχρονης από την τετράχρονη μηχανή ντήζελ. Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζεται ένα υποθετικό παράδειγμα δύο μηχανών (δίχρονης και τετράχρονης ντήζελ), ίδιας ονομαστικής ισχύος (8,000 KW) για περίοδο λειτουργίας 8,000 ώρες. Βλέπουμε ότι η επίδραση της κατανάλωσης ελαίου λιπάνσεως είναι σημαντική καθώς μειώνει τη διαφορά των 98,560 USD στα 3,200 USD.

	Δίχρονη Diesel	Τετράχρονη Diesel
Ισχύς εξόδου μηχανής (KW)	8,000	8,000
Συνολικές ώρες λειτουργίας (hours)	8,000	8,000
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (gr/KWh)	172	186
Τιμή καυσίμου (USD/ton)	110	110
Συνολικό Κόστος Καυσίμου (USD)	1,210,880	1,309,440
		+98,560
Ειδική κατανάλωση ελαίου (gr/KWh)	1.2	0.7
Τιμή ελαίου λιπάνσεως (USD/ton)	1,000	1,000
Συνολικό Κόστος ελαίου λιπάνσεως (USD)	92,160	44,800
Κατανάλωση ελαίου κάρτερ (Kg/hr)	6	-
Τιμή ελαίου λιπάνσεως κάρτερ (USD/ton)	1,000	-
Συνολικό Κόστος ελαίου κάρτερ (USD)	48,000	-
ΣΥΝΟΛΟ	1,351,040	1,354,240
		+3,200

Πίνακας 3.2: Η επίδραση της κατανάλωσης ελαίου στο συνολικό κόστος λειτουργίας

Εκτός από τα παραπάνω μερικά σημαντικά ζητήματα της ντήζελ-ηλεκτρικής πρόωσης που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι τα παρακάτω:

- Στην επιλογή της ντήζελ-ηλεκτρικής πρόωσης, οι μηχανές στρέφουν με σταθερές στροφές, έτσι η ειδική κατανάλωση καυσίμου παραμένει σταθερή ακόμη και σε διακυμάνσεις φορτίων ενώ η ειδική κατανάλωση ελαίου λιπάνσεως είναι η ίδια, είτε λειτουργούν για πρόωση είτε για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθετη

περίπτωση η αργόστροφη μηχανή ντήζελ μπορεί να έχει καλύτερη ειδική κατανάλωση καυσίμου ενώ εργάζεται σε επιχειρησιακή ταχύτητα, όμως σε χαμηλότερες απαιτήσεις φορτίων η ειδική κατανάλωση ελαίου λιπάνσεως αυξάνεται αρκετά.

3.6 Ελικτικές ικανότητες

Οι ελικτικές ικανότητες ενός πολεμικού πλοίου είναι από τα σοβαρότερα ζητήματα στα οποία θα πρέπει ο μελετητής/ σχεδιαστής να εστιάσει, διότι η φύση και η αποστολή τέτοιων πλοίων απαιτεί υψηλά χαρακτηριστικά ροπής. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να σκεφτούμε τις απαιτήσεις που θα θέλαμε να ικανοποιούνται όταν ένα πολεμικό πλοίο επιχειρεί σε δυσμενές περιβάλλον με έντονη θαλασσοταραχή και έχει αναλάβει μια αποστολή ανάλογη της φύσης του. Θα πρέπει λοιπόν ανά πάσα στιγμή να μπορεί να στρέψει αρκετά γρήγορα, να ακινητοποιηθεί από τη μέγιστη ταχύτητα στον ελάχιστο δυνατό χρόνο (crash stop) και εν γένει να διαθέτει εξαιρετική απόκριση στις εντολές που δίδονται για την πρόωση και την πηδαλιουχία. Ειδικά όταν το πλοίο κινείται υπό την απειλή κάποιου άλλου εχθρικού πλοίου και η κατάσταση χαρακτηρίζεται κρίσιμη για την ίδια τη επιβιωσιμότητα του πλοίου αλλά και την ασφάλεια του πληρώματός του, το τυχόν επιπλέον κόστος για εγκατάσταση συστημάτων πρόωσης με πολύ καλές ελικτικές ικανότητες, δύναται να προσδώσει πλεονέκτημα στο πλοίο αυτό και στο έθνος του.¹

Τα έμφυτα πλεονεκτήματα των μετατροπέων συχνότητας και των κινητήρων πρόωσης προσδίδουν στην πλήρως εξηλεκτρισμένη εγκατάσταση προώσεως εξαιρετικές ελικτικές ικανότητες και χαρακτηριστικά πρόωσης. Οι μετατροπείς συχνότητας δύνανται να ελέγξουν επακριβώς οποιαδήποτε απότομη μεταβολή του φορτίου, σε αντίθεση με τη

¹ Χαρακτηριστικό παράδειγμα για εμάς τους Έλληνες αποτελεί το θωρηκτό Αβέρωφ, που κατάφερε τεράστια εθνική επιτυχία το 1912. Είναι πράγματι γεγονός ότι είχαν δαπανηθεί πάρα πολλά χρήματα για το πλοίο αυτό, όμως τη δεδομένη στιγμή, οι εξαιρετικές ελικτικές του ικανότητες και οι ικανότητές του στην πρόωση, σε συνδυασμό με την εξαιρετική ανθεκτικότητά του (survivability), έδωσαν το τακτικό πλεονέκτημα στην Ελλάδα και με τους κατάλληλους χειρισμούς του εμπειρότατου κυβερνήτη Παύλου Κουντουριώτη, η Ελλάδα πέτυχε ένα πολύ μεγάλο στόχο. Αποδείχθηκε λοιπόν ότι άξιζαν οι δαπάνες που είχε καταβάλει η Ελλάδα τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και ουδείς γνωρίζει τι θα επακολουθούσε αν δεν είχε αγοραστεί αυτό το πλοίο.

συμβατική εγκατάσταση προώσεως, όπου οι κύριες μηχανές απαιτούν κάποιο χρόνο έτσι ώστε να δώσουν στο πλοίο την επιθυμητή ταχύτητα. Το μεγάλο πλεονέκτημα ενός ηλεκτρικού κινητήρα είναι ότι μπορεί να αποδώσει την ονομαστική του ροπή σε όλο το φάσμα των στροφών του. Αυτό δίνει την ικανότητα στο πλοίο να ανταποκρίνεται πάρα πολύ γρήγορα στις συχνές απαιτήσεις φορτίου και επίσης καθιστά τη διαδικασία της αναπόδισης του σκάφους γρήγορη και εύκολα πραγματοποιούμενη.

Προκειμένου δε να αυξηθούν οι ελικτικές ικανότητες του πλοίου, ειδικά όταν αναφερόμαστε σε μεγάλα πλοία (αντιτορπικά, φρεγάτες και πλοία γενικής υποστήριξης) είναι δυνατόν να εγκατασταθούν πλωραίοι ή πρυμναίοι προωστήριοι μηχανισμοί (stern and bow thrusters) δίχως να αυξάνει η πολυπλοκότητα και το μέγεθος της απαιτούμενης ισχύος. Στην περίπτωση της συμβατικής πρόωσης κάτι τέτοιο θα αύξανε τη συνολική ενεργειακή απαίτηση των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών.

Όμως ο καλύτερος τρόπος για να αυξηθούν περαιτέρω οι ελικτικές ικανότητες του πλοίου είναι η εγκατάσταση των pods αντί της συμβατικής λύσης αξονικού συστήματος και πηδαλίου μετά πτερυγίων. Τα pods είναι πλήρως περιστρέψιμα κατά 360° προσφέροντας στο σκάφος εξαιρετικό επίπεδο ελιγμών και crash stop. Το επιπλέον κέρδος που θα ωφελούνταν ο τελικός χρήστης, δηλαδή το Πολεμικό Ναυτικό από την εγκατάσταση σε μεγάλα πλοία pods και bow ή stern thrusters είναι μεγάλο αν σκεφτούμε ότι για να απάρει ένα τέτοιου εκτοπίσματος πλοίο απαιτούνται ρυμουλκά και αρκετός χρόνος.

3.7 Εκπομπές καυσαερίων

3.7.1 Γενικά

Οι εκπεμπόμενοι ρύποι των καυσαερίων των κυρίων μηχανών είναι ένα σημαντικό ζήτημα το οποίο θα πρέπει να αποτιμηθεί σε μια μελέτη, μιας και οι διεθνείς και οι εθνικοί κανονισμοί, όσον αφορά στο συγκεκριμένο θέμα γίνονται ολοένα και αυστηρότεροι. Είναι δεδομένο ότι σήμερα δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στην προστασία του περιβάλλοντος από την παγκόσμια κοινότητα και οι διακρατικοί έλεγχοι για την προστασία του περιβάλλοντος έχουν εντατικοποιηθεί.

Σύμφωνα με το πρόγραμμα των εκπεμπόμενων ρύπων των ναυτικών εφαρμογών, η ποσότητα του εκπεμπόμενου NOx από τα πλοία στις εκβολές του ποταμού στο Vlissingen της Ολλανδίας ήταν σχεδόν ίση με την εκπεμπόμενη ποσότητα από όλες τις βιομηχανικές

εγκαταστάσεις μετρούμενη σε Kg/Km²/day. Οι εκπομπές σε SO_x και CO ήταν σχεδόν το 20% και το 4% αντίστοιχα των συνολικών βιομηχανικών εκπομπών. Όπως φαίνεται λοιπόν από τα παραπάνω ο στόχος των νεότερων κανονισμών για την προστασία του περιβάλλοντος θα είναι η μείωση των εκπομπών σε NO_x και SO_x στο προσεχές μέλλον[11].

3.7.2 Μηχανές Diesel

Αν και η προκαλούμενη ρύπανση από τα καυσαέρια (% κ.ο) των μεγάλων σε μέγεθος Diesel μηχανών είναι μικρή σε σχέση με τη συνολικά προκαλούμενη μόλυνση, εξακολουθούν να έχουν μια μικρή επίπτωση στο περιβάλλον, η οποία όπως αναφέρθηκε και πιο πριν είναι τρόπον τινά αναπόφευκτη.

Η υψηλή θερμική απόδοση των μηχανών Diesel οφείλεται κυρίως στην υψηλή θερμοκρασία καύσης αλλά και τον σχηματισμό NO_x. Κάποιες ενδεικτικές τιμές των εκπεμπόμενων καυσαερίων αργόστρωφων μηχανών παρατίθενται στον πίνακα 3.3.

NO _x	17.0 gr/KWh
SO _x	13.6 gr/KWh
CO ₂	0.5 gr/KWh
CO	0.4 gr/KWh
HC	0.4 gr/KWh
Dust	0.6 gr/KWh

Πίνακας 3.3: Εκπομπές καυσαερίων αργόστρωφων μηχανών Diesel

Αρκετές μέθοδοι είναι σήμερα διαθέσιμες από τους κατασκευαστικούς οίκους προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές NO_x και SO_x.

- Πρώτη επιλογή αποτελεί μια σειρά βελτιωτικών και σχεδιαστικών αλλαγών που έχει εισάγει η Wartsila και που έχει καταφέρει να μειώσει τα επίπεδα των εκπομπών στις μηχανές της κατά 30%, από το 1990.
- Για την περαιτέρω μείωση, η πιο ενδεδειγμένη μέθοδος η οποία μπορεί να επιτύχει 60% μείωση του NO_x είναι η απευθείας έγχυση νερού. Το ανωτέρω σύστημα είναι το πλέον αποδοτικό και δεν επιφέρει πολυπλοκότητα στη μηχανολογική εγκατάσταση και από την άλλη είναι μια βιώσιμη λύση σε περιπτώσεις

μεσόστροφων μηχανών Diesel όπου το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο NO_x είναι 6 gr/KWh.

- Περαιτέρω μείωση του NO_x πάνω από το 90%, επιτυγχάνεται με τη χρήση καταλύτη, ο οποίος μετά από κατάλληλη επεξεργασία δίνει καλά αποτελέσματα, παρά τις όποιες δυσκολίες συναντάμε σε καύσιμα που περιέχουν υψηλό επίπεδο θείου. Παρόλα αυτά όμως παραμένει μια ακριβή μέθοδος (75,000 USD/MW) έχοντας ταυτόχρονα υψηλό κόστος συντήρησης (5 USD/MWh).
- Αναφορικά με τις εκπομπές SO_x η μόνη εφικτή και βιώσιμη μέθοδος είναι η μείωση της περιεκτικότητας σε θείο που περιέχεται στο F-76. Περιεκτικότητα ενός Kg θείου στο καύσιμο ισοδυναμεί με 2 Kg εκπεμπόμενου SO_x. Καύσιμα με μικρή περιεκτικότητα σε θείο είναι διαθέσιμα στην αγορά πετρελαίου, κοστίζουν όμως 30 USD/ton περισσότερο από τα κοινά[36].

3.7.3 Αεριοστρόβιλοι

Αναφορικά με τα επίπεδα εκπεμπόμενων NO_x και SO_x, οι αεριοστρόβιλοι έχουν σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των μηχανών Diesel. Έτσι, αν υποθέσουμε ότι οι αεριοστρόβιλοι είναι εφαρμόσιμοι σε εφαρμογές CODOG, τότε τα πλήρως εξηλεκτρισμένα πολεμικά πλοία, τα οποία χρησιμοποιούν αεριοστροβίλους στην πρόωσή τους συντελούν στη μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος.

Οι εκπομπές SO_x είναι πάρα πολύ μικρές αν όχι ανύπαρκτες και οι εκπομπές NO_x είναι περί τα 2.5-4.0 gr/KWh και μόνο 1.5- 2.5 gr/KWh στους συνδυασμένους κύκλους. Επίσης οι αεριοστρόβιλοι έχουν υψηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου και απαιτούν για την καύση υψηλής αξίας καύσιμο.

Προκειμένου οι μηχανές Diesel να φτάσουν τα χαμηλά επίπεδα εκπομπών των αεριοστροβίλων αναπτύσσονται διάφορες μέθοδοι, οι οποίες μάλλον οδηγούν σε υψηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου στις μηχανές με απευθείας έγχυση νερού και σε επιπλέον κόστος όταν μιλάμε για καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.

Εάν όλα αυτά τα πλεονεκτήματα των αεριοστροβίλων (εξοικονόμηση όγκου και συντήρηση) ληφθούν υπόψη, τότε η ηλεκτροπρόωση COGEG ή CODOG γίνεται ελκυστικότερη ειδικά στην περίπτωση πολεμικών πλοίων.

ΜΕΡΟΣ 4

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ-ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

4.1 Γενικά

Η διαχρονικά διεθνώς υφιστάμενη στενότητα στα κονδύλια για τις κατασκευές πολεμικών πλοίων, έχει αυξήσει την πίεση στους σχεδιαστές και μηχανικούς να σχεδιάζουν οικονομικώς προσιτά πλοία (design affordable ships). Η οικονομική προσιτότητα είναι μια από τις υψηλότερες προτεραιότητες στους σχεδιασμούς πολεμικών πλοίων. Δεν είναι πλέον αρκετό να επιτύχουμε την καλύτερη χωρητικότητα με λιγότερο κόστος, αλλά η σημερινή πρόκληση είναι να προσφέρουμε την καλύτερη δυνατή απόδοση μέσα σε στενό εύρος διαθέσιμων χρημάτων και δαπανών. Παρακάτω δίνονται οι απαραίτητοι ορισμοί και η μεθοδολογία με ενδεικτικά αποτελέσματα της οικονομικής προσιτότητας στις κατασκευές πολεμικών πλοίων και επεξηγείται η ανάλυση του κόστους των πλοίων λαμβάνοντας υπόψη τα κατάλληλα μέτρα προσιτότητας. Τέλος, προτείνονται και αναλύονται τρόποι για να γίνεται ένας στόλος οικονομικότερα προσιτότερος.

4.2 Η οικονομικό-τεχνική προσιτότητα στις κατασκευές πολεμικών πλοίων

4.2.1 Ορισμοί και μέτρα οικονομικής προσιτότητας

Οι χρησιμοποιούμενες έννοιες και όροι στη μεθοδολογία της οικονομικότερης προσιτότητας είναι οι παρακάτω:

- **Acquisition Cost**-Κόστος κτήσης- καθορίζεται ο μέσος όρος κόστους προγράμματος για μια κλάση πολεμικών πλοίων.
- **Affordable Fleet Size**- Οικονομικώς προσιτό μέγεθος στόλου- καθορίζεται ο αριθμός των πλοίων που μπορούν να αποκτηθούν και να λειτουργήσουν για το ίδιο μειωμένο ή μη μειωμένο κονδύλι ως συγκεκριμένος αριθμός πλοίων με τις βασικές προδιαγραφές.
- **Discount Analysis**-Ανάλυση με αναγωγή στην παρούσα αξία-καθορίζεται ο υπολογισμός της σημερινής αξίας των χρημάτων. Ο παράγοντας που χρησιμοποιείται είναι $1/(1+x)^n$ όπου x το ποσοστό έκπτωσης και n ο χρόνος αποπληρωμής.
- **Discount Rate**-επιτόκιο αναγωγής στην παρούσα αξία- είναι το ποσοστό που χρησιμοποιείται στην ανάλυση με βάση την παρούσα αξία.

- **Discount Life Cycle Cost-** παρούσα αξία κόστους κύκλου ζωής- καθορίζεται το κόστος κύκλου ζωής ενός πλοίου εκτιμώμενο σε σημερινή αξία, για ένα περιγραφόμενο σενάριο κύκλου ζωής.
- **Force Level-**Μέγεθος δυνάμεως- καθορίζεται ο αριθμός των πλοίων που μπορούν να διατηρηθούν στην ενέργεια για ένα προκαθορισμένο ετήσιο κονδύλι πρόσκτησης.
- **Lead Ship Cost-** κόστος πατρικού πλοίου- καθορίζεται το κόστος πρόσκτησης του πρώτου πλοίου σε μια κλάση, συμπεριλαμβανομένου του λεπτομερούς σχεδιασμού, του προγραμματισμού και της κατασκευής του.
- **Learning Curve-** καμπύλη μάθησης- καθορίζεται η καμπύλη η οποία δείχνει τη μείωση του κόστους σε σχέση με τον αριθμό των μονάδων που κατασκευάζονται. Παράγοντας διαμόρφωσης της καμπύλης αυτής γίνεται ένα μικρό μέρος του κόστους αν διπλασιαστεί ο αριθμός των μονάδων.
- **Life Cycle Cost-** Κόστος κύκλου ζωής- καθορίζεται το άθροισμα του κόστους πρόσκτησης και του ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης επί τα έτη ζωής του πλοίου.
- **Life Cycle Scenario-**Σενάριο κύκλου ζωής- ο χρονικός προγραμματισμός πρόσκτησης και λειτουργίας των πλοίων που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό και ενημέρωση του κόστους κύκλου ζωής.
- **Military Effectiveness Analysis-** Ανάλυση στρατιωτικής αποδοτικότητας – είναι μια ανάλυση που συγκρίνει το κόστος αποδοτικότητας ενός πλοίου ή μιας ομάδας πλοίων που επιχειρεί σε μια ναυτική αποστολή.
- **Navy Program Costs** – είναι η διαφορά μεταξύ του συνολικού αποφασισμένου κόστους του πλοίου και του κόστους κατασκευής του στο ναυπηγείο συν το διατιθέμενο από την κυβέρνηση κόστος ειδικού απόρρητου εξοπλισμού (GFE Cost).
- **Off- Ship Production** –είναι η προκατασκευή και συναρμολόγηση που πραγματοποιείται πριν το σύστημα ή η μονάδα τοποθετηθεί στο προς ναυπήγηση πλοίο.
- **Operating & Support Cost** – είναι το ετήσιο κόστος λειτουργίας με τις λιγότερες αλλαγές κατά μέσο όρο των πλοίων της κλάσης.
- **VAMOSC- Visibility of Annual Operating and Support Cost-** είναι η ετήσια αποτίμηση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης των πολεμικών πλοίων.

- **Zonal Systems** – είναι βοηθητικά και ηλεκτρικά συστήματα διατεταγμένα και εγκατεστημένα σε ζώνες ανάμεσα σε υδατοστεγανές φρακτές του πλοίου.
- **Average Acquisition Cost**- μέσο κόστος απόκτησης (από ένα προκαθορισμένο αριθμό πλοίων).
- **Acquisition Rate**- ποσοστό απόκτησης πλοίων ανά έτος για ένα συγκεκριμένο κονδύλι.
- **Force Level for specified budget and ship life** – μέγεθος δύναμης για ένα συγκεκριμένο κονδύλι και συγκεκριμένη διάρκεια ζωής πλοίου. (**Force Level=budget*life/acquisition cost**).
- **Life cycle cost/ ship or program life cycle cost/ ship** - κόστος κύκλου ζωής ανά πλοίο ή κόστος προγράμματος κύκλου ζωής πλοίου (μη μειωμένο ή μειωμένο) για ένα συγκεκριμένο αριθμό πλοίων.
- **Discount Affordable Fleet Size** – το ανηγμένο με βάση την παρούσα αξία μέγεθος στόλου- καθορίζεται ο αριθμός των πλοίων που μπορούν να αποκτηθούν και να λειτουργήσουν για την ίδια παρούσα αξία κόστους κύκλου ζωής ως καθορισμένος αριθμός πλοίων (συνήθως 10 ή 100) με τις βασικές προδιαγραφές.
- **Non-Discount Affordable Fleet Size**- μη ανηγμένο με βάση την παρούσα αξία μέγεθος στόλου - καθορίζεται ο αριθμός των πλοίων που μπορούν να αποκτηθούν και να λειτουργήσουν για την ίδια μη-παρούσα αξία κόστους κύκλου ζωής ως καθορισμένος αριθμός πλοίων (συνήθως 10 ή 100) με τις βασικές προδιαγραφές.

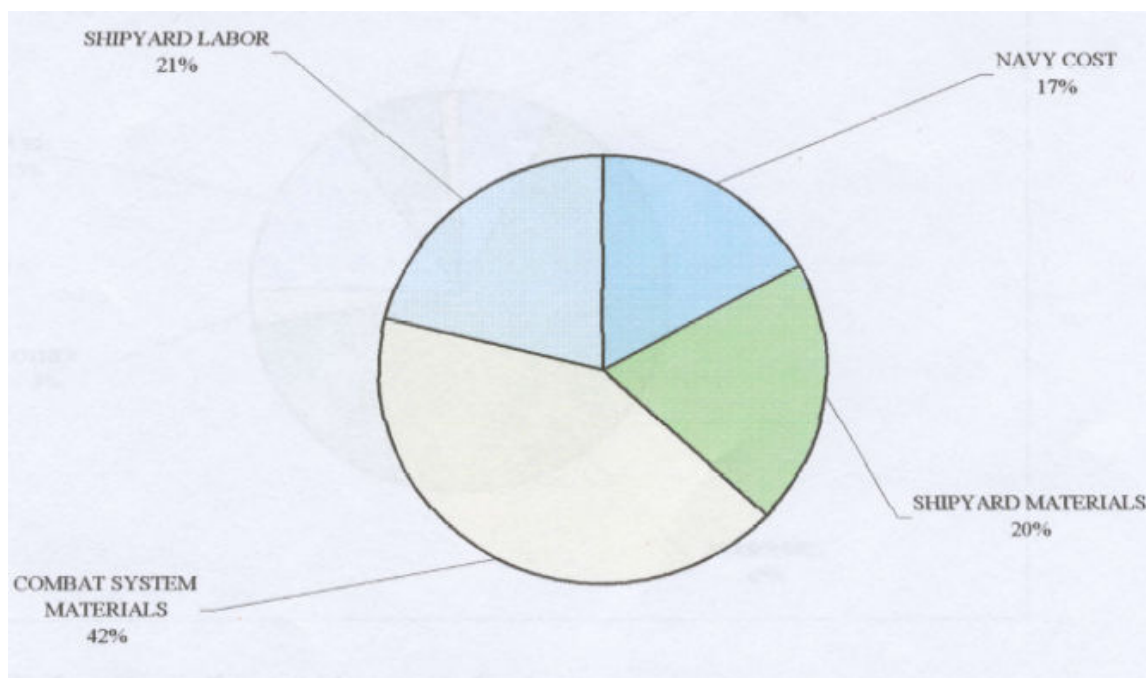
Υπάρχει μεγάλος αριθμός μέτρων οικονομικής προσιτότητας που μπορούν να ληφθούν υπόψη προκειμένου να αποδοθούν ρεαλιστικά αποτελέσματα και μερικά από τα παραπάνω καθορίζονται ως απόλυτα μέτρα οικονομικής προσιτότητας και είναι τα εξής:

1. **Acquisition Cost (M\$)**
2. **Life Cycle Cost (M\$)**
3. **Discount Life Cycle Cost (M\$)**
4. **Acquisition Rate**
5. **Force Level for specified budget and ship life**

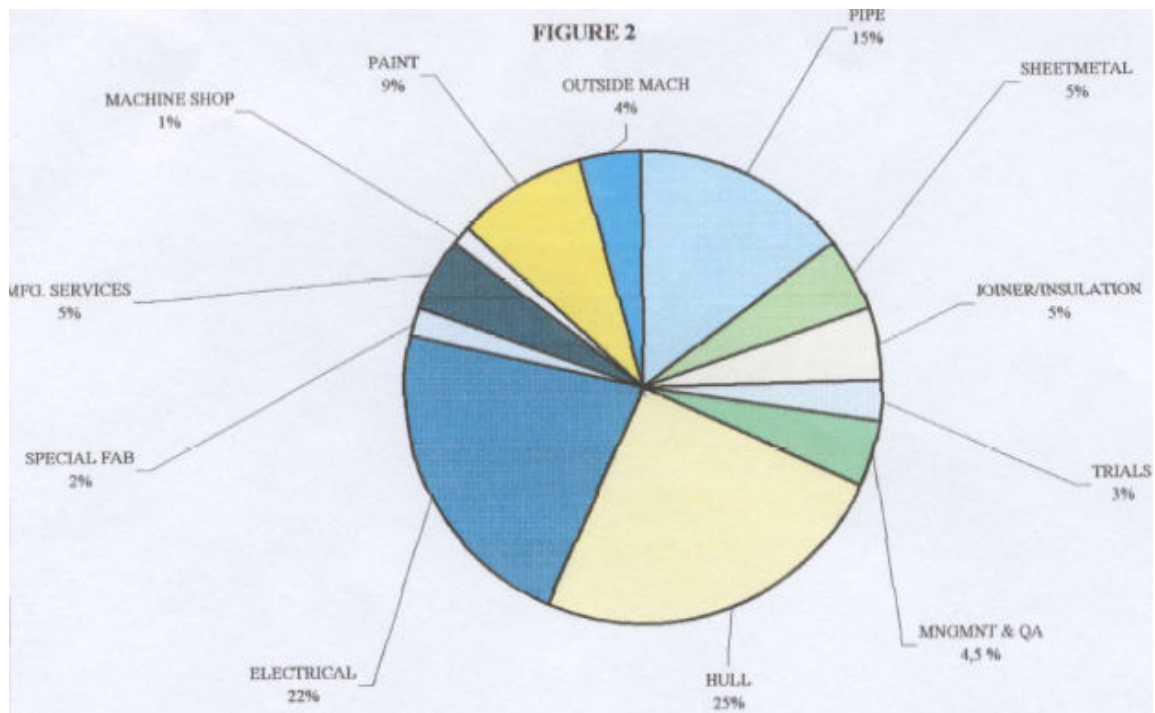
4.2.2 Μεθοδολογία ανάλυσης κόστους

Το κόστος των πολεμικών πλοίων μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη, στο **κόστος προγράμματος απόκτησης** και στο **ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης**. Το

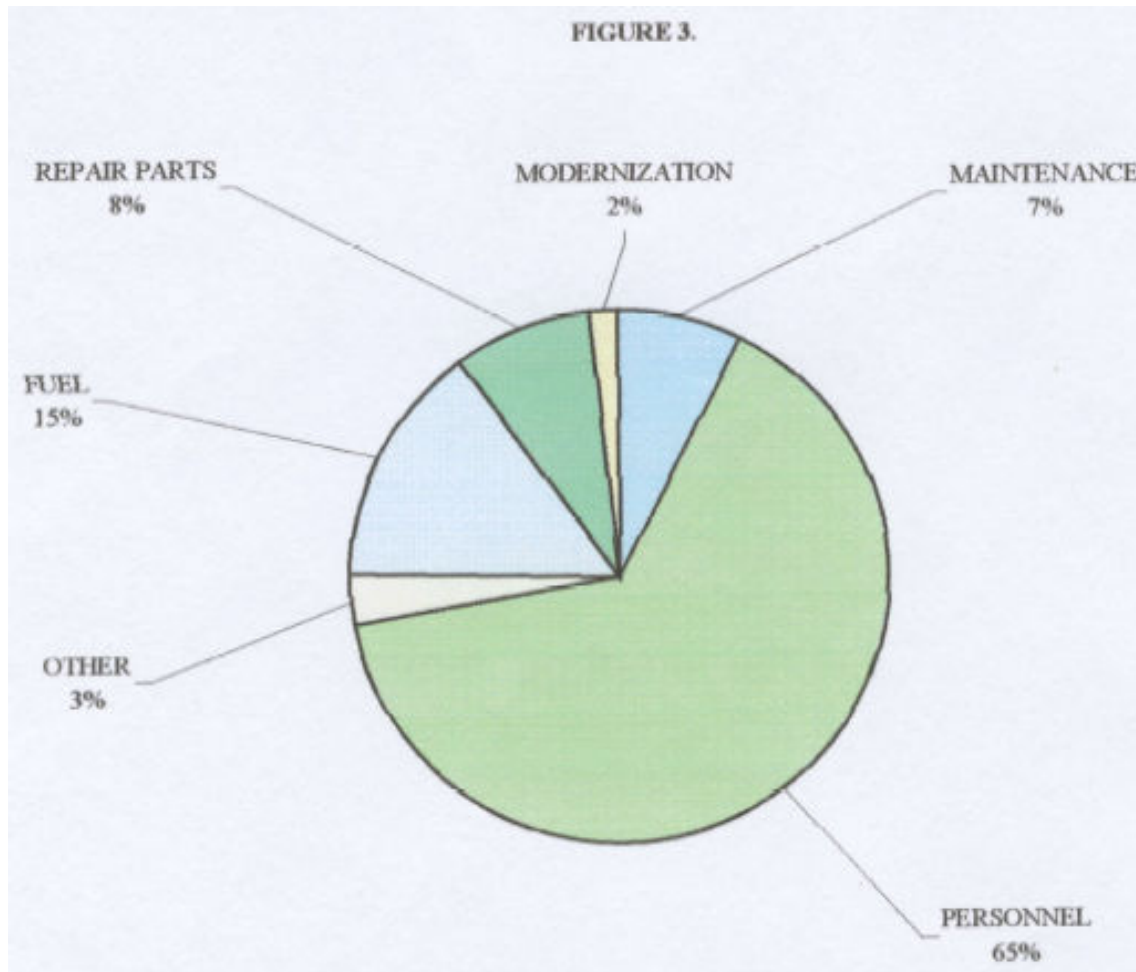
κόστος προγράμματος απόκτησης, συμπεριλαμβανομένων και των μη επαναλαμβανόμενων δαπανών του πρώτου πλοίου (non-recurring), υπολογίζεται για το σύνολο των πλοίων της κλάσης, με τα πλεονεκτήματα της καμπύλης μάθησης (αποκτώμενης εμπειρίας) και το σύνολο κατανέμεται κατά μέσο όρο στον αριθμό των πλοίων της κλάσης. Αντίθετα, δεν υπολογίζεται το κόστος έρευνας και ανάπτυξης για διερεύνηση και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και εξοπλισμού. Η κατανομή του κόστους απόκτησης ενός τυπικού πολεμικού πλοίου (αντιτορπλικού) απεικονίζεται στα σχήματα 4.1 και 4.2, όπου το σύστημα μάχης αποτελεί πλέον του 40% του κόστους απόκτησης. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης απεικονίζεται στο σχήμα 4.3 και παρουσιάζει το ετήσιο κόστος του πληρώματος, των καυσίμων, της συντήρησης, των επισκευών και της εκπαίδευσης ενώ συμπεριλαμβάνεται και το κόστος εκσυγχρονισμού και αναβάθμισης. Το 65% της κάθε δαπάνης που δαπανάται ετησίως πηγαίνει για το προσωπικό. Παρ' όλο που οι δύο αυτοί παράγοντες, σύστημα μάχης και δαπάνες προσωπικού, προφανώς έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στην οικονομική προσιτότητα, μικρές / οριακές βελτιώσεις (across the board) είναι ικανές να μετριάσουν αισθητά το κόστος κατασκευής και λειτουργίας του στόλου στη θάλασσα.



Σχήμα 4.1 : Κατανομή του κόστους κατασκευής πολεμικού πλοίου



Σχήμα 4.2 : Επί μέρους κατανομή του κόστους στο ναυπηγείο



Σχήμα 4.3 : Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης ενός πολεμικού πλοίου

Παρουσιάζεται παρακάτω μια απλουστευμένη εξίσωση κόστους για την κατασκευή και την απόκτηση ενός πολεμικού πλοίου. Παρουσιάζονται επίσης τυπικοί παράγοντες κόστους που περιλαμβάνονται στην ανάλυση. Βασικά το κόστος απόκτησης διαμορφώνεται από τον εξοπλισμό, τα εργατικά και το κόστος ναυπήγησης. Έτσι, η εξίσωση που περιγράφει το σχεδιασμό του πλοίου και το κόστος μοντέλου είναι η κάτωθι:

$$CS = NCF * (CM * MOH + MH * CL * LOH) * GA * FEE, \text{ όπου:}$$

CS=Ship Program Cost (\$) - Κόστος προγράμματος πλοίου

NCF=Naval Cost Factor – Παράγοντας Κόστους Προγράμματος του Ναυτικού

CM=Cost of Materials- Κόστος των υλικών

MOH=Material Overhead- Έξοδα διαχείρισης υλικών

CL=Cost of Shipyard Labor (\$/man hrs)- Κόστος εργατικών ναυπηγείου

MH=Labor (man hrs)- Εργατοώρες

LOH= Labor Overhead- Έξοδα διοίκησης εργατικών

GA= General & Administrative Cost (G&A)- παράγοντας G&A

FEE=Fee Factor- Παράγοντας Αμοιβής

Οι τυπικές τιμές μερικών από τους πιο πάνω παράγοντες της εξίσωσης έχουν ως εξής:

NCF=1.15-1.25

MOH=1.02-1.04

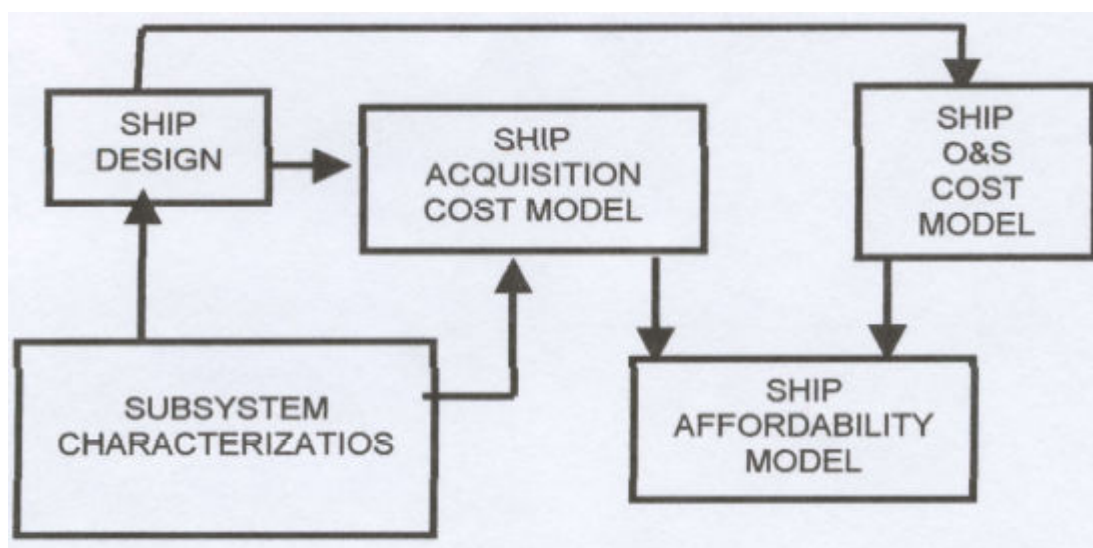
CL=14-18 \$/man hrs

LOH=1.70-1.80

GA=1.05-1.08

FEE=1.07-1.10

Ο παράγοντας Κόστους Προγράμματος Ναυτικού NCF καλύπτει το κόστος πέραν του βασικού κόστους κατασκευής και του κόστους εξοπλισμού, όπως π.χ σχεδίαση – ενδεχόμενες απροσδόκητες αβλεψίες – αλλαγές και αναπροσαρμογές τιμών. Το μοντέλο σχεδίασης (ship design) του πλοίου επιδρά άμεσα, τόσο στο μοντέλο κόστους απόκτησης όσο και στο μοντέλο κόστους λειτουργίας και συντήρησης και τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών συνδυάζονται με διαφορετικά μέτρα οικονομικής προσιτότητας έτσι ώστε να συνθέσουν το γενικό/ ολοκληρωμένο μοντέλο οικονομικής προσιτότητας. Η γενική προσέγγιση απεικονίζεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 : Μεθοδολογία οικονομικής προσιτότητας

Η ανάλυση του κόστους απόκτησης βασίζεται στην παραπάνω εξίσωση και κάθε μια από τις παραμέτρους υπολογίζεται ως εξής:

NCF: Προσδιορίζεται από το λόγο του κόστους του προγράμματος του Ναυτικού προς το κόστος κατασκευής στο ναυπηγείο (συμπεριλαμβανομένου και του συστήματος μάχης) για παρόμοιου τύπου πλοία και κατανέμοντας ανάλογα τα αποτελέσματα. Τα δεδομένα λαμβάνονται από στοιχεία των κονδυλίων του Υπουργείου Άμυνας.

MOH, LOH, GA και Fee : Έξοδα διαχείρισης υλικών, έξοδα διοίκησης εργατικών, παράγοντες γενικών και διοικητικών και παράγοντες αμοιβών που λαμβάνονται επιβλέποντας/ εκτιμώντας τις αξίες και εξάγοντας το μέσο όρο από αρκετά μεγάλα ναυπηγεία.

CM: Κόστος υλικών. Τα κόστη των υλικών υπολογίζονται με δύο τρόπους ως εξής:

- (1) Τα μεγάλα κομμάτια (συστήματα) κοστολογούνται ξεχωριστά χρησιμοποιώντας παραμέτρους κονδυλίων του Υπουργείου (πελάτη) και των προσφορών των πωλητών (vendor quotes) και στη συνέχεια αθροίζονται.
- (2) Υλικά ναυπηγείου, όπως δίκτυα – σωληνώματα, χάλυβας, βαφίματα κλπ κοστολογούνται χρησιμοποιώντας κανόνες διατίμησης/ διαγωνισμού. Οι ποσότητες καθορίζονται από το λεπτομερές πλάνο σχεδιασμού του πλοίου. Οι παράγοντες κόστους που χρησιμοποιούνται ως κανόνες αξιολόγησης αποκτώνται από τα δεδομένα στοιχεία του ναυπηγείου και τις προσφορές των προμηθευτών. Για παράδειγμα, ο χάλυβας τιμολογείται σε μια βάση \$/ τον και η αξία αυτή λαμβάνεται από τις τιμές του ναυπηγείου.

CL: Κόστος εργατικών. Ο παράγοντας αυτός εξαιρεί και αποκλείει τα γενικά έξοδα των εργασιών στο ναυπηγείο. Η αξία αυτή λαμβάνεται από αναφορές του μέσου κόστους εργατικών στα ναυπηγεία (MARAD- Maritime Administration).

MH: Εργατώρες ναυπηγείου. Η εργασία υπολογίζεται βάσει μιας σειράς κανόνων προσέγγισης και διαβάθμισης, ένας (κανόνας) για κάθε εργασία στο ναυπηγείο. Πχ. για το κόστος εργασίας κατασκευής του καταστρώματος υπάρχει μια αξία εργατωρών για κάθε τόνο που βασίζεται στα δεδομένα του ναυπηγείου. Η αξία αυτή πολλαπλασιάζεται με το βάρος σε τόνους το οποίο υπολογίζεται βάσει του μοντέλου σχεδιασμού του πλοίου.

Όλες οι εξισώσεις βάρους και όγκου εργασιών στο μοντέλο του πλοίου βασίζονται σε ένα πλοίο βασικών/ πρότυπων προδιαγραφών. **Το καταδρομικό DDG- 51 του Αμερικανικού Ναυτικού είναι το πλοίο των πρότυπων/ βασικών προδιαγραφών που**

χρησιμοποιείται στα αποτελέσματα της παρούσας οικονομικοτεχνικής μελέτης. Αν τα συστήματα ή υποσυστήματα αλλάξουν στο πλοίο των βασικών προδιαγραφών (πχ διαφορετικό σύστημα πρόωσης ή διαφορετικός χάλυβας) τότε οι παράγοντες βάρους, όγκου εργασιών, απόδοσης κλπ αντικαθίστανται από τις κατάλληλες αξίες που αντιπροσωπεύουν τις καινούργιες επιλογές. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να προκύψουν με τη μορφή συνολικών αξιών ή κανόνων αγοράς/ διαγωνισμού. Όλα αυτά συνηγορούν υπέρ ενός πολύ ευέλικτου αλλά ακριβού εργαλείου εκτίμησης κόστους για πλοία..

4.2.3 Μεθοδολογία ανάλυσης οικονομικής προσιτότητας

Το οικονομικά προσιτό μέγεθος στόλου (AFS) είναι ένας λόγος του κόστους του Κύκλου Ζωής, ήτοι:

Ο λόγος του κόστους του πλοίου με τις βασικές προδιαγραφές προς το κόστος του νέου πλοίου, επί τον αριθμό των πλοίων των βασικών προδιαγραφών. Το οικονομικά προσιτό μέγεθος στόλου είναι η παράμετρος κλειδί ή το αποτέλεσμα της οικονομικής προσιτότητας .

➤ Το σενάριο της απόκτησης και λειτουργίας που χρησιμοποιείται στην παρούσα, έχει ως εξής:

- Δέκα πλοία αποκτώνται με ένα ρυθμό ένα (1) το χρόνο για δέκα (10) χρόνια.
- Τα πλοία χρηματοδοτούνται πλήρως τη στιγμή της απόκτησης.
- Τα πλοία λειτουργούν για σαράντα χρόνια.
- Το ποσοστό της έκπτωσης που χρησιμοποιείται είναι της τάξεως του 5%.

Έτσι, η παρούσα αξία κόστους κύκλου ζωής (DLCC) καταλήγει στην εξίσωση:

$$DLCC= A*(\text{κόστος απόκτησης}) + B*(\text{κόστος λειτουργίας και συντήρησης})$$

και το κόστος κύκλου ζωής (LCC) καταλήγει στην εξίσωση:

$$LCC= 10*(\text{κόστος απόκτησης})+ 10*40*(\text{κόστος λειτουργίας και συντήρησης})$$

Επίσης, το ανηγμένο με βάση την παρούσα αξία μέγεθος στόλου δίνεται από τη σχέση:

$$AFS(D)=10*[A*(\text{κόστος απόκτησης πλοίου βασικών προδιαγραφών})+B*(\text{κόστος λειτουργίας και συντήρησης βασικών προδιαγραφών})]/[A*(\text{κόστος απόκτησης})+B(\text{κόστος λειτουργίας και συντήρησης})]$$

Ενώ το αντίστοιχο μη- ανηγμένο με βάση την παρούσα αξία μέγεθος στόλου δίνεται από τη σχέση:

$$AFS(ND)=10*[(\text{κόστος απόκτησης βασικών προδιαγραφών}) +40*(\text{κόστος λειτουργίας και συντήρησης βασικών προδιαγραφών})*(\text{κόστος απόκτησης})] /[(\text{κόστος απόκτησης}) +40*(\text{κόστος λειτουργίας και συντήρησης})]$$

Οι τιμές των τελεστών **A** και **B** για το συγκεκριμένο σενάριο απόκτησης δέκα (10) πλοίων με ένα ποσοστό έκπτωσης της τάξης του 5%, διαμορφώνονται σε **A=6.05** **B=85.40** και **B/A=14.10**, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4.1

SHIP ACQUISITION COST

Ship No	Factor "A"	Factor "B"
1	0.746	10.49
2	0.710	10.00
3	0.677	9.51
4	0.644	9.05
5	0.614	8.64
6	0.584	8.26
7	0.557	7.88
8	0.530	7.53
9	0.505	7.19
10	0.481	6.87
	A=6.05	B=85.40

Πίνακας 4.1: Υπολογισμός τελεστών A και B

Η ανάλυση της οικονομικής προσιτότητας, δεν είναι η τελευταία λέξη στον προσδιορισμό και την εκτίμηση των πλοίων. Μπορεί να προσδιορίσει παράγοντες κόστους για την ίδια ικανότητα, αλλά χρειάζεται η στρατιωτική ανάλυση αποδοτικότητας για να βαρύνει και να καθορίσει τελικώς την πολεμική ικανότητα του πλοίου, το επίπεδο απειλής, τις υπογραφές του πλοίου και το επίπεδο επιβιωσιμότητας και ασφάλειας. Οι διαδικασίες και μεθοδολογίες που περιγράφονται υπάρχουν για να συγκρίνουν πλοία με διαφορετικά συστήματα μάχης και διαφορετικές υπογραφές και ασφάλεια, μαζί με διαφορετικά κόστη.

Η στρατιωτική αποδοτικότητα (Measure of Effectiveness, **MOE**) ορίζεται ως το πηλίκο εκτέλεσης της αποστολής προς το κόστος αυτής, συνεπώς η οικονομική προσιτότητα παίζει έναν από τους σημαντικότερους ρόλους στην εξίσωση του **MOE**. Το μειωμένο κόστος για την ίδια ικανότητα , αν χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε από τα μέτρα κόστους, βελτιώνει τη στρατιωτική αποδοτικότητα.

Η εξέταση των δύο εξισώσεων που έχουν να κάνουν με την προσιτότητα του μεγέθους του στόλου, προσφέρει γνώση για τη σημασία του κόστους κτήσης και του κόστους λειτουργίας και συντήρησης στον καθορισμό της οικονομικής προσιτότητας, όπως μετράται από την οικονομική προσιτότητα του μεγέθους του στόλου. Όσον αφορά στο **NON-DISCOUNT COST**, αν το πλοίο κοστίζει 800 εκατ. \$ και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι 20 εκατ. \$ ανά έτος, τότε τα δύο κόστη είναι ίδιας σπουδαιότητας. Αυτό φαίνεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση του κόστους κύκλου ζωής (LCC) και εξισώνοντας την παράγωγο του (LCC) με το μηδέν:

$$LCC=ACQC+40*OSC \Rightarrow dLCC=(\delta LCC/\delta ACQC)*dACQC+(\delta LCC/\delta OSC)*dOSC$$

$$\text{και } (\delta LCC/\delta ACQC)=1, (\delta LCC/\delta OSC)=40$$

συνεπώς

$$0= dACQC+40* dOSC \Rightarrow dACQC/ACQC=-40* (dOSC/OSC)*(OSC/ACQC)$$

Το ποσοστό αλλαγής στο κόστος απόκτησης που ισοδυναμεί με μια αλλαγή της τάξης του 1% στο κόστος του OSC είναι: $dACQC/ACQC=-40(1)*(OSC/ACQC)$

Αυτό σημαίνει ότι το κόστος απόκτησης , λειτουργίας και συντήρησης είναι ίσης σημασίας. Αν το OSC αυξάνεται, τότε το ACQC πρέπει να μειωθεί ώστε να κρατηθεί η ισορροπία, αυτό εξάλλου δικαιολογεί και το (-) στο πρόσημο.

Όσον αφορά στο **DISCOUNT COST**, αν το πλοίο κοστίζει 800 εκατ. \$ και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι 20 εκατ. \$ ανά έτος, τότε τα δύο κόστη δεν είναι ίσης σημασίας. Αυτό φαίνεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση της παρούσας αξίας κόστους κύκλου ζωής (DLCC) και εξισώνοντας την παράγωγο του (DLCC) με το μηδέν:

$$DLCC=A*ACQC+B*OSC \Rightarrow$$

$$dDLCC=(\delta DLCC/\delta ACQC)*dACQC+(\delta DLCC/\delta OSC)*dOSC$$

$$\text{και } (\delta DLCC/\delta ACQC)=A, (\delta DLCC/\delta OSC)=B$$

συνεπώς

$$0=A* dACQC+B* dOSC \Rightarrow \delta ACQC/ACQC=-(B/A)* (dOSC/OSC)*(OSC/ACQC)$$

Το ποσοστό αλλαγής στο κόστος απόκτησης που ισοδυναμεί με ένα ποσοστό της τάξης του 1% στο κόστος OSC είναι:

$$\Delta ACQC/ACQC = (-B/A) * (OSC/ACQC) \Rightarrow \Delta ACQC/ACQC = (-14.10) * (20/800) = -0.35$$

Γι' αυτό το παράδειγμα, το κόστος απόκτησης είναι περίπου 3*(1/0.35) φορές πιο σημαντικό από το κόστος λειτουργίας και συντήρησης και αυτό οφείλεται στο ότι στο κόστος έγινε έκπτωση. Το μελλοντικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι λιγότερο σημαντικό από το κόστος απόκτησης επειδή απομειώνεται σε μεγάλη χρονική διάρκεια[29].

4.3 Τρόποι αύξησης οικονομικής προσιτότητας

Οι πιθανοί τρόποι για να βελτιωθεί η οικονομική προσιτότητα για ένα πλοίο χωρίζονται σε τρία μέρη, το πρώτο μέρος είναι η στρατηγική απόκτησης, το δεύτερο μέρος είναι η σχεδίαση και το τρίτο μέρος η παραγωγή. Είναι επομένως αναγκαίες μερικές επεξηγήσεις και ερμηνείες αυτών των αντικειμένων:

Flat Learning Curve - το πρώτο πλοίο μπορεί να απαιτήσει περισσότερες από τις διπλάσιες εργατοώρες που θα χρειαστεί το εικοστό πλοίο της κλάσης. Αξιοσημείωτο κέρδος μπορεί να επιτευχθεί αν με συνολική προσπάθεια μειωθεί η επαναλαμβανόμενη εργασία, οι αποκλίσεις, οι αλληλοπαρεμβάσεις και τα προβλήματα στην παραγωγή των πρώτων πλοίων της κλάσης. Για παράδειγμα, για τη ναυπήγηση είκοσι (20) πλοίων, αν η καμπύλη μάθησης είναι στο 85% επιτυγχάνεται μια εξοικονόμηση (εργατική αποταμίευση) της τάξης του 23,4%. Η αποταμίευση είναι 15,7% για μια καμπύλη μάθησης 90%. Γι' αυτό εξάλλου και είναι επιθυμητή η επίπεδη καμπύλη μάθησης, οπότε και τα εργατικά στα πρώτα πλοία είναι περίπου τα ίδια όσο και στα τελευταία πλοία μιας κλάσης.

Zonal Systems- μελέτες έχουν δείξει ότι υπάρχει μια σημαντική μείωση του όγκου των εργασιών στα βοηθητικά και ηλεκτρικά συστήματα, τοποθετώντας τα σωληνώματα των δικτύων και τα καλώδια των συστημάτων διανομής ηλεκτρικής ισχύος σε υδατοστεγείς ζώνες μεμονωμένες μεταξύ τους, αντί να τοποθετούνται σε κεντρικούς χώρους.

Off Ship Production- πρόσφατες μελέτες σε ναυπηγεία των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής και αλλοδαπών εμπορικών και ναυπηγικών κατασκευαστών έδειξαν μείωση από το 50% έως το 20% της εργασίας όταν τα συστήματα συναρμολογούνται σε συνεργεία ή

σε εταιρείες (όπου προσφέρονται οι διαμορφωμένες μονάδες από έξω), σε σύγκριση με τη συναρμολόγηση πάνω στο πλοίο. Η μέγιστη χρήση της κατασκευής σε εργαστήρια προσφέρει σημαντική μείωση στη συνολική εργασία του ναυπηγείου[29].

4.4 Ενδεικτικά αποτελέσματα και σχολιασμός

Παρακάτω παρουσιάζεται μια σύνοψη ορισμένων αποτελεσμάτων οικονομικής προσιτότητας ενός πολεμικού πλοίου. Οι τύποι των προγραμμάτων που λαμβάνονται υπόψη, ομαδοποιημένα είναι οι εξής:

- Ο κύριος μηχανολογικός εξοπλισμός (που περιλαμβάνει αεριοστροβίλους, μειωτήρες στροφών και κύριες/ βοηθητικές γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας).
- Τα συστήματα μάχης (όπλα και ηλεκτρονικά)
- Τα περιφερειακά βοηθητικά και ηλεκτρικά συστήματα
- Οι ενδιαιτήσεις

Το σενάριο προσιτότητας που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε σε μια εκατοντάδα πολεμικών πλοίων που ναυπηγήθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής τα προηγούμενα είκοσι (20) χρόνια, μ' ένα ποσοστό έκπτωσης της τάξης του 10%. Ο λόγος εργασιών που εκτελέστηκαν στο πλοίο και στο συνεργείο ελήφθη **3:1 (ship to shop ratio)**, ενώ ο λόγος εργασιών διαμορφωμένων μονάδων προς εκείνων στο συνεργείο ελήφθη **2:1 (block to shop ratio)**. Οι ρυθμοί αυτοί βασίζονται σε επίβλεψη και έρευνα των ναυπηγείων. Αριθμητικώς τα παραπάνω παρατίθενται στον πίνακα 4.2 και ο σχολιασμός του οδηγεί στα κάτωθι συμπεράσματα:

1. powerpacks (οι αεριοστροβίλοι συμπεριλαμβανομένων των μειωτήρων, των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών και των βοηθητικών μηχανημάτων) δεν βελτιώνουν σημαντικά την προσιτότητα, διότι η εργασία και ο όγκος που εξοικονομούνται δεν είναι αρκετά για να ξεπεράσουν τα κόστη των διαμορφωμένων προγραμμάτων.
2. οι προδιαμορφώσεις των ενδιαιτήσεων δεν αποδίδουν διότι η στενότητα των χώρων καταπνίγει τα πλεονεκτήματα της παραγωγής στα συνεργεία.
3. οι προδιαμορφώσεις των συστημάτων μάχης δεν αποδίδουν διότι η στενότητα των χώρων καταπνίγει τα κέρδη της εργασίας με τη χρήση παραγωγής στην ξηρά.
4. η εγκατάσταση σε ζώνες των βοηθητικών μηχανημάτων αποδίδει σημαντικά και οδηγεί σ' ένα μικρότερο και οικονομικότερο πολεμικό

πλοίο, λόγω της χωρητικότητας των χώρων και της μείωσης των συστημάτων συμπεριλαμβανομένης και της εκτός πλοίου παραγωγής

	Baseline	Powerpacks	Zonal Aux
Εκτόπισμα (mt)	8417	8488	7830
Μήκος Ισάλου (m)	142	143,56	139,9
Συνολικός Όγκος (m ³)	27513	27542	24694
Συνολικό Κόστος κτήσης (M\$)	829,84	829,91	812,32
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (M\$/Yr)	17,15	17,23	16,24
Affordability (Προσιτότητα)	100	99,9	102,5

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα προσιτότητας στις διάφορες αλλαγές σχεδιασμού

Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι βασικές προδιαγραφές του πλοίου **DDG 51** (σχήμα 4.5) που είναι και το «πλοίο σύγκριση»[18]. Η μελέτη επικεντρώνεται σε τρεις κατηγορίες πιθανών οικονομικοτεχνικών βελτιώσεων, των απαιτούμενων αλλαγών, των βελτιωμένων αρχιτεκτονικών και νέων τεχνολογιών. Πιο αναλυτικά:

Απαιτούμενες αλλαγές:

- μείωση ταχύτητας (3 LM -2500 GT αντί για 4)
- μείωση ταχύτητας (2 LM -2500 GT αντί για 4)
- ακτίνα δράσεως από (Range increased from) 4500 to 6000 n. mi (@ 20 kts)

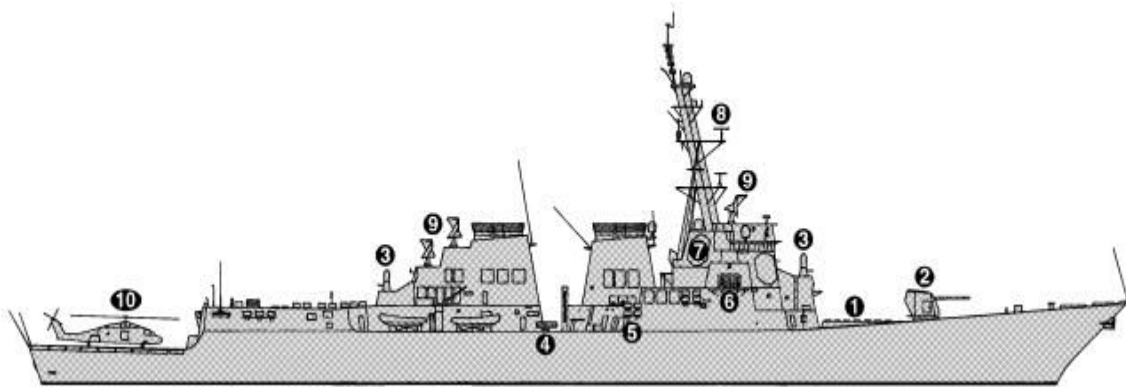
Αρχιτεκτονικές:

- ζώνες / χώροι βοηθητικών και ηλεκτρικών συστημάτων
- λεπτόγραμμη μορφή σκάφους «hull form (L/B= 9/1)»
- μείωση επάνδρωσης/ στελέχωσης « Reduced manning (25%)»

Τεχνολογίες:

- 4 ICR αεριοστρόβιλοι (GT engines)
- 2 ICR / 2 LM -2500
- 3 ICR
- 2 ICR
- Κινητήρας Permanent Magnet (PM) electric drive (ED)/ Power off Main Bus (POMB)

- Pods (with PM/ED/POMB)



Σχήμα 4.5 : DDG-51 ARLEIGH BURKE CLASS, USS DESTROYER

Ακτίνα Ενέργειας	4500 nm @ 20 Kn	Ισχύς πρόωσης	4LM2500 78,33 MW
Μήκος ολικό (m)	153,8	Σύστημα ώσης	2 CPP
Μήκος ισάλου (m)	142	Κόστος κτήσης	840,91 M\$
Εκτόπισμα (mt)	8417	Κόστος λειτ.- συντ.	17,21 M\$/Yr
Βάρος καυσίμ. (mt)	1377		

Πίνακας 4.3: Οι βασικές προδιαγραφές του καταδρομικού DDG-51 («πλοίο σύγκριση»)

Αριθμητικώς τα αποτελέσματα της μελέτης για τα παραπάνω παρατίθεται στα Παραρτήματα «Α» και «Β», με τα ακόλουθα συμπεράσματα::

1. Sustained Speed – η μείωση στον αριθμό των μηχανών προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις AFS (Affordable Fleet Size), ως ακολούθως:

4 LM -2500	$V_S=29.66$	AFS=10.00
3 LM -2500	$V_S=27.80$	AFS=10.39
2 LM -2500	$V_S=25.32$	AFS=10.92

2. Long, slender hull forms- η λεπτομήκης μορφή σκάφους μειώνει την επίπτωση στην εφικτή ταχύτητα και βελτιώνει την οικονομική προσιτότητα, ως εξής:

4 LM -2500	$V_S=31.38$	AFS=10.01
3 LM -2500	$V_S=29.39$	AFS=10.45
2 LM -2500	$V_S=26.70$	AFS=10.96

3. Η αύξηση της ακτίνας δράσης μειώνει την οικονομική προσιτότητα, ως εξής:

	R=4500 n.mi	R=6000 n.mi
	AFS	AFS

4 LM -2500	10.00	9.80
4 ICR	10.09	9.92
3 LM -2500	10.39	10.19
2 LM -2500	10.92	10.67

4. Όλες οι αρχιτεκτονικές κατά ζώνες οδηγούν σε σημαντική βελτίωση της οικονομικής προσιτότητας, ως εξής:

Zonal auxiliaries	AFS=10.33
Zonal electrical	AFS=10.19
Zonal auxiliaries/ electrical	AFS=10.67

5. Manning Reduction (25%) - η μείωση του αριθμού του πληρώματος οδηγεί στη μείωση του μεγέθους του πλοίου και του κόστους συν τα μειωμένα κόστη λειτουργίας και συντήρησης, που οδηγούν σε βελτιωμένο AFS, ως εξής:

Baseline (DDG 51)	AFS= 10.00
Reduced Manning	AFS=10.40

6. Η χρήση του ICR στους αεριοστρόβιλους οδηγεί σε μικρές βελτιώσεις στην οικονομική προσιτότητα, όπως φαίνεται παρακάτω:

	ICR	ICR/ LM-2500	LM-2500
4 μηχανές	10.09	10.16	10.00
3 μηχανές	10.54	-	10.39
2 μηχανές	11.04	-	10.92

Το αυξημένο κόστος μηχανών είναι ελαφρώς λιγότερο σημαντικό από το κέρδος κόστους καυσίμων και τη μείωση του μεγέθους του πλοίου, λόγω της μικρότερης ποσότητας καυσίμων.

7. Κινητήρας (PM) Electric Drive (Inboard and Pods) – η μείωση στο κόστος συντήρησης των ηλεκτρομηχανών του πλοίου και του βάρους συν το συμπαγές των ηλεκτρικών κινητήρων οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της προσιτότητας, ως εξής:

Conventional Mechanical Drive	AFS=10.00
PM ED/POMB (Inboard)	AFS=10.50
PM ED/POMB (Pod)	AFS=10.66

ΜΕΡΟΣ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Τελικά σχόλια

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την αξιολόγηση των προηγούμενων, είναι άκρως ενθαρρυντικά όσον αφορά στην εγκατάσταση ηλεκτροπρόωσης σε πολεμικά πλοία, ιδιαίτερος όταν αναφερόμαστε σε μεγάλες μονάδες (φρεγάτες, κορβέτες, καταδρομικά, αντιτορπιλικά και πλοία γενικής υποστήριξης).

Πιο συγκεκριμένα μπορούν να λεχθούν τα ακόλουθα:

- Η μείωση του αριθμού των εγκατεστημένων κύριων μηχανών οδηγεί στη μείωση του κόστους κτήσης και του κόστους λειτουργίας και συντήρησης του πλοίου, γεγονός που βελτιώνει την οικονομική προσιτότητα.
- Η κατασκευή του μηχανολογικού, του ηλεκτρολογικού και του λοιπού βοηθητικού εξοπλισμού του πλοίου κατά ζώνες οδηγεί στη μείωση του κόστους κτήσης και του κόστους λειτουργίας και συντήρησης και συνεπώς στην σημαντική βελτίωση της οικονομικής προσιτότητας.
- Η δυνατότητα σχεδίασης λεπτομήκους μορφής γάστρας αυξάνει τη μέγιστη συνεχή ταχύτητα του πλοίου και μειώνει το κόστος κτήσης και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, βελτιώνοντας την οικονομική προσιτότητα.
- Η δυνατότητα μείωσης του αριθμού πληρώματος οδηγεί στη μείωση του μεγέθους του πλοίου και του κόστους κτήσης συν τα μειωμένα κόστη λειτουργίας και συντήρησης, βελτιώνοντας την οικονομική προσιτότητα.
- Η χρήση αεριοστροβίλων ICR βελτιώνει ελαφρώς την οικονομική προσιτότητα.
- Η χρήση κινητήρων μονίμων μαγνητών και η εγκατάσταση αξιμουθειακού προωστήριου συστήματος (pods) μειώνουν το κόστος συντήρησης του πλοίου και το μειωμένο συγκριτικά βάρος σε συνδυασμό με το συμπαγές των ηλεκτρικών κινητήρων οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της οικονομικής προσιτότητας.

Συνδυάζοντας τα παραπάνω μπορούν να σχεδιαστούν πολεμικά πλοία οικονομικοτεχνικώς πιο προσιτά. Η εγκατάσταση pods σε συνδυασμό με τη χρήση κινητήρα μονίμων μαγνητών (Permanent Magnet) και η επιλογή κατάλληλου αριθμού αεριοστροβίλων ICR (λαμβάνοντας υπόψη και το επιθυμητό υψηλό επίπεδο εφεδρείας – redundancy-) συνυπολογιζόμενης και της προκύπτουσας εξ αυτών μείωσης στον αριθμό

του πληρώματος και της επίδρασης στη μέγιστη ταχύτητα του πλοίου, δύνανται να αποτελέσουν το «αύριο» στην εγκατάσταση πρόωσης στα πολεμικά πλοία. Υποστηρίζεται ότι με συνδυασμό των ανωτέρω «δεκατρία (13) ή και περισσότερα πλοία μπορούν να αποκτηθούν με αρχικό κόστος δέκα (10) πλοίων» και αυτό είναι ένα σημαντικό βήμα εμπρός.

5.2 Πρόταση για περαιτέρω μελέτη

Είναι γεγονός ότι ακόμη το πεδίο έρευνας και μελέτης για τη συνεχή βελτίωση της ηλεκτροπρόωσης εν γένει, είναι μεγάλο. Οι διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις τόσο στις εμπορικές όσο και στις στρατιωτικές εφαρμογές είναι μεγάλες, όμως ειδικά η στρατιωτική κοινότητα έχει κατανοήσει τα πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης και ως εκ τούτου έχει επενδύσει και θα επενδύσει πολλά χρήματα για την διεξαγωγή έρευνας.

Λαμβάνοντας σοβαρά υπόψη το τελευταίο, θα πρέπει να γίνει μια έρευνα όσον αφορά στις επιπτώσεις που επιφέρει η πραγματικά αυξημένη μαγνητική υπογραφή των πλήρως εξηλεκτρισμένων πλοίων καθώς επίσης και τον/τους τρόπους μείωσής της στον ελάχιστο δυνατό βαθμό.

ΜΕΡΟΣ 6

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΕΙΣ

Θα ήθελα από την παρούσα θέση να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του Ε.Μ.Π κ. Ιωάννη Προυσαλίδη, ο οποίος αφιέρωσε πολύ από τον πολύτιμό του χρόνο, του οποίου οι συμβουλές και η βοήθεια ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Υποναύαρχο ε.α (Μ) Μελέτιο Ίσαρη Π.Ν, τεχνικό σύμβουλο στις Ναυπηγικές και Βιομηχανικές Επιχειρήσεις Ελευσίνας Α.Ε, ο οποίος μου παρείχε πολύτιμο υλικό και συμβουλές από τη σταδιοδρομία του στο Π.Ν, σχετικά με το θέμα της οικονομικοτεχνικής προσιτότητας στις κατασκευές πολεμικών πλοίων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το διπλωματούχο Ναυπηγό Μηχανολόγο ΜΙΤ Υποπλοίαρχο (Μ) Φραγκίσκο Ζουριδάκη Π.Ν για το πλούσιο υλικό πλήρως εξηλεκτρισμένων προωστήριων εγκαταστάσεων που μου παρείχε.

ΜΕΡΟΣ 7

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΝΑΦΟΡΩΝ

Ξενογλώσση βιβλιογραφία

1. ABB Marine, "Azimuthing electric propulsion drive".
2. ABB Marine, "Azipod propulsion control systems".
3. ABB Marine, "Intergrated automation system solutions".
4. ABB Marine, "The CRP Azipod propulsion concept".
5. ABB Marine (1998), "Combined H.V. power plant, Azipod PWM electric propulsion and cargo pump electro drives for a 37500 DWT chemical tanker", proposal to Ceres Hellenic Shipping Enterp. Ltd.
6. ABB Marine, "Sami Megastar frequency converters : Technical Brochure".
7. Ahlqvist I. (1995), "Increasing availability through introduction of redundancy", Wartsila Diesel International Ltd Oy, Finland.
8. Ammala P. (2002), "CRP Azipod propulsion concept : An advanced cost-effective solution", ABB Industry Oy, Finland.
9. Bogh S. A. (2000), "Reliability and safety of electric ships". Logimatic, Denmark.
10. U. Bucknall R. W. G., Doherty K. P. and Haines N. A. (1997), "The matrix converter : the ultimate electric drive technology". University College London, Naval Support Command and Royal School of Signals.
11. Carlton J. S. (1995), "Marine propulsion systems - current trends and their contribution to atmospheric pollution", Lloyd's Register of Shipping, UK.

12. Courtay R. and Viard A. (1995), "Diesel - Electric propulsion : The best system for cruise ships", Chantiers de l'Atlantique, CEGELEC.
13. Det Norske Veritas (2001), "Rules for classification of ships".
14. Ehrhart P. and Sozzi L. (1998), "MM-technology and its application to ship generators and motors", Magnet-Motor GmbH and ABB Industria SpA.
15. Gordouin D. and Menneron F. (2000), "New diesel-electric propulsion system topologies", Alstom Power Conversion France.
16. IMO (1995), "Redundancy of machinery installations including steering gear", report of the correspondence group.
17. International Maritime Associates (1999), "The market for podded electric drives", summary of findings and conclusions of a market study, Washington DC.
18. Jane's (2003), "The fighting warships" Guided Missile Destroyers, United States of America.
19. Johansson M. (2000), "Experiences from commissioning of the KAMEWA/ALSTOM Millennium mermaids and further navalization", Rolls-Royce AB Sweden.
20. Kallah A. S., Murphy M. (1995), "Electric propulsion systems -selecting the right solution", Cegelec Projects Ltd, UK.
21. Koskela M., Koukkari J. and Kuuskoski J. (1995), "Designing an electric propulsion system and power plant for optimum safety", ABB Industry Oy.
22. Krause P. C. (1994), "Analysis of electric machinery". The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York.

- 23.Laukia K. (1995), "The Azipod system - operational experience and designs for the future", Kvaerner Masa-Azipod, Finland.
- 23.MAN B&W - ALPHA Propulsion systems (2001), "Auxiliary Propulsion System for Two-stroke Engine Plants".
- 24.Nicod J. P. and Simon P. (1995), "A step ahead in electric propulsion with Mermaid", Cegelec France.
- 25.Oehlers W. (1995), "Salient features of diesel-electric propulsion concepts for various ship types", MAN B&W Diesel AG, Germany.
- 26.Offringa L. J. J. and Blokland A. J. (1998), "High-speed permanent-magnet generator with power electronic converter for gas turbine power plants", Eindhoven University of Technology and Royal Netherlands Navy.
- 27.Ozpineci B. and Tolbert L. M. (1999), "Cycloconverters", University of Tennessee-Knoxville.
- 28.Pakaste R., Laukia K., Wilhelmson M. and Kuuskoski J. (1995), "Experiences of Azipod propulsion systems onboard merchant vessels", ABB Azipod Oy, Finland.
- 29.Dr Rains A. Dean (July 1996), "Naval Ship Affordability", Naval Engineer Journal, USA.
- 29.Rautelin A., "Variable speed AC thruster drives", ABB Industry Oy, Marine division.
- 30.Prousalidis J. M., Hatziaargyriou N. D. and Papadias B.C. (2001), "On studying ship electric propulsion motor driving schemes". National Technical University of Athens.
- 31.SIEMENS - SCHOTTEL, "The SSP propulsor : An ingenious podded drive system".

32. SIEMENS - SCHOTTEL (1997), "Siemens - Schottel - Propulsor SSP : The podded electric drive with permanently excited motor".
33. Simon P. and Duriaud J. C. (1998), "New trends in electric propulsion", SNAME, NEW YORK.
34. Tunstad T., "Optimising a propulsion plant to special requirements", Wartsila Norway, The Ship Power Supplier.
35. Voyce J. E., Husband S. M. and Mattick D. J. (2000), "The permanent magnet propulsion motor : from infancy to adolescence", AES 2000.
36. Wartsila NSD Corporation, "Emissions Technology".

Ελληνική βιβλιογραφία

37. Φραγκόπουλος Χ.- Προυσαλίδης Ι. (2005), «Ηλεκτρολογικές Εγκαταστάσεις Εισαγωγή στον Αυτοματισμό», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
38. Πρωτονοτάριος Ε. Ν. και Βουρνάς Κ. (1993), «Ηλεκτροτεχνικές Εφαρμογές», Αθήνα.
39. Φραγκόπουλος Χ. Α., Καρυδογιάννης Η. Π. και Καραλής Γ. (1994), «Συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού», ΕΛΚΕΠΑ, Αθήνα.
40. Ι. Κ. Χατζηλάου- Σ. Πέρρος (Μάρτιος 1999), «Μετατροπείς Ενέργειας και ΣΑΕ Ηλεκτρικών Συστημάτων με Ηλεκτρονικά Ισχύος», Σχολή Ναυτικών Δοκίμων, Πειραιάς.
41. Υποπλοίαρχος (Μ) Κ. Ψαλλίδας Π.Ν (Δεκέμβριος 2006), «Νέες τάσεις στη σχεδίαση και κατασκευή γάστρας πολεμικών πλοίων επιφανείας. Εκτίμηση-Συμπεράσματα- Δυνατότητες χρησιμοποίησης σε διάφορους τύπους πολεμικών πλοίων», Ναυτική Επιθεώρηση τεύχος 559.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ «Α»

ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΙΤΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ
ΑΛΛΑΓΕΣ, ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ
[29]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ «Β»

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΙΤΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΔΥΑΖΟΝΤΑΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ
ΑΛΛΑΓΕΣ, ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ.
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ [29]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ "Α"

Affordability Results for Changes in DDG-51 Capabilities

	Displacement (mt)	Fuel Weight (mt)	Acq. Cost (M\$)	O&S COST (M\$/Yr)	5% disc Aff. Fleet
Baseline DDG-51	8417	1377	840,91	17,21	10
3 LM-2500	8040	1355	806,97	16,72	10,39
2 LM-2500	7490	1323	767,44	15,93	10,92
6000 n. mil Range	9150	1880	849,23	18,18	9,8
3 LM-2500/6000 n.mil	8735	1852	815,18	17,64	10,19
2 LM-2500/6000 n.mil	8197	1812	776,6	16,98	10,67

Affordability Results for Changes in DDG-51 Architectures

Changed Item	Displacement (mt)	Fuel Weight (mt)	Acq. Cost (M\$)	O&S COST (M\$/Yr)	5% disc Aff. Fleet
Zonal Auxiliaries	7751	1330	821,23	16,15	10,33
Zonal Electrical/Gen	8219	1288	833,8	16,31	10,19
Zonal Electrical/Aux	7405	1237	809,94	15,14	10,59
25%Manning Reduct	8063	1353	825,91	15,32	10,4
Baseline long,slender	8353	1288	840,66	17,14	10,01
3 LM-2500/long slender	7924	1265	805,76	16,42	10,45
2 LM-2500/long slender	7398	1234	767,24	15,68	10,96

Affordability Results for Changes in DDG-51 Technology

PM=Permanent Magnet
ED=Electric Drive

MD=Mechanical Drive
POMB=Power Off Main Bus

Changed Item	Displacement (mt)	Fuel Weight (mt)	Acq. Cost (M\$)	O&S COST (M\$/Yr)	5% disc Aff. Fleet
4 ICR/MD	7968	1046	847,94	16	10,09
2 ICR/2 LM-2500 MD	7950	1046	838,39	16,18	10,16
3 ICR/MD	7538	1025	809,39	15,49	10,54
2 ICR/MD	7087	1001	770,3	14,96	11,04
PM ED/POMB Inboard	6990	858	828,33	14,44	10,5
PM ED/POMB Pods	6762	844	817,44	14,14	10,66

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ "B"

Affordability Results for Changes in DDG-51 in Capabilities, Architectures and Technology

Changed Item	Displacement (ton)	Fuel Weight (ton)	Acq. Cost (M\$)	O&S COST (M\$/Yr)	5% disc Aff. Fleet
4 ICR/MD Slender Hull	7902	973	847,75	15,87	10,11
4 ICR/MD 6000 n.mil range	8530	1427	855,08	16,83	9,92
2 ICR LM-2500/MD Slender	7421	950	803,21	15,34	10,63
3 ICR/MD Slender Hull	7458	951	809	15,31	10,57
2 ICR/MD Slender Hull	7000	928	769,56	14,63	11,1
PM ED/POMB Pods/Slender	6650	756	875,98	13,27	12,98

Sustained Speed (at Eighty Percent Power) Changes

	Sustained Speed (Kn)
Baseline DDG-51	29,66
DDG-51 Slender Hull	31,38
DDG-51-R=6000 n. mil	29,36
3 LM 2500	27,8
3 LM 2500 Slender Hull	29,39
3 LM 2500- R= 6000 n. mil	27,49
2 LM 2500	25,32
2 LM 2500- Slender Hull	26,7
2 LM 2500-R=6000 n. mil	25,01
PM ED/POMB Pods/Slender	32,38