



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Διερεύνηση Εφαρμοσιμότητας Τεχνολογίας Συνεχούς Ρεύματος σε Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνιος Β. Στρατής

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Διερεύνηση Εφαρμοσιμότητας Τεχνολογίας Συνεχούς Ρεύματος σε Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντώνιος Β. Στρατής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11^η Μαρτίου 2016.

.....
Α. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ι. Προυσαλίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

.....
Αντώνιος Β. Στρατής

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αντώνιος Β. Στρατής, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν κατά την εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την εργασία αυτή και τον Καθηγητή της σχολής των Ναυπηγών Μηχανικών ΕΜΠ κ. Ιωάννη Προυσαλίδη για την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την διαδικασία εκπόνησής της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Δημοσθένη Σπαθή που πρόθυμα με στήριξε σε όλα τα βήματα της συγγραφής με την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω αυτή την εργασία στην οικογένειά μου, που με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του κατά πόσο είναι εφαρμόσιμη η τεχνολογία συνεχούς ρεύματος σε ένα ΣΗΕ πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου.

Αρχικά, στο 1^ο κεφάλαιο, γίνεται μια αναφορά κάποιων γενικών στοιχείων που πρέπει να έχουμε υπόψη μας για πλοία τέτοιου είδους σε σχέση με τα υπάρχοντα και διαμορφούμενα επιστημονικά πρότυπα, καθώς και τις περιβαλλοντικές προϋποθέσεις που διέπουν την κατασκευή και λειτουργία τους.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 2, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δικτύων Συνεχούς έναντι των Εναλλασσόμενου Ρεύματος με ιδιαίτερη βαρύτητα στα χαρακτηριστικά που προσιδιάζουν στις ναυτιλιακές συνθήκες. Επίσης, παραθέτονται οι προτάσεις που έχουν γίνει κατά καιρούς και οι ήδη υπάρχουσες τοπολογίες πλοίων με διανομή ισχύος μέσω ΣΡ.

Στα κεφάλαια 3 έως 6 περιγράφονται τα κυριότερα τμήματα του ΣΗΕ ενός DC πλοίου, με τις διάφορες επιλογές που έχουμε ήδη -ή πιθανότατα θα έχουμε στο εγγύς μέλλον- και φαίνεται από τη βιβλιογραφία να είναι ιδιαίτερες συμφέρουσες από σχεδιαστική, περιβαλλοντική και οικονομική άποψη για τα πλοία αυτά. Ειδικότερα, στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι επιλογές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (κινητήριες μηχανές, γεννήτριες, κυψέλες καυσίμου και ΑΠΕ). Στο κεφάλαιο 4 παρατίθενται -τα ιδιαίτερος σημαντικά στο ΣΡ- συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα συστήματα ηλεκτροπρόωσης και τους ηλεκτροκινητήρες, ενώ το 6^ο κεφάλαιο είναι επικεντρωμένο στα ηλεκτρονικά ισχύος και κάποια καινοτόμα συστήματα οδήγησης που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στους σχεδιασμούς με DC.

Τέλος, στο κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε έπειτα από όλη αυτή τη διερεύνηση και μελέτη των διαφόρων σχεδιασμών και συστημάτων που μπορούν να εφαρμοστούν στο DC πλοίο.

Λέξεις κλειδιά

Πλοίο συνεχούς ρεύματος, ηλεκτροπρόωση, ΣΗΕ πλοίου, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ηλεκτρονικά συστήματα οδήγησης ΣΡ.

Abstract

The purpose of this diploma thesis is to investigate whether it is practicable to apply DC technology in the Electric Power System of an All Electric Ship.

Initially, the 1st chapter is a reference to some general facts that we should keep under consideration for such vessels in relation to the already existing and the constantly evolving scientific standards, and the environmental conditions for their construction and operation.

Next, in Chapter 2, the advantages and disadvantages of DC networks against AC are presented with special attention to the peculiar characteristics of shipping conditions.

Furthermore, the proposals that are made at times by the research community and the existing topologies of DC-ships' electrical networks are also mentioned.

Chapters 3-6 describe the main components of a DC-ship's Power System with the various options that we are given-or probably will be given in the near future- and, as it appears from the literature, seem to be particularly advantageous from the design, environmental and economic point of view for such vessels. In particular, Chapter 3 options are presented for producing the electrical energy (prime movers, generators, fuel cells and renewable energy systems). Chapter 4 are listed the -particularly important in DC- energy storage systems (ESS). In the 5th chapter there is reference to electric propulsion systems and electric motors, while the 6th chapter is focused on power electronics and some innovative motor drive systems that could be used in designs with DC.

Finally, Chapter 7 presents the conclusions reached by the research and examination of different designs and systems that can be applied aboard the DC-Ship.

Keywords

DC-Ship, electric propulsion, ship's EPS, electrical energy production, ESS, DC electrical power drive systems.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:	12
Εισαγωγή	12
1.1 Εισαγωγικό σημείωμα.....	13
1.2 Ιστορική Αναδρομή.....	14
1.3 Τα σημαντικότερα πρότυπα για πλοία με ενοποιημένο ηλεκτρικό σύστημα και διανομή με συνεχές ρεύμα.....	18
IEEE Std 1662™-2008 - “IEEE Guide for the Design and Application of Power Electronics in Electric Power Systems on Ships.”.....	18
IEEE Std 1709™-2010 - “IEEE Recommended Practice for 1 to 35 kV Medium Voltage DC Power Systems on Ships.”.....	19
IEEE Std 1826™-2012 - “IEEE Standard for Power Electronics Open System Interfaces in Zonal Electrical Distribution Systems Rated Above 100 kW.”.....	21
Λοιπά πρότυπα σε σχέση με το DC-πλοίο.....	23
1.4 Περιβαλλοντικά Ζητήματα.....	26
1.4.1 Αναθεωρημένο Παράρτημα VI της MARPOL (MARPOL Annex VI).....	28
1.5 Βιβλιογραφία 1ου Κεφαλαίου.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	32
Ηλεκτρικά Δίκτυα Πλοίων με Διανομή Συνεχούς Ρεύματος (DC-Ships)	32
2.1 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις DC έναντι AC δικτύου.....	33
2.2 Διαγράμματα και τοπολογίες του ηλεκτρικού δικτύου DC-Πλοίου.....	37
2.2.1 Γενικό διάγραμμα του δικτύου συνεχούς ρεύματος μέσης τάσης (MVDC).....	37
2.2.2 Η πρόταση του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ.....	38
Μονάδα Παραγωγής Ισχύος (PGM).....	39
Μονάδα πρόωσης (PMM).....	39
Μονάδα διανομής ισχύος (PDM).....	40
Σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε ζώνες (ZEDS).....	40
2.2.2.1 Παράδειγμα δικτύου MVDC πολεμικού πλοίου.....	41
2.2.3 Το ηλεκτρικό δίκτυο με συνεχές ρεύμα της ABB για εμπορικό πλοίο (ABB Onboard DC Grid).....	46
Πλοίο Υποστήριξης Πλατφόρμας (PSV) Dina Star.....	51
Σύγκριση διαφόρων τοπολογιών για το πλοίο υποστήριξης υποβρύχιων δραστηριοτήτων (Subsea Operation Vessel) Nor Valiant.....	52
2.3 Βιβλιογραφία 2ου Κεφαλαίου.....	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:.....56

Τα βασικότερα μέρη του ΣΗΕ ενός DC-Πλοίου – Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....56

3.1 Κινητήριες Μηχανές και άλλοι τρόποι μετατροπής ενέργειας σε ηλεκτρική - (Μετατροπείς πρωτογενούς ενέργειας με καύση ή χωρίς).....	57
A. Βραχυπρόθεσμες Επιλογές.....	58
Πετρελαιομηχανές.....	58
Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (Liquid Natural Gas – LNG).....	60
Αεριοστρόβιλοι.....	61
B. Μεσο-Μακροπρόθεσμες Περιπτώσεις.....	64
Βιοκαύσιμα.....	64
Πυρηνική Ενέργεια.....	65
Υδρογόνο και άλλα εναλλακτικά καύσιμα.....	69
Πεπιεσμένος Αέρας και Υγρό Άζωτο.....	71
3.2 Γεννήτριες.....	72
A. Τεχνολογικά αποδεδειγμένες κατασκευές.....	74
Εναλλακτήρες έκτυπων πόλων χαμηλής ταχύτητας:.....	74
Εναλλακτήρες τυλιγμένου πεδίου με δυναμοελάσματα:.....	74
Στροβιλοεναλλακτήρες:.....	74
Γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor):.....	74
B. Υπό μελέτη τεχνολογίες.....	77
Σύγχρονες γεννήτριες με υπεραγώγιμα τυλίγματα στον δρομέα (High Temperature Superconducting Machines – HTSM):.....	77
Γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής (Axial Flux PM Generator).....	79
Τεχνολογία ενεργού στάτη (Active Stator).....	80
3.3 Κυψέλες Καυσίμου (Fuel Cells – FC).....	81
3.3.1 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Κυψέλης Καυσίμου.....	83
3.3.2 Συνήθεις Τύποι Κυψελών Καυσίμου.....	86
Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (Alkaline Fuel Cells – AFC):.....	86
Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cells – PAFC):.....	87
Κυψέλη καυσίμου τήγατος ανθρακικών αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC):.....	88
Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC):.....	89
Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC):.....	90
3.3.3 Κυψέλες Καυσίμου στη Ναυτιλία.....	93
3.4 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).....	99
3.4.1 Αιολική Ενέργεια.....	99
3.4.2 Ηλιακή ενέργεια.....	103
3.4.3 Κυματική ενέργεια.....	105
3.4.4 Συμπεράσματα.....	106
3.5 Βιβλιογραφία 3ου Κεφαλαίου.....	107

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:.....109

Τα βασικότερα μέρη του ΣΗΕ ενός DC-Πλοίου – Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage Systems - ESS).....109

4.1 Μπαταρίες.....	112
4.1.1 Σύγκριση στις πιθανές τεχνολογίες συσσωρευτών.....	113
Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος (Lead-acid batteries).....	113
Ηλεκτρικές στήλες υβριδίου νικελίου-μετάλλου (NiMH).....	114
Μπαταρίες νατρίου-χλωριούχου νικελίου (Na-NiCl ₂ – ZEBRA®).....	114
Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion).....	115
4.2 Συστήματα με Σφόνδυλο (Flywheel energy storage systems – FESS)....	120
4.3 Υπερπυκνωτές (supercapacitors ή ultracapacitors).....	127
4.4 Συστήματα Αποθήκευσης Μαγνητικής Ενέργειας με Υπεραγωγούς (Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES Systems).....	130
4.5 Μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής (redox flow batteries – RFB)	134
4.6 Γενικά συγκριτικά στοιχεία των ESS.....	136
4.7 Βιβλιογραφία 4ου Κεφαλαίου.....	138

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:.....140

Τα βασικότερα μέρη του ΣΗΕ ενός DC-Πλοίου – Συστήματα Ηλεκτροπρόωσης και Ηλεκτροκινητήρες.....140

5.1 Συστήματα Ηλεκτροπρόωσης.....	142
5.1.1 Συστήματα ηλεκτροπρόωσης που ο κινητήρας βρίσκεται εντός του κύτους του πλοίου (In-Hull Propulsion).....	142
Αξονικά συστήματα ηλεκτροπρόωσης (shaft propulsion):.....	142
Αζιμουθιακοί προωστήρες τύπου Z ή L (Z or L-type azimuth thrusters).....	143
Σύστημα πρόωσης με προπέλα Voith Schneider (VSP):.....	143
5.1.2 Αζιμουθιακοί προωστήρες με τον ηλεκτροκινητήρα εκτός του σκάφους (Podded Propulsion).....	145
Azipod® (ABB):.....	146
Mermaid® (Rolls Royce & Converteam):.....	146
Siemens-Schottel Propulsor – SSP (Siemens & Schottel):.....	147
DOLPHIN® (SAM Electronics & Wartsila Propulsion):.....	148
5.1.3 Μαγνητο-υδροδυναμικά συστήματα (magnetohydrodynamic drive – MHD)....	148
5.1.4 Ηλεκτροπρόωση με εκτοξευτήρες νερού (Water-jets).....	150
Ripjet®:.....	150
5.2 Ηλεκτρικοί Κινητήρες για Πρόωση.....	152
5.2.1 Σύγχρονοι Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC Synchronous Motors – SM).....	153
5.2.2 Επαγωγικοί/Ασύγχρονοι Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC	

Induction/Asynchronous Motors).....	154
Προηγμένος Επαγωγικός Κινητήρας (Advanced Induction Motor – AIM):.....	154
5.2.3 Σύγχρονος Κινητήρας Εναλλασσόμενου Ρεύματος με Μόνιμο Μαγνήτη (AC Permanent Magnet Synchronous Motor – PMSM).....	155
Κινητήρας ακτινικής ροής (radial flux motor).....	158
Κινητήρας αξονικής ροής (axial flux motor).....	159
Κινητήρας εγκάρσιας ροής (transverse flux motor - TFM).....	160
5.2.4 Σύγχρονος Κινητήρας Εναλλασσόμενου Ρεύματος με Υπεραγωγούς Υψηλής Θερμοκρασίας (AC High Temperature Superconducting Synchronous Motor – HTSSM).....	162
5.2.5 Ομοπολικός Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος με Υπεραγώγιμα Στοιχεία (Superconducting DC Homopolar Motor – SDCHM).....	166
Ο ομοπολικός DC κινητήρας με υπεραγωγούς (SDCHM) της General Atomics (GA):.....	169
5.2.6 Συντελεστής καταλληλότητας (goodness factor) G ηλεκτρικής μηχανής.....	172
5.2.7 Γενικά συμπεράσματα για τους κινητήρες ηλεκτροπρόωσης.....	172
5.3 Βιβλιογραφία 5ου Κεφαλαίου.....	174
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:.....	176
Τα βασικότερα μέρη του ΣΗΕ ενός DC-Πλοίου – Ηλεκτρονικά Ισχύος και Συστήματα Οδήγησης.....	176
6.1 Ηλεκτρονικά ισχύος στο υποσύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας του MVDC δικτύου.....	178
6.1.1 Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος.....	178
6.1.2 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.....	181
6.2 Ηλεκτρονικά ισχύος στο υποσύστημα χρησιμοποίησης ηλεκτρικής ενέργειας του MVDC.....	182
6.3 Ηλεκτρονικά ισχύος στο υποσύστημα διανομής και προστασίας του MVDC.....	184
6.4 Βιβλιογραφία 6ου Κεφαλαίου.....	189
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:.....	192
Συμπεράσματα – Επίλογος.....	192

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικό σημείωμα

Τα τελευταία χρόνια είναι ολοένα και μεγαλύτερος ο προβληματισμός σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος, τις τιμές αλλά και τα αποθέματα του πετρελαίου. Για το λόγο αυτό, στον τομέα των μεταφορών, έχουμε αναγκαστεί να κινηθούμε προς τη διερεύνηση και ανάπτυξη αποδοτικότερων λύσεων, με χαμηλότερες εκπομπές ρύπων και οικονομία στα καύσιμα.

Για τη συμμόρφωση με τους νέους αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς και την επίτευξη μικρότερης κατανάλωσης στη ναυτιλία αναζητούνται αποδοτικότεροι σχεδιασμοί, μέσω της χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος στο ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου. Με την εγκατάσταση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος το 1990 σε συστήματα οδήγησης κινητήρων μεταβλητών στροφών για πλοία με ηλεκτροπρόωση, έγινε ένα αποφασιστικό βήμα όσον αφορά την εξοικονόμηση καυσίμων [1]. Τα πλεονεκτήματα που προέκυψαν από τα ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης δημιούργησαν έντονο ενδιαφέρον για την έννοια του πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου (All Electric Ship – AES), στο οποίο ένα κοινό ηλεκτρικό σύστημα παρέχει την ισχύ τόσο για πρόωση όσο και για τα υπόλοιπα φορτία.

Παρά το γεγονός ότι η συντριπτική πλειοψηφία των υπαρχόντων AES χρησιμοποιούν συστήματα διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), η χρησιμοποίηση μεγάλου αριθμού ηλεκτρονικών μετατροπέων μας κάνει να τείνουμε προς τα συστήματα διανομής DC. Το έναυσμα προς αυτή την κατεύθυνση αποτέλεσε η αντιμετώπιση των ζητημάτων που σχετίζονται με τα AC συστήματα ισχύος ενός πλοίου από τη μία πλευρά, και από την άλλη το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ενσωμάτωση ενεργειακών πηγών, όπως οι κυψέλες καυσίμου, και συσκευών αποθήκευσης ενέργειας με DC εξόδους. Στις προκλήσεις για τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος, που εν γένει απαλλασσόμαστε λόγω DC, περιλαμβάνονται η ανάγκη για συγχρονισμό των μονάδων παραγωγής, η ροή άεργου ισχύος, τα ρεύματα αρμονικών συνιστωσών και οι τριφασικές ασυμμετρίες. Επιπλέον, ένα σύστημα συνεχούς ρεύματος επιτρέπει στις κινητήριες μηχανές (Prime Movers) να λειτουργούν στη βέλτιστη ταχύτητά τους, οδηγώντας σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμων. Τα DC συστήματα ισχύος προσφέρουν περαιτέρω πλεονεκτήματα για τα πλοία, όπως η εξοικονόμηση χώρου και βάρους, αλλά και η ευέλικτη διαρρύθμιση του εξοπλισμού [2].

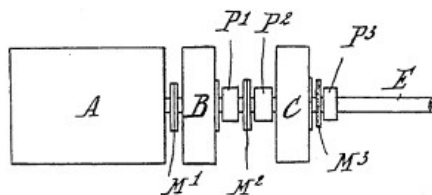
Κατά την τελευταία δεκαετία, το DC έχει διερευνηθεί για πολεμικά πλοία, ιδιαίτερα στις ΗΠΑ, ωστόσο, η έρευνα για τα εμπορικά έχει μόλις αρχίσει να κάνει κάποια δειλά βήματα [3]. Εκτός από μερικούς συγκεκριμένους τύπους πλοίων, όπως τα ρυμουλκά και τα ποταμόπλοια, καθώς και ορισμένα πιλοτικά σκάφη, τα οποία έχουν ήδη κατασκευαστεί εδώ και κάποια χρόνια, στην αγορά έχουν αρχίσει να κάνουν την εμφάνισή τους και περιπτώσεις βοηθητικών παράκτιων πλοίων (offshore supply vessels – OSV) και άλλων, με ιδιαίτερος ενθαρρυντικές ενδείξεις.

Η εμπορική ναυτιλία είναι η ραχοκοκαλιά των επίγειων μεταφορών σε όλη την υδρόγειο, ενώ είναι ιδιαίτερος σημαντική για την ελληνική Εθνική Οικονομία, καθώς η ελληνική ναυτιλία αποτελεί περίπου το 15-20% της εμπορικής ναυτικής δύναμης διεθνώς [3]. Ως εκ τούτου, η δυνατότητα μετατροπής των εμπορικών πλοίων σε πιο αποδοτικά μέσω της ενσωμάτωσης DC συστημάτων διανομής είναι θεμιτό να διερευνηθεί.

Στην παρούσα διπλωματική θα διερευνηθεί αυτή η δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας ηλεκτρικού δικτύου με διανομή ισχύος μέσω συνεχούς ρεύματος σε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου και θα παρουσιαστούν οι διάφορες επιλογές που μπορούμε να έχουμε για τα βασικότερα στοιχεία ενός τέτοιου σχεδιασμού.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η χρήση ηλεκτρισμού για την πρόωση των πλοίων δεν είναι μία εφεύρεση των τελευταίων χρόνων. Ξεκίνησε το 1903/04 για να προσδώσει ευελιξία και δυνατότητα αντίστροφης κίνησης στις προπέλες των πλοίων, που μόλις είχαν αρχίσει να χρησιμοποιούν ντιζελοκινητήρες. Ο Ιταλός ηλεκτρολόγος μηχανικός Cecido Del Proposto ήταν αυτός που ανέπτυξε και εφηύρε ένα νέο τρόπο ελέγχου των μηχανών, παράλληλα με αντίστοιχη δουλειά που γινόταν από τον Ludwig Nobel στην Αγία Πετρούπολη της Ρωσίας. Στο σχήμα 1 φαίνεται το σχέδιο του Del Proposto για αυτή του την εφεύρεση.



Σχήμα 1: Σχέδιο της πατέντας του Del Proposto για την οδήγηση του άξονα της προπέλας. [4]

Εκτός του άξονα της προπέλας (E) και την κινητήρια μηχανή (A), το συστήμα αποτελούνταν από μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (B) και έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος (C). Η γεννήτρια παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια η οποία διοχετευόταν στον κινητήρα μέσω καλωδίωσης. Ο ηλεκτρικός κινητήρας ήταν συνεχώς συνδεδεμένος με τον άξονα μέσω του συνδέσμου M3, όπως και η γεννήτρια με την κινητήρια μηχανή μέσω του M1. Ο ηλεκτρομαγνητικός συμπλέκτης M2 ήταν ανάμεσα στην γεννήτρια και τον κινητήρα και ενεργούσε υπό το ρεύμα που παρείχε η γεννήτρια. [4]

Κατά την έναρξη της μηχανής (A), ο M2 ήταν απεμπλεγμένος ώστε αυτή να ξεκινά χωρίς φορτίο. Ενώ η μηχανή κινούνταν, η γεννήτρια (B) έστελνε το απαραίτητο ρεύμα για να “κλείσει” ο συμπλέκτης (M2) και να ξεκινήσει να στρέφεται ο άξονας (E). Η μετάδοση της μηχανικής ενέργειας γινόταν άμεσα από την κινητήρια μηχανή (A) στον άξονα (E) και έτσι στρέφονταν και τα δύο με την ίδια ταχύτητα. Η γεννήτρια (B) και ο DC κινητήρας (C), σε αυτή την περίπτωση, λειτουργούσαν ως ελεύθερα περιστρεφόμενες μάζες (σφόνδυλοι) για την κύρια μηχανή (A). [4]

Για την ρύθμιση της ταχύτητας ή για αντίστροφη κίνηση της έλικας, ο ηλεκτρομαγνητικός συμπλέκτης M2 αποσυνπλεκόταν και ο άξονας κινούνταν από τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος, ο οποίος λάμβανε ρεύμα από τη γεννήτρια. Με τον έλεγχο της ταχύτητας του ηλεκτροκινητήρα μπορούσαμε να ρυθμίσουμε εύκολα την ταχύτητα του πλοίου ή ακόμα και την κίνησή του προς τα πίσω. [4]

Το πρώτο που χρησιμοποίησε ντιζελογεννήτριες και ηλεκτροκινητήρες ήταν το 75 μέτρων, 800 ωφέλιμων τόνων, ρωσικό δεξαμενόπλοιο “Vandal”, το οποίο λειτουργούσε υπό την Nobel Petroleum Company, στον ποταμό Βόλγα και την Κασπία Θάλασσα. Το παρθενικό του ταξίδι το πραγματοποίησε το 1903. Το Vandal είχε τρία αξονικά συστήματα τοποθετημένα στο μέσον του, τα οποία αποτελούνταν από μία τρικύλινδρη μηχανή ντιζελ (120hp/250rpm) και μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (87kW – 500Vdc) έκαστο. Οι γεννήτριες ήταν συνδεδεμένες μέσω καλωδίων με τρεις κινητήρες συνεχούς ρεύματος (75kW) οι οποίοι κινούσαν τις τρεις προπέλες. Ο έλεγχος για κάθε ανεξάρτητο ζεύγος γεννήτριας-κινητήρα γινόταν από τη γέφυρα, μέσω του ρεύματος διέγερσης του εναλλακτήρα. Αξίζει να σημειώσουμε ότι η διαδικασία από “πρόσω ολοταχώς” σε “ανάποδα ολοταχώς” χρειαζόταν μόνο 8 έως 10 δευτερόλεπτα. Ο Del Proposto όμως είχε επισημάνει τις μεγάλες απώλειες του

συστήματος. Από τους 360 ίππους των ντιζελομηχανών μόνο οι 290 κατέληγαν ως κινητήρια ισχύς - σχεδόν 20% απώλειες. Επίσης το σύστημα ντιζελο-ηλεκτροπρόωσης του πλοίου ήταν αρκετά βαρύ. Οι μηχανές (οι ελαφρύτερες της εποχής τους) ζύγιζαν 48 τόνους ενώ τα ηλεκτρικά μέρη ζύγιζαν 31.2 τόνους. Το 40% του συνολικού βάρους του πλοίου ήταν το σύστημα πρόωσής του. Το Vandal λειτούργησε ως το 1913 μεταφέροντας κυρίως φωτιστικό πετρέλαιο. [4]

Τα προβλήματα αυτά προσπάθησαν να τα αντιμετωπίσουν στο αδελφό πλοίο του, το “Ssarmat”. Αυτό είχε το ίδιο μέγεθος με το “Vandal”, αλλά διαφορετικού τύπου μηχανές και διάταξη. Οι δύο ντιζελ μηχανές (2x180hp/260rpm), που ήταν τοποθετημένες κοντά στην πρύμνη, έδιναν την κίνηση στις προπέλες του σύμφωνα με το ημι-ηλεκτρικό σύστημα οδήγησης του Del Proposto, που αναλύσαμε προωτέρα. Το συνολικό βάρος του συστήματος πρόωσης μειώθηκε σε 65 τόνους και η μέγιστη ταχύτητα αυξήθηκε σε 8,6 κόμβους (από 8 κόμβους στο Vandal). Το “Ssarmat” λειτούργησε από το 1904 – 1923. [4]

Ένα ακόμα πλοίο της εποχής εκείνης, που χρησιμοποιούσε το ντιζελοηλεκτρικό σύστημα του Del Proposto, ήταν το ελβετικό φορτηγό “Venoge”, στη λίμνη της Γενεύης, το οποίο ξεκίνησε τη λειτουργία του το Δεκέμβριο του 1905. [4]

Με τα παραδείγματα που αναφέραμε φαίνεται εμφανώς η ανάγκη, ήδη από το 1903, της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, για μεγαλύτερη ευελιξία στην μετάδοση κίνησης και εργονομία στη σχεδίαση. Σ' αυτό προσέδιδε, σαφέστατα, και το γεγονός ότι οι μηχανές ντιζελ της εποχής δεν είχαν τη δυνατότητα αντίστροφης λειτουργίας. Όταν, από το 1906, αυτό ήταν πλέον δυνατό, άρχισε να ατονεί η χρήση ηλεκτρισμού.

Τη δεκαετία του 1920 όμως, οι απαιτήσεις για πολύ υψηλή ροπή μηχανής στα παγοθραυστικά (το πρώτο ήταν το φινλανδικό “Sisu”) έκαναν την ηλεκτροπρόωση πολύ δημοφιλή.

Παράλληλα, ο έντονος ανταγωνισμός για γρηγορότερα υπερατλαντικά ταξίδια είχε ως αποτέλεσμα την χρήση ηλεκτρισμού και για την κίνηση των επιβατικών αυτής της γραμμής. Ένα παράδειγμα τέτοιου πλοίου ήταν και το “S/S Normandie”. Ο μοναδικός τρόπος που μπορούσαν να επιτευχθούν οι υψηλές απαιτήσεις σε ισχύ, εκείνη την εποχή, ήταν μόνο μέσω ατμοστροβίλου για κινητήρια μηχανή. Οι γεννήτριες τροφοδοτούσαν με ηλεκτρική ενέργεια τους σύγχρονους κινητήρες και η ταχύτητα περιστροφής τους μεταβαλλόταν σύμφωνα με τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος [1]. Συνδυασμός αεριοστροβίλων-ηλεκτροπρόωσης χρησιμοποιήθηκε και στα πολεμικά πλοία κατηγορίας Τενεσί (Tennessee-class) του Αμερικανικού Πολεμικού Ναυτικού, ενώ τα φινλανδικά πολεμικά “Ilmarinen” και “Väinämöinen” είχαν ντιζελ-ηλεκτρικό σύστημα από το 1928-1929 [5].

Την επόμενη δεκαετία ένας μεγάλος αριθμός επιβατικών ήταν εξοπλισμένοι με ντιζελοηλεκτρικά συστήματα, αποτελούμενα από γεννήτρια και κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC). Η ταχύτητα καθοριζόταν μεταβάλλοντας ένα σχετικά χαμηλής έντασης επαγόμενο ρεύμα στη γεννήτρια. Αυτή η τεχνική εξελίχθηκε με την πάροδο του χρόνου και συνέχισε να χρησιμοποιείται μέχρι και τη δεκαετία του 1970 [4]. Ένα πολύ προηγμένο και εξελιγμένο πλοίο της περιόδου ήταν το 16500 τόνων επιβατικό “Patria”, το μεγαλύτερο ηλεκτροπροωθούμενο της εποχής του [4], που εκτελούσε δρομολόγια στην δυτική ακτή της Νοτίου Αμερικής. Είχε τη δυνατότητα να μεταφέρει 185 επιβάτες στην πρώτη θέση, 164 στην δεύτερη και είχε 241 άτομα πλήρωμα. Το μηχανικό μέρος του αποτελούνταν από έξι μηχανές ντιζελ, οι οποίες κινητοποιούσαν τριφασικούς εναλλακτήρες των 2140 KVA στις 250 ΣΑΛ, που παρήγαν ηλεκτρικό ρεύμα για δύο 7500 ίππων (5500 KVA) σύγχρονους κινητήρες. Τα έξι αυτά συστήματα ήταν τοποθετημένα σε δύο ομάδες των τριών, σε δύο ξεχωριστά μέρη τα οποία διαχωρίζονταν από υδατοστεγές χώρισμα.

Κατά το 2° Παγκόσμιο Πόλεμο, το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό κατασκεύασε διάφορων τύπων αντιτορπιτικά τα οποία ήταν είτε ντιζελ-ηλεκτρικά (Evarts και Cannon-class) είτε ατμοστρόβιλο-ηλεκτρικά (Buckley και Rudderow-class). Τα πολεμικά παγοθραυστικά τύπου Wind (Wind-class icebreaker) ήταν και αυτά ντιζελ-ηλεκτρικά λόγω της ευελιξίας και της

αντοχής που προσφέρει αυτό το σύστημα [5].

Η ανάπτυξη των συστημάτων οδήγησης ηλεκτροκινητήρων με μεταβλητή ταχύτητα, αρχικά με τον ΕΡ/ΣΡ (AC/DC) ανορθωτή (Silicon Controlled Rectifier – SCR) τη δεκαετία του '70 και στη συνέχεια με ΕΡ/ΕΡ (AC/AC) μεταλλάκτες στις αρχές της δεκαετίας του '80, συνέτειναν στο να συμβεί μία πραγματική επανάσταση στην ηλεκτροπρόωση. Σε αντίθεση με τα μεγάλα ηλεκτρικά δίκτυα ισχύος της ξηράς, στα δίκτυα των πλοίων η όποια μεταβολή στην ταχύτητά του προκαλεί αλλαγή εκτός από το φορτίο και στη συχνότητα του ρεύματος. Τα ηλεκτρονικά ισχύος κατέστησαν δυνατή την εγκατάσταση μετατροπέων συχνότητας και την υιοθέτηση του μοντέλου σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επί του πλοίου. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό οι γεννήτριες παράγουν ρεύμα σταθερής τάσης και συχνότητας, το οποίο διανέμεται στη συνέχεια, ανάλογα με τις ανάγκες, στην πρόωση και στα εκάστοτε φορτία του πλοίου. Ο έλεγχος της ταχύτητας γίνεται με την ρύθμιση της περιστροφής της προπέλας σταθερού βήματος (fixed pitch propellers – FPP). Αυτή η μέθοδος εφαρμόστηκε αρχικά σε ειδικού τύπου πλοία όπως ερευνητικά και παγοθραυστικά, αλλά σύντομα δοκιμάστηκε και σε κρουαζιερόπλοια [1].

Το πρώτο σύγχρονο επιβατικό-κρουαζιερόπλοιο στο οποίο χρησιμοποιήθηκε αυτό το μοντέλο είναι το “Queen Elizabeth 2” (1969-2008) , γνωστό και ως “QE2”, το οποίο αποτελεί πρότυπο για τα σημερινά και μελλοντικά κρουαζιερόπλοια όσον αφορά την ηλεκτροπρόωση και τη μείωση θορύβου και κραδασμών της εγκατάστασής του. Το 1986 αποφασίστηκε η αντικατάσταση του μηχανικού μέρους από ντιζελοηλεκτρικό σύστημα πρόωσης, με αποτέλεσμα την αύξηση κατά 15% περίπου της ιπποδύναμής του (110000hp σε 130000hp) και μείωση κατά 35% στην κατανάλωση καυσίμου [6].

Το διάδοχο πλοίο του “QE2” είναι το “Queen Mary 2” (2004-σήμερα), είναι το πρώτο επιβατικό που εφαρμόστηκε το Ενοποιημένο Σύστημα Ηλεκτροπρόωσης (Integrated Electric Propulsion – IEP), με τη χρήση ενός συνδυασμού μηχανών ντίζελ (τέσσερις Wärtsilä 16V46CR EnviroEngine) και αεριοστρόβιλων (δύο General Electric LM2500), για την παραγωγή τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος, και συστήματα πρόωσης τύπου κελύφους (pod) – τέσσερις Rolls-Royce Mermaid azimuth podded propulsors [7].

Η πρόωση με podded κινητήρες ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του '90. Ο ηλεκτρικός κινητήρας βρίσκεται, μαζί με την προπέλα και τον άξονα, σε μια ανεξάρτητα στρεφόμενη κάψουλα, προσαρτημένη στην εξωτερική πλευρά του κήτους του πλοίου. Ενώ αυτή η ιδέα αρχικά αναπτύχθηκε για να βελτιώσει την επίδοση των παγοθραυστικών, σύντομα ήταν εμφανή τα πλεονεκτήματα στην υδροδυναμική απόδοση και στην ευελιξία και για άλλα πλοία. Έπειτα από την πρώτη εγκατάσταση podded-πρόωσης στο κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation” (σχήμα 2), τα πλεονεκτήματα ήταν τόσο θεαματικά που τους καθιέρωσαν σε όλα τα πλοία αυτού του τύπου. [1]



Σχήμα 2: Το κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation” (κάτω δεξιά), εξοπλισμένο με προωστήρες Azipod, εξοικονομεί σημαντικό χώρο σε σχέση με το αδελφό πλοίο (πάνω αριστερά) με αξονική πρόωση. [1]

Το επόμενο βήμα και ότι πιο σύγχρονο στην ηλεκτροπρόωση είναι ένα υβριδικό σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στα φορτία τόσο με τριφασικό εναλλασσόμενο όσο και με συνεχές ρεύμα χαμηλής ή μέσης τάσης. Το σκάφος ανεφοδιασμού θαλάσσιων πλατφόρμων “Dina Star” της νορβηγικής Myklebusthaug Offshore, το οποίο τέθηκε σε λειτουργία το 2013, είναι ένα από τα πλοία που το χρησιμοποιούν σήμερα. Διαθέτει πέντε κύριες γεννήτριες (4x2350kW και 1x969kW @ 1000Vdc), μία εκτάκτου ανάγκης (340kW @ 400Vac – 50Hz), τρεις μπροστινούς προωστήρες για ελιγμούς (bow thrusters) – δύο σταθερού και έναν αζιμουθιακού τύπου (2x925kW και 1x880kW) και δύο αζιμουθιακού τύπου προπέλες (Azipull 120, 2x2200 kW) [8].

1.3 Τα σημαντικότερα πρότυπα για πλοία με ενοποιημένο ηλεκτρικό σύστημα και διανομή με συνεχές ρεύμα

Το αυξημένο ενδιαφέρον για τα ενοποιημένα συστήματα ισχύος οδήγησε στο σχηματισμό πολλών επιστημονικών ομάδων για τον καθορισμό και τη σύνταξη των καινούριων προτύπων που θα διέπουν τον σχεδιασμό και την κατασκευή των ηλεκτρικών δικτύων των πλοίων και κυρίως των ηλεκτρονικών ισχύος τους, ούτως ώστε να ακολουθούν ενιαία δομή και αρχές.

Το πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση έγινε με την έκδοση του προτύπου 1662TM-2008 του IEEE *"IEEE Guide for the Design and Application of Power Electronics in Electric Power Systems on Ships"* το 2008. Το 2010 ακολούθησε το std.1709TM *"IEEE Recommended Practice for 1 to 35 kV Medium Voltage DC Power Systems on Ships"*, το οποίο είναι πιθανώς το σημαντικότερο πρότυπο για πλοία με διανομή συνεχούς ρεύματος. Αυτό μέχρι στιγμής αποτελεί απλά μια προτεινόμενη πρακτική που θα πρέπει να ακολουθείται, χωρίς να έχει επικυρωθεί ακόμα, αλλά χρησιμοποιείται ως βάση για τέτοιου είδους συστήματα. Το 2012 εγκρίθηκε το std.1826TM *"IEEE Standard for Power Electronics Open System Interfaces in Zonal Electrical Distribution Systems Rated Above 100 kW"*. Υπό ανάπτυξη βρίσκονται επίσης ενημερώσεις του ήδη υπάρχοντος IEEE std.45TM-2002 *"Recommended Practice for Electric Installations on Shipboard"* για το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου.

- *IEEE Std 1662TM-2008 - "IEEE Guide for the Design and Application of Power Electronics in Electric Power Systems on Ships."*

Αντικείμενο αυτού του προτύπου είναι να συνοψίσει τις τρέχουσες μεθόδους και πρακτικές της ηλεκτρολογίας για την εφαρμογή των σύγχρονων ηλεκτρονικών ισχύος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας των πλοίων. Περιγράφει τις αναλυτικές μεθόδους, τις προτιμώμενες παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας υπό ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς για αξιόπιστα ενοποιημένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας στη ναυτιλία. [9]

Ο σκοπός του είναι να προτείνει μια μεθοδολογία για την ανάλυση και τις προδιαγραφές των παραμέτρων του εξοπλισμού ηλεκτρονικών ισχύος για τα θαλάσσια συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλύει την επίδραση εννοιών όπως τα ηλεκτρονικά ισχύος με μορφή δομικού στοιχείου (power electronic building block - PEBB) ή τα ενοποιημένα συστήματα ισχύος ως προς το μέγεθος, το κόστος κύκλου ζωής, το βάρος, την αποδοτικότητα των καυσίμων και τον περιορισμό του ρίσκου της εφαρμογής. [9]

Στο κείμενο αυτό παρατίθενται οι γενικές προϋποθέσεις, όπως για παράδειγμα τα όρια για τις διακυμάνσεις της τάσης σε συστήματα διανομής με συνεχές ρεύμα, τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 1, αλλά και σε συστήματα μπαταρίας (πίνακας 2). Τα όρια αυτά ισχύουν εάν δεν ορίζονται διαφορετικά από εθνικά ή διεθνή πρότυπα.

Παράμετροι	Περιθώριο Διακύμανσης
Ανοχή Τάσης (συνεχής)	±10%
Περιοδική Απόκλιση Τάσης - (Voltage cyclic variation deviation)	5%
Κυματισμός Τάσης (AC rms τιμή πάνω από τη σταθερή στάθμη της DC τάσης)	10%

Πίνακας 1: Όρια διακυμάνσεων της DC τάσης σύμφωνα με το IEEE Std 1662TM-2008. [9]

Είδος Συστήματος	Περιθώριο Διακύμανσης
Στοιχεία του δικτύου που συνδέονται με την μπαταρία κατά τη διάρκεια της φόρτισης (*)	+30%, -25%
Στοιχεία του δικτύου μη συνδεδεμένα με την μπαταρία κατά τη φόρτιση	+20%, -25%
(*) Διαφορετικές διακυμάνσεις της τάσης, όπως καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά φόρτισης/εκφόρτισης, πρέπει να ληφθούν υπόψη, συμπεριλαμβανομένης της κυμάτωσης της τάσης από τη συσκευή φόρτισης.	

Πίνακας 2: Όρια διακύμανσης τάσης για συστήματα μπαταρίας. [9]

Αναφέρονται, επίσης, τα σχεδιαστικά ζητήματα που πρέπει να καλύπτονται, όπως το μέγεθος και το βάρος, οι απαιτήσεις αξιοπιστίας και συντήρησης, οι απαιτήσεις κατά τη δυναμική συμπεριφορά τους, ο τοπικός έλεγχος στον οποίο υπόκεινται και το λογισμικό που πιθανώς να χρειάζεται, τα μέσα ηλεκτρικής απομόνωσης και προστασίας, η θερμοκρασία λειτουργίας και ανοχής, το επίπεδο δονήσεων και θορύβου λειτουργίας, οι ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον τους και πολλά άλλα.

Γίνεται κατηγοριοποίηση των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, που αποτελούν τμήμα του ηλεκτρικού δικτύου των πλοίων, ανάλογα με την εφαρμογή τους, ενώ περιγράφονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους και οι συνηθέστερες τοπολογίες που συναντώνται.

Τέλος περιγράφονται οι δοκιμές που πρέπει να γίνουν στα ηλεκτρονικά ισχύος που προορίζονται για ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου κατά την πιστοποίηση και επιθεώρησή τους, γενικά αλλά και για κάποιες ειδικές περιπτώσεις.

➤ *IEEE Std 1709™-2010 - “IEEE Recommended Practice for 1 to 35 kV Medium Voltage DC Power Systems on Ships.”*

Γενικά, δεν υπάρχουν υφιστάμενα πρότυπα εξειδικευμένα για MVDC συστήματα διανομής ισχύος με επίπεδα τάσης άνω των 3 kV. Το UR E11 της Διεθνούς Ένωσης Νηογνομών (IACS UR E11: Unified requirements for systems with voltages above 1 kV up to 15 kV) καλύπτει κυρίως συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος και αναφέρεται πολύ συνοπτικά στα DC. Το IEEE Std 1709™-2010 ήρθε να καλύψει αυτό ακριβώς το κενό.

Η προτεινόμενη πρακτική αυτή, βασίζεται σε τωρινές μεθόδους και πρακτικές της ηλεκτρολογίας ώστε να εφαρμοστεί η διανομή ισχύος με συνεχές ρεύμα για τοπολογίες μέσης τάσεως 1kV έως 35kV στα πλοία. Παρουσιάζονται προτάσεις για αναλυτικές μεθόδους, για προτιμώμενες διεπαφές-μέσα διασύνδεσης και χαρακτηριστικά λειτουργίας για την αξιόπιστη εφαρμογή των ηλεκτρικών εξαρτημάτων μέσης συνεχούς τάσης σε τέτοια συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Στόχος του προτύπου 1709™-2010 είναι να προτείνει μια μεθοδολογία για τις παραμέτρους της ανάλυσης και των προδιαγραφών των συστημάτων ισχύος πλοίων με MVDC αυτών των επιπέδων. Περιγράφει τις επιπτώσεις της MVDC σε όλα τα ηλεκτρικά εξαρτήματα και διατυπώνει τις απαιτήσεις σχετικά με την ορθή διασύνδεση, το μέγεθος, το βάρος, το κόστος κύκλου ζωής, την αποδοτικότητα και τη μείωση των κινδύνων κατά την εφαρμογή τέτοιων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρότυπο αυτό είναι συμπληρωματικό με το IEEE Std 45™ -2002.

Εδώ συστήνεται ένα θεωρητικό, χρηστικό, λειτουργικό διάγραμμα (σχήμα 3) του MVDC συστήματος. Του MVDC δικτύου, που πρέπει να παράγει, να αποθηκεύει και να διανέμει

αδιάκοπα ισχύ κατάλληλης ποιότητας στα εξυπηρετούμενα φορτία, με την μέγιστη δυνατή ασφάλεια. Τα μέρη του δομικού διαγράμματος ορίζονται ως εξής:

- *Shore Power Interface* (διεπαφή με το ηλεκτρικό δίκτυο της ακτής) είναι ουσιαστικά μια πηγή ισχύος η οποία προσαρμόζει την ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνει από τη στεριά σε μορφή MVDC (π.χ. μετασχηματιστής διεπαφής και ανορθωτής).
- *Power Generator* (παραγωγός ισχύος) είναι κατά κύριο λόγο μια πηγή ισχύος που μετατρέπει τη χημική ενέργεια των καυσίμων σε ηλεκτρική MVDC (π.χ. αεριοστρόβιλος με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη και ανορθωτή).
- *Energy Storage* (αποθήκευση ενέργειας) παρέχει ισχύ στο σύστημα όταν τη χρειάζεται, αλλά και τροφοδοτείται με ισχύ από αυτό για να επαναφορτίσει (π.χ. συστοιχία υπερπυκνωτών με μετατροπέα DC/DC διπλής κατεύθυνσης).
- *Pulsed Load* (παλμικό φορτίο) είναι ένα αυτόνομο σύστημα φορτίου, το οποίο αντλεί κυρίως διακοπτόμενους παλμούς ισχύος από το δίκτυο (π.χ. τα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα απογείωσης αεροσκαφών – EMALS).
- *Propulsion* (προωστήρας) είναι ένα σύστημα φορτίου που αντλεί ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο για την πρόωση του πλοίου. Μπορεί επίσης να επιστρέψει ισχύ κατά τη διάρκεια κάποιων ελιγμών όπως το crash back (π.χ. σύστημα οδήγησης με ηλεκτρονικό αντιστροφέα και κινητήρα).
- Το *Ship Service* (υπηρεσίες του πλοίου) πρόκειται για σύστημα που τροφοδοτείται με ισχύ από το κεντρικό δίκτυο για την εξυπηρέτηση των φορτίων στις διάφορες ζώνες του πλοίου (π.χ. μετατροπέας DC/DC για διανομή LVDC, ή DC/AC αντιστροφέας για LVAC διανομή ισχύος εντός ζώνης).
- *Dedicated High Power Load* (αποκλειστικό φορτίο υψηλής ισχύος) αποτελεί ένα αυτόνομο κέντρο φορτίου που αντλεί ισχύ 1MW ή και περισσότερο σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας (π.χ. σύστημα πίνακα ραντάρ 3MW).
- *MVDC bus* (ζυγός συνεχούς ρεύματος μέσης τάσης) είναι ένα λειτουργικό στοιχείο του δικτύου που επιτρέπει την απόζευξη και αποκοπή τμημάτων του MVDC δικτύου (π.χ. μηχανικοί αποζευκτήρες, διακόπτες συνεχούς ρεύματος στερεάς κατάστασης, κλπ).

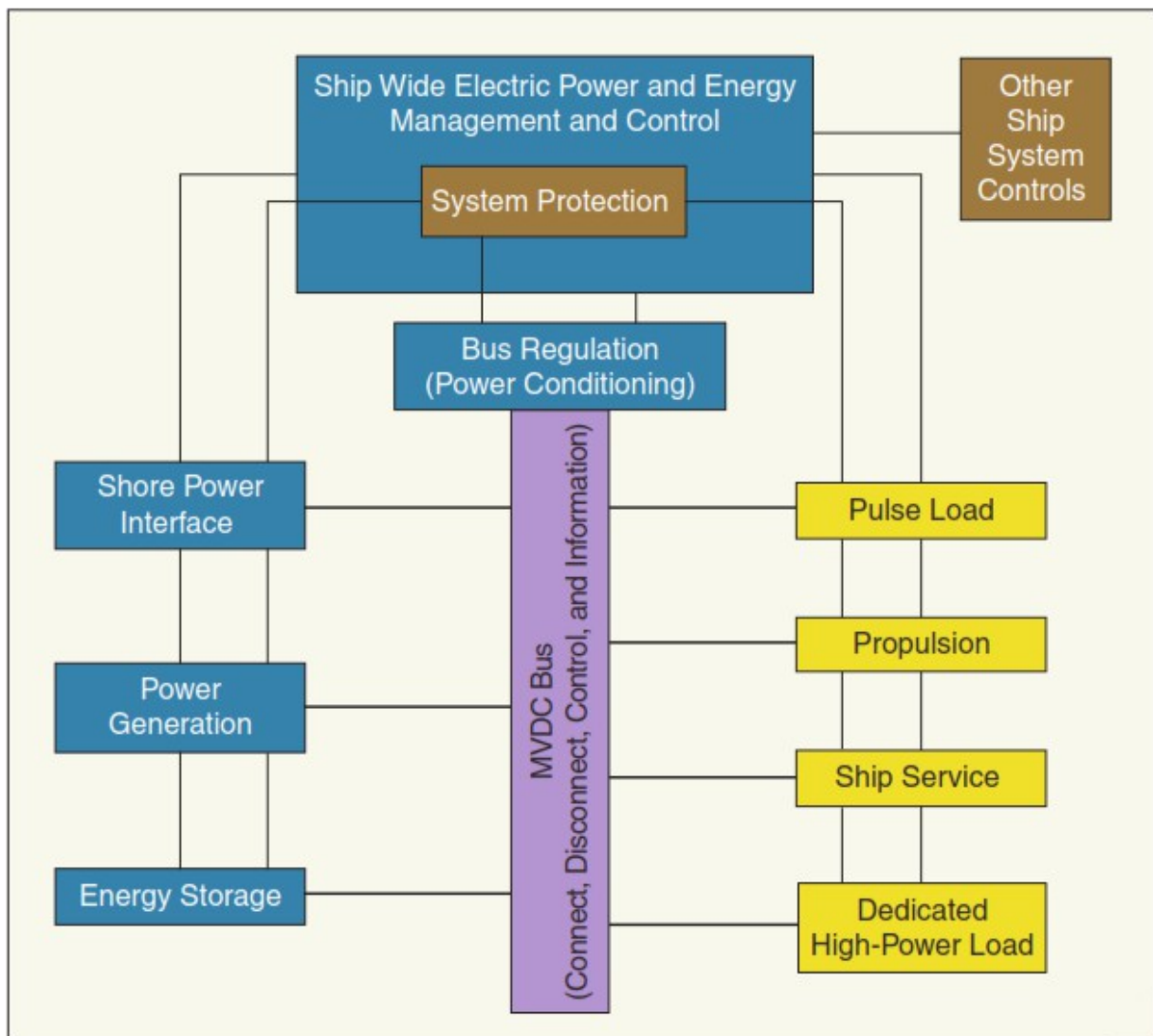
Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι κάθε ένα από τα στοιχεία του δικτύου που παρουσιάσαμε παραπάνω υποχρεούται να έχει τη δυνατότητα αποκοπής από το σύστημα, ζεύξης και απόζευξης με δικά του μέσα χωρίς να εξαρτάται το ένα από το άλλο.

Οι γενικές απαιτήσεις ενός MVDC συστήματος καταδεικνύονται στο IEEE Std 1709™-2010. Σ' αυτό προτείνεται η κατηγοριοποίηση των επιπέδων ονομαστικών τάσεων (V_d) (πίνακας 3) αλλά και μέγιστων επιπέδων ανοχής τους (βλ. πίνακα 4) για ένα τέτοιο δίκτυο. Επίσης, αναφορά γίνεται και για το ονομαστικό ρεύμα και τα όρια του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Για τη γείωση του συστήματος δίνονται τέσσερις επιλογές, ενώ παρουσιάζεται και τα προβλήματα διάβρωσης λόγω ρευμάτων που διαρρέονται σε μεταλλικά μέρη του πλοίου. Όλα τα φορτία κατά προτίμηση πρέπει να είναι γαλβανικά μονωμένα. Η γαλβανική μόνωση μπορεί να επιτευχθεί για παράδειγμα μέσω κατάλληλων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, που μετατρέπουν αρχικά το MVDC σε AC υψηλής συχνότητας και, αφού περάσει από υψηλής μετασχηματιστή, στη συνέχεια σε AC στη συχνότητα που επιθυμούμε ή σε DC. Επίσης αναφέρονται τα απαιτούμενα μέτρα για την σταθερότητα και την υψηλή απόδοση του συστήματος, την προστασία και την επιβιωσιμότητά του (survivability), για τη σύνδεση και αποσύνδεση φορτίων και γεννητριών, αλλά και για τη διαχείριση της ισχύος. Απαιτούμενα για ένα MVDC πλοίο είναι επίσης η εξασφάλιση του QoS (Quality of Service) και του quality of power. Όπως ορίζονται στο 3^ο κεφάλαιο του IEEE Std 1709™-2010, το QoS είναι ένας

τρόπος μέτρησης του πόσο αξιόπιστα το σύστημα παρέχει ισχύ στα φορτία και το quality of power είναι, όσον αφορά τα συστήματα MVDC, η τήρηση συγκεκριμένων ορίων για το επίπεδο τάσεως και της κυμάτωσής της.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις απαιτήσεις σχεδιασμού και λειτουργίας του συστήματος, όπου προτείνεται η χρήση διαθέσιμων στην αγορά ηλεκτρονικών ισχύος με μορφή δομικών στοιχείων (PEBBs) το καθένα από τα οποία θα έχει τη δική του ευφυΐα, θα είναι προγραμματιζόμενο και θα διαθέτει σύστημα αυτοπροστασίας στον κατάλληλο βαθμό.

Καταλήγοντας, παρουσιάζονται οι προτεινόμενες μελλοντικές μελέτες και αναλύσεις, όπως και οι τεχνικές δοκιμών, επιθεώρησης και προληπτικής συντήρησης που είναι απαραίτητες για την εγκατάσταση MVDC δικτύων στα πλοία.



Σχήμα 3: Θεωρητικό δομικό διάγραμμα MVDC συστήματος πλοίου. [10]

- *IEEE Std 1826™-2012 - “IEEE Standard for Power Electronics Open System Interfaces in Zonal Electrical Distribution Systems Rated Above 100 kW.”*

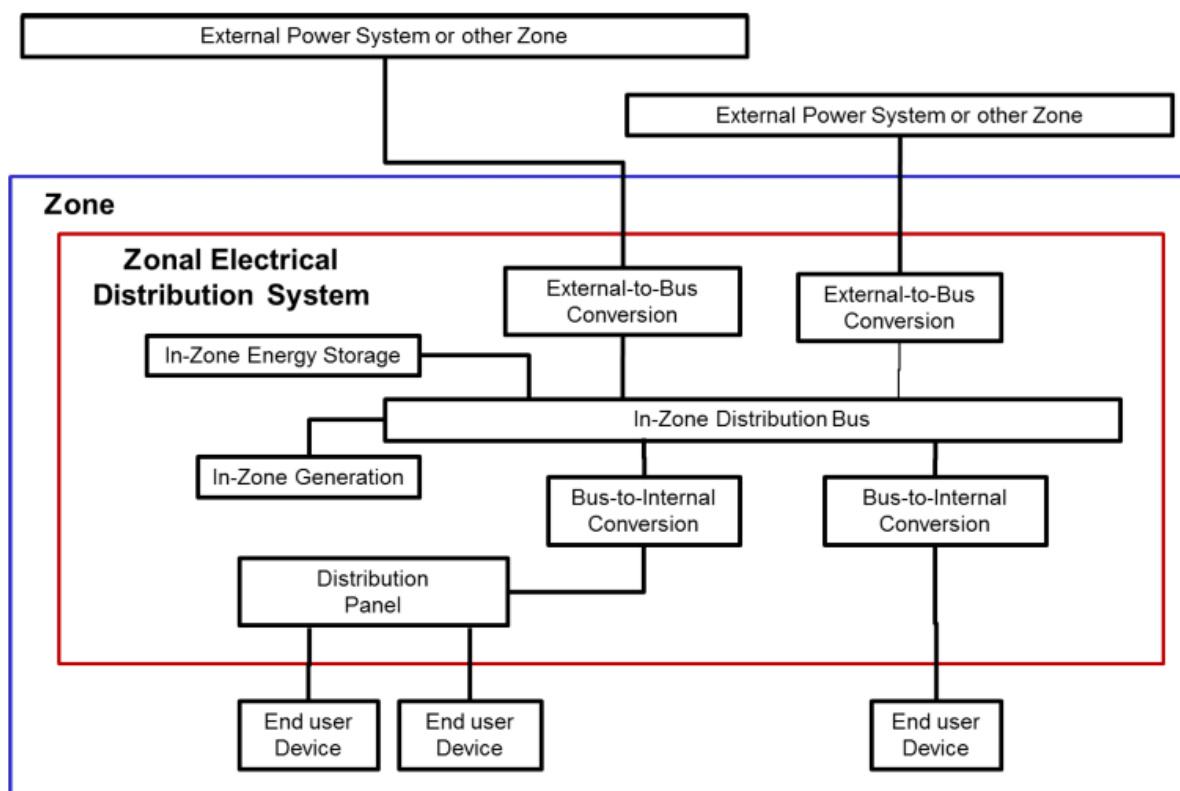
Το πρότυπο αυτό προσδιορίζει τις διεπαφές ανοικτού συστήματος για ηλεκτρονικό εξοπλισμό ονομαστικής ισχύος άνω των 100 kW που χρησιμοποιείται σε συστήματα διανομής ηλεκτρικού ρεύματος σε ζώνες (zonal electrical distribution systems – ZEDS). Οι διεπαφές ομαδοποιούνται σε βασικές και μη βασικές διασυνδέσεις και βασίζονται στην τεχνολογική

ωριμότητα, τις αποδεκτές πρακτικές, και τις ανεκτές μελλοντικές τεχνολογικές προσθήκες. Το πρότυπο αυτό ορίζει την διαδικασία για την επαλήθευση και επικύρωση του πόσο ανοικτό είναι ένα σύστημα (openness) μέσα από αυστηρούς μηχανισμούς αξιολόγησης, διαχείριση του ελέγχου της διεπαφής και προληπτικές δοκιμές δυνατότητας για σύνδεση και άμεση λειτουργία (plug-and-play) ανεξάρτητα από τη φύση των στοιχείων του. Διατυπώνονται επίσης οι ειδικές απαιτήσεις διεπαφών για τα "ανοικτά" ZEDS σε πλοία και θαλάσσιες πλατφόρμες.

Οι περιγραφόμενες προδιαγραφές και απαιτήσεις εφαρμόζονται παντού ώστε να διατηρείται η απόδοση και συμπεριφορά του συνολικού συστήματος σε υψηλό επίπεδο κατά την μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας στα φορτία. Αυτό είναι ικανό για τα περισσότερα πλοία και πλατφόρμες. Το IEEE Std 1826™-2012 είναι συμπληρωματικό του προτύπου IEEE Std 1662™-2008, που περιγράψαμε πρωτύτερα, και του IEEE Std 1676™-2010.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται η περιγραφή και ανάλυση των θεμελιωδών χαρακτηριστικών και των κυριότερων στοιχείων που συνιστούν τα συστήματα ηλεκτρικής διανομής σε ζώνες (ZEDS).

Ο συνδυασμός ενός ZEDS μαζί με τα φορτία που εξυπηρετεί συγκροτούν μία ζώνη (σχήμα 4). Βασικό χαρακτηριστικό τους αποτελεί ότι τα σφάλματα που συμβαίνουν εντός της ζώνης δεν διαδίδονται έξω από αυτή.



Σχήμα 4: Διάγραμμα μίας δομής ηλεκτρικού συστήματος ισχύος με ZEDS. [11]

Τα φορτία κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με το QoS που απαιτείται. Αυτά είναι τα φορτία αδιάλειπτης παροχής ισχύος (uninterruptible), τα φορτία βραχείας διακοπής (short-term interrupt), τα μακράς διακοπής (long-term interrupt) και τα φορτία τα οποία είναι απαλλαγμένα από βραχεία ή μακρά αποκατάσταση της παρεχόμενης ισχύος (exempt).

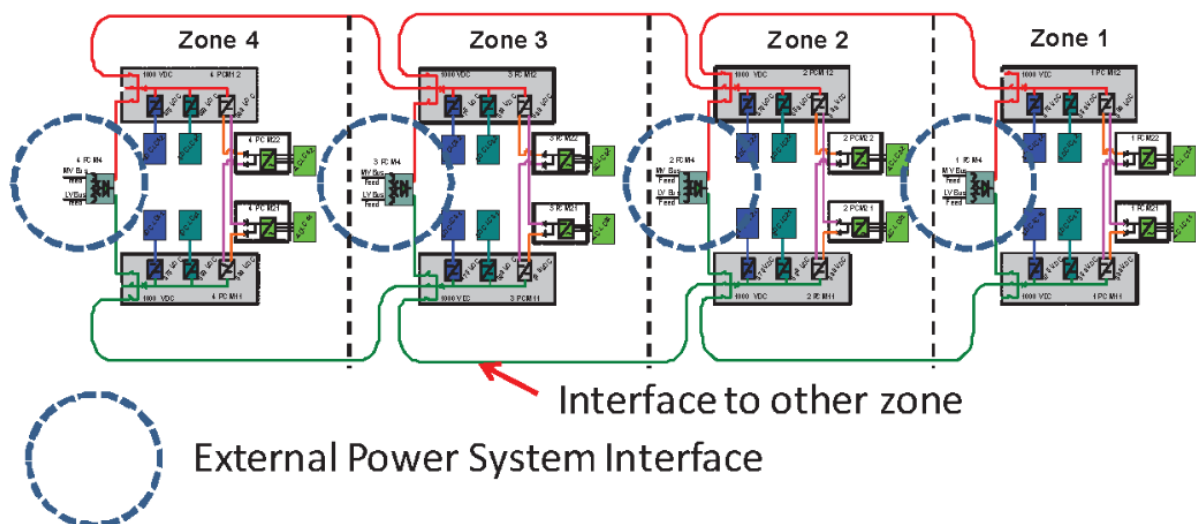
Για την ακρίβεια, στα uninterruptible, ο χρόνος ανεκτής διακοπής παρεχόμενης ισχύος δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από το χρονικό διάστημα αναδιανομής ισχύος μέσω διαφορετικής διαδρομής χωρίς να επιφέρει αύξηση της παραγωγής (reconfiguration time – t1),

το οποίο θα πρέπει να είναι δυνητικά μικρότερο από 0,01sec. Τα short-term interrupt φορτία επιδέχονται χρονικό διάστημα διακοπής μεγαλύτερο του t_1 αλλά λιγότερο από t_2 , όπου t_2 είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να επιτευχθεί το απαιτούμενο επίπεδο παραγόμενης ισχύος είτε από πηγές εντός της ζώνης είτε εκτός. Στα long-term interrupt η διακοπή μπορεί να είναι μεγαλύτερη ακόμα και από t_2 . Τα exempt αποτελούν ειδική κατηγορία των προηγούμενων φορτίων τα οποία, όμως, δεν απαιτούν αποκατάσταση της παροχής. Κατά τη λειτουργία του συστήματος ισχύος, τα exempt φορτία αντιμετωπίζονται ως φορτία μακράς διακοπής.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στον έλεγχο, την επιτήρηση, την ανταλλαγή πληροφοριών και την προστασία των συστημάτων με διαπαφές.

Στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία Επαλήθευσης και Επικύρωσης (Verification & Validation – V&V). Η V&V διαδικασία καθορίζει κατά πόσο τα ηλεκτρονικά ισχύος ανοιχτών συστημάτων διαπαφής σε ζωνικά συστήματα ισχύος συμμορφώνονται με τα διεθνή πρότυπα και τα πρότυπα του IEEE και πληρούν τις απαιτήσεις. Στη διαδικασία περιλαμβάνονται δοκιμές και έλεγχοι αξιολόγησης, ανάλυσης, αναθεώρησης, επιθεώρησης και συμμόρφωσης των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος.

Συμπληρωματικά, στο παράρτημα δίνονται δύο παραδείγματα εφαρμογής ZEDS εκ των οποίων το ένα είναι το ηλεκτρικό σύστημα ενός υποθετικού πολεμικού πλοίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.



Σχήμα 5: Τα ZEDS ενός υποθετικού πολεμικού πλοίου. [11]

➤ *Λοιπά πρότυπα σε σχέση με το DC-πλοίο.*

Εκτός από τα πρότυπα που αναφέρθηκαν υπάρχουν αρκετά ακόμα που σχετίζονται με τα πλοία με διανομή συνεχούς ρεύματος.

Πρώτα και κύρια είναι το κατεξοχήν πρότυπο για την ηλεκτρολογική εγκατάσταση των εμπορικών, κυρίως, πλοίων IEEE std.45™-2002. Λόγω του μεγάλου όγκου του, και για να είναι δυνατή η περαιτέρω εμβάθυνση στις εκάστοτε εξειδικεύσεις του, αποφασίστηκε το πρότυπο αυτό να διασπαστεί σε πολλά επιμέρους πρότυπα, από τα οποία ορισμένα είναι ήδη σε τελικό στάδιο ενώ άλλα τελούν υπό εξέλιξη, και όλα μαζί θα αποτελούν μία “οικογένεια” προτύπων και κατά μία έννοια όλα θα αναφέρονται, θα έχουν ως βάση και θα συμπληρώνουν το αρχικό. Τα προγράμματα εργασίας, λοιπόν, που θα αναπτύξουν τα αντίστοιχα υπο-πρότυπα στα οποία θα χωριστεί το IEEE std.45™-2002 είναι τα εξής [12]:

- IEEE P45.1 – Σχεδιασμός Συστήματος Ισχύος.

- IEEE P45.2 – Έλεγχος και Αυτοματισμός.
- IEEE P45.3 – Ενοποίηση Συστημάτων.
- IEEE P45.4 – Συστήματα Θαλάσσιων Αποστολών.
- IEEE P45.5 – Μέτρα Ασφαλείας.
- IEEE P45.6 – Δοκιμές Συστήματος.
- IEEE P45.7 – Ηλεκτρολογικοί Πίνακες AC.
- IEEE P45.8 – Συστήματα Καλωδίωσης

Οι εξειδικεύσεις αυτές συνεχώς ανανεώνονται και επεκτείνονται, ούτως ώστε να ακολουθούν τις τεχνολογικές εξελίξεις.

Επιπλέον σε ισχύ βρίσκεται το πρότυπο *IEEE std. 1580™-2010 “Recommended Practice for Marine Cable for Use on Shipboard and Fixed or Floating Facilities”*, που καταγράφονται οι απαιτήσεις για τα καλώδια ονομαστικής τάσης 300V έως 35kV που πρόκειται να εγκατασταθούν σε πλοία ή σε θαλάσσιες πλατφόρμες. Επέκταση αυτού του προτύπου αποτελεί το 1580.1, το οποίο βρίσκεται ακόμη υπό ανάπτυξη και έχει αντικείμενο την εγκατάσταση μονωμένων σωληνοειδών ζυγών (Insulated Bus Pipes) για τη διανομή ισχύος. [5]

Το IEEE σε συνεργασία με την IEC και τον ISO, προχώρησαν στη δημιουργία του *IEC/ISO/IEEE 80005-1-2012 “Utility Connections in Port--Part 1: High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems--General requirements”*. Το πρότυπο αυτό περιγράφει τα συστήματα σύνδεσης του ηλεκτρικού δικτύου πλοίου με αυτό της ακτής σε υψηλή τάση (High Voltage Shore Connection – HVSC), για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, κάτι που είναι γνωστό και ως Cold Ironing. Το πρότυπο εφαρμόζεται για το σχεδιασμό, την εγκατάσταση και τη δοκιμή των συστημάτων HVSC και παρουσιάζει: συστήματα διανομής HV ακτής, τη σύνδεση ακτής με πλοίο και εξοπλισμό διεπαφής, μετασχηματιστές/αντιδραστήρες, ημιαγωγούς/περιστρεφόμενους μετατροπείς, συστήματα ηλεκτρικής διανομής πλοίου και συστήματα ελέγχου, παρακολούθησης και διαχείρισης ενέργειας. Πρέπει να σημειώσουμε ότι το 80005-1 δεν ισχύει για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη διάρκεια ναυπήγησης, συντήρησης και επισκευής του πλοίου. Ανολοκλήρωτα παραμένουν ως αυτή τη στιγμή τα 80005-2 “Cold Ironing Part 2: High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems – Communication Interface Description” και 80005-3 “Utility Connections in Port - Part 3: Low Voltage Shore Connection (LVSC) Systems - General Requirements” που αποτελούν συνέχεια του συγκεκριμένου προτύπου. [13], [14]

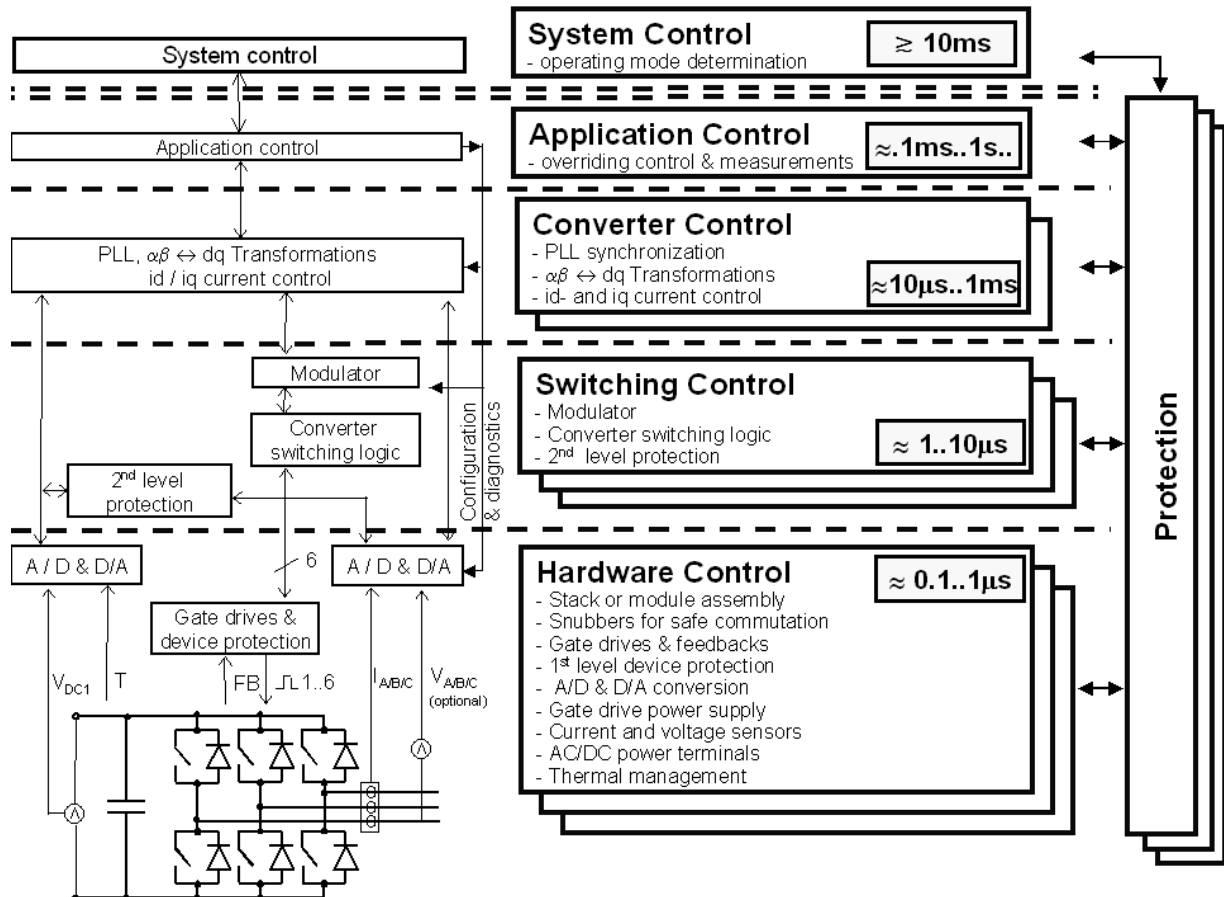
Στο *IEEE std. 1676™-2010 “Guide for Control Architecture for High Power Electronics (1 MW and Greater) Used in Electric Power Transmission and Distribution Systems.”* προτείνεται μια αρχιτεκτονική ελέγχου βασισμένη σε πολυεπίπεδες λειτουργίες και τις διεπαφές μεταξύ των στρωμάτων, όπως φαίνεται στο σχήμα 6. Δίνονται επίσης κάποια παραδείγματα υποθετικών εφαρμογών της αρχιτεκτονικής αυτής. Τα στρώματα ελέγχου είναι τα εξής (σχήμα 6):

- Έλεγχος συστήματος – καθορισμός τρόπου λειτουργίας από το προσωπικό μέσω διεπαφής ($\geq 10\text{ms}$).
- Έλεγχος από εφαρμογές – χαμηλότερο στρώμα ελέγχου των πηγών τάσεως ή ρεύματος ($\approx 1\text{ms} - 1\text{s}$).
- Έλεγχος των ηλεκτρονικών μετατροπέων – έλεγχος κυματομορφής από αισθητήρες τάσης και ρεύματος μέσω ανατροφοδότησης ($\approx 10\mu\text{s} - 1\text{ms}$).
- Έλεγχος διακοπτικών στοιχείων – προσαρμογή διακοπτόμενων παλμών, 2° επίπεδο

προστασίας ($\approx 1 - 10\mu\text{s}$).

- Έλεγχος από αυτόματους ασφαλειοδιακόπτες – έλεγχος και προστασία των συσκευών ισχύος από λογικές πύλες ($\approx 0.1 - 1\mu\text{s}$).

[13], [15], [16]



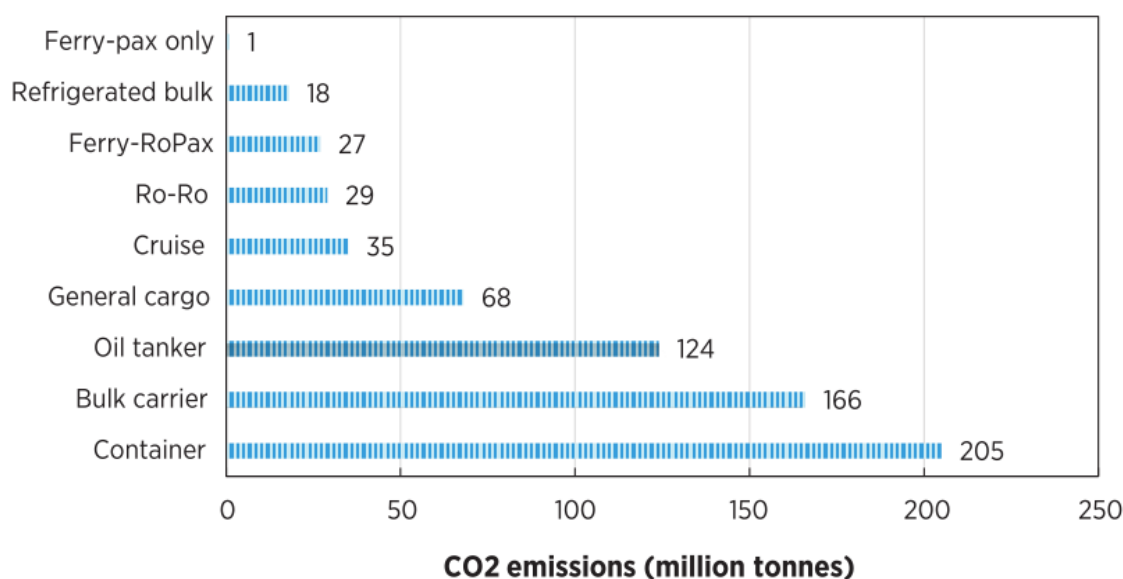
Σχήμα 6: Αρχιτεκτονική ελέγχου και προστασίας για τα ηλεκτρονικά ισχύος όπως προτείνεται στο IEEE Std 1676™-2010. [15]

Τέλος υπάρχει ένα ακόμα πρότυπο το οποίο βρίσκεται υπό συγγραφή και είναι το *IEEE std. 1821 "Guide for Usage of Design Tools for Power Electronic Building Blocks (PEBB) and PEBB Based Systems."* [17]. Το αντικείμενο του οδηγού αυτού είναι να χαρακτηριστούν οι διάφορες προσεγγίσεις μοντέλων και εργαλείων προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση και την πραγματοποίηση συστημάτων με ηλεκτρονικά ισχύος με μορφή δομικών στοιχείων (PEBBs) τα οποία παρουσιάστηκαν ήδη στο πρότυπο IEEE std. 1662™-2008. Η τάξη ισχύος των συστημάτων που εξετάζονται θα κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες kW έως χιλιάδες MW, αλλά θα δίνεται έμφαση στα 1 MW ως εκατοντάδες MW. Η συγγραφή του προτύπου αναμένεται να ολοκληρωθεί έως τον Δεκέμβριο του 2016 [18].

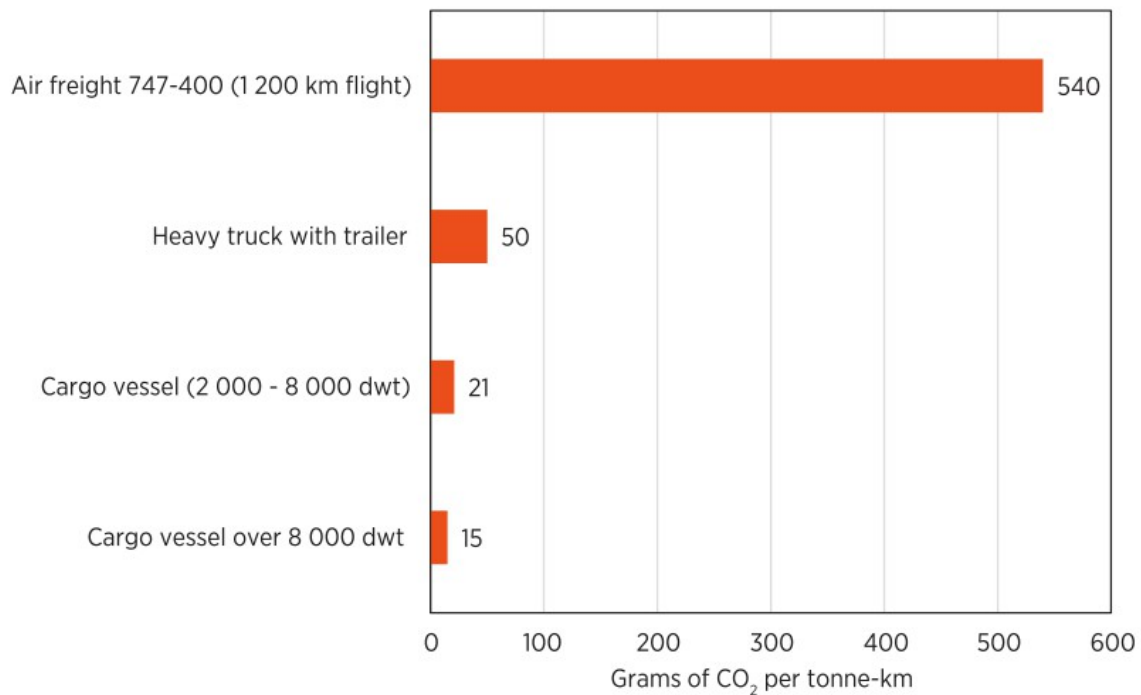
1.4 Περιβαλλοντικά Ζητήματα

Το παγκόσμιο εμπόριο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη ναυτιλία, η οποία μεταφέρει περίπου το 90% του μεικτού βάρους σε τόνους του συνόλου των εμπορευμάτων. Η ναυτιλία, επίσης, αποτελεί μέσο επιβίωσης για τις νησιωτικές περιοχές. Η Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το Εμπόριο και την Ανάπτυξη (United Nations Conference for Trade and Development – UNCTAD), εκτιμά ότι το συνολικό βάρος διακινούμενων εμπορευμάτων που φορτώνεται σε ετήσια βάση αυξήθηκε από 2,6 δισεκατομμύρια τόνους σε λίγο περισσότερο από 9,5 δις μεταξύ 1970 και 2013 [19]. Τα αγαθά αυτά έχουν μικρή ή καθόλου πιθανότητα για εναλλακτικά μέσα μεταφοράς στο άμεσο μέλλον. Επιπλέον, η ζήτηση για τις ναυτιλιακές μεταφορές αναμένεται να αυξηθούν περαιτέρω λόγω της διαφορετικής διαμόρφωσης της παγκόσμιας παραγωγής, την αυξανόμενη σπουδαιότητα των παγκόσμιων αλυσίδων ανεφοδιασμού και την αναμενόμενη ανάπτυξη σε πολλές οικονομίες [19]. Εξαιτίας αυτής της προβλεπόμενης ανάπτυξης στον τομέα της ναυτιλίας, αναμένεται αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας και στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα αυτό. Το 2012, ο συνολικός παγκόσμιος εμπορικός στόλος αποτελούνταν από 86942 πλοία, μεταξύ των οποίων τα 11176 είναι πετρελαιοφόρα, τα 9512 φορτηγά χύδην φορτίου, τα 11421 πλοία μεταφοράς διαφόρων φορτίων, τα 5109 εμπορευματοκιβωτίων και 40031 ακόμα από άλλες κατηγορίες. Η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, επομένως, καθίσταται απαραίτητη ώστε να μειωθούν οι εκπομπές και η ενεργειακή κατανάλωση του τομέα αυτού.

Η τρίτη μελέτη σχετικά με τα αέρια του θερμοκηπίου από τον Διεθνή Οργανισμό Ναυσιπλοΐας (IMO) το 2014 [20] έδειξε ότι μεταξύ του 2007 και του 2012 ο παγκόσμιος θαλάσσιος στόλος κατανάλωσε 250 έως 325 εκατομμύρια τόνους καυσίμων, που αντιστοιχούν περίπου στο 2,8% των ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (3,1% των ετήσιων εκπομπών CO₂). Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από επιλεγμένους τύπους πλοίων το 2012 φαίνεται στο σχήμα 7 με βάση τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης. Ωστόσο, όπως φαίνεται στο σχήμα 8, σε σχέση με άλλα μέσα μεταφοράς η ναυτιλία εκπέμπει πολύ λιγότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα ανά τόνο εμπορευμάτων που μεταφέρονται ανά διανυόμενο χιλιόμετρο.



Σχήμα 7: Οι εκπομπές CO₂ διαφόρων τύπων πλοίων κατά το 2012. [19]



Σχήμα 8: Σύγκριση εκπεμπόμενων γραμμαρίων CO₂ διαφόρων μέσων μεταφοράς ανά τόνο διακινούμενων εμπορευμάτων ανά χιλιόμετρο που διανύθηκε. [19]

Οι εκπομπές επιβλαβών αερίων από τον τομέα αναμένεται να αυξηθούν κατ' αντιστοιχία με τη ζήτηση για θαλάσσιες μεταφορές και θα μπορούσαν ακόμα και να τριπλασιαστούν έως το 2050, εάν αφεθούν ανεξέλεγκτες [19] [20]. Για το λόγο αυτόν πρέπει να υπάρξουν περιορισμοί προκειμένου να μειωθεί η ρύπανση του αέρα και να μετριαστούν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής από τις εκπομπές αυτές. Ο ίδιος ο κλάδος της ναυσιπλοΐας έχει θέσει ως στόχο τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 20% μέχρι το 2020 και 50% μέχρι το 2050 [19].

Στη Διεθνή Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (MARPOL) προβλέπονται τα υποχρεωτικά τεχνολογικά και λειτουργικά μέτρα που απαιτούνται από τα πλοία ώστε να είναι πιο αποδοτικά στη χρήση της ενέργειας και να μειωθούν οι εκπομπές. Οι απαιτήσεις αυτές τέθηκαν σε ισχύ το 2013. Οι κανονισμοί της MARPOL καθιστούν υποχρεωτικό τον Ονομαστικό Δείκτη Ενεργειακής Απόδοσης (Energy Efficiency Design Index – EEDI) για τα καινούρια πλοία και το Σχέδιο Διαχείρισης της Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP) για όλα, παλιά και νέα. Επίσης, σύμφωνα με την πολιτική του IMO, η αποδοτικότητα ενός πλοίου θα πρέπει να αξιολογείται και μέσω ενός άλλου δείκτη εκτός του EEDI. Αυτός είναι ο Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Λειτουργίας (Energy Efficiency Operation Indicator – EEOI) και μπορεί να υπολογιστεί για νέες αλλά και ήδη υπάρχουσες κατασκευές. Τόσο ο EEDI όσο και ο EEOI εκφράζουν την εκπομπή CO₂ ανά χωρητικότητα του πλοίου και απόσταση που διανύθηκε. Ένα σημαντικό μειονέκτημα του EEDI είναι ότι θεωρεί μόνο ένα σημείο λειτουργίας και δεν έχει σχεδιαστεί για να αντιπροσωπεύει με ακρίβεια τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας. Αντιθέτως, ο δείκτης EEOI είναι πιο κατάλληλος για να αντιπροσωπεύει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε πλοία. Ο λεπτομερής τρόπος υπολογισμού του EEDI και του EEOI, με τους διάφορους παράγοντες που προσαρμόζονται στις ειδικές κατηγορίες των πλοίων και τις εναλλακτικές διαμορφώσεις και τις συνθήκες λειτουργίας τους, αναφέρεται στη βιβλιογραφία (βλ. [22], [23]), αλλά σε μια πιο απλοποιημένη μορφή, οι τύποι τους μπορούν να συνοψιστούν όπως φαίνονται παρακάτω [21]:

$$EEDI = \frac{\text{Εγκατεστημένη Ισχύς} \cdot \text{Ειδική κατανάλωση καυσίμου} \cdot \text{Μετατροπή σε άνθρακα}}{\text{Διαθέσιμη χωρητικότητα} \cdot \text{Ταχύτητα}}$$

$$EEOI = \frac{\text{Κατανάλωση καυσίμου} \cdot \text{Μετατροπή σε άνθρακα}}{\text{Απόσταση που διανύθηκε} \cdot \text{Βάρος εμπορεύματος που μεταφέρθηκε}}$$

Ο EEDI εγκρίθηκε επίσημα από τον IMO, τον Ιούλιο του 2011 και ισχύει για τα νέα πλοία που έχουν κατασκευαστεί από το 2013 και μετά. Κατά τη διάρκεια της 63^{ης} συνεδρίασης της Επιτροπής Προστασίας Θαλασσίου Περιβάλλοντος (Marine Environment Protection Committee – MEPC), ορισμένα μέλη πήραν μια ισχυρή θέση ενάντια στην εφαρμογή του τύπου EEDI για τα υπάρχοντα πλοία και η άποψη αυτή έγινε δεκτή. Η εφαρμογή του EEOI παραμένει προαιρετική αλλά ο EEOI έχει πλέον συμπεριληφθεί στο SEEMP ως ένας πιθανός δείκτης για την επαλήθευση και τη μέτρηση της αποτελεσματικότητας του.

Πολλές οικονομικά αποδοτικές εναλλακτικές τεχνολογικές λύσεις για νέες και υφιστάμενες κατασκευές πλοίων έχουν επισημανθεί για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης ή τη μείωση της κατανάλωσης. Αυτές οι επιλογές μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κύριες κατηγορίες. Στην κατηγορία που αποσκοπεί στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, δηλαδή την αύξηση της παραγωγικότητας χρησιμοποιώντας την ίδια ποσότητα ενέργειας, την κατηγορία που μελετά τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή και αιολική), την κατηγορία που αφορά τη χρήση καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (π.χ. βιοκαύσιμα και υδροποιημένο φυσικό αέριο) και αυτήν που προτείνει με τη χρήση τεχνολογιών μείωσης των εκπομπών με τρόπους όπως η χημική μετατροπή, η δέσμευση και αποθήκευση των ρύπων. Η διαμόρφωση του ηλεκτρικού δικτύου πλοίου για διανομή ισχύος με συνεχές ρεύμα (DC-Ship), όπως θα δούμε και στη συνέχεια, ενδείκνυται άμεσα ή έμμεσα τουλάχιστον για τις τρεις πρώτες.

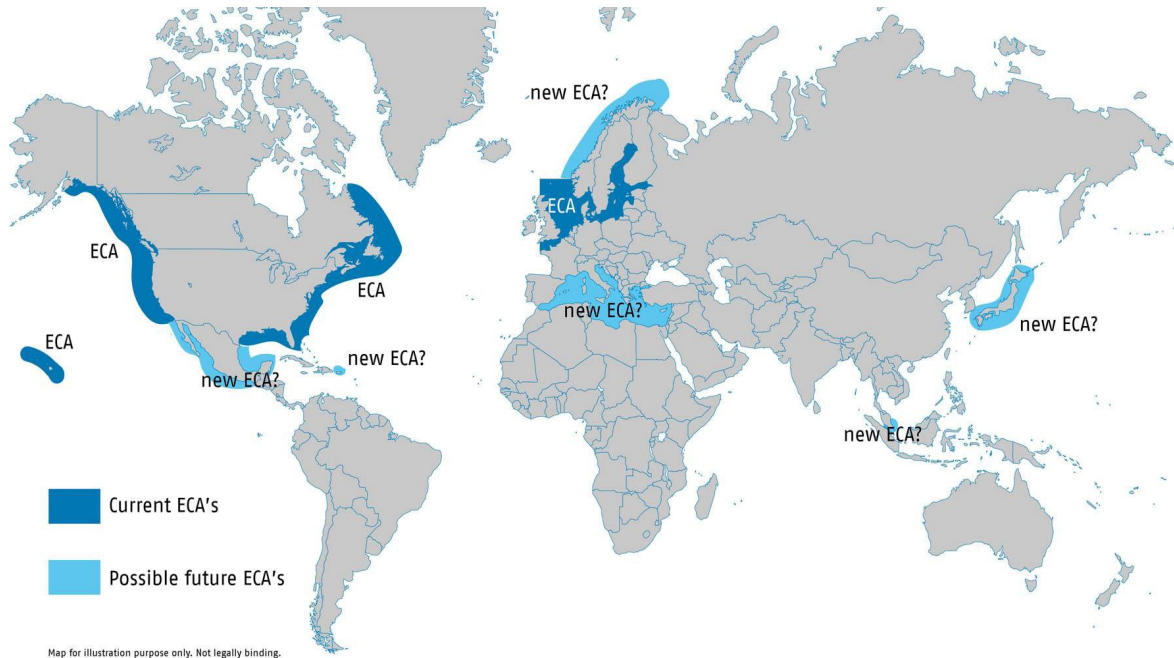
1.4.1 Αναθεωρημένο Παράρτημα VI της MARPOL (MARPOL Annex VI)

Το Παράρτημα VI της MARPOL, την οποία αναφέραμε και προηγουμένως, εκδόθηκε για πρώτη φορά το 1997 και θέσπισε περιορισμούς στους κύριους ατμοσφαιρικούς ρύπους που περιέχονται στα καυσαέρια των εξατμίσεων πλοίων, όπως τα οξειδία του θείου (SO_x) και του αζώτου (NO_x). Επίσης, απαγορεύει ηθελημένες εκπομπές ουσιών που καταστρέφουν το όζον (ODS), ενώ ρυθμίζει την αποτέφρωση πάνω στο πλοίο καθώς και τις εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC) από δεξαμενόπλοια.

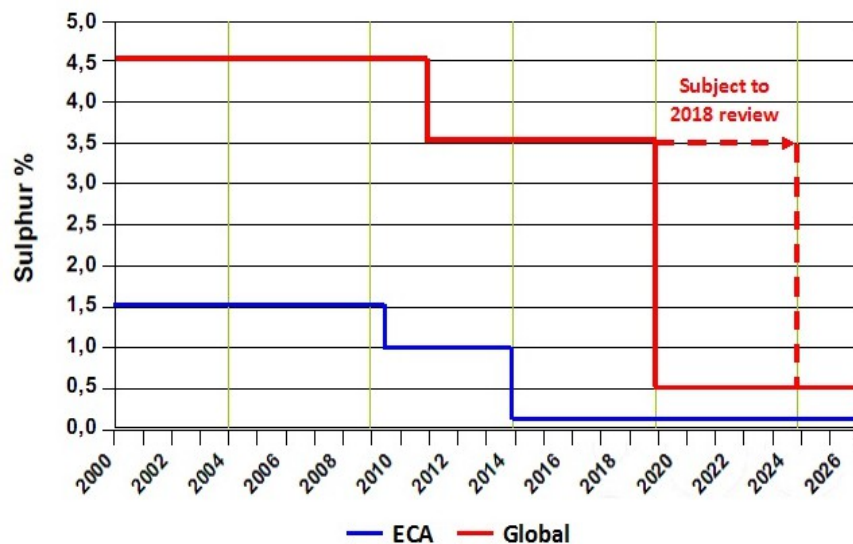
Μετά την έναρξη της ισχύος του MARPOL Annex VI στις 19 Μαΐου 2005, η MEPC, κατά την 53η σύνοδό της τον Ιούλιο του 2005, συμφώνησε να αναθεωρήσει το παράρτημα αυτό με στόχο την περαιτέρω σημαντική μείωση των ορίων εκπομπών υπό το πρίσμα των τεχνολογικών βελτιώσεων και την αποτύπωση των μέχρι τότε εμπειριών. Έπειτα από τρία έτη μελέτης, η MEPC 58 τον Οκτώβριο του 2008, υιοθέτησε το αναθεωρημένο παράρτημα VI της MARPOL και τον σχετικό Τεχνικό Κώδικα NO_x, που τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιουλίου 2010.

Οι κύριες αλλαγές ήταν η σταδιακή μείωση παγκοσμίως των εκπομπών SO_x, NO_x και σωματιδίων και η καθιέρωση των Περιοχών Ελέγχου των Εκπομπών (Emission Control Areas – ECAs) για την περαιτέρω μείωση των εκπομπών των αερίων ρύπων σε συγκεκριμένες θαλάσσιες περιοχές. Οι υπάρχουσες αλλά και οι πιθανότατα επόμενες ECAs φαίνονται στο χάρτη του σχήματος 9. Σύμφωνα με το αναθεωρημένο παράρτημα VI, το παγκόσμιο ανώτατο

όριο περιεκτικότητας των καυσίμων σε θείο θα μειωθεί από το σημερινό 3,50% σε 0,50%, με ισχύ από 1^η Ιανουαρίου 2020, με την επιφύλαξη αναθεώρησης από μελέτη που θα ολοκληρωθεί το αργότερο μέχρι το 2018. Τα όρια που εφαρμόζονται στις ECAs για τα SO_x και τα εκπεμπόμενα σωματίδια μειώθηκαν στο 0,10% από 1ης Ιανουαρίου 2015. Πιο αναλυτικά, τα όρια αυτά, απεικονίζονται στο σχήμα 10.



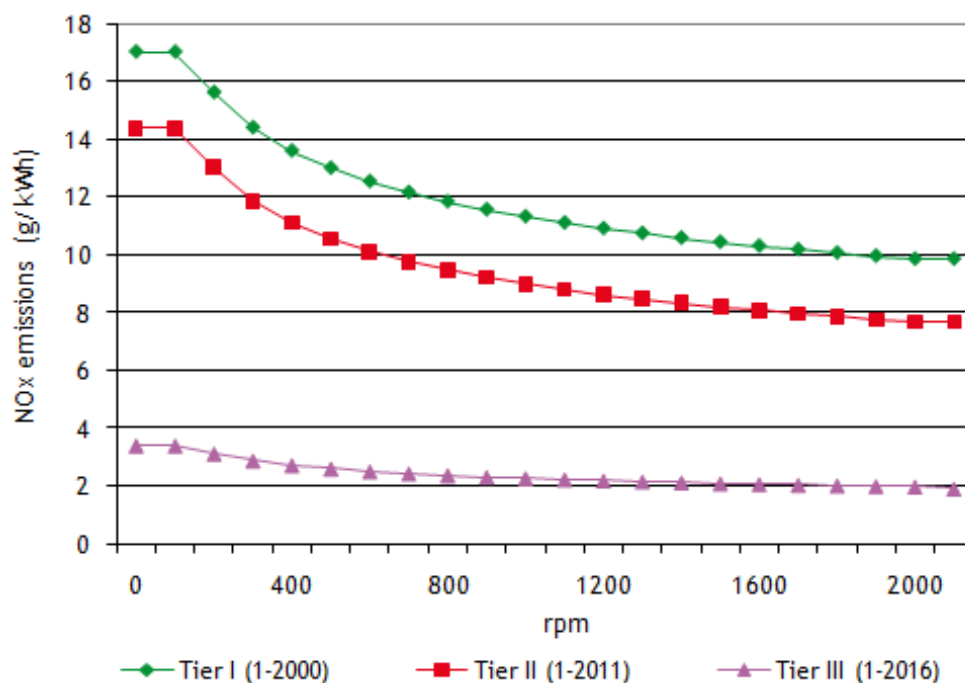
Σχήμα 9: Οι υπάρχουσες και οι μελλοντικές Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECA). [24]



Σχήμα 10: Τα επιτρεπόμενα όρια της περιεκτικότητας των καυσίμων σε θειώδη παγκόσμια (κόκκινη γραμμή) αλλά και στις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECA) (μπλε γραμμή) από το 2000 και έπειτα. [25]

Περιλαμβάνονται επίσης προοδευτικές μειώσεις των εκπομπών οξειδίων του αζώτου από τις μηχανές ντίζελ που έχουν εγκατασταθεί σε πλοία, με όριο εκπομπών, σε 2^ο επίπεδο (Tier II), για σκάφη που έχουν κατασκευαστεί από την 1η Ιανουαρίου 2011 και μετά, και ένα πιο αυστηρό όριο, σε 3^ο επίπεδο (Tier III), για αυτά που έχουν κατασκευαστεί από την 1η

Ιανουαρίου 2016 και μετά και κινούνται εντός των NO_x ECAs. Οι πετρελαιομηχανές για πλοίο που έχει κατασκευαστεί την 1η Ιανουαρίου 1990 και μετά αλλά πριν από την 1η Ιανουαρίου 2000 είναι υποχρεωτικό να συμμορφώνονται με τα όρια εκπομπών 1^{ου} επιπέδου (Tier I), εάν μια εγκεκριμένη μέθοδος για τη συγκεκριμένη μηχανή έχει πιστοποιηθεί από κάποια αρχή. Τα όρια εκπομπών NO_x που ισχύουν για τις μηχανές ντίζελ είναι ανάλογα με τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 11.



Σχήμα 11: Τα όρια εκπομπών NO_x των πετρελαιομηχανών σε σχέση με τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής τους, σύμφωνα με τα Tier I/II/III του MARPOL Annex VI. [25]

Οι απαιτήσεις του Tier III δεν ισχύουν για τις μηχανές που είναι εγκατεστημένες σε πλοίο που έχει κατασκευαστεί πριν από την 1^η Ιαν 2021 και έχει λιγότερη χωρητικότητα από 500 κόρους, είναι 24 μέτρα μήκος και άνω, και το οποίο έχει σχεδιαστεί ειδικά και χρησιμοποιείται αποκλειστικά για ψυχαγωγικούς σκοπούς.

1.5 Βιβλιογραφία 1^ο Κεφαλαίου

- [1] A. Adnanes, Maritime electrical installations and diesel electric propulsion. Oslo: ABB AS Marine, 2003.
- [2] J. F. Hansen, J. O. Lindtjorn, U. U. Odegaard, and T. A. Myklebust, "Increased operational performance of OSVs by Onboard DC Grid," presented at the 4th International Conference on Technology and Operation of Offshore Support Vessels, 2011.
- [3] DC-Ship_Proposal_012.
- [4] 1998-Norwegian-Society-of-Chartered-Engineers-95-years-of-diesel-electric-propulsion-form-a-mekeshift-solution-to-a-modern-propulsion-system
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel-electric_transmission#Ships
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Queen_Elizabeth_2
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/RMS_Queen_Mary_2#Power_plant_and_propulsion_system
- [8] ABB_Dina-Star-specification
- [9] IEEE Std 1662™-2008 - Guide for the Design and Application of Power Electronics in Electrical Power Systems on Ships.
- [10] IEEE Std 1709™-2010 - Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships
- [11] IEEE Std 1826™-2012 - Standard for Power Electronics Open System Interfaces in Zonal Electrical Distribution Systems Rated Above 100 kW.
- [12] 2010_A Report on IEEE Standard Development for Shipboard IPS System Design_Islam.
- [13] <https://standards.ieee.org/>
- [14] IEC ISO IEEE Std 80005-1-2012 - Utility Connections in Port--Part 1 High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems--General requirements.
- [15] IEEE Std 1676™-2010 - Guide for Control Architecture for High Power Electronics (1 MW and Greater) Used in Electric Power Transmission and Distribution Systems.
- [16] 2014_Standards in Marine Power Systems_IS2-1-4.
- [17] P1821
- [18] 25-Mar-2015_recommendations
- [19] p12 & 37-40_IRENA_Tech_Brief_RE_for Shipping_2015.pdf
- [20] Smith, T.W.P. et al. (2014b) Third IMO GHG Study 2014. London: International Maritime Organisation.
- [21] 2012_12_Ship_efficiency_briefing
- [22] MEPC.1-Circ.681 (EEDI)
- [23] MEPC.1-Circ.684 (EEOI)
- [24] <http://www.marinelink.com/news/rickmerslinie-supports376868.aspx>
- [25] 2014_Heian_Factors Influencing Machinery System Selection for Complex Operational Profiles.pdf

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

Ηλεκτρικά Δίκτυα Πλοίων με Διανομή Συνεχούς Ρεύματος (DC-Ships)

2.1 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις DC έναντι AC δικτύου

Είναι γνωστό ότι στη ναυτιλία τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) έχουν κυριαρχήσει επί αυτών του συνεχούς (DC). Τα τελευταία χρόνια όμως έχει γίνει στροφή προς την χρήση των συστημάτων DC στα πλοία (DC-Ship) για μια σειρά από λόγους. Οι λόγοι αυτοί παρουσιάζονται παρακάτω μαζί με τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν απ' αυτούς. Αυτοί περιλαμβάνουν [1], [2]:

Για τον παραλληλισμό των γεννητριών απαιτείται μόνο το ταίριασμα του πλάτους της τάσης απαλλάσσοντάς μας από το χρονοβόρο αλλά κρίσιμο συντονισμό της φάσης και της συχνότητας που απαιτείται στο AC.

- Δυνατότητα εύκολης σύνδεσης και αποσύνδεσης μεταξύ γεννητριών και μέσων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας διαφορετικού τύπου και μεγέθους.
- Ο συγχρονισμός των γεννητριών μεταξύ τους και με το δίκτυο είναι πλέον περιττός.
- Δυνατότητα ένταξης στο σύστημα μέσω αποθήκευσης και μετατροπής ενέργειας όπως οι μπαταρίες, οι κυψέλες καυσίμου και τα φωτοβολταϊκά πολύ εύκολα.

Επιτρέπει τη λειτουργία των διακοπτικών στοιχείων των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος σε συχνότητες μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από ότι με το σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής συχνότητας (HFAC), που έχει προταθεί για το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ ως μεταβατικό από το μέσης τάσης AC (MVAC) για το μέσης τάσης DC (MVDC). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ακόμη μικρότερους μετασχηματιστές. Αν δε η γαλβανική απομόνωση δεν κρίνεται απαραίτητη σε κάποιο σύστημα, είναι δυνατή επιπλέον μείωση στο μέγεθος, ή ακόμα και εξάλειψη των Μ/Σ. Αυτό αντισταθμίζεται, βέβαια, κάπως από την ανάγκη για πρόσθετους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.

- Απαλλασσόμαστε από τους ογκώδεις και βαρείς μετασχηματιστές χαμηλής συχνότητας (50 ή 60Hz).

Αποσυνδέει την ταχύτητα περιστροφής της κινητήριας μηχανής (π.χ. πετρελαιομηχανή) από τη συχνότητα του δικτύου. Επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της γεννήτριας ανάλογα με το είδος της εκάστοτε κινητήριας μονάδας, με την οποία είναι συνδεδεμένη χωρίς να χρειάζεται να μεσολαβούν γρανάζια μείωσης ή αύξησης της ταχύτητας. Επίσης, οι γεννήτριες δεν περιορίζονται σε ένα δεδομένο αριθμό πόλων. Η ταχύτητά τους μπορεί να μεταβάλλεται ακόμη και σε όλο το φάσμα λειτουργίας της κινητήριας μηχανής ώστε να βελτιστοποιήσει την απόδοση ή/και την απόκριση.

- Μείωση του βάρους της εγκατάστασης λόγω χρήσης γεννητριών υψηλής ταχύτητας.
- Μειωμένη κατανάλωση καυσίμων λόγω της δυνατότητας λειτουργίας της κινητήριας μηχανής σε μεταβλητές στροφές.

Δυνατότητα μείωσης του βάρους της καλωδίωσης, ανάλογα με το επίπεδο της επιλεγόμενης τάσης, λόγω της απουσίας της επίδρασης του επιδερμικού φαινομένου και της άεργου ισχύος που προκύπτουν από τις μετατοπίσεις στις φάσεις μεταξύ των κυματομορφών ρεύματος και τάσης στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος. Ωστόσο, τα DC συστήματα μπορεί να έχουν μία μικρή άεργο ισχύ λόγω της κυμάτωσης της τάσης και του ρεύματος.

- Εξάλειψη των άεργων απωλειών ισχύος.

- Υψηλότερα επίπεδα φέρουσας ισχύος σε DC απ' ότι σε AC για την ίδια διατομή καλωδίου.

Με ηλεκτρονικά ισχύος που συνδέονται πλησίον κάθε ηλεκτρομαγνητικής συσκευής, έχουμε την ικανότητα να ελέγξουμε τα ρεύματα σφάλματος σε επίπεδα σημαντικά χαμηλότερα και πολύ πιο κοντά στην πηγή του προβλήματος από ότι στα AC συστήματα.

- Μικρότερου μεγέθους και τάξης διακοπτικά στοιχεία.
- Εύκολος περιορισμός και διαχείριση ρευμάτων από σφάλματα και δυνατότητα αναδιάρθρωσης του συστήματος επί τόπου.
- Βελτιωμένος έλεγχος της ροής ισχύος, κυρίως κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων και εκτάκτων καταστάσεων.

Επειδή δεν υπάρχει μια κοινή συχνότητα του κινούμενου εξοπλισμού (πχ 60 Hz), το χαρακτηριστικό ηχητικό “αποτύπωμα” του συστήματος έχει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων με αποτέλεσμα λιγότερες τονικότητες να μπορούν να παρατηρηθούν και να αποδοθούν ως το ακουστικό στίγμα του πλοίου. Αυτό είναι κάτι ιδιαίτερα επιθυμητό για τα πολεμικά πλοία και υποβρύχια.

- Βελτιωμένα ακουστικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τα MVAC και HFAC συστήματα.

Κάτι ακόμα θελκτικό για τα πολεμικά πλοία είναι ότι επιτρέπει την εγκατάσταση των μελλοντικών ηλεκτρικών οπλικών συστημάτων, όπως τα ηλεκτρομαγνητικής εκτόξευσης πυροβόλα όπλα (electromagnetic launch railguns – 30 MW) ή τα λείζερ ελευθέρων ηλεκτρονίων (free electron lasers – 10 MW). Αυτά πρόκειται για φορτία με απαιτήσεις για πολύ υψηλή ισχύ σε μια αρχιτεκτονική πολύ πιο συμπαγή και μεγάλης πυκνότητας ισχύος, όπως αυτή των MVDC.

Μειώνει τους προβληματισμούς του μηχανικού ως προς τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (electromagnetic interference – EMI) και την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (electromagnetic compatibility – EMC) στο σύστημα, κάτι που πρόκειται για σοβαρό ζήτημα στα HFAC.

Παρόλα αυτά, πρέπει να αναφέρουμε ότι οι διαθέσιμες συμβατικές μηχανές συνεχούς ρεύματος μειονεκτούν αρκετά σε σχέση με τις AC ως προς το βάρος, τον όγκο, την απόδοση και το κόστος κατασκευής και συντήρησής τους. Επομένως, είναι προτιμότερο να επιλέξουμε στρεφόμενες γεννήτριες και κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, παρότι η διανομή της ισχύος θα γίνεται σε DC.

Η ενσωμάτωση διανομής συνεχούς ρεύματος σε ένα απομονωμένο δίκτυο, όπως αυτό ενός πλοίου, έχει να αντιμετωπίσει και ορισμένες σημαντικές τεχνολογικές προκλήσεις, καθώς πολλές από τις τεχνολογίες που απαιτούνται παραμένουν ακόμα σε πρώιμο στάδιο μελέτης και ανάπτυξης. Οι κυριότερες συνοψίζονται ως εξής [1]:

Οι παραδοσιακές τεχνικές ανάχνευσης σφάλματος και απομόνωσης που χρησιμοποιούνται στους συμβατικούς ασφαλειοδιακόπτες AC κυκλωμάτων και βασίζονται στο ρεύμα διαρροής δεν είναι επιθυμητές για συστήματα MVDC λόγω της δυσκολίας στην απόσβεση των DC εκκενώσεων χωρίς τη διέλευση από το μηδέν της τάσης ή του ρεύματος. Αντί αυτού, στο MVDC, αναμένεται να χρησιμοποιηθούν ηλεκτρονικά ισχύος με προηγμένους ελέγχους για να εντοπίζουν γρήγορα και να απομονώνουν διαταραχές πριν από την ανάπτυξη μεγάλων ρευμάτων σφάλματος. Κατά το σχεδιασμό των ηλεκτρονικών ισχύος, πρέπει να γίνεται μελέτη για να εξασφαλιστεί η παροδική σταθερότητα και να περιοριστούν οι ενδεχόμενες υπερτάσεις κατά τη διάρκεια μεταβατικών καταστάσεων. Οι λεπτομέρειες, οι μέθοδοι και τα

πρότυπα για την εφαρμογή των ηλεκτρονικών ισχύος και του ελέγχου, βασισμένου σε προηγμένες τεχνικές ανίχνευσης και απομόνωσης σφαλμάτων, απαιτούν περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη.

Επειδή όλα τα φορτία σε ένα ζυγό MVDC θα παρουσιάζονται πιθανότατα ως φορτία σταθερής ισχύος με αυξανόμενες αρνητικές σύνθετες αντιστάσεις, απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός για τη διασφάλιση της σταθερότητας του συστήματος. Παρότι έχουν γίνει επιδείξεις διάφορων μεθόδων που να διασφαλίζουν τη σταθερότητα σε παρόμοια συστήματα στην ξηρά, παραμένει η ανάγκη εξέλιξης αυτών των μεθόδων σε προδιαγραφές, πρότυπα και τεχνικές ενοποίησης με αυστηρότερα κριτήρια.

Πρέπει να θεσπιστούν τυποποιημένες μέθοδοι για τον έλεγχο της ισχύος της κινητήριας μηχανής (prime mover – PM) και του διαμοιρασμού των φορτίων μεταξύ των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος, η πραγματική ισχύς ρυθμίζεται από τους ρυθμιστές ταχύτητας στις PM, ενώ η άεργος ισχύς ρυθμίζεται και διαμοιράζεται μέσω του ρυθμιστή τάσης. Στα συστήματα συνεχούς ρεύματος που δεν έχουμε άεργο ισχύ (χωρίς φυσικά να υπολογίζουμε την κυμάτωση της τάσης και του ρεύματος) η ισχύς ελέγχεται μέσω του ρυθμιστή τάσης. Είναι, λοιπόν, απαραίτητη η ανάπτυξη τυποποιημένων μεθόδων για να επιτύχουμε τη “σύνδεση” της ρύθμισης τάσης με το ρυθμιστή ταχύτητας της κινητήριας μηχανής όπως και την κατάλληλη επικοινωνία μεταξύ των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τον ορθό διαμοιρασμό του φορτίου.

Πρέπει να καθοριστεί μια στρατηγική γείωσης για το σύστημα MVDC. Η στρατηγική αυτή θα πρέπει να αντισταθμίζει τον κίνδυνο για υψηλά, ενδεχομένως επικίνδυνα, ρεύματα διαρροής προς τη γη με το μέγεθος και το κόστος για την παροχή γαλβανικής απομόνωσης των ηλεκτρονικών μονάδων μετατροπής ισχύος.

Απαιτείται η ανάπτυξη προτύπων ποιότητας ισχύος για τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος. Τα πρότυπα θα έχουν αντίκτυπο στο μέγεθος, το βάρος και το κόστος εξίσου των ανορθωτών και των φορτίων. Επίσης απαιτείται η θέσπιση προτύπων που βελτιστοποιούν τη συνολική απόδοση του συστήματος και το κόστος για όλο το εύρος των εφαρμογών στο πλοίο.

Δεν υπάρχει μια καθιερωμένη βιομηχανική βάση. Οι DC διακόπτες καθώς και τα ηλεκτρονικά συστήματα ανίχνευσης και ελέγχου των σφαλμάτων που απαιτούνται ώστε να κάνουν την εφαρμογή MVDC σε πλοίο βιώσιμη είναι σχεδόν ανύπαρκτα στο εμπόριο. Κατά συνέπεια, οι σχεδιαστές θα εξαρτώνται από ένα μικρό αριθμό πωλητών με εμπειρία σε τέτοιου είδους δίκτυα και θα πρέπει να αντιμετωπίσουν τον κίνδυνο που προκύπτει από την πιθανή απώλεια ενός σημαντικού πωλητή μέσω μεθόδων όπως η αγορά και αποθήκευση μεγάλου αριθμού ανταλλακτικών έκτακτης ανάγκης και την καθιέρωση, σε πολλές περιπτώσεις, προσωπικών κατασκευών.

Έχουμε έλλειψη σε πρότυπα σχεδιασμού, πρακτικές, οδηγούς, εργαλεία σχεδιασμού, και δεδομένα υποστήριξης. Ένας τύπος υποδομής σχεδιασμού είναι απαραίτητος για να εξασφαλιστεί η επιτυχής ολοκλήρωση των συστημάτων MVDC σε όλα τα στάδια

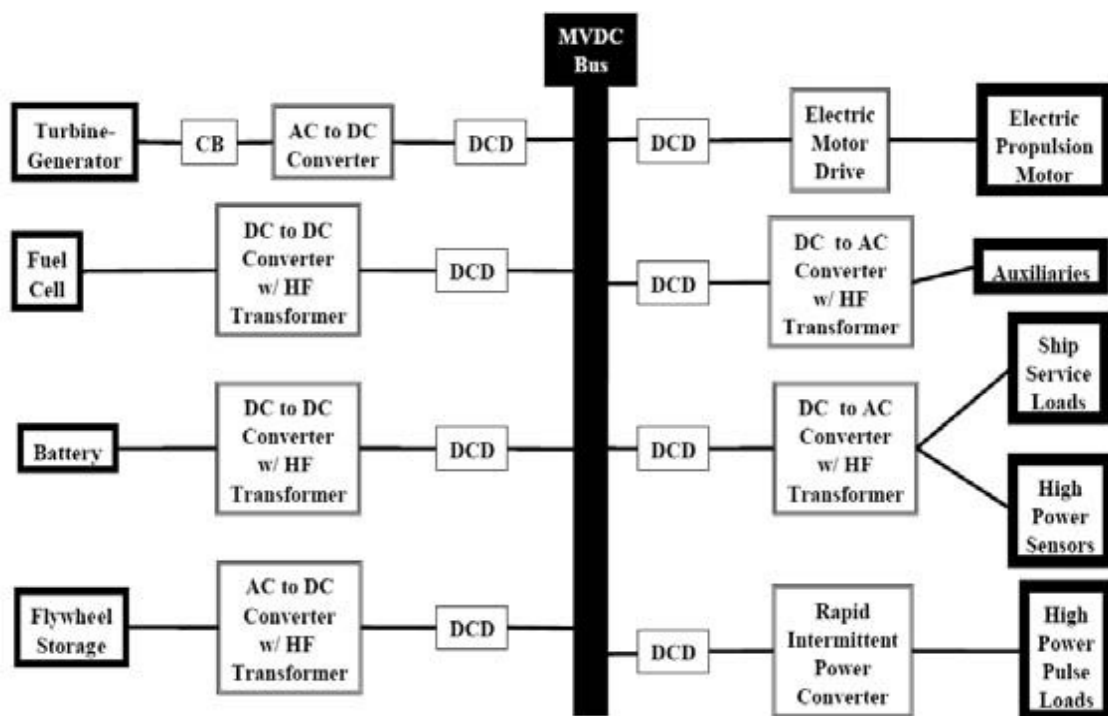
σχεδιασμού του πλοίου.

Χρειάζεται να καθορισθεί μια μέθοδος για την περίπτωση διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο της ακτής. Θα πρέπει είτε το σύστημα του πλοίου να μετατρέπει το διαθέσιμο ρεύμα συχνότητας 60Hz ή 50Hz, κατά περίπτωση, στην συνεχή τάση που απαιτείται από το πλοίο, είτε η εγκαταστάσεις του λιμανιού να έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν την κατάλληλη συνεχή τάση.

2.2 Διαγράμματα και τοπολογίες του ηλεκτρικού δικτύου DC-Πλοίου

2.2.1 Γενικό διάγραμμα του δικτύου συνεχούς ρεύματος μέσης τάσης (MVDC).

Το θεωρητικό σχεδιάγραμμα ως γενική αρχή ενός δικτύου διανομής συνεχούς ρεύματος μέσης τάσης (MVDC) είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 1. Είναι εμφανές ότι το πλήθος των επιλογών που έχουμε, όσον αφορά τα στοιχεία του δικτύου, είναι πολύ μεγάλο και περιορίζεται μόνο από τις συνθήκες λειτουργίας (απομονωμένο δίκτυο, περιορισμένος χώρος, θαλάσσιο περιβάλλον). Είναι χαρακτηριστικό ότι στην διανομή με DC όλα τα φορτία και οι παραγωγοί ηλεκτρικού ρεύματος είναι συνδεδεμένα στο ζυγό με ηλεκτρονικά ισχύος, η σημαντική εξέλιξη των οποίων τα τελευταία χρόνια κατέστησε ρεαλιστικό αυτό το είδος δικτύου. Το τι θα επιλέξουμε τελικά, εξαρτάται από τις απαιτήσεις του εκάστοτε τύπου πλοίου.



Σχήμα 1: Το γενική ιδέα του MVDC για πλοίο. [3]

Όλα τα στοιχεία του κυκλώματος που απαιτούν ανεξάρτητη γείωση πρέπει να συνδεθούν στο ζυγό μέσης τάσης DC με χρήση ενός μέσου όπως οι συμπαγείς μετασχηματιστές υψηλής συχνότητας. Ηλεκτρονικοί μετατροπείς θα παρέχουν την άεργο ισχύ που απαιτείται για τα φορτία. Για να μειώσουμε το μέγεθος του συστήματος και το βάρος, μπορούν να εξαλειφθούν οι μετασχηματιστές μεταξύ γεννητριών και κινητήρων πρόωσης με το ζυγό.

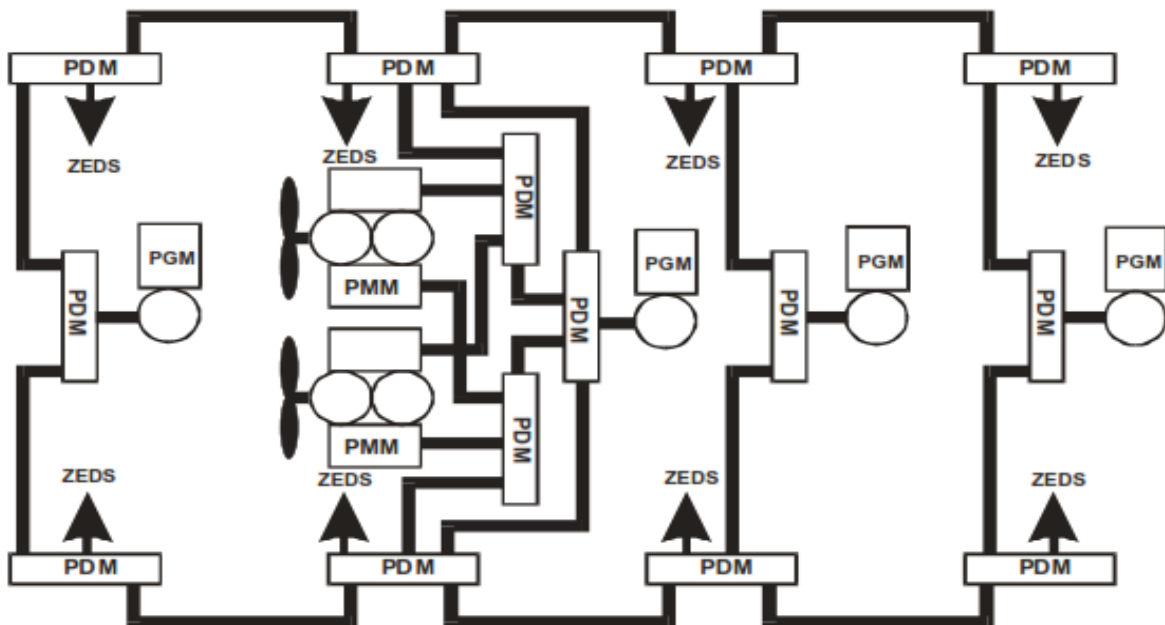
Επιπλέον, με τη δυνατότητα για έλεγχο και διακοπή του ρεύματος των ηλεκτρονικών ισχύος, οι περισσότεροι αυτόματοι διακόπτες του κυκλώματος μπορούν να αντικατασταθούν από απλούς DC διακόπτες αποσύνδεσης. Για την περίπτωση βλάβης των ηλεκτρονικών μετατροπέων μεταξύ της γεννήτριας και του MVDC ζυγού ή την αποτυχία των μετατροπέων να περιορίσουν το ρεύμα σφάλματος, θα πρέπει να υπάρχει μια εφεδρική συσκευή

προστασίας βραχυκυκλώματος ανάμεσα σε κάθε γεννήτρια και τον μετατροπέα της.

Οι πηγές ενέργειας θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα ενεργού περιορισμού ρευμάτων σφάλματος. Μια τέτοια προσέγγιση επιτρέπει σχετική ευκολία να συμπεριληφθούν διαφορετικών μεγεθών γεννήτριες, συσκευές αποθήκευσης και φορτία. Στα εμπορικά πλοία είναι πιθανό να μην απαιτείται η ύπαρξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, εκτός αν συντρέχουν λόγοι ασφαλείας για το προσωπικό, τους υπολογιστές, τον έλεγχο και τις επικοινωνίες καθώς και για ζητήματα διεθνών κανονισμών. Στην περίπτωση των μεγάλων φορτίων τύπου παλμού (high power pulse loads), για σύντομο χρονικό διάστημα η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να υπερβεί σημαντικά την ονομαστική ισχύ όλων των εγκατεστημένων γεννητριών. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, μπορεί να υπάρχει μια σειρά από τρόπους με τους οποίους ένα σύστημα διαύλου DC μπορεί να διαμορφωθεί. [1]

2.2.2 Η πρόταση του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ.

Το 2007, ο Τεχνικός Διευθυντής του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ Norbert Doerry περιέγραψε την πρόταση για μελλοντική ένταξη της τοπολογίας MVDC (σχήμα 2). Αυτή πρόκειται να αποτελέσει το τελικό στάδιο εξέλιξης του ενοποιημένου ηλεκτρικού συστήματος επόμενης γενιάς (Next Generation Integrated Power System – NGIPS). Το IPS ξεκίνησε από την τοπολογία μέσης τάσης AC (MVAC), που υπάρχει αυτή τη στιγμή στο αντιτορπιλικό DDG 1000, και θα αντικατασταθεί από το NGIPS υψηλής συχνότητας AC (HFAC) με καταληκτική εξέλιξη την MVDC, έως το τέλος του 2018, με βασικότερο σκοπό τη μείωση του κόστους, του βάρους, του όγκου και την βελτίωση της επιβιωσιμότητας (survivability) του ηλεκτρικού συστήματος των πολεμικών πλοίων.



Σχήμα 2: Η γενική τοπολογία που προτάθηκε από το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ. [1]

Το παραπάνω σχέδιο (σχήμα 2) είναι μία γενική αρχιτεκτονική, κοινή για τα MVAC, HFAC και MVDC, αλλά με διαφορετικά στοιχεία ανά περίπτωση. Όλα αυτά τα στοιχεία έχουν μοναδιαία (modular) δομή, με παρόμοιες διαστάσεις, που κάνει πολύ εύκολη την μετατροπή από τον ένα τύπο δικτύου στον άλλο και την επιδιόρθωση ή αντικατάστασή τους στα πλοία.

που έχουν ενοποιημένο ηλεκτρικό δίκτυο (IPS). Τα βασικά μέρη του MVDC κυκλώματος που φαίνονται στο σχήμα είναι τα εξής:

- Μονάδα παραγωγής ισχύος (Power Generation Module – **PGM**).
- Μονάδα πρόωσης (Propulsion Motor Module – **PMM**).
- Μονάδα διανομής ισχύος (Power Distribution Module – **PDM**).
- Σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε ζώνες (Zonal Electrical Distribution System – **ZEDS**).

Όλα αυτά θα τα περιγράψουμε λίγο περισσότερο στη συνέχεια και θα τα αναλύσουμε στα επόμενα κεφάλαια.

➤ *Μονάδα Παραγωγής Ισχύος (PGM).*

Πρόκειται για τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, ή γενικά οποιαδήποτε πηγή ηλεκτρικής ενέργειας στο πλοίο, σε συνδυασμό με τον ηλεκτρονικό ανορθωτή.

Η κινητήρια μηχανή (prime mover) μπορεί να είναι αεριοστρόβιλος, μηχανή πετρελαίου ή ατμοστρόβιλος, με καύσιμα από πετρέλαιο μέχρι πυρηνική ενέργεια και βιοκαύσιμα, που να μπορούν να φτάνουν σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής, ώστε να συνδυαστούν με υψηλής ταχύτητας γεννήτριες.

Οι γεννήτριες αυτές, ως γνωστόν, έχουν μεγάλη πυκνότητα ισχύος και μπορούν να είναι συμβατικές σύγχρονες, ασύγχρονες, γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη ή με υπεραγωγία τυλίγματα και γενικά οποιαδήποτε στρεφόμενη γεννήτρια ταιριάζει καλύτερα και αποδίδει περισσότερο στο εκάστοτε σύστημα. Εκτός από στρεφόμενες γεννήτριες, η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να προκύπτει και από άλλα μέσα, όπως κυψέλες καυσίμου (fuel cells) και ανανεώσιμες πηγές.

Στους συμβατικούς ηλεκτρονικούς ανορθωτές χρησιμοποιούνται είτε δίοδοι είτε θυρίστορ και είναι ιδιαίτερα οικονομικοί αλλά διοχετεύουν στο κύκλωμα αρκετές αρμονικές με αποτέλεσμα να μειώνεται ο συντελεστής ισχύος. Στην περίπτωση που απαιτούνται λιγότερες αρμονικές ή που θέλουμε να ρυθμίζουμε την τάση (πχ στις γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ελεγχόμενους ανορθωτές με διακοπτικά στοιχεία (IGBTs, IGCTs, κλπ) που είναι κάπως ακριβότεροι αλλά αποδίδουν καλύτερη ποιότητα τάσης.

➤ *Μονάδα πρόωσης (PMM).*

Η PMM δεν είναι τίποτα άλλο από το σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης του πλοίου, το οποίο περιλαμβάνει τον ηλεκτρικό κινητήρα και το σύστημα οδήγησης μεταβλητών στροφών.

Εκτός από τους συνηθισμένους σύγχρονους και επαγωγικούς κινητήρες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, νέοι τύποι με υψηλότερη πυκνότητα ισχύος έχουν κατασκευαστεί τελευταία, ενώ άλλοι βρίσκονται ακόμα στο στάδιο της μελέτης και της δοκιμής. Ο προηγμένος επαγωγικός κινητήρας (advanced induction motor – AIM) έχει ήδη εγκατασταθεί στο DDG 1000 και αποτελεί μια επαρκή και οικονομική περίπτωση για το IPS του. Αυτοί που αναμένεται να τον αντικαταστήσουν μεσοπρόθεσμα είναι ο σύγχρονος κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες (PMSM) ή αργότερα αυτός με υπεραγωγούς υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας (HTS), ενώ εν εξελίξει βρίσκεται και ο ομοπολικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος με υπεραγωγία στοιχεία χαμηλής θερμοκρασίας (LTS).

Η ανάπτυξη ενός κοινού συστήματος οδήγησης ανοικτής αρχιτεκτονικής για πολλαπλές εφαρμογές ναυτιλιακού ηλεκτροκινητήρα πρόωσης δίνει τη δυνατότητα να βελτιώσει την οικονομική προσιτότητα και την απόδοση του συστήματος NGIPS.

Όλο και πιο συχνά τα τελευταία χρόνια, ο κινητήρας μαζί με τον περιστρεφόμενο άξονα μπορεί να περικλείονται μέσα σε μεταλλικό κέλυφος (pod) εκτός της γάστρας του πλοίου, το οποίο στην μία, συνήθως την μπροστά, ή και στις δύο άκρες του έχει προσαρτημένη την έλικα και μπορεί να περιστρέφεται 360° γύρω από τον άξονά του. Αυτή είναι γνωστή ως podded πρόωση και έχει πολύ καλύτερα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά, ευελιξία και εξοικονόμηση χώρου από τη συμβατική αξονική πρόωση.

➤ *Μονάδα διανομής ισχύος (PDM).*

Πρόκειται για τα μέσα μετάδοσης του ηλεκτρικού ρεύματος στο δίκτυο που αποτελούνται από τους ελεγχόμενους και μη διακόπτες και φυσικά τα καλώδια.

Στο MVDC θα χρειαστεί να αναπτυχθούν νέου τύπου διακόπτες όπου θα συνδυάζουν μηχανικούς διακόπτες με μεταγωγή από ηλεκτρονικά ισχύος ώστε να εξαλειφθεί η ανάγκη να διακόπτουν το τόξο (αρκάρισμα) του συνεχούς ρεύματος και γι' αυτό θα ονομάζονται υβριδικοί. Επιπλέον, απαιτούνται νέοι αισθητήρες, προστατευτικά ρελέ, συστήματα ελέγχου ηλεκτρικού πίνακα και πρωτόκολλα ρύθμισης τάσης.

Για τα καλώδια θα χρειαστεί ανάλυση και δοκιμές ώστε να θεσπιστούν κανονισμοί για τη χρήση σε πολεμικές και μη εφαρμογές συνεχούς ρεύματος.

Πολύ σημαντικά στοιχεία των PDMs αποτελούν οι ελεγχόμενοι διακόπτες επιλογής ζυγού (controllable bus transfers – CBTs), οι οποίοι, σε αντίθεση με τους αυτόματους (ABTs), δεν λειτουργούν αυτόνομα παρά λαμβάνουν εντολές από το σύστημα ελέγχου ισχύος.

➤ *Σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε ζώνες (ZEDS).*

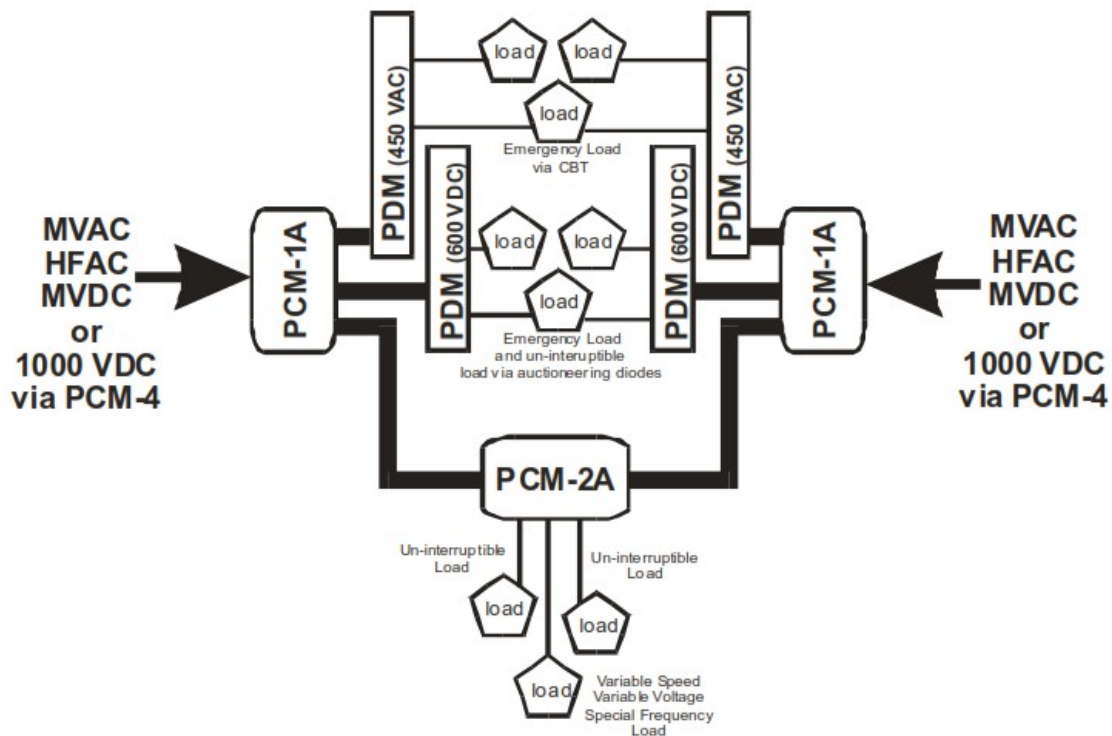
Το σύστημα διανομής αυτό αναπτύχθηκε με στόχο να χωρίσει το κύκλωμα του πλοίου σε πολλαπλές ζώνες ώστε να είναι ευκολότερη η απομόνωση ενός τμήματος που έχει υποστεί ζημιά και η μετέπειτα επισκευή ή αντικατάστασή του.

Η τοπολογία του ZEDS είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 3 και είναι κοινή για τα δίκτυα MVAC, HFAC και MVDC. Είναι αναπόσπαστο τμήμα του NGIPS που θα εφαρμοστεί στα μελλοντικά πολεμικά πλοία και η ορθή εφαρμογή του για τα φορτία παρέχει υψηλή ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service – QoS) και επιβιωσιμότητα στο πλοίο, μείζον γεγονός για τα πολεμικά. Ωστόσο, ο πολύπλοκος σχεδιασμός του συστήματος και ο σημαντικός αριθμός ηλεκτρονικών μετατροπέων που το απαρτίζουν, το καθιστούν μία ακριβή λύση, που εκτός των πολεμικών θα είχε πολύ περιορισμένη εφαρμογή στα εμπορικά πλοία. Στο σχέδιο της τοπολογίας παρατηρούμε (σχήμα 3) ότι εκτός από τα PDMs που αναφέρθηκαν παραπάνω εμφανίζονται και αρκετές μονάδες μετατροπής ισχύος (Power Conversion Modules – PCMs), όπως και η θέση των εκάστοτε φορτίων. Η λειτουργία των δομοστοιχειωτών μονάδων που το απαρτίζουν είναι η ακόλουθη:

- **PCM-4:** Είναι ο ηλεκτρονικός ανορθωτής που μετατρέπει την εναλλασσόμενη ή συνεχή τάση του ζυγού σε 1000 VDC. Σημειώνεται ότι δεν είναι απαραίτητος.
- **PCM-1A:** Μετατρέπει τα 1000 VDC του PCM-4 ή την τάση από τον MVDC ζυγού σε 750-800 VDC, 650 VDC, όποιο άλλο επίπεδο DC τάσης χρειάζεται αλλά και σε 450 VAC στα 60 Hz. Επίσης διαχωρίζει και προστατεύει τους ζυγούς της αριστερής και της δεξιάς πλευράς του πλοίου από τα εντός ζώνης σφάλματα. Η τάση 650 VDC χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία ελεγκτών των μεγάλων κινητήρων και για τις εφαρμογές θέρμανσης με μεγάλες αντιστάσεις. Για τα DC φορτία, η PCM-1A περιέχει μια σειρά από δομοστοιχειωτούς ηλεκτρονικούς μετατροπείς για τις υπηρεσίες του πλοίου (Ship Service Converter Modules – SSCM) που μπορούν να παραλληλιστούν ώστε να παρέχει πλεόνασμα στο

απαιτούμενο επίπεδο ισχύος. Ομοίως, για τα AC φορτία, η PCM-1A έχει μια σειρά από μονάδες ηλεκτρονικών αντιστροφέν για τις υπηρεσίες του πλοίου (Ship Service Inverter Modules – SSIM) οι οποίοι μπορούν να συνδεθούν παράλληλα για να παρέχεται το απαραίτητο πλεόνασμα στην επιζητούμενη τάξη ισχύος.

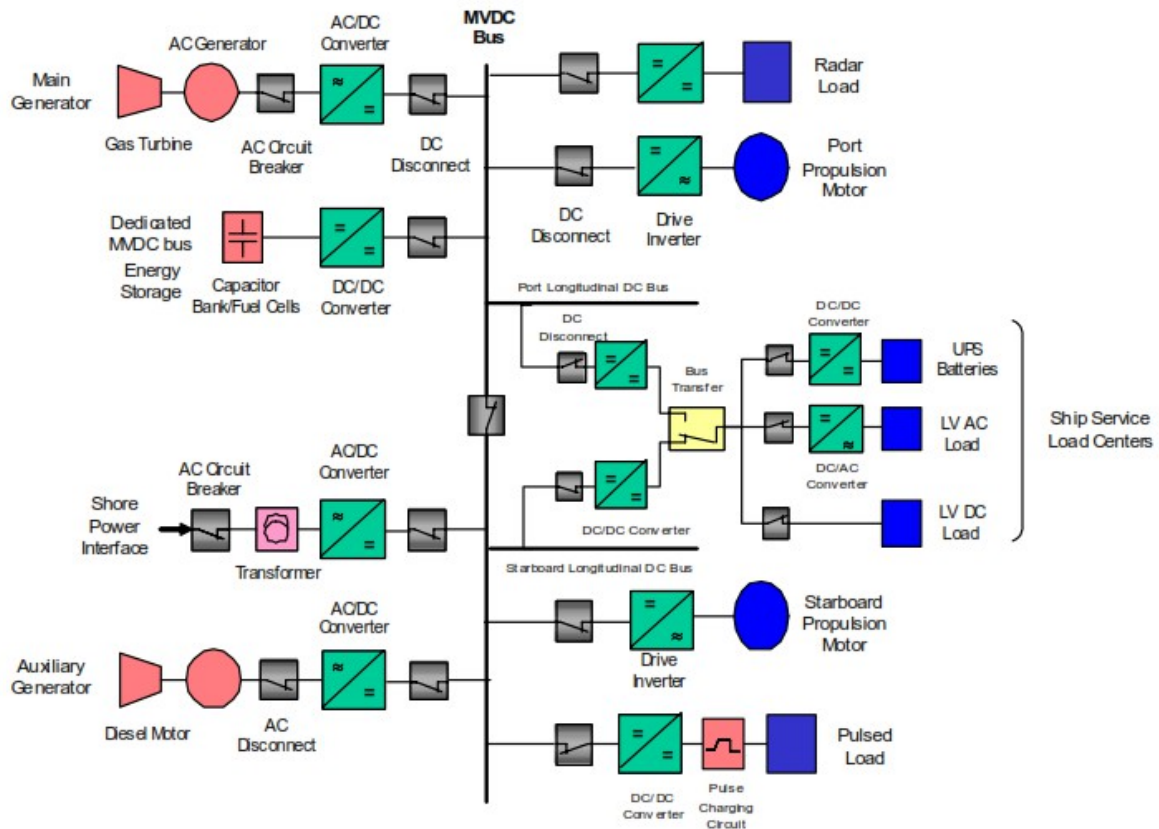
- **PCM-2A:** Μετατρέπει την 750-800 VDC τάση από την PCM-1A σε 450 VAC ισχύ στα 60 Hz, 400 Hz, ή σε μεταβλητή συχνότητα και τάση για την οδήγηση κινητήρων μεταβλητής ταχύτητας. Η PCM-2A θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τα AC φορτία αδιάλειπτης παροχής (uninterruptible AC loads), καθώς και για τα φορτία με ιδιαίτερες απαιτήσεις σε ισχύ. Επίσης, εμπεριέχει τα χαρακτηριστικά ενός κέντρου φορτίου, όπου τα επιμέρους φορτία ή σύνολα μικρών φορτίων θα μπορούσαν να έχουν επιμέρους μετατροπείς ισχύος. Για να ενισχυθεί η επιβιωσιμότητα μιας ζώνης θα πρέπει να έχει πολλαπλές PCM-2As που να ομαδοποιούν τα τροφοδοτούμενα φορτία. Γενικά, ο αριθμός των φορτίων που τροφοδοτούνται από PCM-2A πρέπει να ελαχιστοποιείται λόγω του χαμηλού δείκτη απόδοσης (~85%) σε σχέση με τις PCM-1As (~97%) και των επιπτώσεων στο κόστους και την αξιοπιστία που επιφέρει η παροχή ισχύος σε ένα καταναλωτή από την PCM-2A μέσω PCM-1A.



Σχήμα 3: Η τοπολογία του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε ζώνες (Zonal Electrical Distribution System – ZEDS). [1]

2.2.2.1 Παράδειγμα δικτύου MVDC πολεμικού πλοίου.

Ένα τυπικό παράδειγμα ενός ρεαλιστικού δικτύου MVDC θα μπορούσε να είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4: Παράδειγμα ρεαλιστικού δικτύου MVDC σε πλοίο. [3]

Τα βασικά στοιχεία του διαγράμματος μπορούν να αναλυθούν ως εξής :

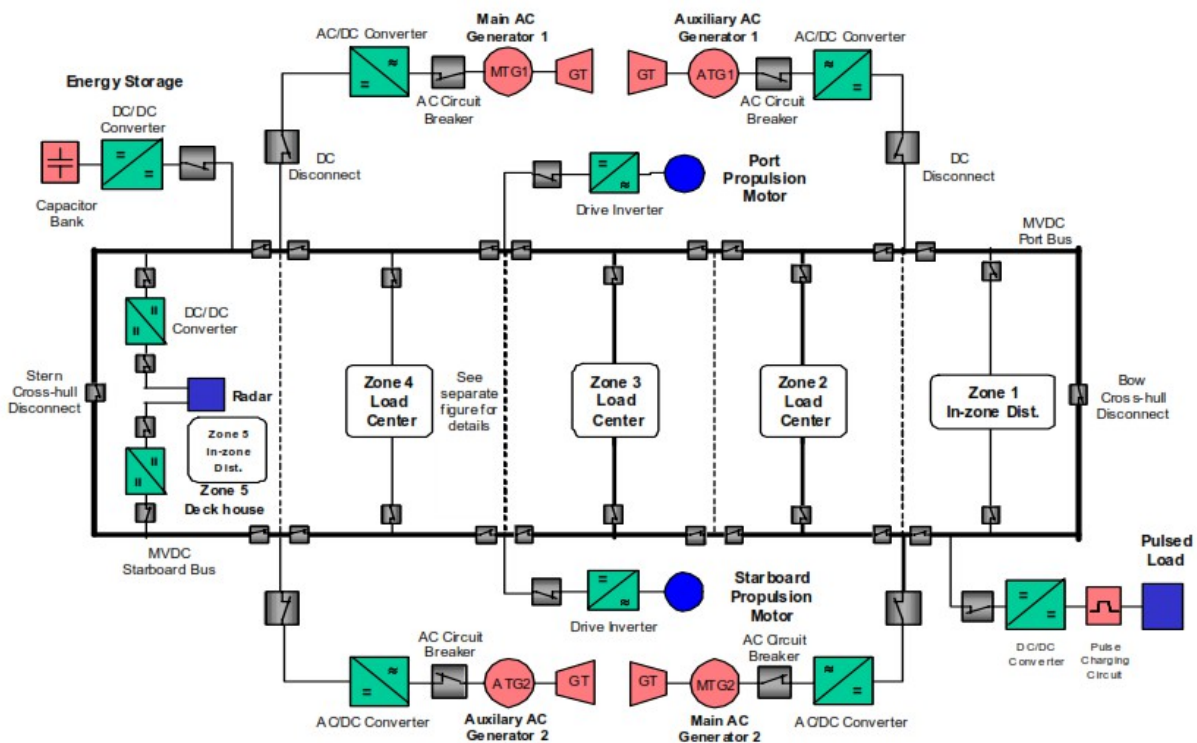
- ◆ **Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας:** Η ηλεκτρική ενέργεια σε MVDC στο πλοίο παράγεται μέσω γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος οδηγούμενης από αεριοστρόβιλο και ακολουθούμενη από ανορθωτή (AC/DC). Προκειμένου να εκπληρωθούν οι απαιτήσεις συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, δύο μεγάλης δυναμικότητας κύρια ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη (π.χ. 36 MW) μπορούν να συμπληρωθούν με δύο ή περισσότερα μικρής ικανότητας βοηθητικά (π.χ. 4 MW). Για παράδειγμα, υψηλής ταχύτητας γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος μόνιμου μαγνήτη μπορούν να χρησιμοποιήσουν απλή, χαμηλού κόστους, ανόρθωση με διόδους για την παροχή συνεχούς ρεύματος στο ζυγό διανομής συνεχούς ρεύματος. Εάν χρησιμοποιηθούν διπλής κατεύθυνσης (ενεργοί) ανορθωτές (π.χ. με IGBTs), απαιτείται επαρκής προστασία και έλεγχος ώστε να εμποδίζεται η αντίστροφη ροή ρεύματος για την αποφυγή ζημιών στην κινητήρια μηχανή. Πρέπει να σημειώσουμε ότι τα συστήματα κυψελών καυσίμου, τα οποία τροφοδοτούνται από καύσιμα, κατατάσσονται στους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας.
- ◆ **Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS):** Δεδομένου ότι η απόκριση των ζευγών ηλεκτροπαραγωγής στις διακυμάνσεις της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή έως μέτρια, οι ξαφνικές απαιτήσεις, σε υψηλή ισχύ του ζυγού DC που προκαλούνται από βηματικά και παλμικά φορτία ή από την απώλεια ενός σετ γεννήτριας ή της σύνδεσης με την ξηρά, καλύπτονται από τη χρήση των γρήγορης απόκρισης συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον, τα ESS μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για να καταστεί δυνατή μία επανεκκίνηση του συστήματος του πλοίου από ολική διακοπή (black start), κάτι που είναι πολύ σημαντικό για τα απομονωμένα ηλεκτρικά δίκτυα. Όλα τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι συστοιχίες πυκνωτών ή τα

συστήματα με σφόνδυλο εκφορτίζονται σε, και φορτίζουν από, το ζυγό διανομής MVDC μέσω αμφίδρομων ηλεκτρονικών μετατροπών DC/DC. Αντίστοιχα με πριν, να σημειώσουμε ότι, οι ανανεώσιμες κυνέλες καυσίμου (regenerative fuel cells) μπορούν να χαρακτηριστεί ως ESS, καθώς επιτρέπουν την αντίστροφη από τη συνήθη διαδικασία, δηλαδή την παραγωγή καυσίμων από ηλεκτρισμό.

- ◆ **Διασύνδεση με την ακτή (Cold Ironing):** Η διασύνδεση του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου με την ακτή είναι πολύ σημαντική. Αυτή μπορεί να καταστεί εφικτή εάν το τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα του δικτύου της στεριάς αυξήσει ή μειώσει το πλάτος της τάσης του κατάλληλα μέσω μετασχηματιστή και έπειτα μετατραπεί σε συνεχές στο επίπεδο του MVDC με τη χρήση ανορθωτή (AC/DC).
- ◆ **Ηλεκτροπρόωση:** Οι ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης του πλοίου οδηγούνται από τον ζυγό διανομής DC μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών μεταβλητής ταχύτητας. Αυτοί οι μετατροπείς μπορεί να είναι διπλής κατεύθυνσης (bi-directional) για να επιτρέπουν να απορροφάται από άλλα φορτία του πλοίου, συνδεδεμένα στον ζυγό διανομής MVDC, η ανακτώμενη ισχύς που δημιουργείται κατά την απότομα ανάποδα (crash-back) λειτουργία της προπέλας.
- ◆ **Λειτουργικά φορτία:** Η ισχύς για τα λειτουργικά φορτία του πλοίου παρέχεται από τον ζυγό MVDC μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών DC/DC. Στα πολεμικά πλοία, όπου η συνεχής μετάδοση ισχύος σε ζωτικά φορτία είναι υψίστης σημασίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η έννοια των περιοχών-ζωνών (zones) φορτίου κατά μήκος του πλοίου που έχουν τη δυνατότητα να εξυπηρετούνται από περισσότερους του ενός (π.χ. αριστερά και δεξιά) DC ζυγούς, όπως φαίνεται και στα σχήματα 3, 4 και 5. Η συνέχεια της ισχύος εντός κάθε ζώνης ενισχύεται με αυτόματη εναλλαγή παροχής ισχύος μεταξύ των ζυγών αριστερής και δεξιάς πλευράς με αυτόματους διακόπτες. Ορισμένα φορτία εξυπηρέτησης του πλοίου, όπως συστήματα οδήγησης μεταβλητής ταχύτητας των μεγάλων κινητήρων και το μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, μπορεί να λειτουργήσουν άμεσα με συνεχές ρεύμα που παρέχεται από μετατροπείς DC/DC. Για τα AC φορτία, όπως οι μικρότεροι κινητήρες από αντλίες και ανεμιστήρες και τα φορτία ενδίαίτησης, είναι απαραίτητοι DC/AC αντιστροφείς ώστε να μετατραπεί το συνεχές ρεύμα σε χαμηλής τάσης, μονοφασικό ή τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα. Τέλος, αμφίδρομοι μετατροπείς DC/DC μπορούν να συνδέσουν τα κυκλώματα φόρτισης/εκφόρτισης των τροφοδοτικών αδιάλειπτης παροχής (uninterruptable power supply – UPS) των φορτίων στον ζυγό διανομής DC.
- ◆ **Παλμικά φορτία:** Τα παλμικά κυκλώματα φόρτισης των λέιζερ ελεύθερων ηλεκτρονίων (FELs) και των συστημάτων ηλεκτρομαγνητικής εκτόξευσης αεροσκαφών (electromagnetic aircraft launch system – EMALS) και βλημάτων (railguns), τα οποία μπορεί μια ημέρα να είναι μέρος του οπλισμού ορισμένων πολεμικών πλοίων, θα αντλούν ενέργεια από τον ζυγό διανομής MVDC μέσω μετατροπέα DC/DC. Αυτά τα κυκλώματα, εάν απαιτείται, μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να παρέχουν ισχύ πίσω στο σύστημα MVDC και ως εκ τούτου, μπορούν να επιτελέσουν λειτουργία ως συσκευές αποθήκευσης ενέργειας.
- ◆ **Ειδικά φορτία υψηλής ισχύος:** Η τροφοδοσία φορτίων υψηλής ισχύος, όπως ορισμένες συστοιχίες στρατιωτικών ραντάρ, μεγάλοι πλευρικοί προωστήρες ή μονάδες συμπίεστων, που συνήθως απαιτούν αρκετά MW ισχύος, παρέχεται απευθείας από τον ζυγό διανομής MVDC μέσω μετατροπέα DC/DC.
- ◆ **Ασφάλεια συστήματος:** Τα AC υποσυστήματα ισχύος, όπως οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος και η διασύνδεση με την ξηρά, μπορούν να προστατευτούν έναντι βλαβών από σφάλματα με την συνήθη χρήση των συμβατικών αυτόματων διακοπών. Στο σχήμα 2, οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς συνδέονται με τον ζυγό διανομής μέσω DC διακοπών αποσύνδεσης. Η προστασία του συστήματος

συνεχούς ρεύματος επιτυγχάνεται μέσω ενός συνδυασμού ελέγχου των μετατροπέων και άλλων συσκευών απόξευξης DC, όπως για παράδειγμα ο DC αποξεύκτης στερεάς κατάστασης (solid state DC breaker).

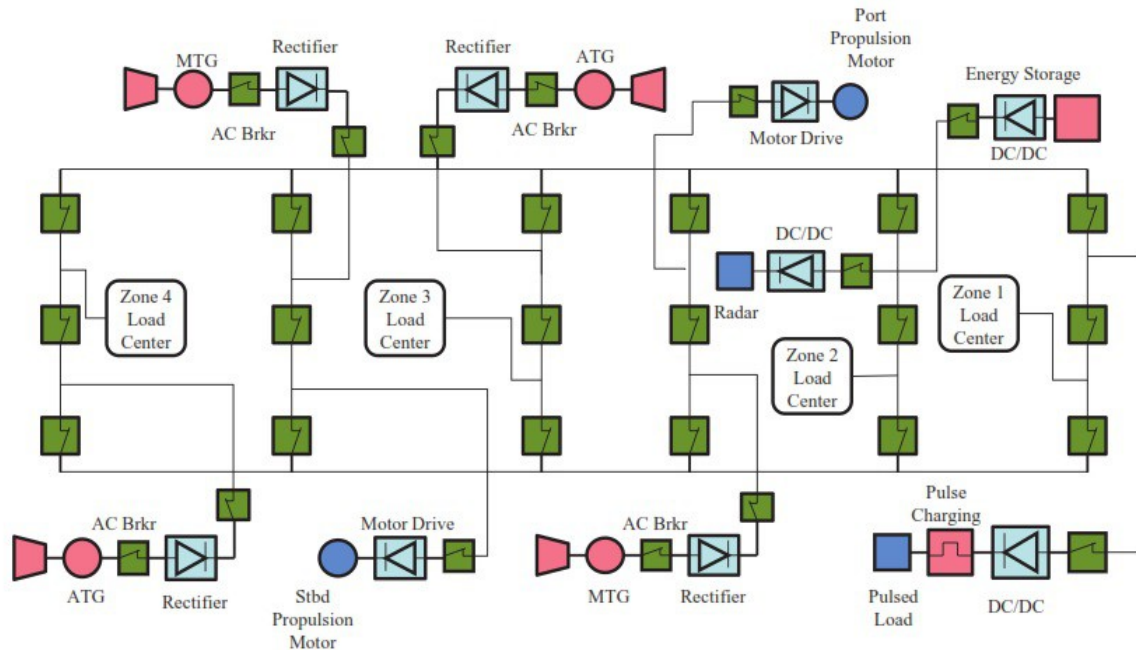
Στο σχήμα 5 έχουμε το ίδιο ρεαλιστικό δίκτυο του σχήματος 4, που περιγράψαμε παραπάνω, με τα φορτία του εμφανώς κατανομημένα σε ζώνες (zonal electrical distribution systems – ZEDS), σε τοπολογία δακτυλίου (ring bus topology).



Σχήμα 5: Το δίκτυο του σχήματος 2 με διαμόρφωση των φορτίων σε ζώνες (ZEDS). [3]

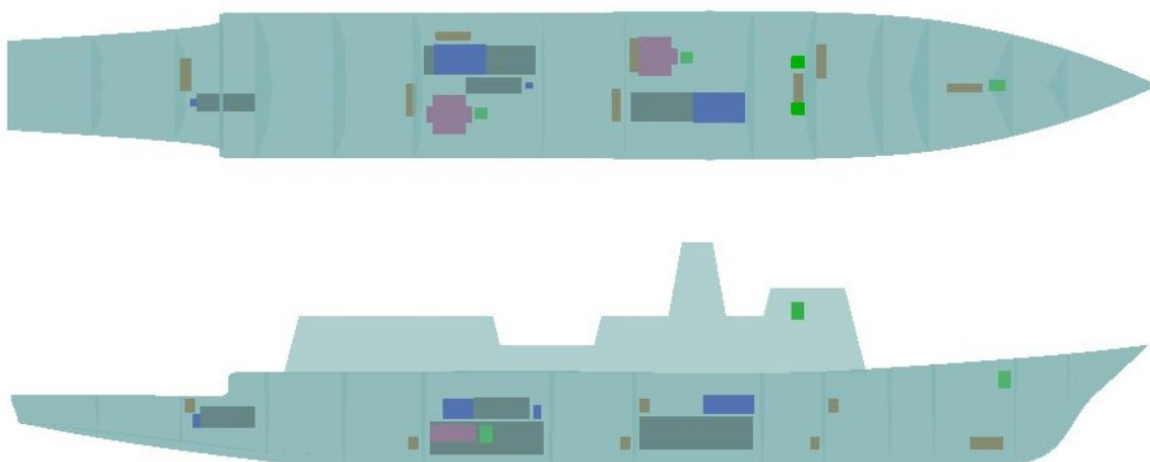
Στο [4] γίνεται η σύγκριση της τοπολογίας του σχήματος 3 με αυτήν του σχήματος 6, η οποία ονομάζεται breaker-and-a-half. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι έχουν σχεδόν ίδιες απώλειες και κατανάλωση καυσίμου, όμως η breaker-and-a-half, φυσικά για τα ίδια φορτία, είναι περίπου 100 τόνους ελαφρύτερη και καταλαμβάνει περίπου 120 m³ λιγότερο όγκο, κυρίως λόγω του μικρότερου αριθμού μονάδων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που είναι απαραίτητες. Το τίμημα που πληρώνουμε για όλα αυτά τα πολύ ευνοϊκά χαρακτηριστικά της είναι η ελαφρώς μειωμένη ανθεκτικότητα σε βλάβες. Σε σχεδιασμούς όμως που δεν μας ενδιαφέρει η υψηλή επιβιωσιμότητα θα ήταν μία τοπολογία που θα άξιζε να την λάβουμε υπόψη.

Οι μετρήσεις έγιναν για το υποθετικό πλοίο που σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Paramarine της QinetiQ με βάση το DDG-51 του USN και φαίνεται στο σχήμα 7. Το πλοίο αυτό έχει τέσσερα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, δύο αεριοστρόβιλους MT30 της Rolls-Royce και δύο αεριοστρόβιλους LM500 με προσαρτημένες τις αντίστοιχες ηλεκτρογεννήτριες, με δυνατότητα να παράγουν από 36 MW οι πρώτες και από 5 MW οι δεύτερες. Για την πρόωση έχει δύο επαγωγικούς κινητήρες AIM ισχύος 35 MW έκαστος. Τα δύο βασικά φορτία του, εκτός της πρόωσης, είναι το ραντάρ (3,75 MW) και ένα παλμικό οπλικό σύστημα (10 MW), ενώ έχει ακόμα 22 ομαδοποιημένα φορτία κατανομημένα σε τέσσερις ζώνες.



Σχήμα 6: Η τοπολογία breaker-and-a-half για MVDC. [4]

Στο σχήμα 7 οι γεννήτριες απεικονίζονται με γκρι χρώμα. Σε κάθε μηχανοστάσιο έχουμε τοποθετημένη από μία MT30. Η μία LM500 βρίσκεται στο πίσω μηχανοστάσιο και πάνω από την MT30, ενώ η δεύτερη είναι προς την πρύμνη στο χώρο του βοηθητικού μηχανοστασίου. Οι ηλεκτρονικοί ανορθωτές είναι με μπλε χρώμα, προσαρτημένοι στις εκάστοτε γεννήτριες. Οι προωστήριοι κινητήρες βρίσκονται σε ξεχωριστές ZEDS με ροζ χρώμα. Σε κάθε ζώνη υπάρχουν από δύο PCM-1As καφέ χρώματος, ένας μπροστά και ένας πίσω. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας DC/DC του παλμικού οπλικού συστήματος φαίνεται με πράσινο χρώμα στην πλώρη, ακριβώς κάτω από το κύριο κατάστρωμα, ενώ αυτοί του ραντάρ εμφανίζονται, με τον ίδιο χρωματισμό, δεξιά και αριστερά στην γέφυρα.



Σχήμα 7: Υποθετικό πολεμικό πλοίο με MVDC τοπολογία σε ζώνες, όπως σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα Paramarine. [4]

2.2.3 Το ηλεκτρικό δίκτυο με συνεχές ρεύμα της ABB για εμπορικό πλοίο (ABB Onboard DC Grid).

Το Onboard DC Grid της ABB είναι απλώς μια επέκταση των DC συνδέσεων που ήδη υπάρχουν σε όλα τα συστήματα οδήγησης κινητήρων πρόωσης και πλευρικών προωστήρων (thrusters). Τα συστήματα μεταβλητών στροφών αυτά, που συνιστούν συνήθως μεγαλύτερο από 80% του συνολικού ηλεκτρικού φορτίου στα πλοία με ηλεκτροπρόωση, χρησιμοποιούν τοπικά ηλεκτρονικό ανορθωτή (rectifier) για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου σε συνεχές και έπειτα αντιστροφέα (inverter) για μετατροπή του DC στο AC της συχνότητας και του πλάτους που επιθυμούμε. Η επέκταση αυτή σημαίνει ότι θα διατηρηθούν όλα τα αποδοτικά και καλά δοκιμασμένα προϊόντα που χρησιμοποιούνται ήδη σήμερα κατά κόρον στα ηλεκτρικά πλοία, όπως οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος, μονάδες inverter, AC κινητήρες, κλπ. Ωστόσο, οι ογκώδεις κύριοι ηλεκτρικοί πίνακες και μετασχηματιστές εναλλασσόμενου ρεύματος δεν είναι πλέον απαραίτητοι και έτσι έχουμε τα πιο ευέλικτα συστήματα ισχύος και πρόωσης που είχαμε ποτέ μέχρι σήμερα. Οι κυριότερες καινοτομίες σε αυτή τη νέα DC τοπολογία έχουν να κάνουν περισσότερο με το σχεδιασμό και τον έλεγχο του συστήματος προστασίας και τη βελτιστοποιημένη ροή ενέργειας. Στο σχήμα 8 έχουμε την απεικόνιση της τοπολογίας AC (αριστερά) και της DC (δεξιά) για το ίδιο πλοίο υποστήριξης πλατφόρμας (Platform Supply Vessel – PSV).

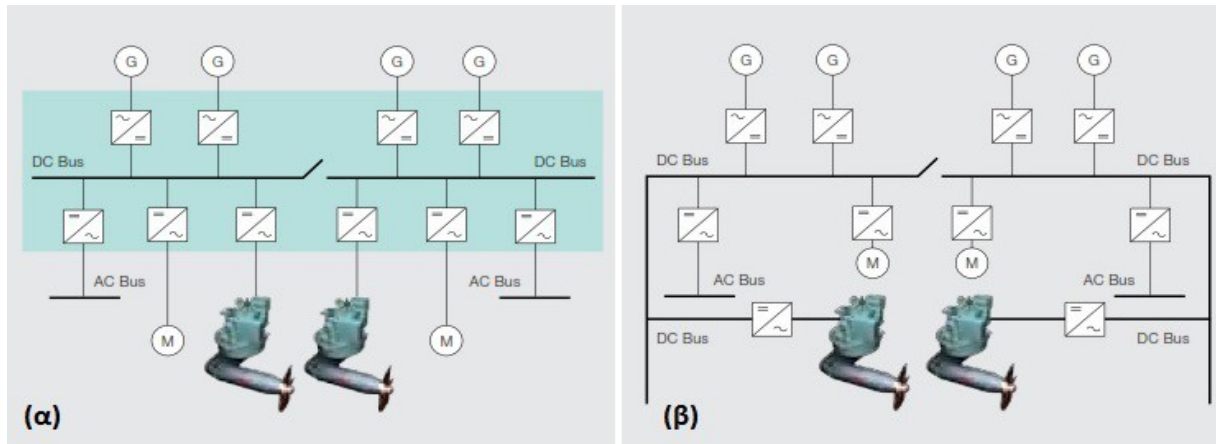


Σχήμα 8: Ένα πλοίο υποστήριξης πλατφόρμας με AC δίκτυο (αριστερά) και με Onboard DC Grid της ABB (δεξιά). [5]

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι μορφοποίησης του Onboard DC Grid, από την multidrive προσέγγιση (σχήμα 9α) έως την πλήρως κατανεμημένη (σχήμα 9β). Στη multidrive όλες οι μονάδες ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος βρίσκονται στη σειρά μέσα στον ίδιο χώρο, παρόμοια με τον κύριο πίνακα διανομής AC που χρησιμοποιείται στα AC ηλεκτρικά πλοία. Στο κατανεμημένο σύστημα, κάθε μετατροπέας βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα προς την αντίστοιχη πηγή τροφοδοσίας ή κατανάλωσης ισχύος.

Το κοινό χαρακτηριστικό και για τις δύο εναλλακτικές λύσεις είναι ότι ο κύριος πίνακας AC διανομής και όλοι οι μετασχηματιστές των thrusters παραλείπονται. Αντί αυτού όλη η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτείται απευθείας ή μέσω ενός ανορθωτή σε ένα κοινό ζυγό DC που διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια προς τους καταναλωτές. Κάθε κύριος καταναλωτής στη συνέχεια τροφοδοτείται από μια ξεχωριστή μονάδα μετατροπέα. Η διανομή των 220V AC, π.χ. για τα φορτία ενδιαίτησης, παρέχεται με χρήση απομονωμένων μετατροπέων, ειδικά σχεδιασμένων για να τροφοδοτήσει καθαρή ενέργεια σε αυτά τα πιο ευαίσθητα κυκλώματα. Περαιτέρω μετατροπείς για τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να προστεθούν στο δίκτυο καθώς μετατροπείς DC/DC είναι απαραίτητοι για τον

έλεγχο και την προστασία τους. Τα συστήματα αυτά θα μπορούσαν για παράδειγμα να είναι μπαταρίες ή υπερπυκνωτές που να χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση των απότομων μεταβολών ισχύος. Τα λειτουργικά οφέλη από τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι προφανή, ωστόσο, ο όγκος και το κόστος αυτού του τύπου εξοπλισμού είναι σημαντικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη στη συνολική διεργασία βελτιστοποίησης.

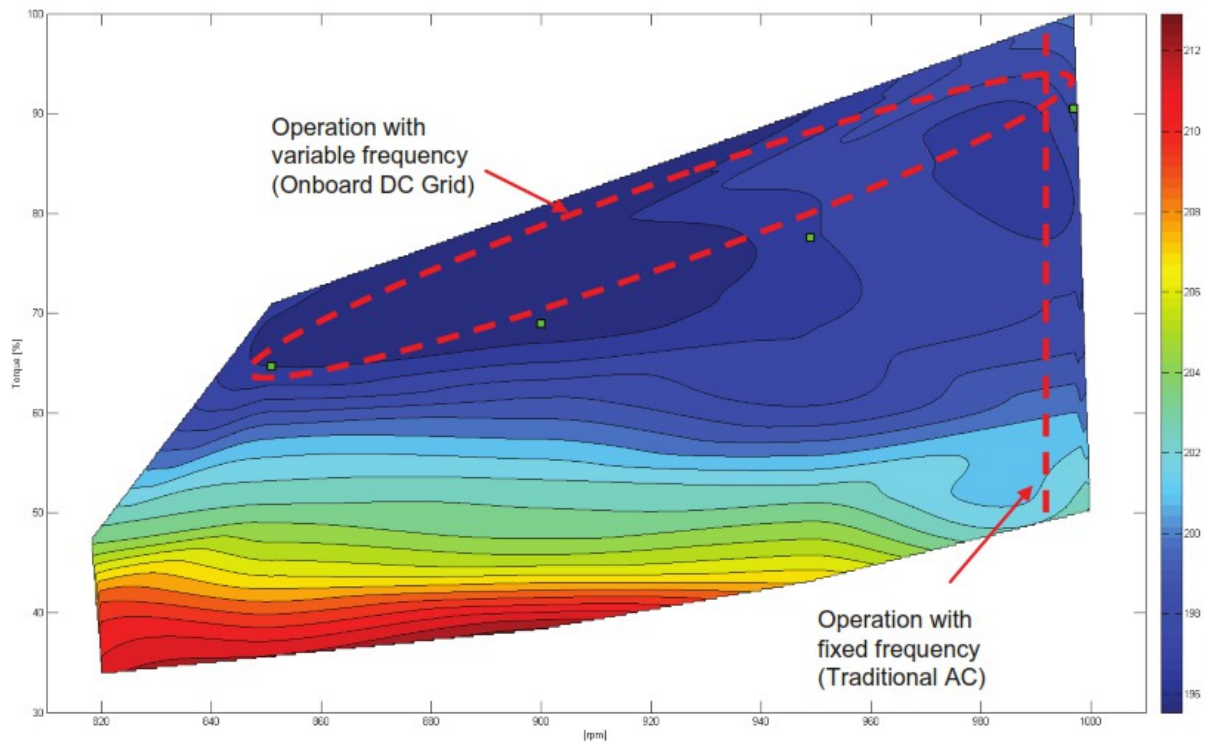


Σχήμα 9: (α) Η multidrive και (β) η κατακεντημένη προσέγγιση για το dc δίκτυο της ABB. [5]

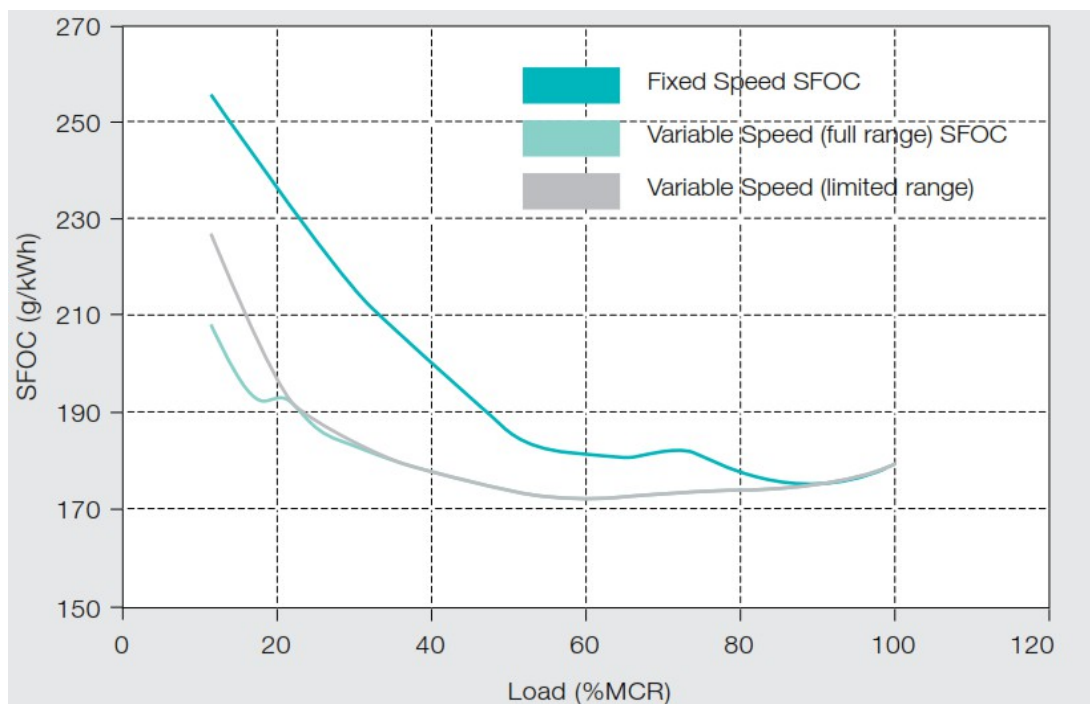
Ουσιαστικά πρόκειται για μια νέα αντίληψη διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που, αξιοποιώντας τις τεχνολογικά αποδεδειγμένες γεννήτριες και κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, δημιουργεί νέες προοπτικές για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και την εξοικονόμηση χώρου.

Η βελτίωση της απόδοσης επιτυγχάνεται κυρίως λόγω του γεγονότος ότι το σύστημα δεν είναι πλέον “κλειδωμένο” σε μια συγκεκριμένη συχνότητα (συνήθως 60Hz), παρόλο που κάθε πηγή ισχύος των 60Hz μπορεί επίσης να συνδεθεί με το δίκτυο. Η απελευθέρωση του ελέγχου κάθε καταναλωτή ισχύος ανεξάρτητα, ανοίγει το δρόμο για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου με πολλούς τρόπους. Σήμερα, σχεδόν όλοι οι παραγωγοί ενέργειας στα ηλεκτρικά πλοία κινούνται από κινητήρες εσωτερικής καύσης. Οι περισσότεροι λειτουργούν με πετρέλαιο (HFO/MDO), κάποιιοι με φυσικό αέριο, κυρίως υγροποιημένο (LNG), και μερικοί με ικανότητα διπλής τροφοδοσίας καυσίμων (dual fuel), υγρά ή αέρια. Κατά τη λειτουργία αυτών των κινητήρων με σταθερές στροφές, η κατανάλωση καυσίμου είναι η ελάχιστη σε ένα πολύ μικρό εύρος στροφών λειτουργίας, περίπου στο 85% του ονομαστικού φορτίου. Με τη δυνατότητα να μεταβάλλεται η ταχύτητα αυτό το παράθυρο λειτουργίας μπορεί να επεκταθεί μέχρι και 50% του ονομαστικού φορτίου χωρίς αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου (σχήμα 10). Αλλά ακόμα και αν ο κινητήρας λειτουργεί σε φορτία κάτω από αυτό το όριο, η απόδοσή του παραμένει σημαντικά υψηλότερη από εκείνη σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής (σχήμα 11).

Αυτό είναι ιδιαίτερος πλεονεκτητικό για σκάφη που λειτουργούν με δυναμικό προσδιορισμό θέσης (Dynamic Positioning – DP), όπου ο μέσος όρος των φορτίων των thrusters είναι υπό φυσιολογικές συνθήκες χαμηλός, λόγω της μικρής ταχύτητας των ελίκων κατά τις φυσιολογικές καιρικές συνθήκες, αλλά ο αριθμός των μηχανών που λειτουργούν είναι μεγάλος για λόγους ασφαλείας. Η ακριβής βελτίωση της απόδοσης και, επακόλουθα, εξοικονόμηση καυσίμου εξαρτάται φυσικά από τον τύπο του σκάφους και το προφίλ λειτουργίας, αλλά ένα πλοίο υποστήριξης πλατφόρμας με δυνατότητα DP είναι ένα παράδειγμα τύπου που έχει σαφέστατα όλες τις προδιαγραφές για την πλήρως ευνοϊκή χρήση των ικανοτήτων της Onboard DC Grid τοπολογίας.



Σχήμα 10: Δοκιμές της κατανάλωσης καυσίμου από μηχανή με μεταβλητή ταχύτητα – το έγχρωμο σχέδιο αποτελεί την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) σε g/kWh. [5]



Σχήμα 11: Σύγκριση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (SFOC) σε g/kWh μηχανής με μεταβαλλόμενη ταχύτητα και μηχανής με σταθερή. [6]

Η τοπολογία αυτή, επιλύει ένα ακόμα θεμελιώδες πρόβλημα που σχετίζεται με τη λειτουργία DP κατά τη διανομή ισχύος με εναλλασσόμενο ρεύμα. Αυτό δεν είναι άλλο από το περιορισμένο επίπεδο επιτάχυνσης των thrusters. Στα παραδοσιακά AC συστήματα με πλευρικούς προωστήρες ελεγχόμενης μεταβλητής ταχύτητας, ο ρυθμός μεταβολής των RPM

της προπέλας, και επακόλουθα η ισχύς, περιορίζεται αυστηρά από το σύστημα ελέγχου των διαθέσιμων, και συνήθως σχετικά αργών, ρυθμών μεταβολής της ταχύτητας του κινητήρα, λόγω της επιρροής από την επιτρεπόμενη συχνότητα και τις διακυμάνσεις της τάσης στον κύριο AC ηλεκτρικό πίνακα. Με το Onboard DC Grid οι περιορισμοί αυτοί μπορούν να χαλαρώσουν σε κάποιο βαθμό και είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν λιγότερο “αυστηροί” ρυθμοί μεταβολής των στροφών για τα thrusters. Το αποτέλεσμα είναι ότι οι επιταχύνσεις των προωστήρων μπορεί να είναι μεγαλύτερες, λόγω του γεγονότος ότι πρώτον δεν υπάρχει το ζήτημα επιρροής της συχνότητας της γεννήτριας και δεύτερον ότι τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να παρέχουν την απαιτούμενη δραστικά μεταβαλλόμενη ισχύ κατά την εντολή του ελεγκτή αυτόματου προσδιορισμού θέσης. Συνολικά, λοιπόν, θα βελτιωθεί η απόδοση του DP με αποτέλεσμα λιγότερη κατανάλωση καυσίμου.

Ένα προφανές πλεονέκτημα του Onboard DC Grid είναι η μείωση του βάρους και της επιφάνειας του εγκατεστημένου ηλεκτρικού εξοπλισμού. Τα ακριβή ποσά διαφέρουν φυσικά ανάλογα με τον τύπο του πλοίου και την εφαρμογή, ωστόσο, τα συγκεντρωτικά στοιχεία μιας μελέτης που έγινε για PSV φαίνεται στον Πίνακα 1.

Εξοπλισμός	Ποσότη.	Τάξη Μεγέθους	Βάρος (Συμβατικό)	Βάρος (DC)
Γεννήτριες	4	2500 kVA	38000 kg	39000 kg
Κύριος Ηλ/κός AC Πίνακας	1	690 VAC	4450 kg	0 kg
Κύρια Διανομή DC	1	1000 VDC	0 kg	2400 kg
Διανομή AC	1	450V/ 230V	14490 kg	16530 kg
Κυρίως Πρόωση	2	3500 kVA	31980 kg	13680 kg
Πλευρικοί Προωστήρες	3	1200 kVA	26600 kg	13750 kg
Σύνολο			115520 kg	85360 kg

Πίνακας 1: Σύγκριση του βάρους του εγκατεστημένου ηλεκτρολογικού εξοπλισμού ενός PSV για το συμβατικό AC σύστημα έναντι του Onboard DC Grid της ABB. [5]

Τα στοιχεία του πίνακα 1 παρουσιάζουν την απομείωση βάρους συγκρίνοντας μόνο τον εγκατεστημένο εξοπλισμό. Περαιτέρω εξοικονόμηση αναμένεται ως αποτέλεσμα της πιο ευέλικτης τοποθέτησης των μονάδων και πιστεύεται ότι με προσεκτικότερο σχεδιασμό μπορεί να επιτευχθεί ένα πιο λειτουργικό σκάφος με αυξημένο χώρο για το ωφέλιμο φορτίο.

Η νέα αυτή τοπολογία της ABB επιτρέπει νέους τρόπους σκέψης για την επιχειρησιακή βελτιστοποίηση. Δεδομένου ότι το σύστημα είναι ευέλικτο συνδυάζοντας διαφορετικές πηγές ενέργειας, όπως στρεφόμενες μηχανές, στρόβιλους, κυψέλες καυσίμου, κλπ, υπάρχει μια τεράστια δυναμική για την εφαρμογή ενός πραγματικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας που λαμβάνει υπόψη τις τιμές και τη διαθεσιμότητα των διαφόρων καυσίμων. Μπορεί να είναι ακόμα λίγο πρώιμο για αυτό το είδος της βελτιστοποίησης, αλλά με το Onboard DC Grid το σκάφος είναι προετοιμασμένο για το μέλλον και κάθε ενεργειακή τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρισμού που μπορεί να είναι διαθέσιμη μέσα στα επόμενα 5-10 χρόνια.

Αυτό που είναι διαθέσιμο σήμερα και θα βοηθήσει στην επίλυση της παραδοσιακής πρόκλησης για την DP λειτουργία είναι η αποδοτική λειτουργία των μηχανών υπό μερικό φορτίο. Στις πλέον απαιτητικές εφαρμογές DP σήμερα η ηλεκτρική εγκατάσταση λειτουργεί με χωρισμένη παράλληλη διαμόρφωση σε δύο ίδια δίκτυα για λόγους ασφαλείας. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο σκάφος για να διατηρήσει τη θέση του ακόμη και αν στη μία πλευρά του σταθμού παραγωγής συμβεί σφάλμα. Ωστόσο, η λειτουργία με παράλληλες γραμμές AC διανομής δεν χρησιμοποιεί πλήρως τα οφέλη της ηλεκτρικής πρόωσης σε γενικές γραμμές καθώς η συνολική βελτιστοποίηση της λειτουργίας των μηχανών δεν είναι δυνατή. Με το Onboard DC Grid αυτή η λειτουργία μπορεί να δράσει πιο αποτελεσματικά καθώς η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να ρυθμιστεί και να βελτιστοποιηθεί για το απαιτούμενο φορτίο χωρίς

την ανάγκη να αλλάζει ο αριθμός των γεννητριών που είναι απευθείας συνδεδεμένες.

Η κύρια πρόκληση στη DC διανομή σε γενικές γραμμές ήταν να επιτευχθεί η πλήρης επιλεκτικότητα και προστασία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού σε παρόμοιο τρόπο όπως στη διανομή εναλλασσόμενου ρεύματος. Τα AC ρεύματα είναι από τη φύση τους πολύ πιο απλό να διακοπεί λόγω του περάσματος από το μηδέν σε κάθε ημιπερίοδο. Διακόπτες DC υπάρχουν σε κάποιο βαθμό, αλλά είναι πιο πολύπλοκοι, μεγαλύτερου όγκου και πιο κοστοβόροι από τους αντίστοιχους διακόπτες κυκλώματος AC.

Η φιλοσοφία προστασίας στο DC σύστημα της ABB βασίζεται σε ένα συνδυασμό από διακόπτες ασφαλείας και ελεγχόμενους διακόπτες. Συνοπτικά, οι ασφάλειες χρησιμοποιούνται για την προστασία και την απομόνωση των μονάδων αντιστροφεία σε περίπτωση σοβαρών βλαβών τους, παρόμοια με την τρέχουσα προστασία και απομόνωση των μετατροπέων συχνότητας χαμηλής τάσης. Επιπλέον, κυκλώματα εισόδου διαχωρίζουν τις μονάδες αντιστροφείων από τον κύριο DC ζυγό και παρέχουν τη δυνατότητα πλήρη ελέγχου της αντιστροφής ισχύος, τόσο σε περίπτωση σφάλματος όσο και σε φυσιολογικές συνθήκες, όπως για παράδειγμα σε κατάσταση πέδησης έλικας. Αυτό σημαίνει ότι τα σφάλματα σε έναν καταναλωτή δεν θα επηρεάσουν τους άλλους καταναλωτές που είναι συνδεδεμένοι με το κύριο σύστημα διανομής DC. Σε περίπτωση εκτεταμένων βλαβών επί του καταναμημένου DC ζυγού, το σύστημα προστατεύεται από τις γεννήτριες μέσω ενός ελεγχόμενου ανορθωτή με θυρίστρο, ο οποίος δρα και ως συσκευή προστασίας για τη γεννήτρια.

Ως προς την επιλεκτικότητα, απομονωτές έχουν εγκατασταθεί σε κάθε κλάδο του κυκλώματος προκειμένου να απομονωθούν αυτόματα τα προσβεβλημένα τμήματα από το υγιές σύστημα.

Εν ολίγοις, το Onboard DC Grid συμμορφώνεται πλήρως με τους κανόνες και τους κανονισμούς για την επιλεκτικότητα και τον εξοπλισμό προστασίας. Επιπλέον, κάθε ρεύμα σφάλματος εκκαθαρίζεται το πολύ εντός 40ms, κάτι που οδηγεί σε δραστική μείωση των επιπέδων ενέργειας σφάλματος σε σύγκριση με τα παραδοσιακά κυκλώματα προστασίας AC, όπου η διάρκεια σφάλματος μπορεί να φτάσει έως και το ένα δευτερόλεπτο. Αυτό το σύστημα προστασίας χαμηλής ενέργειας σφάλματος επιτρέπει στην τοπολογία να χρησιμοποιηθεί για εγκατεστημένη ισχύ μέχρι τουλάχιστον 20 MW.

Συμπερασματικά λοιπόν, το εποχούμενο σύστημα DC αυτό είναι ένας νέος τρόπος για τη διανομή ενέργειας για εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης στο πλοίο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιοδήποτε ηλεκτρολογικό σχεδιασμό πλοίου μέχρι τουλάχιστον 20MW και λειτουργεί με ονομαστική τάση 1000V DC. Η διανομή ισχύος μπορεί να γίνεται με όλες τις ηλεκτρονικές μονάδες μετατροπής συγκεντρωμένες σε ένα χώρο και σε μια ενιαία γραμμή (Multidrive) ή με τις μονάδες αυτές διαμοιρασμένες σε όλο το σκάφος και συνδεδεμένες με DC ζυγούς που φέρουν προστασία από βραχυκυκλώματα.

Τα βασικότερα αναμενόμενα πλεονεκτήματα που προκύπτουν για τον πλοιοκτήτη είναι τα εξής [5], [7], [8]:

Εξοικονόμηση καυσίμου έως 20%, με την εκμετάλλευση όλων των πλεονεκτικών χαρακτηριστικών των DC συστημάτων, όπως την εγκατάσταση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και μηχανών μεταβλητής ταχύτητας.

Βελτίωση του βαθμού απόδοσης κατά 5-10%.

Σημαντική μείωση των ρύπων και βελτίωση της απόδοσης της επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (Selective Catalytic Reduction – SCR).

Ελάττωση του θορύβου και των κραδασμών.

Μειωμένη φθορά των μηχανών και απαιτήσεις για συντήρηση, λόγω της αποτελεσματικότερης λειτουργίας τους – καλύτερη καύση των καυσίμων και λιγότερη κατανάλωση των ελαίων λίπανσης.

Βελτιωμένη δυναμική απόκριση του δικτύου με τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία μπορεί να βελτιώσουν και την απόδοση του DP με χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων και περισσότερη ακρίβεια θέσης.

Δυνατότητα για ενεργό προγραμματισμένο και βελτιστοποιημένο διαμοιρασμό των φορτίων μέσω ενός συστήματος διαχείρισης ισχύος στο πλοίο.

Νέα δυναμική για τη διαχείριση της ισχύος και της ενέργειας με κινητήριες μηχανές σε αναμονή αλλά άμεση διαθεσιμότητα (hot standby).

Μεγαλύτερος χώρος για τα εμπορεύματα, λόγω του μειωμένου όγκου και της μικρής επιφάνειας που καταλαμβάνει το ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα του πλοίου αλλά και της ευελιξίας στην τοποθέτησή του.

Περισσότερο εύχρηστος σχεδιασμός μέσω της δυνατότητας τοποθέτησης των ηλεκτρικών εξαρτημάτων σε διάφορες ευνοϊκές θέσεις εντός του σκάφους.

Πρόκειται για μία πλατφόρμα που επιδέχεται πολύ απλής μετατροπής και εγκατάστασης των μελλοντικών πηγών ηλεκτρικής ενέργειας.

Σημαντικά προτερήματα προκύπτουν όμως επίσης για τον σχεδιαστή μηχανικό και για τη ναυπήγηση [5], [7], [8]:

Ευελιξία στην εγκατάσταση των ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων.

Μείωση βάρους και καταληφθείσας επιφάνειας από τα ηλεκτρικά στοιχεία του δικτύου κατά 30%.

Ελάττωση της καλωδίωσης και των ηλεκτρικών συνδέσμων, λόγω της μείωσης των εξαρτημάτων και της χρήσης αγωγίμων ράβδων (bus ducts) για τη διανομή.

Νέες δυνατότητες για τη βελτιστοποίηση των κινητήριων μηχανών (prime movers) και με λιγότερους περιορισμούς στην ταχύτητα περιστροφής.

Έγκριση επί της αρχής (Approval in Principal – AIP) χορηγήθηκε στο Onboard DC Grid της ABB τον Ιανουάριο του 2014 από τον αμερικανικό νηογνώμονα American Bureau of Shipping (ABS). Η έγκριση αυτή αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την υποστήριξη και την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, της επικύρωσης, της εκτέλεσης και του ελέγχου των νέων κατασκευών DC πλοίων. [9]

➤ *Πλοίο Υποστήριξης Πλατφόρμας (PSV) Dina Star.*

Το πλοίο υποστήριξης πλατφόρμας (PSV) Dina Star (σχήμα 12) που παραδόθηκε από το ναυπηγείο Kleven στην νορβηγικής ιδιοκτησίας Myklebusthaug Offshore τον Απρίλιο του 2013, αποτελεί το πρώτο σκάφος που τροφοδοτείται από το πλήρες σύστημα του DC δικτύου της ABB: Onboard DC Grid, ώστε να παρέχει μεγαλύτερη εξοικονόμηση καυσίμου και χαμηλότερες εκπομπές ρύπων. Το Dina Star ήταν υποψήφιο για το βραβείο Ενεργειακής Απόδοσης 2013 της έκθεσης Nor-Shipping.

Μετά από σειρά δοκιμών και μετρήσεων αυτά τα χρόνια λειτουργίας από τη δανική Pon Power, που παρείχε τις κύριες μηχανές, και την ABB, παρουσιάστηκε έως 27% μείωση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) στην κανονική λειτουργία, 14% εξοικονόμηση καυσίμου κατά την DP λειτουργία και 30% χαμηλότερα επίπεδα θορύβου. [10]



Σχήμα 12: Το πλοίο PSV Dina Star. [10]

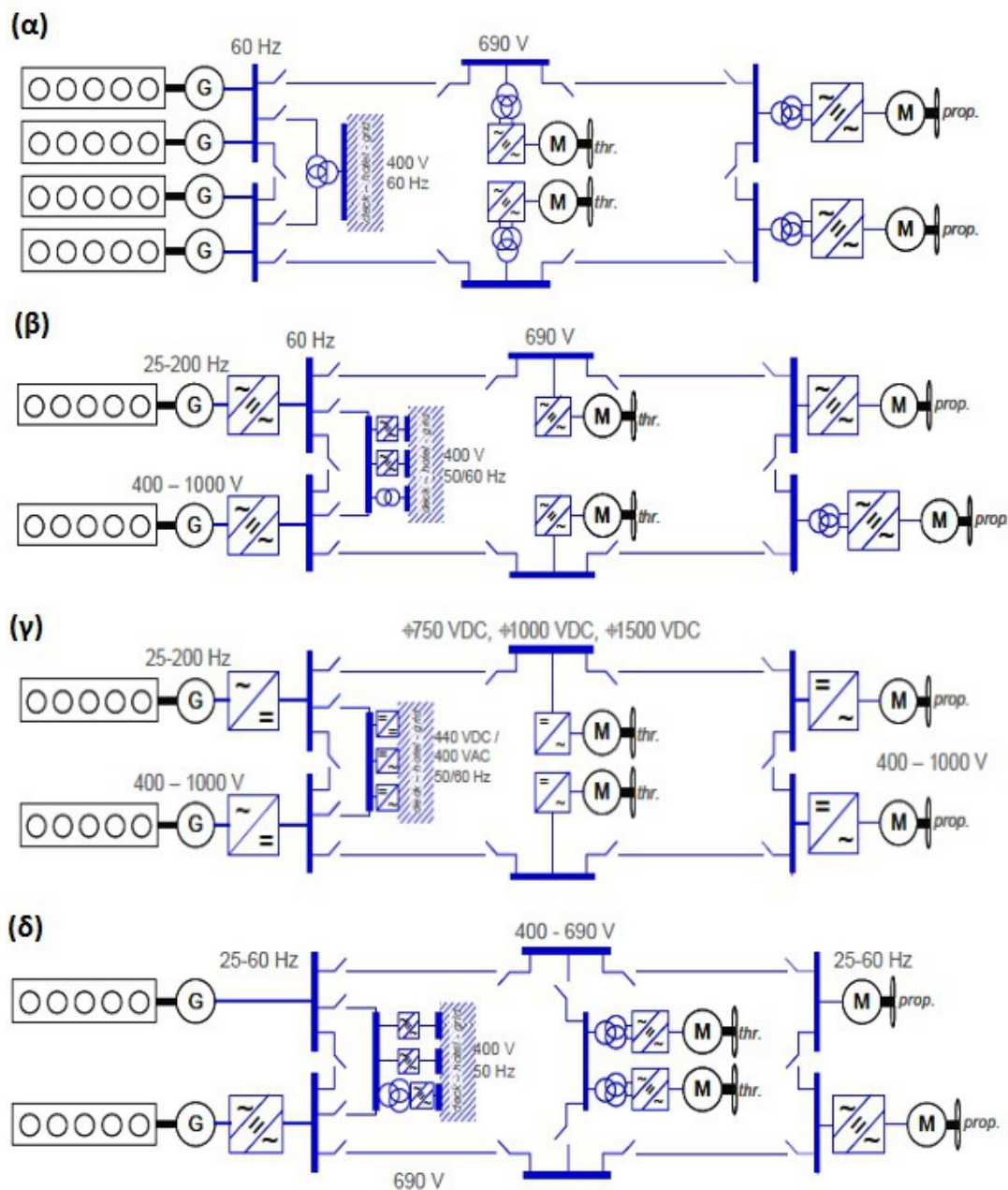
- Σύγκριση διαφόρων τοπολογιών για το πλοίο υποστήριξης υποβρύχιων δραστηριοτήτων (*Subsea Operation Vessel*) *Nor Valiant*.

Το 2008 κατασκευάστηκε το πλοίο “*Nor Valiant*” (σχήμα 13), το οποίο παρέχει υποστήριξη για δραστηριότητες σε σχέση με τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα ή σε ημικαταδύμενες εξέδρες γεωτρήσεων και πρόκειται για ένα πλοίο με αρκετά μεγάλο διάστημα λειτουργίας σε δυναμικό προσδιορισμό θέσης. Το ηλεκτρικό του δίκτυο, με ισχύ παραγωγής στα 6 MW, θεωρήθηκε από τα πλέον κατάλληλα για σύγκριση των διαφόρων υπαρκτών τοπολογιών.



Σχήμα 13: Το πλοίο υποστήριξης υποβρύχιων δραστηριοτήτων *Nor Valiant*. [11]

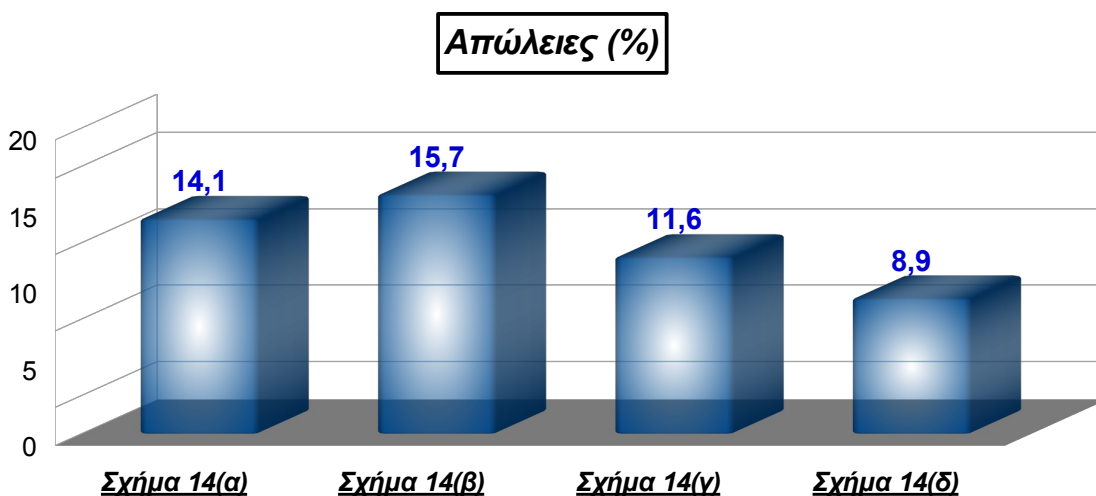
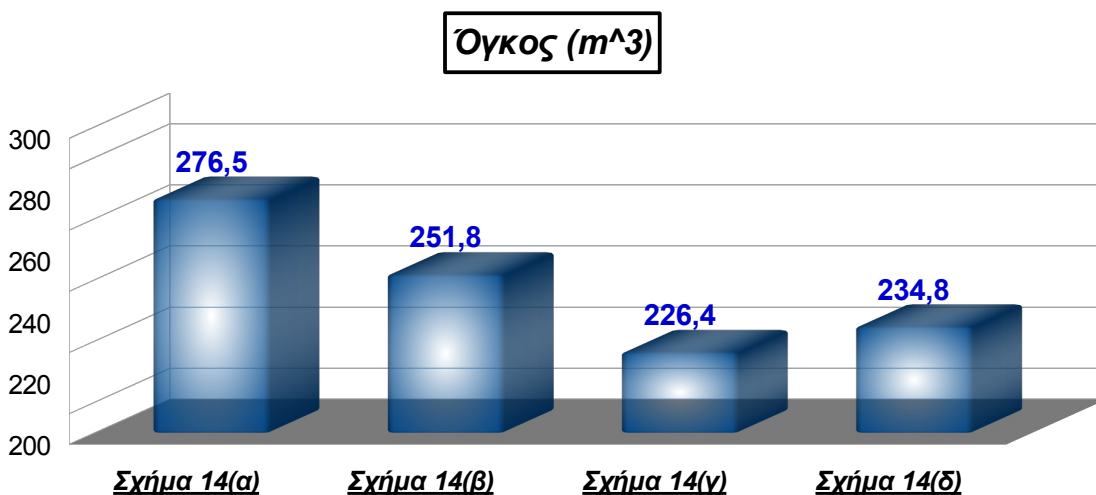
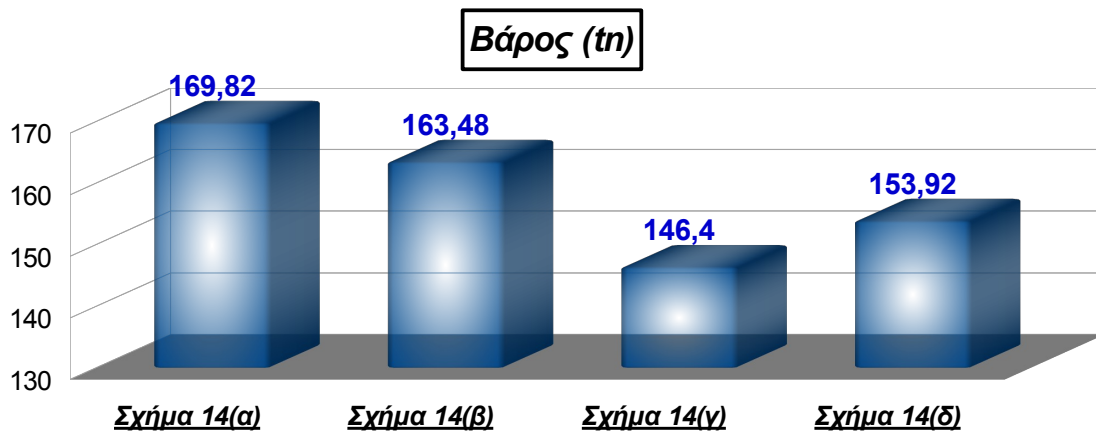
Οι γενικές τοπολογίες που συγκρίθηκαν παρουσιάζονται στο σχήμα 14.



Σχήμα 14: Οι τοπολογίες που συγκρίθηκαν με βάση το δίκτυο του Nor Valiant. [11]
 (α) Σύστημα σταθερής συχνότητας και τάσης AC (το τυπικό σύστημα πλοίου με ντίζελο-ηλεκτρική πρόωση).
 (β) Σύστημα το οποίο έχει ηλεκτρονικούς μετατροπείς σε όλους τους παραγωγούς και καταναλωτές (Full Power Converter – FPC), με σταθερής συχνότητας AC για τη διανομή ισχύος
 (γ) Τοπολογία αντίστοιχη με τη (β) αλλά με διανομή μέσω DC.
 (δ) Σχεδιασμός με AC μεταβλητής συχνότητας.

Τα στοιχεία για τη θεωρητική σύγκριση που παρατίθενται στο [11] έχουν ληφθεί από τους προμηθευτές του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού ισχύος ή βρέθηκαν με βάση ανάλυση της αγοράς και επιλογή των μέσων τιμών. Μετά από επεξεργασία των στοιχείων αυτών προκύπτουν τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στα παρακάτω γραφήματα με ονοματοθεσία για το εκάστοτε γράφημα ανάλογα με την αντίστοιχη τοπολογία του σχήματος 14 παραπάνω.

Με απλή παρατήρηση είναι εμφανή τα σαφή πλεονεκτήματα της τοπολογίας με διανομή σε DC. Οι απώλειες για το μεταβλητής συχνότητας AC δίκτυο μπορεί να έχουν λίγο καλύτερη τιμή από του DC αλλά λόγω πολυπλοκότητας δεν είναι δυνατόν να υπολογιστούν θεωρητικά με ακρίβεια καθώς πολλά από τα πλεονεκτήματα αλληλοαναιρούνται από μειονεκτήματα.



2.3 Βιβλιογραφία 2^ο Κεφαλαίου

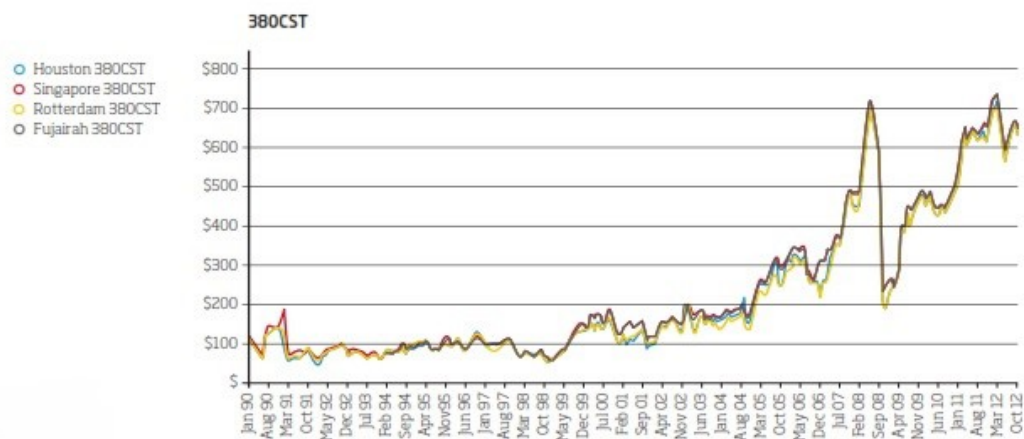
- [1] 2007_NGIPS_Technology_Dev_Roadmap_final.
- [2] DC-Ship_Proposal_012.
- [3] IEEE Std 1709™-2010 - Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships.
- [4] 2011_Analysis of Various All-Electric-Ship Electrical Distribution System Topologies.
- [5] ABB_12_10_OnboardDCGrid_Technical-Information.pdf.
- [6] Generations_2012_single_page.
- [7] Generations 2014.
- [8] Marinelive Workshop_Presentation_DC Grid
- [9] ABB is granted Approval in Principle for Onboard DC Grid concept by ABS.
- [10] ABB_ Tests confirm up to 27% fuel savings on ships from Onboard DC Grid.
- [11] 2011_Balashov - (NOR) Design of marine generators for alternative diesel-electric

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

***Τα βασικότερα μέρη του ΣΗΕ ενός DC-Πλοίου –
Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας***

3.1 Κινητήριες Μηχανές και άλλοι τρόποι μετατροπής ενέργειας σε ηλεκτρική - (Μετατροπείς πρωτογενούς ενέργειας με καύση ή χωρίς)

Η διεθνής συμφωνία για την καταπολέμηση της μόλυνσης του περιβάλλοντος, η ολοένα και αυξανόμενη τιμή στα ναυτιλιακά καύσιμα (βλ. Σχήμα 1) και οι εξελίξεις σε διάφορα άλλα μέτωπα, έχουν εγείρει αμφιβολίες στον εφοπλιστικό χώρο για το κατά πόσο οι σύγχρονες μέθοδοι παραγωγής ενέργειας στα πλοία τους είναι βιώσιμες. Τον προβληματισμό αυτόν έρχονται να τον ενισχύσουν ακόμα περισσότερο το έκτο παράρτημα του κανονισμού που έχει επιβάλλει το διεθνές συνέδριο για την καταπολέμηση της περιβαλλοντικής μόλυνσης λόγω των πλοίων (MARPOL 73/78 Annex VI) και ο Δείκτης της Ενεργειακής Απόδοσης του Σχεδιασμού (Energy Efficiency Design Index – EEDI) σε συνδυασμό με την πιθανή θεσμοθέτηση τέλους άνθρακα (carbon taxes). Επομένως, η ανάγκη για μείωση της κατανάλωσης των μηχανών και κατ' επέκταση των ρύπων μάς έχει κάνει να επιζητούμε τη βελτιστοποίηση των υπάρχοντων τοπολογιών αλλά και εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ενέργειας για τις απαιτήσεις των εκάστοτε φορτίων του πλοίου.



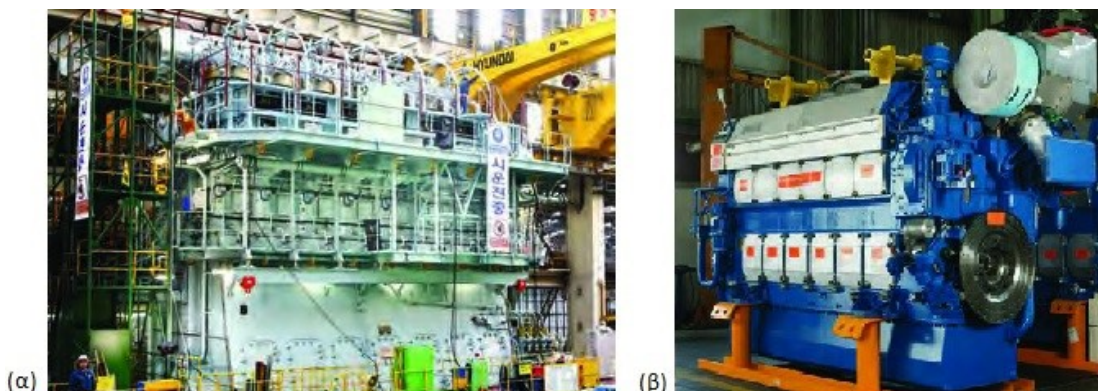
Σχήμα 1: Η διακύμανση της τιμής του 380cSt πετρελαίου σε τέσσερα διαφορετικά σημεία ανεφοδιασμού από το 1990 έως το 2012. [1]

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τις διάφορες επιλογές που μας παρέχει η ευελιξία του Ενοποιημένου Συστήματος Ισχύος (Integrated Power System – IPS) με συνεχές ρεύμα στο βραχυπρόθεσμο και μεσο-μακροπρόθεσμο επίπεδο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματά τους. Η συνεχής τάση που μας δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε μετατροπείς πρωτογενούς ενέργειας με καύση ή χωρίς με ευρύ φάσμα σε ταχύτητες περιστροφής και ευελιξία στην τοποθέτηση και τον σχεδιασμό.

A. Βραχυπρόθεσμες Επιλογές

➤ Πετρελαιομηχανές

Είναι οι πιο διαδεδομένες κινητήριες μηχανές στη ναυσιπλοΐα αυτή τη στιγμή. Αποτελούν μία πολύ αξιόπιστη και προσιτή λύση μηχανών εσωτερικής καύσης, με τους κατασκευαστές και τα πληρώματα να έχουν χρόνια γνώση και εμπειρία σε επισκευές και πρόσβαση σε ευρεία γκάμα ανταλλακτικών. Τα είδη μηχανών πετρελαίου που συναντάμε στη ναυτιλία είναι οι δίχρονοι χαμηλής ταχύτητας (σχήμα 2α), οι μεσαίων στροφών τετράχρονοι (σχήμα 2β) και οι τετράχρονοι υψηλών στροφών.



Σχήμα 2: Πετρελαιομηχανές πλοίου (α) χαμηλών στροφών(Wartsila RT-flex82T v. B), (β) μεσαίων στροφών (©Wärtsilä). [1]

Από τη δεκαετία του 1960 ξεκίνησε μια προσπάθεια βελτίωσης των μηχανών ντίζελ η οποία είχε να κάνει κυρίως με τρόπους υπερσυμπίεσης του αέρα ή βέλτιστης έγχυσης του καυσίμου στα ακροφύσια. Ωστόσο τη δεκαετία του 1990 άλλαξαν τα δεδομένα. Τότε ξεκίνησε η προσπάθεια για μείωση των αέριων ρύπων οξειδίων του αζώτου (NO_x) και του θείου (SO_x) ώστε να συμβαδίσουν με τα όρια που είχαν θεσπιστεί. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα μια σειρά από βασικές και δευτερεύουσες μεθόδους οι οποίες σχετίζονταν είτε με τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της μηχανής είτε με την ποιότητα και τον τρόπο έγχυσης του καυσίμου. Παράδειγμα τέτοιας εξέλιξης των ντίζελ μηχανών αποτελεί η τεχνολογία “Common Rail Injection” με ηλεκτρονικό έλεγχο στις δίχρονες μηχανές, συνήθως σε συνδυασμό με μεγάλη διαδρομή εμβόλου (extra-long stroke), η οποία τις κάνει ιδιαίτερα αποδοτικές από άποψη κατανάλωσης καυσίμου (μείωση έως 10%) και εκπεμπόμενων ρύπων [8].

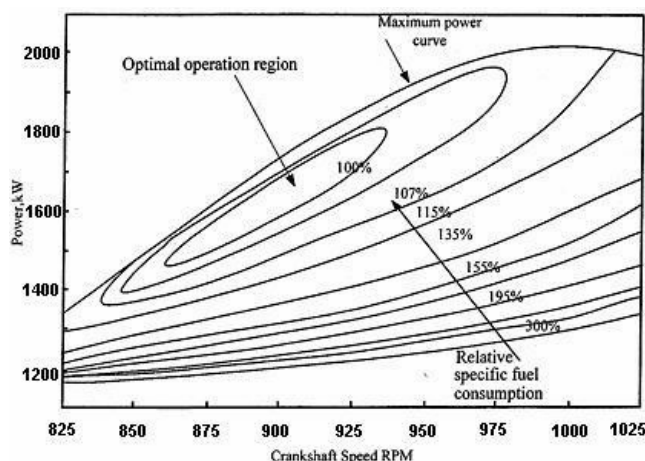
Συνοπτικά, οι πιο σύγχρονες βελτιώσεις στις διατάξεις των ντίζελ μηχανών είναι [8]:

- ✓ χρήση ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων έγχυσης,
- ✓ προσαρμογή στο προφίλ ταξιδιού (voyage profile adaption),
- ✓ ηλεκτρονική παρακολούθηση-έλεγχος των τμημάτων και
- ✓ συμμόρφωση με τη βαθμίδα II (Tier II) και τη βαθμίδα III (Tier III) των κανονισμών του Διεθνούς Οργανισμού Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization – IMO).

Με την καθιέρωση των παραπάνω τεχνικών έχει γίνει εφικτή η κατασκευή αποδοτικότερων δίχρονων και τετράχρονων μηχανών μικρότερης διάστασης και υψηλότερων στροφών.

Στο DC-Ship, επιπλέον, εκτός από αυτή καθεαυτή την βελτίωση της πετρελαιομηχανής, έχουμε ένα πρωταρχικό πλεονέκτημα του δικτύου που ευνοεί την αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Λόγω της αποσυσχέτισης της γεννήτριας από μια μοναδική σταθερή συχνότητα δικτύου, μπορούμε να κινούμε την κινητήρια μηχανή στις βέλτιστες στροφές ανάλογα με το φορτίο, δηλαδή μπορούμε να τις έχουμε μόνιμα άμεσα συζευγμένες, χωρίς γρανάζια-

μειωτήρες, και σε λειτουργία βέλτιστης απόδοσης. Στο σχήμα 3 φαίνονται οι καμπύλες σχετικής κατανάλωσης καυσίμου ανάλογα με την ισχύ για μια μηχανή ντίζελ 2MW. Το 100% υπονοεί την αποδοτικότερη κατάσταση, ενώ η καμπύλη 195% δείχνει ότι σε εκείνους τους συνδυασμούς ταχύτητας-ισχύος, καταναλώνουμε 95% παραπάνω καύσιμο από το βέλτιστο. Έτσι για παράδειγμα με φορτίο ίσο με 1300kW, εάν λειτουργούμε στις 900ΣΑΛ (8 πόλοι, 60Hz), η απόδοση είναι 55% χειρότερη από τη βέλτιστη, δηλαδή καταναλώνουμε 55% περισσότερο καύσιμο [2].



Σχήμα 3: Καμπύλες σχετικής κατανάλωσης πετρελαίου ανάλογα με την ισχύ και την ταχύτητα μηχανής 2MW. [2]

Σαφέστατα λοιπόν στην τοπολογία με συνεχές ρεύμα η επιλογή για τη γεννήτρια κινητήριας μηχανής πετρελαίου προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

- η τεχνολογία ντίζελ είναι ευρέως κατανοητή και αξιόπιστη,
- δεν χρειάζεται περαιτέρω εκπαίδευση στο πλήρωμα για το χειρισμό της,
- πολύ εύκολη η ανεύρεση ανταλλακτικών και μονάδων για επισκευή τους σε όλο τον κόσμο,
- το πετρέλαιο, σαν καύσιμο, είναι διαθέσιμο παγκόσμια,
- έχουν εφαρμοστεί πολλές βασικές και δευτερεύουσες μέθοδοι για τη μείωση των ρύπων και η έρευνα για καινούριες και η εξέλιξή τους είναι διαρκής και ειδικά στην περίπτωση πλοίου με ενοποιημένο ηλεκτρομηχανολογικό συστήματα με συνεχές ρεύμα, οι μηχανές πετρελαίου είναι δυνατόν να λειτουργούν υπό μερικό φορτίο, σε μεταβατικές και δυναμικές καταστάσεις, στο βέλτιστο βαθμό απόδοσης.

Το πετρέλαιο όμως έχει και ορισμένα πολύ βασικά μειονεκτήματα εν γένει:

οι ντιζελομηχανές παράγουν πολλούς και βλαβερούς ρύπους όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), οξειδία του αζώτου (NO_x) και του θείου (SO_x), διάφορες πτητικές οργανικές ενώσεις και αιωρούμενα σωματίδια. Πρέπει να σχεδιάζονται λοιπόν έτσι ώστε να ακολουθούν τις υποδείξεις του έκτου παραρτήματος της MARPOL (MARPOL Annex VI) και να συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό του EEDI του πλοίου,

οι εκπομπές θειούχων οξειδίων (SO_x) είναι ανάλογες με την περιεκτικότητα σε θείο του χρησιμοποιούμενου καυσίμου και για να συμβαδίσουν με τους κανονισμούς θα πρέπει να εγκατασταθεί σύστημα ελάττωσής του,

➤ *Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (Liquid Natural Gas – LNG).*

Τα καύσιμα των πλοίων αντιπροσωπεύουν έως και το 70% των λειτουργικών δαπανών τους. Το 2015 αναμένεται να τεθεί σε ισχύ το όριο του 0.1% περιεκτικότητας των καυσίμων σε θείο που χρησιμοποιούνται στις αμερικανικές και ευρωπαϊκές Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (Emission Control Areas – ECAs) και τα σκάφη που επιλέγουν να λειτουργούν με καύσιμα που είναι προϊόντα διύλισης εντός των περιοχών αυτών πρόκειται να δουν δραματική αύξηση στο κόστος λειτουργίας καθώς τα επιτρεπόμενα θα είναι κατά πολύ ακριβότερα από συμβατικά όπως το βαρύ μαζούτ (HFO). Επιπλέον, από το 2020 ή το 2025 σύμφωνα με τα σχέδια του IMO, όλα τα σκάφη θα πρέπει να καίνε καύσιμα περιεκτικότητας ίσης ή λιγότερης από 0,5% σε θείο παγκόσμια. Με αυτό κατά νου, οι ιδιοκτήτες και οι φορείς εκμετάλλευσης λαμβάνουν αποφάσεις για το πώς θα ανταποκριθούν σε αυτές τις οικονομικές και ρυθμιστικές προκλήσεις, σταθμίζοντας τα οφέλη από τις δύο μοναδικές βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις αυτή τη στιγμή: συστήματα καθαρισμού των καυσαερίων ή LNG ως καύσιμο

Η χρήση του φυσικού αερίου σε μηχανές εσωτερικής καύσεως δεν είναι κάτι καινούριο στα πλοία. Ξεκίνησε πριν από 15 περίπου χρόνια και χρησιμοποιείται κυρίως σε μηχανές τετράχρονες μέσης ταχύτητας, με επόμενο στόχο των μηχανικών η κατασκευή και δίχρονων χαμηλής ταχύτητας που θα μπορούν να λειτουργήσουν με αυτό [8]. Ένα σημαντικό βήμα προς την υιοθέτηση του φυσικού αερίου υπήρξαν τα ντιζελοηλεκτρικά συστήματα διπλού καυσίμου (Dual Fuel – DF) στα πλοία που μεταφέρουν υγρό φυσικό αέριο (LNG carriers) που είναι ήδη σε υπηρεσία είτε υπό κατασκευή. Η ιδιότητα του φυσικού αερίου να εξατμίζεται (boil-off gas) και να δημιουργεί μεγάλη πίεση στις δεξαμενές μεταφοράς του κατέστησε επιτακτική την ανάγκη να εγκατασταθεί στα πλοία αυτά επανυγροποιητής, ούτως ώστε να επαναμετατρέπεται σε υγρό και να επιστρέφεται στις δεξαμενές. Η ενεργοβόρα αυτή διαδικασία σε συνδυασμό με την παγκόσμια άνοδο της τιμής του πετρελαίου έκανε τους σχεδιαστές να σκεφτούν τη λύση του ως καύσιμο.

Το βασικό συστατικό του φυσικού αερίου είναι το μεθάνιο (CH₄) το οποίο όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο μειώνει τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) κατά 25% περίπου. Επιπροσθέτως, η μικρή συγκέντρωση αζώτου κατά την διαδικασία της καύσης, λόγω υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, ελαττώνει τα αζωτούχα οξείδια (NO_x) κατά 85%. Δηλαδή το LNG, ακόμα και χωρίς επιλεκτική καταλυτική αναγωγή, πληρεί τα όρια του 3^{ου} και πλέον αυστηρού επιπέδου (Tier III) του MARPOL Annex VI καθώς με αυτό έχουμε 20% λιγότερα αέρια του φαινομένου του θερμοκηπίου (greenhouse gases – GHG), συμπεριλαμβανομένου και του διαφυγόντος μεθανίου κατά την ατελή καύση. Επιπλέον, έχουμε μηδενικές εκπομπές θειούχων οξειδίων, λόγω της απουσίας θείου στη σύσταση, και μείωση κατά 99% στα αιωρούμενα σωματίδια [8]. Όσον αφορά τον EEDI, η χρήση LNG από μόνη της, σε ένα ήδη υπάρχον πλοίο, θα μπορούσε να μειώσει αυτόν το δείκτη κατά 25%.

Αντίθετα με το παγκόσμιο σύστημα σημείων ανεφοδιασμού του πετρελαίου, για το υγροποιημένο φυσικό αέριο δεν υπάρχει κάτι τέτοιο ώστε να υποστηρίξει τη λειτουργία πλοίων με αυτό το καύσιμο. Εντούτοις, τα περισσότερα από τα μεγάλα εμπορικά λιμάνια του κόσμου έχουν σταθμούς με φυσικό αέριο στην περιοχή, οι οποίοι εξυπηρετούν καταναλωτές στην ξηρά, που θα μπορούσαν να μετατραπούν εύκολα για να χρησιμοποιηθούν από τη ναυτιλία.

Για όλους αυτούς τους λόγους, τα επόμενα πέντε με δέκα χρόνια αναμένεται ραγδαία αύξηση στα LNG-πλοία. Ήδη, μόλις ένας προμηθευτής έχει πάνω από 2000 πωλήσεις σε μηχανές με καύσιμο LNG μέχρι τώρα.

Συμπερασματικά, από το φυσικό αέριο ως καύσιμο επωφελοώμαστε ως εξής:

η εμπειρία από μηχανές εσωτερικής καύσης με LNG, μολονότι περιορισμένη, κρίνεται ως θετική και ικανοποιητική μέχρι τώρα,

είναι πολύ σημαντικά τα οφέλη από τη μείωση των εκπομπών CO₂, NO_x, SO_x,

υπάρχουν ήδη ολοκληρωμένα συστήματα χρήσης του καυσίμου αυτού στη ναυτιλία, είναι σχετικά εύκολη η μετατροπή υφιστάμενων μηχανών εσωτερικής καύσης σε LNG μηχανές,

προς το παρόν είναι αισθητά φθηνότερο από τα συμβατικά ναυτιλιακά καύσιμα, δεν υφίσταται ο κίνδυνος διαρροής προς τη θάλασσα (όπως στη διαρροή πετρελαίου).

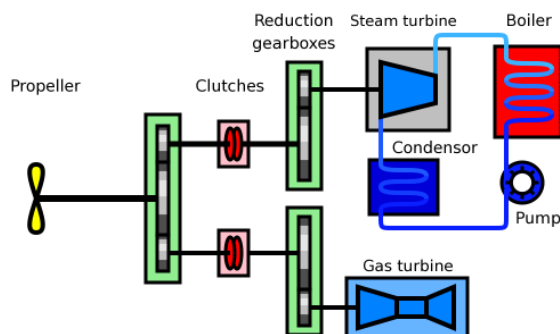
Κάποια σημεία προβληματισμού είναι τα παρακάτω:

πρέπει να αποφεύγεται η διαρροή μεθανίου κατά την τροφοδοσία του πλοίου με καύσιμα και κατά την διαδικασία της καύσης, καθώς επιβαρύνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου,

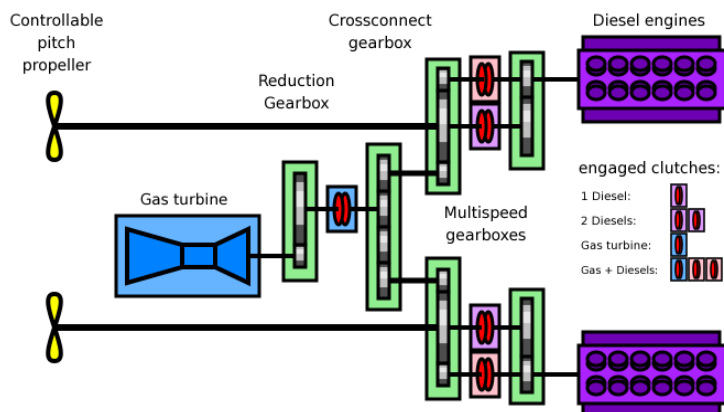
αυτή τη στιγμή είναι ελλιπές το παγκόσμιο σύστημα τροφοδοσίας.

➤ Αεριοστρόβιλοι

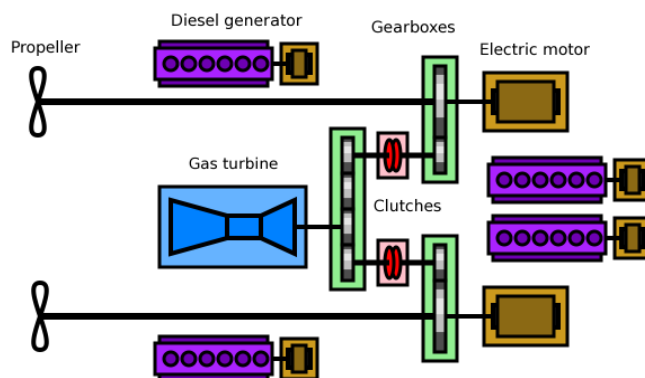
Οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιήθηκαν πρώτη φορά τη δεκαετία του 1950 ως προωστήριες μηχανές σε πολεμικά πλοία για δύο βασικούς λόγους. Πρώτον μπορούσε να επιτευχθεί πολύ υψηλή ταχύτητα λόγω της μεγάλης πυκνότητας ισχύος τους και δεύτερον η ευκολία με την οποία μπορούσαν να εκκινήσουν ή να διακοπεί η λειτουργία τους, δίνοντας στους χειριστές τη δυνατότητα για πολύ απότομες μεταβολές πολύ μεγάλης ισχύος. Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται είτε ως απευθείας για την πρόωση είτε ως κινητήριες μηχανές για τις γεννήτριες δημιουργώντας καινοτόμες υβριδικές τοπολογίες όπως η COSAG (συνδυασμός με ατμοστρόβιλους – σχήμα 4), η CODAG (συνδυασμός με πετρελαιοκινητήρες – σχήμα 5) και η CODLAG (μαζί με νηξελογεννήτριες – σχήμα 6), ανάλογα με τις απαιτήσεις του πλοίου.



Σχήμα 4: Διάγραμμα συνδυασμού αεριοστρόβιλου με ατμοστρόβιλο (COSAG).[3]



Σχήμα 5: Διάγραμμα συνδυασμού αεριοστρόβιλου με πετρελαιοκινητήρες (CODAG).[4]



Σχήμα 6: Διάγραμμα συνδυασμού αεριοστροβίλου με νηζελογεννήτριες (CODLAG). [5]

Για τα εμπορικά πλοία στην αγορά υπάρχουν δύο κυρίως τύποι αεριοστροβίλων: ο αεριοθούμενος και ο βιομηχανικού τύπου. Ο πρώτος τύπος είναι δυνατόν να παρέχει μεγάλη ισχύ αλλά απαιτεί πολύ υψηλής ποιότητας καύσιμα, ενώ ο δεύτερος γενικά δίνει κατώτερα επίπεδα ισχύος αλλά αξιώνει μικρότερη ποιότητα στα καύσιμα και έχει ευκολότερη συντήρηση. Τρεις από τους διαθέσιμους αεριοθούμενους στροβίλους είναι οι LM2500, WR21 και MT30 (σχήμα 7). Ο MT30 έχει μέγιστη τάξη ισχύος τα 40MW στους 15°C και θερμοαντική απόδοση λίγο πάνω από 40%. Επομένως, είναι κατάλληλος για τους περισσότερους τύπους και μεγέθη εμπορικών πλοίων. Ο WR21 είναι ένας πιο εξελιγμένος αεριοστροβίλος που περιλαμβάνει μεταβλητούς αεραγωγούς στον στάτορα ενώ συνδυάζει ταυτόχρονα intercooler στο συμπιεστή και τεχνικές ανάκτησης θερμότητας από την εξάτμιση. Κατασκευάστηκε για χαμηλή κατανάλωση εξειδικευμένου καυσίμου και έχει θερμοαντική απόδοση γύρω στο 43%. Η μηχανή αυτή χρησιμοποιείται σαν κινητήρια μηχανή για τη γεννήτρια των αντιτορπιλικών Τύπου 45 του Βασιλικού Πολεμικού Ναυτικού της Μ. Βρετανίας (Type 45 destroyers of the Royal Navy). Επιπρόσθετα, έχει πολύ αυξημένη απόδοση σε μερικό φορτίο.



Σχήμα 7: Ο αεριοστροβίλος MT30, κατάλληλος για τη ναυσιπλοΐα. ©Rolls-Royce plc 2013. [1]

Γενικά οι αεριοστροβίλοι έχουν πολύ μικρό βάρος σε σχέση με τις αντίστοιχες πετρελαιομηχανές, κάτι που κάτι που διευκολύνει τους σχεδιαστές στην τοποθέτηση τους σε διάφορα μέρη του πλοίου. Για παράδειγμα ο MT30 ζυγίζει μόλις 28 τόνους, συμπεριλαμβανομένων όλων των μερών του. Επίσης επιλογή τους στο DC-Ship για κινητήρια

μηχανή δείχνει πολύ συμφέρουσα καθώς οι υψηλές στροφές λειτουργίας ευνοεί τη χρήση μικρών σε μέγεθος και βάρος ηλεκτρογεννητριών. Οι σύγχρονες τοπολογίες είναι σχεδιασμένες να καίνε εμπορικά διαθέσιμα καύσιμα που πληρούν τα όρια των κανονισμών σε εκπομπές καυσαερίων. Ωστόσο τα καύσιμα αυτά είναι ακριβότερα αυτών των κλασικών ντηζελομηχανών. Η αναλογία, για παράδειγμα, της τιμής τους προς τη μέση τιμή του 180cSt και 360cSt πετρελαίου ήταν 1.5 τον Οκτώβριο του 2012. Γι' αυτόν το λόγο δεν προτιμώνται στη ναυτιλία.

Μία περαιτέρω τροποποίηση της τεχνολογίας του αεριοστρόβιλου είναι ο συνδυασμένος κύκλος με ατμοστρόβιλο που κινείται με ανάκτηση της θερμότητας από τα καυσαέρια της μηχανής μας, προκαλώντας αύξηση στη θερμομαντική απόδοση κατά την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Συγκεντρωτικά τα πλεονεκτήματα του αεριοστρόβιλου είναι τα εξής:

- είναι μια αποδεδειγμένα υψηλής πυκνότητας ισχύος τεχνολογία,
- το μικρό τους βάρος δίνει την ευχέρεια στον σχεδιαστή να τους τοποθετήσει σε διάφορα σημεία του πλοίου,
- οι εκπομπές σε NO_x είναι χαμηλές και σε SO_x είναι αμελητέες καθώς τα καύσιμα είναι ανώτερης ποιότητας,
- η συντήρηση και η αντικατάστασή τους είναι γενικά εύκολη.

Ενώ τα κυριότερα μειονεκτήματά τους είναι:

- τα καύσιμα των αεριοθούμενων αεριοστρόβιλων είναι ακριβότερα από τα συμβατικά των ντίζελ μηχανών αυτή τη στιγμή, καθώς είναι καλύτερης ποιότητας,
- όταν αυξάνεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος πέφτει η απόδοσή τους,
- οι θερμομαντική απόδοσή τους είναι χαμηλότερη από των πετρελαιομηχανών αντίστοιχης ισχύος.

B. Μεσο-Μακροπρόθεσμες Περιπτώσεις

➤ Βιοκαύσιμα

Τα πιο διαδεδομένα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς είναι το βιοντίζελ και η βιοαιθανόλη. Αυτά είναι μία δυννητικά μεσοπρόθεσμη εναλλακτική στα συμβατικά καύσιμα των πετρελαιομηχανών.

Το βιοντίζελ είναι το αποτέλεσμα της αντίδρασης ζωικών λιπών και φυτικών ελαίων (καρύδα, φοίνικας, κράμβη, σόγια) με μία αλκοόλη όπως η μεθανόλη. Τα καύσιμα αυτά είναι επίσης γνωστά ως Μεθυλεστέρες Λιπαρών Οξέων – ΜΛΟ (Fatty Acid Methyl Esters – FAME) και παρουσιάζουν διαφοροποίηση στις ιδιότητές τους ανάλογα με το μείγμα από το οποίο παράγονται. Επίσης έχουν την τάση να συγκρατούν μεγάλη ποσότητα νερού, το οποίο μπορεί να προκαλέσει υδρολυτικές αντιδράσεις και να μετατρέψει ένα μέρος των ΜΛΟ σε λιπαρά οξέα, που προκαλούν διάβρωση στις μεταλλικές επιφάνειες. Εναλλακτικά, αν αφαιρέσουμε την υγρασία από τα καύσιμα τότε παρατηρείται αύξηση στη συγκέντρωση των μικροβίων με συνέπεια το φράξιμο των φίλτρων. Πρόσφατες δοκιμές με ΜΛΟ στο φορτηγό πλοίο “Maersk Kalmar” έδειξαν ότι παρόλο ότι δεν πρόκειται για ιδεατά καύσιμα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν. Περαιτέρω έρευνες όμως, εν πλω ή στο εργαστήριο, είναι απαραίτητες προκειμένου να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα.

Η βιοαιθανόλη είναι το προϊόν της ζύμωσης φυτικών πηγών σακχάρων ή αμύλου όπως η ταπιόκα, το καλαμπόκι, το σόργο, το ζαχαρότευτλο, το ζαχαροκάλαμο και το σιτάρι. Σε αντίθεση με τους ΜΛΟ είναι άχρωμες, υγροσκοπικές, διαλυτές στο νερό και ασταθείς χημικές ενώσεις. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις νερού έχει την τάση να αποσπάται η αιθανόλη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία υψηλής περιεκτικότητας σε αλκοόλη διαλύματος νερού-αιθανόλης, το οποίο επικάθεται στον πυθμένα των δεξαμενών αποθήκευσης και είναι πιθανότατα εξαιρετικά διαβρωτικό.

Για να τροφοδοτήσουμε ολόκληρο τον στόλο των εμπορικών πλοίων παγκόσμια απαιτείται ενέργεια ίση με 7.3×10^{18} Joules/χρόνο. Χρησιμοποιώντας βιοκαύσιμα που προέρχονται από φυσικές πηγές όπως φυτικά έλαια θα χρειαζόταν έκταση όσο δύο φορές το Ηνωμένο Βασίλειο για την παραγωγή αυτών των πηγών ή αλλιώς 5% της παγκόσμιας έκτασης. Η ελαιοκράμβη, που χρησιμοποιείται στην παραγωγή βιοντίζελ, έχει υπολογιστεί ότι μας δίνει ισχύ περίπου $0,13 \text{ W/m}^2$ γης. Επομένως εγείρεται και ηθικό ζήτημα ως προς τη χρήση αυτής της γης για παραγωγή ενέργειας αντί τροφίμων.

Η επιστήμη της συνθετικής βιολογίας έχει επικεντρώσει στην δημιουργία της δεύτερης γενιάς βιοκαυσίμων, όπου πολλά από τα ανωτέρω ζητήματα δεν θα υφίστανται. Συνθετικά καύσιμα που θα βασίζονται σε ανώτερες αλκοόλες διακλαδισμένης αλυσίδας και νέα είδη του βακτηρίου *E. coli* (*Escherichia coli*) αλλά και σε άλγη και άλλους μικροοργανισμούς, όπως η μαγιά, θα κάνουν την εμφάνισή τους. Αυτά όμως δεν μπορούν παρά να λογίζονται ως μακροπρόθεσμες λύσεις περισσότερο, καθώς δεν έχουν εξεταστεί ακόμα επαρκώς παράγοντες όπως η αποθήκευση και η διαχείρισή τους, αλλά και οι επιπτώσεις τους στην υγεία και το περιβάλλον. Πιστεύεται, πάντως, ότι ως το 2030 τα βιοκαύσιμα θα παίξουν σημαντικό ρόλο στη ναυτιλία εάν κατορθώσουμε να παράγουμε τις απαιτούμενες ποσότητες [7].

Ένα ακόμα εναλλακτικό καύσιμο για τις μηχανές που λειτουργούν μέσω ανάφλεξης με συμπίεση που δείχνει προοπτικές είναι ο διμεθυλαιθέρας (di-methyl ether – DME). Προκύπτει από τη μετατροπή διάφορων πηγών όπως το φυσικό αέριο, ο γαιάνθρακας, υπολείμματα πετρελαίου και η βιομάζα. Το DME είναι γενικά εύχρηστο καθώς είναι παρόμοιο με το υγραέριο (Liquefied Petroleum Gas – LPG), διότι υγροποιείται όταν συμπιέζεται σε περισσότερα από 0.5MPa και θεωρείται μη τοξικό και φιλικό προς το περιβάλλον. Έχει μεγάλο δείκτη κετανίου και μπορεί να επιτευχθεί καύση χωρίς παραγωγή καπνού, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο. Για να επιτευχθούν όμως τα ίδια επίπεδα ενέργειας όπως

με τα συμβατικά ντίζελ καύσιμα, θα πρέπει η παροχή στον κύλινδρο να είναι μεγαλύτερη λόγω της μικρής πυκνότητας και ενθαλπίας ανάφλεξης του καυσίμου. Επίσης είναι απαραίτητη η χρήση πρόσθετων βελτιωτικών λίπανσης και αντιοξειδωτικών υλικών στεγανοποίησης για να επιτύχουμε λειτουργία χωρίς διαρροές. Παρά τα μειονεκτήματά του όμως, ο διμεθυλαιθέρας, έχει αποδειχθεί ότι παρέχει καύση υψηλής θερμαντικής απόδοσης, με χαμηλά επίπεδα εκπομπών NO_x και θορύβου, χωρίς αιθάλη. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι αυτό το καύσιμο αξίζει περαιτέρω έρευνας. Ωστόσο, για να χρησιμοποιηθεί στην παγκόσμια ναυσιπλοΐα, θα πρέπει να αναπτυχθεί επαρκές δίκτυο παραγωγής και διανομής.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα λοιπόν των βιοκαυσίμων είναι:

δυναμικά μπορούν να αποτελέσουν εναλλακτικά καύσιμα των συμβατικών μηχανών, τα συνθετικά βιοκαύσιμα που από ανώτερες αλκοόλες διακλαδισμένης αλυσίδας και νέα τύπους βακτηρίων *E. coli*, άλγεων και άλλων μικροοργανισμών, θα αποτελέσουν μία μεσομακροπρόθεσμη περίπτωση τηρουμένου ότι η παραγωγή θα ικανοποιήσει τη ζήτηση της αγοράς,

ο διμεθυλαιθέρας εμφανίζει αρκετά οφέλη ως εναλλακτικό καύσιμο,

τα συνθετικά καύσιμα μπορούν να προκύψουν μέσω μίας θερμοχημικής διαδικασίας αεριοποίησης της βιομάζας για την παραγωγή συνθετικού αερίου (syngas).

Τα σημεία στα οποία μειονεκτούν είναι:

τα βιοκαύσιμα πρώτης γενιάς εμφάνισαν διάφορα προβλήματα όταν χρησιμοποιήθηκαν σε πλοίο εν πλω, κάτι το οποίο αναμένεται να διορθωθεί με τα νέας γενιάς,

προς το παρόν, χρειάζονται σημαντικές εκτάσεις γης για την παραγωγή πρώτης γενιάς βιοκαυσίμων ώστε να καλυφθεί η ναυτιλιακή αγορά,

είναι πιθανόν να μην επαρκεί η παγκόσμια διαθέσιμη ποσότητα σε βιοκαύσιμα και βιομάζα για τις ανάγκες των πλοίων,

η αποθήκευση και η διαχείρισή αυτών των καυσίμων, όπως και οι επιπτώσεις τους στην υγεία και το περιβάλλον πρέπει να μελετηθούν περαιτέρω,

πρέπει να επιλυθούν τα προβλήματα που επισύρει η χρήση του διμεθυλαιθέρα από πλευράς λίπανσης και διάβρωσης της μηχανής, όπως και η δημιουργία δικτύου παραγωγής.

➤ *Πυρηνική Ενέργεια*

Η βασική διαφορά μεταξύ συμβατικών και πυρηνικών σταθμών παραγωγής έγκειται στον τρόπο παραγωγής του ατμού ο οποίος κινεί τους ατμοστρόβιλους. Σε ένα συμβατικό σταθμό αυτό γίνεται, όπως είναι γνωστό, με την καύση άνθρακα ή πετρελαίου στην εστία ενός ατμοπαραγωγού. Στον πυρηνικό σταθμό ο ατμοπαραγωγός αντικαθίσταται από ένα πυρηνικό αντιδραστήρα, όπου η ενέργεια η οποία εκλύεται υπό μορφή θερμότητας κατά τη σχάση του πυρηνικού καυσίμου μεταφέρεται σε ένα ψυκτικό μέσο, το οποίο είτε χρησιμοποιείται για να παράγει ατμό σε ένα εναλλάκτη θερμότητας ή, στην περίπτωση ψύξεως με νερό, το ίδιο το ψυκτικό μέσο αφήνεται να ατμοποιηθεί απευθείας [6]. Η πυρηνική ενέργεια επομένως αποτελεί μια δυναμικά ριζοσπαστική λύση, έχοντας μηδενικές εκπομπές CO₂ κατά την παραγωγή.

Η παραγωγή ενέργειας και η πρόωση με πυρηνικά δεν είναι κάτι το άγνωστο.

Χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά το 1955 στο υποβρύχιο “Nautilus” του αμερικανικού

πολεμικού ναυτικού. Από τότε, περί τους 700 πυρηνικούς αντιδραστήρες έχουν εγκατασταθεί σε πλωτά σκάφη, ενώ οι 200 είναι εν ενεργεία.

Υπάρχουν πολλά είδη αντιδραστήρων, καυσίμων, επιβραδυντών αλλά και τρόπων σχάσεως που θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε στα πλοία, ο πιο διαδεδομένος όμως είναι ο αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (Pressurized Water Reactor - PWR) με καύσιμο το ουράνιο. Το φυσικό ουράνιο περιλαμβάνει τρία ισότοπα: ^{238}U σε ποσοστό 99.3%, ^{235}U σε 0.7% και ^{234}U σε 0.005%. Το διασπασίμο στοιχείο στο καύσιμο είναι το ουράνιο 235 του οποίου ο πυρήνας, κατά την απορρόφηση βραδέων νετρονίων, υφίσταται ως επί το πλείστον “σχάση” σε δύο τμήματα με υψηλή κινητική ενέργεια. Κατά τη διαδικασία αυτή εκπέμπονται 2 ή 3 νετρόνια τα οποία επιβραδύνονται από τον “επιβραδυντή” μας (πεπιεσμένο νερό) πριν προκαλέσουν και αυτά σχάση με τη σειρά τους σε επόμενα άτομα ^{235}U [6]. Η ενέργεια των νετρονίων που απορροφάται από το ψυκτικό-επιβραδυντικό μέσο είναι δυνατό να μεταφέρεται σε ένα δευτερεύων κύκλο ατμού ώστε συνδυαστικά να έχουμε μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της αντίδρασης αυτής είναι:

- ✓ Έκλυση μεγάλης κινητικής ενέργειας (περί τα 200MeV ανά σχάση, σε σύγκριση με λίγα eV που εκλύονται κατά μια συνήθη χημική αντίδραση).
- ✓ Δυνατότητα αυτοσυντηρούμενης (αλυσιδωτής) αντίδρασης, η οποία οφείλεται σε πλεόνασμα νετρονίων μη απορροφούμενων, ή μη διαρρεόντων από το σύστημα κατά τη διάρκεια της διεργασίας.

Όπως προαναφέρθηκε μόνο το ουράνιο 235 μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους PWR, το οποίο όμως υπάρχει σε πολύ μικρή ποσότητα στη φύση. Οι απαραίτητες ποσότητες που χρειαζόμαστε μπορούν να βρεθούν εμπλουτίζοντας το απλό 238 ουράνιο ανάλογα με τις απαιτήσεις μας. Θεωρητικά μπορούμε να το εμπλουτίσουμε σε οποιοδήποτε βαθμό, όμως για “εμπορική” χρήση συμβιβάζομαστε με ποσοστά γύρω στο 5% ^{235}U . Για επίπεδα από 20% και πάνω υπόκεινται σε αυστηρούς ελέγχους λόγω των διεθνών διασφαλίσεων για την μη διασπορά των πυρηνικών όπλων και χρησιμοποιούνται μόνο σε εξειδικευμένες ή στρατιωτικές εφαρμογές.

Μία ακόμα πηγή προέλευσης για το διασπασίμο ^{235}U είναι το θόριο (^{232}Th). Είναι πιο άφθονο από το ουράνιο και τυπικά υπάρχει στο έδαφος σε συγκεντρώσεις γύρω στα 6ppm (μέρη ανά εκατομμύριο). Επίσης ο χρόνος ημιζωής των ακτινοβολούντων παραγώγων του είναι μικρότερος από αυτόν του ουρανίου. Με τους αντιδραστήρες θορίου, ανάλογα με τη διαμόρφωσή τους, μπορούμε να εξασφαλίσουμε πολύ σημαντική μείωση πυρηνικών αποβλήτων και έχουν μικρότερη πιθανότητα να χρησιμοποιηθούν για οπλική χρήση σε σχέση με τους κλασικούς αντιδραστήρες ουρανίου και πλουτωνίου.

Οι αντιδραστήρες με τηγμένο άλας είναι υποψήφιοι μελλοντικά για την παραγωγή ενέργειας στα πλοία, όμως ακόμα πρέπει να περάσει μια μακρά περίοδος έρευνας και μελέτης για να συμβεί αυτό. Δεν παύουν όμως να έχουν κάποια πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα για τη ναυσιπλοΐα, όπως το μικρό μέγεθος και βάρος, υψηλή θερμοκρατική απόδοση, η λειτουργία σε ατμοσφαιρική πίεση, η σταθερότητά του ακόμα και σε δυναμικές καταστάσεις και ο πολύ μικρότερος χρόνος ημιζωής των αποβλήτων του (ασφαλή επίπεδα ραδιενέργειας σε 300 χρόνια, σε αντίθεση με τα δεκάδες χιλιάδες χρόνια άλλων ακτινίδων).

Η εποχή της πυρηνικής ισχύος ξεκίνησε με αντιδραστήρες μερικών δεκάδων MW, με τον καιρό όμως φτάσαμε σε ισχείς όπως οι σημερινές των 4.5 GW θερμικής που αποδίδει 1.0 έως 1.6GW ηλεκτρική. Αυτοί είναι εμφανώς πολύ μεγάλοι για εφαρμογή σε πλοίο, ωστόσο τελευταία έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον και η προσοχή έχει στραφεί προς ένα νέου τύπου αντιδραστήρα, τον μικρό δομοστοιχειωτό αντιδραστήρα (small modular reactor - SMR). Ο δομοστοιχειωτός αντιδραστήρας είναι περισσότερο σαν ένα είδος πυρηνικής “μπαταρίας” με σαφώς μικρότερο μέγεθος και ισχύ εξόδου από τους προαναφερθέντες αντιδραστήρες. Έχει

36% θερμική σε ηλεκτρική ενεργειακή απόδοση και μπορεί να χωρέσει σε εμπορευματοκιβώτιο είκοσι ποδών (TEU container) και ζυγίζει περί τους 2 τόνους ανά ηλεκτρικό MW. Το “καύσιμο” του είναι ουράνιο χαμηλού (>20%) βαθμού εμπλουτισμού (Low Enrichment Uranium – LEU) [10]. Δημιουργήθηκε με σκοπό την μαζική παραγωγή, ώστε να είναι πιο προσιτός οικονομικά, πιο εύχρηστος και ικανός να εγκατασταθεί σε διάφορες τοπολογίες. Υπάρχουν πολλοί μικροί πυρηνικοί αντιδραστήρες στην αγορά αυτή τη στιγμή που αναφέρονται στον Πίνακα 1 και θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε τύπους πλοίων όπως αυτοί στον Πίνακα 2. Όλοι αυτοί που αναφέρονται είναι πεπεσμένοι ύδατος. Επίσης, όλοι έχουν ενσωματωμένα ατμογεννήτρια εκτός από τους KLT 40S, VBER 150 και SMR.

Μοντέλο	Χώρα & εταιρεία παρ/γής	Ισχύς Εξόδου (MW electric)
KLT 40S	Ρωσία OKBM	35
VBER 150	Ρωσία OKBM	110
SMART	Ν. Κορέα KAERI	100
MRX	Ιαπωνία JAERI	30
SMR	ΗΠΑ Westinghouse	200
mPower	ΗΠΑ B+W	125
NuScale	ΗΠΑ NuScale Power	45

Πίνακας 1: Μικροί δομοστοιχειωτοί πυρηνικοί αντιδραστήρες που υπάρχουν αυτή τη στιγμή διαθέσιμοι. [1]

Τύπος	Μέγεθος	Αναγκαία Ισχύς (MW)
Φορτηγό πλοίο	320000 dwt	30
Πλοίο μεταφοράς Container	12000 TEU	80
Κρουαζιερόπλοιο	100000 dwt	70

Πίνακας 2: Τύποι πλοίων που μπορούν να εγκατασταθούν μικροί δομοστοιχειωτοί πυρηνικοί αντιδραστήρες με την ζητούμενη ισχύ τους. [1]

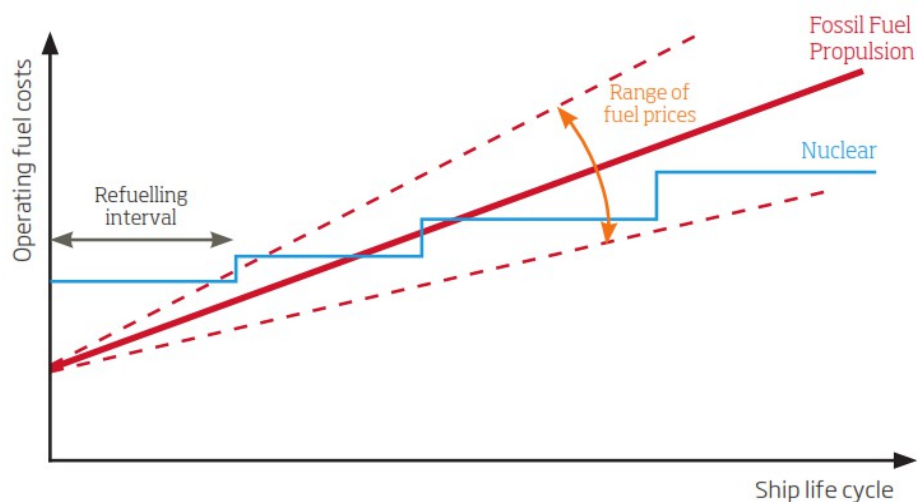
Για τον σχεδιασμό και την κατασκευή πυρηνικών εμπορικών πλοίων είναι απαραίτητες σημαντικές αλλαγές όσον αφορά την προστασία και την ασφάλεια, ενώ η όλη διαδικασία θα πρέπει να συμβαδίζει με τις αρχές και τις απαιτήσεις της Διεθνούς Οργάνωσης Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency – IAEA), προσαρμοσμένες στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Η ποσότητα των καυσίμων που χρησιμοποιούν οι PWR είναι σαφώς μικρότερη σε σύγκριση με αυτή των συμβατικών σε συμβατικές μηχανές. Για παράδειγμα, το βάρος του ουρανίου εμπλουτισμένου με ^{235}U κατά 3.5% που θα χρησιμοποιούνταν από ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων 12500 TEU για ένα ταξίδι από το λιμάνι του Ρότερνταμ έως την ανατολική ακτή των ΗΠΑ στους 25 κόμβους θα ανέρχονταν σε μερικά κιλά, ενώ σε βαρύ μαζούτ θα χρειαζόμασταν περί τους 1550 τόνους υπό φυσιολογικές συνθήκες. Με την πυρηνική ενέργεια λοιπόν μπορούμε να έχουμε μία εντελώς διαφορετική αντίληψη στη σχεδίαση του πλοίου ως προς την χωρητικότητα εκπομπής και την ταχύτητά του.

Όσον αφορά την προστασία του πληρώματος από την ραδιενέργεια από την εφαρμογή πυρηνικών υπάρχει ήδη η εμπειρία και η γνώση που χρειάζεται. Με κατάλληλο σχεδιασμό της θωράκισης του αντιδραστήρα η ποσότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι πολύ μικρή. Η

ακτινοβολία που δέχονται τα πληρώματα πυρηνικών υποβρυχίων θεωρείται κατά πολύ μικρότερη από αυτή που δέχεται ο πληθυσμός της γης. Παρά ταύτα είναι απαραίτητος ένας μηχανισμός παρακολούθησης των επιπέδων της.

Λαμβάνοντας υπόψη το κόστος του κύκλου ζωής του πυρηνικού πλοίου, ενώ η αρχική επένδυση είναι μεγαλύτερη, η κλίση της καμπύλης είναι πολύ μικρότερη, με κλιμακωτές αυξήσεις κατά τον ανεφοδιασμό με καύσιμα όπως διακρίνεται στο σχήμα 8. Αντίθετα, τα διάφορα συμβατικά πλοία έχουν χαμηλότερο αρχικό κόστος αλλά η κλίση της καμπύλης είναι μεγαλύτερη, αντικατοπτρίζοντας την κατανάλωση του συμβατικού καυσίμου και τις μεταβολές στην τιμή του.



Σχήμα 8: Σχηματικό διάγραμμα για το δια-βίου κόστος καυσίμων του πλοίου. [1]

Η πυρηνική ενέργεια λοιπόν είναι πολύ πιο “πράσινη” από τα συμβατικά καύσιμα και δείχνει να έχει πρακτική εφαρμογή σε πολεμικά πλοία και υποβρύχια. Πάρα την πείρα που έχουμε αποκτήσει στη λειτουργία αντιδραστήρων πεπιεσμένου ύδατος, η κατασκευή ενός εμπορικού πυρηνικού πλοίου που θα ταξιδεύει διεθνώς περιλαμβάνει αυξημένες δυσκολίες και κόστη τα οποία δεν είναι πλήρως εμφανή και διαχειρίσιμα αυτή τη στιγμή, δεν παύει όμως να είναι εφικτή [9], [10]. Δυσκολίες θα προκύψουν σε διάφορα ζητήματα όπως: στον σχεδιασμό και την εκτέλεσή του, στη λειτουργία, την εκπαίδευση των πληρωμάτων και του προσωπικού ξηράς, στους κανονισμούς για τα πυρηνικά, στην ασφάλεια, στην κοινή γνώμη, τη διαχείριση των αποβλήτων και ούτω καθεξής. Η χρήση μικρών δομοστοιχειωτών αντιδραστήρων ή αντιδραστήρων τετηγμένου άλατος μπορεί να μετριάσει πολλές από αυτές τις δυσκολίες, αλλά σε καμία περίπτωση να τις εξαλείψει.

Στη σημερινή εποχή, τόσο σύντομα μετά το ατύχημα της Φουκουσίμα, μπορεί οι κοινωνίες παγκόσμια να διατηρούν επιφυλάξεις έναντι της πυρηνικής ενέργειας. Μελλοντικά όμως, η αναπόφευκτη μείωση στη χρήση ορυκτών καυσίμων, είτε λόγω κανονισμών που αφορούν τη μόλυνση του περιβάλλοντος είτε λόγω ελάττωσης των κοιτασμάτων, θα αναγκάσει την κοινή γνώμη και κατ' επέκταση και τους πολιτικούς να αναθεωρήσουν. Η ανάπτυξη τεχνολογιών με βάση το θόριο (^{232}Th) ή το τετηγμένο άλας, οι οποίες μετριάζουν πολλά από τα ζητήματα που προκαλεί το ουράνιο ως προς την ασφάλεια και τα πυρηνικά απόβλητα, μπορεί να εξελιχθούν στο σημείο να είναι δυνατή και αποδεκτή η εφαρμογή τους σε πλοία μακροπρόθεσμα ή και μεσοπρόθεσμα ακόμα [7]. Πριν όμως από αυτήν την πυρηνική αναγέννηση θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι διαθέσιμες ποσότητες σε “καύσιμα”. Σύμφωνα με το σενάριο των Deutch κλπ, η ποσότητα του ουρανίου επαρκεί για αύξηση σε 1000 αντιδραστήρες των

1000MWe (το 19% της παγκόσμιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας) έως το 2050 και για 40 χρόνια επιπλέον με τον ίδιο ρυθμό αύξησης [11]. Σ' αυτό όμως δεν έχουν υπολογιστεί και τα εμπορικά πλοία. Πρέπει λοιπόν, πριν απ' όλα, να ξεκινήσει ένα είδος ανακύκλωσης των πυρηνικών αποβλήτων. Η πρόοδος της τεχνολογίας και η εξέλιξη των αντιδραστήρων ταχέων νετρονίων θα επιτρέψουν την επαναχρησιμοποίηση των εξαντλημένων πυρηνικών αποθεμάτων με αποτέλεσμα να έχουμε πρακτικά απεριόριστα καύσιμα για 1500 χρόνια. Ωστόσο με την τρέχουσα τεχνολογία χρειάζεται σχεδόν 40-50 χρόνια για να παραχθούν περισσότερα καύσιμα [10]

Συνοψίζοντας, τα κυριότερα θετικά σημεία της πυρηνικής ενέργειας είναι:

κατά την λειτουργία των πυρηνικών γεννητριών δεν εκλύονται καθόλου CO₂, NO_x, SO_x, πτητικές οργανικές ενώσεις και σωματίδια,

υπάρχει σημαντικός όγκος γνώσης και εμπειρίας στον σχεδιασμό και την ασφαλή λειτουργία πυρηνικών συστημάτων σε πλωτά σκάφη, ειδικά στην περίπτωση σχεδιασμών με αντιδραστήρες πεπλεγμένου ύδατος (PWR),

η εφαρμογή του πυρηνικού σταθμού παραγωγής είναι κατάλληλη και για εμπορικά πλοία,

οι μικροί δομοστοιχειωτοί αντιδραστήρες ή οι αντιδραστήρες τετηγμένου άλατος μπορεί να αμβλύνουν πολλά από τα ζητήματα των πυρηνικών, αλλά δεν μπορούν να τα εξαλείψουν,

προσφέρει περαιτέρω ευελιξία στο σχεδιασμό και τον προγραμματισμό της λειτουργίας σε σχέση με την ταχύτητα, το σχέδιο του κήτους και τον αριθμό των πλοίων που χρησιμοποιούνται για ένα δρομολόγιο,

το κόστος του καυσίμου πληρώνεται εξ αρχής μαζί με τον αντιδραστήρα και έτσι γλιτώνουμε τις διακυμάνσεις των τιμών για σημαντικές περιόδους λειτουργίας.

Η πυρηνική ενέργεια όμως έχει και ορισμένα αρνητικά σημεία όπως:

οι κλασικές μέθοδοι σχεδιασμού, ναυπήγησης και λειτουργίας των εμπορικών πλοίων θα χρειαστούν πλήρη αναδιάρθρωση καθώς τα νέα σκάφη θα τελούν υπό νέους κανονισμούς ασφάλειας και μηχανικής,

σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας υπάρχουν επιπλέον ζητήματα που αφορούν την ανάπτυξη της πυρηνικής τεχνολογίας που απαιτούν επίλυση. Αυτά περιλαμβάνουν διεθνείς κανονισμούς, την αρνητική προδιάθεση της κοινής γνώμης, το αρχικό κόστος κεφαλαίου και τη χρηματοδότηση, την κατάρτιση των πληρωμάτων, τον ανεφοδιασμό καυσίμων, την ασφαλή αποθήκευση των πυρηνικών αποβλήτων, τη δημιουργία υποδομών και τη συντήρηση ενός συστήματος υποστήριξης τους και τα πλάνα αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης.

➤ *Υδρογόνο και άλλα εναλλακτικά καύσιμα*

Το υδρογόνο (H₂) από πολλούς θεωρείται το καύσιμο του μέλλοντος. Για την παραγωγή του χρειάζεται ένα ποσό ενέργειας η οποία θα προέρχεται είτε από συμβατικά ορυκτά καύσιμα είτε από εναλλακτικές πηγές όπως αιολική, υδροηλεκτρική, ηλιακή, πυρηνική σε εγκαταστάσεις στην ξηρά. Αυτή τη στιγμή όλο όσο χρησιμοποιείται στη βιομηχανία προέρχεται από το φυσικό αέριο. Το υγρό υδρογόνο έχει πολύ μεγαλύτερη ειδική θερμότητα ανά μονάδα βάρους από τα κλασικά καύσιμα (βλ. Πίνακα 3) αλλά καταλαμβάνει πολύ περισσότερο χώρο για αποθήκευση. Συγκεκριμένα, για αποθήκευση υπό πίεση 700bar, οι δεξαμενές θα έπρεπε να είναι τουλάχιστον έξι φορές μεγαλύτερες. Τα πλοία που θα

χρησιμοποιήσουν το υγρό υδρογόνο θα χρειαστούν κατασκευές που καταλαμβάνουν πολύ από τον περιορισμένο χώρο τους και έτσι ίσως φανεί δύσκολη η υιοθέτησή του ως εναλλακτική. Ένα σημαίνον πλεονέκτημα του υγρού H_2 είναι ότι δεν απελευθερώνει καθόλου CO_2 και SO_x στην ατμόσφαιρα, ενώ τα NO_x μπορούν να περιοριστούν με τους κλασικούς τρόπους όπως και στα υπόλοιπα καύσιμα. Ωστόσο, το ότι είναι ένα εξαιρετικά εύφλεκτο καύσιμο και τα συστήματα υψηλής πίεσης και κρυογονικότητας που απαιτούνται θέτουν κάποια επιπλέον σχεδιαστικά ζητήματα. Ζητήματα τα οποία συναντάμε και στα πλοία με LNG ή LPG αλλά σε μικρότερο βαθμό. Κάπου εδώ όμως πρέπει να σημειώσουμε ότι το H_2 είναι ίσως η σημαντικότερη επιλογή για αξιοποίηση σε κυψέλες καυσίμου, στις οποίες έχουμε και μηδενικές εκπομπές NO_x .

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι εκτός από το υδρογόνο, υπάρχουν και άλλα καύσιμα που μπορεί να εξελιχθούν μελλοντικά σε σημαντικές εναλλακτικές των συμβατικών. Μέσα που μπορεί να μην ενέχουν τη χημική ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου αλλά είναι πιθανόν πιο εύχρηστα. Μερικά απ' αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 3 [12].

Καύσιμο	Τυπική Ενεργειακή Πυκνότητα
Υδρογόνο	142.0 MJ/kg
Αιθανόλη	29.7 MJ/kg
Αμμωνία	17.0 MJ/kg
Βενζίνη (για αυτοκίνητα)	45.8 MJ/kg
Μεθάνιο	55.5 MJ/kg
Μεθανόλη	22.7 MJ/kg

Πίνακας 3: Ενεργειακή πυκνότητα διαφόρων δυνητικών καυσίμων. [12]

Αντίστοιχα με το LNG και τα άλλα εναλλακτικά καύσιμα που έχουμε αναφέρει μέχρι τώρα θα χρειαστεί και εδώ η δημιουργία εγκαταστάσεων διανομής H_2 σε ευρεία κλίμακα ώστε να είναι ρεαλιστική η χρήση του για υπερπόντια ταξίδια ανά τον κόσμο.

Σημειώνοντας λοιπόν κάποια από τα πλεονεκτήματα του υδρογόνου έχουμε ότι:

- το υγρό υδρογόνο έχει μηδενικές εκπομπές CO_2 και SO_x κατά την καύση του,
- για την παραγωγή του χρησιμοποιούνται μονάδες στην ξηρά, κάτι που προσφέρει πολλές εναλλακτικές στις πηγές ενέργειας που θα εκμεταλλευτούμε,
- μπορεί να λειτουργήσει ως καύσιμο στις μηχανές εσωτερικής καύσης αλλά και στις κυψέλες καυσίμου,
- η καύση του παράγει μεγάλα αποθέματα νερού.

Ωστόσο, τα σημαντικότερα μειονεκτήματα του είναι:

- δεν έχει δοκιμαστεί ακόμα σχεδόν καθόλου στη ναυσιπλοΐα,
- έχει κάποια ζητήματα ασφάλειας που πρέπει να ληφθούν υπόψη,
- έχει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα,
- είναι απαραίτητη η δημιουργία παγκόσμιου δικτύου τροφοδοσίας H_2 ώστε να καταστεί μία βιώσιμη επιλογή για τη ναυτιλία.

➤ *Πεπιεσμένος Αέρας και Υγρό Άζωτο*

Ο πεπιεσμένος αέρας και το υγρό άζωτο χρησιμοποιούνται για την κίνηση κάποιου στροβίλου και αποτελούν πιθανές επιλογές για το απώτερο μέλλον. Ιδιαίτερη μελέτη, έρευνα και δοκιμές είναι απαραίτητες προκειμένου να διαπιστωθεί εάν έχουν πρακτική εφαρμογή στη ναυτιλία. Πρόκειται ουσιαστικά για περιπτώσεις μέσω αποθήκευσης ενέργειας (compressed air energy storage – CAES και cryogenic energy storage - CES) καθώς η συμπίεση και η παραγωγή τους αντίστοιχα γίνεται σε εγκαταστάσεις στην ξηρά, κατά προτίμηση από εναλλακτικές πηγές ενέργειας, και χαρακτηρίζονται από μικρή ενεργειακή πυκνότητα. Για την εφαρμογή τους χρειάζονται, για τον μεν πεπιεσμένο αέρα, σύστημα υψηλής πίεσης και για το υγρό άζωτο, κρυογονικό σύστημα.

Τα θετικά τους αποτελούν τα εξής σημεία:

παράγουν μηδενικές εκπομπές ρύπων όταν χρησιμοποιούνται,
μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικές μορφές ενέργειας για την παραγωγή του υγρού αζώτου και την συμπίεση του πεπιεσμένου αέρα,
ως αποθηκευτικά μέσα, έχουν κοινά οφέλη για το ηλεκτρολογικό σύστημα με τις μπαταρίες και τους πυκνωτές.

Ενώ στα αρνητικά συμπεριλαμβάνονται:

είναι αναγκαία η ανάπτυξη δίκτυου παροχής και διανομής,
το μέγεθος, το επίπεδο πίεσης που επιδέχονται και η κρυογονική δυνατότητα, για την περίπτωση του υγρού άζωτου, των δεξαμενών αποθήκευσης του πλοίου θα καθορίζουν το μέγεθος της αποθηκευμένης ενέργειας και επομένως τις δυνατότητες αυτών των συστημάτων,
ελλοχεύει ο κίνδυνος έκρηξης των δεξαμενών που βρίσκονται σε υψηλή πίεση,
η διάβρωση των δεξαμενών υψηλής πίεσης, που προκαλεί το θαλάσσιο περιβάλλον, είναι ένα σημαντικό πρόβλημα,
είναι ιδιαίτερα άγνωστη η συμπεριφορά τους σε τοπολογίες πλοίων,
είναι μέσα αποθήκευσης ενέργειας με μικρή ενεργειακή πυκνότητα, επομένως, πιθανότατα θα μπορούσαν να εφαρμοστούν μόνο για μεταβατικές καταστάσεις ή σύντομα δρομολόγια.

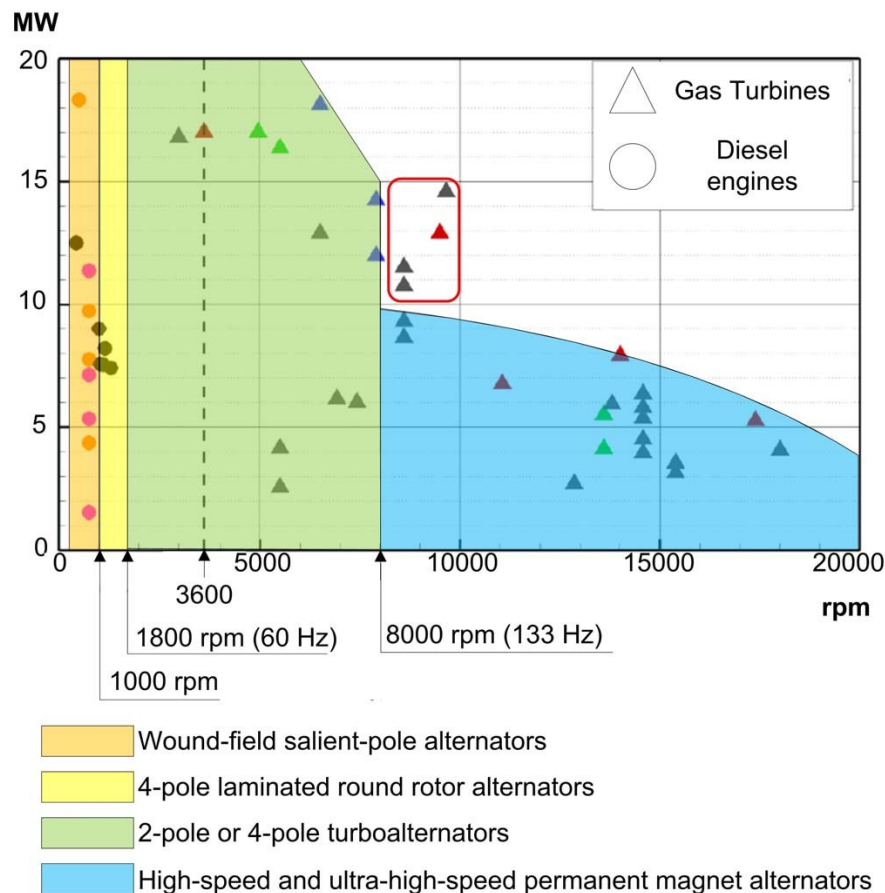
3.2 Γεννήτριες

Ένα από τα ισχυρότερα προτερήματα της πρότασης για διανομή της ισχύος στο δίκτυο πλοίου με συνεχές ρεύμα είναι η αποδέσμευση των ηλεκτρικών γεννητριών από τη σταθερή συχνότητα των 50Hz ή 60Hz. Για την παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος δεν χρειάζεται να λειτουργούν σε σταθερές στροφές. Αντίθετα είναι θεμιτό να λειτουργούν σε οποιαδήποτε ταχύτητα, σε οποιαδήποτε συχνότητα, ώστε να βρισκόμαστε πάντοτε στο βέλτιστο σημείο απόδοσης των στρεφόμενων κινητήριων μηχανών, ανάλογα με την ζήτηση σε ισχύ του δικτύου εκείνη ακριβώς τη στιγμή. Στο σύστημα παραγωγής μας πλέον είναι δυνατή η άμεση σύζευξη της γεννήτριας με την κινητήρια μηχανή, χωρίς τα ογκώδη και βαριά κιβώτια ταχυτήτων, ακόμη και για πολύ υψηλές ταχύτητες. Ένας εναλλακτήρας που λειτουργεί σε πολύ υψηλές στροφές, μπορεί να δώσει την ίδια ισχύ με πολύ μικρότερη ροπή καθώς, ως γνωστόν:

$$P = \omega \times T$$

όπου P: παραγόμενη ισχύς, ω : ταχύτητα περιστροφής και T: ροπή. Επομένως όσο αυξάνεται η ταχύτητα μειώνεται το μέγεθος και το βάρος της μηχανής μας.

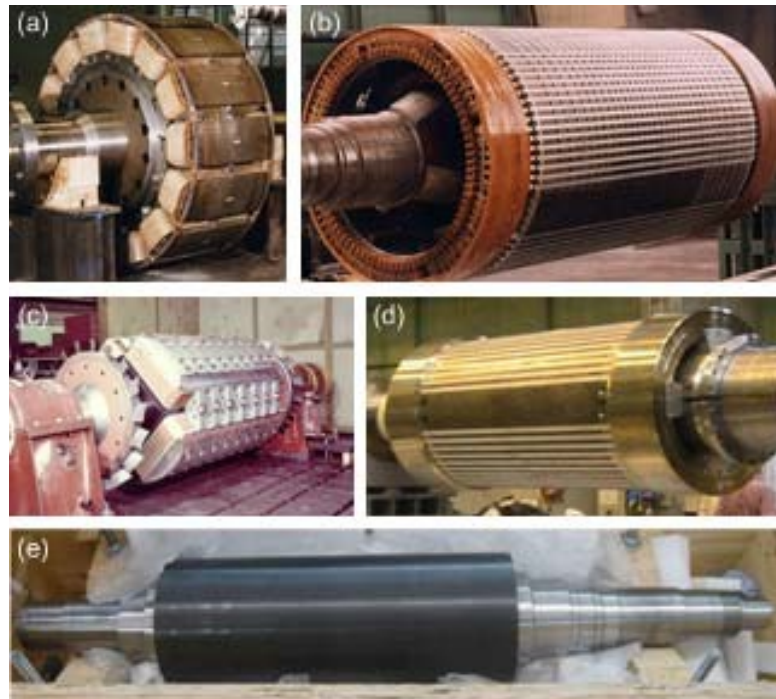
Η υιοθέτηση του συνεχούς ρεύματος ως κύριο μέσο διανομής ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο λοιπόν μας δίνει τη δυνατότητα να συμπεριλάβουμε στις μελέτες μας και μη συμβατικούς τύπους μηχανών, οι οποίες έχουν τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα του μικρού όγκου και βάρους. Μηχανές στο φάσμα των 1.5 – 20 MW και 200 – 25000 ΣΑΛ, όπως φαίνεται και στο σχήμα 9, πρέπει να εξεταστούν ως πιθανές λύσεις.



Σχήμα 9. Γράφημα Ισχύος-Ταχύτητας για εφαρμοσμένες τεχνολογίες εναλλακτήρα και κινητήριας μηχανής. [13]

Οι χρωματισμένες περιοχές απεικονίζουν τις δυνατές εκδοχές σχεδίασης τοπολογίας εναλλακτήρα ενώ τα σημεία με τρίγωνα και κύκλους αντιστοιχούν στις άμεσα διαθέσιμες ή εφαρμόσιμες τεχνολογίες για κινητήριες μηχανές (ντίζελ και αεριοστρόβιλοι).

Οι ηλεκτρικές μηχανές του σχήματος 10 είναι αυτές που θεωρούνται πιο τεχνολογικά τεκμηριωμένες λύσεις και έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές έως σήμερα. Εκτός από αυτές όμως υπάρχουν και πολλές καινοτόμες διατάξεις που είναι είτε υπό δοκιμή είτε υπό μελέτη. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι κυριότερες και από τις δύο αυτές κατηγορίες.



Σχήμα 10:

- (a) Ρότορας με έκτυπους πόλους για εναλλακτήρα 515rpm 14MVA σε επιβατικό πλοίο,**
- (b) Ρότορας τύπου τυλιγμένου δρομέα με δυναμοελάσματα για γεννήτρια με 1250mm διατομή άξονα στις 1500rpm,**
- (c) δρομέας έκτυπων πόλων από συμπαγή χάλυβα για μηχανή 1800rpm με 800mm αξονική διατομή,**
- (d) δρομέας έκτυπων πόλων από συμπαγή χάλυβα για μηχανή 3000rpm με 1200mm αξονική διατομή,**
- (e) ρότορας για μηχανή μόνιμου μαγνήτη με περίβλημα με ανθρακονήματα υψηλής αντοχής για λειτουργία στις 15000rpm. [13]**

A. Τεχνολογικά αποδεδειγμένες κατασκευές

➤ *Εναλλακτήρες έκτυπων πόλων χαμηλής ταχύτητας:*

Συνήθως χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ισχυρές πετρελαιομηχανές χαμηλής ταχύτητας (σχήμα 10a). Είναι απλής κατασκευής και συνεπώς χαμηλού κόστους μηχανές με λειτουργία σε χαμηλές σχετικά στροφές (έως 1000ΣΑΛ) και με αριθμό πόλων που μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα. Συνήθως τις βρίσκουμε με 12-24 πόλους και πιο σπάνια με τετραπολικούς δρομείς από ατόφιο χάλυβα (σχήμα 10c). Σπανίζουν σε εφαρμογές με υψηλές ταχύτητες λόγω της μεγάλης φυγόκεντρου δύναμης που ασκείται στις προεξοχές των τυλιγμάτων πεδίου και στα πέλματα των πόλων.

➤ *Εναλλακτήρες τυλιγμένου πεδίου με δυναμοελάσματα:*

Είναι ως επί το πλείστον τετραπολικές μηχανές οι οποίες χρησιμοποιούνται ως μία φθηνή εναλλακτική στους ακριβούς στροβιλοεναλλάκτες για ταχύτητες μέχρι 1800rpm (σχήμα 10b). Λόγω της χαμηλότερης ταχύτητας είναι απλούστερη η κατασκευή του ρότορα. Το χαρακτηριστικό της είναι ότι αποτελείται από συστάδα ελασμάτων κράματος πυριτίου-χάλυβα που συγκρατούνται από συμπαγείς πλάκες στις άκρες και έχουν ένα σύνθετο σύστημα ψύξης βασιζόμενο σε ακτινικούς αγωγούς εξαέρωσης. Όμως ακόμα και σε χαμηλότερες ταχύτητες από 1000rpm, σε πολλές περιπτώσεις, πλεονεκτούν αυτών με τους έκτυπους πόλους. Επομένως η κίτρινη περιοχή του σχήματος 9 θα μπορούσε να επεκταθεί λίγο ακόμα προς τα αριστερά.

➤ *Στροβιλοεναλλακτήρες:*

Σύγχρονες μηχανές που διαθέτουν δρομέα από συμπαγή χάλυβα, διαμορφωμένο με σφυρηλάτηση και αυλάκωση όπως φαίνεται στο σχήμα 10d. Οι στροβιλογεννήτριες χρησιμοποιούνται στα κλασσικά θερμοηλεκτρικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρισμού συζευγμένες με ατμοστρόβιλους ή αεριοστρόβιλους στις 3000-3600ΣΑΛ. Η εδραίωσή τους και τα πολύ πλεονεκτικά χαρακτηριστικά τους στη βιομηχανία αερίου, ως μεταβλητής ταχύτητας υψηλής ισχύος κινητήρες για τους στροβιλοσυμπιεστές, τούς κάνει μία πολύ ενδιαφέρουσα περίπτωση για γεννήτριες σε πλοία με συνεχές ρεύμα. Συνήθως έχουν 2 ή 4 πόλους αλλά στη μεταβλητή ταχύτητα προτιμάται το δεύτερο, λόγω μικρότερου μεγέθους και καλύτερης δυναμικής συμπεριφοράς. Όσο κινούμαστε όμως στις μεγαλύτερες επιτρεπτές ταχύτητες (περίπου 8000ΣΑΛ) η τετραπολική σχεδίαση προκαλεί πολύ ψηλές συχνότητες και έτσι μεγάλες απώλειες πυρήνα, επομένως σε αυτές τις περιπτώσεις ίσως είναι προτιμότεροι οι δύο πόλοι.

➤ *Γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor):*

Σε περισσότερες από 8000 στροφές ανά λεπτό, όπου η επιφανειακή ταχύτητα του δρομέα μπορεί να φτάσει μέχρι αυτήν του ήχου, η ύπαρξη τυλίγματος διέγερσης καθίσταται αδύνατη. Σε αυτές τις περιπτώσεις η λύση του μόνιμου μαγνήτη (σχήμα 10e) είναι η πλέον ενδεδειγμένη.

Τα βασικά πλεονεκτήματα λοιπόν αυτού του τύπου γεννήτριας σε σχέση με του τυλιγμένου πεδίου είναι:

- δυνατότητα περιστροφής σε πολύ υψηλές στροφές, καθώς τα περιστρεφόμενα τυλίγματα διέγερσης ή οι γέφυρες ανορθωτών είναι περιττά,
- υψηλότερος βαθμός απόδοσης

μικρότερο μέγεθος.

Δεν παύουν όμως να έχουν και μερικά μειονεκτήματα, μεταξύ των οποίων είναι:

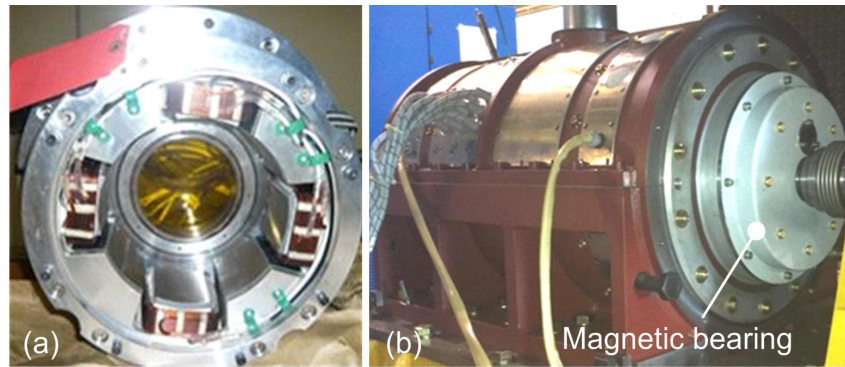
δεν είναι δυνατή η ρύθμιση του μαγνητικού πεδίου,

κίνδυνος απομαγνήτισης του μόνιμου μαγνήτη λόγω υψηλής θερμοκρασίας ή υψηλών ρευμάτων στο στάτη,

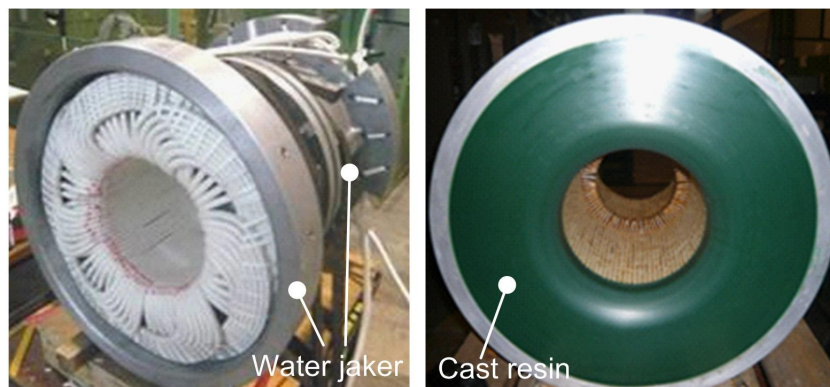
η τεχνολογία δεν είναι ακόμα όσο “ώριμη” θα έπρεπε για τις στροφές που βρίσκονται στο δεξί άκρο του σχήματος 9.

Συγκεκριμένα, γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη που θα τοποθετούνταν στο πάνω δεξιά τμήμα του γραφήματος δεν είναι ακόμα εφαρμόσιμες με συμβατικά μέσα. Αντίθετα, θεωρούνται μη συμβατικές μηχανές, που διαθέτουν επιφανειακούς μόνιμους μαγνήτες και διέπονται από ορισμένα πολύ καθοριστικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά που επισημαίνουμε στη συνέχεια.

- ✓ Η συγκράτηση του μαγνήτη στην επιφάνεια λόγω της ισχυρής φυγόκεντρου δύναμης που δέχεται. Στην πιο εξελιγμένη μέθοδο χρησιμοποιούνται ανθρακονήματα με μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα ή εναλλακτικά μη μαγνητικά κράματα υψηλής αντοχής και ανθεκτικότητας με αγωγίμο περίβλημα για προστασία, των μόνιμων μαγνητών, από αρμονικές μαγνητικής φύσεως στο διάκενο της μηχανής.
- ✓ Ο άξονας και ο ρότορας κατασκευάζονται από συμπαγή χάλυβα με αναπόφευκτη την ανάπτυξη δινορευμάτων καθώς οι πυρήνες που αποτελούνται από δυναμοελάσματα δεν μας εξασφαλίζουν την απαιτούμενη μηχανική σταθερότητα.
- ✓ Η ψηλή συχνότητα που αναπτύσσεται στο στάτη, η οποία μπορεί να ξεπεράσει τα 700Hz, προκαλεί αφενός μεγάλες απώλειες πυρήνα, αφετέρου αυξημένες απώλειες στους αγωγούς του στάτη λόγω επιδερμικού φαινομένου. Οι προτεινόμενες λύσεις είναι η χρήση ελασμάτων υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο στον πυρήνα του στάτη και κατασκευή των τυλιγμάτων με ειδικό στριφτό καλώδιο τεχνολογίας τύπου Λιτς (Litz wire).
- ✓ Απώλειες δρομέα λόγω των ταλαντώσεων του πεδίου στο διάκενο. Αυτές μπορεί να εμφανιστούν εξίσου στους μόνιμους μαγνήτες όσο και στα μέρη της μηχανικής υποστήριξής τους. Ο περιορισμός και ο έλεγχος τέτοιου είδους απωλειών χρήζουν επισταμένης ανάλυσης και λεπτομερούς σχεδιασμού για την πρόβλεψη των δινορευμάτων στα ενεργά και μη τμήματα του δρομέα.
- ✓ Η ύπαρξη μαγνητικής αιώρησης του ρότορα με μαγνητικά έδρανα, όπως φαίνεται στο σχήμα 11, είναι επίσης θεμιτή αν όχι αναγκαία. Αυτή είναι η συνιστώμενη για εφαρμογές με πολύ μεγάλες ταχύτητες περιστροφής, για τον περιορισμό των απωλειών από την τριβή και την καλύτερη δυναμική συμπεριφορά του άξονα. Η χρήση του όμως χρήζει διερεύνησης λόγω της πιθανής ασυμβατότητας με τις μηχανικές δονήσεις στα πλοία.
- ✓ Για την αντιμετώπιση των επιπλέον απωλειών του δρομέα και των κυματισμών στη ροπή λόγω της αυλάκωσης του στάτη στις μεγάλες ταχύτητες, συνίσταται ο σχεδιασμός στάτη χωρίς αύλακες, όπως στο σχήμα 12. Αυτό συνεπάγεται μη αμελητέα τεχνολογικά ζητήματα όσον αφορά την κατασκευή των τυλιγμάτων, την συγκράτηση των μηχανικών μερών και την ψύξη, σε συνδυασμό με την μείωση της πυκνότητας ροπής λόγω του αυξημένου διακένου. Η μείωση της πυκνότητας ροπής μπορεί εν μέρει να αντισταθμιστεί επιλέγοντας υλικά με υψηλή πυκνότητα ενέργειας μόνιμου μαγνητικού πεδίου μαζί με διάταξη των μαγνητών σε πίνακα Χάλμπακ (Halbach-array), τα οποία ανεβάζουν όμως το κόστος παραγωγής.



Σχήμα 11: Παράδειγμα εφαρμογής ενεργού μαγνητικού εδράνου: (a) Τμήμα του στάτη πριν από τη συναρμολόγηση, (b) η πλήρης μηχανή μετά τη συναρμολόγηση. [13]



Σχήμα 12: Στάτης χωρίς αύλακες (a) πριν την κάλυψη, (b) μετά την κάλυψή του με υψηλά θερμοαγώγιμη χυτή ρητίνη. [13]

Οι υψηλής ταχύτητας σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές μόνιμου μαγνήτη που αναφέρθηκαν, αυτή τη στιγμή χρησιμοποιούνται κυρίως σε συνδυασμό με στροβιλοσυμπιεστές στη βιομηχανία αερίου και πετρελαίου. Ωστόσο, η χρήση τους είτε ως κινητήρες είτε ως γεννήτριες δεν διαφέρει στην πράξη. Σε κάθε περίπτωση, στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές αναφορές που τις συστήνουν ως κατάλληλες για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, σε συνδυασμό με ανορθωτές, σε πλοίο με συνεχές ρεύμα.

B. Υπό μελέτη τεχνολογίες

Συμπληρωματικά με τις τεχνολογίες και τους τύπους μηχανών που αναφέραμε και που έχουν αποδείξει εδώ και αρκετά χρόνια στην πράξη ότι πρόκειται για αξιόπιστες και ρεαλιστικές λύσεις δυναμικά για ηλεκτρογεννήτριες, αν και ορισμένες επιδέχονται περαιτέρω μελέτης και βελτιστοποίησης προκειμένου να εγκατασταθούν σε πλοίο, κάποιες πραγματικά καινοτόμες τοπολογίες μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία. Οι περισσότερες, ωστόσο, είναι σε πειραματικό και σε υπό μελέτη στάδιο. Κάποια παραδείγματα αναφέρονται στη συνέχεια.

➤ *Σύγχρονες γεννήτριες με υπεραγώγιμα τυλίγματα στον δρομέα (High Temperature Superconducting Machines – HTSM):*

Πρόκειται για γεννήτριες ο στάτης των οποίων δεν διαφέρει σε τίποτα από αυτούς των παραδοσιακών μηχανών. Ο ρότορας όμως είναι εξοπλισμένος με ένα πολύ ιδιαίτερο τυλίγμα διέγερσης, το οποίο ψύχεται από υγρό άζωτο ή άλλα υγρά και έχει επομένως την ικανότητα να αντέχει πολύ μεγάλη πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος. Σαν αποτέλεσμα λοιπόν έχουμε οι μηχανές αυτές να παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος άρα και πολύ μικρότερο μέγεθος σε σχέση με τις αντίστοιχες συμβατικές (σχήμα 13), πολύ βασικό ζητούμενο για τον περιορισμένο χώρο του κήτους. Έχει υπολογιστεί ότι μια HTS μηχανή έχει “πυκνότητα ισχύος” περί τα 30kW/kg, ενώ μια κλασική γύρω στα 5kW/kg. Επίσης, παρόλο που οι συμβατικές μηχανές θεωρούνται πολύ αποδοτικές, οι HTSM είναι αποδοτικότερες, φτάνοντας στο 99%, ειδικά όταν λειτουργούν σε χαμηλότερες στροφές από τις μέγιστες. Έχουμε λοιπόν εξοικονόμηση σε καύσιμο και λιγότερους ρύπους [1].

Η υπεραγωγιμότητα ανακαλύφθηκε το 1911 από τον Heike Kamerlingh-Onnes όταν παρατήρησε ότι τιμή της αντίστασης στο δείγμα υδραργύρου που μελετούσε, στη θερμοκρασία των 4,2°K (-268,95°C) έφτανε από 0,11Ω σε λιγότερο από 10⁻⁵Ω. Αυτό ήταν και το πρώτο υπεραγώγιμο υλικό χαμηλής θερμοκρασίας (Low Temperature Superconductor – LTS) που ανακαλύφθηκε. Η υπεραγωγοί υψηλής θερμοκρασίας (High Temperature Superconductors – HTS) έμελλε να ανακαλυφθούν 75 χρόνια μετά. Τον Απρίλιο του 1986 οι Bednorz και Muller περιέγραψαν μία χημική ένωση από βάριο, λανθάνιο, χαλκό και οξυγόνο η οποία είχε την ανήκουστη μέχρι τότε κρίσιμη θερμοκρασία των 30°K. Σε λιγότερο από ένα χρόνο ο Bednorz με τον Alexander αυτή τη φορά παρουσίασαν μία διαφορετική ένωση αποτελούμενη από ύτριο, βάριο, χαλκό και οξυγόνο (YBCO) με κρίσιμη θερμοκρασία περίπου 96°K, κάτι που τους έδωσε και το βραβείο Νόμπελ. Κι όμως, χρειάστηκε μία ολόκληρη εικοσαετία μέχρι να καταφέρουμε να φτιάξουμε αποδοτικούς αγωγούς και τυλίγματα για χρήση σε μηχανές [1].

Ως εκ τούτου, αυτή η πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, φαίνεται να είναι μία μάλλον μεσομακροπρόθεσμα εφαρμόσιμη προοπτική. Η κυριότερη δυσκολία που παρουσιάζεται σε αυτήν την εφαρμογή ώστε να γίνει ανταγωνιστική σε κόστος και αξιοπιστία έχει σχέση με το εξαιρετικά πολύπλοκο μηχανικό σύστημα που χρειάζεται για την ψύξη των περιστρεφόμενων αγωγών του δρομέα. Η δομή της μηχανής με υψηλής θερμοκρασίας με υπεραγώγιμα στοιχεία με τα κυριότερα μέρη της φαίνονται στο σχήμα 14.

Συνοπτικά κάποια από τα πλεονεκτήματα της HTSM είναι [1], [14]:

- η τεχνολογία αυτή φαίνεται να είναι βιώσιμη για εφαρμογές μεγάλης ισχύος,
- οι απώλειες είναι ελάχιστες με αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση της μηχανής,
- τα καυσαέρια είναι επίσης μειωμένα,
- υψηλή απόδοση σε ταχύτητες από τη μέγιστη μέχρι πολύ χαμηλές,

περιλαμβάνει ισοθερμικά τυλίγματα πεδίου, κατάλληλα για συνεχείς μεταβολές στο φορτίο,

έως και τρεις φορές υψηλότερη πυκνότητα ροπής σε σχέση με άλλες εναλλακτικές, έχει μικρό μέγεθος και βάρος, επομένως είναι πιο εύκολη και ευέλικτη η εγκατάσταση και η μετακίνησή τους,

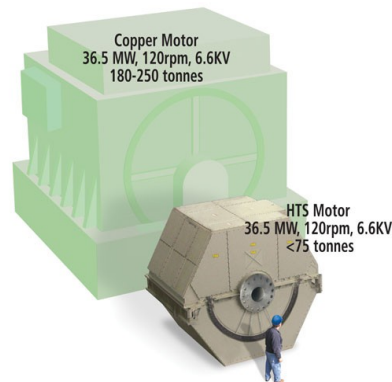
η έλλειψη οδοντώσεων από σίδηρο στο στάτη, έχει σαν αποτέλεσμα να είναι μικρότερα και τα επίπεδα θορύβου της μηχανής.

αμελητέα ύπαρξη αρμονικών στην κυματομορφή της τάσης που παράγει. Η πιο μεγάλη αρμονική είναι η 5^η που είναι το 2% της θεμελιώδους.

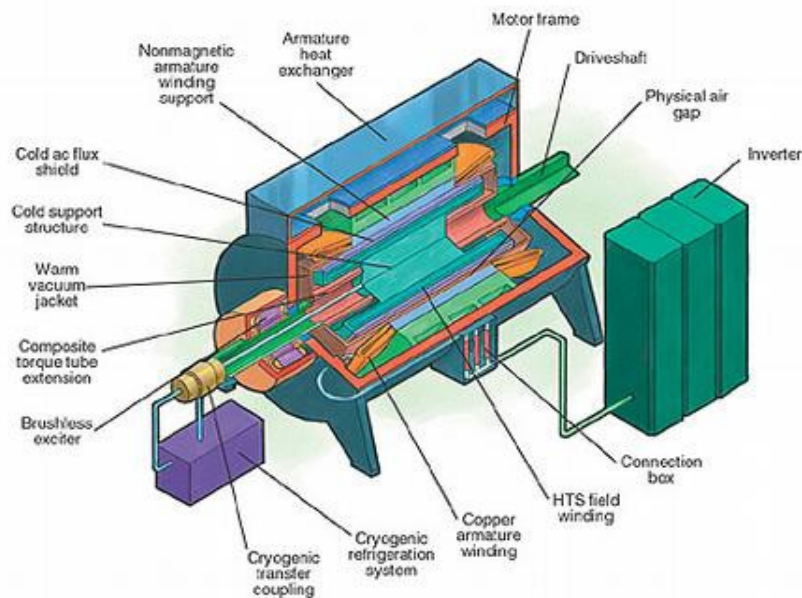
Αντίθετα τα κυριότερα μειονεκτήματά της είναι:

η συνεχής λειτουργία και απόδοση της HTSM είναι άμεσα εξαρτημένη από το πολύπλοκο και κοστοβόρο κρυογονικό σύστημα ψύξης,

η τεχνολογία μένει να αποδειχθεί ότι μπορεί όντως να χρησιμοποιηθεί σε συνθήκες πλεύσης.



Σχήμα 13: Σύγκριση μεγέθους συμβατικής με HTS μηχανή. [15]



Σχήμα 14: Η HTS μηχανή με το σύστημα ψύξης και αντιστροφέα. [16]

➤ *Γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής (Axial Flux PM Generator)*

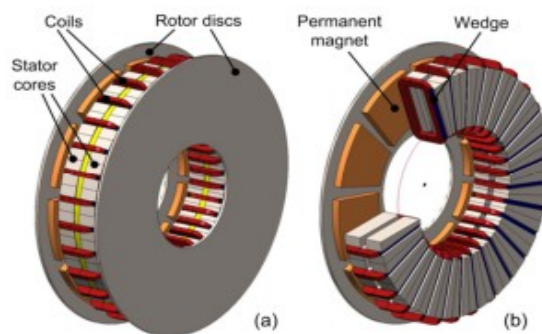
Είναι ειδικές ηλεκτρικές μηχανές με μαγνητική ροή που αναπτύσσεται όχι κατά την ακτινική διεύθυνση αλλά κατά την αξονική, παράλληλα προς τον άξονα. Αποτελούνται από μία αλληλουχία από δίσκους-δρομείς με προσαρτημένους μόνιμους μαγνήτες πάνω στην επιφάνειά τους και τοροειδείς στάτες–πυρήνες αποτελούμενους από δυναμοελάσματα, όπως παρουσιάζεται και στα σχήματα 15 και 16. Σε σύγκριση με τις κλασσικές μηχανές με ακτινικό πεδίο, είναι πιο συμπαγείς στην αξονική διεύθυνση και προσφέρουν μεγαλύτερη πυκνότητα ροπής με μεγάλους αριθμούς πόλων. Είναι ιδιαίτερα διαδεδομένες στην αυτοκινητοβιομηχανία και χρησιμοποιούνται ήδη σε ανεμογεννήτριες [17]. Προτάσεις για μεγάλες μηχανές τέτοιου τύπου έχουν γίνει για εφαρμογή στη ναυσιπλοΐα τόσο για την παραγωγή ηλεκτρισμού, όσο και για την ηλεκτροπρώση [18]. Βασίζόμενοι σε πρόχειρους υπολογισμούς, μερικοί συγγραφείς υποστηρίζουν ότι μία μηχανή με αξονικό μαγνητικό πεδίο της τάξης των 12MVA στις 200rpm θα είναι 55% μικρότερη σε μέγεθος και 60% ελαφρύτερη από μία συμβατική έκτυπων πόλων. Ενδεικτικά είναι τα στοιχεία της 25MVA PMSM της Jeumont Industrie που έχουμε στον Πίνακα 4. Στον Πίνακα 5 φαίνεται η πολύ καλή απόδοση της μηχανής για ταχύτητες μέχρι και 20% της μέγιστης.

Είδος Γεννήτριας	Συνολικό Βάρος	Εξωτερική Διάμετρος	Συνολικό Μήκος
Μηχανή Μόνιμου Μαγνήτη Αξονικού Πεδίου	65 τόνοι	2.7m	3.0m
Σύγχρονη Μηχανή Έκτυπων Πόλων	120 τόνοι	5.6m	3.6m

Πίνακας 4: Σύγκριση βάρους και διαστάσεων της μηχανής μόνιμου μαγνήτη με αξονικό μαγνητικό πεδίο της Jeumont Industrie και συμβατικής μηχανής με έκτυπους πόλους.

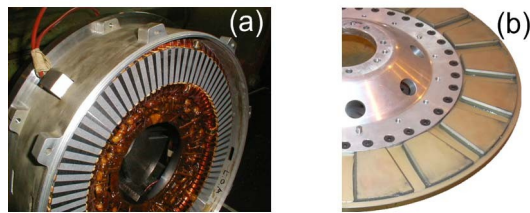
Ταχύτητα % της μέγιστης	Απόδοση
@100%	97%
@80%	97.2%
@60%	97.2%
@40%	96.8%
@20%	93%

Πίνακας 5: Απόδοση της μηχανής μόνιμου μαγνήτη με αξονικό μαγνητικό πεδίο της Jeumont Industrie σε διάφορες ταχύτητες.



Σχήμα 15: Σχηματικό διάγραμμα μηχανής μόνιμου μαγνήτη με αξονικό μαγνητικό πεδίο (a) τελική σύνθεση, (b) το εσωτερικό μετά την απομάκρυνση ενός ρότορα-δίσκου και

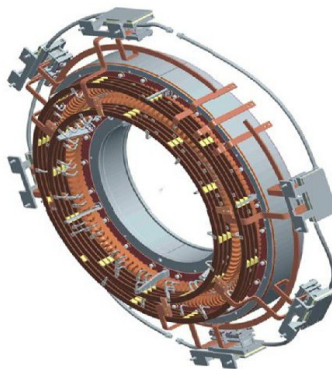
μερικών τμημάτων στάτορα και πηνίων. [13]



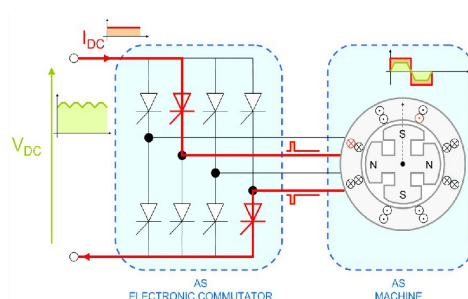
Σχήμα 16: Παράδειγμα μηχανής μόνιμου μαγνήτη με αξονικό μαγνητικό πεδίο: (a) στάτης, (b) δίσκος-δρομέας με εμφανείς τους προσκολλημένους μόνιμους μαγνήτες στην επιφάνειά του. [13]

➤ *Τεχνολογία ενεργού στάτη (Active Stator)*

Αυτή η τεχνολογία νοητικά αναπαράγει την τραπεζοειδή αρχή της μηχανής συνεχούς ρεύματος χωρίς ψύκτρες (Brushless DC Machine). Η δομή της μηχανής είναι ίδια με της σύγχρονης μηχανής με τυλιγμένο πεδίο ή με μόνιμους μαγνήτες, μόνο που οι φάσεις του στάτη είναι συνδεδεμένες με ένα μετατροπέα τύπου πηγής ρεύματος με θυρίστορ ή άλλα διακοπτικά στοιχεία (βλ. Σχήμα 17), ο οποίος ελέγχει το ρεύμα σε κάθε φάση ώστε αυτό να είναι μέγιστο και σχεδόν σταθερό στα διαστήματα όπου προκύπτει η μέγιστη ηλεκτρεγερτική δύναμη στο δρομέα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 18. Με κατάλληλο σχεδιασμό των πόλων είναι δυνατόν η αναπτυσσόμενη από τον ρότορα ηλεκτρεγερτική δύναμη να έχει σχεδόν τραπεζοειδές σχήμα ώστε οι ταλαντώσεις της ροπής να ελαχιστοποιηθούν και έτσι η μέση ωφέλιμη ροπή να μεγιστοποιηθεί. Η τεχνολογία αυτή είναι υπό μελέτη και εξομοίωση και οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι μπορεί να προκύψουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την πυκνότητα της ροπής σε συμβατικές τοπολογίες γεννητριών όπως τυλιγμένου πεδίου και μόνιμου μαγνήτη. [13]



Σχήμα 17: Ο στάτης μίας μηχανής με τεχνολογία ενεργού στάτη, όπου είναι εμφανή τα διακοπτικά στοιχεία και η σύνδεσή τους με τις φάσεις.[19]



Σχήμα 18: Σύνδεση των θυρίστορς με τον στάτη τετραφασικής μηχανής για έλεγχο του

3.3 Κυψέλες Καυσίμου (Fuel Cells – FC)

Οι κυψέλες καυσίμου θεωρούνται ιδιαίτερες σημαντικές για το μέλλον της ναυτιλίας και ειδικά για το DC-Ship. Αυτές, μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του “καυσίμου” απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια στην μορφή συνεχούς ρεύματος. Είναι ένας στατικός ηλεκτροχημικός μετατροπέας ενέργειας. Ωστόσο, σε αντίθεση με τις μπαταρίες, δεν εξαντλεί την αποθηκευμένη ενέργεια και δεν χρειάζεται να επαναφορτιστεί. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας διαρκεί για όσο το καύσιμο παρέχεται συνεχώς. Τα τυπικά καύσιμα αποτελούνται από ένα οξειδωτικό και καθαρό υδρογόνο ή μείγμα με υψηλή συγκέντρωση σε υδρογόνο. Ορισμένοι μάλιστα αποκαλούν την κυψέλη καυσίμου και ως "μπαταρία αερίου".

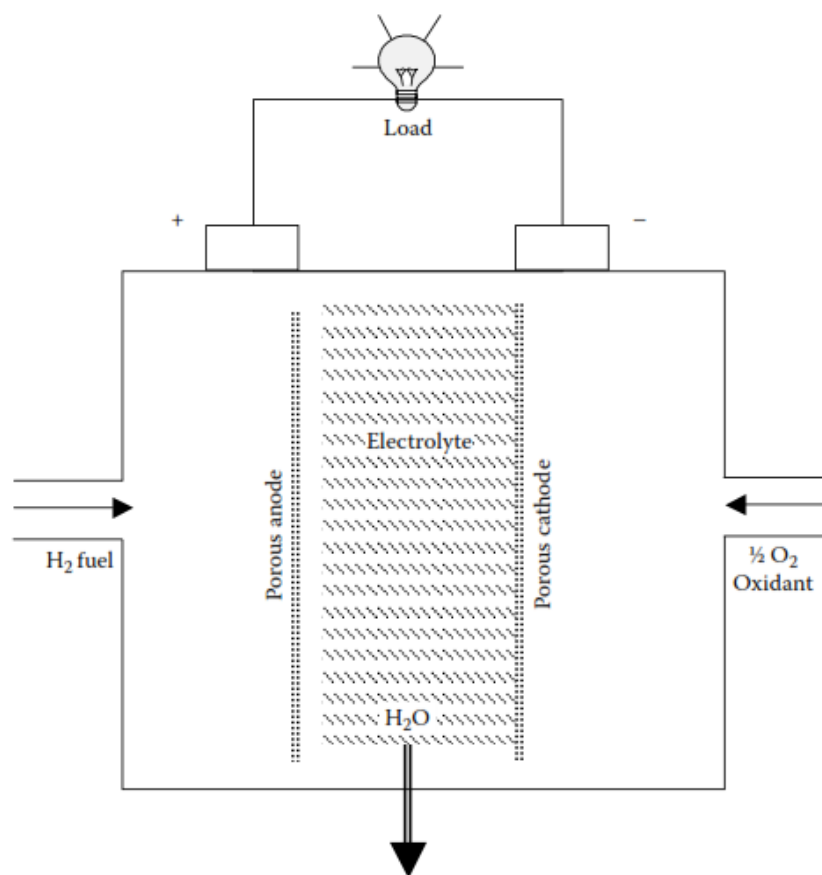
Η αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου είναι η αντίστροφη της υδρόλυσης. Στην υδρόλυση, η ηλεκτρική ενέργεια εγχέεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων βυθισμένων σε νερό για την παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου. Στα fuel cells, το υδρογόνο και το οξυγόνο συνδυάζονται για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και νερό. Η μετατροπή της ενέργειας είναι απευθείας από χημική σε ηλεκτρική. Δεδομένου ότι η διαδικασία είναι ισόθερμη, η απόδοση μετατροπής δεν περιορίζεται από την απόδοση της μηχανής Carnot (θεώρημα Carnot), σε αντίθεση με τους θερμοδυναμικούς μετατροπείς ενέργειας με χρήση ατμού (ατμομηχανές) ή τους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η απόδοση των κυψελών καυσίμου, ως εκ τούτου, μπορεί να είναι περίπου διπλάσια αυτής του θερμοδυναμικού μετατροπέα. Μπορεί να φτάνει στο 65% σε ορισμένα σχέδια χαμηλού κόστους και 75-80% σε κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων μετάλλων που αναπτύχθηκαν για χρήση σε μεγάλης κλίμακας μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [20]. Πρόσθετα πλεονεκτήματα σε σχέση με τους θερμοδυναμικούς παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν η αθόρυβη λειτουργία και η υψηλή αξιοπιστία τους λόγω έλλειψης κινούμενων μερών.

Κατασκευαστικά, η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου, που χωρίζονται από ένα υγρό ή ένα στερεό ηλεκτρολύτη, και ένα εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 19. Καθαρό υδρογόνο ή ένα μείγμα με υψηλή συγκέντρωση τροφοδοτείται στην άνοδο. Αυτό συνδυάζεται με το οξυγόνο του οξειδωτικού που εισέρχεται από τη θύρα της καθόδου. Το υδρογόνο δεν καίγεται, όπως στον κινητήρα εσωτερικής καύσης. Χωρίζεται σε θετικά ιόντα υδρογόνου (H^+) και τα ηλεκτρόνια (e^-) και παράγει ηλεκτρική ενέργεια λόγω μίας ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Τα υποπροϊόντα της αντίδρασης είναι νερό και θερμότητα, εάν το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο. Με φυσικό αέριο, αιθανόλη, ή μεθανόλη ως πηγή υδρογόνου, όπως συμβαίνει σε ορισμένες περιπτώσεις, τα υποπροϊόντα περιλαμβάνουν κάποια ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα, ίχνη μονοξειδίου του άνθρακα και αμελητέα ποσότητα σε υδρογονάνθρακες και οξείδια του αζώτου.

Έτσι, τα FC είναι στατικές ηλεκτροχημικές συσκευές που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την χημική αντίδραση χωρίς μεταβολή των ηλεκτροδίων ή του υλικού του ηλεκτρολύτη. Η χημική αντίδραση είναι $2H_2 + O_2 = 2H_2O$, και η ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία. Σε αντίθεση με τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS) η κυψέλη καυσίμου δεν αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια. Ως εκ τούτου, αυτό απαιτεί μια συνεχή παροχή αντιδρώντων και απομάκρυνση των υποπροϊόντων της αντιδράσεως κατά τη λειτουργία.

Το fuel cell λειτουργεί με υδρογόνο, το πιο απλό στοιχείο και πιο άφθονο αέριο στο σύμπαν. Το υδρογόνο είναι άχρωμο, άοσμο και άγευστο. Είναι επίσης το ελαφρύτερο στοιχείο, με πυκνότητα 0,09 γραμμάρια ανά λίτρο, σε ατμοσφαιρική πίεση, αλλά έχει την υψηλότερη ενεργειακή περιεκτικότητα ανά μονάδα βάρους μεταξύ όλων των καυσίμων, περίπου 52.000 Btu/lb, η οποία είναι τρεις φορές αυτή της βενζίνης. Με μοριακό βάρος 1 για το υδρογόνο και 16 για το οξυγόνο 1gr υδρογόνου χρειάζεται 8gr οξυγόνου για να σχηματίσει H_2O και να

απελευθερώσει 52.000Btu ενέργειας κατά τη διαδικασία.



Σχήμα 19: Σχηματική αναπαράσταση των βασικών στοιχείων κυψέλης καυσίμου. [20]

Οι λειτουργίες των κύριων στοιχείων των κυψελών καυσίμου (σχήμα 19) έχουν ως εξής:

1. Η άνοδος (ηλεκτρόδιο "καυσίμου") παρέχει μια κοινή διεπαφή για τα καύσιμα και τον ηλεκτρολύτη, όπου διενεργείται η αντίδραση οξείδωσης του καυσίμου, και διοχετεύει τα ηλεκτρόνια από το χώρο της αντίδρασης προς το εξωτερικό κύκλωμα.
2. Η κάθοδος (ηλεκτρόδιο οξυγόνου) παρέχει μια κοινή διεπαφή για το οξυγόνο και τον ηλεκτρολύτη, όπου διενεργείται η αντίδραση αναγωγής του οξυγόνου, και διοχετεύει τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα στο χώρο αντίδρασης.
3. Ο ηλεκτρολύτης μεταφέρει τα ιόντα που συμμετέχουν στις αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια του καυσίμου και του οξυγόνου, ενώ εμποδίζει την αγωγή των ηλεκτρονίων για την αποφυγή βραχυκυκλώματος.

Άλλα στοιχεία ενδέχεται επίσης να είναι αναγκαία για την στεγανοποίηση, για θαλάμους αερίου και για το διαχωρισμό ένα FC από το επόμενο σε μια συστοιχία κυψελών καυσίμου. Στο σχήμα 20 απεικονίζεται μία διάταξη κυψελών καυσίμου 5 kW, 240Vdc από την Plug Power Corporation που διατίθεται στο εμπόριο. Στον κάτω θάλαμο βρίσκεται η συστοιχία κυψελών καυσίμου ενώ στον πάνω είναι ο μετατροπέας ηλεκτρονικών ισχύος, ο οποίος μετατρέπει το DC εξόδου της κυψέλης καυσίμου σε ηλεκτρικό ρεύμα 60Hz για εναλλασσόμενα φορτία.



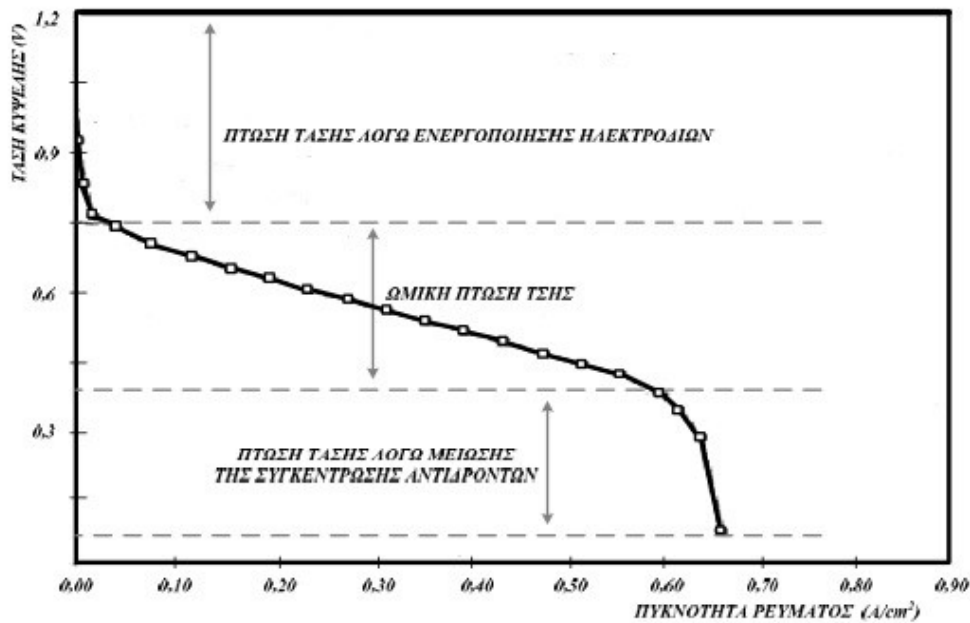
Σχήμα 20: Μία διάταξη κυψελών καυσίμου 5 kW με μετατροπέα 60Hz της Plug Power Corporation. [20]

3.3.1 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Κυψέλης Καυσίμου.

Η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί βασικά ως μια πηγή τάσης με εσωτερική αντίσταση. Η θεωρητική τιμή τάσης της στοιχειώδους κυψέλης είναι 1.2 V, περίπου το ίδιο όπως και σε στοιχεία μπαταριών NiCd και NiMH. Πολλαπλές κυψέλες καυσίμου στοιβάζονται σε συνδυασμούς σε σειρά ή/και παράλληλα για να ληφθεί η επιθυμητή τάση και ρεύμα. Η πτώση τάσης της κυψέλης καυσίμου όταν διαρρέεται από ρεύμα είναι μεγαλύτερη από ό,τι σε μία μπαταρία, λόγω διαφόρων παραγόντων. Η πτώση τάσης αυξάνει με την αύξηση του ρεύματος ως εξής:

$$V_{drop} = \alpha + \beta \ln(J)$$

όπου J είναι η πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, και α και β είναι σταθερές που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και την επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Στο σχήμα 21 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος εξόδου (V-I) της κυψέλης καυσίμου, με τους επιμέρους όρους που επηρεάζουν την μεταβολή της τάσης εξόδου. Για μικρές τιμές του ρεύματος φορτίου η πτώση της τάσης εξόδου της κυψέλης οφείλεται στην τάση ενεργοποίησης, στις ενδιάμεσες τιμές στην ωμική πτώση τάσης, ενώ για μεγάλες τιμές του ρεύματος του φορτίου οφείλεται στην μείωση της συγκέντρωσης των αντιδρώντων στοιχείων (υδρογόνο και οξυγόνο). Τα σημεία μετάβασης από τον έναν τύπο πτώσης τάσης στον άλλο εξαρτώνται από τις τιμές που παίρνουν οι παράμετροι, που εμπλέκονται στις σχέσεις που προσδιορίζουν την τάση εξόδου της κυψέλης.



Σχήμα 21: Χαρακτηριστική V-I και παράγοντες που επηρεάζουν την τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου. [2]

Η πτώση τάσης σε ένα fuel cell επηρεάζεται λοιπόν από τους εξής παράγοντες:

- ✓ Πόλωση ενεργοποίησης – η δυσκολία του καυσίμου και του οξειδωτικού να αντιδράσουν σε κάθε ηλεκτρόδιο. Προκαλεί απώλεια ενέργειας που συνδέεται με την αντίδραση.
- ✓ Πόλωση ωμικής αντίστασης - απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας από τα ωμικά φαινόμενα στα ηλεκτρόδια, τις επαφές και την ιοντική αντίσταση του ηλεκτρολύτη.
- ✓ Πόλωση λόγω συγκέντρωσης αντιδρώντων - η συσσώρευση των ιόντων και των προϊόντων της αντίδρασης, και η εξάντληση των ιόντων που καταναλώνονται και των αντιδρώντων στον ηλεκτρολύτη κοντά στις επιφάνειες του ηλεκτροδίου. Προκαλεί την απώλεια ενέργειας που συνδέεται με τα μέσα παροχής.

Η τάση μειώνεται, επίσης, μετά από κάποιες ώρες λειτουργίας. Το σχήμα 22 δείχνει τις καμπύλες τάσης στον ακροδέκτη έναντι του ρεύματος σε τρεις διαφορετικές “στιγμές” της διάρκειας ζωής ενός fuel cell. Η τάση είναι υψηλότερη αρχικά και, στη συνέχεια, σταδιακά μειώνεται καθώς οι ώρες λειτουργίας συσσωρεύονται. Σε οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή, η γενική σχέση V-I μπορεί να εκφραστεί ως περίπου:

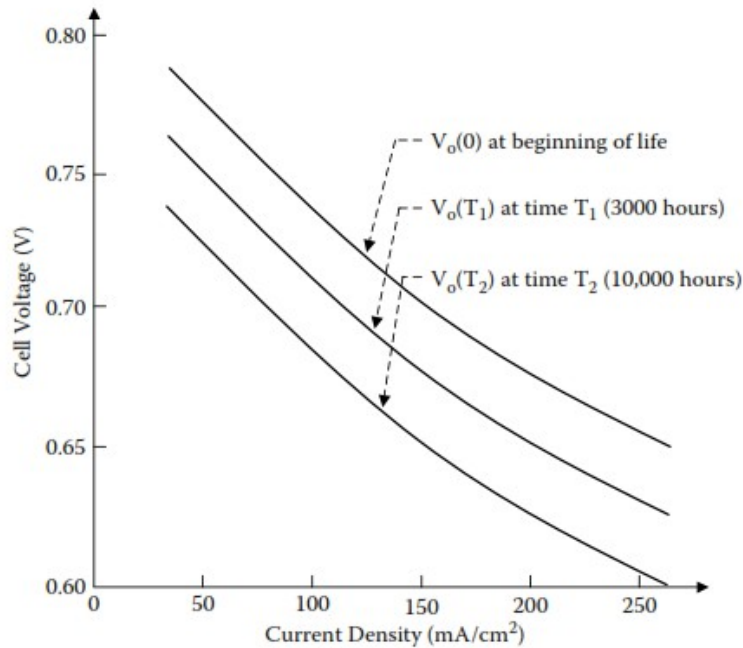
$$V = V_o - kI$$

όπου V και I είναι τάση και το ρεύμα των ακροδεκτών αντίστοιχα, V_o είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος και k είναι μια σταθερά. Με την πάροδο του χρόνου η τιμή του k αυξάνεται και η V_o μειώνεται. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση, μπορούμε να εκφράσουμε την ισχύ P που προσδίδεται σε οποιοδήποτε χρονικό σημείο λειτουργίας ως:

$$P = V \times I = (V_o - kI) \times (V_o - V) \div k$$

Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παραχθεί από την κυψέλη καυσίμου βρίσκεται από την λύση της εξίσωσης $dP/dI = 0$, η οποία εμφανίζεται για $V = \frac{1}{2}V_o$, και είναι:

$$P_{max} = \frac{V_o^2}{4k}$$



Σχήμα 22: Χαρακτηριστική V-I μίας κυψέλης καυσίμου μετά το πέρας διαφορετικών ωρών λειτουργίας. [20]

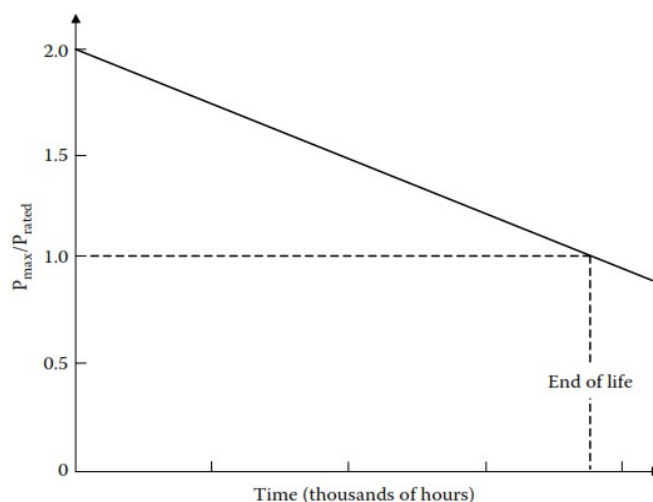
Δεδομένου ότι η τάση ανοικτού κυκλώματος V_o μειώνεται με το χρόνο, ομοίως θα μειώνεται και η P_{max} . Η τιμή του V_o σε σχέση με το χρόνο t μπορεί να εκφραστεί ως η αρχική τάση μικρότερη κατά K_o φορές τις ώρες λειτουργίας, όπου K_o είναι μία σταθερά. Δηλαδή:

$$V_o(t) = V_o(0) - K_o \times \text{ώρες λειτουργίας}$$

Ωστόσο, η λειτουργία των κυψελών καυσίμου στη μέγιστη ισχύ μόνιμα δεν έχει πρακτική χρησιμότητα, δεδομένου ότι θα καταναλώνουν επίσης τη μέγιστη ποσότητα καυσίμου. Για το λόγο αυτό, είναι προτιμότερο να λειτουργούν στη μέγιστη απόδοση των καυσίμων μέχρι το τέλος της διάρκειας ζωής τους.

Τότε, όταν δηλαδή η μέγιστη ισχύς που είναι ικανό να προσδώσει το fuel cell εξισωθεί με την ονομαστική ισχύ, μπορούμε να πούμε ότι αυτό έχει φτάσει στο όριο λειτουργίας του και πρέπει να αντικατασταθεί.

Για να παρέχουμε μια σταθερή ονομαστική τάση στο φορτίο, είναι αναγκαίος ένας ρυθμιστής τάσης από μετατροπείς με ηλεκτρονικά ισχύος μεταξύ της κυψέλης καυσίμου και του φορτίου ώστε να ενισχύει την ολοένα μειούμενη ονομαστική τάση εξόδου της. Ωστόσο, όταν η τάση των κυψελών καυσίμου έχει μειωθεί κάτω από ένα ορισμένο όριο, ο ρυθμιστής δεν θα είναι σε θέση να ενισχύσει μέχρι το επίπεδο ονομαστικής τάσης του φορτίου. Η κυψέλη καυσίμου τότε θεωρείται ότι έχει φτάσει στο τέλος της διάρκειας ζωής της. Σε εκείνο το σημείο, η P_{max} ορίζεται να είναι η ονομαστική ισχύς της. Έτσι, η αναλογία P_{max}/P_{rated} της κυψέλης καυσίμου μπορεί να είναι μέχρι 2 στην έναρξη λειτουργίας, αλλά θα φθάσει (εξ ορισμού) στο 1 στο τέλος της ζωής της. Η διάρκεια ζωής των κυψελών καυσίμου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση του V_o συναρτήσεως του χρόνου, από την οποία προκύπτει και η καμπύλη P_{max} - χρόνου λειτουργίας. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της κυψέλης καυσίμου όπου ο λόγος P_{max}/P_{rated} πέφτει στο 1 προσδιορίζεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 23.



Σχήμα 23: Γραφική παράσταση της υποβάθμισης του λόγου $P_{\max}/P_{\text{rated}}$ έναντι των συσσωρευμένων ωρών λειτουργίας του fuel cell. [20]

3.3.2 Συνήθεις Τύποι Κυψελών Καυσίμου.

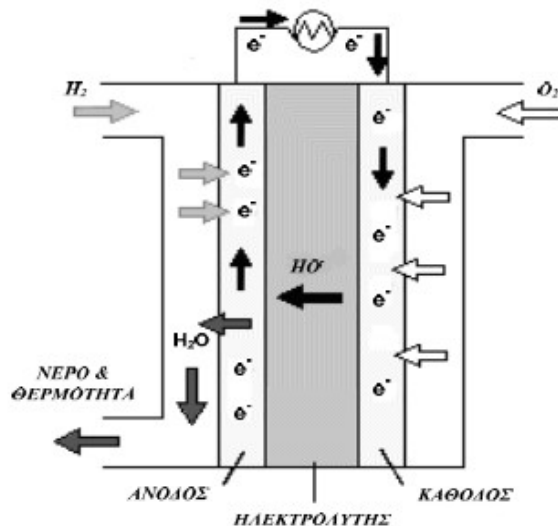
Οι κυψέλες καυσίμου κατατάσσονται σε κατηγορίες, ανάλογα με το καύσιμο και τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν, καθώς και με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται, ως εξής [21]:

- Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (Alkaline Fuel Cells – AFC)
- Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC)
- Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC)
- Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC)
- Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell - PEM)

Εκτός από τους πέντε παραπάνω αρχικούς τύπους κυψελών καυσίμου υπάρχουν τρεις ακόμα κατηγορίες οι οποίες είναι οι κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας (Redox FC), τις οποίες παρουσιάζουμε στο κεφάλαιο για τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, οι κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (Direct Methanol FC) και οι κυψέλες καυσίμου αιθανόλης (Direct Ethanol FC).

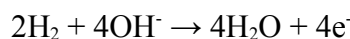
Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (Alkaline Fuel Cells – AFC):

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου ήταν από τις πρώτες κυψέλες καυσίμου που αναπτύχθηκαν. Στις κυψέλες αυτού του τύπου χρησιμοποιείται διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH) ως ηλεκτρολύτης και μια ποικιλία μη πολύτιμων μετάλλων ως καταλύτες στην άνοδο και την κάθοδο. Η θερμοκρασία λειτουργίας των αλκαλικών κυψελών αρχικά κυμαινόταν μεταξύ 50°C και 200°C. Οι αλκαλικές κυψέλες νεότερης γενιάς λειτουργούν σε θερμοκρασίες από 23°C έως 80°C. Στο σχήμα 24 απεικονίζεται η λειτουργία της κυψέλης AFC. Όπως φαίνεται, το υδρογόνο στην άνοδο αντιδρά με τον ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα να παράγεται νερό και να ελευθερώνονται ηλεκτρόνια, τα οποία κατευθύνονται προς την κάθοδο μέσω του κλειστού κυκλώματος : άνοδος – φορτίο – κάθοδος.

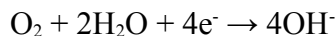


Σχήμα 24: Δομικό διάγραμμα λειτουργίας της κυψέλης AFC. [21]

Η χημική αντίδραση, που γίνεται στην άνοδο περιγράφεται ως εξής:



Τα ηλεκτρόνια κινούνται στο ηλεκτρικό κύκλωμα εξωτερικά της κυψέλης καυσίμου και καταλήγουν στην κάθοδο. Εκεί αντιδρούν με το οξυγόνο και με το νερό, παράγοντας περισσότερα υδροξυλικά ιόντα για να αναπληρώσουν αυτά που είχαν αντιδράσει στην άνοδο:



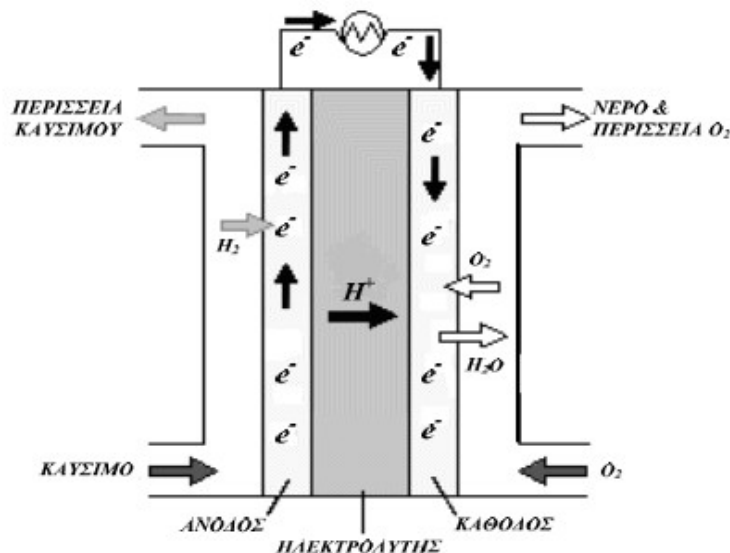
Ο ηλεκτρολύτης ρέει συνεχώς μέσα από την κυψέλη, η οποία ψύχεται, απορροφώντας θερμότητα από τα καταλυμένα πορώδη ηλεκτρόδια γραφίτη, από τα οποία παίρνει ιόντα υδροξυλίου (OH^-) και μία μικρή ποσότητα νερού κατά την όλη διαδικασία. Σε μία ενεργή κυψέλη, το ένα τρίτο από την ποσότητα του νερού που παράγεται, διαφεύγει προς την κάθοδο, ενώ τα δύο τρίτα παραμένουν στην άνοδο. Η υγρή φύση του ηλεκτρολύτη τον καθιστά ημιπερατό και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο ανθρακικό υλικό επενδυμένο με teflon, το οποίο όμως καταλύεται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας.

Αν και οι κυψέλες αυτές έχουν πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης (έως και 70%), εμφανίζουν ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα, που έχει να κάνει με την ευπάθειά τους στο διοξείδιο του άνθρακα. Ακόμα και μια μικρή ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να υποβιβάσει την απόδοση της κυψέλης, οπότε καθίσταται πολύ δύσκολη η χρήση ατμοσφαιρικού αέρα. Είναι απαραίτητο, λοιπόν, να φιλτράρεται τόσο το οξυγόνο, όσο και το υδρογόνο πριν εισαχθούν στη κυψέλη, οπότε αυξάνεται σημαντικά το κόστος λειτουργίας. Επιπλέον, η ευαισθησία των αλκαλικών κυψελών στο διοξείδιο του άνθρακα μειώνει τη διάρκεια ζωής τους, καθιστώντας τη χρήση τους οικονομικά ασύμφορη. Για το λόγο αυτό είναι δύσκολη η εμπορική εκμετάλλευση του τύπου αυτού.

Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cells – PAFC):

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cells) χρησιμοποιούν φωσφορικό οξύ σε παχύρρευστη μορφή (gel) ως ηλεκτρολύτη και πορώδη ηλεκτρόδια από άνθρακα, ο οποίος περιέχει ποσότητα λευκόχρυσου. Η λειτουργία τους (σχήμα 25) μοιάζει πολύ με αυτή των PEM, ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται μεταξύ 180°C έως 220°C.

Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος είναι οι πρώτες κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά. Η χρήση αυτού του τύπου γίνεται συνήθως σε στατικές εφαρμογές, αν και υπάρχουν μερικές εφαρμογές σε μεγάλα οχήματα όπως αστικά λεωφορεία. Είναι περισσότερο ανθεκτικές στην παρουσία CO από ότι οι κυψέλες μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), αλλά εμφανίζουν μικρότερη πυκνότητα ρεύματος.



Σχήμα 25: Δομικό διάγραμμα λειτουργίας της κυψέλης φωσφορικού οξέος (PAFC). [21]

Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος είναι συνήθως μεγάλες και βαριές κατασκευές. Ένα άλλο μειονέκτημά τους είναι ότι, όπως και οι κυψέλες μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, έχουν αυξημένο κόστος λόγω της χρήσης λευκόχρυσου ως καταλύτη.

Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC):

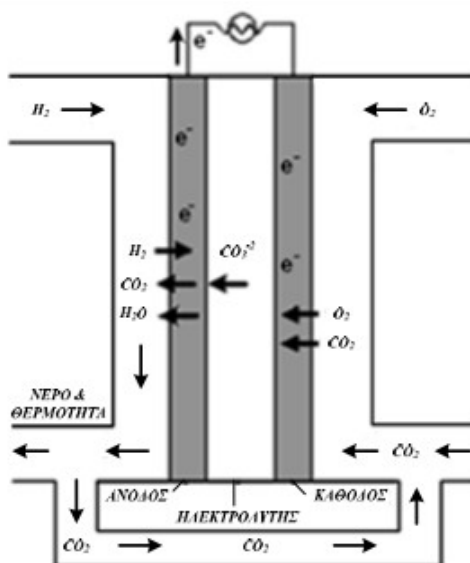
Οι κυψέλες καυσίμου αυτού του τύπου λειτουργούν σε θερμοκρασίες μεταξύ 620°C έως 660°C και μπορούν να χρησιμοποιήσουν ως καύσιμο εισαγωγής στην είσοδο της καθόδου οξειδία του άνθρακα (μονοξείδιο ή διοξείδιο), αλλά στη έξοδό τους απαιτείται η παρουσία υδρογόνου. Παρ' όλο που η υψηλή θερμοκρασία επιτρέπει την ύπαρξη άνθρακα στην κυψέλη, το θείο μπορεί να "δηλητηριάσει" την κυψέλη, ακόμα και σε μικρές ποσότητες (σχεδόν 1ppm). Ωστόσο, θεωρούνται λιγότερο ευάλωτες σε προσμίξεις [23].

Στην κάθοδο, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα του ατμοσφαιρικού αέρα αντιδρούν μεταξύ τους και παράγουν ανθρακικά ιόντα (CO_3^{2-}), τα οποία διέρχονται μέσα από τον ηλεκτρολύτη της κυψέλης. Αυτά αντιδρούν με το υδρογόνο ή το μονοξείδιο του άνθρακα στην άνοδο και παράγεται νερό, διοξείδιο του άνθρακα και δυο ηλεκτρόνια (σχήμα 26).

Η θερμοκρασία που παράγεται κατά την λειτουργία των συστημάτων MCFC είναι αρκετά υψηλή για επιπλέον παραγωγή ισχύος και ταυτόχρονα αρκετά χαμηλή, ώστε να μην απαιτείται η χρήση ακριβών καταλυτών καθώς και ο απαραίτητος συνεργαζόμενος εξοπλισμός, όπως στις -κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων.

Ένα σύστημα κυψελών καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, παράγει ρεύμα πυκνότητας 0,16 A/cm² και τάσης 0,75V ανά κυψέλη, ενώ αν το σύστημα βρίσκεται υπό πίεση έχει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται από νικέλιο, ενώ ο ηλεκτρολύτης από ένα μείγμα αποτελούμενο κατά 68% από ανθρακικό λίθιο (Li_2CO_3) και κατά 32% από υδροξείδιο του καλίου (KOH). Ο βαθμός

απόδοσης του συστήματος αυτού, όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμένο κύκλο φτάνει το 50% έως 60%.



Σχήμα 26: Δομικό διάγραμμα λειτουργίας της κυψέλης τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC). [21]

Τέλος, οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), όπως και οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC), χρησιμοποιούνται σε μεγάλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC):

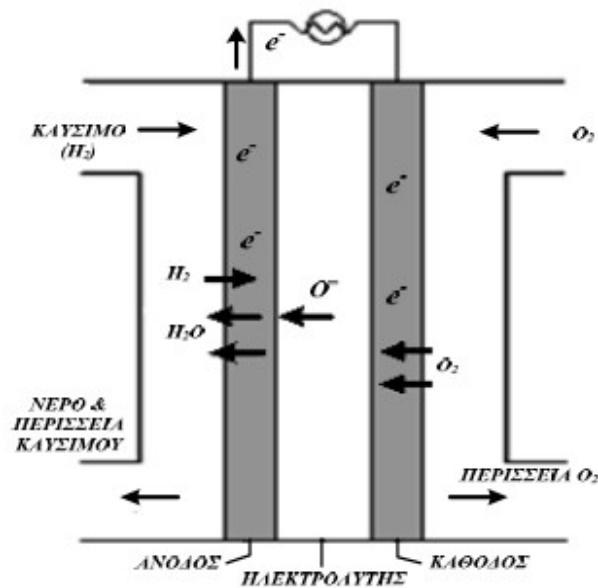
Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων χρησιμοποιούν μια σκληρή, μη πορώδη, κεραμική ουσία ως ηλεκτρολύτη. Συνήθως στην κατασκευή του ηλεκτρολύτη χρησιμοποιείται οξειδίο του Ζιρκονίου (Zr) στο οποίο έχει προστεθεί ποσότητα Υτρίου (Y). Λειτουργώντας στους 800-1000°C, τα στερεά οξείδια σχηματίζουν ιόντα υδρογόνου τα οποία αντιδρούν με το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο, ελευθερώνοντας ηλεκτρόνια (σχήμα 27). Αυτή η διαδικασία είναι αντίθετη με αυτή που συμβαίνει στις άλλες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου, στις οποίες το υδρογόνο κατευθύνεται προς τα ηλεκτρόδια και μετά προς την πηγή του οξυγόνου. Αυτή η διαφορά, σε συνδυασμό με τη σταθερότητα των στερεών οξειδίων, επιτρέπει στις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων να εξαλείψουν την ανάγκη προσθήκης επεξεργαστή καυσίμου και συνεπώς να είναι πιο ευέλικτες από τις κυψέλες τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), ως προς τον τύπο του καυσίμου που τροφοδοτούνται. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας τους, δεν είναι αναγκαία η χρήση καταλυτών από πολύτιμα μέταλλα, οπότε μειώνεται το κόστος κατασκευής τους. Επιπλέον, όπως συμβαίνει και με τις κυψέλες MCFC, η επεξεργασία του καυσίμου γίνεται μέσα στην ίδια την κυψέλη, οπότε είναι δυνατή η χρήση μιας μεγάλης ποικιλίας καυσίμων.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων είναι ότι είναι πολύ ανεκτικές στην παρουσία θείου μέσα στην κυψέλη. Η κυψέλες αυτές μπορούν να αντέξουν παρουσία ποσότητας θείου κατά πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή που αντέχουν οι άλλοι τύποι κυψελών. Επίσης, είναι ανεκτικές και στο μονοξείδιο του άνθρακα και μάλιστα μπορούν να το χρησιμοποιήσουν ως καύσιμο, όπως επίσης και τα άλλα αέρια που είναι ενώσεις του άνθρακα.

Η απόδοση μετατροπής του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια φτάνει το 50-60%, ενώ αν

χρησιμοποιηθεί και η θερμότητα που παράγουν (συμπαραγωγή), η απόδοσή τους αγγίζει το 85%.

Μειονέκτημα της κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων είναι η αργή διαδικασία εκκίνησης, η οποία οφείλεται στην πολύ υψηλή θερμοκρασία που πρέπει να επιτευχθεί, για να αρχίσει να παράγει ενέργεια. Επιπλέον απαιτείται ισχυρή θερμική μόνωση, ώστε να συγκρατείται η θερμότητα. Για το λόγο αυτό η χρήση των κυψελών αυτών δεν είναι δυνατή σε οχήματα, καθώς και σε φορητές συσκευές, οπότε η εφαρμογή τους περιορίζεται σε μεγάλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας επιφέρει μείωση του χρόνου ζωής των συσκευών και περιορισμούς στη θερμική αντοχή των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της κυψέλης.



Σχήμα 27: Δομικό διάγραμμα λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC). [21]

Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC):

Η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων παρουσιάζει ενδιαφέρον, γιατί προορίζεται για χρήση σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Ήδη έχει γίνει εφαρμογή των κυψελών αυτών σε αυτοκίνητα, ενώ έχει κατασκευαστεί κυψέλη αυτού του τύπου, που προορίζεται για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε φορητό υπολογιστή. Επίσης γίνεται συζήτηση για εφαρμογή των κυψελών καυσίμου PEM σε παραγωγή ενέργειας μικρής κλίμακας, για την κάλυψη των αναγκών μιας οικίας ή ακόμα και μιας πολυκατοικίας. Αν μάλιστα αξιοποιηθεί η δυνατότητα εκμετάλλευσης της θερμότητας που εκλύει η κυψέλη για την κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση (συμπαραγωγή), τότε επιτυγχάνεται μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας και το οικονομικό αλλά και το περιβαλλοντικό όφελος που προκύπτει είναι μεγάλο.

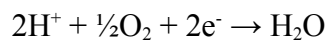
Αυτός ο τύπος κυψελών καυσίμου χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά, ως σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και νερού, σε επανδρωμένη διαστημική αποστολή. Στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιήθηκε μία πολυμερής μεμβράνη, κατασκευασμένη από μία ειδική σύνθεση θειικού οξέος, η οποία όμως δεν ήταν μεγάλης διάρκειας. Η πολυμερής αυτή μεμβράνη χρησιμοποιούσε, ως καύσιμο και αντιδρόν σώμα, το υδρογόνο (H₂) και το οξυγόνο (O₂), προερχόμενα από κρυογενή αποθήκευση. Με την τοποθέτηση μεμβρανών, των οποίων η χημική τους βάση είναι το θείο (S), επιτεύχθηκε η ηλεκτροχημική σταθερότητα του πολυμερούς καταλύτη, ενώ η θερμοκρασία που εκλύεται στις χημικές αντιδράσεις δεν

υπερβαίνει τους 100°C.

Η μεμβράνη δρα ως όξινη καταλύτης. Τα αντιδρώντα στοιχεία, υδρογόνο και οξυγόνο, προερχόμενα από τον ατμοσφαιρικό αέρα τροφοδοτούν συνεχώς τα δύο ηλεκτρόδια. Το υδρογόνο διαχέεται μέσω των πόρων της ανόδου στην καταλυτική επιφάνεια και στον κυρίως ηλεκτρολύτη, όπου και διασπάται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια (σχήμα 28), σύμφωνα με την αντίδραση:

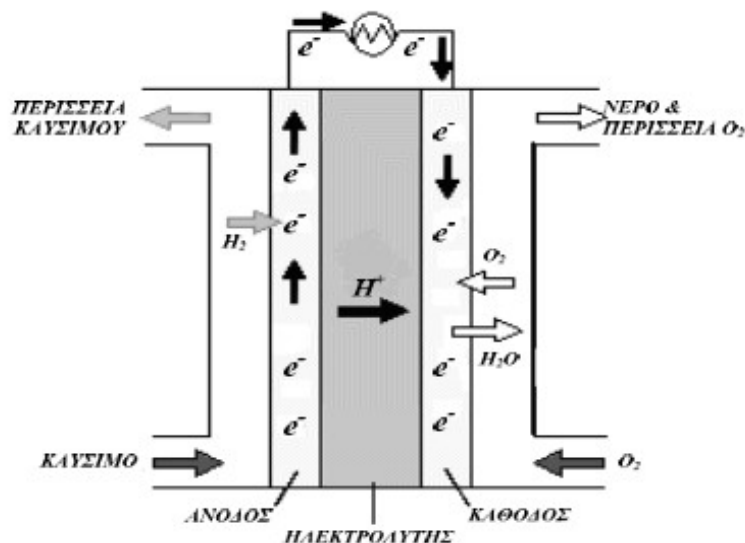
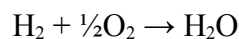


Τα ιόντα του υδρογόνου (H^+) κατά το πέρασμά τους από την κάθοδο, διέρχονται μέσα από την μεμβράνη του πολυμερούς ηλεκτρολύτη, η οποία είναι πολύ αγωγίμη για τα πρωτόνια. Συγχρόνως, τα ηλεκτρόνια ρέουν προς την κάθοδο μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος. Στο τμήμα της συσκευής, μεταξύ της καθόδου και του ηλεκτρολύτη, τα ιόντα υδρογόνου μαζί με τα ηλεκτρόνια του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος και το οξυγόνο, που έχει διαχυθεί μέσω των πόρων της καθοδικής επιφάνειας, αντιδρούν και σχηματίζεται καθαρό νερό, σύμφωνα με την αντίδραση :



Το νερό που παράγεται από αυτή την αντίδραση εξέρχεται από το σύστημα συμπαρασυρόμενο από τον αέρα.

Οι δύο αντιδράσεις συνοψίζονται στην εξής συνολική αντίδραση:



Σχήμα 28: Σχηματική παράσταση των διεργασιών μέσα στην κυψέλη καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC). [21]

Εξ' αιτίας του πλεονάσματος των ηλεκτρονίων στην άνοδο και του ελλείμματος ηλεκτρονίων στην κάθοδο, δημιουργείται μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια η οποία υπολογίζεται περίπου στο 1.1V. Αυτή η τάση παραμένει σταθερή για όσο διάστημα τροφοδοτείται αρκετή ποσότητα υδρογόνου και οξυγόνου στην κάθοδο και την άνοδο αντίστοιχα. Στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου, σε αντίθεση με τις μπαταρίες, η πάροδος του χρόνου δεν επιφέρει καμία πρακτική μεταβολή καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους. Στην άνοδο, η αντίδραση ελευθερώνει ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια, των οποίων η μεταφορά είναι εξαιρετικά σημαντική για την παραγωγή ενέργειας. Αυτά τα ιόντα στην άνοδο, δημιουργούν ένα θετικό δυναμικό (+) το οποίο ωθεί τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα από την

περιοχή της ανόδου, τα οποία είναι είτε προσκολλημένα σε ένα μόριο νερού που διέρχεται τον ηλεκτρολύτη, είτε προσκολλημένα σε μόρια νερού και μεταφέρονται μέσα από τον ηλεκτρολύτη. Αυτό συμβαίνει γιατί το άτομο του υδρογόνου που περιέχει το νερό, είναι φορτισμένο θετικά, με αποτέλεσμα να έλκει τα αρνητικά ιόντα κοντά και αυτά με τη σειρά τους να προσκολλώνται. Όμως αυτές οι δυνάμεις έλξης δεν είναι ιδιαίτερα ισχυρές, οπότε αυτή η αμοιβαία έλξη ανάμεσα στα αντίθετα φορτισμένα σωματίδια, μπορεί εύκολα να διασπαστεί. Η μέθοδος μεταφοράς των ιόντων ποικίλλει, αλλά εξαρτάται κυρίως, από το πόσο λεπτή είναι η μεμβράνη, από την ποσότητα του νερού που βρίσκεται πάνω στη μεμβράνη και από τον αριθμό των ιόντων που μεταφέρονται.

Η οξύτητα του ηλεκτρολύτη δημιουργεί τη δομή στον ηλεκτρολύτη και λειτουργεί ως εμπόδιο για τα ηλεκτρόνια. Επίσης, λειτουργεί αποτελεσματικά στη ροή των ηλεκτρονίων από υλικά, των οποίων τα ηλεκτρόνια συνδέονται με ασθενείς δεσμούς, εξ' αιτίας της διαδικασίας μεταφοράς των ηλεκτρονίων. Έτσι, τα ηλεκτρόνια κινούνται από τις επιφάνειες αντίδρασης της ανόδου, περνώντας μέσα από το τμήμα διάχυσης του αερίου στο ηλεκτρόδιο, μετά διέρχονται από τον συλλέκτη ρεύματος στην άνοδο, καταλήγοντας σε ένα κύκλωμα ώστε να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς (ηλεκτρικό ρεύμα), και κατόπιν επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία κατά την αντίστροφη φορά, δηλαδή διαβιβάζονται τα ηλεκτρόνια στον συλλέκτη ρεύματος καθόδου, μετά στο τμήμα διάχυσης του αερίου στο ηλεκτρόδιο και κατόπιν στις καταλυτικές επιφάνειες αντίδρασης στην κάθοδο. Τα ηλεκτρόνια δεν κινούνται μέσα στον ηλεκτρολύτη, γιατί οι χημικοί δεσμοί συγκρατούν ισχυρά τα ηλεκτρόνια μεταξύ τους, οπότε σχηματίζεται ένας ηλεκτρικός μονωτής. Τα κριτήρια επιλογής ενός ηλεκτρολύτη είναι η δομική του σταθερότητα, η χαμηλή αντίστασή του σε κινήσεις ιόντων και το πορώδες υλικό του.

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι PEMFC (όπως μπορεί να φανεί και από τον πίνακα 6) και που τις καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικές σε εφαρμογές που έχουν να κάνουν με την καθημερινή ζωή, είναι οι εξής:

- Λειτουργούν σε χαμηλή θερμοκρασία (συνήθως στους 80°C).

- Δεν εκλύουν ρυπογόνες ουσίες κατά τη λειτουργία τους.

- Μετατρέπουν το 35-40% της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αν αξιοποιηθεί και η εκλυόμενη θερμότητα (συμπαγωγή), ο βαθμός απόδοσής μπορεί να φτάσει το 80%.

- Είναι αθόρυβες και δεν έχουν κινούμενα μέρη (σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης).

- Έχουν στερεό ηλεκτρολύτη (μεμβράνη) και έτσι αποφεύγονται οι κίνδυνοι που προκύπτουν από τη χρήση ενός υγρού, διαβρωτικού ηλεκτρολύτη (π.χ. υδροξείδιο του καλίου).

- Έχουν μεγάλη πυκνότητα ισχύος, δηλαδή μια κυψέλη PEM με μικρό όγκο μπορεί να παράγει μεγάλη ισχύ.

Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας τους, των άμεσων εκκινήσεων (χωρίς ανάγκη προθέρμανσης) και του υψηλού βαθμού απόδοσής τους, είναι ιδανικές για την εφαρμογή τους στα οχήματα μεταφοράς. Υπολογισμοί και μετρήσεις που έχουν γίνει σε οχήματα εφοδιασμένα με κυψέλες καυσίμου PEM (με αποθηκευμένο υδρογόνο υπό πίεση) έχουν αποδείξει ότι υπερτερούν, σε απόδοση, των μηχανών εσωτερικής καύσης, κατά ένα συντελεστή 1,5 με 2,0.

Σύμφωνα με το υπουργείο ενέργειας των Η.Π.Α, οι κυψέλες μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων είναι οι βασικές υποψήφιες για εφαρμογές σε κατοικίες και σε ελαφρά οχήματα.

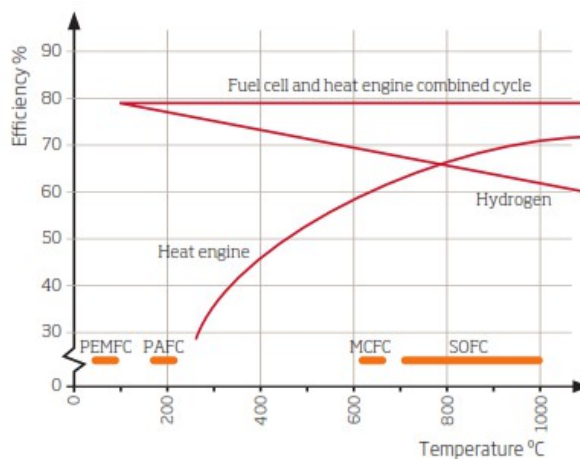
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωμένα οι τύποι κυψελών που περιγράφηκαν με τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Κυψέλη καυσίμου	Πυκν. Ρεύματος (A/cm ²)	Ηλεκτρολύτης	Θερμοκρασία (°C)	Απόδοση (%)
Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)	0.12	Στερεά πολυμερής ιοντική μεμβράνη	50-100	35-40%
Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)	0.2	Υδροξείδιο καλίου	50-200	55-60%
Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)	0.216	Φωσφορικό οξύ	180-220	45-45%
Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)	0.16	Τήγμα ανθρακικών αλάτων καλίου και λιθίου	620-660	50-60%
Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)	0.2	Διοξείδιο ζirkονίου κεραμικό	800-1000	50-60%

Πίνακας 6: Τεχνικές προδιαγραφές διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου. [21]

3.3.3 Κυψέλες Καυσίμου στη Ναυτιλία.

Όσον αφορά στη χρήση τους σε πλοία, πολλοί είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου και όλοι θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή και να εξετάζονται στο συγκεκριμένο πλαίσιο. Οι τύποι των καυσίμων, οι συνθήκες αποθήκευσης, η χρήση αναμορφωτήρα (reformer) καυσίμου και ο τύπος της ισχύος εξόδου πρέπει να ληφθούν υπόψη. Μια σύγκριση της απόδοσης με εκείνη των κινητήρων ντίζελ δεν πρέπει να βασιστεί απλά στην απόδοση των ίδιων των μηχανών μόνο. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το σύνολο του ηλεκτρομηχανικού συστήματος προώθησης, ιδίως καθώς οι κινητήρες ντίζελ έχουν έξοδο περιστροφική κίνηση ενώ οι κυψέλες καυσίμου ηλεκτρική ενέργεια σε DC. Μια περίπτωση είναι να εξεταστεί η θεωρητική μέγιστη απόδοση μιας θερμικής μηχανής και μιας κυψέλης καυσίμου, όπως φαίνεται στο σχήμα 29. Το κάτω όριο της θερμικής μηχανής (για θερμοκρασία λειτουργίας 100°C) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον κύκλο Carnot. Η κυψέλη καυσίμου τροφοδοτείται απ' ευθείας με αέριο υδρογόνο και οξυγόνο, όχι αέρα. Με την εξαίρεση των fuel cells που χρησιμοποιούνται στο διάστημα και τα υποβρύχια, το οξυγόνο υποκαθίσταται από τον αέρα. Χρησιμοποιώντας τον ατμοσφαιρικό αέρα, με την φυσιολογική περιεκτικότητα σε οξυγόνο (21%), μειώνεται η απόδοση, αλλά αυτό αντισταθμίζεται από την ελεύθερη παροχή.



Σχήμα 29: Θεωρητική απόδοση θερμικής μηχανής και κυψέλης καυσίμου ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας. [1]

Στην πράξη, οι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας έχουν τη δυνατότητα να επιτύχουν αποδόσεις παρόμοιες με, αν όχι καλύτερες, από εκείνες των μεγάλων κινητήρων ντίζελ των πλοίων, ειδικά αν συνδυάζονται με μονάδα ατμοπαραγωγής που χρησιμοποιεί την εκλυόμενη θερμική ενέργειά τους. Ο πίνακας 7 παρουσιάζει μια διαφορετική αξιολόγηση, μαζί με συγκρίσεις για ειδική ισχύ και πυκνότητα ισχύος. Ενώ οι αποδόσεις είναι παρόμοιες, οι μηχανές diesel έχουν αρκετά καλύτερη ειδική ισχύ και πυκνότητα ισχύος.

Είδος Γεννήτριας	Ηλεκτρική Απόδοση (%)	Ειδική Ισχύς (kW/m ²)	Πυκνότητα Ισχύος (W/kg)
Κυψέλη καυσίμου τήγατος ανθρακικών αλάτων (MCFC)	45-50	3	15
Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων υψηλής θερμοκρασίας (HTPEM)	≈45	30	60
Ντίζελ-γεννήτρια (4-χρονη)	40	80	90
Αεριοστρόβιλο-γεννήτρια (4-χρονη)	45	80	90

Πίνακας 7: Χαρ/κά δύο τύπων κυψελών καυσίμου και δύο τύπων γεννητριών με μηχανές εσωτερικής καύσης. [1]

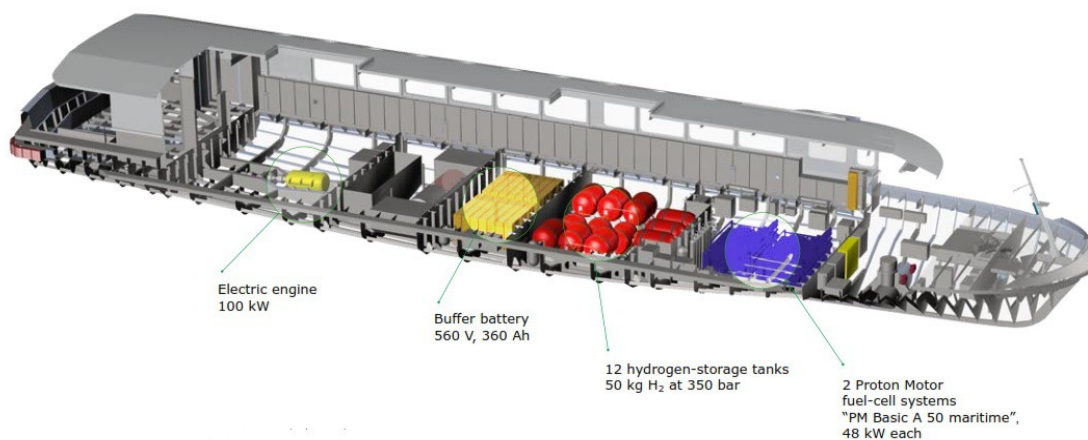
Η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) ταξινομείται ως χαμηλής θερμοκρασίας και χρησιμοποιείται κυρίως στην αγορά αυτοκινήτου, μεταξύ άλλων εφαρμογών, σε εύρος ισχύος 1-300 kW. Η φωσφορικού οξέος (PAFC) θεωρείται επίσης χαμηλής θερμοκρασίας και έχει ένα υψηλότερο φάσμα τροφοδοσίας ισχύος, τυπικά 10kW ως 1 MW, αλλά δεν είναι κατάλληλη για θαλάσσιες εφαρμογές λόγω της φύσης του ηλεκτρολύτη της. Η κυψέλη καυσίμου μεθανόλης (DMFC) είναι μια τρίτη χαμηλής θερμοκρασίας και χρησιμοποιεί μεθανόλη (CH₃OH) ως πηγή υδρογόνου. Οι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, όπως οι τήγατος ανθρακικών αλάτων (MCFC) και οι στερεών οξειδίων (SOFC), μπορούν να κατασκευαστούν για να μπορούν να εξυπηρετούν πολύ μεγαλύτερα φορτία, από λίγα κιλοβάτ έως 10 MW. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικές υποψηφίες για την χρήση στην κύρια πρόωση, καθώς και ως βοηθητικές ή εκτάκτου ανάγκης γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένα μείζον ζήτημα για τις κυψέλες καυσίμου είναι τα καύσιμα τους: το οξυγόνο μπορεί να ληφθεί από τον αέρα, αλλά το υδρογόνο είναι πιο πολύπλοκο. Μια επιλογή είναι η άμεση παροχή καθαρού υδρογόνου, αλλά, προς το παρόν, η αποθήκευση είναι προβληματική και η υποδομές είναι ανύπαρκτες. Η εξωτερική αναμόρφωση του ντίζελ πετρελαίου είναι μια εναλλακτική λύση και θεωρείται ως μια βιώσιμη επιλογή για τα πολεμικά πλοία, τα οποία χρησιμοποιούν υψηλής ποιότητας απόσταγμα καυσίμων. Ωστόσο, η αναμόρφωση του χαμηλού κόστους και ποιότητας μαζούτ (HFO) που χρησιμοποιείται συνήθως από το εμπορικό ναυτικό είναι πιο δύσκολη. Ένα πιο ρεαλιστικό και πιο άμεσο σενάριο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου στα πλοία είναι η χρήση φυσικού αερίου. Τα περισσότερα fuel cells υψηλής θερμοκρασίας είναι ικανά να λειτουργούν απ' ευθείας με φυσικό αέριο με τη μετατροπή του μεθανίου σε υδρογόνο να γίνεται μέσα στην ίδια την κυψέλη καυσίμου, ως μια εσωτερική αναμόρφωση. Το μειονέκτημα σε αυτήν την περίπτωση είναι ότι ο άνθρακας που περιέχεται στο καύσιμο απελευθερώνεται ως CO₂ στην ατμόσφαιρα.

Μέχρι πρόσφατα, η ανάπτυξη κυψελών καυσίμου στο θαλάσσιο τομέα είναι περιορισμένη, με εξαίρεση την “ανεξάρτητη αέρος πρόωση” (Air Independent Propulsion - AIP) για υποβρύχια και αυτόνομα υποθαλάσσια οχήματα. Η πρώτη πρακτική εφαρμογή κυψέλης καυσίμου για

πρόωση σε ένα υποβρύχιο ήταν το 1964, όταν η Allis-Chalmers δημιούργησε μια κυψέλη καυσίμου 750 kW για την Electric Boat Company για να τροφοδοτήσει ένα υποβρύχιο ερευνητικό σκάφος ενός ατόμου. Πιο πρόσφατα, η Siemens, κατ' εντολή της γερμανικής κυβέρνησης, ανέπτυξε μια επιτυχημένη PEMFC των 120 kW για το γερμανικό πολεμικό ναυτικό. Ένα ζεύγος από αυτές τις μονάδες χρησιμοποιούνται για την AIP στα υποβρύχια τύπου-214 που κατασκευάστηκαν για διάφορες ναυτικές δυνάμεις, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας. Τα τύπου-209, είναι διαθέσιμα με μία επέκταση AIP 6 μέτρων και δυνατότητα μετατροπής υφισταμένων σκαφών. Και οι δύο τύποι υποβρυχίων φέρουν υγρό οξυγόνο, εσωτερικά για τα 209 και εξωτερικά για τα 214, και αποθηκευμένο υδρογόνο σε εξωτερικές δεξαμενές από μεταλλικά υδρίδια. Οι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούνται επίσης για αυτόνομα υποθαλάσσια οχήματα. Η σειρά Hugin, που κατασκευάστηκε από την Kongsberg, χρησιμοποιεί κυψέλες ημι-καυσίμου (semi-fuel cell - SFC) αλουμινίου-οξυγόνου, με σημαντικό μειονέκτημα ότι το καύσιμο υπεροξείδιο του υδρογόνου, ο ηλεκτρολύτης και οι άνοδοι φέρεται να απαιτούν συχνή αντικατάσταση.

Ορισμένα μικρά ferries έχουν χρησιμοποιηθεί για να δοκιμαστεί η τεχνολογία κυψελών καυσίμου. Στην Expo2000 της Λειψίας χρησιμοποιήθηκε για λόγους επίδειξης το τροποποιημένο “M/S Weltfrieden” που ήταν εξοπλισμένο με μία κυψέλη καυσίμου PEM των 10kW, όπου το υδρογόνο αποθηκεύεται σε μεταλλικό υδρίδιο. Από το 2008 το πρώτο Fuel Cell Ship είναι γεγονός. Το “FC/S Alsterwasser” (σχήμα 30), δημιούργημα του προγράμματος ZEMSHIPS (Zero EMISSIONS SHIPS), είναι ένα επιβατηγό πλοίο 100 ατόμων, που εξυπηρετεί μετακινήσεις στον ποταμό Alster στο Αμβούργο. Αυτό το πλοίο προωθείται από ένα ζεύγος κυψελών καυσίμου PEM των 48kW χρησιμοποιώντας υδρογόνο ως πεπιεσμένο αέριο και αέρα.



Σχήμα 30: Το σύστημα πρόωσης του FC/S Alsterwasser με τα χαρακτηριστικότερα μέρη του. [22]

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή με το 5ο, 6ο και το 7ο πρόγραμμα-πλαίσιο έχει χρηματοδοτήσει διάφορες μελέτες, έρευνες και κατασκευές επίδειξης. Τα πρώτα προγράμματα περιελάμβαναν τα πλοία κυψελών καυσίμου (FCSHIP) (2002-2004) και το νέο πλοίο υδρογόνου (New-H-Ship) (2004-2006). Στα προγράμματα αυτά εξετάζεται η τεχνική δυνατότητα εφαρμογής της εγκατάστασης κυψελών καυσίμου σε πλοία την οποία ακολούθησε ένας αριθμός κατασκευών επίδειξης (EK 2002-2006). Τα προγράμματα είχαν ισχυρή εκπροσώπηση από τις σκανδιναβικές χώρες, συμπεριλαμβανομένης της Ισλανδίας, η οποία είδε στις κυψέλες καυσίμου τον καταλύτη για την ανάπτυξη μιας οικονομίας του υδρογόνου. Στο MC-WAP (Molten-Carbonate fuel cells for Waterborne Applications) (2005-2011) το ενδιαφέρον μετατοπίστηκε από το καθαρό υδρογόνο ως καύσιμο. Σκοπός της πρωτοβουλίας αυτής ήταν

να μελετηθεί η εφαρμογή του MCFC σε μεγάλα πλοία, όπως Ro/Pax, Ro/Ro και κρουαζιερόπλοια. Αυτό περιελάμβανε το σχεδιασμό, την κατασκευή, την εγκατάσταση επί του σκάφους και τον έλεγχο της MCFC 500 kW βοηθητικής μονάδας ισχύος, που τροφοδοτείται από πετρέλαιο ντίζελ. Το METHAPU (Validation of renewable methanol based auxiliary power systems for commercial vessels) (2006-2010) ανέπτυξε ένα SOFC μεθανόλης/αέρα για χρήση σε θαλάσσιες εφαρμογές. Μια πρότυπη μονάδα 20kW, κατασκευασμένη από την Wärtsilä, εγκαταστάθηκε στο οχηματογωγό “MV Undine” της σουηδικής Wallenius Lines για να υποστηρίξει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τα βοηθητικά φορτία. Το πρόγραμμα έχει αποδείξει την ικανότητά της τεχνολογίας SOFC ώστε να αντέχει στις απαιτήσεις του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Ενώ η μεθανόλη απαιτεί μια σειρά από πρόσθετες προφυλάξεις, σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα, αποδείχθηκε ότι θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια χωρίς σημαντικές αποκλίσεις από τις διαδικασίες λειτουργίας ή τις κατασκευαστικές μεθόδους του πλοίου. Επιπλέον, φάνηκε ότι η χρήση του εν λόγω καυσίμου δεν παρουσιάζει μεγαλύτερο κίνδυνο για το πλοίο, τους επιβαίνοντες σε αυτό ή για το περιβάλλον από ό,τι αποδίδεται στις συμβατικές μηχανές.

Το FellowSHIP είναι ένα κοινό ερευνητικό πρόγραμμα που ξεκίνησε το 2003 με σκοπό την ανάπτυξη και την επίδειξη υβριδικών συστημάτων κυψελών καυσίμου υψηλής ισχύος ειδικά για θαλάσσια και παράκτια περιβάλλοντα. Στους εταίρους περιλαμβάνονται δύο μεγάλοι κατασκευαστές ντίζελ μηχανών, οι Wärtsilä και MTU, καθώς και η DNV. Με τη συνεργασία όλων, το 2009 κατά τη δεύτερη φάση, εγκαταστάθηκε και λειτουργεί από τότε με επιτυχία υβριδική πρόωση με MCFC 320 kW στο LNG πλοίο των 6.200dwt “OSV Viking Lady” της νορβηγικής ναυτιλιακής εταιρείας Eidesvik Offshore (σχήμα 31). Αυτή η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί σε συνδυασμό με τέσσερα συστήματα γεννητριών που μπορούν να λειτουργήσουν με ντίζελ ή LNG (Dual Fuel) και απέδειξε επιτυχώς την ομαλή λειτουργία για πάνω από 20000 ώρες ως σήμερα [6], κάτι που υποδηλώνει ότι οι κυψέλες καυσίμου είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν επί του πλοίου για σταθερή, υψηλής απόδοσης, χαμηλής εκπομπής λειτουργία. Εάν ληφθεί υπόψη μόνο η εσωτερική κατανάλωση καυσίμου, η ηλεκτρική απόδοση εκτιμάται ότι είναι 44,5% χωρίς ανιχνεύσιμες εκπομπές NO_x, SO_x και αιωρούμενων σωματιδίων. Αν όμως είναι ενεργοποιημένη και η ανάκτηση θερμότητας, η συνολική αποδοτικότητα των καυσίμων αυξάνεται σε 55%. Ωστόσο, εξακολουθεί να υπάρχει η δυνατότητα για περαιτέρω αύξηση αυτών των επιπέδων απόδοσης. Παρ' όλα αυτά, λόγω της εξίσωσης Nernst^(►), οι κυψέλες καυσίμου δεν μπορούν να “κάψουν” όλα τα καύσιμα, δεδομένου ότι η συγκέντρωση των αντιδρώντων καθορίζει την τάση. Ουσιαστικά 15 έως 20% του καυσίμου (υδρογόνο) φεύγει από την έξοδο της ανόδου και θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί διαφορετικά. Η τρίτη φάση του προγράμματος (FellowSHIP III) αναμενόταν να ολοκληρωθεί μέσα στο 2015 και επρόκειτο να εγκατασταθούν στο Viking Lady μπαταρίες Li-ion χωρητικότητας 450kWh, κάνοντας έτσι εφικτή την υβριδική ηλεκτροπρόωση (hybrid-electric propulsion). Στο σχήμα 31 παρουσιάζεται το μοντέλο του συστήματος πρόωσης του Viking Lady όπως φαίνεται στην πλατφόρμα COSSMOS της DNV GL.

(►) Για το MCFC η εξίσωση Nernst είναι ως εξής:

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{CO_2(c)}}{p_{CO_2(a)}} \right), \text{ όπου}$$

E: ηλεκτρικό δυναμικό κυψέλης,

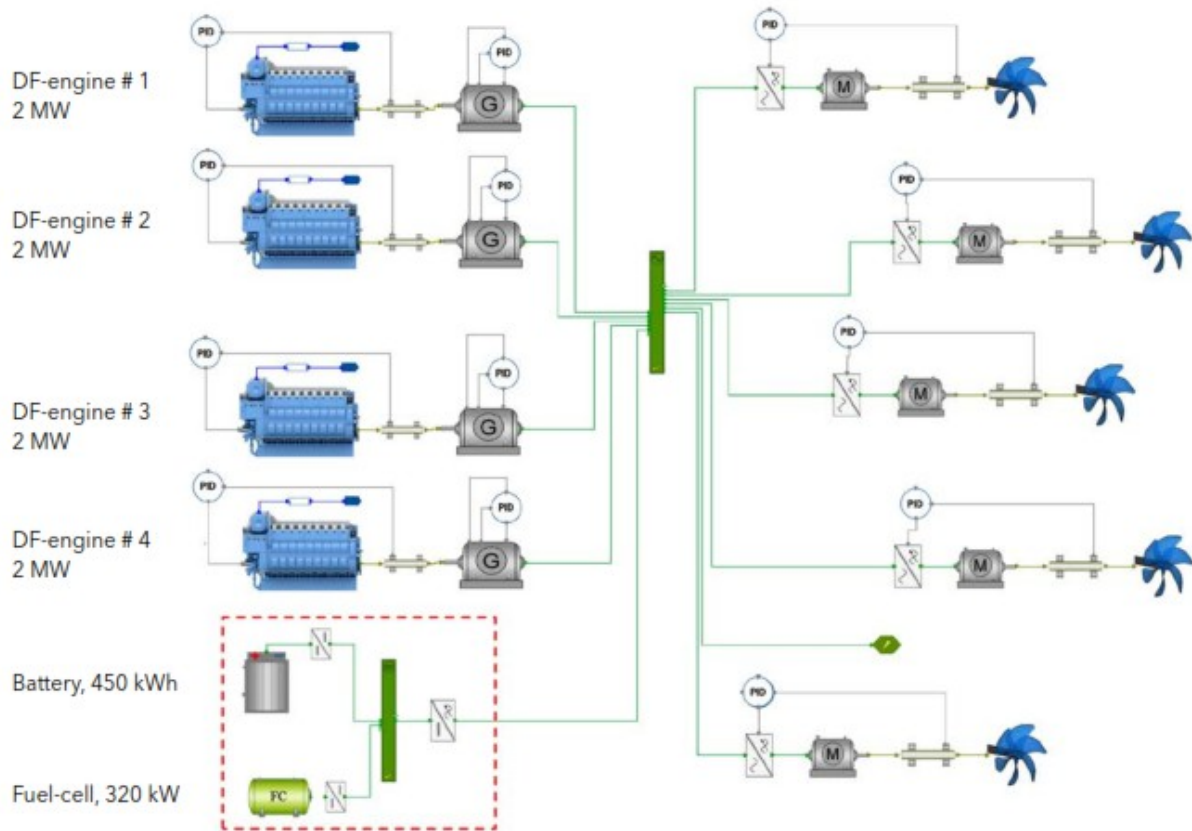
E^ο: ονομαστικό ηλεκτρικό δυναμικό κυψέλης σε Κ.Σ. (1atm. @ 25°C) με συγκεντρώσεις αντιδρώντων αερίων 1mol,

R: παγκόσμια σταθερά αερίων (≈ 8,314 J/K·mol),

T: η απόλυτη θερμοκρασία (°K),

F: η σταθερά Faraday (≈ 9,648534·10⁴ Cb/mol),

p_n: η μερική πίεση του n αντιδρώντος αερίου (c: κάθοδος, a: άνοδος)



Σχήμα 31: Μοντέλο του δικτύου υβριδικής ηλεκτροπρόωσης του Viking Lady όπως φαίνεται στο COSSMOS. [24]

Η απόδοση των κυψελών καυσίμου, σε αντίθεση με τις μηχανές ντίζελ και τους αεριοστρόβιλους, συχνά δείχνει να αυξάνεται σε χαμηλότερα φορτία. Ωστόσο, κατά την εξωτερική αναμόρφωση του “καυσίμου”, και σε μικρότερο βαθμό με την εσωτερική, η παροχή του θα μπορούσε να εμποδίσει τη θεμιτή λειτουργία στα ταχεία και δυναμικά μεταβαλλόμενα φορτία.

Σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, ωστόσο, το λειτουργικό περιβάλλον και η υιοθέτηση της ηλεκτρικής έναντι της μηχανικής μετάδοσης, αναμένεται να δημιουργήσουν ευνοϊκές συνθήκες υπέρ της κυψέλης καυσίμου. Το λεγόμενο “πράσινο υδρογόνο” (green hydrogen), που παράγεται με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ξηρά και καταναλώνεται σε κυψέλες υδρογόνου στη θάλασσα, θα είναι μια δελεαστική λύση. Σε ένα τέτοιο ιδανικό περιβάλλον λειτουργίας, τα οφέλη της τεχνολογίας των fuel cells θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν πλήρως.

Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν για τις κυψέλες καυσίμου είναι τα εξής:

Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου αποτελεί μια δυνητική λύση για την πρόωση των πλοίων μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα.

Επί του παρόντος είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντική η εμπειρία που αποκτήθηκε μέσω της χρήσης για βοηθητική, υβριδική και χαμηλής ισχύος πρόωση.

Για την ηλεκτροπρόωση πλοίων, οι υψηλής θερμοκρασίας κυψέλες στερεών οξειδίων (SOFC) και τήγατος ανθρακικών αλάτων (MCFC) δείχνουν οι πιο ελπιδοφόρες. Για μικρότερη ισχύ, οι χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) είναι καταλληλότερες.

Η μεθανόλη είναι ένα πιθανό εναλλακτικό καύσιμο.

Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρική ισχύ συνεχούς ρεύματος και, ως εκ τούτου, κατάλληλη για DC-πλοία.

Οι κυψέλες καυσίμου δεν έχουν κινούμενα μέρη και, κατά συνέπεια, έχουν χαμηλότερα επίπεδα θορύβου και κραδασμών από ό,τι οι συμβατικές μηχανές.

Αν τροφοδοτούνται με υδρογόνο, έχουν μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Απαιτούν καθαρά καύσιμα και έτσι δεν εκπέμπουν SO_x, αλλά επίσης είναι συσκευές χαμηλής θερμοκρασίας και δεν εκπέμπουν NO_x.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα αντιθέτως συνοψίζονται στα εξής:

Παρά το γεγονός ότι το υδρογόνο είναι το πιο εύκολα χρησιμοποιήσιμο καύσιμο, αυτό θα απαιτούσε να αναπτυχθεί μια παγκόσμια παραθαλάσσια υποδομή για τον εφοδιασμό πλοίων.

Η χρήση των πιο συμβατικών καυσίμων πλοίων σε κυψέλες καυσίμου παρουσιάζει προβλήματα και απαιτεί περίπλοκη προεπεξεργασία-αναμόρφωση να λάβει χώρα επί του σκάφους. Σε αυτή την περίπτωση είναι ένας σημαντικά πιο κοστοβόρος τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση τις συμβατικές μεθόδους.

Παράγουν ηλεκτρική ισχύ συνεχούς ρεύματος και, ως εκ τούτου, δεν είναι τόσο κατάλληλες για πλοία με μηχανικά συστήματα μετάδοσης.

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν χαμηλότερη ειδική ισχύ (W/m²) και πυκνότητα ισχύος (W/kg) απ' ό,τι οι πετρελαιοκινητήρες.

3.4 *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)*

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να μεταμορφώσουν τον παγκόσμιο ναυτικό στόλο σε κάθε επίπεδο και για ποικίλα μεγέθη πλοίων, συμπεριλαμβανομένων αυτών που χρησιμοποιούνται για τις διεθνείς και εγχώριες μεταφορές εμπορευμάτων και προσώπων, για το ψάρεμα, για τον τουρισμό και διάφορες άλλες θαλάσσιες δραστηριότητες. Στις εφαρμογές χρήσης ανανεώσιμων σε πλοία όλων των μεγεθών περιλαμβάνονται επιλογές για κύρια, υβριδική ή/και βοηθητική πρόωση, καθώς και για χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για διάφορες λειτουργίες του σκάφους. Οι βασικές δυναμικές μορφές ενέργειας που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε για εφαρμογές στη ναυτιλία είναι η αιολική, η ηλιακή και, πιθανώς η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας στη θάλασσα, η ενέργεια των κυμάτων. Πολλές από αυτές τις λύσεις “καθαρής” ενέργειας μπορούν να εγκατασταθούν μέσω μετατροπών στον υφιστάμενο στόλο ή να ενσωματωθούν στο σχεδιασμό νέων πλοίων. Λόγω της ευελιξίας που παρέχει το DC-Ship στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, είναι δυνατή και η υλοποίηση προτάσεων με συνδυασμό κάποιων ή όλων αυτών των πηγών ενέργειας ταυτόχρονα.

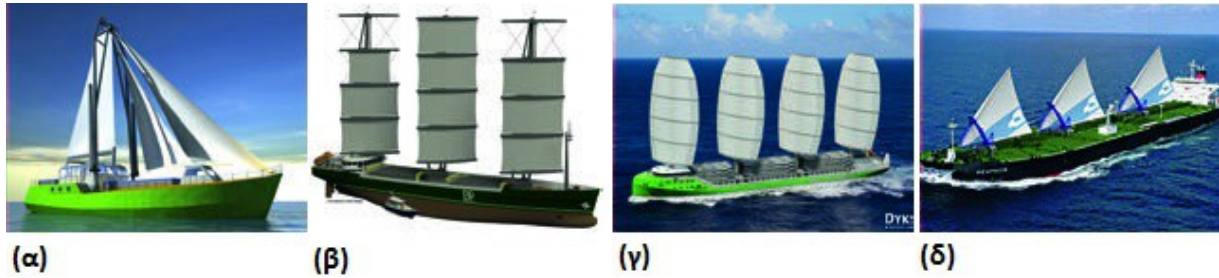
Συνολικά, οι μεγαλύτερες δυνατότητες εμφανίζονται κατά τη χρήση ενός συνδυασμού λύσεων ανανεώσιμης ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό μεγιστοποιείται η διαθεσιμότητα και η συμπληρωματικότητα των ενεργειακών πόρων. Υπό την έννοια αυτή, η επίτευξη της πλήρους αξιοποίησης των ΑΠΕ στον τομέα της ναυτιλίας απαιτεί συστήματα ενοποιημένης μηχανικής προσέγγισης ικανής να αντιμετωπίζει και τα διάφορα εμπόδια που παρουσιάζονται στην ανάπτυξή τους. Εμπόδια που σχετίζονται τόσο με θέματα οργάνωσης, κατασκευής και συμπεριφοράς στο εκάστοτε περιβάλλον αλλά και ζητήματα αντικρουόμενων εμπορικών συμφερόντων.

Τα σπουδαιότερα συστήματα αξιοποίησης ΑΠΕ, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε πλοίο με διανομή ισχύος με συνεχές ρεύμα παρουσιάζονται στη συνέχεια.

3.4.1 *Αιολική Ενέργεια.*

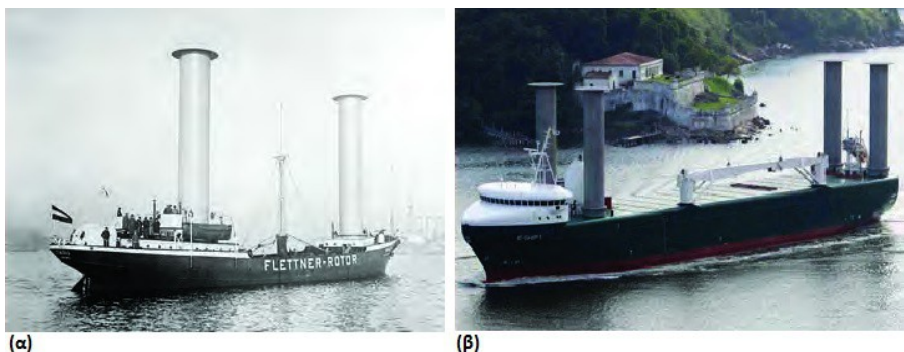
Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν τον άνεμο ως πηγή ενέργειας στα πλοία περιλαμβάνουν μια πλειάδα από τεχνικές. Συνήθως τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν μεμονωμένα ή σε συνδυασμό: ρότορες Flettner, αετούς ή αλεξίπτωτα πλαγιάς μεγάλης κλίμακας, πανιά, πτερύγια, σύνθετα ιστία και ανεμογεννήτριες. Μάλιστα η εξοικονόμηση σε κατανάλωση καυσίμου στην κύρια μηχανή λόγω ενός μόνο ρότορα Flettner ή από ένα απλό αλεξίπτωτο έλκυσης έχει υπολογιστεί σε 2-24% και 1-32% αντίστοιχα [30].

Τα πανιά είναι ιστορικά η παλαιότερη από αυτές τις τεχνικές, προγενέστερη της χρήσης μηχανικών μορφών πρόωσης. Ενώ έγιναν ορισμένα σημαντικά βήματα στην ιστιοπλοΐα, ιδιαίτερα με τα ιστιοφόρα του 19ου με αρχές του 20ου αιώνα που μετέφεραν τσάι, η δύναμη που ασκείται από το πανί εξαρτάται από την ύπαρξη μιας κάποιας εντάσεως ανέμου και την ικανότητα των ναυτικών να εκμεταλλευτούν κατά βέλτιστο τρόπο την ένταση αυτή. Για τους λόγους αυτούς κυρίως η χρήση αυτής της τεχνικής έχει εκλείψει στα πλοία. Ωστόσο σήμερα, αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου μπορούν να μιμηθούν, σε πολύ μεγάλο βαθμό, τις δεξιότητες των ναυτικών. Στο σχήμα 32 φαίνονται διάφορα παραδείγματα σύγχρονων εφαρμογών με συστήματα αυτόματου ελέγχου των πανιών. Στο σχήμα 32α βλέπουμε τη φορτηγίδα “Greenheart”, που φέρει κλασικού σχήματος πανιά, στα 32β-32γ παρατηρούμε διαφορετικές εκδοχές των πανιών με σύστημα τύπου Dyna-Rig, ενώ στο 32δ έχουμε μια πρόταση για εμπορικό πλοίο με πανιά Seagate σχήματος δέλτα που αναμένεται να είναι έτοιμο γύρω στο 2016-17.



Σχήμα 32: (α) Η φορτηγίδα “Greenheart” μήκους 32 μέτρων,
 (β) Το πλοίο μεταφοράς φορτίου χύδην “B9” εκτοπίσματος 3000dwt,
 (γ) Το 8210dwt φορτηγό πλοίο “Ecoliner”,
 (δ) Η πρόταση για εμπορικό πλοίο με πανιά Seagate τριγωνικού σχήματος. [32]

Ο ρότορας Flettner πρωτοεμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 με το πλοίο “Baden-Baden” που φαίνεται στο σχήμα 33α. Η τεχνική αυτή εκμεταλλεύεται το φαινόμενο Magnus της ρευστομηχανικής, όπου όταν πνέει άνεμος προς έναν περιστρεφόμενο κύλινδρο τότε ασκείται μια ανυψωτική δύναμη. Η δύναμη αυτή έχει γραμμική σχέση με την ταχύτητα του ανέμου και, σε αντίθεση με τα συμβατικά πανιά ή τα πτερύγια, η κάθετη συνιστώσα του ανέμου σε σχέση με την πορεία θα παράγει μία χρήσιμη ώθηση προς τα εμπρός για οποιαδήποτε ταχύτητα του πλοίου, ακόμα και όταν αυτή είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ανέμου. Για ένα μεγάλο πλοίο, οι Flettner ρότορες μπορούν να παρέχει ένα μικρό αλλά σημαντικό ποσοστό της συνολικής προωστήριας δύναμης. Ωστόσο, η πλήρης κατανόηση της περιδίνησης που δημιουργείται από κάθε ρότορα και των σχετικών δυνάμεων που ασκούνται στο σκάφος είναι ακόμη υπό διερεύνηση. Ένα ακόμα ζήτημα είναι ότι, όπως έχει παρατηρηθεί, όσο μεγαλύτερο είναι το πλοίο τόσο μικρότερη είναι η εξοικονόμηση καυσίμου. Εξοικονόμηση έως 60% έχει ήδη επιτευχθεί για κάποια σχετικά μικρά σκάφη, ενώ υπάρχουν μοντέλα πολύ μεγάλων δεξαμενόπλοιων μεταφοράς αργού πετρελαίου (Very Large Crude Carriers – VLCC) με εξοικονόμηση ως 19% [32]. Το 2010 κατασκευάστηκε το “E-Ship 1”, ένα πλοίο της Enecon με χωρητικότητα εκτοπίσματος 10.500 dwt. Εκτός από τους δύο κινητήρες ντίζελ, από 3,5 MW έκαστος, το E-Ship 1 έχει τέσσερις ρότορες Flettner: δύο στην πρύμνη, αριστερά και δεξιά, και δύο εμπρός, πίσω από τη γέφυρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 33β. Το πλοίο αυτό είναι ικανό να αναπτύσσει ταχύτητα κανονικής λειτουργίας 17,5 κόμβων. Η Enecon δημοσίευσε το 2013 ότι το πρότυπο αυτό πλοίο τους, ύστερα από 170000 ναυτικά μίλια, είχε 25% χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου. Η τεχνολογία Flettner θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί το πλεονεκτικό χαρακτηριστικό του DC δικτύου για λειτουργία κινητήρων σε μεταβλητές στροφές για τη βέλτιστη απόδοση ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και τις απαιτήσεις του χειριστή.



Σχήμα 33: (α) Το πλοίο Baden-Baden με δύο ρότορες Flettner.
 (β) Το σύγχρονο πλοίο E-Ship 1 με τέσσερις ρότορες Flettner. [1]

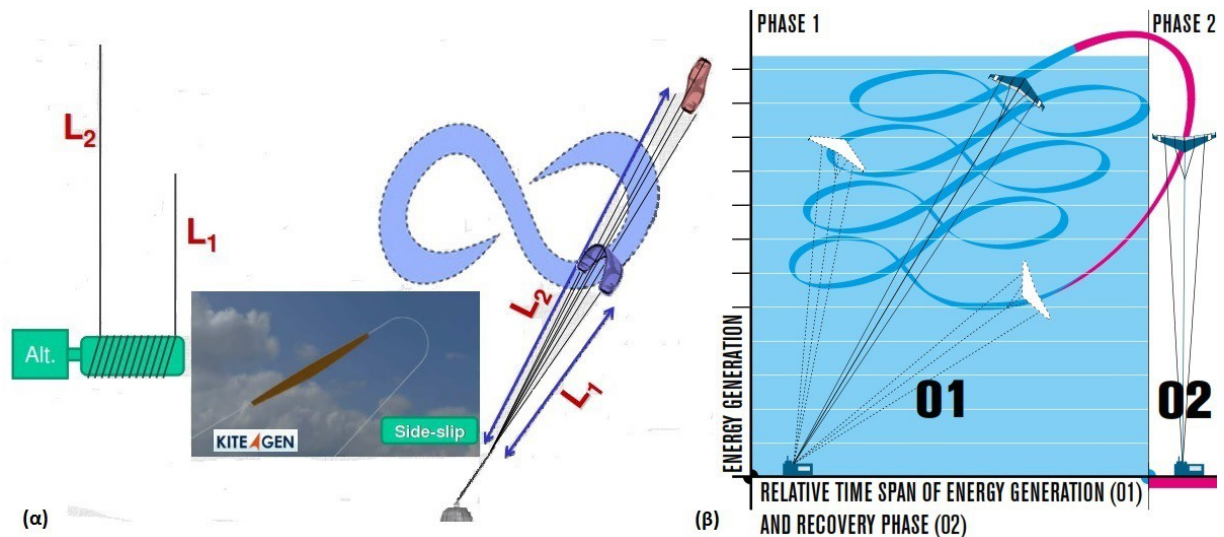
Αετοί και μπαλόνια όμοια με αλεξίπτωτα πλαγιάς μεγάλου μεγέθους (σχήμα 34) έχουν διερευνηθεί πειραματικά στη σύγχρονη εμπορική ναυτιλία. Η συμβολή τους κατά την πλεύση προς τα μπροστά και την πλευρική είναι συνάρτηση σχετική του μεγέθους και της κατεύθυνσης του πλοίου και της ταχύτητας του ανέμου. Η τεχνική αυτή επωφελείται από τα βέλτιστα ανεμολογικά στοιχεία που υφίστανται σε πολύ μεγάλα ύψη (>300m).

Εκτός από τα σχετικά απλά συστήματα, αποκλειστικά για έλκυση του πλοίου, τα τελευταία χρόνια έχουν κάνει την εμφάνισή τους προτάσεις όπως το KitVes [26] στην οποία το αλεξίπτωτο, εκτός από τον έλκυσμό του πλοίου, συνεισφέρει και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εκμεταλλευόμενο την υψηλή ισχύ του ανέμου σε μεγάλο υψόμετρο (High Altitude Wind Power – HAWP). Το σύστημα λειτουργεί σε δύο φάσεις. Στην πρώτη, την φάση παραγωγής, το μπαλόνι κινείται σε διαδρομή σχήματος οριζόντιου 8 απομακρυνόμενο από το πλοίο τραβώντας το νήμα που είναι τυλιγμένο γύρω από τον κύλινδρο που κινεί τον ρότορα της μηχανής. Όταν έχει φτάσει στη μέγιστη απόσταση από τη βάση τότε ξεκινάει η δεύτερη φάση. Σ' αυτήν το αλεξίπτωτό μας παίρνει τέτοια θέση ώστε να έχει την ελάχιστη αντίσταση στον άνεμο (side-slip) και να είναι εύκολη η επαναφορά του στο αρχικό σημείο με τη μηχανή να λειτουργεί τώρα ως κινητήρας για να το τραβήξει. Με αυτό κλείνει ο κύκλος. Η διαδικασία

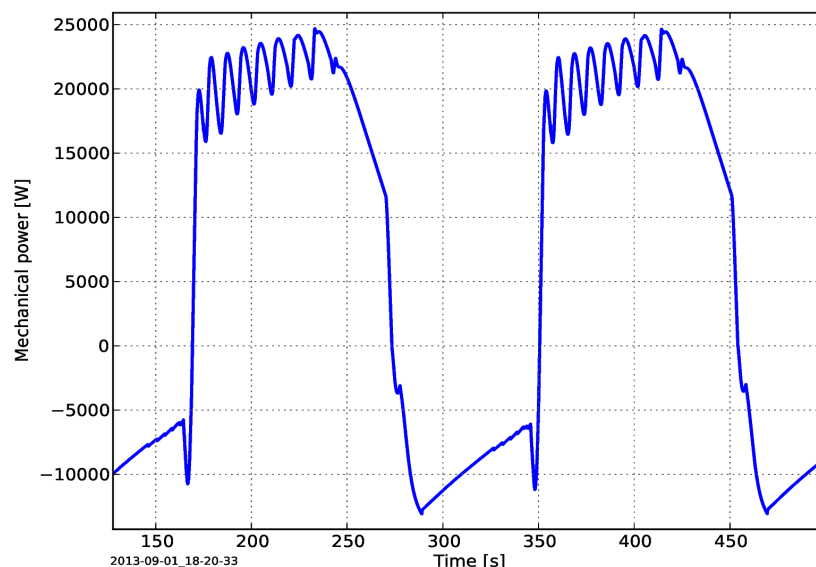


Σχήμα 34: Το φορτηγό πλοίο BBC SkySails με έλκυση από αλεξίπτωτο. [25]

που περιγράψαμε μπορεί να φανεί και στο σχήμα 35α. Στο γράφημα του σχήματος 36 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης τέτοιου συστήματος [28] με παραγόμενη ισχύ στην πρώτη φάση περίπου 20 MW, καταναλισκόμενη ισχύ περίπου 10 MW στη δεύτερη φάση και συνολικά μέση παραγόμενη μηχανική ισχύ $P_{mech} = 7400 W$. Ένα παρόμοιο σύστημα, με μόνη διαφορά τη χρήση αιωρόπτερου (αετού) αντί για αλεξίπτωτο, το οποίο ωστόσο δεν έχει προταθεί μέχρι στιγμής για πλοίο, είναι το EnerKite [27]. Η διαδρομή στις διάφορες φάσεις του φαίνεται στο σχήμα 35β. Τα συστήματα αυτά θα ήταν ιδιαίτερα ευνοϊκά για DC-πλοία με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται θα μπορούσε να αποθηκευθεί. Η παραγωγή θα μπορούσε να συνεχίζεται ενώ το πλοίο είναι αρόδου ή σε μερικές περιπτώσεις ακόμα και ελλιμενισμένο.



Σχήμα 35: (α) Το σύστημα KitVes από αριστερά προς τα δεξιά με τη θέση του νήματος που συγκρατεί το αλεξίπτωτο στο τύμπανο που συνδέεται στο ρότορα (L_1 πλήρως τυλιγμένο και κοντά στη βάση, L_2 ξετυλιγμένο μακριά), τη διαδρομή λειτουργίας του και την πλάγια θέση επαναφοράς (side-slip). [26]
 (β) Η διαδρομή στις δύο φάσεις του συστήματος EnerKite. [27]



Σχήμα 36: Η μετρούμενη μηχανική ισχύς εξομοίωσης συστήματος τύπου με αλεξίπτωτο πλαγιάς για δύο κύκλους λειτουργίας. [28]

Οι ανεμογεννήτριες εξετάζονταν εδώ και πολλά χρόνια για την πρόωση των πλοίων, ωστόσο, μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν επιτυχή πρωτότυπα με εφαρμογή τους [32]. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζει τα ζητήματα των συστημάτων αυτών σε σχέση με την σταθερότητα και τις δονήσεις αλλά και την έμφυτη μη αποδοτική μετατροπή ενέργειας σε σχέση με άλλες τεχνολογίες. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να εκμεταλλεύονται την ισχύ του ανέμου ακόμα και όταν το σκάφος πλέει απευθείας κόντρα προς αυτόν. Λαμβάνοντας, όμως, υπόψη τις τεράστιες προόδους στην τεχνολογία των ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην ξηρά, δεν μπορεί παρά να υπάρχει σημαντική τεχνολογία που πρέπει να μεταφερθεί στον τομέα της ναυτιλίας. Με γεννήτρια μεταβλητών στροφών θα ήταν

επίσης μία επιλογή που αξίζει να μελετηθεί για πλοίο με διανομή συνεχούς ρεύματος και σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Για μικρότερα σκάφη έχουν γίνει κάποιες προτάσεις όπως το Hornblower Hybrid (σχήμα 37).



Σχήμα 37: Το επιβατικό πλοίο Hornblower Hybrid με ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα και φωτοβολταϊκά πάνελς. [31]

Σήμερα τα συστήματα αιολικής ενέργειας γενικά δεν χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα, αλλά σε γενικές γραμμές η εφαρμογή τους θα μπορούσε να μελετηθεί για πλοία που κινούνται σε χαμηλή ταχύτητα, διανύουν μεγάλες αποστάσεις και διαθέτουν μεγάλες ελεύθερες επιφάνειες στο κατάστρωμα για την εγκατάσταση.

3.4.2 Ηλιακή ενέργεια

Οι εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από φωτοβολταϊκά κύτταρα. Όλες οι καινοτομίες αυτής της ταχέως εξελισσόμενης τεχνολογίας είναι διαθέσιμες για χρήση στη ναυτιλία. Οι κύριοι περιορισμοί είναι η έλλειψη επαρκούς έκτασης εγκατάστασης που απαιτείται για τα φωτοβολταϊκά και την αποθήκευση της ενέργειας. Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας προσφέρουν μεγαλύτερες δυνατότητες και καλύτερη προοπτική στο να συμπεριληφθούν και φωτοβολταϊκά συστήματα ισχύος στην πρόωση πλοίων βραχυπρόθεσμα, αλλά η χρήση τους για πρόωση πλήρως απαιτεί περαιτέρω τεχνολογική εξέλιξη και είναι πιθανόν να μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για σχετικά μικρά πλοία.

Τα φωτοβολταϊκά προσφέρουν μια επιλογή για περιορισμένης παραγωγής ηλεκτρική ενέργεια σε συνεχές ρεύμα. Μελέτες έχουν δείξει ότι είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για βοηθητικές απαιτήσεις ισχύος. Ωστόσο, η μέγιστη συνεισφορά τους είναι μικρή σε σύγκριση με την ισχύ που απαιτείται για την πρόωση ενός πλοίου [29].

Η μέση διαθέσιμη “ισχύς” της ηλιοφάνειας μεταβάλλεται ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και τη γωνία κατά την οποία τοποθετείται το φωτοβολταϊκό κύτταρο σε σχέση με τον ήλιο. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, η μέση τιμή στη διάρκεια του έτους είναι περίπου 100 W/m^2 σε οριζόντια τοποθετημένη επιφάνεια. Σε όλο τον κόσμο η διακύμανση της διαθέσιμης ισχύος, με μέση νεφοκάλυψη, είναι συνήθως από 87 W/m^2 , στο Άνκορατζ της Αλάσκας, έως 273

W/m², στο Νουακτσότ στις ακτές της Μαυριτανίας. Επίσης, η επίδραση της κάλυψης από τα σύννεφα είναι σημαντικός αρνητικός ενεργειακός παράγοντας για αυτή την τεχνολογία. Κατά συνέπεια, οι καιρικές συνθήκες και η θέση του πλανήτη στην οποία κινείται ένα πλοίο είναι σημαντικοί παράγοντες που θα πρέπει να επηρεάζουν την απόφασή μας για χρήση της ηλιακής ενέργειας.

Αυτή τη στιγμή υπάρχει μια ευρεία γκάμα τεχνολογιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά ο βασικός περιορισμός είναι στο πόσες “ελεύθερες” επιφάνειες έχουμε στο κατάστρωμα, ώστε η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών να μην επηρεάζει τις διάφορες λειτουργίες. Υπό το πλαίσιο αυτό, τα πλοία που μεταφέρουν αυτοκίνητα είναι μια προφανής επιλογή για την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας.

Βάσει των νόμων της φυσικής, αυτή η τεχνολογία πάσχει από εγγενώς χαμηλή ικανότητα παραγωγής, ακόμη και αν πετυχαίναμε βαθμό απόδοσης 100%. Ως εκ τούτου, με τα φωτοβολταϊκά, σε συνδυασμό με τη μέγιστη ειδική ισχύ από τον ήλιο στα εκάστοτε γεωγραφικά πλάτη και την εν γένει περιορισμένη διαθέσιμη επιφάνεια καταστρώματος, η εφικτή ισχύς θα αρκεί μόνο ως συμπληρωματική για τις βοηθητικές απαιτήσεις ισχύος.

Διάφορες θεωρητικές προτάσεις έχουν γίνει κατά καιρούς για την αύξηση της διαθέσιμης περιοχής για την εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών, όπως δομές σε ιστό που διατάσσονται κατά μήκος του καταστρώματος, μερικές φορές σε συνδυασμό με την εκμετάλλευση και του ανέμου (σχήμα 38). Ο αριθμός των ιστίων που μπορούν να τοποθετηθούν εξαρτάται πάλι από τον τύπο του πλοίου και τις λειτουργίες του, ενώ πρέπει να μελετηθεί και η κλίση των πάνελ σε σχέση με τον ήλιο, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητά τους.



Σχήμα 38: Παράδειγμα συνδυασμού εκμετάλλευσης ηλιακής και αιολικής ενέργειας από την SolarSailor [1]. © SolarSailor 2013

Μια άλλη ενδιαφέρουσα πρόταση είναι η χρήση εκτυπωμένων φωτοβολταϊκών κυττάρων [7]. Τα ηλιακά κύτταρα μπορούν να εκτυπωθούν απευθείας σε χάλυβα ή άλλες επιφάνειες, ενεργώντας ως “φωτοβολταϊκό υλικό” αποτελούμενο από ημιαγώγιμα πολυμερή και υλικά νανο-μηχανικής. Φωτο-αντενεργά υλικά μπορούν να επικαλύψουν ή να εκτυπωθούν πάνω σε φθηνά εύκαμπτα υποστρώματα χρησιμοποιώντας την roll-to-roll τεχνική, παρόμοια με τον τρόπο που τυπώνεται η εφημερίδα σε μεγάλα ρολά. Η διαδικασία είναι μη τοξική και φιλική προς το περιβάλλον, και επειδή διεξάγεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, είναι λιγότερο ενεργοβόρα από άλλες τεχνολογίες παραγωγής. Η διαδικασία είναι πέντε φορές πιο οικονομική από την παραγωγή παραδοσιακών ηλιακών πάνελ και έχει προστιθέμενα οφέλη ότι είναι ελαφρύ, ευέλικτο και προσαρμόζεται εύκολα. Στο μέλλον, είναι πολύ πιθανό να δούμε μεγάλες επιφάνειες των δομών ενός πλοίου να καλύπτονται από εκτυπώσιμα ηλιακά κύτταρα.

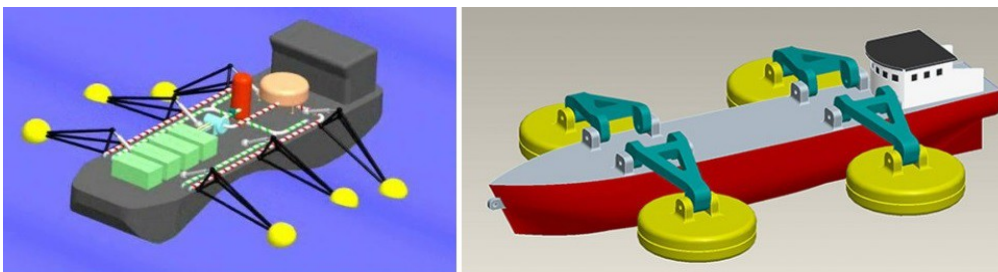
3.4.3 Κυματική ενέργεια

Τα σχέδια των τρεχουσών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ενέργεια των κυμάτων δείχνουν ότι είναι απαραίτητη μια εντελώς νέα σχεδιαστική φιλοσοφία ώστε να εφαρμοστεί για τις ενεργειακές ανάγκες στον τομέα της ναυτιλίας. Ο μικρός αριθμός των σχεδιαστών του κλάδου αυτού προσπαθούν να εμπνευστούν από τη βιολογία και να μιμηθούν το τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούν τους μυς τα δελφίνια και τα μεγάλα ψάρια των πελάγων στα θαλάσσια περιβάλλοντα. Στο πρωτοποριακό οχηματαγωγό “E/S Orcelle” της Wallenius Wilhelmsen Logistics, που φαίνεται στο σχήμα 39, προτείνεται η χρήση μιας σειράς από δώδεκα υποβρύχια πτερύγια, όπου μιμούμενα τις κινήσεις της ουράς των δελφινιών Ιραγουάντι, αξιοποιούν και μετατρέπουν την ενέργεια των κυμάτων του ωκεανού για να την πρόωση και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και υδραυλικής ισχύος για τα συστήματα του πλοίου. Ωστόσο, κάποιες μελέτες υποδεικνύουν ότι δεν θα ήταν λειτουργικά για τόσο μεγάλου μήκους σκάφος (250 m) [33].



Σχήμα 39: Το σχέδιο του οχηματαγωγού “E/S Orcelle” με τα υποθαλάσσια πτερύγια για την μετατροπή κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική. [33]

Μια επιπλέον πρόταση είναι αυτή του σχήματος 40. Αυτό είναι το σύστημα της αμερικανικής Fraunhofer Center for Manufacturing Innovation, το οποίο θα αποτελείται από πλωτές σημαδούρες που θα βρίσκονται δεξιά και αριστερά του πλοίου προσαρτημένες σε αρθρωτούς βραχίονες. Καθώς οι σημαδούρες θα κινούνται σύμφωνα με την αυξομείωση της στάθμης της θάλασσας, οι βραχίονες με τη σειρά τους θα κινούνται και αυτοί πάνω και κάτω και θα μεταφέρουν την απαραίτητη κινητική ενέργεια στην γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενέργεια αυτή θα μπορεί στη συνέχεια να καταναλώνεται ή να αποθηκεύεται σε εποχούμενο σύστημα αποθήκευσης. Το σύστημα αυτό μειονεκτεί σε μεγάλες ταχύτητες λόγω αντίστασης των σημαδούρων, αλλά θα ήταν ιδανικό για πλοία με χαμηλή ταχύτητα ή πλωτά με δυναμικό σύστημα προσδιορισμού θέσης.



Σχήμα 40: Η πρόταση της Fraunhofer για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την κυματική. [34]

Στο σχήμα 41 φαίνεται και το σχέδιο της πρότασης του Jorg Sommer [35] για ένα μικρότερο σκάφος (περίπου 24.5m) που χρησιμοποιεί αιολική, ηλιακή και κυματική για τις ενεργειακές

του ανάγκες, με την κυματική να αναμένεται να είναι μακράν η μεγαλύτερη πηγή ισχύος κατά μέσο όρο στο ιδανικό σενάριο, όπως φαίνεται στον πίνακα 8.

Είδος ΑΠΕ	Μέση Ισχύς (kW)
Ηλιακή	5.5
Αιολική	6.7
Κυματική	319.1

Πίνακας 8: Οι υπολογιζόμενοι μέσοι όροι ισχύος για τις διάφορες ΑΠΕ στο σύστημα του Sommer. [35]



Σχήμα 41: Η πρόταση του Jorg Sommer για σκάφος τροφοδοτούμενο από ΑΠΕ.

Από τις προτάσεις που παρουσιάστηκαν είναι εμφανής η διαφορά στη φιλοσοφία σχεδιασμού που χρειάζεται τόσο για τα σκάφη, όσο και για τα ίδια τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρισμού από κυματική ενέργεια.

3.4.4 Συμπεράσματα.

Οι τεχνολογίες αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη διεθνή ναυτιλία έχουν λίγες πιθανότητες να παίξουν κυρίαρχο ή ακόμα και σημαντικό ρόλο στο εγγύς μέλλον. Για τη βέλτιστη χρήση των ΑΠΕ απαιτείται μια παραδειγματική αλλαγή στον ναυτιλιακό τρόπο σκέψης, όπως η δρομολόγηση με βάση την εποχή και την πρόγνωση του καιρού, ώστε να μεγιστοποιήσουμε την έκθεση στις πρωτογενείς πηγές ενέργειας (σε αυτή την περίπτωση, τον ήλιο, τον άνεμο και τα κύματα).

Για λύσεις άμεσου οφέλους, το βάρος θα πρέπει να δοθεί σε συστήματα για μικρά σκάφη (κάτω των 10000 dwt), τα οποία είναι τα πλέον διαδεδομένα σε όλο τον πλανήτη και μεταφέρουν λιγότερο συνολικό φορτίο αλλά εκπέμπουν περισσότερα αέρια του θερμοκηπίου ανά μονάδα φορτίου και απόστασης που διανύθηκε σε σύγκριση με μεγαλύτερα πλοία.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πιθανώς να έχουν ένα μελλοντικό ρόλο να διαδραματίσουν στην παροχή αρχικής ενέργειας για τον διαχωρισμό του υδρογόνου από το θαλασσίνο νερό, με σκοπό να χρησιμοποιηθεί στην τεχνολογία κυβελών καυσίμου υδρογόνου. [32]

Η μετάβαση, λοιπόν, σε ένα πιο “καθαρό” ενεργειακό προσανατολισμό απαιτεί, μεταξύ άλλων, μια σημαντική μεταστροφή από τις μεταφορές με ενεργοβόρα πλοία που κινούνται με ορυκτά καύσιμα σε ενεργειακά αποδοτικότερους σχεδιασμούς με τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

3.5 Βιβλιογραφία 3^ο Κεφαλαίου

- [1] Royal Academy of Engineering, "Future Ship Powering Options - Exploring alternative methods of ship propulsion", July 2013
- [2] 2011_Balashov - Design of marine generators for alternative diesel-electric power systems
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Combined_steam_and_gas
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Combined_diesel_and_gas
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Combined_diesel-electric_and_gas
- [6] Β. Παπαδιάς, Κ. Βουρνάς, "Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας και Τάσεως", Συμμετρία, 1991.
- [7] DNV GL: The Future of Shipping, Hovik, 2014.
- [8] http://www.joules-project.eu/Joules/technologies/primary_energy_convertors_combustion_and_non-combustion
- [9] J.L. Beaver III, "An Early Conceptual Design and Feasibility Analysis of a Nuclear-Powered Cargo Vessel", 2009, MIT.
- [10] Dedes, E, Turnock, S.R., Hudson, D.A. and Hirdaris, S. (2011) Possible power train concepts for nuclear powered merchant ships. In, LCS 2011: International Conference on Technologies, Operations, Logistics and Modeling for Low Carbon Shipping, Glasgow City, GB, 22 - 24 Jun 2011., 261-274.
- [11] Ansolabehere, S., Deutch, J., Driscoll, M., Gray, P., Holdren, J., Joskow, P., Lester, R. and Moniz, E. (2008), 'The future of nuclear power: an interdisciplinary mit study'.
- [12] Foresighting Report – Energy Storage, 2005, © ITI Scotland Limited
-
- [13] A. Tessarolo, S. Castellan, R. Menis and G. Sulligoi, "Electric Generation Technologies for All-Electric Ships with Medium-Voltage DC Power Distribution Systems", IEEE, 2013
- [14] 2003_ΦΑΡΜΑΚΑΣ_Εφαρμογές Ηλεκτρικής Ισχύος με HTS.pdf
- [15] www.1.bp.blogspot.com/_VyTCyizqrHs/SWzPuPdKkdI/AAAAAAAAACPk/jEqeqxUI5UA/s1600-h/superconmotor2
- [16] www.machinedesign.com/motorsdrives/superconducting-research-spawns-superefficient-motor
- [17] C.G. Hodge and D.J. Mattick, "The electric warship VI", Transactions IMarE, Vol 113, part 2, pages 49-58, 2001
- [18] F. Caricchi, F. Crescimbinì and O. Honorati, "Modular Axial-Flux Permanent-Magnet Motor for Ship Propulsion Drives", IEEE, 1999
- [19] Active Stator™, CONVERTEAM
-
- [20] 2012_Patel - Shipboard Propulsion, Power Electronics, and Ocean Energy
- [21] 2010_Μαραμπέας_Νέα Τοπολογία Ηλεκτρονικών Ισχύος για Εφαρμογές σε Κυψέλες Υδρογόνου Αναστρέψιμης Λειτουργίας
- [22] Zemships.pdf
- [23] Types of Fuel Cells _ Department of Energy
- [24] LNG_report_2015-01_web_tcm8-13833
-

- [25] 130829_EN_SkySails_Product_Brochure
- [26] 2012_Fagiano; Milanese; Razza; Bonansone - High-Altitude Wind Energy for Sustainable Marine Transportation
- [27] ENERKITE_Broschure_EN
- [28] Uwe_Fechner.KitepowerModelling
- [29] gully_2010_ASME_INTEGRATING RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES TO REDUCE LARGE SHIP FUEL CONSUMPTION
- [30] Insight Issue 03 for web
- [31] https://en.wikipedia.org/wiki/Hornblower_Hybrid
- [32] IRENA_Tech_Brief_RE_for Shipping_2015
- [33] 2009_Rosen_Wave Energy Propulsion for Pure Car and Truck Carriers (PCTCs)
- [34] <http://www.gizmag.com/wave-power-system-on-ships/19251/>
- [35] Jorg_Sommer_-_Ship_propulsion_by_renewable_energies_-_Natural_Propulsion_2013

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

***Τα βασικότερα μέρη του ΣΗΕ ενός DC-Πλοίου –
Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage
Systems - ESS)***

Χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης, όπου η μετάδοση της ενέργειας είναι ηλεκτρική και η κίνηση στην προπέλα και τους πλευρικούς προωθητήρες παρέχεται από μεταβλητής ταχύτητας ηλεκτροκινητήρες, η κατανάλωση καυσίμου μπορεί να μειωθεί σημαντικά για πολλούς τύπους σκαφών με σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Ωστόσο, σε ορισμένες ειδικές συνθήκες εργασίας, όπως η λειτουργία δυναμικού προσδιορισμού θέσης (Dynamic Positioning - DP), το φορτίο μεταβάλλεται σημαντικά, για παράδειγμα, λόγω της κυματικής διαταραχής της θάλασσας και την συχνή αλλαγή του καιρού. Η ξαφνική μεταβολή του φορτίου είναι μια συνεχής διαταραχή του ηλεκτρικού συστήματος και των κινητήριων μηχανών. Επιπλέον, για να διατηρηθούν τα περιθώρια ασφάλειας των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η μέση φόρτιση των εν ενεργεία μηχανών πρέπει να μειωθεί, γεγονός που αυξάνει την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές στο περιβάλλον.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (energy storage systems - ESS) μπορούν, με την ταχεία δράση τους, να λύσουν αυτά τα προβλήματα με την αποτελεσματική μείωση των διακυμάνσεων σε ένα σύστημα ισχύος. Αυτό θα εξομαλύνει τις αιφνίδιες αλλαγές στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, θα βελτιώσει τη σταθερότητα του συστήματος και, ενδεχομένως, να αυξηθεί η μέση φόρτιση με λιγότερους ηλεκτροπαραγωγούς σε λειτουργία και έτσι να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου και τη συντήρηση. [1]

Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο των ESS είναι ότι αποτελούν αρκετά προσιτή λύση και είναι αρκετά εύκολη η εγκατάστασή τους σε ήδη υπάρχοντα ηλεκτρικά συστήματα για τη μείωση των καυσαερίων. Είναι λογικό επομένως πολλές ναυτιλιακές εταιρίες να προσανατολίζονται προς τα ESS ως εναλλακτική για τις τεχνολογίες φίλτρων, το LNG ή τη χρήση καυσίμων με 0.1% θειούχα για να επιτύχουν τα αυστηρά όρια ρύπων που επιβάλλονται με τον καιρό. Ο Chris Kruger, αντιπρόεδρος της Cogrus Energy, αναφέρει στο [2] επ' αυτού: “Η τιμή των καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο είναι περίπου 45% υψηλότερη από εκείνη του μαζούτ. Η τρέχουσα εκτίμηση κόστους για εγκατάσταση φίλτρων καυσαερίων είναι στα 5,6 εκατομμύρια δολάρια ανά σκάφος, ενώ η τροποποίηση για χρήση LNG είναι πάρα πολύ ακριβή, περίπου το διπλάσιο του κόστους των φίλτρων.” (“*The price of low-sulfur fuel is approximately 45% higher than that of HFO. The current estimate for a scrubber retrofit is US\$5.6 million per vessel, while LNG is too expensive for retrofits, being about twice the price of a scrubber fit.*”).

Στις μέρες μας, η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε μορφές όπως [3]:

- ✓ η ηλεκτροχημική - π.χ. μπαταρίες, οξειδοαναγωγικές κυψέλες καυσίμου/μπαταρίες (regenerative fuel cells ή redox flow batteries),
- ✓ η μηχανική – συστήματα με σφόνδυλο (flywheel electric storage systems – FESS), συστήματα με πεπιεσμένο αέρα (compressed air energy storage – CAES), αποθήκευση νερού σε υδατοδεξαμενές (pumped hydro storage systems),
- ✓ η ηλεκτρική – υπερπυκνωτές (super-capacitors) και αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας με υπεραγωγούς (super-conducting magnetic energy storage - SMES)
- ✓ η χημική – κύκλος υδρογόνου (ηλεκτρόλυση-> αποθήκευση-> μετατροπή ενέργειας),
- ✓ η θερμική – θερμοαντήρες νερού κλπ.

Καθένα σύστημα από τα παραπάνω προσφέρει τα ιδιαίτερα του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Όμως τα μέσα αποθήκευσης που κυρίως προτείνονται στην βιβλιογραφία για την περίπτωση είτε εμπορικού είτε πολεμικού πλοίου είναι οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, τα συστήματα με σφόνδυλο (flywheel energy storage systems - FESS), οι υπερπυκνωτές (supercapacitors), τα κρυογονικά συστήματα αποθήκευσης μαγνητικής ενέργειας με υπεραγωγούς

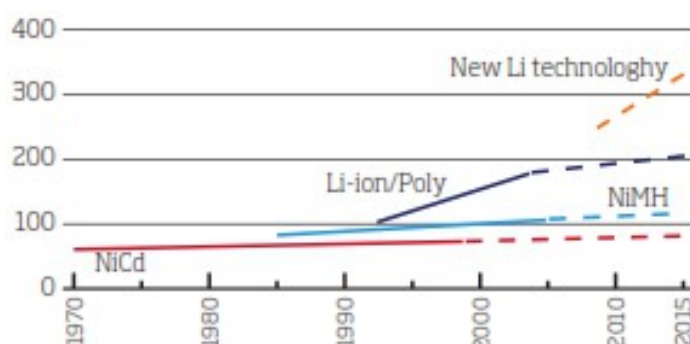
(superconducting magnetic energy storage – SMES) και οι οξειδοαναγωγικές κυψέλες καυσίμου (redox flow cells). Καθένα από αυτά μπορεί να προσφέρει, ανάλογα με τις ανάγκες σχεδιασμού, πολλά πλεονεκτήματα αλλά όλα έχουν κοινό χαρακτηριστικό ότι τροφοδοτούνται και τροφοδοτούν σε συνεχή τάση, καθιστώντας τα, επομένως, ιδιαιτέρως εύχρηστα σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο DC-πλοίου.

Αυτή τη στιγμή, με τις υπάρχουσες τεχνολογίες, οι τύποι των πλοίων για τους οποίους παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η εγκατάσταση ESS είναι τα επιβατικά-οχηματαγωγά (ferries), παράκτια σκάφη υποστήριξης (offshore vessels), δεξαμενόπλοια για κοντινές αποστάσεις (shuttle tankers), σκάφη για υποστήριξη αιολικού πάρκου (wind farm vessels), τα επιβατηγά πλοία (passenger boats), αλιευτικά σκάφη (fishing boats), ρυμουλκά (tugs), σκάφη ειδικών εργασιών (workboats) και άλλα ειδικά πλοία με μεγάλες διακυμάνσεις του φορτίου των μηχανών. Η υβριδοποίηση των πλοίων μπορεί να προσφέρει εξοικονόμηση καυσίμου 20-30%, με χρόνο αποπληρωμής από 2 έως 4 χρόνια. Μπορεί να βελτιώσει τις επιδόσεις των πετρελαιοκίνητων και LNG συστημάτων, είτε πρόκειται για νέα κατασκευή ή τροποποίηση ήδη υπάρχουσας, και μπορεί να λειτουργήσει ως μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας από την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας, από την ανατροφοδοτική πέδηση (regenerative braking) των γερανών και αυτής που δημιουργείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επίσης οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας είναι απαραίτητο στοιχείο σε συστήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου. [4]

4.1 Μπαταρίες

Οι ηλεκτροχημικές μπαταρίες είναι η πιο ώριμη και ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία μεταξύ των βασικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Οι μολύβδου οξέος, ψευδάργυρου-άνθρακα, νικελίου-μετάλλου και νικελίου-καδμίου υπήρξαν οι πιο κοινοί τύποι μπαταριών τα τελευταία 150 χρόνια. Κατά την περίοδο αυτή έχουν εξελιχθεί ελάχιστα. Σε σχέση και με άλλα μέσα αποθήκευσης, παρουσιάζουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, χαμηλή πυκνότητα ισχύος και πάσχουν από διάφορες άλλες αδυναμίες. Αυτές συμπεριλαμβάνουν ένα ανεπιθύμητο ποσοστό αυτοεκφόρτισης και ένα φαινόμενο γνωστό ως “φαινόμενο μνήμης” (memory effect), κατά το οποίο η μέγιστη χωρητικότητα ενέργειας μιας μερικώς αποφορτισμένης μπαταρίας μειώνεται με κάθε επαναφόρτιση. Κατά συνέπεια, αυτά τα χαρακτηριστικά δεν τις ευνοούν πρακτικά ή οικονομικά για χρήση σε μεγάλη κλίμακα στα πλοία.

Τα τελευταία χρόνια, έχουν υπάρξει σημαντικές βελτιώσεις και η πυκνότητα ενέργειας και ισχύος γίνονται ολοένα υψηλότερες. Αυτά τα νεότερα είδη συσσωρευτών μπορούν να επαναφορτιστούν ταχύτερα, έχουν χαμηλότερα ποσοστά αυτοεκφόρτισης και είναι απαλλαγμένα από το φαινόμενο μνήμης. Στο σχήμα 1 φαίνεται η εξέλιξη στις διάφορες τεχνολογίες από το 1970 μέχρι σήμερα και η αύξηση στην ενεργειακή τους πυκνότητα (σε Wh/kg).



Σχήμα 1: Εξέλιξη στην χωρητικότητα (Wh/kg) των επαναφορτιζόμενων μπαταριών (πηγή: Avicenne Energy). [5]

Οι νέες μπαταρίες περιλαμβάνουν χημικούς συνδυασμούς μετάλλου-θείου, όπου το μέταλλο είναι μαγνήσιο, νάτριο ή λίθιο ή μετάλλου-οξυγόνου γνωστός και ως μετάλλου-αέρος, όπου το μέταλλο είναι ψευδάργυρος, λίθιο ή νάτριο. Επί του παρόντος, ο βασικότερος υποψήφιος είναι ο συσσωρευτής λιθίου-αέρα. Θεωρητικά μια μπαταρία λιθίου-αέρα μπορεί να απελευθερώσει 11.780 Wh από την οξείδωση ενός κιλού λιθίου. Σε αντίθεση με τις περισσότερες μπαταρίες, οι οποίες φέρουν το απαραίτητο οξειδωτικό στο εσωτερικό, η μπαταρία λιθίου-αέρα δεσμεύει το οξυγόνο από την ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης και το απελευθερώνει κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Ως εκ τούτου, οι μπαταρίες λιθίου-αέρα μπορεί να είναι πολύ ελαφριές αλλά απαιτούν ένα σύστημα παροχής και απομάκρυνσης του αέρα, αντίστοιχο με αυτό στις μηχανές που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα.

Παρά την θεωρητικά υψηλή πυκνότητα ενέργειας της τεχνολογίας των μπαταριών λιθίου-αέρα, οι επιδόσεις που επιτεύχθηκαν είναι κατώτερες του αναμενόμενου (2000 Wh/kg). Παρ' όλα αυτά, η ανάπτυξη των μπαταριών λιθίου-αέρα είναι σε πρώιμο στάδιο και έχουν εμφανίσει επιτυχίες και αποτυχίες, συμπεριλαμβανομένων των προβλημάτων στην εξασθένηση χωρητικότητας, τον κύκλο ζωής, αξιοσημείωτη αναντιστοιχία σε τάση φόρτισης και εκφόρτισης, καθώς και περιορισμούς στο ρυθμό διάχυσης του οξυγόνου. Δεδομένου ότι

πολλές ερευνητικές ομάδες που εργάζονται σε αυτόν τον τεχνικό τομέα, οι μπαταρίες λιθίου-αέρα πρόκειται να αυξήσουν σημαντικά το επίπεδο της ενεργειακής πυκνότητας σε σχέση με τους συσσωρευτές ιόντων λιθίου.

Όσον αφορά τη διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, τα παγκόσμια κοιτάσματα λιθίου είναι συγκριτικά περιορισμένα. Σύμφωνα με το [6] τα παγκόσμια αποθέματα λιθίου είναι μεταξύ 10 με 11 εκατομμύρια τόνους με το μεγαλύτερο μέρος να βρίσκεται στη Χιλή. Ως εκ τούτου, εάν αυξηθεί η χρήση των μπαταριών με βάση το λίθιο, θα περιοριστούν σημαντικά τα παγκόσμια αποθέματα ενώ αναμένεται να αυξηθεί το κόστος του. Μια εναλλακτική τεχνολογία μπαταριών που μπορεί να αντιμετωπίσει τον κίνδυνο αυτό είναι η μπαταρία ιόντων μαγνησίου. Ερευνητικά προγράμματα βρίσκονται σε εξέλιξη και υπάρχουν αισιόδοξες αναφορές σύμφωνα με τις οποίες, επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ιόντων μαγνησίου, χρησιμοποιώντας τα καλύτερα νέα υλικά καθόδου, έχουν την τριπλάσια πυκνότητα ενέργειας σε σύγκριση με τις λιθίου-ιόντων ή κοινώς περίπου την ίδια βελτίωση όπως αυτή που προβλέπεται για συσσωρευτές λιθίου-αέρα. Επιπλέον, η τιμή του μαγνησίου είναι, τη δεδομένη στιγμή, μικρότερη (περίπου στο 1/20) ενώ τα αποθέματά του είναι κατά πολύ μεγαλύτερα. Στο φλοιό της Γης απαντάται σε ποσότητα 29.000 ppm (parts per million), ενώ για το λίθιο είναι 17ppm και στους ωκεανούς σε 1.290 ppm και 0,17 ppm, αντίστοιχα. Πάντως, σύμφωνα και με το [4], οι τιμές των συστημάτων συσσωρευτών υψηλής χωρητικότητας σε ενέργεια προβλέπεται να πέσουν από 500 \$/kWh στα 200 \$/kWh μέχρι το 2020 και στα 160 \$/kWh το 2025.

4.1.1 Σύγκριση στις πιθανές τεχνολογίες συσσωρευτών.

Προκειμένου να γίνει σύγκριση μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών θα επιλέξουμε μια μπαταρία αναφοράς με ωφέλιμο ενεργειακό περιεχόμενο 1 MWh. Ανάλογα με την τεχνολογία η διαθέσιμη ισχύς, ο όγκος, το βάρος και η τιμή της μπαταρίας αναφοράς θα διαφέρουν σημαντικά.

➤ *Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος (Lead-acid batteries).*

Πρόκειται για την παλαιότερη και πιο “ώριμη” τεχνολογία επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Το κύριο τους πλεονέκτημα είναι η χαμηλή τους τιμή, περί τα 150 \$/kWh. Τα βασικά μειονεκτήματά τους είναι η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα (20-40 Wh/kg) και ο πολύ περιορισμένος κύκλος ζωής (Cycle of Life) των 300-500 κύκλων για φόρτιση από 80% ποσοστό (βάθος) εκφόρτισης (depth of discharge - DOD). Μολονότι η χαμηλή τιμή του συσσωρευτή μολύβδου-οξέος σε σχέση με άλλες τεχνολογίες μπαταριών θεωρητικά επιτρέπει να αντικατασταθεί όποτε χρειαστεί με καινούρια κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση το χρόνο μη διαθεσιμότητας του πλοίου. Σε πολλές περιπτώσεις αυτή η μη διαθεσιμότητα δεν είναι επιτρεπτή. Για εφαρμογές σε πλοία οι μπαταρίες με βαλβίδες εξαέρωσης (Valve Regulated Lead-Acid – VRLA) με απορροφητικό γυαλί ματ (Absorbed Glass Mat - AGM) είναι οι πλέον κατάλληλες, καθώς μπορούν να λειτουργούν υπό μερική φόρτιση (state of charge - SOC) σε αντίθεση με τις ανοιχτού τύπου, έχουν μεγαλύτερη θερμική σταθερότητα και μπορούν να φορτίζονται με υψηλότερης έντασης ρεύμα απ' ό,τι οι VRLA με ηλεκτρολύτη σε μορφή γέλης. Η τάση αυτή ήδη παρατηρείται από το 2009 σε συστήματα των 24 Vdc σε μικρότερα σκάφη. Η ενεργειακή απόδοση της AGM μπαταρίας είναι μεταξύ 75 και 90%.

Ως παράδειγμα επιλέχθηκαν τα στοιχεία της μπαταρίας Enersys PC2250[9]. Όταν

αυτή εκφορτίζεται σε μισή ώρα, μπορεί να προσδώσει 40 W/kg, δηλαδή επιτυγχάνει ενεργειακή πυκνότητα 20 Wh/kg σε επίπεδο στοιχείου (cell). Ο συσσωρευτής αναφοράς μας της 1 MWh μπορεί να προσφέρει λοιπόν ισχύ 2 MW, μια σχετικά μικρή τιμή. Η επαναφόρτιση πρέπει να γίνεται σε έναν μάλλον μέτριο ρυθμό που κυμαίνεται μεταξύ 300 και 700 kW, αλλιώς θα έχουμε άνοιγμα των βαλβίδων και εκτόνωση του αερίου (δηλαδή μόνιμη απώλεια υγρού) [10]. Όπως προαναφέρθηκε, οι μπαταρίες AGM VRLA είναι πολύ πιο ανεκτικές σε σχέση με αυτές σε μορφή gel ως προς το επίπεδο ρεύματος φόρτισης που επιδέχονται, αλλά με χαμηλή επιβάρυνση από ρεύματα επιτυγχάνεται η μέγιστη διάρκεια του κύκλου ζωής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζονται 5 ως 6 ώρες για την επαναφόρτιση της μπαταρίας από 80% DOD.

➤ *Ηλεκτρικές στήλες υβριδίου νικελίου-μετάλλου (NiMH).*

Οι μπαταρίες NiMH έχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα (40-70 Wh/kg) ανά στοιχείο από τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος όπως σημαντικά υψηλότερη είναι και η αναλογία ισχύος-ενέργειας, με τιμές που κυμαίνονται από 4 έως πάνω από 20. Το κύριο μειονέκτημα της μπαταρίας NiMH είναι η χαμηλή ενεργειακή απόδοση (της τάξεως του 65-75%). Η τιμή αναμένεται να είναι μεταξύ 240 και 320 \$/kWh για μπαταρίες μεγάλης χωρητικότητας (>100 Ah) που παράγονται σε ρυθμούς 20k-100k μονάδες/έτος. Δεδομένου ότι υπάρχουν διαθέσιμες μπαταρίες NiMH υψηλής ενέργειας/μέσης ισχύος και μεσαίας ενέργειας/υψηλής ισχύος, ένα παράδειγμα και των δύο συστημάτων είναι δίνεται παρακάτω.

Το παράδειγμα υψηλής ενέργειας/μέσης ισχύος βασίζεται στη μπαταρία της Johnson Controls-Saft των 12V/100Ah. Αυτή, ανά στοιχείο, μπορεί να προσδώσει 195 W/kg με ενεργειακή πυκνότητα 65 Wh/kg. Ο συσσωρευτής λοιπόν αναφοράς μας της 1 MWh μπορεί να προσδώσει ηλεκτρική ισχύ 3 MW.

Για το παράδειγμα υψηλής ισχύος/μέσης ενέργειας θα χρησιμοποιήσουμε τα στοιχεία της 7.2V/6.5Ah μονάδας της Primearth EV Energy, η οποία χρησιμοποιείται στο Toyota Prius. Αυτή η μονάδα έχει πυκνότητα ισχύος 1130 W/kg και να επιτυγχάνει ενεργειακή πυκνότητα 39 Wh/kg ανά στοιχείο. Για μπαταρία αναφοράς 1 MWh λοιπόν έχουμε ένα εκπληκτικό μέγεθος ισχύος 29 MW. Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι αυτή η υψηλή απόδοση ισχύος μπορεί να επιτευχθεί μόνο μεταξύ 100 και 45% SOC. Καθώς το DOD αυξάνεται, η ισχύς εξόδου θα μειωθεί, αλλά εξακολουθεί να παραμένει πολύ υψηλή.

Η μονάδα υψηλής ενέργειας/μέσης ισχύος έχει διάρκεια ζωής πάνω από 2000 κύκλους, για DOD της τάξης του 80%. Για την μονάδα μέσης ενέργειας/υψηλής ισχύος δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, αλλά αυτή πρέπει να είναι γύρω στους 1500-2000 κύκλους για 80% DOD. Η επαναφόρτιση της μπαταρίας NiMH είναι πολύ πιο γρήγορη από ότι η AGM VRLA, δεδομένου ότι μια στήλη 1 MWh NiMH είναι δυνατόν να ξεκινήσει να φορτίζεται και από επίπεδο αποφόρτισης (DOD) μικρότερο του 70-75%.

➤ *Μπαταρίες νατρίου-χλωριούχου νικελίου (Na-NiCl₂ – ZEBRA®).*

Οι συσσωρευτές αυτοί απαρτίζονται από άνοδο τετηγμένου νατρίου (Na) και κάθοδο χλωριούχο νικέλιο (NiCl₂) [11]. Κατασκευάζονται από την MES-DEA στην Ελβετία και είναι η μοναδική μπαταρία που παράγεται αποκλειστικά για ηλεκτρικά οχήματα (electric vehicles – EV). Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μπαταρίας είναι ότι λειτουργεί μεταξύ 270 και 350° C, δηλαδή χρειάζεται ένα σύστημα θέρμανσης για την εκκίνηση της λειτουργίας της, όμως κατά τη διάρκεια αυτής η ανάγκη αυτή παύει να

υφίσταται. Από μια άλλη οπτική όμως αυτό μπορεί να θεωρηθεί και θετικό καθώς μπορούμε να πούμε πως δεν επηρεάζεται η απόδοσή της από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Επίσης, λόγω των υλικών που χρησιμοποιούνται, είναι μη τοξική και ανακυκλώσιμη. Η πυκνότητα ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερη από τους τύπους μολύβδου-οξέος και NiMH, καθώς φτάνει τις 85 Wh/kg (120 Wh/kg κατ' άλλη πηγή [12]) σε επίπεδο στοιχείου. Ο λόγος ισχύος-ενέργειας είναι περίπου 2, η οποία είναι χαμηλότερη από τις NiMH. Το κόστος τους είναι 600 \$/kWh όταν αγοράζονται σε αρκετά μεγάλη ποσότητα. Σε πολύ μεγάλης κλίμακας παραγωγή (10k-100k μονάδες/έτος) η τιμή αυτή αναμένεται να πέσει στα 335-200 \$/kWh, αν και σύμφωνα με τους Galloway και Dustmann [13] το κόστος παραγωγής είναι 109 \$/kWh, επομένως υπάρχει περιθώριο για περαιτέρω μείωση. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτής της μπαταρίας είναι η υψηλή διάρκεια ζωής των 15 ημερολογιακών ετών (1000-2500 κύκλοι επαναφόρτισης από 100% DOD). Επίσης, μπορεί να φορτίσει ως 80% SOC σε 75 λεπτά [14]. Το βασικό μειονέκτημα είναι το υψηλές απώλειες των 100 W σε κατάσταση αναμονής για τη μονάδα των 16 kWh/32 kW. Ωστόσο, το πολύ χαμηλότερο κόστος της τεχνολογίας Na-NiCl₂ σε σύγκριση με NiMH ή Li-ion σημαίνει ότι για μια μπαταρία 20kWh ZEBRA, θα χρειαστούν περισσότερα από 50 χρόνια να διατηρείται μονίμως σε αναμονή για να ισούνται οι απώλειες ενέργειάς της με το επιπλέον κόστος των άλλων μπαταριών. Ένα ακόμα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό αυτού του τύπου συσσωρευτή είναι η υψηλή διαθεσιμότητα και το μικρό κόστος των υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του (NaCl και Ni).

Αυτή η μπαταρία χρησιμοποιείται ήδη σε διάφορους τύπους ηλεκτρικών οχημάτων και λεωφορείων, ενώ η Rolls-Royce την έχει προσθέσει στην γκάμα των προϊόντων της ως αντικαταστάτη για τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος σε ντίζελ-ηλεκτρικά υποβρύχια.

➤ *Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion).*

Οι Li-ion είναι οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες με την υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας και ισχύος. Ο κύκλος ζωής τους είναι υψηλότερος από άλλους συσσωρευτές και φτάνει τους 3000 κύκλους, από 80% DOD, διπλάσιο από εκείνο των NiMH και ZEBRA. Επίσης πολύ ευεργετικό είναι η υψηλή αποθηκευτική αποδοτικότητα (>90%) και ο χαμηλός βαθμός αυτοεκφόρτωσης σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες. Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι πρόκειται για μια ελάχιστα χρησιμοποιημένη τεχνολογία στον τομέα της ηλεκτροκίνησης, η οποία δεν έχει ακόμη αποδείξει την αξία της σε θέματα ασφάλειας και αξιοπιστίας. Για την ενίσχυση της ασφάλειας και την προστασία από υπερφορτίσεις και υπερεκφορτίσεις, η μπαταρία πρέπει να είναι εξοπλισμένη με ένα σύστημα διαχείρισης (battery management system - BMS). Το BMS “παρακολουθεί” ξεχωριστά την τάση κάθε στοιχείου και διακόπτει τη φόρτιση όταν αυτή πάρει τιμή πάνω από ένα όριο (π.χ. 4.3V) και την εκφόρτιση όταν η τάση του στοιχείου πέσει κάτω από ένα άλλο όριο (π.χ. 2.5V). Η λειτουργία της μπαταρίας διακόπτεται επίσης όταν η θερμοκρασία ανέβει πάνω από το επιτρεπτό όριο. Το κόστος των συσσωρευτών μεγάλης χωρητικότητας για παραγωγή μεγάλης κλίμακας προβλέπεται να μειωθεί σε 175 με 285 \$/kWh.

Εδώ θα εξετάσουμε τρία παραδείγματα στηλών Li-ion. Το πρώτο είναι μία υψηλής ενέργειας/μέσης ισχύος μπαταρία με βάση την Kokam 3.7V/100Ah. Η μπαταρία έχει πυκνότητα ισχύος 700 W/kg και ενεργειακή πυκνότητα 160Wh/kg σε επίπεδο μονάδας. Η δεύτερη περίπτωση είναι μία μέσης ενέργειας/υψηλής ισχύος μπαταρία Li-ion με βάση την Kokam 3,7V/7,2 Ah. Αυτή μπορεί να προσδώσει 2.600 W / kg και να επιτύχει μια ενεργειακή πυκνότητα των 110Wh/kg ανά στοιχείο. Όπως και στα παραδείγματα της NiMH, είναι εμφανές ότι μπορούν να γίνουν διαφορετικοί συμβιβασμοί ανάλογα με το αν η τοπολογία μας απαιτεί υψηλή ενέργεια ή υψηλή

ισχύ. Θα πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι η μέσης ενέργειας Li-ion επιτυγχάνει καλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από την υψηλής ενέργειας NiMH. Ένα τρίτο παράδειγμα είναι η μπαταρία Altairnano, μια πολλά υποσχόμενη νέα μπαταρία με δυνατότητα να λειτουργεί για 15 χρόνια, ενώ ο κύκλος ζωής φαίνεται να ξεπερνάει τους 15.000 και ακόμη τους 20.000 κύκλους. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι σχετικά μικρή (70 Wh/kg), αλλά η πυκνότητα ισχύος αξιώνει να φθάσει τα 4000 W/kg, που είναι εκατό φορές καλύτερη από το συσσωρευτή μολύβδου-οξέος.

Συγκεντρωτικά λοιπόν, για να συγκρίνουμε τις υπονήφιες τεχνολογίες συσσωρευτών κάνουμε τις εξής παραδοχές. Η μπαταρία αναφοράς είναι 1 MWh ωφέλιμης ενέργειας, όπως αναφέραμε και παραπάνω. Όλες πρέπει να αποφορτίζονται σε μέγιστο βάθος 80%, έτσι ένα επιπλέον 25% των στηλών πρέπει να ληφθεί υπόψη προκειμένου να ικανοποιηθεί η απαίτηση αυτή. Επίσης, κατά τη μετάβαση από στήλες σε συστοιχίες, επιπλέον βάρος και όγκος πρέπει να προστεθεί λόγω του περιβλήματος και του κυκλώματος ψύξης και προστασίας. Το βάρος πολλαπλασιάζεται με ένα συντηρητικό συντελεστή 1.5, ενώ ο όγκος πολλαπλασιάζεται επί 2. Οι συντελεστές αυτοί συμφωνούν με τις τιμές για μεγάλα πακέτα μπαταριών που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 1.

	Ενέργεια (MWh)	Ισχύς (MW)	Όγκος (m ³)	Βάρος (τόνοι)	Κύκλος Ζωής @ 80% DOD
AGM Pb-Ac	1	2	40.4	73.9	400 κύκλοι
YE/MI NiMH	1	3	14.8	23.1	2000 κύκλοι
YI/ME NiMH	1	29	21.1	38.5	2000 κύκλοι
ZEBRA (Na-NiCl ₂)	1	2.2	13.0	18.3	1500 κύκλοι
YE/MI Li-ion	1	4.4	5.9	9.4	3000 κύκλοι
YI/ME Li-ion	1	23.6	9.6	13.6	3000 κύκλοι
Altairnano (Li-ion)	1	57	23.6	21.4	20000 κύκλοι

Πίνακας 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά μπαταρίας αναφοράς 1 MWh με βάση διάφορες τεχνολογίες. [8]

Ο συσσωρευτής αναφοράς ζυγίζει μεταξύ 9,4 και 73,9 τόνων, λαμβάνοντας υπόψη το σύστημα διαχείρισης μπαταριών (BMS), τους μηχανισμούς ασφαλείας, τις δομές στήριξης και συσκευασίας και ούτω καθεξής. Η μολύβδου-οξέος, η ZEBRA και η υψηλής ενέργειας NiMH μπορεί να προσδώσει 2 έως 3 MW. Μία ενδιάμεση τιμή επιτυγχάνεται με την υψηλής ενέργειας Li-ion που μπορεί να δώσει ισχύ 4,4 MW. Οι υψηλής ισχύος NiMH και Li-ion μπαταρίες μπορεί να προσφέρουν περισσότερα από 20 MW, ενώ η Altairnano υπερβαίνει ακόμη και τα 50 MW. Πρόκειται λοιπόν για αξιόλογες τάξεις ισχύος. 23-29 MW είναι η ονομαστική ισχύς της μεγαλύτερης τετράχρονης μηχανής ντιζελ, ενώ τα 50 MW της μπαταρίας Altairnano μπορούν να αντικαταστήσουν δύο από τους πολύ δημοφιλείς αεριοστρόβιλους LM2500. Η διάρκεια αυτής της ισχύος εξόδου είναι βέβαια πολύ περιορισμένη, εκφορτίζοντας μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία 1MWh σε 3 μόλις λεπτά για φορτίο 20 MW, κάτι που δείχνει την περιορισμένη πρακτική αξία αυτών των πολύ υψηλών λόγων ισχύος προς ενέργεια. Η ενεργειακή πυκνότητα των διαφόρων τεχνολογιών έχει επίσης βαρύνουσα σημασία. Η 1 MWh υψηλής ενέργειας μπαταρία Li-ion έχει 7 φορές λιγότερο βάρος από μια μολύβδου οξέος και δύο φορές λιγότερο από ότι μια τύπου ZEBRA ή υψηλής ενέργειας NiMH.

Ως εκ τούτου, η χρησιμότητα των διαφόρων ηλεκτρικών στηλών θα πρέπει να εξεταστεί πάντα σε σχέση με την εφαρμογή μας.

Ένα επιτυχημένο παράδειγμα εγκατάστασης συσσωρευτών αποτελεί το νορβηγικό επιβατικό-οχηματαγωγό MF Finnøy της Norled. Το σύστημα αποθήκευσης λειτουργεί στα 960V με

ενεργειακή ικανότητα 260kWh και αποτελείται από 40 προηγμένες μπαταρίες πολυμερών λιθίου τύπου AT6500 της Corvus Energy. Στις 17/11/2014, όπως αναφέρεται στο [7], ολοκληρώθηκε επιτυχώς η τρίμηνη δοκιμή τους. Ένα ακόμα παράδειγμα αποτελεί το OSV Viking Lady της Eidesvik Offshore ASA. Αυτό ήταν το αποτέλεσμα του προγράμματος FellowSHIP στο τρίτο σκέλος του οποίου το 2013 εγκαταστάθηκαν 68 μπαταρίες των 6,5 kWh (Corvus Energy AT6500 li-polymer), δηλαδή περίπου 450kWh, που λειτουργούν στα 856VDC κάνοντας δυνατή, σε συνδυασμό με τα ήδη εγκατεστημένα fuel cells, την υβριδική ηλεκτροπρόωση (hybrid-electric propulsion) [15]. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται μερικά εμπορικά πλοία και πλοiάρια που χρησιμοποιούν τους συσσωρευτές πολυμερών λιθίου AT6500 της Corvus Energy σαν βοηθητικούς ή, ενίοτε, και κύριους παροχείς ενέργειας για την πρόωση.

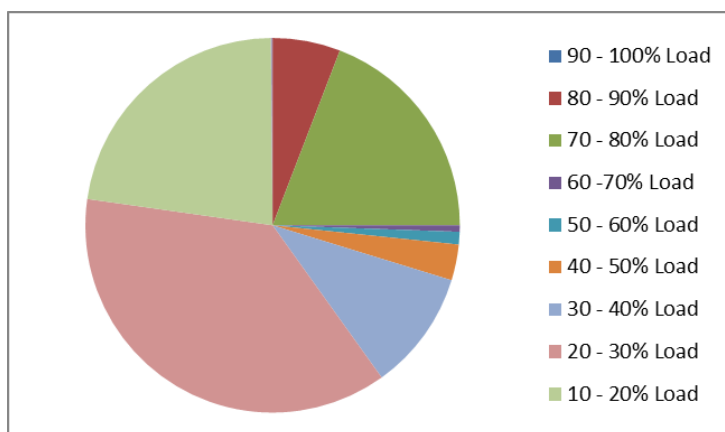
Όνομα πλοίου	Εταιρία	Τύπος	Χωρητικότητα μπαταριών	Τάση λειτουργίας	Έτος κατασκ./τροποπ.
Viking Lady	Eidesvik	OSV	442 kWh	856 VDC	2013
Edda Ferd	Ostensjo	PSV	260 kWh	900 VDC	2013
Prinsesse Benedikte	Scandlines	Hybrid Ferry	2,6 MWh	932 VDC	2013
Deutschland					
Prins Richard					
Schleswig Holstein					
Bhagwan Dryden	Bhagwan	56m Dive Support	130 kWh	450 VDC	2013
Spirit of the Sound	Norwalk Maritime Aquarium	Hybrid 65-foot Catamaran	91 kWh	600 VDC	2015
RT Adriaan	Kotug	Hybrid Tugboat	78 kWh	490 VDC	2012
RT Evolution	Kotug	Hybrid Tugboat	117 kWh	400 VDC	2012
Euro	Svitzer/ Chevron	Hybrid Tugboat	533 kWh	950 VDC	2014
Perentie					
Boodie					
Dugong					
Ampere	Norled	Passenger and Automotive Ferry	1,9 MWh	900 VDC	2014
MF Finnoy	Norled	Passenger and Automotive Ferry	260 kWh	900 VDC	2014
Folgefonn	Norled	Passenger and Automotive Ferry	1,4 MWh	800 VDC	2014
ZeroCat™ 120 [16]	Norled	Passenger and Automotive Ferry	1,46 MWh	---	2015

Πίνακας 2: Λίστα εμπορικών πλοίων με μπαταρίες Corvus Energy AT6500 με την εκάστοτε χωρητικότητα. [15]

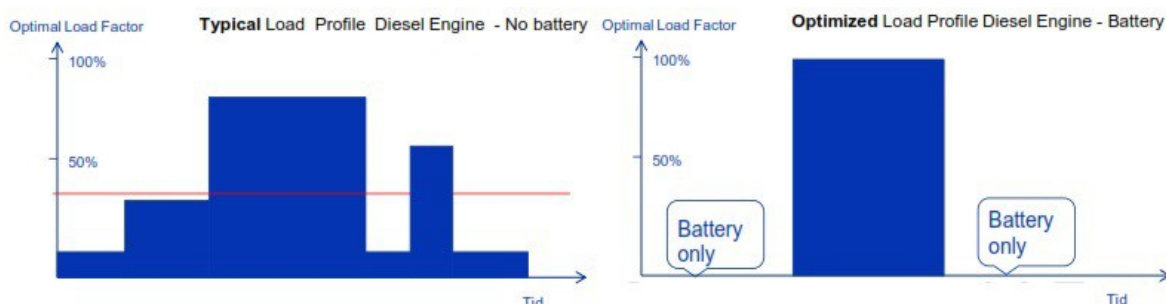
Παρατηρούμε από τα στοιχεία αυτού του πίνακα ότι πρόκειται για πλοία κυρίως μεσαίου μεγέθους, ως επί το πλείστον πλήρως ηλεκτροπροωθούμενα ή υβριδικά, που κινούνται κυρίως κοντά στις ακτές και τα οποία τελούν υπό μερικό ηλεκτρικό φορτίο για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Άλλωστε, σύμφωνα και με τον Narve Mjøe, υπεύθυνος για τα προγράμματα και τις υπηρεσίες που έχουν σχέση με μπαταρίες στην DNV GL, “Το 2020, τα περισσότερα μεσαία και μεγάλα επιβατικά θα φέρουν κάποιο είδος μπαταρίας... όπως και όσα πλοία ελλιμενίζονται συχνά” (“In 2020, most medium and large passenger-carrying vessels will have some form of battery onboard... as will vessels with frequent stays in port.”) [2].

Στο σχήμα 2 φαίνεται χαρακτηριστικά η κατανομή φορτίων ενός βοηθητικού παράκτιου

σκάφους (offshore supply vessel – OSV) όπως για παράδειγμα το Viking Lady. Κατά το 75% σχεδόν της διάρκειας λειτουργίας του τελεί υπό φορτίο κάτω του 50% και κατά τα 2/3 περίπου υπό φορτίο κάτω από 30%. Στην περίπτωση που θα μπορούσαμε να αποφύγουμε τη λειτουργία των πολύ μειωμένης απόδοσης στο μερικό φορτίο θερμικών μηχανών, εν προκειμένω με τη χρήση συσσωρευτών, θα είχαμε μεγάλη εξοικονόμηση καυσίμων, σημαντική μείωση ρύπων και εξασφάλιση βέλτιστης λειτουργίας άρα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και λιγότερα έξοδα συντήρησης, λόγω μικρότερης καταπόνησης. Η κατανομή φορτίου – φόρτος της θερμικής μηχανής φαίνεται στο σχήμα 3 με χρήση μόνο πετρελαιομηχανής (αριστερά) και σε συνδυασμό με μπαταρίες (δεξιά).



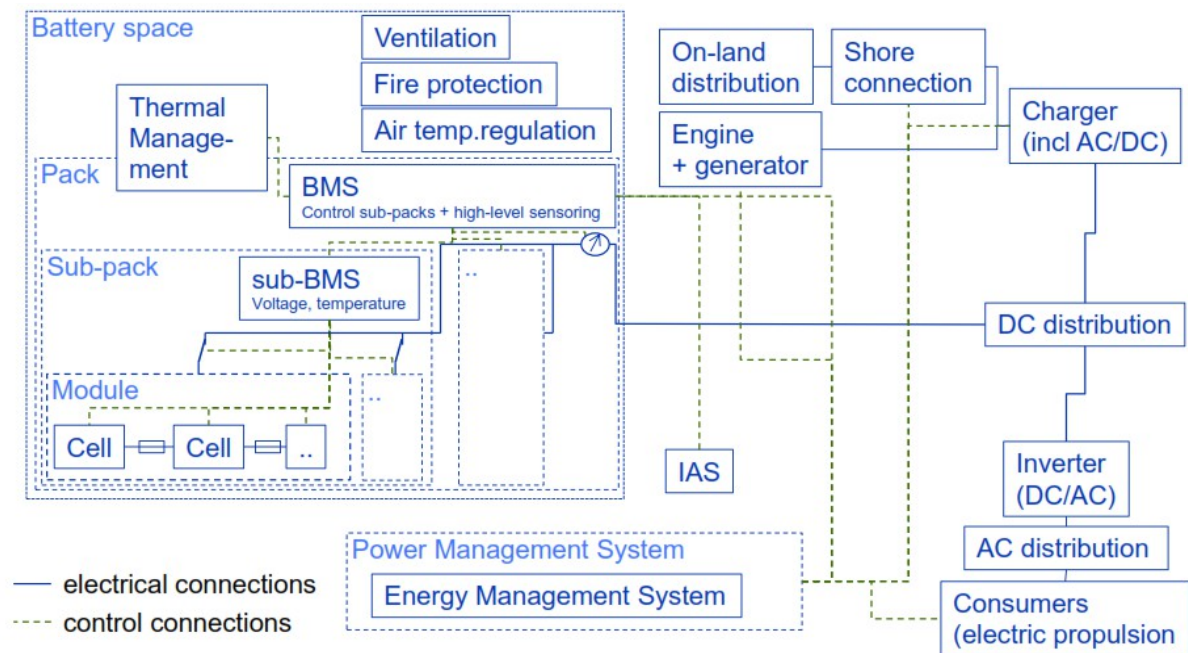
Σχήμα 2: Το ποσοστό των φορτίων ενός OSV κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.



Σχήμα 3: Φόρτος μηχανής πετρελαίου χωρίς συσσωρευτές (αριστερά) και με συσσωρευτές (δεξιά).

Τον Ιανουάριο 2012 η Det Norske Veritas (DNV) ενέταξε ένα καινούριο κεφάλαιο στους κανόνες της για την κατηγοριοποίηση/προτυποποίηση των πλοίων (“*Rules for Classification of Ships/High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft*”). Το κεφάλαιο αυτό καθορίζει τους κανόνες που διέπουν την εγκατάσταση συσσωρευτών σε πλοία, τόσο για πρόωση όσο και για άλλες χρήσεις. Αυτοί χαρακτηρίζονται ως ενδεικτικοί (“*Tentative Rules for Battery Power*”) και τέθηκαν σε ισχύ από την 1^η Ιουλίου 2012. Επίσης καθορίζεται η ορολογία και οι ορισμοί που σχετίζονται με τις μπαταρίες σε πλοία και εισάγεται ο όρος Battery Power (Ικανότητα Ισχύος Συσσωρευτή) για περιπτώσεις όπου κατά την θεωρούμενη κανονική-φυσιολογική λειτουργία του σκάφους, οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται για πρόωση [17]. Με βάση αυτούς τους κανόνες το 2013 ξεκίνησε ένα πρότζεκτ μεταξύ της DNV, της Grenland Energy και της ZEM (Zero Emissions) Energy, με την υποστήριξη της Transnova. Το πρόγραμμα αυτό είχε ως αποτέλεσμα έναν οδηγό για την επιλογή της κατάλληλης συστοιχίας συσσωρευτών (με έμφαση τους Li-ion) με τον οποίο καθορίζεται η βέλτιστη πρακτική για την πιστοποίηση (qualification) των συσσωρευτών των πλοίων, με βάση ένα γενικό σύστημα (βλ. Σχήμα 4) και ένα μοναδικό συνδυασμό μεθοδολογίας για διαχείριση κινδύνων και τεχνικής

και λειτουργικής τεχνογνωσίας. Επιπλέον δημιουργήθηκε μια πλατφόρμα για ανάλυση των επιπτώσεων και της κρισιμότητας των καταστάσεων βλάβης (Failure Mode Effects and Criticality Analysis - FMECA) και επικαιροποιήθηκαν οι κανόνες της DNV για την τάξη των μπαταριών. [4]



Σχήμα 4: Μπλοκ διάγραμμα του γενικού συστήματος μπαταριών του οδηγού της DNV. [4]

4.2 Συστήματα με Σφόνδυλο (Flywheel energy storage systems – FESS)

Η αρχή σύμφωνα με την οποία μια μάζα με αδράνεια J ($kg \cdot m^2$), που περιστρέφεται γύρω από τον άξονα της με γωνιακή ταχύτητα ω (rad/sec), αποκτά κινητική ενέργεια E (Joule) της μορφής:

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (1)$$

αποτελέσει την βασική ιδέα ανάπτυξης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με τη χρήση του σφονδύλου. Η ενέργεια αποθηκεύεται μηχανικά, υπό μορφή κινητικής ενέργειας, μέσω της περιστροφής του σφονδύλου γύρω από τον άξονά του.

Ο σφόνδυλος (flywheel) στην πιο απλή του μορφή που χρησιμοποιείται σε μηχανές είναι ένας μεγάλος τροχός με όλη του τη μάζα συγκεντρωμένη στην περιφέρεια. Αυτό βοηθά να έχουν όλα τα σημεία του την ίδια μεγάλη ροπή αδράνειας. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των σφονδύλων και ταυτόχρονα βασικό πλεονέκτημά τους, αποτελεί η ικανότητα τους να αντιστέκονται στις μεταβολές της περιστροφικής τους ταχύτητας, λόγω της μεγάλης τους αδράνειας. Η ιδιότητα αυτή συμβάλει στο να διατηρούν την περιστροφική-κινητική τους ενέργεια για μεγάλα χρονικά διαστήματα, καθιστώντας τους ιδανικό ‘εξάρτημα’ για οποιοδήποτε σύστημα αποθήκευσης κινητικής ενέργειας.

Τα συστήματα FESS που μας ενδιαφέρουν χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια για να επιταχύνουν ή να επιβραδύνουν το σφόνδυλο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μια ηλεκτρική μηχανή ο δρομέας της οποίας συνδέεται με το σφόνδυλο και αυτά **απευθείας με το δίκτυο συνεχούς τάσης (DC)**. Όταν υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας από το δίκτυο, τότε αυτή αποθηκεύεται στο σύστημα μέσω της επιτάχυνσής του από τον κινητήρα. Ενώ, στην αντίθετη περίπτωση που η υπάρχουσα διαθέσιμη ισχύς του δικτύου δεν επαρκεί για την κάλυψη του φορτίου, η διαφορά καλύπτεται από το σύστημα αποθήκευσης, το οποίο λειτουργεί αντίστροφα, με το σφόνδυλο να λαμβάνει τώρα το ρόλο του κινητήρα και την ηλεκτρική μηχανή να λειτουργεί ως γεννήτρια. Καθ’ όλη την διάρκεια αυτή ο σφόνδυλος επιβραδύνεται. Η ιδέα των συστημάτων FES δεν είναι καινούρια αλλά πλέον έγινε και εμπορικά βιώσιμη λόγω της ανάπτυξης δρομέων/σφονδύλων που αποτελούνται από ελαφριές, υψηλής αντοχής, συνθετικές ίνες (ανθρακονήματα) και των μαγνητικών ρουλεμάν που λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες έως και 100.000 ΣΑΛ. Πολλά από τα σύγχρονα συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (Uninterruptible Power Supplies – UPS) χρησιμοποιούν σφονδύλους αντί για μπαταρίες. Η απόδοση της αμφίπλευρης μετατροπής ενέργειας ενός μεγάλου συστήματος με σφόνδυλο είναι γύρω στο 90% και είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτά με συσσωρευτές που πλησιάζουν το 70% [18].

Τα κυριότερα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5, είναι [19], [22], [23]:

- η ηλεκτρική γεννήτρια/κινητήρας – συνήθως μόνιμου μαγνήτη αν και υπάρχουν FESS με ασύγχρονες μηχανές ή σύγχρονες μαγνητικής αντίστασης [20],
- η περιστρεφόμενη μάζα (σφόνδυλος) – με πολύ μεγάλη ροπή αδράνειας,
- τα ρουλεμάν – χρησιμοποιούνται ενεργά μαγνητικά ρουλεμάν τα οποία δεν έχουν καμία μηχανική επαφή με τον κύλινδρο, δεν έχουν κινητά μέρη, φθείρονται ελάχιστα με το πέρασμα του χρόνου και δεν απαιτούν λίπανση και έτσι συμβάλλουν στη μείωση των τριβών, των δονήσεων και του θορύβου,

- ο θάλαμος κενού – ο σφόνδυλος με τα μαγνητικά ρουλεμάν τοποθετούνται σε ένα θάλαμο κενού για περαιτέρω μείωση των τριβών,
- ο μετατροπέας ισχύος – μεταβλητής συχνότητας και τάσης, συνήθως χρησιμοποιούνται γέφυρες με συνδυασμό διόδων και IGBTs,
- η διάταξη ελέγχου – πρόκειται για τη διάταξη που καθορίζει τη ροή της ισχύος, δηλαδή τη φόρτιση ή την εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης, στέλνοντας τα κατάλληλα σήματα ελέγχου στους μετατροπείς, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο.

Σχήμα 5: Βασική διάταξη του σφονδύλου.[22]

Τα συστήματα σφονδύλων στην παραγωγή χρησιμοποιούνται για να παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο όταν χρειάζεται (εφεδρεία) και να αποσπούν ενέργεια από αυτό όταν περισσεύει, ενέργεια που διαφορετικά θα έμενε ανεκμετάλλευτη.

Όταν συμβεί σημαντική αλλαγή στο φορτίο μιας γεννήτριας δύο πράγματα είναι πιθανό να ακολουθήσουν: η τάση να «κάνει κοιλιά» ή να «φουσκώσει» και η απόδοση της γεννήτριας να πέσει. Αν το φορτίο αυξηθεί, η τάση «κάνει κοιλιά» (sag) ενώ αν μειωθεί, η τάση «φουσκώνει» (swell). Επιπλέον, η λειτουργία των γεννητριών γίνεται αποδοτικότερη και λιγότερο ρυπογόνα όταν η έξοδος της προσαρμόζεται βαθμιαία και όχι απότομα.

Το σχήμα 6 δείχνει τη λειτουργία του σφονδύλου σε περιπτώσεις απότομης μεταβολής του φορτίου. Όταν το φορτίο μειωθεί απότομα η γεννήτρια συνεχίζει να παρέχει ισχύ έως ότου ρυθμίσει την έξοδό της στις νέες μειωμένες απαιτήσεις του. Η ισχύς αυτή, η οποία αλλιώς θα έμενε ανεκμετάλλευτη και ενδεχομένως να προκαλούσε προβλήματα στην ποιότητα της τάσης, απορροφάται από το σφόνδυλο και αποθηκεύεται σ' αυτόν (πρώτο κόκκινο τρίγωνο). Αντίστροφα, αν το φορτίο αυξηθεί απότομα, ο σφόνδυλος εκφορτίζεται και παρέχει την ισχύ που χρειάζεται το φορτίο για λίγα δευτερόλεπτα έως ότου η έξοδος της γεννήτριας φτάσει στο σημείο που να μπορεί να το ικανοποιήσει (δεύτερο κόκκινο τρίγωνο). Και στις δύο περιπτώσεις ο σφόνδυλος εξαλείφει τις διαταραχές στην ισχύ και συμβάλλει στη διατήρηση της σταθερότητας της τάσης.

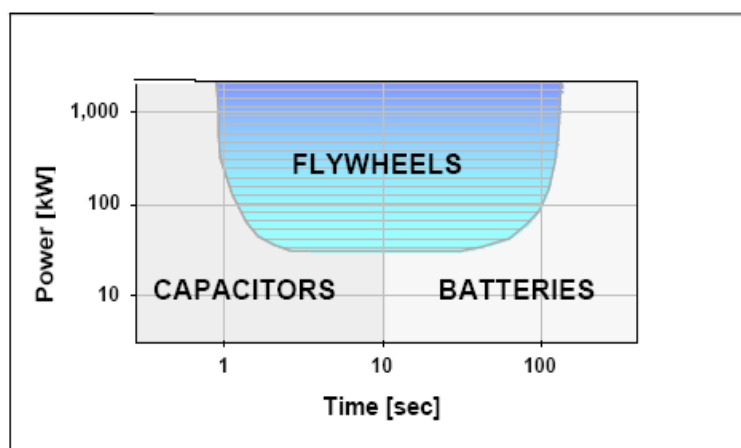
Σχήμα 6: Οι κόκκινες περιοχές δείχνουν τα συμπληρώματα ενέργειας που παρέχονται από το σφόνδυλο. [22]

Τα μέσα αποθήκευσης ενέργειας αυτά έχουν τη ικανότητα να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες κρίσιμες καταστάσεις του ηλεκτρικού δικτύου του DC-πλοίου του μέλλοντος όπως [18], [19]:

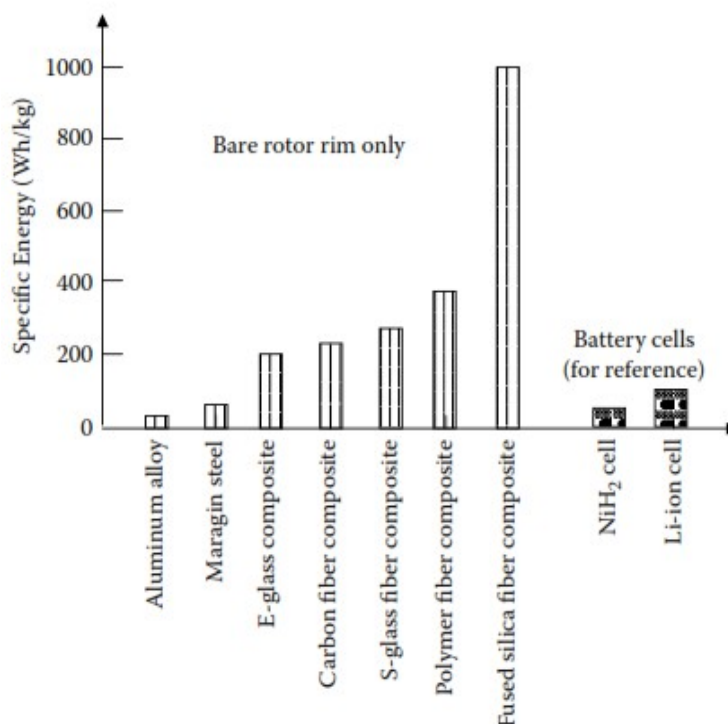
- ✓ Δυνατότητα για ηλεκτρική ή βαθμιαία εκκίνηση των κύριων μηχανών: Οι αεριοστρόβιλοι και οι ατμοστρόβιλοι, που μέχρι τώρα χρησιμοποιούσαν συνήθως πνευματικούς εκκινήτες πεπιεσμένου αέρα, πλέον μπορούν να εκκινούν μέσω των σφονδύλων χρησιμοποιώντας τις γεννήτριές τους ως κινητήρες. Κάθε εκκίνηση μπορεί να χρειαστεί μέχρι και 2.5kWh, έτσι συστήματα των 25kWh μπορούν να παρέχουν 10 συνεχόμενες εκκινήσεις. Επιπλέον οι στροβιλογεννήτριες μπορούν να μην είναι συνδεδεμένες από την αρχή στο δίκτυό μας αλλά να εισέλθουν αργότερα, στη μόνιμη κατάσταση, αφού έχουν αυξήσει βαθμιαία την ισχύ εξόδου τους στα επιθυμητά επίπεδα.
- ✓ Αδιάλειπτη παροχή ισχύος στα κρίσιμα φορτία: Σε μια πρώιμη αξιολόγηση θεωρείται ότι το καλύτερο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για αυτό το λόγο θα ήταν ένα υβριδικό σύστημα συσσωρευτών και FES, όμως με την δημιουργία πλέον ολοένα και μεγαλύτερης ενέργειας σφονδύλων ίσως κάτι τέτοιο να μην είναι απαραίτητο.
- ✓ Λειτουργία μίας γεννήτριας (Single-generator operation -SGO): Το ζητούμενο των Hodge και Mattick στο ενοποιημένο πλήρως εξηλεκτρισμένο σύστημα πρόωσης (Integrated Full Electric Propulsion – IFEP) που πρότειναν ήδη από το 1997 [21] είναι πλέον δυνατόν. Μία μόνο κινητήρια μηχανή μπορεί να λειτουργεί για την παροχή ισχύος στην πρόωση και τα υπόλοιπα φορτία του πλοίου με ασφάλεια, εξοικονομώντας μεγάλη ποσότητα καυσίμου και μειώνοντας αρκετά τους ρύπους.
- ✓ Εξομάλυνση του φορτίου και της τάσης: Απορροφώντας αρχικά την “περιττή” ενέργεια όταν είναι σε αφθονία και έπειτα διοχετεύοντάς την ξανά στο δίκτυο σταθεροποιείται η τάση.
- ✓ Τροφοδοσία παλμικών φορτίων/συστημάτων: Οι δύο επικρατέστεροι “υποψήφιοι” για την τροφοδοσία παλμικών φορτίων είναι οι πυκνωτές και οι παλμογεννήτριες με FESS.

Επομένως είναι δυνατόν να σχεδιάσουμε ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που βασίζεται σε μονάδες σφονδύλων το οποίο να μπορεί ταυτόχρονα να πραγματοποιεί όλες αυτές λειτουργίες, αντί κάθε μία να επιτελείται ξεχωριστά από μπαταρίες ή άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης χαμηλής ικανότητας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 7 τα FESS είναι κατάλληλα για τις περισσότερες των περιπτώσεων.

Σημαντικές προσπάθειες για βελτίωση των FESS βρίσκονται σε εξέλιξη σε όλο τον κόσμο, ώστε να σχεδιαστούν υψηλότερης ταχύτητας συστήματα που να μπορούν να αποθηκεύουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Ο άμεσος στόχος αυτών των εξελίξεων είναι να επιτευχθεί πέντε φορές η ενεργειακή πυκνότητα που έχουν οι σήμερα διαθέσιμες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Το ζητούμενο αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή των παρόντων τεχνολογιών στους σφονδύλους με υψηλής αντοχής εποξικές ίνες και ενεργά μαγνητικά ρουλεμάν οι οποίοι να περιστρέφονται σε θαλάμους με κενό αέρος ή έστω χαμηλή πίεση. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 8 η θεωρητική ενεργειακή πυκνότητα συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλο από ίνες τετηγμένου διοξειδίου του πυριτίου (fused silica fiber) και τοροειδή μορφή είναι περίπου 10 φορές αυτής των συσσωρευτών ιόντων λιθίου.



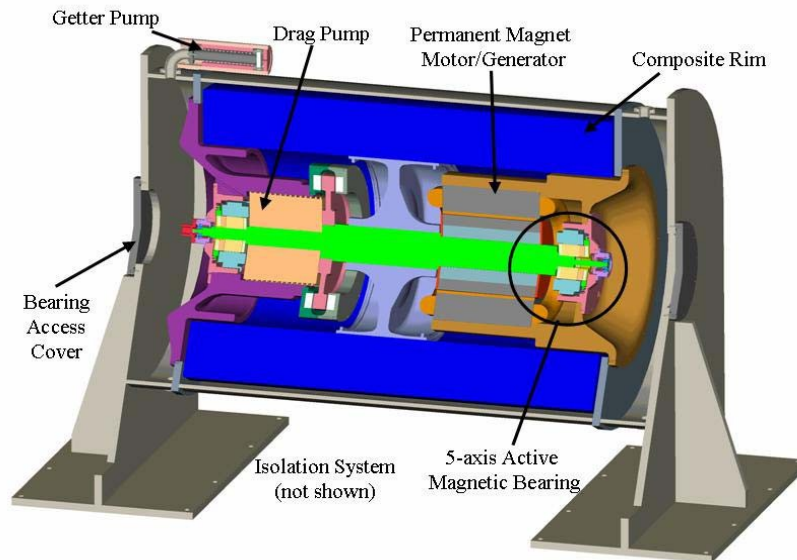
Σχήμα 7: Καταλληλότητα διάφορων συστημάτων αποθήκευσης ως προς την ισχύ και τον χρόνο εκφόρτισης. [22]



Σχήμα 8: Μέγιστη θεωρητική ενεργειακή πυκνότητα σφονδύλων με μορφή δακτυλίου από διάφορα υλικά. [18]

Σύμφωνα με υπολογισμούς, η αναγκαία ενέργεια που χρειάζεται να παρέχει ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε κάθε ζώνη του πλοίου είναι 12.5kWh με 24kWh.

Στο σχήμα 9 φαίνεται το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με τη χρήση σφονδύλου ενεργειακής διαθεσιμότητας 25kWh που προτείνεται από τους McGroarty et al στο [19] με τα βασικότερα μέρη του και είναι βασισμένο στο FESS της Beacon Power Corp.



Σχήμα 9: Προτεινόμενο FESS διαθέσιμης ενέργειας 25kWh για πλοίο από το [19] με τα βασικότερα μέρη του. [19]

Το μηχανικό μέρος έχει 36 ίντσες (91.44cm) διάμετρο, 66 ίντσες (167.64cm) μήκος και ζυγίζει περίπου 1360 κιλά ενώ η συστοιχία των ηλεκτρονικών του εξαρτημάτων υπολογίζεται στις 19 επί 24 επί 60 ίντσες (48.26 x 60.96 x 152.4 cm) με βάρος 227 κιλά περίπου.

Λόγω των ταλαντώσεων του πλοίου προς κάθε κατεύθυνση χρειάστηκε να εξεταστεί η καταπόνηση των τριβών σε διάφορες καταστάσεις. Στον πίνακα 3 φαίνεται η επιτάχυνση που δέχονται τα ρουλεμάν σε σχέση με τη βαρυτική επιτάχυνση (g) για οριζόντια ευθυγράμμιση του άξονα του συστήματος, παράλληλα στον άξονα της καρίνας του πλοίου, και για κατακόρυφο προσανατολισμό.

Καταπόνηση \ \Ευθυγράμμιση	Παράλληλη (g)	Κατακόρυφη (g)
Ευθύγραμμη	0.31	2.05
Ακτινική 1	2.19	5.43
Ακτινική 2	2.05	1.01

Πίνακας 3: Καταπόνηση ρουλεμάν (g) για την παράλληλη και κατακόρυφη ευθυγράμμιση του άξονα.

Από τα στοιχεία του πίνακα 3 συμπεραίνουμε ότι η παράλληλη ευθυγράμμιση προσφέρει ισορροπημένο ακτινικό και μειωμένο αξονικό “φορτίο” στα μαγνητικά ρουλεμάν και έτσι είναι η ιδεατή λύση.

Λαμβάνοντας υπόψη τις δονήσεις του συστήματος έχουμε από τον πίνακα 4 ότι το μέγιστο εύρος διακένου προκύπτει για λειτουργία στα 25Hz και είναι σχεδόν 9mils (0.226mm),

δηλαδή εντός του επιτρεπόμενου ορίου, ενώ στην ίδια ταχύτητα προκύπτει και η μέγιστη επιτάχυνση του ρότορα λόγω των δονήσεων. Αυτή είναι 1.14g και πρέπει να προστεθεί στην καταπόνηση των ρουλεμάν από την ταλάντωση του πλοίου και να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό τους. Η συνολική καταπόνηση των ενεργών μαγνητικών τριβέων θα είναι λοιπόν περίπου 3.3g ακτινικά και 1.5g ευθύγραμμα.

Συχνότητα (Hz)	Εύρος διακένου (inch)	Επιτάχυνση δρομέα (g)
4	0.0024	0.05
15	0.0086	0.66
16	0.0061	0.50
25	0.0089	1.14
26	0.0046	0.61
33	0.0055	0.93
34	0.0028	0.49
40	0.0031	0.64
41	0.0019	0.40
50	0.0021	0.54

Πίνακας 4: Απόκριση στην κίνηση της βάσης

Η περίπτωση κραδασμών του συστήματος πρέπει να αναλυθεί περαιτέρω. Η Beacon Power έχει εμπειρία σχεδιασμού FESS για σεισμούς αλλά δεν έχει αναπτύξει ακόμα σενάρια για τους πιθανώς πολύ έντονους κραδασμούς που μπορεί να προκύψουν σε ένα πλοίο, είτε πολεμικό είτε εμπορικό.

Από τα προηγούμενα λοιπόν είναι εμφανή κάποια πολύ σημαντικά θετικά εγγενή σημεία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με σφόνδυλο, που τα διακρίνει από τα άλλα μέσα αποθήκευσης και τα κάνει ιδιαίτερα χρήσιμα στην ηλεκτροπρόωση και δη στα δίκτυα πλοίων με διανομή ισχύος με συνεχή τάση (DC). Αυτά συνοψίζονται ως εξής [18], [19], [22]:

- απαιτούν εύκολη, φθηνή και όχι συχνή συντήρηση,
- η ενεργειακή τους χωρητικότητα δε φθίνει με τη συχνότητα φόρτισης-εκφόρτισης και το χρόνο,
- η λειτουργία τους δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία,
- έχουν μεγάλο κύκλο ζωής (εκατοντάδες χιλιάδες κύκλους) και τουλάχιστον εικοσαετή διάρκεια,
- είναι σχεδιασμένα ως μονάδες αποθήκευσης(modular architecture), επομένως μπορούν εύκολα να συνδεθούν πολλές μαζί ανάλογα με τις απαιτήσεις της τοπολογίας μας,
- μπορούν να συνδεθούν απευθείας στο δίκτυο συνεχούς τάσης του πλοίου (χρησιμοποιώντας μόνο μία βαθμίδα μετατροπών AC/DC),
- παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα ισχύος και άρα μείωση στο βάρος και τον όγκο του εξοπλισμού μας,
- έχουν γρήγορη απόκριση και γρήγορη επαναφόρτιση,
- παρουσιάζουν μεγάλη απόδοση και ελάχιστες απώλειες (οι απώλειες όταν βρίσκονται εκτός λειτουργίας – standby losses – κυμαίνονται περίπου από 0.1 ως 1% της ονομαστικής τους ισχύος),

έχουν προβλέψιμη λειτουργία, αφού γνωρίζοντας την ταχύτητα περιστροφής τους, ξέρουμε πάντα την διαθέσιμη αποθηκευμένη ενέργεια,

κατά τη χρήση τους ως ηλεκτρικούς εκκινητήρες:

- ο έχουμε πολύ περισσότερο έλεγχο της επιτάχυνσης της μηχανής μας, με δυνατότητα εκκίνησης μέχρι και 25% πιο γρήγορα,
- ο επιτυγχάνουμε περαιτέρω εξοικονόμηση βάρους και όγκου, καθώς γλιτώνουμε τα ογκώδη, πολύπλοκα και βαριά πνευματικά και υδραυλικά συστήματα,

αποφορτίζονται σε πολύ μεγάλο βαθμό (έως και 90%),

εμφανίζουν ευελιξία στη ρύθμιση της τάσης και του ρεύματος που απαιτείται απ' αυτά ανάλογα με το δίκτυό μας,

έχουν υψηλή μέγιστη ισχύ χωρίς να προβληματιζόμαστε για υπερθέρμανση (όπως με τις μπαταρίες για παράδειγμα),

είναι μια “πράσινη” τεχνολογία καθώς, χωρίς να παράγουν ρύπους, βελτιώνουν τη συνολική απόδοση του δικτύου μας και των περιστρεφόμενων μηχανών (SGO).

Επίσης δεν περιέχουν τα επικίνδυνα για τον άνθρωπο και το περιβάλλον χημικά που έχουν οι μπαταρίες.

4.3 Υπερπυκνωτές (supercapacitors ή ultracapacitors)

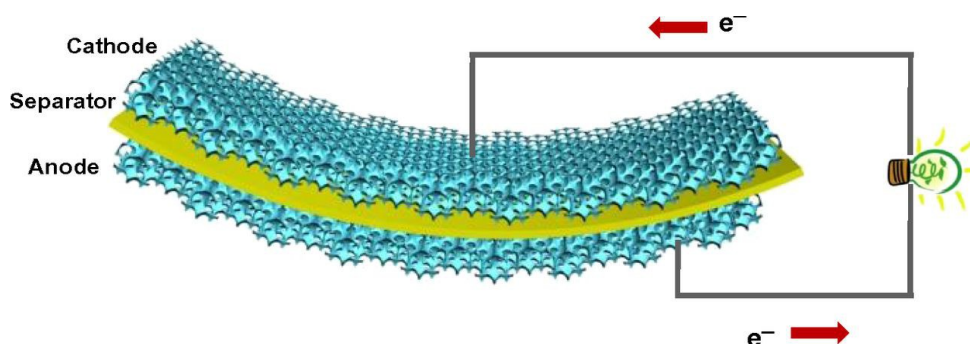
Η ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα πυκνωτή είναι ίση με $1/2 \cdot C \cdot V^2$, όπου V είναι η διαφορά δυναμικού στους οπλισμούς του και C είναι η χωρητικότητα η οποία δίνεται από:

$$C = \frac{\text{επιφάνεια πλάκας} \times \text{διηλεκτρική σταθερά του υλικού μεταξύ των οπλισμών}}{\text{απόσταση μεταξύ θετικής και αρνητικής πλάκας}}$$

Από τη σχέση αυτή φαίνεται ότι ο πυκνωτής μπορεί να αποθηκεύσει περισσότερη ενέργεια αν η επιφάνεια της πλάκας αυξηθεί και η απόσταση μεταξύ του θετικού και αρνητικού οπλισμού μειωθεί μέχρι το σημείο που “αντέχει” το διηλεκτρικό μας ώστε να μην έχουμε ηλεκτρική εκκένωση. Ο υπερπυκνωτής -γνωστός και ως ηλεκτρικός πυκνωτής διπλής στρώσης- αποθηκεύει ενέργεια όπως κάθε άλλος πυκνωτής, αλλά η πυκνότητα της αποθηκευμένης αυτής ενέργειας, σε όρους Wh/kg, μπορεί να είναι έως και 100 φορές περισσότερη από του παραδοσιακού ηλεκτρολυτικού πυκνωτή. Ως εκ τούτου, οι supercapacitors στην ουσία δεν ανταγωνίζονται τους άλλους πυκνωτές, αλλά τις μπαταρίες σε εφαρμογές βιομηχανικές και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Για το λόγο αυτό, κατασκευάζονται από στοιχεία (cells) με επίπεδα τάσης αντίστοιχα με αυτά των συσσωρευτών. [18]

Στον υπερπυκνωτή, τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται από εξαιρετικά πορώδη ενεργό άνθρακα (γραφένιο) για να δώσει ένα πολύ μεγαλύτερο εμβαδόν επιφάνειας (σχήμα 10) και το διπλό στρώμα που σχηματίζεται από τον ιοντικό διαχωρισμό με αποτέλεσμα την πολύ μικρή απόσταση μεταξύ των θετικών και αρνητικών φορτίων (σχήμα 11), είναι οι δύο παράγοντες που συμβάλλουν στην πολύ υψηλή χωρητικότητα. Supercapacitors έως 3000 farads είναι διαθέσιμα αυτή τη στιγμή σε χαμηλά επίπεδα τάσης, γύρω στα 2,5 V. Αυτοί μπορούν να συνδεθούν σε συνδυασμούς παράλληλα ή σε σειρά ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματός μας σε τάση και ρεύμα.

Σχήμα 10: Μεγέθυνση της επιφάνειας φύλλου γραφενίου που χρησιμοποιείται σε υπερπυκνωτή. [24]



Σχήμα 11: Σχηματική 3D αναπαράσταση των ηλεκτροδίων υπερπυκνωτή. [25]

Στον πίνακα 5 γίνεται μία σύγκριση της απόδοσης του υπερπυκνωτή με της μπαταρίας ιόντων λιθίου. Είναι εμφανές ότι ο υπερπυκνωτής δεν είναι ογκομετρικά συμφέρων και ότι είναι πιο ακριβός από τη μπαταρία, όμως έχει πολλά άλλα πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, η ενεργειακή πυκνότητα του υπερπυκνωτή είναι περίπου 5 έως 8 Wh/kg έναντι 100-160 Wh/kg για την μπαταρία λιθίου-ιόντων. Όμως, μπορεί να προσφέρει πολύ υψηλότερη πυκνότητα ισχύος, και ο κύκλος ζωής του όσον αφορά τον αριθμό των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης (μερικά εκατομμύρια) είναι πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με τους κύκλους (χιλιάδες) για τον συσσωρευτή. Η Li-ion μπορεί να δώσει περίπου 250 W/kg ισχύ, ενώ ο υπερπυκνωτής 10.000 W/kg, χωρίς να υποβαθμίζεται η απόδοσή του. Επιπλέον, η απόδοση του υπερπυκνωτή δεν μειώνεται λόγω χαμηλών θερμοκρασιών. Όλα τα παραπάνω καθιστούν τον υπερπυκνωτή την προτιμώμενη επιλογή για εφαρμογές που ζητείται μεγάλη ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας και υψηλή ισχύς σε επαναλαμβανόμενα πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα.

Λειτουργία	Υπερπυκνωτής	Μπαταρία Li-ion
Χρόνος Φόρτισης	1-10 sec	10-60 min
Κύκλος Ζωής	1 εκατομμύριο (ή 30000h)	>500
Τάση Στοιχείου	2.3-2.75 V	3.6-3.7 V
Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/kg)	5 (τυπική τιμή)	100-200
Πυκνότητα Ισχύος (W/kg)	Έως 10000	1000-3000
Κόστος ανά Wh	\$20 (τυπική τιμή)	\$2 (τυπική τιμή)
Διάρκεια Ζωής	10-15 έτη	5-10 έτη
Θερμοκρασία Φόρτισης	-40 ως 65°C	0 ως 45°C
Θερμοκρασία Εκφόρτισης	-40 ως 65°C	-20 ως 60°C

Πίνακας 5: Σύγκριση χαρακτηριστικών υπερπυκνωτή – μπαταρίας Li-ion. [18]

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του υπερπυκνωτή σε σχέση με τις μπαταρίες είναι η ικανότητά του να φορτίζεται και να αποφορτίζεται ταχύτατα και κατ' επανάληψη, χωρίς αυτό να είναι επιζήμιο για την απόδοσή του είτε βραχυπρόθεσμα είτε μακροπρόθεσμα. Για το λόγο αυτό, η μπαταρία και ο υπερπυκνωτής χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό. Ο υπερπυκνωτής αντιμετωπίζει τις ριπές υψηλής ενέργειας, δεδομένου ότι μπορεί να φορτιστεί και να αποφορτιστεί γρήγορα, ενώ η μπαταρία τροφοδοτεί το μεγαλύτερο μέρος του αργά μεταβαλλόμενου φορτίου, καθώς μπορεί να αποθηκεύσει και να αποδώσει ένα μεγαλύτερο ποσό ενέργειας αργά για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Επιπλέον μπορεί να λειτουργήσει και να φορτίσει σε οποιοδήποτε επίπεδο τάσης εντός της ονομαστικής του εν αντιθέσει με τους συσσωρευτές που φορτίζουν σε ένα πολύ περιορισμένο εύρος τάσεων.

Ο υπερπυκνωτής είναι πολύ σημαντικός για την επόμενη γενιά ηλεκτροκίνησης με κυψέλες καυσίμου για να παρέχει γρήγορη παροδική ισχύ κατά την επιτάχυνση. Μπορεί επίσης να απορροφά ενέργεια κατά τη διάρκεια της πέδησης με ανατροφοδότηση, ενώ η κυψέλη καυσίμου δεν μπορεί να λειτουργήσει ανατροφοδοτικά. Λόγω του πολύ μεγαλύτερου κύκλου ζωής σε σύγκριση με τις μπαταρίες, ο υπερπυκνωτής μπορεί επίσης να αντικαταστήσει τις μπαταρία ιόντων λιθίου, NiMH και μολύβδου-οξέος.

Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που βασίζεται σε υπερπυκνωτές έχει εφαρμοστεί ήδη σε ένα μικρό επιβατηγό πλοίο 22,1 μέτρων, το γαλλικό “Ar Vag Tredan” που κατασκευάστηκε από την STX Lorient για την Lorient Agglomération (σχήμα 12). Το πλοίο αυτό εκτελεί μικρά δρομολόγια των 2,5 ναυτικών μιλίων περίπου σε προστατευμένα νερά με μέγιστη ταχύτητα 10 κόμβων. Η αποθηκευμένη ενέργεια στους υπερπυκνωτές είναι αρκετή για να επιτρέψει ένα ταξίδι μετ' επιστροφής ενώ η επαναφόρτιση γίνεται από το χερσαίο δίκτυο ηλεκτροδότησης (cold-ironing) κατά την επιβίβαση και αποβίβαση των επιβατών. Η επαναφόρτιση διαρκεί τέσσερα λεπτά μέσω της παροχής 400V στην πρύμνη του πλοίου. Επιπλέον, φωτοβολταϊκά

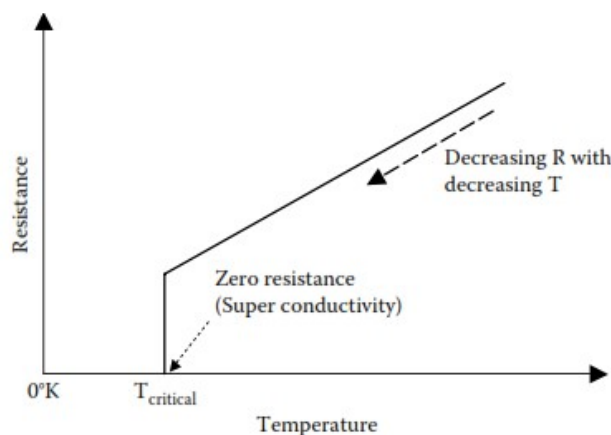
πάνελ συμβάλλουν στην ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται από τον εξοπλισμό πλοήγησης.[5]



Σχήμα 12: Το κινούμενο από υπερπυκνωτές επιβατηγό Ar Vag Tredan. [5]

4.4 Συστήματα Αποθήκευσης Μαγνητικής Ενέργειας με Υπεραγωγούς (Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES Systems)

Η ηλεκτρική αντίσταση ενός αγωγού, όπως φαίνεται και στο σχήμα 13, είναι ευθέως ανάλογα εξαρτημένη από τη θερμοκρασία. Εάν η τιμή της θερμοκρασίας κινηθεί προς το απόλυτο μηδέν στην κρυογονική περιοχή (η θερμοκρασία του υγρού αζώτου έως αυτή του υγρού ήλιου), η ωμική αντίσταση ορισμένων αγωγών πέφτει απότομα στο απόλυτο μηδέν σε κάποια κρίσιμη θερμοκρασία T_{cr} . Κάτω από αυτή τη θερμοκρασία, το υπεραγωγίμο πηνίο απαιτεί θεωρητικά μηδενική τάση για να το διαρρεύσει πάρα πολύ υψηλό ρεύμα και επομένως να παράξει πολύ υψηλή μαγνητική ροή. Στο πηνίο αυτό δεν χρειάζεται τάση για να κυκλοφορεί ένα σταθερό συνεχές ρεύμα, ενώ οι ακροδέκτες του μπορούν να βραχυκυκλωθούν ώστε να έχουμε συνεχή κυκλοφορία του ρεύματος για πάντα. Η χρονική σταθερά του κυκλώματος L/R μπορεί να θεωρηθεί πλέον άπειρη, κάτι που σημαίνει ότι το ρεύμα θα συνεχίσει να ρέει στο πηνίο επ' αόριστον. Σε αυτήν την κατάσταση λέμε ότι το πηνίο έχει φτάσει στην υπεραγωγίμη κατάσταση και έχει μηδενική αντίσταση. Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο πηνίο τότε “παγώνει” και παραμένει αποθηκευμένη μέχρι να τη χρειαστούμε.



Σχήμα 13: Η αντίσταση αγωγού σε σχέση με τη θερμοκρασία καθώς πλησιάζει το απόλυτο μηδέν. [18]

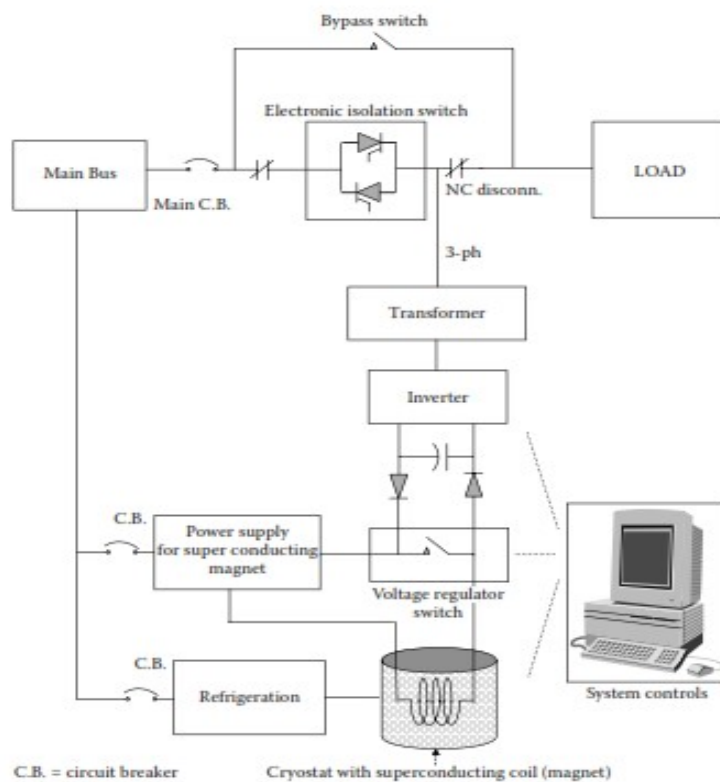
Όπως αναφέραμε και παραπάνω η ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα πυκνωτή είναι ίση με $\frac{1}{2}C \times V^2$ ή αλλιώς η χωρική της πυκνότητα είναι $\frac{1}{2}\epsilon \times E^2$ Joules/m³ ανάμεσα στις πλάκες του, όπου ϵ είναι η επιτρεπτότητα του διηλεκτρικού (μονάδες F/m) και E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (V/m). Τα περισσότερα υγρά διηλεκτρικά διασπώνται στα 10kV/mm περίπου. Ένας πυκνωτής λαδιού που λειτουργεί στα 5kV/mm, το ανώτατο σχεδιαστικό όριο για την κανονική τάση λειτουργίας, έχει χωρική πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας ίση με $\frac{1}{2}(8.85 \times 10^{-12}) \times (5 \times 10^6)^2 = 110$ J/m³ μεταξύ των οπλισμών. Αυτή είναι πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερη απ' ότι στο μαγνητικό πεδίο ενός επαγωγέα, όπως θα συζητηθεί παρακάτω.

Η χωρική πυκνότητα της αποθηκευμένης ενέργειας στο μαγνητικό πεδίο B πηνίου σε μέσο με διαπερατότητα μ είναι $\frac{1}{2}B^2/\mu$ J/m³ στο εσωτερικό του. Με όρους ρεύματος I και αυτεπαγωγής L , η αποθηκευμένη ενέργεια είναι $\frac{1}{2}L \times I^2$ joules. Η πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας σε μαγνητικό πεδίο στον αέρα με πυκνότητα ροής 2Wb/m², το ανώτερο σχεδιαστικό όριο στο σημείο κορεσμού του μαγνητικού χάλυβα, θα είναι $\frac{1}{2}2^2/(4\pi \times 10^{-7}) = 1,6$ MJ/m³. Αυτή είναι 15.000 φορές μεγαλύτερη από την πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας στον πυκνωτή. Μάλιστα ένα πηνίο τυλιγμένο στον αέρα χωρίς μαγνητικό πυρήνα χάλυβα δεν έχει όριο κορεσμού. Όσο υψηλότερο ρεύμα το διαρρέει, τόσο υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα μπορεί

να αποθηκεύσει καθώς αυτή είναι ανάλογη με το τετράγωνο της έντασης του ρεύματος. Το ρεύμα ενός συμβατικού πηνίου χαλκού περιορίζεται από τη θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω I^2R , το υπεραγώγιμο πηνίο όμως με $R=0$ θεωρητικά δεν έχει όριο στο ρεύμα. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν διαθέσιμα υπεραγώγιμα πηνία στο εμπόριο (συχνά αποκαλούμενα και υπεραγώγιμοι μαγνήτες) για ευρύ φάσμα εφαρμογών στα οποία δημιουργούνται πυκνότητες μαγνητικής ροής μέχρι και 15 Wb/m^2 σε όγκο αέρα ενός λίτρου δηλαδή μπορούν να αποθηκευθούν 90 MJ/m^3 . Κοινώς ένα εκατομμύριο φορές μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από ότι στον πυκνωτή. Για το λόγο αυτό, το ενδιαφέρον για το υπεραγώγιμο πηνίο αυξάνεται συνεχώς για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας, όπως στο DC-Ship.

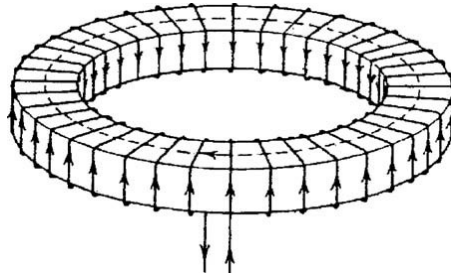
Οι παλαιότερης γενιάς υπεραγωγοί, κυρίως κράματα νιοβίου-τιτανίου (NbTi) και νιοβίου-κασσίτερου (NbSn) λειτουργούσαν σε θερμοκρασία υγρού ηλίου, στους 4°K . Ωστόσο, από το 1986 ανακαλύφθηκαν τα υπεραγώγιμα υλικά υψηλής θερμοκρασίας (high temperature superconductors – HTS) και ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται τρεις νέοι τύποι υπεραγωγών που αποτελούνται από ενώσεις βισμούθιου ή ύττριου-χαλκού. Αυτοί μπορούν να ψυχθούν με υγρό άζωτο καθώς έχουν σχετικά πολύ υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία (80°K ως 100°K), επομένως χρειάζονται και πολλές τάξεις μεγέθους λιγότερη ισχύ ψύξης. [18]

Ένα τυπικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με υπεραγώγιμο μαγνήτη φαίνεται στο σχήμα 14. Το υπεραγώγιμο πηνίο φορτίζεται από μετατροπέα AC/DC στην παροχή ρεύματος του δικτύου. Μόλις φορτιστεί πλήρως, ο μετατροπέας συνεχίζει την παροχή μικρής τάσης που απαιτείται για να ξεπεραστούν οι απώλειες στα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος που βρίσκονται σε θερμοκρασία δωματίου. Στη λειτουργία αποθήκευσης, ο διακόπτης του ρυθμιστή τάσης κλείνει (βραχυκυκλώνεται το πηνίο) ώστε το ρεύμα να κυκλοφορεί στο πηνίο. Ο διακόπτης του πηνίου ανοίγει όταν χρειαστεί να εκκενώσει την αποθηκευμένη ενέργεια σε ένα φορτίο. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης εκφόρτισης θεωρητικά είναι απεριόριστος, σε αντίθεση με την μπαταρία που μπορεί να φορτιστεί και να αποφορτιστεί όχι περισσότερο από μερικές χιλιάδες φορές και έπειτα θα πρέπει να αντικατασταθούν.



Σχήμα 14: Διάγραμμα συστήματος SMES μεγάλης κλίμακας. [18]

Το ισχυρό μαγνητικό πεδίο που πηγάζει από ένα συμβατικό σωληνοειδές πηνίο θα επηρέαζε τα συστήματα ελέγχου του πλοίου ή άλλο κοντινό εξοπλισμό που είναι ευαίσθητος στο μαγνητικό πεδίο. Για τα SMES, το πηνίο πρέπει να μην έχει πυρήνα και να είναι σε μια δακτυλιοειδή διαμόρφωση όπως φαίνεται στο σχήμα 15 για να περιέχει το μαγνητικό πεδίο εντός του ίδιου έτσι ώστε να μην διαταράσσει τη λειτουργία του εξοπλισμού που το περιβάλλει.



Σχήμα 15: Κατάλληλη τοροειδής μορφή υπεραγωγίμου πηνίου για την διατήρηση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του. [18]

Δύο αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά των υπεραγωγών είναι:

- ✓ Έχουν ακριβώς μηδενική αντίσταση μόνο στο συνεχές ρεύμα. Σε εφαρμογές εναλλασσόμενου ρεύματος, ο υπεραγωγός έχει κάποια μικρή αντίσταση, η οποία επιβαρύνει σημαντικά την κρυογονική ψύξη και κάνει τις εφαρμογές εναλλασσόμενου ρεύματος πολύ λιγότερο ελκυστικές.
- ✓ Πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία, το κρίσιμο ρεύμα, ή την κρίσιμη πυκνότητα μαγνητικής ροής, χάνει την υπεραγωγικότητα και προκαλεί εξαιρετικά υψηλή θερμική απώλεια I^2R . Έτσι, οι τρεις παράμετροι, η θερμοκρασία λειτουργίας, η πυκνότητα του ρεύματος, και η πυκνότητα μαγνητικής ροής καθορίζουν από κοινού, την κατάσταση όπου το κράμα έχει ακριβώς μηδενική αντίσταση.

Το πηνίο υπεραγωγίμο μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια για πολλές εφαρμογές, μικρές και μεγάλες. Στα πολεμικά πλοία, μπορεί να προσφέρει ένα εξαιρετικά υψηλό μέγεθος ισχύος, απαραίτητο για την εκτόξευση βλημάτων, απαλλάσσοντάς μας από μεγάλης τάξης ισχύος γεννήτριες και απότομες επιβαρύνσεις τους, εκτός από ένα μικρό ποσό της ενέργειας που απαιτείται για τη φόρτιση του συστήματος μεταξύ δύο εκτοξεύσεων. Στα εμπορικά, το δίκτυο μπορεί να φορτίσει το σύστημα σε καταστάσεις χαμηλού φορτίου ή κατά τον ελλειμενισμό με σκοπό να εξαλείψει διακυμάνσεις ή πτώσεις τάσης και να μειώσει την απαιτούμενη ικανότητα αιχμής παραγωγής του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής του πλοίου. Επίσης τα LNG πλοία που μεταφέρουν υπερψυγμένο υγροποιημένο φυσικό αέριο (supercooled LNG), σε 110°K (-163°C), είναι καλοί υποψήφιοι για τις αναπτυσσόμενες εφαρμογές υπεραγωγών υψηλής θερμοκρασίας (HTS), οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιούν την ίδια κρυογονική εγκατάσταση. [18]

Τα συστήματα SMES έχουν τα ακόλουθα προτερήματα έναντι άλλων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [18]:

Η ενεργειακή απόδοση είναι υψηλή, γύρω στο 95%. Υψηλότερη από οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία.

Έχει πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, έως περίπου 30 χρόνια.

Οι χρόνοι φόρτισης και αποφόρτισης είναι ελάχιστοι, γεγονός που τα καθιστά ελκυστικά για την παροχή μεγάλης ισχύος για ένα σύντομο χρονικό διάστημα.

Δεν έχουν κινούμενα μέρη στο κεντρικό σύστημα, με εξαίρεση κάποια εξαρτήματα της κρυογονικής ψύξης.

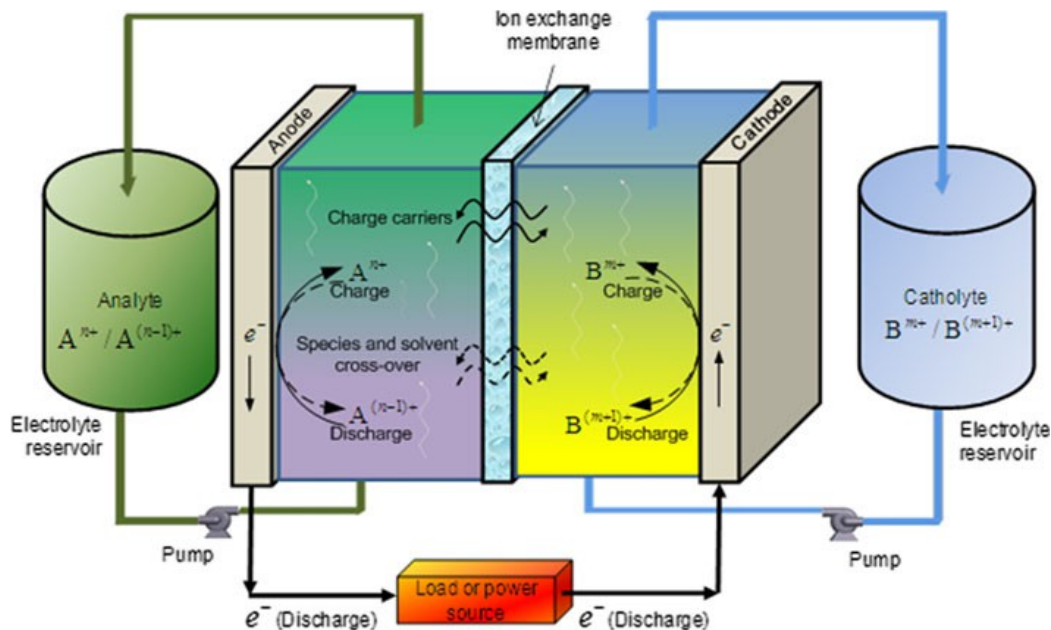
Χωρίς κινούμενα μέρη, διαθέτει πολύ υψηλή αξιοπιστία.

Η αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου μπορεί να αποδοθεί σε λιγότερο από 30 ms, ελάχιστος χρόνος σε σύγκριση με τα 15 λεπτά που χρειάζονται για να προετοιμαστεί και να εκκινήσει μια συμβατική γεννήτρια έκτακτης ανάγκης.

4.5 Μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής (redox flow batteries – RFB)

Οι μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής (redox flow batteries - RFB) αποτελούν υποκατηγορία των ανανεώσιμων κυψελών καυσίμου (regenerative fuel cells), είναι δηλαδή συσκευές ηλεκτροχημικής αποθήκευσης ενέργειας. Το όνομα "redox" προκύπτει από τις χημικές αντιδράσεις αναγωγής (reduction) και οξείδωσης (oxidation) που χρησιμοποιούνται στην RFB για την αποθήκευση ενέργειας σε υγρά διαλύματα ηλεκτρολυτών τα οποία ρέουν μέσα από μία συστοιχία ηλεκτροχημικών στοιχείων κατά τη διάρκεια της φόρτισης και εκφόρτισης.

Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, ένα ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται μέσω μιας αντίδρασης οξείδωσης από μία κατάσταση υψηλού χημικού δυναμικού στην αρνητική πλευρά ή άνοδο της μπαταρίας. Το ηλεκτρόνιο κινείται μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος για να προσφέρει ωφέλιμο έργο. Τελικά "συλλαμβάνεται" μέσω μιας αντίδρασης αναγωγής σε μία κατάσταση χαμηλότερου χημικού δυναμικού στη θετική πλευρά ή κάθοδο της μπαταρίας. Η κατεύθυνση του ρεύματος και οι χημικές αντιδράσεις, κατά τη διάρκεια της φόρτισης, είναι οι αντίστροφες. Στο σχήμα 16 φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση μίας τυπικής μπαταρίας οξειδοαναγωγής ενώ οι γενικές αντιδράσεις της διαδικασίας που περιγράφηκε εμφανίζεται παρακάτω. [26]



Σχήμα 16: Τυπική μπαταρία οξειδοαναγωγής (redox flow battery). [30]

✓ Εκφόρτιση:

- $A^{(n-x)+} \rightarrow A^{n+} + xe^-$ ($n > x$) (οξείδωση)
- $B^{(m+y)+} \rightarrow B^{m+} - ye^-$ (αναγωγή)

✓ Φόρτιση:

- $A^{n+} + xe^- \rightarrow A^{(n-x)+}$ (αναγωγή)
- $B^{m+} - ye^- \rightarrow B^{(m+y)+}$ (οξείδωση)

Η συνολική διαφορά σε χημικό δυναμικό μεταξύ των χημικών καταστάσεων των εκάστοτε δραστικών στοιχείων στις δύο πλευρές της μπαταρίας καθορίζει την ηλεκτρεγερτική δύναμη

(HEΔ) που παράγεται σε κάθε στοιχείο της μπαταρίας. Η τάση που αναπτύσσεται από την RFB διαφέρει ανάλογα με τα χημικά στοιχεία που συμμετέχουν στις αντιδράσεις (π.χ. 1.4V/cell για συστήματα με βανάδιο και 1.67V/cell για Zn/Br₂ [27]) και το αριθμό των κυψελών που είναι συνδεδεμένες σε σειρά. Το ρεύμα που αναπτύσσεται προσδιορίζεται από τον αριθμό των ατόμων ή μορίων των δραστικών χημικών στοιχείων που αντιδρούν εντός των κυττάρων ως συνάρτηση του χρόνου. Η ισχύς που δίδεται από την μπαταρία οξειδοαναγωγικής ροής είναι το γινόμενο του συνολικού ρεύματος επί της συνολικής τάσης που αναπτύσσεται στις ηλεκτροχημικές στήλες. Η ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύεται προσδιορίζεται από το συνολικό αριθμό των ενεργών χημικών στοιχείων που είναι διαθέσιμα στο διάλυμα του ηλεκτρολύτη του συστήματος.

Οι redox μπαταρίες ροής μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Τις μπαταρίες πραγματικής ροής οξειδοαναγωγής (true redox flow batteries), όπου όλα τα χημικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην αποθήκευση ενέργειας είναι διαλυμένα πλήρως σε διάλυμα ανά πάσα στιγμή, και τις υβριδικές μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής (hybrid redox flow batteries), όπου τουλάχιστον το ένα χημικό στοιχείο είναι στερεό (επιμεταλλωμένο) στις ηλεκτροχημικές στήλες κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Παραδείγματα true redox αποτελούν τα συστήματα βαναδίου-βαναδίου και σιδήρου-χρωμίου. Παραδείγματα υβριδικών RFB περιλαμβάνουν τα συστήματα με ψευδάργυρο-βρώμιο και ψευδάργυρο-χλώριο.

Οι RFB είναι κατάλληλες για εφαρμογές με απαιτήσεις ισχύος της τάξης των δεκάδων κιλοβάτ έως δεκάδων μεγαβάτ, και αποθηκευμένης ενέργειας από 500 κιλοβατώρες έως εκατοντάδες μεγαβατώρες. Είναι πιθανόν η πιο οικονομική επιλογή σε αυτό το εύρος, διότι οι δεξαμενές αποθήκευσης, η συντήρηση και ο έλεγχος ροής είναι γενικά εύκολοι και φθηνό σε τέτοια κλίμακα. Επίσης έχουν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας καθώς λειτουργούν σε θερμοκρασία και ατμοσφαιρική πίεση δωματίου, με αποτέλεσμα να μην προκαλείται αλλοίωση των υλικών, και έχουν μόνο δύο κινούμενα μέρη.

Οι μπαταρίες ροής redox έχουν έναν βασικό σχεδιαστικό μειονέκτημα σε σύγκριση με τις αρχιτεκτονικές ενοποιημένων ηλεκτρικών στοιχείων. Οι RFB τείνουν να έχουν ογκομετρικά χαμηλότερη πυκνότητα ενέργειας, ειδικά σε εφαρμογές υψηλής ισχύος και σύντομης διάρκειας. Αυτό προκύπτει λόγω του όγκου του συστήματος ελέγχου και διαχείρισης ροής ηλεκτρολύτη, το οποίο δεν χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της ενέργειας. Παρά το γεγονός αυτό, υπάρχουν διαθέσιμα συστήματα με μπαταρίες ροής που καταλαμβάνουν εμβαδόν εντός του στόχου των 500ft²/MWh (46.5 m²/MWh) που θέτει το αμερικανικό ινστιτούτο έρευνας ηλεκτρικής ισχύος (electric power research institute – EPRI).

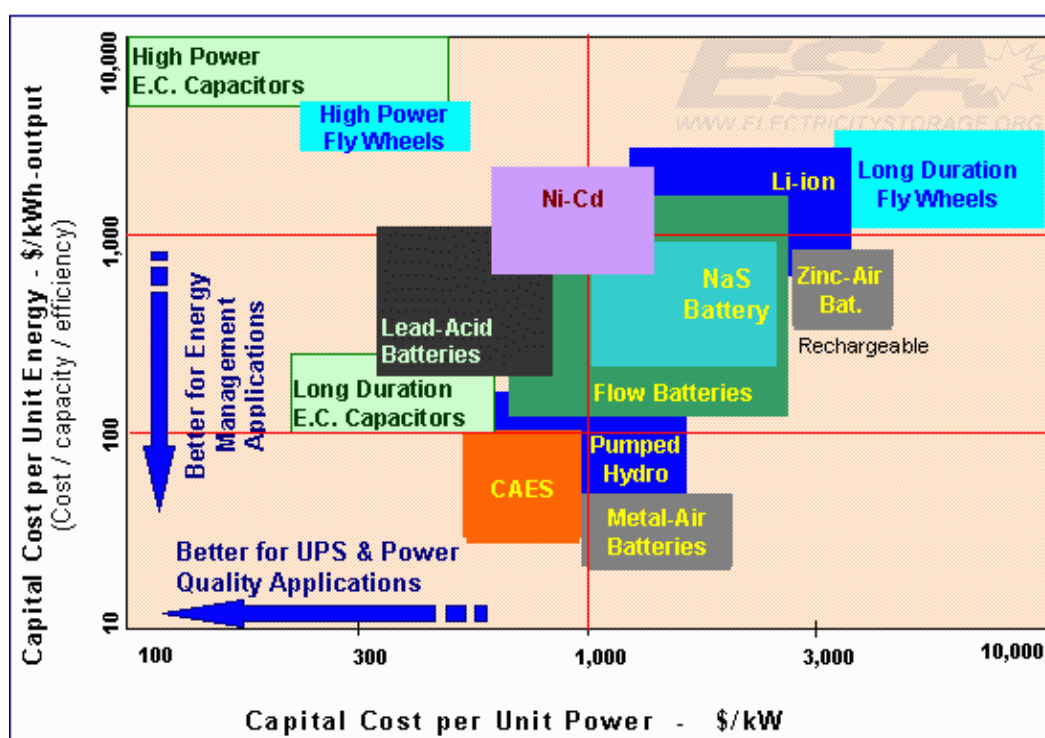
Συμπερασματικά λοιπόν, μπορούμε να πούμε ότι μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής αποτελούν μια οικονομική και αρκετά ανθεκτική λύση για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ είναι κατάλληλες για εφαρμογές με ονομαστική ισχύ από 10kW ως 10MW και διάρκεια εκφόρτισης μέσα σε 2 έως 10 ώρες. Η χρήση RFB σε πλοία με ηλεκτροπρόωση έχει προταθεί ήδη από το 2001 [28], ενώ παράδειγμα τοπολογίας DC-πλοίου με φωτοβολταϊκά και redox μπαταρίες βαναδίου έχουμε στο [29].

4.6 Γενικά συγκριτικά στοιχεία των ESS

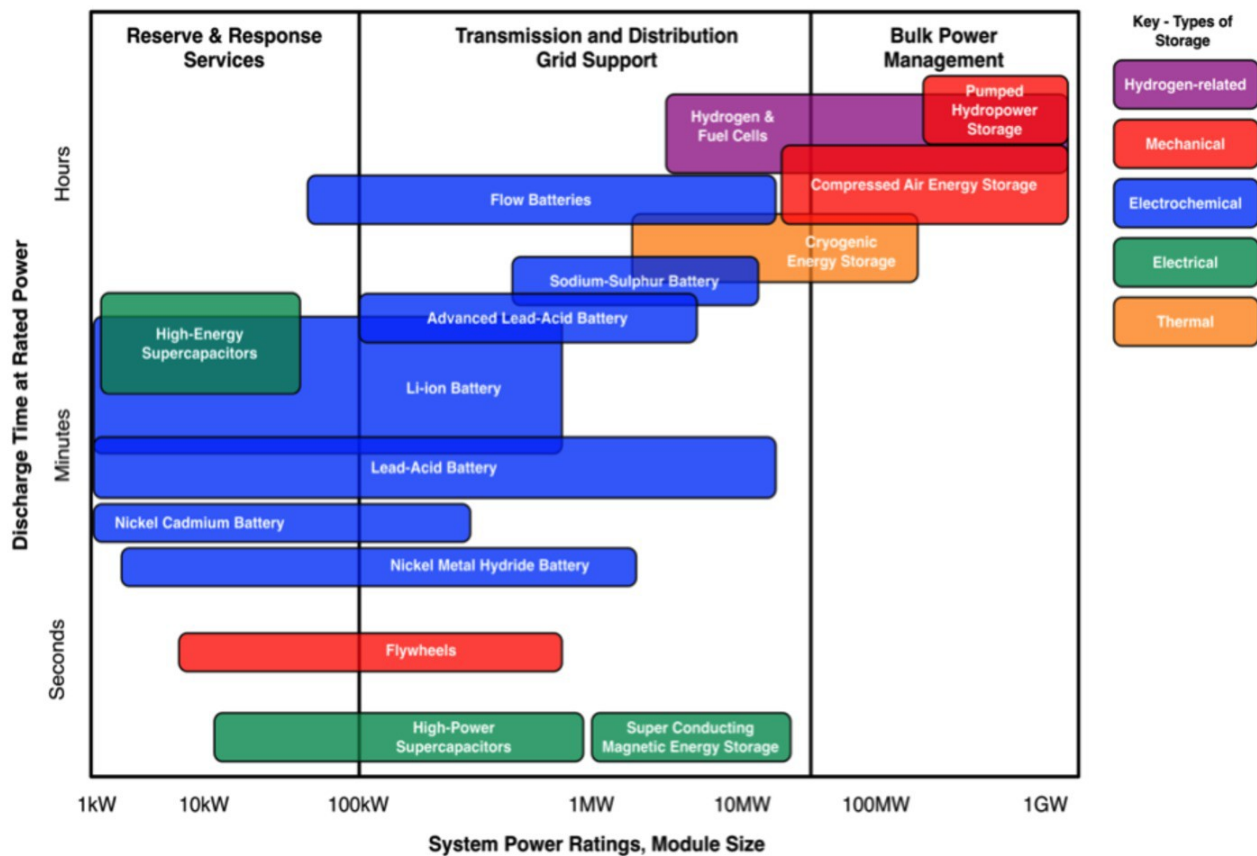
Στον πίνακα 6 παρουσιάζουμε τη σύγκριση των προδιαγραφών των πιο διαδεδομένων ESS [27], ενώ στα σχήματα 17 και 18 αναπαρίστανται γραφικά οι διαφορές τους σε κόστος ανά μονάδα ισχύος (\$/kW) και ανά μονάδα ενέργειας (\$/kWh) [31] αλλά και η κατάταξή τους ανάλογα με το χρόνο αποφόρτισης σε σχέση με την ονομαστική ισχύ [32].

Είδος ESS	Ισχύς	Διάρκεια Αποφόρτισης	Απόδοση (%)	Διάρκεια Ζωής	Κόστος (\$/kW)
Li-ion	5 MW	15mins έως αρκετές ώρες	90 (DC)	15 χρόνια	4000-5000
Μολύβδου Οξέος	3-20 MW	10secs έως αρκετές ώρες	75-80 (DC) 70-75 (AC)	4-8 χρόνια	1740-2580
ZEBRA	<10 MW	Έως 8 ώρες	80-85 (DC)	>1500 κύκλους	1500-2000
Μπαταρία Ροής Βαναδίου	4 MW	4-8 ώρες	75-80 (DC) 63-68 (AC)	10 χρόνια	7000-8200
Μπαταρία Ροής Zn/Br ₂	40-100 kW, 2 MW	2-4 ώρες	75-80 (DC) 60-70 (AC)	20 χρόνια	5100-5600
Μπαταρία Ροής Fe/Cr	<10 MW	2-4 ώρες	50-65	20 χρόνια	200-2500
Σφόνδυλος Υψηλής Ισχύος	750-1650 kW	15secs – 15mins	93	20 χρόνια	3695-4313
SMES	1–3 MW	1-3secs	90	>30000 κύκλους	380-490
SMES Υψηλής Ισχύος	100-200 MW	100 secs (MWh) 30mins–1h (100MWh) 5-10h (GWh)	90	>30000 κύκλους	700-2000
Υπερπυκνωτές	10 MW	Έως 30secs	90	>500000 κύκλους	1500-2500

Πίνακας 1: Προδιαγραφές των πιο διαδεδομένων ESS. [27]



Σχήμα 1: Τοποθέτηση σε γράφημα και σύγκριση των ESS ανάλογα με το κόστος τους (\$) ανά kW και ανά kWh. [31]



Σχήμα 2: Σύγκριση των ESS ανάλογα με τον χρόνο εκφόρτισης σε σχέση την ονομαστική ισχύ τους. [32]

4.7 Βιβλιογραφία 4^ο Κεφαλαίου.

- [1] ABB Generations_23 Hybrid marine electric propulsion
- [2] 2014_Battery power's catching on
- [3] 2005_Full report - Energy Storage (ES).
- [4] 2014_DNV_GL_Guideline_large_mar_battery_systems_tcm4-597233
- [5] Royal Academy of Engineering, "Future Ship Powering Options - Exploring alternative methods of ship propulsion", July 2013.
-
- [6] <http://spectrum.ieee.org/energywise/transportation/advanced-cars/world-lithium-reserves-and-exports>.
- [7] 2014-11-17 MF Finnøy Hybrid Ferry Corvus FINAL
- [8] 2009_De Breucker, Peeters, Driesen - Possible applications of Plug-in Hybrid Electric Ships
- [9] Odyssey Application Manual – SLI Drycell Battery Guide
- [10] DT2009 - Αλεξόπουλος - ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ
- [11] Zebra battery fact sheet, MES-DEA.
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle_battery#Zebra
- [13] 2003_Galloway, Dustmann - ZEBRA Battery - Material Cost, Availability and Recycling
- [14] The sodium Nickel Chloride "Zebra" Battery, Meridian International Research 2005
- [15] <http://corvus-energy.com/Projects.html>
- [16] Norled - Zerocat
- [17] 2012_DNV_Tentative Rules for Battery Power
-
- [18] 2012_Patel - Shipboard Propulsion, Power Electronics, and Ocean Energy,
- [19] 2005_McGroarty, Schmeller, Hockney, Polimeno_Flywheel Energy Storage System for Electric Start and an All-Electric Ship,
- [20] 2012_Yu; Wang; Zhang; Sun - Analysis of the comprehensive physical field for a new flywheel Energy Storage Motor-Generator on Ships,
- [21] Hodge C.G., Mattick D.J., "The Electric Warship II" – 1997,
- [22] Τσιώλης Π., "ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΦΟΝΔΥΛΟ", ΑΠΘ, 2007, Διπλωματική εργασία,
- [23] Αναστασόπουλος Κων/νος, "ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΥΤΟΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΕ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ", ΑΠΘ, 2010, Διπλωματική εργασία
-
- [24] <http://arstechnica.com/science/2012/10/the-fast-and-the-flexible-graphene-foam-batteries-charge-quickly/>
- [25] 2012_Li et al - "Flexible graphene-based lithium ion batteries with ultrafast charge and discharge rates", PNAS.
-
- [26] <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/redox-flow-batteries>
- [27] 2009_iaa_energy_storage

[28] 2001-Young; Newell; Little_Beyond Electric Ship

[29] 2013_TSEKOURAS; KANELLOS - Optimal Operation of Ship Electrical Power System with Energy Storage System and Photovoltaics: Analysis and Application

[30] 2011_Weber et al_Redox flow batteries a review

[31] 2005_Full report - Energy Storage (ES)

[32] <http://theconversation.com/the-missing-link-why-australia-needs-energy-storage-10846>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

***Τα βασικότερα μέρη του ΣΗΕ ενός DC-Πλοίου –
Συστήματα Ηλεκτροπρόωσης και Ηλεκτροκινητήρες***

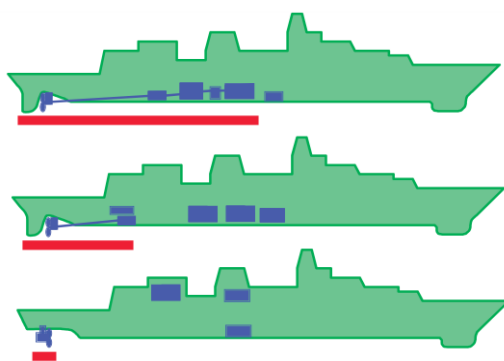
Η τεχνολογία ηλεκτροπρόωσης αλλάζει τον τρόπο που ένα πλοίο μεταδίδει την ισχύ από την κύρια μηχανή (prime mover) στην προπέλα και τον τρόπο που διαχειρίζεται και διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια εξίσου για την πρόωση και για τα υπόλοιπα φορτία. Η κύρια πηγή ενέργειας του πλοίου δεν αλλάζει, καθώς παραμένει ο κινητήρας ντίζελ, ο αεριοστρόβιλος, ή ο ατμοστρόβιλος, τουλάχιστον προς το παρόν. [1]

Από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, με την κατασκευή των μεγάλων ηλεκτρικών κινητήρων και γεννητριών, ξεκίνησε η εγκατάσταση ηλεκτροπρόωσης. Ωστόσο, ενώ ήταν πολλά υποσχόμενη, δεν μπορούσε να ανταγωνιστεί την τεχνολογία μηχανικής μετάδοσης κίνησης των μεγάλων πλοίων μέχρι το 1980. Τότε οι τεχνολογικές εξελίξεις στους κινητήρες, ιδιαίτερα στα συστήματα οδήγησης με ηλεκτρονικά ισχύος, έκανε την ηλεκτροπρόωση δυνητικά πιο αποδοτική από τη μηχανική μετάδοση ακόμα και για τα μεγάλα πλοία. Το 1985, το Ηνωμένο Βασίλειο άρχισε να κατασκευάζει τις κλάσης “Duke” τύπου 23 φρεγάτες, στις οποίες χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός πρόωσης μηχανικής με αεριοστρόβιλο και diesel-ηλεκτρικής. Το χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας ντιζελοηλεκτρικό σύστημα κινούσε το πλοίο κατά τις επιχειρήσεις ανίχνευσης (σόναρ) και ρυμούλκησης σε ταχύτητες μέχρι 14 κόμβους και το στρόβιλο-μηχανικό στις υψηλότερες ταχύτητες μέχρι τη μέγιστη σταθερή ταχύτητα των 28 κόμβων. Το 1987, το κρουαζιερόπλοιο “Queen Elizabeth II” υποβλήθηκε σε γενική ανακατασκευή καθώς το μηχανικό σύστημα κίνησής του αντικαταστάθηκε από το ενοποιημένο σύστημα ηλεκτροπρόωσης (Integrated Electric Propulsion - IEP). Η επιτυχής λειτουργία του έθεσε τη βάση για την ευρεία υιοθέτηση της IEP στα κρουαζιερόπλοια. Σήμερα, τα περισσότερα κρουαζιερόπλοια κατασκευάζονται με ηλεκτροπρόωση. [1]

Στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship – AES) με IEP καθίσταται δυνατή η χρήση από άλλα φορτία μέρους της ισχύος που προορίζεται για πρόωση, επιτρέποντας τη μείωση του αριθμού των εγκατεστημένων κινητήριων μηχανών, το οποίο με τη σειρά του αυξάνει την οικονομία καυσίμου και προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία σχεδιασμού. Τα ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης είναι οικονομικά, φιλικά προς το περιβάλλον και αξιόπιστα. Προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα από την άποψη της λειτουργίας και του ελέγχου, ενώ έχουν βέλτιστη ικανότητα ελιγμών και προσδιορισμού θέσης. Τα χαμηλά επίπεδα κραδασμών και θορύβου, και η δυνατότητα για την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση του χώρου είναι ίσως τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους. [2]

5.1 Συστήματα Ηλεκτροπρόωσης

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της χρήσης του ηλεκτρικού κινητήρα για την πρόωση είναι ότι οι σχεδιαστές των πλοίων δεν περιορίζονται από την ύπαρξη και την τοποθέτηση του απαραίτητου μειωτήρα στροφών στη γραμμή μετάδοσης κίνησης και του πολύ μεγάλου μήκους άξονα. Η αντικατάσταση των μηχανικών εξαρτημάτων μεταξύ της κινητήριας μηχανής και της προπέλας με ένα ηλεκτρικό δίκτυο ενέχει πολλαπλά πιθανά οφέλη συμπεριλαμβανομένης της μειωμένης κατανάλωσης καυσίμου, βελτιωμένη δυναμική συμπεριφορά, αυξημένη αξιοπιστία, μειωμένο κόστος συντήρησης, καθώς και μεγαλύτερη ευελιξία στη διαρρύθμιση του πλοίου. Με την επιλογή κατάλληλων κινητήρων, η πρόωση με ηλεκτρισμό μπορεί να καταστήσει περιττό το μειωτήρα και να μειώσει σημαντικά το μήκος ή να εξαλείψει τελείως τον άξονα, όπως στην περίπτωση των αζιμουθιακών προωστήρων. Στο σχήμα 1 είναι εμφανής η διαφορά στο μήκος του άξονα μετάδοσης της κίνησης για το συμβατικό μηχανικό σύστημα, την αξονική ηλεκτροπρόωση και την πρόωση με αζιμουθιακό προωστήρα με τον ηλεκτροκινητήρα εκτός του κύτους του πλοίου (pod). Οι σχεδιαστές εξετάζουν διάφορα συστήματα ηλεκτροπρόωσης για χρήση άμεσα ή σε μελλοντικά πλοία, τα σημαντικότερα από τα οποία είναι αυτά που τοποθετούνται εντός του κύτους (in-hull), τα αζιμουθιακά (podded), τα μαγνητο-υδροδυναμικά (magnetohydrodynamic drive – MHD) και τα ηλεκτρικά συστήματα με εκτοξευτήρες νερού (Water-jets). Αυτά θα εξεταστούν στη συνέχεια. [2]



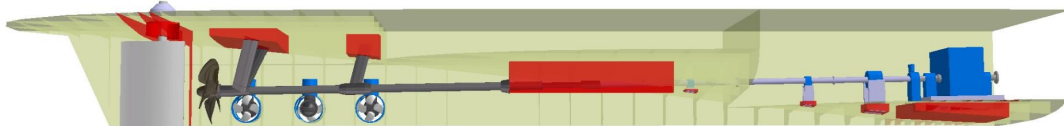
Σχήμα 1: Το μήκος του περιστροφικού άξονα στη συμβατική μηχανική τοπολογία (πάνω), στην αξονική ηλεκτροπρόωση (μέση) και στην πρόωση με pod (κάτω). [15]

5.1.1 Συστήματα ηλεκτροπρόωσης που ο κινητήρας βρίσκεται εντός του κύτους του πλοίου (In-Hull Propulsion).

➤ Αξονικά συστήματα ηλεκτροπρόωσης (shaft propulsion):

Η βασική τοπολογία με ηλεκτρικές μονάδες πρόωσης εντός του κοιλώματος είναι παρόμοια με εκείνη της συμβατικής μηχανικής μετάδοσης κίνησης. Πρόκειται για την αξονική ηλεκτροπρόωση (σχήμα 1), όπου ο κινητήρας βρίσκεται μέσα στο κύτος του πλοίου και μεταφέρει ροπή, χρησιμοποιώντας έναν περιστροφικό άξονα, προς την έλικα που με τη σειρά της μετατρέπει τη ροπή σε κίνηση προς τα εμπρός ή προς τα πίσω. Στην εντός του κύτους ηλεκτροπρόωση απαιτείται πρόσθετος εξοπλισμός, όπως ειδικά έδρανα και στεγανοποιητικά παρεμβύσματα στον άξονα στα σημεία διάτρησης των διαφραγμάτων, και ένα πηδάλιο για να παρέχει τον έλεγχο του συστήματος διεύθυνσης. Σε σύγκριση με τη μηχανική πρόωση, είναι δυνατή σημαντική μείωση στο μήκος του άξονα λόγω της ευελιξίας της θέσης του

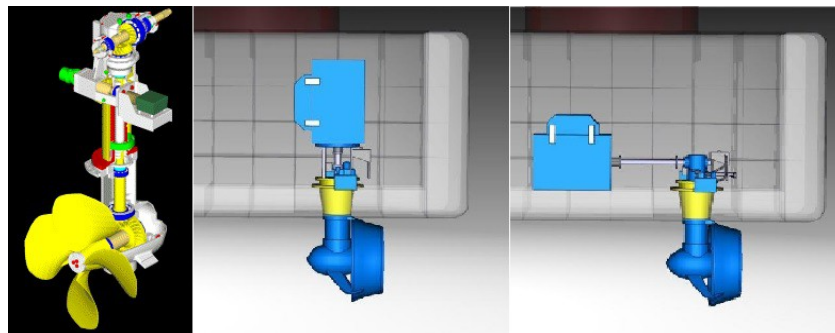
ηλεκτροκινητήρα [2]. Εξαιτίας του συστήματος οδήγησης μεταβλητών στροφών που χρησιμοποιείται γενικά στην ηλεκτροπρόωση, μπορούμε να επιλέξουμε προπέλες σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propellers – FPP), οι οποίες γενικά είναι 3 με 4 φορές φθηνότερες από τις έλικες μεταβλητού βήματος (Controllable Pitch Propellers – CPP). Οι CPPs έχουν μεγαλύτερη πλήμνη, επειδή πρέπει να έχει αρκετό χώρο για τον υδραυλικό μηχανισμό ελέγχου της γωνίας των πτερυγίων, και έτσι έχουν χειρότερα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις FPPs. Επίσης, οι ελεγχόμενοι βήματος, λόγω της υψηλότερης πολυπλοκότητας έχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις συντήρησης και συνοδεύονται από υψηλότερο ρίσκο εμφάνισης προβλημάτων κατά τη λειτουργία [9].



Σχήμα 2: Διάταξη αξονικής ηλεκτροπρόωσης όπου φαίνεται ο ηλεκτροκινητήρας (αριστερά), ο άξονας, οι μηχανικοί σύνδεσμοι και τα στηρίγματα. [3]

➤ *Αζιμουθιακοί προωστήρες τύπου Z ή L (Z or L-type azimuth thrusters).*

Τοπολογίες στις οποίες ο ηλεκτροκινητήρας βρίσκεται εντός της γάστρας του σκάφους αποτελούν και οι περιπτώσεις με τύπου Z ή L αζιμουθιακούς προωστήρες (σχήμα 2) οι οποίοι έχουν καλύτερα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά από τις κλασικές αξονικές που αναφέραμε παραπάνω και μπορούν να υλοποιηθούν με ακόμα μικρότερου μήκους άξονες, προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία στην κίνηση αλλά έχουν πιο πολύπλοκο μηχανικό σύστημα. Αυτοί χρησιμοποιούνται συνήθως ως thrusters στην πλώρη ή την πρύμνη.

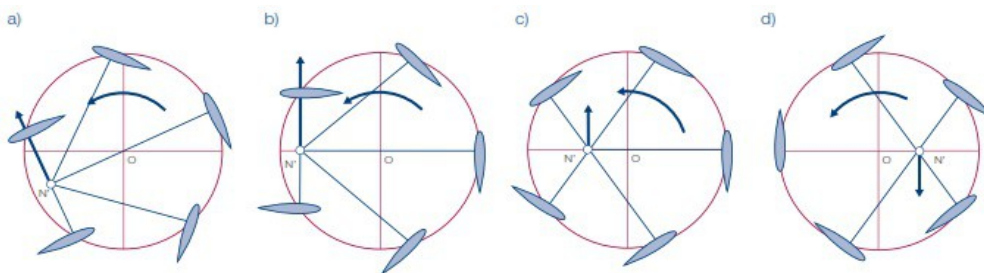


Σχήμα 3: Μηχανικό σύστημα προωστήρα τύπου Z (αριστερά) και διατάξεις τύπου L (κέντρο), τύπου Z (δεξιά). [3], [4]

➤ *Σύστημα πρόωσης με προπέλα Voith Schneider (VSP):*

Ένας ακόμα τύπος ηλεκτροπρόωσης με κινητήρα εντός του κύτους που πρέπει να αναφερθεί είναι αυτός με προπέλα τύπου Voith Schneider (VSP), η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 5. Αυτή πρόκειται για κυκλοειδούς τύπου και χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό πτερυγίων που περιστρέφονται γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα, υπό γωνία (pitch) που εξαρτάται από τη θέση του και προσπαθεί να προσομοιάσει την κίνηση του πτερυγίου της ουράς των δελφινιών. Οι δύο μεταβλητές, η κατεύθυνση και η ταχύτητα πρόωσης, καθορίζονται από αυτή τη γωνία η οποία ελέγχεται από ένα υδραυλικό σύστημα με μηχανικό διεγέρτη (σερβοκινητήρα), όπου πολύ εύκολα βέβαια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρικό στο μέλλον για την περίπτωση του πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου (All-Electric Ship – AES). Στο

σχήμα 4 φαίνεται αυτή η λειτουργία με το διάνυσμα που έχει ως αρχή του το σημείο που ενώνονται οι κάθετες των πτερυγίων N' να υποδηλώνει την κατεύθυνση και το μέγεθος της ταχύτητας. Παρατηρούμε ότι όσο πιο μακριά είναι το N' από το κέντρο O τόσο μεγαλύτερη θα είναι αυτή. Επιπλέον, εάν το N' είναι στο 3^ο τεταρτημόριο (σχήμα 3a) η κατεύθυνση θα είναι προς τα πάνω και αριστερά, στο 2^ο θα είναι πάνω και δεξιά, στο 1^ο κάτω και δεξιά και στο 4^ο η κατεύθυνση θα της κίνησης θα είναι κάτω και αριστερά. Όλα αυτά βέβαια στην περίπτωση που η VSP περιστρέφεται με την ανθρωπολογιακή φορά. Σ' αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι η ταχύτητα του σκάφους εξαρτάται και ελέγχεται κυρίως από το pitch και όχι από τις ΣΑΛ του κινητήρα, κάτι το οποίο είναι πολύ ευνοϊκό για τη μηχανή μας που μπορεί να λειτουργεί στις κατάλληλες στροφές για την βέλτιστη ροπή κατά περίπτωση [6].



Σχήμα 4: Περιπτώσεις θέσεων των πτερυγίων της VSP για διαφορετικές ταχύτητες [6]:

- a) Υψηλή ταχύτητα, κατεύθυνση προς τα πάνω αριστερά,
- b) Υψηλή ταχύτητα, κατεύθυνση προς τα πάνω,
- c) Χαμηλή ταχύτητα, κατεύθυνση προς τα πάνω,
- d) Χαμηλή ταχύτητα, κατεύθυνση προς τα κάτω.

Όπως διακρίνεται και στο σχήμα 5, μπορεί να συνδεθεί απευθείας με ηλεκτροκινητήρα (στο συγκεκριμένο μοντέλο έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί και με άλλον ένα κινητήρα) παρόμοια με την περίπτωση του thruster τύπου Z, με πολύ μικρού – ίσως μικρότερου – μήκους άξονα. Στα δεξιά του σχήματος 5 φαίνονται και τα μηχανικά μέρη της, όπου πάνω δεξιά είναι το υδραυλικό έμβολο που ελέγχει το pitch και πάνω αριστερά το σημείο σύνδεσης με την κινητήρια μηχανή [7].



Σχήμα 5: Η προπέλα Voith Schneider συνδεδεμένη με ηλεκτροκινητήρα (αριστερά)[8] και τα κυριότερα μηχανικά μέρη της (δεξιά) [7]

Μια εφαρμογή με VSP παρουσιάζει ακόμα μεγαλύτερη κινητική ευελιξία, σταθερότητα και σχεδόν ακαριαία δυναμική απόκριση [5], είναι ιδανική επομένως για πλοία με σύστημα δυναμικού προσδιορισμού θέσης (Dynamic Positioning – DP). Η ηλεκτροπρόωση με προπέλα τύπου Voith Schneider είναι αυτή τη στιγμή αρκετά διαδεδομένη σε ρυμουλκά πλοία, επιβατικά και διάφορα βοηθητικά πλοία εργασιών. Μία τέτοια εγκατάσταση παρουσιάζεται στο σχήμα 6.



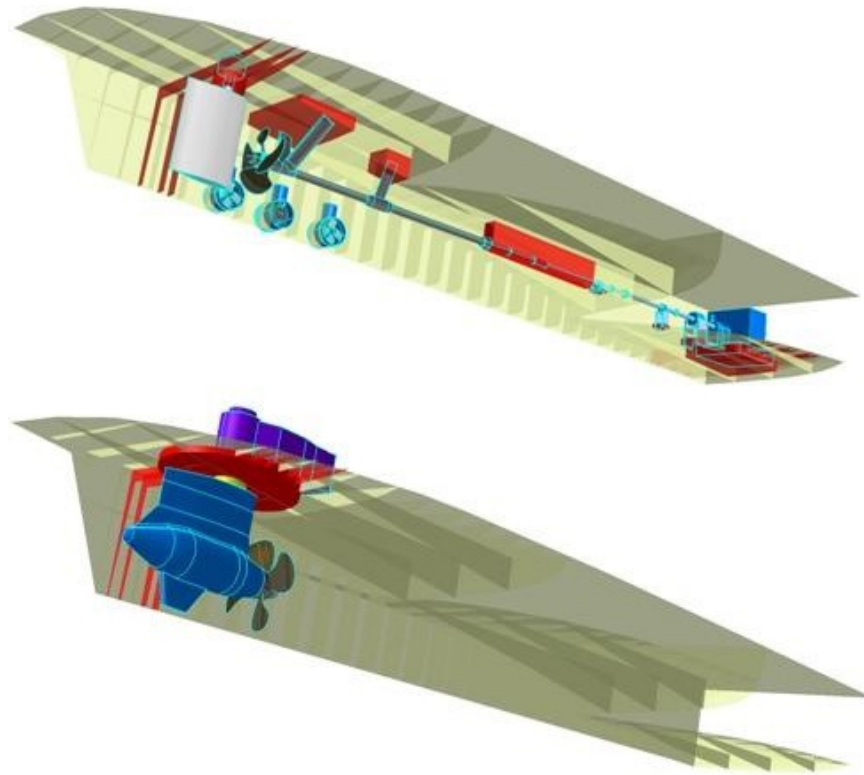
Σχήμα 6: Παράδειγμα εγκατάστασης προπέλας Voith Schneider [7].

5.1.2 Αξιμουθιακοί προωστήρες με τον ηλεκτροκινητήρα εκτός του σκάφους (Podded Propulsion).

Οι αξιμουθιακοί προωστήρες (pods) που έχουν εγκατεστημένο τον ηλεκτροκινητήρα εντός του κελύφους τους εξαλείφουν την ανάγκη για άξονα μετάδοσης της περιστροφικής κίνησης που διέρχεται κατά μήκος του κύτους. Στην περίπτωση που εξετάζουμε, οι προπέλες τοποθετούνται στις ατράκτους που μπορούν να περιστραφούν σε οποιαδήποτε οριζόντια κατεύθυνση, καθιστώντας την ύπαρξη πηδαλίου περιττή και δίνοντας στα πλοία μεγαλύτερη δυνατότητα ελιγμών από ένα σύστημα με σταθερής διεύθυνσης έλικα και πηδάλιο.

Στο άμεσα οδηγούμενο (direct driven) pod λοιπόν, ο κινητήρας βρίσκεται έξω από το κυρίως κύτος του πλοίου μέσα στο pod, κάτι που επιτρέπει στην προπέλα να τοποθετηθεί απευθείας στην κινητήρια μηχανή. Αυτός ο τύπος ηλεκτροπρόωσης προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την αποτελεσματικότητα, την αξιοπιστία και την εξοικονόμηση χώρου. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί να έχει έναν ελάχιστο αριθμό μηχανικών μερών, άρα και μηχανικών απωλειών, και παρέχει εξαιρετική ευελιξία, η οποία είναι απαραίτητη για την πλοήγηση σε ρηγά νερά και στις καταστάσεις επιβίβασης/αποβίβασης, με εξαιρετικά υδροδυναμικά χαρακτηριστικά, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις με προπέλα έλξης.

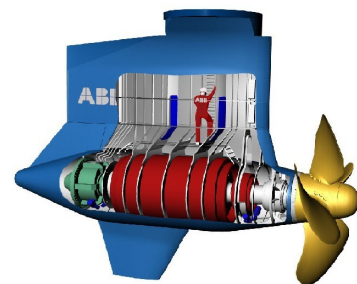
Με την podded πρόωση οι μεγάλοι μήκους περιστροφικοί άξονες και τα διάφορα μηχανικά εξαρτήματα της αξονικής πρόωσης μπορούν να εξαλειφθούν πλήρως και οι μεγάλοι ηλεκτροκινητήρες μπορούν να βρίσκονται εκτός της γάστρας του πλοίου, όπως είναι εμφανές στο σχήμα 7, αυξάνοντας περαιτέρω τον χώρο που διατίθεται για μηχανήματα και εμπορεύματα εντός του πλοίου, ενώ ελαχιστοποιούνται οι θόρυβοι και οι δονήσεις που προέρχονται από τα μηχανικά μέρη. Στις μεγάλες εταιρείες για podded πρόωση περιλαμβάνονται οι ABB, η Rolls Royce σε συνεργασία με την Converteam, η Siemens με τη Schottel και η SAM Electronics με τη Wartsila Propulsion.



Σχήμα 7: Οπτική απεικόνιση της αξονικής (πάνω) και της podded ηλεκτρικής πρόωσης για το ίδιο πλοίο. [3]

➤ *Azipod® (ABB):*

Το Azipod® (σχήμα 8) της ABB είναι ένα σύστημα πρόωσης τύπου έλξης (pulling type), και μπορεί να περιστραφεί γύρω από τον κάθετο άξονά του κατά 360°. Τα Azipod C, Azipod V και Azipod X έχουν ονομαστική ισχύ 1-4,5 MW, 6-21 MW και 10-25 MW αντίστοιχα. Η σειρά Azipod C χρησιμοποιεί σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη για την πρόωση, ενώ τα V και X Azipods χρησιμοποιούν σύγχρονους ή ασύγχρονους κινητήρες.

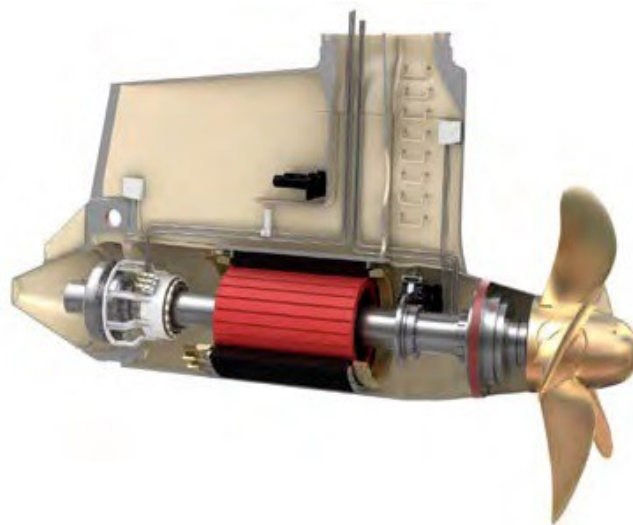


Σχήμα 8: Η σειρά Azipod της ABB, από αριστερά προς τα δεξιά: Azipod CO, Azipod VI, Azipod XO. [9]

➤ *Mermaid® (Rolls Royce & Converteam):*

Το Mermaid® pod (σχήμα 9), που αναπτύχθηκε από την Rolls Royce και την Converteam από κοινού, μπορεί να περιστραφεί κατά 360 μοίρες και αυτό για ελιγμούς. Το βασικό στοιχείο στην υποβρύχια μονάδα είναι ο ηλεκτρικός κινητήρας, είτε σύγχρονου τύπου με διέγερτρια χωρίς ψήκτρες είτε επαγωγικός. Το pod λειτουργεί τόσο ως προπέλα όσο και ως πηδάλιο, με ενσωματωμένο ηλεκτρικό κινητήρα απ'ευθείας συζευγμένο, χωρίς μειωτήρες

στροφών, και ένα σχετικά κοντό άξονα έλικας. Το εύρος ισχύος του Mermaid είναι 5-27 MW.



Σχήμα 9: Το εσωτερικό του Mermaid ICE Pod της Rolls Royce και της Converteam. [10]

➤ *Siemens-Schottel Propulsor – SSP (Siemens & Schottel):*

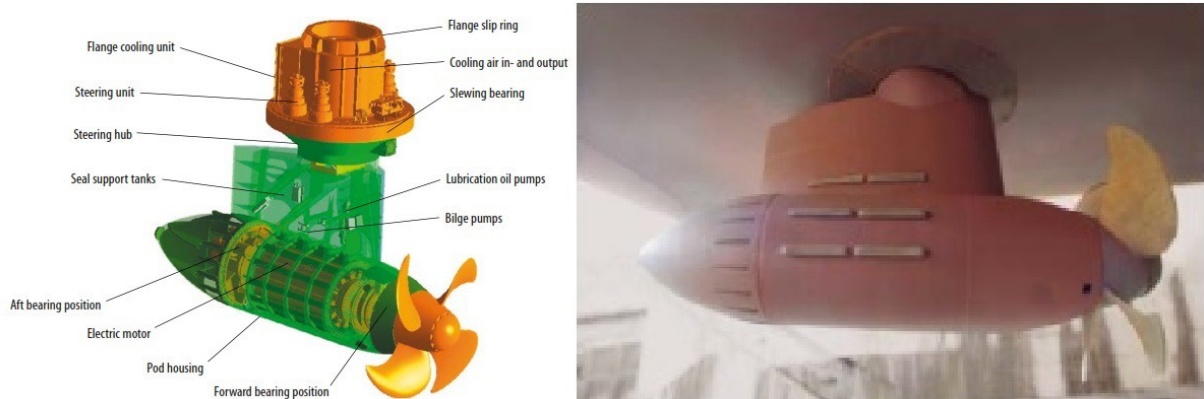
Η συνεργασία της Siemens Marine Solutions και της SCHOTTEL GmbH είχε ως αποτέλεσμα την κατασκευή του Siemens-Schottel Propulsor (SSP) (σχήμα 10) ο οποίος είναι ένας τύπος pod με διπλή έλικα, μία έλξης στο μπροστινό τμήμα και μία ώθησης στο πίσω (Push-Pull pod). Η τεχνογνωσία της Schottel στην μηχανική και υδροδυναμική και ο ηλεκτροκινητήρας μόνιμου μαγνήτη με το σύστημα οδήγησής του της Siemens συνέτειναν στην δημιουργία αυτού του προωστήρα. Ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη, ψύχεται απευθείας από το θαλασσινό νερό που τον περιβάλλει και χρησιμοποιείται άμεσα, χωρίς επιπλέον παρεμβαλλόμενα μηχανικά εξαρτήματα, ως μοτέρ κίνησης για τις προπέλες [11]. Το εύρος ισχύος του SSP είναι 5-30 MW και φυσικά ως pod μπορεί να περιστραφεί κατά 360 μοίρες, το οποίο βελτιώνει σημαντικά την ευελιξία του πλοίου, ειδικά στις μικρές ταχύτητες.



Σχήμα 10: Δύο προωστήρες Siemens-Schottel (SSP) εγκατεστημένοι σε πλοίο.

➤ **DOLPHIN® (SAM Electronics & Wartsila Propulsion):**

Το Dolphin® pod (σχήμα 11), που αναπτύχθηκε από την σύμπραξη της SAM Electronics και της Wartsila Propulsion, είναι ένα σύστημα πρόωσης τύπου έλξης στο πεδίο ισχύος 5 έως 11 MW. Ένας εξαφασικός αερόψυκτος σύγχρονος κινητήρας χρησιμοποιείται ως κινητήρας και η χαμηλή του ταχύτητα δίνει τη δυνατότητα να είναι συνδεδεμένος άμεσα με την σταθερού βήματος προπέλα έλξης. Η αζιμουθιακή του περιστροφή είναι ηλεκτρο-υδραυλική. Ο διπλού τυλίγματος κινητήρας ελέγχεται από συγχρομετατροπέα (synchroconverter) στις υψηλές ταχύτητες και από μετατροπείς με σύστημα διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM). Η βέλτιστη δυνατότητα ελιγμών διασφαλίζεται, καθώς έχει και αυτό, όπως όλα τα pod, 360 μοίρες ελευθερία περιστροφής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. [12]



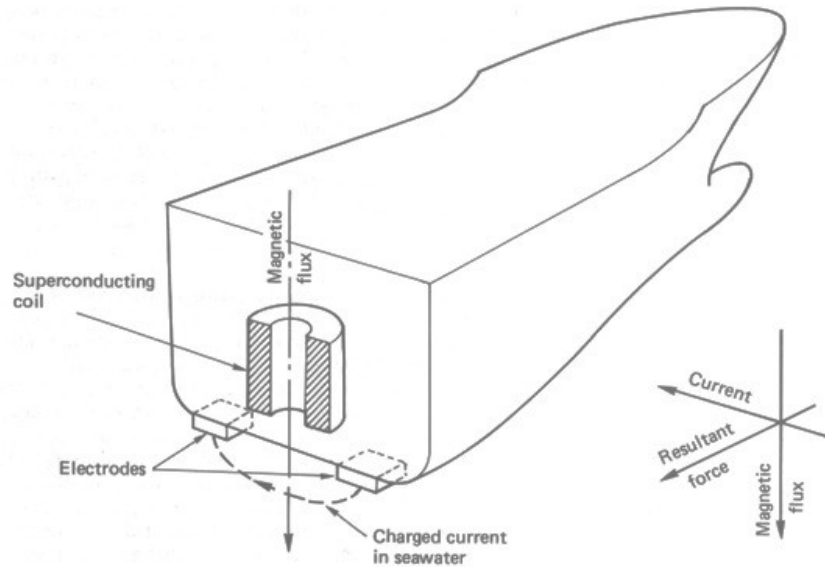
Σχήμα 11: Τρισδιάστατη απεικόνιση του DOLPHIN pod της SAM electronics και της Wartsila με τα κυριότερα μέρη του (αριστερά) και εφαρμογή του σε πλοίο (δεξιά).

5.1.3 Μαγνητο-υδροδυναμικά συστήματα (magnetohydrodynamic drive – MHD).

Σε αντίθεση με τους άλλους τύπους συστημάτων πρόωσης, το σύστημα αυτό δεν χρειάζεται καμία έλικα, πτερύγια, κουπιά, πανιά ή οτιδήποτε συμβατικό για να κάνει το σκάφος να κινηθεί στη θάλασσα [13]. Η αρχή αυτού του συστήματος ηλεκτρομαγνητικής πρόωσης βασίζεται στην εξίσωση δύναμης του Lorentz που έχει την προέλευσή της από τον 19ο αιώνα. Η εξίσωση μπορεί να γραφτεί ως:

$$\vec{F} = q[\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})]$$

όπου E, B και v είναι διανύσματα που ορίζουν, αντίστοιχα, το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο και την ταχύτητα των φορέων φορτίου q [14]. Δηλαδή, σε ένα σωματίδιο με φορτίο q που κινείται με ταχύτητα \vec{v} , υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} και ενός μαγνητικού πεδίου \vec{B} θα ασκηθεί μια δύναμη \vec{F} . Πρόκειται ουσιαστικά για αλληλεπίδραση μεταξύ δύο μαγνητικών πεδίων. Το πρώτο πεδίο είναι αποτέλεσμα του εγκατεστημένου πηνίου στην πρύμνη του σκάφους και το δεύτερο λόγω του ηλεκτρικού ρεύματος που δημιουργείται από δύο ηλεκτρόδια που τοποθετούνται στο πίσω μέρος σε επαφή με το θαλασσίνο νερό όπως φαίνεται και στο σχήμα 12. Σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού, με βάση την σχετική διεύθυνση των μαγνητικών πεδίων, το πλοίο μπορεί να κινηθεί προς τα εμπρός ή προς τα πίσω, και η ταχύτητα μπορεί να ελέγχεται από το πλάτος του ηλεκτρικού ρεύματος στο πηνίο. [14]



Σχήμα 12: Σχέδιο της αρχής λειτουργίας του συστήματος μαγνητο-υδροδυναμικής πρόωσης (MHD). [13]

Η ιδέα της ηλεκτρομαγνητικής πρόωσης κατοχυρώθηκε πρώτη φορά ως πατέντα στις ΗΠΑ το 1961. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 η Mitsubishi Heavy Industries κατασκεύασε το MHD προωθούμενο σκάφος επίδειξης Yamato 1 (σχήμα 13). Αυτό το 150 τόνων σκάφος χρησιμοποιούσε υπεραγώγιμα πηνία χαμηλής θερμοκρασίας με ψύξη υγρού ήλιου για την επίτευξη των απαιτούμενων υψηλών μαγνητικών πεδίων. Ωστόσο, η επιτευχθείσα ταχύτητα ήταν περίπου 8 κόμβους. [14]



Σχήμα 13: Το πειραματικό πλοιάριο Yamato 1 με ηλεκτρομαγνητική πρόωση. [13]

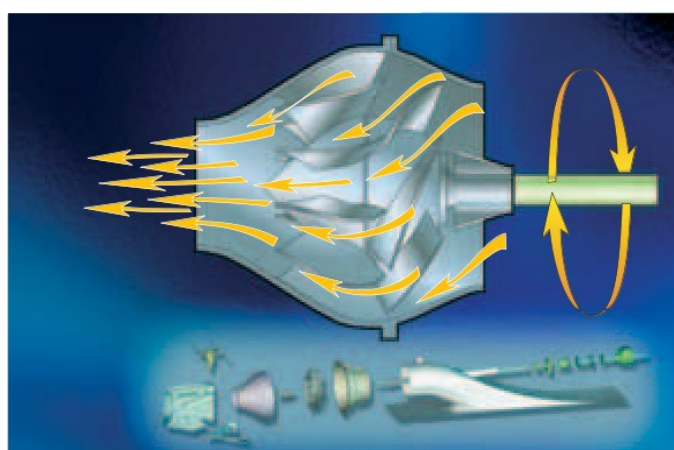
Ένα επιθυμητό αναμενόμενο όφελος των εφαρμογών MHD ήταν ότι θα είναι σχεδόν αθόρυβες σε λειτουργία και ως εκ τούτου ότι θα υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον από τους κατασκευαστές υποβρυχίων και πολεμικών πλοίων. Ωστόσο, αυτό αποδείχθηκε ότι δεν ισχύει στην πράξη. Η δημιουργία φυσαλίδων στα ηλεκτρόδια δημιουργούσε θόρυβο ευρέος φάσματος με συχνότητες από 2 kHz έως 20 kHz και πάνω, αλλά με το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας στην περιοχή 2 kHz έως 6 kHz. Αυτός ο θόρυβος προκαλούνταν κυρίως μέσω της συνένωσης των φυσαλίδων που είχαν διάμετρο μεταξύ 0,075 και 0,150 χιλιοστών οι οποίες γίνονταν σφαιρικές καθώς κινούνταν μακριά από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου και ως εκ

τούτου μετατρέπονταν σε ακουστικές πηγές προς όλες τις κατευθύνσεις. Αν και οι αρχές λειτουργίας των MHD έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε ηλεκτρομαγνητικά κανόνια και στις αντλίες υγρού μετάλλου, προέκυψαν λιγότερο επιτυχείς για τη θαλάσσια πρόωση [14]. Η ανάπτυξη και η εξέλιξη όμως των δικτύων συνεχούς ρεύματος στα πλοία ευνοεί σε μεγάλο βαθμό την ένταξη της ηλεκτρομαγνητικής πρόωσης ανάμεσα στις ρεαλιστικές επιλογές για τοπολογίες που θα εξετασθούν στα προσεχή χρόνια, ειδικά για εμπορικά πλοία.

5.1.4 Ηλεκτροπρόωση με εκτοξευτήρες νερού (Water-jets).

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της πρόωσης είναι η σπηλαιώση (cavitation), η οποία περιορίζει τη μέγιστη ταχύτητα των ελικοφόρων σκαφών μεταξύ 30 και 35 κόμβων. Καθώς οι προπέλες επιταχύνουν, η σπηλαιώση αρχίζει να αναπτύσσεται σε περιοχές επί των πτερυγίων με χαμηλή πίεση και συνεχίζει να επιδεινώνεται μέχρις ότου, σε μια υψηλή ταχύτητα, οι περιοχές αυτές να καλύπτονται πλήρως από μικροσκοπικές φυσαλίδες. Αυτό το φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία αλλοίωση της επιφάνειας της προπέλας, τη δημιουργία παλμών πίεσης που βιώνονται ως θόρυβος και κραδασμοί στο πλοίο και τη σημαντική μείωση στην απόδοση της έλικας. [15]

Για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων, τα πλοία που χρειάζεται να αναπτύσσουν μεγάλες ταχύτητες κινούνται με εκτοξευτήρες νερού (Water-jets), οι οποίοι είναι ουσιαστικά τεράστιες αντλίες που τραβούν νερό από την κάτω πλευρά του σκάφους και το εκβάλουν με πολύ υψηλή πίεση στην πρύμνη. Τα κυριότερα μέρη του κλασικού τύπου water-jet και η ροή μέσω υδροβολής απεικονίζονται στο σχήμα 14. Επειδή η πτερωτή του εκτοξευτήρα νερού περικλείεται από θωράκιση, σε αντίθεση με τα εκτεθειμένα πτερύγια της συμβατική προπέλα, μπορούν να αναπτύσσονται υψηλότερες πιέσεις. Αυτό σε συνδυασμό με τον κατάλληλο σχεδιασμό του στροφείου και του σταθερού περιβλήματος είναι δυνατόν να καταστείλουν το φαινόμενο της σπηλαιώσης. Η ταχύτητα του άξονα του water-jet, σε παρόμοια επίπεδα ισχύος, είναι τυπικά διπλάσια από εκείνη των ελίκων κάτι που μας δίνει τη δυνατότητα επιλογής υψηλόστροφου ηλεκτροκινητήρα. [15]



Σχήμα 14: Η ροή του νερού και τα κυριότερα μέρη σε ένα συνηθισμένο water-jet. [15]

➤ Ripjet®:

Παράδειγμα εκτοξευτήρα νερού οδηγούμενου από συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα αποτελεί το RipJet® (σχήμα 15) της Maelstrom Marine, το οποίο τροφοδοτείται από υβριδικές μπαταρίες λιθίου και τη δεδομένη στιγμή υπάρχει μόνο σε μικρή κλίμακα αλλά έχει κινήσει μεγάλο

ενδιαφέρον από ναυπηγικές εταιρίες και βρίσκεται υπό συζήτηση από το αμερικανικό πολεμικό ναυτικό. Είναι ένας ηλεκτρικός θαλάσσιος προωστήρας που μοιάζει με μινιατούρα τουρμπίνα αεροπλάνου. Επιπλέον, σε αντίθεση με τους συμβατικούς εκτοξευτήρες, λειτουργεί υποβρύχια, αντίστοιχα με τα rods. Η λειτουργία του είναι σχεδόν αθόρυβη ενώ ο σχεδιασμός και η κατασκευή του το καθιστούν αδιαπέραστο από τη θαλάσσια χλωρίδα και πανίδα ή από διάφορα άλλα σωματίδια και υπολείμματα που μπορεί να βρίσκονται στο νερό. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο Hugh Nicholson, ένας από τους εφευρέτες του RipJet, “Το ομαλό, σύγχρονου σχεδιασμού κέλυφος, με περίβλημα από εύκαμπτα ελαστικά στοιχεία, ωθεί τα πράγματα εκτός της πορείας του, χωρίς να τα τραυματίζει” (“*The smooth, streamline pod with flexible rubber housing elements nudges things out of the way without injuring them*”). Δοκιμές στο εργαστήριο υδροδυναμικής του Πανεπιστημίου του Μίσιγκαν έδειξαν ότι ένα σχεδόν 7 κιλών RipJet θα μπορούσε να δημιουργήσει μια ώθηση συγκρίσιμη με έναν 80 κιλών συμβατικό κινητήρα φυσικού αερίου. [16]



Σχήμα 15: Φωτογραφία του RipJet®. [16]

5.2 Ηλεκτρικοί Κινητήρες για Πρόωση

Οι ηλεκτροκινητήρες που συνδέονται με ηλεκτροπρόωση για μεγάλα πλοία μπορούν να χωριστούν σε διάφορες βασικές κατηγορίες που αναφέρονται στον πίνακα 1 με τις τεχνικές ονομασίες τους. Μπορούν να είναι AC ή DC και αποτελούνται από παραδοσιακούς ή νεοσύστατους. Τα χαρακτηριστικά κατασκευής και απόδοσης των παραδοσιακών κινητήρων μπορούν αναφέρονται εκτενώς στη βιβλιογραφία. Τα βασικά χαρακτηριστικά και οι επιδόσεις των νέων κινητήρων που έχουν αναπτυχθεί ειδικά για την ηλεκτροκίνηση σε ένα πλοίο θα συζητηθούν σε αυτό το κεφάλαιο.

Οι νέοι κινητήρες διαφέρουν από άποψη τεχνολογικής ωριμότητας, πυκνότητας ισχύος, καθώς και δυναμικής εφαρμογής σε διάφορα πολεμικά και εμπορικά πλοία. Για το λόγο αυτό, ένα μεγάλο μέρος της συζήτησης για την ηλεκτροκίνηση αφορά την επιλογή του κατάλληλου ηλεκτροκινητήρα.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά του κινητήρα, σε ένα μεγάλο πλοίο, κυρίως πολεμικό, απαιτείται να είναι αξιόπιστος, συμπαγής, ανθεκτικός στους κραδασμούς, να έχει χαμηλά επίπεδα θορύβου και να μπορεί να προσφέρει μεγάλη ισχύ και υψηλή ροπή σε μια αργή σχετικά ταχύτητα περιστροφής, κατάλληλη για προπέλες πλοίων. Παραδοσιακά οι υψηλής ισχύος ηλεκτρικοί κινητήρες τείνουν να είναι μηχανές υψηλής ταχύτητας και χαμηλής ροπής και όχι χαμηλή ταχύτητας, υψηλής ροπής.

Είδη Ηλεκτρικών Κινητήρων για Πρόωση
✓ Σύγχρονος Κινητήρας Εναλλασσόμενου Ρεύματος (<i>AC Synchronous Motor - SM</i>)
✓ Επαγωγικός/Ασύγχρονος Κινητήρας Εναλλασσόμενου Ρεύματος (<i>AC Induction Motor - IM</i>)
✓ Σύγχρονος Κινητήρας Εναλλασσόμενου Ρεύματος με Μόνιμο Μαγνήτη (<i>AC Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM</i>)
✓ Σύγχρονος Κινητήρας Εναλλασσόμενου Ρεύματος με Υπεραγωγούς Υψηλής Θερμοκρασίας (<i>AC High Temperature Superconducting Synchronous Motor - HTSSM</i>)
✓ Ομοπολικός Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος με Υπεραγωγίμα Στοιχεία (<i>Superconducting DC Homopolar Motor – SDCHM</i>)

Πίνακας 1: Τα είδη των ηλεκτροκινητήρων που χρησιμοποιούνται για πρόωση πλοίων.

Από άποψη σχεδιασμού, ο περιορισμός των συμβατικών ηλεκτρικών κινητήρων στην ανάπτυξη υψηλής ροπής προέρχεται τόσο από το ηλεκτρικό ρεύμα όσο και από τη μαγνητική ροή, τα οποία αλληλεπιδρούν για να τη δημιουργήσουν, καθώς "ανταγωνίζονται" για τον ίδιο χώρο στις μεταλλικές εγκοπές του πυρήνα. Ένας σχεδιασμός που να μπορεί να παρέχει επαρκή χώρο και για τα δύο έχει ως αποτέλεσμα μη συμπαγείς κινητήρες με μεγάλο όγκο και βάρος. Οι περιελιγμένοι αγωγοί του στάτη είναι ενσωματωμένοι στις εγκοπές του πυρήνα σιδήρου, ο οποίος φέρει τη μαγνητική ροή επίσης. Η ροπή που αναπτύσσεται στον άξονα είναι το γινόμενο του ρεύματος και της ροής. Ως εκ τούτου, η πυκνότητα ροπής της μηχανής μπορεί να αυξηθεί μόνο εάν τα μεγέθη των αγωγών και των σχισμών στις οποίες περιέχονται αυξηθεί. Ωστόσο, οι μεγαλύτερες αυλακώσεις μειώνουν το πλάτος των οδοντώσεων που

φέρουν τη μαγνητική ροή, μειώνοντας έτσι την ροή από τον πυρήνα του στάτη στους πόλους του ρότορα. Επιπλέον, όλοι οι ενεργοί αγωγοί που παράγουν ροπή βρίσκονται συμπιεσμένοι σε ένα στενό δακτυλιοειδή χώρο παρακείμενο προς το διάκενο αέρος. Το υπόλοιπο του όγκου της μηχανής παραμένει κενό από “ενεργό” -παράγον ροπή- ρεύμα.

Λόγω του περιορισμένου χώρου του πλοίου, στην ηλεκτροπρόωση είμαστε αναγκασμένοι να εστιάζουμε σε συμπαγείς κινητήρες που μπορούν να δώσουν υψηλή ισχύ και υψηλή πυκνότητα ροπής ανά κιλό και ανά κυβικό μέτρο. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί μερικοί χαμηλών στροφών, υψηλής ισχύος και ροπής ηλεκτρικοί κινητήρες που είναι αρκετά συμπαγείς για χρήση σε εμπορικά και πολεμικά πλοία ή υποβρύχια. Όσον αφορά την οδήγηση, έχει επίσης καταστεί δυνατή η ανάπτυξη ηλεκτρονικών ισχύος για μετατροπείς που θα μπορούσαν να χειριστούν αποτελεσματικότερα υψηλή ισχύ και να παρέχουν το υψηλής ποιότητας (χαμηλών αρμονικών) ρεύμα που απαιτείται για να λειτουργήσει ο κινητήρας σε υψηλή απόδοση με χαμηλό θόρυβο και μικρές δονήσεις. Επίσης, η ανάπτυξη των μεγάλων συσκευών ηλεκτρονικών ισχύος, επιτρέπει την εφαρμογή διάφορων καινούριων τεχνολογιών για τα ηλεκτρικά πλοία, επειδή μπορούν να μετατρέψουν αποτελεσματικά μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ισχύος σε διαφορετικές τάσεις και συχνότητες που απαιτούνται τόσο για την πρόωση όσο και για άλλα φορτία. Η εξέταση των χαρακτηριστικών των μεγάλων κινητήρων πρόωσης που χρησιμοποιούνται σε πλοία ακολουθεί στη συνέχεια. [1]

5.2.1 Σύγχρονοι Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC Synchronous Motors – SM).

Ο σύγχρονος κινητήρας είναι η πιο ώριμη τεχνολογία και είναι κατάλληλος για μεγάλα πλοία. Έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για ηλεκτροπρόωση στα περισσότερα εμπορικά πλοία, ιδιαίτερα στα κρουαζιερόπλοια, για περίπου δύο δεκαετίες. Έχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τον κινητήρα επαγωγής, αλλά μπορεί να χάσει το συγχρονισμό του σε περίπτωση της μεγάλης μεταβολής στο φορτίο λόγω ενός γρήγορου ελιγμού, όπως μπορεί να απαιτείται σε ορισμένα πλοία όπως τα πολεμικά. Επίσης, εάν κατασκευαστεί στα επίπεδα υψηλής ιπποδύναμης που απαιτείται για τις υψηλές ταχύτητες (>30 κόμβοι) των πολεμικών πλοίων και υποβρυχίων, ο κινητήρας θα είναι ογκώδης και βαρύς, επομένως ακατάλληλος για χρήση, λόγω της σχετικά χαμηλής πυκνότητας ισχύος του σε σύγκριση με άλλους τύπους κινητήρων. Ο όγκος και το βάρος είναι κρίσιμα ζητήματα σχεδιασμού στο ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα πρόωσης των υποβρυχίων, ενώ μπορεί να είναι κάπως μεγαλύτερη η ανοχή αν προορίζεται για το εσωτερικό πλοίου επιφάνειας. Επίσης, στην περίπτωση αζιμουθιακού προωστήρα με pod, ένας υψηλής ισχύος συμβατικός σύγχρονος κινητήρας μπορεί να είναι πολύ μεγάλος για να χωρέσει εντός του κελύφους. Ο κινητήρας μπορεί να γίνει κάπως μικρότερος με μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος με τη χρήση υδρόψυξης αντί της ψύξης με αέρα. Οι μεγάλες κλίμακας σύγχρονες γεννήτριες εκατοντάδων μεγαβάτ, χρησιμοποιούν ψύξη με νερό στο στάτη. Ωστόσο, στο φάσμα ισχύος των 20-25 MW, το δυνητικό κέρδος, ως προς την πυκνότητα ισχύος, της ψύξης με νερό μπορεί να μην είναι αρκετά μεγάλο ώστε να δικαιολογεί την επιπλέον πολυπλοκότητα για την παροχή απιονισμένου νερού στο σύστημα ψύξης μέσω των κοίλων αγωγών του στάτη. Η πιο πιθανή περίπτωση ηλεκτρικού συστήματος πρόωσης με σύγχρονους κινητήρες μπορεί να είναι σε μεγάλα πλοία, τα οποία να είναι σχεδιασμένα για σχετικά μικρότερες ταχύτητες. Επιπλέον οι περιορισμοί του εσωτερικού χώρου τους θα πρέπει να μην είναι τόσο μεγάλοι και το σύστημα πρόωσής τους να μην χρειάζεται να πληρεί τα πρότυπα, όπως αυτά του πολεμικού ναυτικού, σε χαμηλά επίπεδα ακουστικού θορύβου και υψηλής αντοχής σε κραδασμούς. [1]

5.2.2 Επαγωγικοί/Ασύγχρονοι Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC Induction/Asynchronous Motors).

Ο επαγωγικός κινητήρας είναι επίσης μία ώριμη τεχνολογία για χρήση σε μεγάλα πλοία και είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος κινητήρας στη βαριά βιομηχανία λόγω της στιβαρής κατασκευής και της χαμηλού κόστους αγοράς και συντήρησης. Ο κινητήρας επαγωγής χρησιμοποιήθηκε στις πλήρους κλίμακας χειρσαίες δοκιμές επίδειξης της ηλεκτρικής πρόωσης από το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ. Μπορεί να έχει αρκετά υψηλή πυκνότητα ισχύος για χρήση στα πολεμικά πλοία, αλλά ίσως όχι για τα υποβρύχια. Η απλή κατασκευή του ασύγχρονου κινητήρα όχι μόνο συμβάλει στην εγγενή αξιοπιστία του, αλλά επιτρέπει επίσης απλό σχεδιασμό κατάλληλο ως προς τις απαιτήσεις αντοχής σε κραδασμούς. Έχει χαμηλό επίπεδο στερεόφερτου θορύβου, επιτρέποντας απευθείας τοποθέτηση στο σκαρί του πολεμικού σκάφους. Έχει υψηλή πυκνότητα ισχύος, αποδοτικότητα, χαμηλά επίπεδα θορύβου και δονήσεων, υψηλή ικανότητα να αντέχει κραδασμούς και χαμηλό κόστος συντήρησης και το κόστος κύκλου ζωής. Η πρόοδος στην τεχνολογία αυτή κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών τους καθιστά από τους ιδανικότερους υποψηφίους για εφαρμογές πρόωσης πλοίων. [1], [2]

➤ Προηγμένος Επαγωγικός Κινητήρας (Advanced Induction Motor – AIM):

Η Alstom σε συνεργασία με την Converteam σχεδίασαν έναν 20 MW, 180 στροφών ανά λεπτό, προηγμένο πολυφασικό κινητήρα επαγωγής, βάρους 100 τόνων (με στόχο να στα επόμενα μοντέλα να μειωθεί στους 70 τόνους) και σημαντικά μειωμένο όγκο σε σχέση με τους συμβατικούς. Ο γνωστός και ως Advanced Induction Motor (AIM) είναι ένας 15-φασικός κινητήρας με υψηλή πυκνότητα ροπής και ανθεκτικότητα στους κραδασμούς. [1]

Η υψηλής ισχύος AIM σε συνδυασμό με ειδικά σχεδιασμένο σύστημα μεταβλητών στροφών, με διαμόρφωση εύρους παλμού (Pulse Width Modulation – PWM), μπορεί να αποτελέσει ένα συμπαγές και αποτελεσματικό σύστημα πρόωσης. Ο βέλτιστα σχεδιασμένος AIM, με το δικό του σύστημα οδήγησης, επιτρέπει ευελιξία και βελτιστοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού σχεδιασμού. Αυτό με τη σειρά του επιτρέπει τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και του συντελεστή ισχύος, ενώ δίνει τη δυνατότητα για μεγαλύτερο διάκενο και επομένως περισσότερη αντοχή στους κραδασμούς. Η πρόοδος των διπολικών τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBTs) συνέβαλαν στο σχεδιασμό πιο αποτελεσματικών PWM-μετατροπέων για συνδυασμό με κινητήρες επαγωγής. Ο AIM έχει τη δυνατότητα επίσης να σχεδιαστεί ώστε να είναι ένας κινητήρας υψηλής τάσης 12 ή 15 φάσεων, που συνδέεται άμεσα με το μετατροπέα χωρίς τη χρήση μετασχηματιστή, ένα σημαντικό πλεονέκτημα για τη μείωση του βάρους, του όγκου και του κόστους και παράλληλα πολύ ευνοϊκό για χρήση σε πλοία με DC. [1]

Ο AIM κατασκευάστηκε κυρίως για εφαρμογές όπου απαιτούνται χαμηλές ταχύτητες με υψηλή ροπή, όπως σε μονάδες πρόωσης των πλοίων, και έχει μια πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος που το καθιστά ιδανικό για πολεμικά πλοία. Τα αντιτορπικά Τύπου 45, κλάσης Daring του Βρετανικού Βασιλικού Ναυτικού προωθούνται από δύο AIM των 20MW της Converteam. Επίσης, τα αεροπλανοφόρα του Βασιλικού Ναυτικού κατηγορίας Queen Elizabeth, που τέθηκε σε υπηρεσία το 2014, και Prince of Wales, που πρόκειται να τεθεί σε υπηρεσία το 2016, θα τροφοδοτούνται από τέσσερις AIM 20MW (σχήμα 16). Στα αντιτορπικά DDG1000, κατηγορίας Zumwalt, του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ έχουν εγκατασταθεί δύο 34,6MW (120 rpm) AIM. Όσον αφορά την τελευταία περίπτωση, αρχικά, ένας πιο προηγμένος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη είχε προβλεφθεί, αλλά το υψηλό ρίσκο της τεχνολογίας αυτής οδήγησαν τους ανθρώπους του US Navy στην επιλογή του AIM. Αυτόν τον κινητήρα χρησιμοποιούν επίσης και μερικά αεροπλανοφόρα του Πολεμικού Ναυτικού της Γαλλίας. Η τεχνολογία AIM μπορεί να θεωρηθεί πλέον ότι είναι πιο ώριμη και δοκιμασμένη από κάθε άλλη τεχνολογία κινητήρα πρόωσης. Στο πλήρες φορτίο η απόδοση του κινητήρα

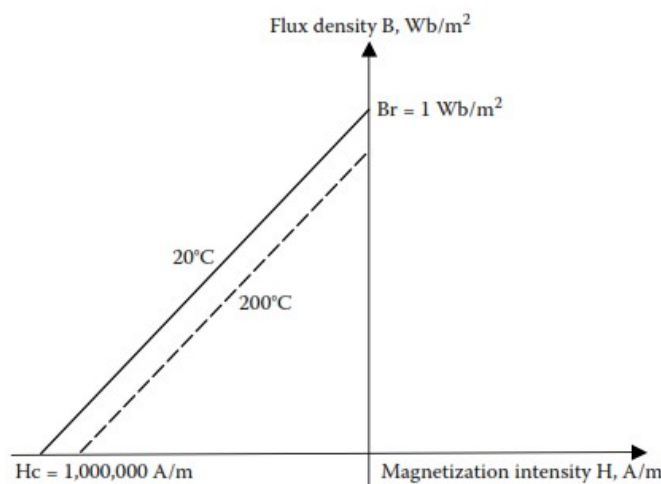
αυτού είναι περίπου 97%. Το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ σχεδιάζει να κατασκευάσει τουλάχιστον τρία DDG1000s εκ των οποίων τα δύο θα έχουν σίγουρα AIMs. Η παράδοση του πρώτου πλοίου έγινε τον Απρίλιο του 2014, και οι βλέψεις για την πρώτη επιχειρησιακή του συμβολή αναμένεται εντός του 2015 [17]. [2]



Σχήμα 16: Ο ένας από τους τέσσερις επαγωγικούς κινητήρες AIM των 20MW που έχουν τα αεροπλανοφόρα της κατηγορίας Queen Elizabeth του βρετανικού Βασιλικού Ναυτικού. [18]

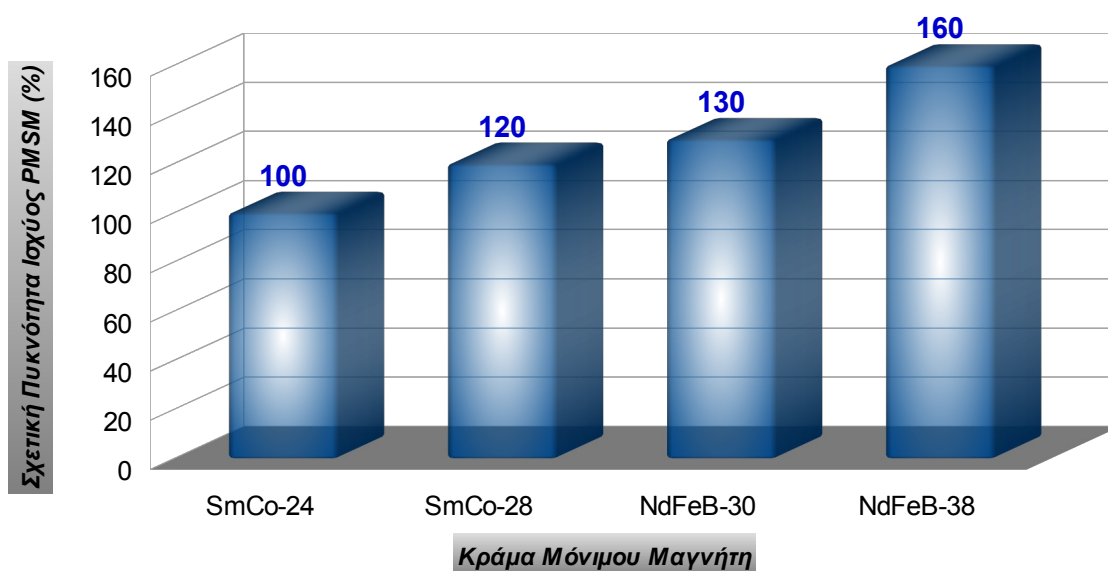
5.2.3 Σύγχρονος Κινητήρας Εναλλασσόμενου Ρεύματος με Μόνιμο Μαγνήτη (AC Permanent Magnet Synchronous Motor – PMSM).

Ο επόμενος τύπος κινητήρα που θα αναλύσουμε χρησιμοποιεί μόνιμους μαγνήτες, στον ρότορα ως επί το πλείστον, που είναι κατασκευασμένοι από κράματα σαμάρου-κοβάλτιου (SmCo) ή νεοδύμιου-σιδήρου-βόριου (NdFeB) και γενικά παράγουν υψηλής ενέργειας μόνιμους μαγνήτες. Αυτά τα κράματα εμφανίζουν γραμμικό απομαγνητισμό κατά το δεύτερο τεταρτημόριο του B-H βρόχου υστέρησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 16. Έχουν απομένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής B_r περίπου ίση με 1 Wb/m^2 και υψηλή ένταση μαγνητικού πεδίου H_c περίπου 1000 kA/m . Επομένως, η μαγνητική ενεργειακή πυκνότητα $(\frac{1}{2} B_r \times H_c)$ θα είναι ιδιαίτερα υψηλή. Η μαγνητική διαπερατότητα του κράματος είναι η ίδια με του αέρα. Δεδομένου ότι ο μόνιμος μαγνήτης παράγει μια σταθερή ροή, μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα πηνίο διεγερμένο με σταθερή πηγή ρεύματος. Ως εκ τούτου, για την ανάλυση της απόδοσης του κινητήρα, οι μαγνήτες αντιμετωπίζονται ως μια σταθερή πηγή ρεύματος στην επιφάνειά του με πυκνότητα ίση προς 1000 kA/m , η οποία αλληλεπιδρά με το ρεύμα του στάτη για να παραχθεί η ροπή. Η ισχύς και η ροπή που έχουν την ικανότητα να παράγουν οι κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη είναι ανάλογες με την παραγόμενη ενέργεια, η οποία είναι η περιοχή μεταξύ της γραμμής απομαγνητισμού και του x και y άξονα, δηλαδή $(\frac{1}{2} B_r \times H_c)$ στο σχήμα 17. Ο μαγνήτης με τη μεγαλύτερη παραγόμενη ενέργεια παράγει μεγαλύτερη ροπή. Η απουσία του τυλίγματος στο ρότορα κάνει διαθέσιμο περισσότερο χώρο για να τοποθετηθούν περισσότεροι μαγνήτες υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, με αποτέλεσμα την υψηλή μαγνητική ροή στο διάκενο, η οποία προσθέτει επίσης στην πυκνότητα ροπής. Για αυτούς τους λόγους, ο κινητήρας μόνιμου μαγνήτη έχει υψηλότερη πυκνότητα ροπής, και επομένως, υψηλότερη πυκνότητα ισχύος. Επίσης έχει υψηλή απόδοση, δεδομένου ότι δεν υπάρχει τυλιγμένο πηνίο στον ρότορα και έτσι οι απώλειες χαλκού είναι μηδενικές. [1]



Σχήμα 17: Η γραμμή απομαγνήτισης στο 2^ο τεταρτημόριο του βρόχου υστέρησης (B-H) [1].

Η πυκνότητα ισχύος του PMSM για τα διάφορα κράματα συγκρίνεται στο σχήμα 18. Τα κράματα νεοδύμιου-σιδήρου-βόριου έχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, ενώ αυτά με σαμάριο-κοβάλτιο έχουν καλύτερες θερμικά χαρακτηριστικά. Η ενέργεια και των δύο είναι εξαρτημένη από τη θερμοκρασία λειτουργίας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 16, αυτή μειώνεται από τους 20 °C στους 200 °C, ενώ αποδομείται γρηγορότερα σε υψηλότερη θερμοκρασία και φτάνει να μηδενίζεται στη χαρακτηριστική θερμοκρασία Curie του κράματος. Οι έντονοι μηχανικοί κραδασμοί είναι επίσης γνωστό ότι μειώνουν τα επίπεδα ενέργειας. [1]



Σχήμα 18: Η σχετική πυκνότητα ισχύος των PMSM για τα πιο διαδεδομένα κράματα μόνιμου μαγνήτη. [1].

Ο μόνιμος μαγνήτης NdFeB έχει χαμηλό κόστος με υψηλή αντοχή και είναι σε θέση να λειτουργήσει μέχρι και στους 150 °C, ενώ οι υψηλής θερμοκρασίας μόνιμοι μαγνήτες SmCo μας δίνουν τη δυνατότητα λειτουργίας έως τους 290 °C. Τα όρια αυτά λειτουργίας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό ενός συστήματος. Για παράδειγμα, σε μια γεννήτρια

μόνιμου μαγνήτη που είναι συνδεδεμένη άμεσα με ένα στροφείο τουρμπίνας αερίου υψηλής ταχύτητας που λειτουργεί στους 900 °C είναι απαραίτητη η χρήση υψηλής θερμοκρασίας μαγνητικό υλικό.

Ένας σημαντικός εγγενής κίνδυνος κατά τη λειτουργία ενός κινητήρα μόνιμου μαγνήτη υποβόσκει στην περίπτωση ενός σφάλματος όπως το βραχυκύκλωμα στα καλώδια μεταξύ του μετατροπέα και του κινητήρα, ένα σφάλμα που μπορεί να συμβεί σε οποιοδήποτε ηλεκτρικό σύστημα, καθώς, σε αντίθεση με άλλους τύπους μηχανών, δεν είναι δυνατή η απενεργοποίηση του μαγνητικού πεδίου του ρότορα. Στην περίπτωση λοιπόν που συμβεί ένα τέτοιο σφάλμα, ο κίνδυνος που υπάρχει είναι ότι, λόγω αδράνειας, ο άξονας θα συνεχίσει να περιστρέφεται και ο κινητήρας με την αντίθετη ΗΕΔ (back EMF) που αναπτύσσεται θα αρχίσει να λειτουργεί ως γεννήτρια, ιδίως εάν το πλοίο κινείται μέσα στο νερό σε υψηλή ταχύτητα όπου η έλικα μετατρέπεται για κάποιο χρονικό διάστημα ουσιαστικά σε υδροστρόβιλο. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται θα τροφοδοτείται από τη μηχανή, που τώρα εργάζεται ως γεννήτρια, πίσω στο σφάλμα με αποτέλεσμα την επιδείνωση των συνεπειών που προκλήθηκαν. Η back EMF διαρκεί όσο ο ρότορας περιστρέφεται και δεν είναι δυνατό να αποσβεστεί γρήγορα. Ωστόσο, στους σύγχρονους κινητήρες, και πολύ περισσότερο σε αυτούς με υπεραγωγή στοιχεία, η διακοπή του μεγάλου συνεχούς ρεύματος διέγερσης δεν είναι εύκολη, λόγω της μεγάλης αυτεπαγωγής του πηνίου πεδίου. Στο μοτέρ μόνιμου μαγνήτη η back EMF πρέπει να ρυθμίζεται από ένα κατάλληλο κύκλωμα ελέγχου. Αυτή μπορεί να εκτραπεί σε μια ψευδο-αντίσταση, όπως στην περίπτωση δυναμικής πέδησης που εφαρμόζεται σε άλλους κινητήρες, στην οποία τα σφάλματα διαχειρίζονται μέσω του σχεδιασμού του κινητήρα και του συστήματος ελέγχου.

Η υψηλή πυκνότητα ισχύος και η καλή ακουστική απόδοση του PMSM τον καθιστούν κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα πλοίων. Οι σχεδιασμοί με επιφανειακούς και εμφυτευμένους μαγνήτες παρέχουν υψηλή ανθεκτικότητα και απόδοση για όλες τις ταχύτητες και τα φορτία. Ο κινητήρας αυτός έχει περίπου 30% λιγότερο βάρος από τον σύγχρονο τυλιγμένου δρομέα και σε συνδυασμό με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας, προσφέρει ευελιξία στην επιλογή του αριθμού των πόλων. Η αύξηση των πόλων έχει ως συνέπεια τη μείωση του όγκου και του βάρους, καθώς μειώνεται ο σίδηρος που απαιτείται στο ζύγωμα (yoke), και σημαντική ελάττωση των δονήσεων. Οι μηδενικές απώλειες χαλκού στο ρότορα οδηγούν στην υψηλή απόδοση και τη χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας. Το κόστος παραγωγής των μόνιμα μαγνητισμένων υλικών μειώνεται, με νέους μαγνήτες, υψηλής μαγνητικής δύναμης, που αντέχουν σε όλο και υψηλότερες θερμοκρασίες να βγαίνουν συνεχώς στην αγορά. Το κόστος πλέον είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με το τυλιγμένο με το χέρι πηνίο για την ίδια ένταση του μαγνητικού πεδίου. Χωρίς τυλίγματα στο δρομέα και με τη δυνατότητα για μεγαλύτερο διάκενο, οι PMSMs, είναι πιο αξιόπιστοι, περισσότερο ανθεκτικοί στους εξωτερικούς κραδασμούς, πιο εύκολα συντηρήσιμοι με λιγότερα έξοδα και λιγότερο επιρρεπείς σε κατασκευαστικές αστοχίες. Επιπλέον, μπορούν να παράγουν τη μέγιστη ροπή σε ουσιαστικά μηδενική ταχύτητα, κάτι που ο επαγωγικός κινητήρας δεν μπορεί να κάνει αποτελεσματικά, ενώ έχουν και πολύ υψηλή απόδοση στο μερικό φορτίο. [1], [2]

Αν και τεχνολογικά λιγότερο ώριμος από τους δύο προηγούμενους τύπους ηλεκτρικών κινητήρων που παρουσιάσαμε, ένας μόνιμου μαγνήτη μπορεί να κατασκευαστεί για χρήση στο ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης για πλοία επιφανείας του πολεμικού ναυτικού και υποβρύχια ώστε να είναι πιο αθόρυβο και να έχει μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος. Γι' αυτόν το λόγο, το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ έχει δοκιμάσει PMSMs σε κλίμακα 1:4 (6000 hp) για πιθανή χρήση στα υποβρύχια κατηγορίας Virginia και άλλα μελλοντικά υποβρύχια. Η DRS Technologies είναι μια από τις εταιρίες που ηγούνται στο σχεδιασμό υψηλής πυκνότητας ροπής PM κινητήρων για πρόωση πλοίων. Η εργοστασιακή δοκιμή ενός από τους μεγαλύτερους PMSMs του κόσμου (36,5 MW, 127 rpm) ολοκληρώθηκε θετικά το Δεκέμβριο του 2005. Οι δοκιμές του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ στον χώρο χερσαίων δοκιμών (Land Based Test Site – LBTS) στη Φιλαδέλφεια ολοκληρώθηκε την άνοιξη του 2008, για

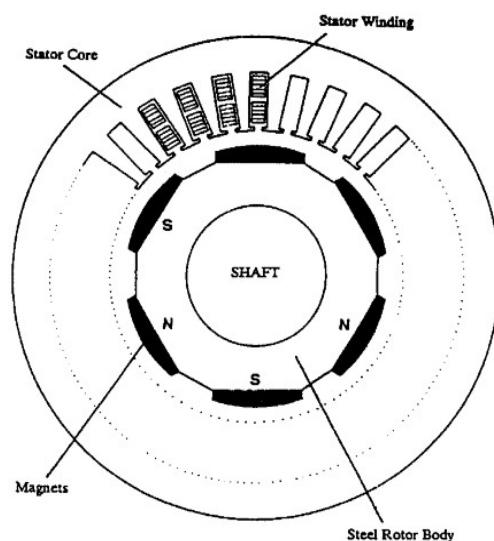
μελλοντική χρήση σε πολεμικά πλοία όπως το DDG1000. Η απόδοση σε πλήρες φορτίο του κινητήρα αυτού είναι περίπου 97,5%. Οι κινητήρες αυτοί μπορεί σύντομα να είναι διαθέσιμοι σε τάξεις ισχύος κατάλληλες για τη δημιουργία, όπως είναι άλλωστε και ο στόχος, ενός κοινού ηλεκτρικού συστήματος πρόωσης μεταξύ των πλοίων και των υποβρυχίων του. Η χρηματοδότηση του PM κινητήρα από το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ, ακόμη και στην μικρή αυτή κλίμακα, λαμβάνεται από ορισμένους στην αγορά, ως η απόδειξη ότι υπάρχει εμπιστοσύνη στην τεχνολογία κινητήρα μόνιμου μαγνήτη. Ωστόσο, οι τεχνικοί κίνδυνοι παραμένουν για την αλλαγή της τάξης μεγέθους έως αυτό που απαιτείται για ονομαστική ισχύ σε τοπολογίες όπως των αντιτορπιλικών DD-21. [1], [2]

Ο σχεδιασμός μηχανών μόνιμου μαγνήτη με την παραδοσιακή τοπολογία ακτινικής ροής ανταγωνίζεται με τον AIM, που προαναφέραμε, από την Alstom/Converteam Incorporated. Ωστόσο, η μακροπρόθεσμη σταθερότητα των υλικών μόνιμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται στους μεγάλους κινητήρες δεν έχει αποδειχθεί ακόμα επαρκώς και αυτό είναι κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει σε ζητήματα αξιοπιστίας και συντήρησης κατά τη διάρκεια ζωής του κινητήρα.

Οι μηχανές μόνιμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται ή ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρικά πλοία συνεχούς ρεύματος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη διεύθυνση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό τους, τις οποίες θα παρουσιάσουμε συνοπτικά στη συνέχεια.

➤ *Κινητήρας ακτινικής ροής (radial flux motor).*

Στην πρώτη κατηγορία έχουμε τις μηχανές ακτινικής ροής (radial flux motors), οι οποίες είναι πλέον μελετημένες και χρησιμοποιημένες ηλεκτρικές μηχανές μόνιμου μαγνήτη. Στη θέση των τυλιγμάτων του δρομέα έχουμε μόνιμους μαγνήτες τοποθετημένους έτσι ώστε η ωφέλιμη μαγνητική ροή να είναι κατά την ακτινική διεύθυνση, δηλαδή όπως στις συνήθεις συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές (σχήμα 19). Τα χαρακτηριστικά τους δεν διαφέρουν πολύ από τις κλασικές σύγχρονες μηχανές και είναι αυτά που έχουμε ήδη αναφέρει παραπάνω. Οι Siemens και η ABB είναι δύο από τις εταιρίες που έχουν κατασκευάσει τέτοιου είδους κινητήρες [21] και είτε τις έχουν προσαρμόσει στα αζιμουθιακά συστήματα pod τους είτε τις χρησιμοποιούν ως αξονικές μηχανές.



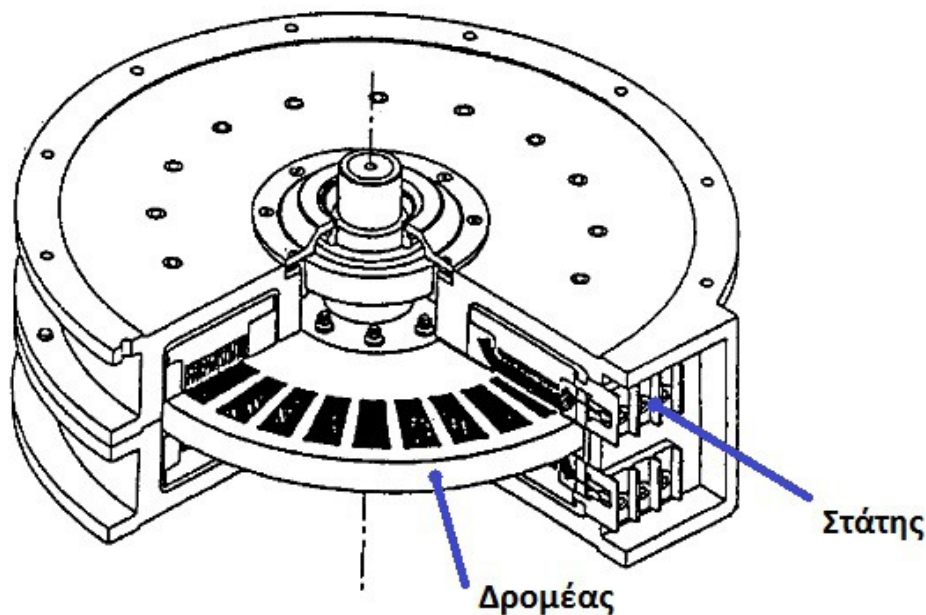
Σχήμα 19: Σχηματική αναπαράσταση εγκάρσιας τομής 6-πολικής μηχανής μόνιμου μαγνήτη με ακτινική ροή [19].

➤ *Κινητήρας αξονικής ροής (axial flux motor).*

Στη δεύτερη περίπτωση έχουμε τις μηχανές αξονικής ροής (axial flux motors), όπου έχουν μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα, προσανατολισμένους κατά τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να έχει διεύθυνση παράλληλη προς τον περιστρεφόμενο άξονα (σχήμα 20). Οι κινητήρες αξονικής ροής χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλη πυκνότητα ισχύος επιτάχυνση [23]. Το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ είχε επιλέξει αρχικά κινητήρες αξονικής ροής με ισχύ 19MW και 32 φάσεις για τα DD(x) αντιτορπιλικά τους από την Kaman Aerospace Corporation [23], οι οποίοι στη συνέχεια απορρίφθηκαν, κυρίως λόγω καθυστερήσεων στην κατασκευή και παράδοση [22], με αποτέλεσμα να επιλεγούν τελικά οι AIM της Converteam. Το υπολογιζόμενο βάρος του καθενός θα ήταν γύρω στους 50 τόνους σε αντίθεση με τον αντίστοιχης ισχύος σύγχρονο κινητήρα με έκτυπους πόλους στο ρότορα που φτάνει τους 229 τόνους [23]. Ήδη, από το 1996, το Γαλλικό Πολεμικό Ναυτικό ανέθεσε στην Jeumont Industrie την κατασκευή ενός τέτοιου είδους κινητήρα για τα πλοία του, που θα αποτελείται από 4 διαδοχικούς “δίσκους”, δηλαδή τέσσερις μονάδες όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 20 και θα έχει ισχύ 20MW με στροφές λειτουργίας τις 180rpm. Η σύγκριση σε βάρος και διαστάσεις του κινητήρα αυτού με μια συμβατική σύγχρονη μηχανή, σύμφωνα στοιχεία από τη Jeumont, φαίνεται στον πίνακα 2. Όπως είναι σαφές από τα στοιχεία του πίνακα 2, με τον axial flux κινητήρα επιτυγχάνουμε μεγάλη εξοικονόμηση χώρου και βάρους.

	Συνολικό Βάρος	Εξωτερική Διάμετρος	Συνολικό Μήκος
Κινητήρας αξονικής ροής	65 τόνοι	2.7 m	3.0 m
Συμβατικός σύγχρονος κινητήρας	120 τόνοι	5.6 m	3.6 m

Πίνακας 2: Σύγκριση της μηχανής μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής της Jeumont Industrie με συμβατική σύγχρονη μηχανή ως προς το βάρος και τις βασικές διαστάσεις. [20].

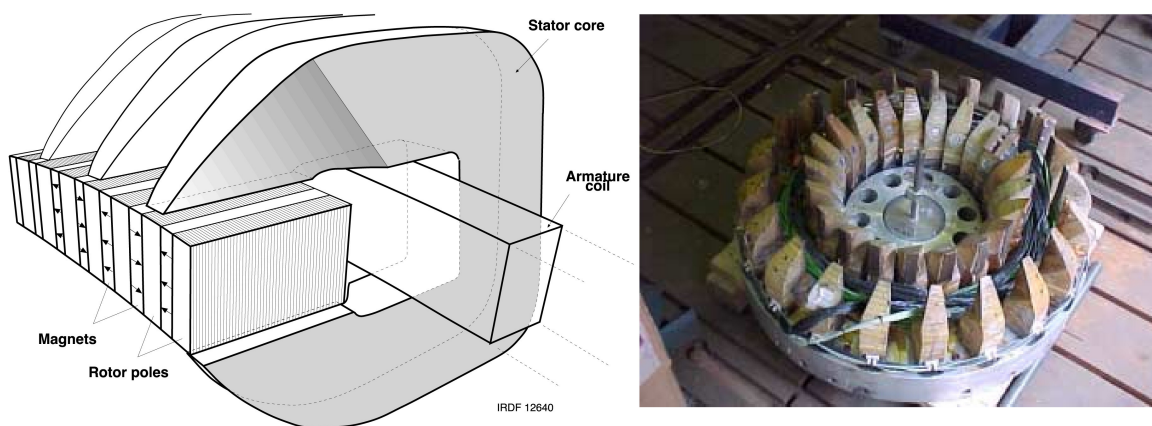


Σχήμα 20: Σχηματική απεικόνιση μηχανής μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής (axial flux PM motor), γνωστή και ως disk machine, με έναν ρότορα και δύο στάτες [19].

➤ *Κινητήρας εγκάρσιας ροής (transverse flux motor - TFM)*

Στην τρίτη κατηγορία βρίσκουμε τις μηχανές εγκάρσιας ροής (transverse flux motors – TFM) στις οποίες οι μόνιμοι μαγνήτες στο δρομέα είναι προσανατολισμένοι κατά τέτοιο τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει μέσα στο διάκενο σε διεύθυνση εν μέρει κατά την αξονική διεύθυνση και κυρίως εγκάρσια προς τον άξονα της μηχανής (σχήμα 21). Ουσιαστικά οι TFM για να αυξήσουν την παραγόμενη ροπή εκμεταλλεύονται την πλήρη διαδρομή της μαγνητικής ροής στο τρισδιάστατο επίπεδο, χωρίς να χρειάζεται να βρεθεί η “χρυσή τομή” μεταξύ του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, καθώς αυτά δεν ανταγωνίζονται μεταξύ τους για τον ίδιο χώρο όπως συμβαίνει στους κινητήρες αξονικής και, πολύ περισσότερο, στους ακτινικής ροής [24].

Η τοπολογία που παρουσιάζεται στο σχήμα 21 ήταν αυτή που επιλέχθηκε το 1997 από το Βασιλικό Πολεμικό Ναυτικό της Μ. Βρετανίας ως η βέλτιστη και επικρατέστερη για χρήση στα αντιτορπιλικά Τύπου 45. Μετά όμως από εκτενείς και ενδεδειγμένες δοκιμές σε πειραματικό TFM 2.5MW (ο στάτης του οποίου φαίνεται στο σχήμα 21 δεξιά) βγήκαν στην επιφάνεια διάφορα προβλήματα. Μερικά από αυτά οφείλονταν στα μη επαρκή ηλεκτρονικά ισχύος της εποχής, εμφανίστηκαν όμως και άλλα που ήταν εγγενή προβλήματα του σχεδιασμού αυτού. Τέτοια ήταν ο κίνδυνος επαφής του ρότορα με το στάτη σε περίπτωση έντονων κραδασμών [20] και η αποκόλληση των δυναμοελασμάτων των πυρήνων στους πόλους σχήματος C στις άκρες τους κατά τη δοκιμή κενού φορτίου [21]. Το σημαντικότερο όμως ζήτημα λόγω σχεδιασμού ήταν ο πολύ χαμηλός συντελεστής ισχύος. Αυτός ήταν περίπου 0,6 για πίεση συνάφειας (shear stress) διακένου 100kN/m^2 και για μεγιστοποιημένη πυκνότητα ροπής με πίεση συνάφειας διακένου 120kN/m^2 θα μπορούσε να φτάσει μέχρι τα 0,4 μόλις, πράγμα που σημαίνει ότι θα χρειαζόταν ηλεκτρονικούς μετατροπείς των 50MVA για έναν TFM των 20MW [20]. Ένα σύστημα με μηχανή εγκάρσιας ροής με ΣΙ περίπου 0,7, τιμή κοντά σε αυτούς των συμβατικών σύγχρονων μηχανών, δεν θα είχε μικρότερο όγκο από ένα σύστημα με προηγμένους επαγωγικούς κινητήρες (AIM) [27] και επομένως δεν θα συνέφερε. Για τους παραπάνω λόγους θεωρήθηκε ότι αυτή η τεχνολογία δεν ήταν έτοιμη εκείνη την εποχή για εφαρμογή και έτσι προτιμήθηκαν οι AIM.



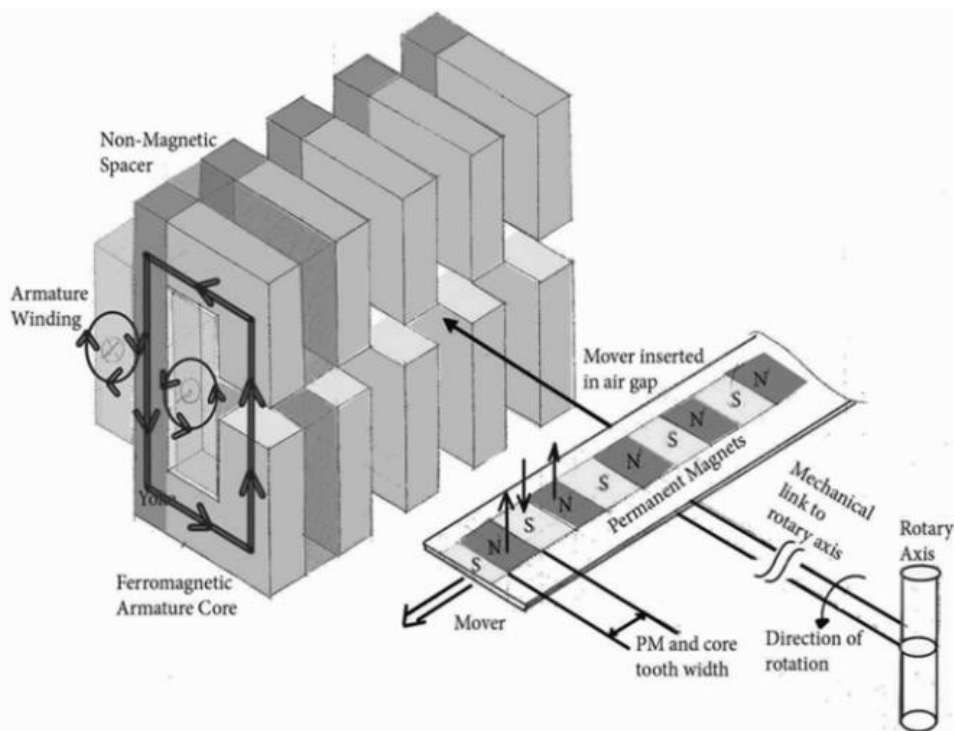
Σχήμα 21: Τα βασικά στοιχεία του TFM με στάτη σχήματος C που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί από το Βασιλικό Πολεμικό Ναυτικό της Μ. Βρετανίας (αριστερά) και ο στάτης κατά τη δοκιμή κενού φορτίου (δεξιά) [21].

Την ίδια περίοδο απασχόλησαν τους ανθρώπους του Υπουργείου Αμύνης της Μ. Βρετανίας και οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη ακτινικής ροής των Siemens και ABB. Από τα στοιχεία του πίνακα 3 παρακάτω, είναι εμφανής ο σημαντικά μικρότερος όγκος του κινητήρα εγκάρσιας ροής, ακόμα και του αναθεωρημένου, σε σχέση με τους ακτινικής μαγνητικής ροής.

	TFM (αρχικός)	TFM (αναθεωρ.)	Ακτινικής Ροής ABB	Ακτινικής Ροής Siemens
Συνολ. Διάμετρος	2.6m	2.75m	2.8m	2.8m
Συνολ. Μήκος	2.6m	2.85m	4.4m	4.7m
Συνολ. Βάρος	39 τόνοι	58 τόνοι	70 τόνοι	85 τόνοι
Συχνότητα	195Hz	195Hz	300Hz	36Hz
Αριθμός Πόλων	130	130	200	24
Αριθμός Φάσεων	8	8	12	12
Συντελεστής Ισχύος	0.4	0.6	0.75	0.94
% Αύξηση Όγκου	0.0%	+22.63%	+96.27%	+109.65%

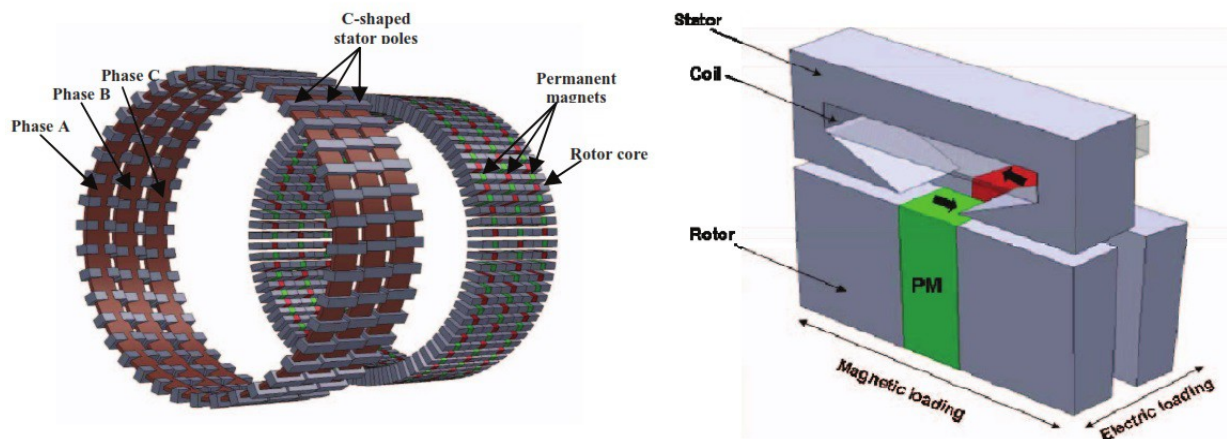
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά σχεδιασμού του αρχικού και αναθεωρημένου κινητήρα εγκάρσιας ροής (TFM) και δύο ακτινικής μαγνητικής ροής κινητήρων μόνιμου μαγνήτη. [21]

Κοινό χαρακτηριστικό μεταξύ των διαφόρων TFM είναι ότι το τύλιγμα πεδίου του στάτη έχει σχήμα δακτυλίου με κέντρο ίδιο με τον περιστρεφόμενο άξονα, το οποίο περιβάλλεται από διαδοχικές δομές από δυναμοελάσματα σε σχήμα C. Λεπτομέρεια του στάτη και του ρότορα μιας θεωρητικής μηχανής εγκάρσιας ροής φαίνεται στο σχήμα 22. Στο σχήμα αυτό φαίνεται καθαρά η μαγνητική ροή που δημιουργείται, σε αυτή την περίπτωση, από τα δύο τυλίγματα διέγερσης στις δομές C του στάτη και οι πόλοι του μόνιμου μαγνήτη του ρότορα.



Σχήμα 22: Τμήμα του στάτη και του ρότορα μιας υποθετικής μηχανής εγκάρσιας ροής (TFM). [24]

Μία σχετικά διαφοροποιημένη τοπολογία για κινητήρα πλοίου παρουσιάζεται στο σχήμα 23, στο οποίο διακρίνονται οι τρεις φάσεις. Η κάθε φάση αποτελείται από ένα σετ στάτη και ρότορα και οι τρεις τους είναι μηχανικά συζευγμένες μεταξύ τους. Δηλαδή κάθε φάση είναι μία ξεχωριστή, σχεδόν ανεξάρτητη, δομή από την άλλη. Το σχήμα 23 πρόκειται για την τρισδιάστατη απεικόνιση του στάτορα και του ρότορα της TFM που ανήκει στο ισχύος 3MW σύστημα οδήγησης έλικας πλοίου που προτείνεται στο [25].



Σχήμα 23: Οι τρεις φάσεις ενός εναλλακτικού σχεδιασμού μηχανής εγκάρσιας ροής (αριστερά) και η χαρακτηριστική δομή σχήματος C των πόλων του στάτη. [26]

Το κοινό γνώρισμα των μηχανών αξονικής και εγκάρσιας ροής είναι το δισκοειδές τους σχήμα που επιτρέπει την κατασκευή κινητήρων μεγάλου αριθμού πόλων και πολλών βαθμίδων για εφαρμογές υψηλής ισχύος και χαμηλών στροφών όπως στην ηλεκτρική πρόωση πλοίων. Αυτή η δομοστοιχειωτή τους φύση αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα ως προς το χρόνο και το κόστος για τη συντήρηση, την αντικατάσταση και τη μετατροπή ήδη εγκατεστημένων μηχανών ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

5.2.4 Σύγχρονος Κινητήρας Εναλλασσόμενου Ρεύματος με Υπεραγωγούς Υψηλής Θερμοκρασίας (AC High Temperature Superconducting Synchronous Motor – HTSSM).

Η πρόοδος στην τεχνολογία υπεραγωγών υψηλής θερμοκρασίας (High Temperature Superconductors – HTS) επιτρέπει την κατασκευή μιας νέας κατηγορίας σύγχρονων περιστρεφόμενων μηχανών που μπορούν να χαρακτηριστούν ως υπερμηχανές. Οι HTS κινητήρες είναι οικονομικότεροι, ελαφρύτεροι, πιο συμπαγείς και πιο αποδοτικοί από ίδιας τάξης ισχύος συμβατικές μηχανές. Οι κινητήρες αυτοί έχουν, επίσης, μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος από τους συμβατικούς σύγχρονους κινητήρες κυρίως λόγω της αυξημένης ικανότητας μεταφοράς ρεύματος στα HTS καλώδια. Όταν αναπτυχθούν πλήρως και χρησιμοποιηθούν εκτενέστερα αυτοί οι κινητήρες θα μειωθεί δραστικά ο σπαταλούμενος ωφέλιμος όγκος των πλοίων που αναλώνεται, αυτή τη στιγμή, από τα συστήματα ηλεκτροπρόωσης. [23]

Οι πρώτες μηχανές με υπεραγωγούς που κατασκευάστηκαν ήταν πριν από 40 και πλέον χρόνια και χρησιμοποιούσαν υπεραγωγούς χαμηλής θερμοκρασίας (Low Temperature Superconductors – LTS). Αυτοί ήταν πολύ δύσχρηστοι για μηχανές μεγάλης κλίμακας καθώς η πολύ χαμηλή κρίσιμη θερμοκρασία τους – η θερμοκρασία κατά την οποία το υλικό αποκτά υπεραγώγιμες ιδιότητες – ($\approx 4^{\circ}\text{K}$ ή -269°C) απαιτούσε ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο και ακριβό σύστημα ψύξης. Όμως, με την ανακάλυψη και χρήση των HTS, μπόρεσαν να σχεδιαστούν κινητήρες με μεγέθη ισχύος κατάλληλα για ηλεκτροπρόωση πλοίων. Οι υπεραγωγοί υψηλής θερμοκρασίας, όπως είναι εμφανές και από την ονομασία τους, σε σχέση με τους LTS έχουν υψηλότερη κρίσιμη θερμοκρασία (στα τελευταία υλικά που έχουν ανακαλυφθεί μπορεί να ξεπερνάει ακόμα και τους 100°K ή 173°C [1]), ενώ η μετάβαση στην υπεραγώγιμη περιοχή λειτουργίας είναι αρκετά ομαλότερη, πράγμα που σημαίνει ότι δεν χάνουν εντελώς τη δυνατότητα να φέρουν πολύ μεγάλες τιμές ρεύματος σε θερμοκρασίες λίγο πιο πάνω από την κρίσιμη. Αυτά τα χαρακτηριστικά κάνουν δυνατή τη χρήση συστημάτων ψύξης πολύ

μικρότερου κόστους και πολυπλοκότητας, ακόμα και απλά ευρέως διαδεδομένα στην αγορά συστήματα.

Τα προτερήματα των κινητήρων με υπεραγώγιμα στοιχεία είναι τα εξής [28]:

Η έως και τρεις φορές υψηλότερη πυκνότητα ροπής σε σχέση με άλλες τεχνολογίες κάνει τους HTSSM μικρότερους και ελαφρύτερους. Τα πλεονεκτήματα αυτά καθιστούν ευκολότερη τη μεταφορά και την εγκατάσταση, ενώ δίνουν ευελιξία στον σχεδιαστή του πλοίου ως προς το σημείο τοποθέτησης.

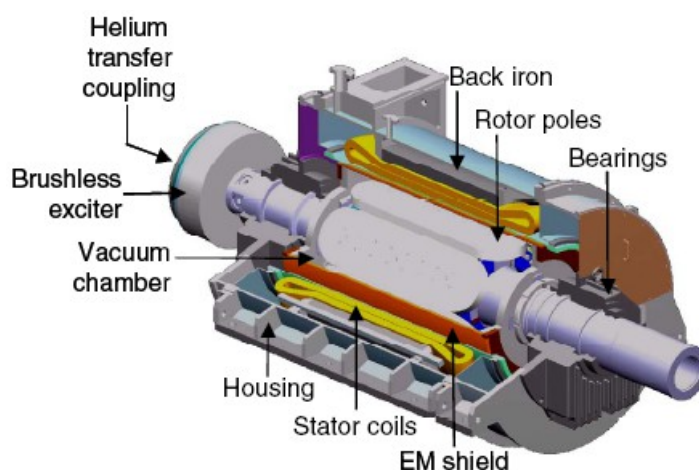
Η απουσία οδοντώσεων στον πυρήνα του στάτη μειώνει το θόρυβο λειτουργίας.

Έχουν υψηλή απόδοση σχεδόν σε όλο το εύρος ταχύτητας περιστροφής, από τις μέγιστες έως πολύ χαμηλές στροφές.

Η διατήρηση της θερμοκρασίας στο τύλιγμα πεδίου τους κάνει ιδανικούς για συνεχείς μεταβολές του φορτίου.

Τη δεδομένη στιγμή έχουν κατασκευαστεί και δοκιμαστεί HTSSM με υπεραγωγούς που είναι βασισμένοι στο βισμούθιο (BSCCO), τους λεγόμενους και 1^{ης} γενιάς (1G) υπεραγωγούς, ενώ από το 2004 έχουν ξεκινήσει να μελετώνται και να κατασκευάζονται τοπολογίες με 2^{ης} γενιάς (2G) υπεραγωγούς, οι οποίοι βασίζονται κυρίως στο ύτριο (YBCO) και είναι φθηνότεροι από τους πρώτους [29].

Η γνωστότερη κατασκευάστρια HTSSM είναι η American Superconductors Corporation (AMSC). Η AMSC κατασκεύασε, σε συνεργασία με την Alstom, ένα δοκιμαστικό κινητήρα 5MW, ο οποίος παραδόθηκε το 2003 στο αμερικανικό πολεμικό ναυτικό, τα κυριότερα στοιχεία του οποίου παρουσιάζονται στο σχήμα 24. Αυτός πέρασε με επιτυχία όλα τα τεστ και σε πολλές περιπτώσεις ξεπέρασε τις προσδοκίες με αποτέλεσμα την παραγγελία μίας μηχανής 36.5MW για χρήση σε πολεμικά πλοία. Ο κινητήρας αυτός, που φαίνεται στο σχήμα 25, κατασκευάστηκε και παραδόθηκε έως το 2007 σε συνεργασία αυτή τη φορά με την Northrop Grumman Corp. και την Electric Machines Company, μέσω χρηματοδότησης από το γραφείο ναυπηγικών μελετών (Office of Naval Research – ONR) του US Navy. Τα τεχνικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των δύο κινητήρων δίδονται στον πίνακα 4.



Σχήμα 24: Γραφική αναπαράσταση των κυριότερων στοιχείων του HTSSM 5MW της AMSC. [31]



Σχήμα 25: Ο HTSSM 36.5MW της AMSC στις εγκαταστάσεις του US Navy.[29]

Χαρακτηριστικό HTSSM	5 MW	36.5 MW
Ισχύς Εξόδου	5000 kW	36500 kW
Ταχύτητα	230 ΣΑΛ	120 ΣΑΛ
Απόδοση Ροπής	63%	97%
Ζεύγη Πόλων	3	8
Τάση	4.16 kV	6 kV
Ρεύμα Οπλισμών	722 A rms (3-φ)	1270 A rms (9-φ)
Αριθμός Φάσεων	3	9
Συντελεστής Ισχύος	1	1
Συχνότητα	11.5 Hz	16 Hz
Βάρος	23 τόνοι	75 τόνοι
Διαστάσεις	2.5 x 1.9 x 1.9 m	3.4 x 4.6 x 4.1 m
Ψύξη Στάτη	Υδρόψυκτος	Υδρόψυκτος
Σύστημα Οδήγησης	Απλό Ηλεκτρονικό Σύστημα του Εμπορίου	Απλό Ηλεκτρονικό Σύστημα του Εμπορίου

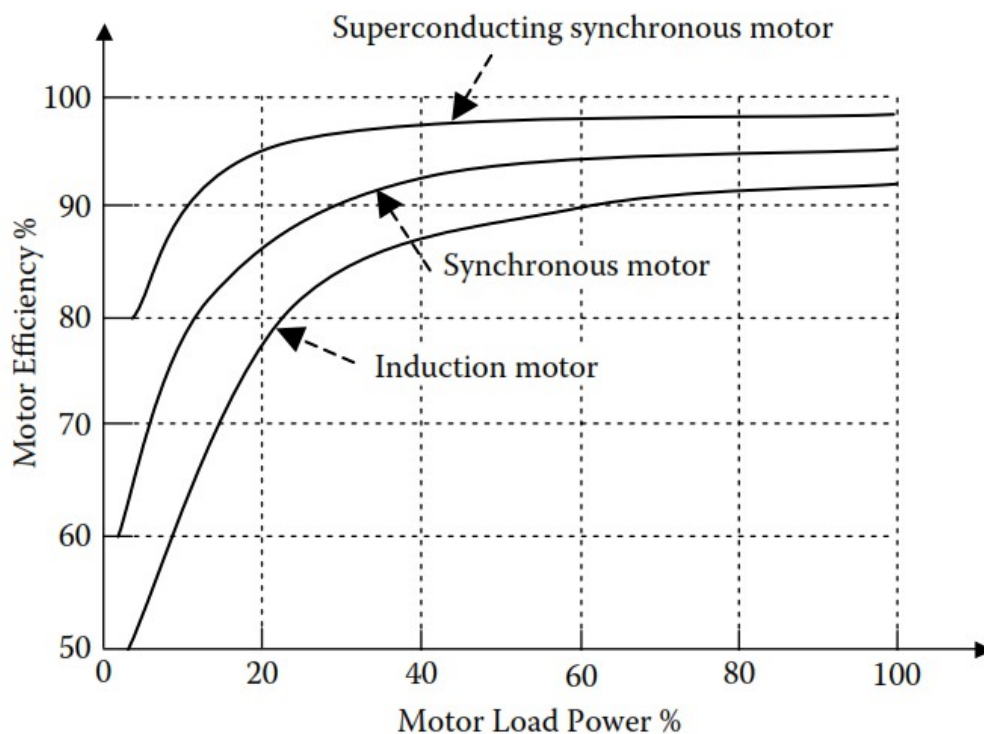
Πίνακας 4: Τεχνικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των σύγχρονων κινητήρων 5MW και 36.5MW με HTS της AMSC. [1]

Στο σχήμα 26 γίνεται η σύγκριση της απόδοσης κινητήρα 20 MW με HTS και των πλέον συμβατικών εναλλακτικών. Είναι εμφανές ότι ο κινητήρας με υπεραγωγούς υπερτερεί σε απόδοση τόσο στο πλήρες όσο, ακόμα περισσότερο, υπό μερικό φορτίο σε σχέση με τους “ανταγωνιστές” του. Αυτό το χαρακτηριστικό του HTSSM κατά το μερικό φορτίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για πλοία που κινούνται συχνά με χαμηλή ταχύτητα, όπως τα περισσότερα πολεμικά και τα κρουαζιερόπλοια. Να σημειώσουμε εδώ ότι η ισχύς πρόωσης σχετίζεται με την ταχύτητα ως εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{prop.} = k (Speed)^{\alpha} \\ P_{prop.} = T_{prop.} \times Speed \end{array} \right\} \rightarrow P_{prop.} = k (Speed)^{\alpha+1}$$

όπου: T_{prop} είναι η ροπή πρόωσης, P_{prop} είναι η ισχύς πρόωσης, k είναι σταθερά και α είναι εκθέτης, όπου $\alpha = 2$ στις χαμηλές ταχύτητες, $\alpha = 3$ στις μεσαίες και $\alpha = 4$ ή παραπάνω στις υψηλές ταχύτητες, στις οποίες υπάρχει έντονος στροβιλισμός του νερού και σπηλαιώση. [1]

Επομένως, όταν ένα πλοίο κινείται με το 50% της μέγιστης ταχύτητας η ισχύς που απαιτείται είναι ίση με το $(\frac{1}{2})^{3+1} = 0.0625$ ή αλλιώς το 6,25% της μέγιστης ονομαστικής ισχύος.



Σχήμα 26: Σύγκριση της απόδοσης σε σχέση με το φορτίο σύγχρονου κινητήρα με υπεραγωγούς υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας 20 MW και συμβατικού σύγχρονου και επαγωγικού κινητήρα ίδιας ισχύος. [1]

Οι δοκιμές του σύγχρονου κινητήρα με υπεραγωγία στοιχεία υψηλής θερμοκρασίας ισχύος 36,5 MW έγιναν στη Φιλαδέλφεια στον χώρο χειρσαίων δοκιμών (Land Based Test Site – LBTS) του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ και ολοκληρώθηκαν πριν το τέλος του 2008. Τα τεστ που πραγματοποιήθηκαν αποτέλεσαν την τελική τεκμηρίωση ότι αυτή η τεχνολογία είναι έτοιμη για την ένταξη σε ένα σύστημα ηλεκτροπρόωσης πολεμικού πλοίου. Όταν ένας HTS κινητήρας πρόωσης αντικαθιστά πιο συμβατικά συστήματα έχουμε ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση μεγέθους, βάρους και κόστους. Οι αρχικός οδηγός σχεδιασμού του προγράμματος του Office of Naval Research (O.N.R.) περιελάμβανε στόχο για χαμηλό βάρος του συστήματος της τάξης των 75 μετρικών τόνων, κάτι που επιτεύχθηκε. Αυτό οδηγεί σε σπουδαία ναυπηγικά πλεονεκτήματα τόσο για υπάρχοντα όσο και για νέα πλοία που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους [30].

Στιγμιότυπο από τη διάρκεια των δοκιμών παρουσιάζεται στο σχήμα 27, στο οποίο φαίνεται ο HTSSM 36.5 MW με τον άξονά του συνδεδεμένο δεξιά με εξομοιωτή φορτίου (water break) ικανό να απορροφήσει μέχρι 47 MW στις 150 ΣΑΛ (3MN-m ροπή). Για την τροφοδοσία του επιλέχθηκαν 3 ηλεκτρονικά συστήματα οδήγησης μεταβλητής ταχύτητας του εμπορίου (Perfect Harmony), κατασκευασμένα από τις Siemens-Robicon, με ικανότητα 2400 VL-L, 1400 A και 600 Hz διακοπτική συχνότητα έκαστο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ιδιαίτερα καλή συμπεριφορά του κινητήρα στα εκάστοτε φορτία, με χαμηλούς κραδασμούς, πολύ χαμηλές αρμονικές (< 1% THD) και ροπή που έφτασε μέχρι τα 2.88 MN-m. Η απόδοση της μηχανής υπολογίστηκε στα 97.3% για τη μέγιστη ισχύ (36.3 MW), ενώ είναι χαρακτηριστικό ότι κατά τις 60 rpm ήταν μεγαλύτερη από 90%.



Σχήμα 27: Ο HTSSM 36.5MW της AMSC κατά τη διάρκεια των δοκιμών στο LBTS της Φιλαδέλφεια το 2007-2008. [32]

5.2.5 Ομοπολικός Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος με Υπεραγώγιμα Στοιχεία (Superconducting DC Homopolar Motor – SDCHM).

Η ομοπολική μηχανή ήταν η πρώτη περιστρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή που αναπτύχθηκε και επιδείχθηκε από τον Michael Faraday το 1831. Το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ έχει ερευνήσει τους ομοπολικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος με υπεραγωγούς (SDCHM) ήδη από το 1960. Η περίπτωση αυτής της μηχανής έχει διερευνηθεί, κυρίως, λόγω της ικανότητάς της να παράγει υψηλή και σταθερή ροπή σε μία ευρεία γκάμα ταχυτήτων. Οι ομοπολικοί κινητήρες είναι ελκυστικοί για πιθανή χρήση ειδικά για τα DC πλοία, σε συστήματα ηλεκτροκίνησης που είναι συνδεδεμένα άμεσα με την προπέλα, όπως τα pod, λόγω του ότι είναι συμπαγείς και έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος. [23]

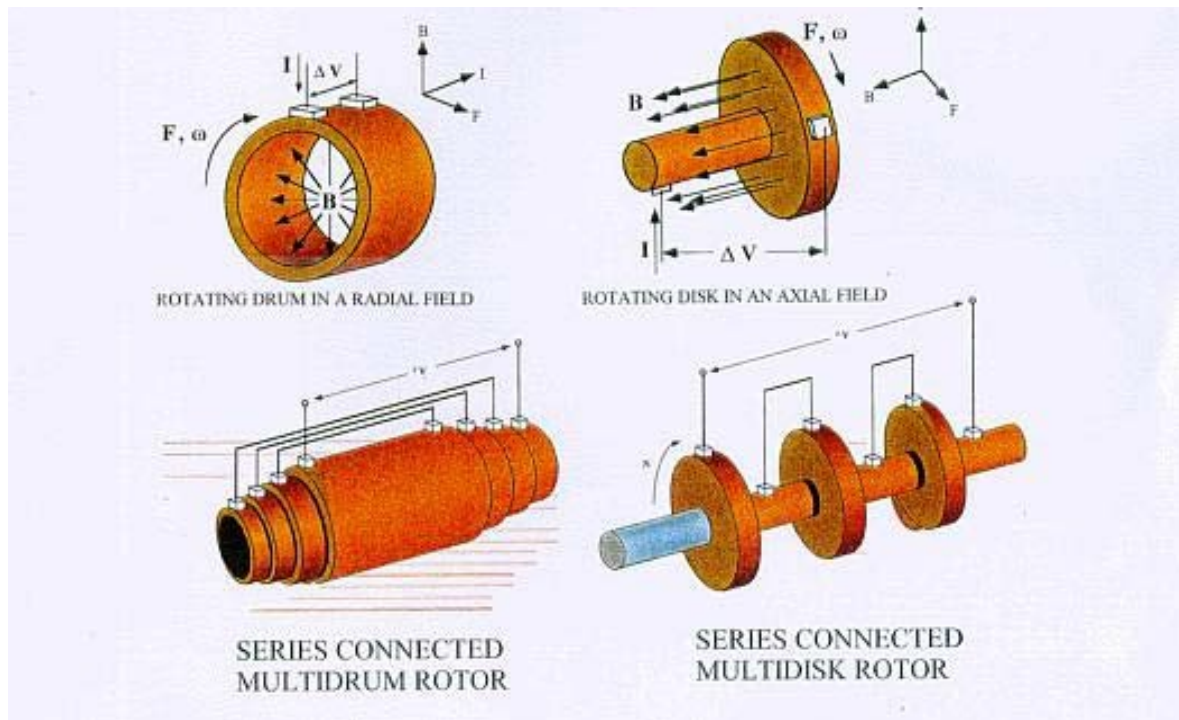
Υπάρχουν δύο τύποι SDCHM, που περιλαμβάνουν τη μηχανή με οπλισμό σε σχήμα τυμπάνου (drum armature machine) και τη μηχανή με οπλισμό σε σχήμα δίσκου (disk armature machine). Οι δύο διαμορφώσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 28, σε μοναδιαία μορφή αλλά και συνδεδεμένες πολλές μαζί στη σειρά.

Η μηχανή με οπλισμό σε σχήμα δίσκου, όπως φαίνεται στο σχήμα 28 δεξιά, αποτελείται από ένα ηλεκτρικά αγώγιμο δίσκο που βρίσκεται σε ένα ενιαίο και σταθερό μαγνητικό πεδίο, με αξονική κατεύθυνση. Το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα που εφαρμόζεται στο δίσκο αλληλεπιδρά με το αξονικό μαγνητικό πεδίο και αναπτύσσει μια μηχανική δύναμη που περιστρέφει το δίσκο. Η αναπτυχθείσα δύναμη βασίζεται στο νόμο της επαγωγής του Faraday:

$$d\vec{F} = I d\vec{L} \times \vec{B},$$

όπου I είναι η ένταση του ρεύματος στον οπλισμό, \vec{B} είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου διαμέσου του οποίου περνάει το ρεύμα και $d\vec{L}$ είναι το μήκος της διαφορικής διαδρομής του ρεύματος. Οι δυνάμεις που ασκούνται στον οπλισμό και στον στάτορα του κινητήρα μπορούν να βρεθούν με ολοκλήρωση του $d\vec{F}$. [23]

Στον ρότορα σχήματος τυμπάνου (κυλινδρικό) που βρίσκεται εντός ενός ακτινικού μαγνητικού πεδίου θα ασκηθεί μια περιστροφική δύναμη όταν το διαρρέυσει ρεύμα αξονικής κατεύθυνσης. Και για τις δύο περιπτώσεις ομοπολικού κινητήρα, η περιστροφική κίνηση του στροφείου δημιουργείται χωρίς την αλλαγή της κατεύθυνσης (πολικότητας) του μαγνητικού πεδίου ή του ρεύματος οπλισμού. Για το λόγο αυτό οι ομοπολικές ονομάζονται πραγματικές μηχανές συνεχούς ρεύματος (true DC machines), καθώς διαρρέονται από συνεχές ρεύμα τόσο εντός τους όσο και εκτός, σε αντίθεση με τις άλλες DC μηχανές που ο ρότορας διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα από τον συλλέκτη [1]. [23]



Σχήμα 28: Οι δύο τύποι SDCHM: η μηχανή με οπλισμό σε σχήμα τυμπάνου (drum armature machine) (αριστερά) και η μηχανή με οπλισμό σε σχήμα δίσκου (disk armature machine) (δεξιά). [23]

Τα βασικότερα οφέλη των ομοπολικών μηχανών είναι τα εξής [23]:

Απλή μηχανή συνεχούς ρεύματος: Αμετάβλητα, στο χώρο και το χρόνο, μαγνητικά πεδία.

Χαμηλά επίπεδα θορύβου: Δεν υπάρχουν αξονικές ταλαντώσεις εξ αιτίας των πόλων.

Εξαιρετικά χαρακτηριστικά ροπής: Μέγιστη ροπή σε μηδενική ταχύτητα, και σταθερή κατά τη μεταβολή της ταχύτητας. Επίσης, ροπή αντίδρασης αναπτύσσεται στους ρευματοφόρους οπλισμούς του στάτη και όχι στο τύλιγμα πεδίου.

Εύκολος έλεγχος: Ο έλεγχος μιας τέτοιας DC μηχανής είναι ξεκάθαρος και πολύ απλός.

Είναι δυνατή η χρήση LTS: Καθώς η πηγή του μαγνητικού πεδίου δεν περιστρέφεται, είναι πολύ πιο απλή η σχεδίαση της πηγής του μαγνητικού πεδίου και του κρυογονικού συστήματος. Έτσι, είναι δυνατόν να κατασκευαστούν πηνία από χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας υπεραγώγιμα στοιχεία, καθώς το κόστος της επιπλέον ψύξης είναι αρκετά μικρότερο από την HTS ταινία-καλώδιο.

Οι ομοπολικές μηχανές έχουν και ένα πολύ σημαντικό εγγενές πρόβλημα: ότι πρόκειται για μηχανές που από κατασκευής τους έχουν χαμηλή τάση και υψηλό ρεύμα και έτσι χρειάζονται ψήκτρες με αντοχή σε πολύ μεγάλες τιμές ρεύματος. Το πρόβλημα αυτό είναι ακόμα πιο έντονο για τις SDCHM, καθώς λόγω υπεραγωγιμότητας οι εντάσεις των ρευμάτων είναι μεγαλύτερες [1]. Από τη φθορά και την καταπόνηση των ψηκτρών προκύπτουν ζητήματα συντήρησης και αξιοπιστίας. Οι εξελίξεις στις τεχνολογίες των υπεραγωγών υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας και των ψηκτρών από ίνες ατόφιου αργύρου ή από υγρό μέταλλο θα μπορούσαν να εξαλείψουν αυτά τα προβλήματα στις επόμενης γενιάς SDCHM [1]. Οι ψήκτρες υγρού μετάλλου μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες τιμές ρεύματος, σε περισσότερες στροφές και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, από τις συμβατικές [23]. Υπό μελέτη είναι και αυτές που είναι κατασκευασμένες από ίνες χαλκού, καθώς ισορροπούν καλά τα χαρακτηριστικά της ικανότητας να φέρουν μεγάλες τιμές ρεύματος και της αντοχής από τη φθορά, για μεγάλη διάρκεια χρόνου [2]. Επίσης, είναι δυνατόν να αυξήσουμε την τάση λειτουργίας, και επομένως να μειώσουμε το επίπεδο του ρεύματος, συνδέοντας πολλές μοναδιαίες μηχανές (ομόκεντρους ρότορες) στη σειρά, όπως φαίνεται και στο σχήμα 28. Αυτό βέβαια θα προκαλούσε τη χρήση ακόμα περισσότερων ψηκτρών, οι οποίες βέβαια θα καταπονούνται λιγότερο. [33]

Ένα σύστημα ηλεκτροπρόωσης με SHDCM, όταν συνδυάζεται με ένα σύστημα διανομής ισχύος σε DC, θα μπορούσε να απλοποιήσει την ενοποιημένη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία, ενώ θα βοηθούσε στη μείωση του αριθμού των συνιστωσών του δικτύου, στη βελτίωση της αποδοτικότητας και στη μείωση του κόστους απόκτησης και λειτουργίας. [2]

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, το αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό επέδειξε την τεχνολογία του ομοπολικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος με υπεραγωγούς με μία μηχανή 400 ίππων (~300 kW) και μια 3000 ίππων (~2237 kW) στο δοκιμαστικό πλοίο “*Jupiter II*”. [1]

Το 1992, το αμερικανικό ινστιτούτο μελέτης ηλεκτρικής ισχύος (Electric Power Research Institute – EPRI) σε συνεργασία με την Reliance Electric Corp. (REC) κατασκεύασαν ένα μικρής κλίμακας (25W) HTS DC κινητήρα. Το τύλιγμα πεδίου στο στάτη αποτελούνταν από δύο BSCCO HTS πηνία τα οποία ήταν μέσα σε δεξαμενή υγρού αζώτου κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. [31]

Το 1995, στο Naval Surface Warfare Center (NSWC) στις ΗΠΑ, κατασκευάστηκε άλλος ένας HTS DC κινητήρας με BSCCO πηνία. Ο κινητήρας αυτός παρείχε 167 ίππους (125 kW) ισχύ εξόδου κατά τη λειτουργία του με ψύξη του υπεραγωγού από υγρό ήλιο στους 4.2°K (-269°C) και 122 hp (91 kW) με ψύξη από υγρό νέον στους 28°K (-245°C). Είχε δηλαδή μια πτώση της απόδοσής του κατά 26%. [31]

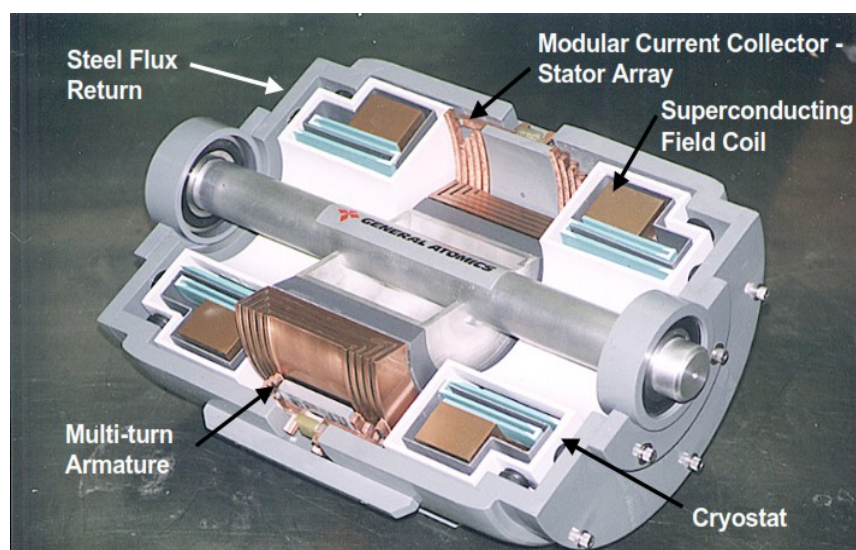
Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, επισυνάφθηκε συνεργασία, μεταξύ του Naval Research Laboratory (NRL), του NSWC και των εταιριών AMSC και Intermagnetics General Corp. (IGC), με σκοπό τον σχεδιασμό HTS κινητήρων για ηλεκτροπρόωση πλοίων. Έως το 1998, είχαν ήδη δοκιμάσει έναν SDCHM με πηνία κατασκευασμένα από ταινίες $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}$ (BSCCO ή Bi-2223), ο οποίος παρείχε τα επίπεδα ισχύος σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ψύξης που φαίνονται στο σχήμα 29. Ο οπλισμός ήταν τύπου τυμπάνου με ψήκτρες υγρού μετάλλου νατρίου καλίου (NaK) [23]. [31]

Το 2002, χρηματοδοτήθηκε μέσω του ONR ένα πρόγραμμα για την κατασκευή ενός SDCHM από την General Atomics (GA) ισχύος 3.7 MW με απώτερο σκοπό τελικά έναν κινητήρα 36,5 MW, ενώ αρχικά υπολόγιζαν σε έναν ισχύος 19 MW με παρόμοια χαρακτηριστικά με τον προηγμένο επαγωγικό κινητήρα (AIM) της Converteam-Alstom. [31]

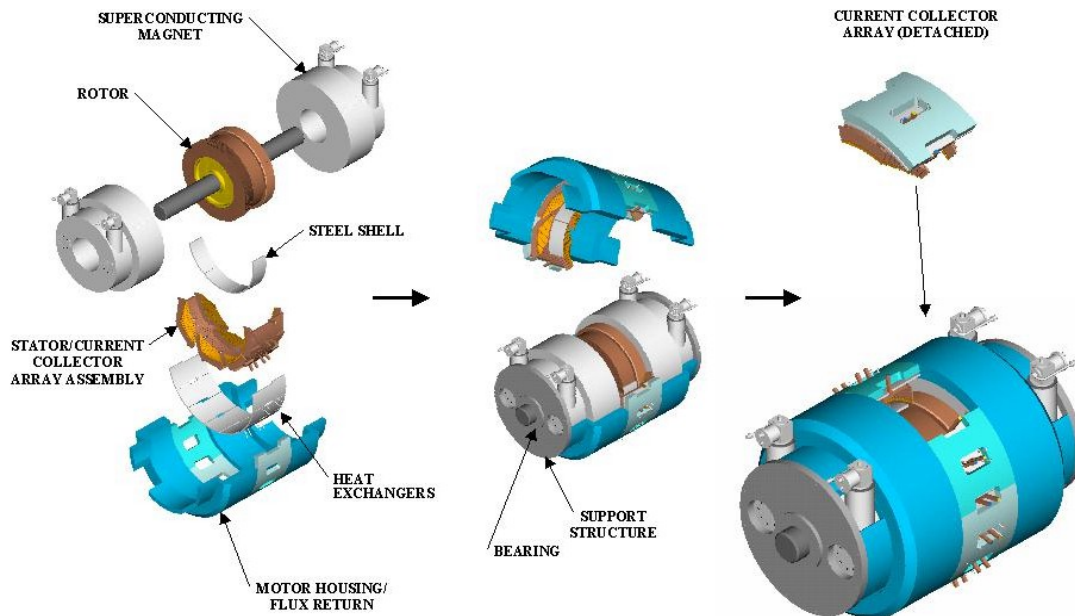


Σχήμα 29: Η ισχύς εξόδου της SDCHM του NSWC με HTS πηνία, που δοκιμάστηκε το 1998 στις ΗΠΑ, σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ψύξης του υπεραγωγού. [31]

➤ *Ο ομοπολικός DC κινητήρας με υπεραγωγούς (SDCHM) της General Atomics (GA):*
 Η General Atomics (GA) θεωρείται πρωτοπόρος στη βιομηχανία ανάπτυξης των SHDCM. Η επιτυχημένη σχεδίαση και δοκιμή κινητήρων ισχύος 3,7 MW (σχήμα 30, 31) και 300 kW οδήγησε στη χρηματοδότηση από το Γραφείο Ναυτικών Ερευνών (ONR) των ΗΠΑ για την ανάπτυξη κινητήρα 36,5 MW. Η GA θα παραδώσει ένα 36,5 MW, 120 rpm προηγμένου σχεδιασμού πρότυπο σύστημα κινητήρα, με το σύστημα οδήγησής του και τον εξοπλισμό υποστήριξης, το οποίο θα αποσταλεί στις εγκαταστάσεις του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ για πλήρη έλεγχο. Η προβλεπόμενη απόδοση πλήρους φορτίου του SHDCM είναι περίπου 97,5%. Ο SHDCM θα χρησιμοποιηθεί για να ωθήσει μεγάλα πλοία, όπως αντιτορπιλικά, που είναι σε εξέλιξη αυτή τη στιγμή. [2]



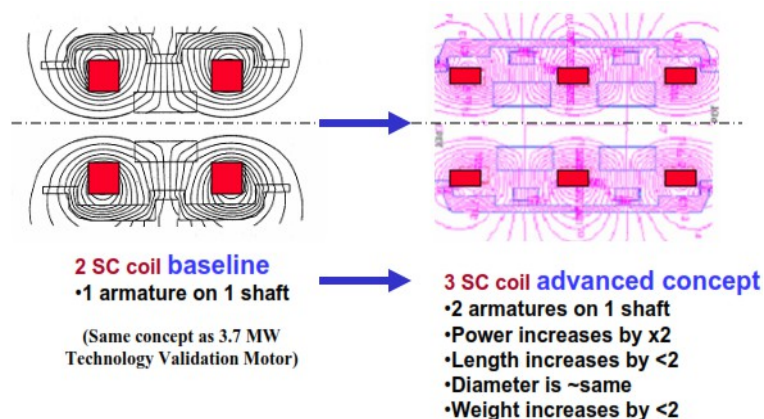
Σχήμα 30: Εγκάρσια τομή του SDCHM ισχύος 3.7 MW της General Atomics, στην οποία φαίνονται τα κυριότερα στοιχεία του. [34]



Σχήμα 31: Τρισδιάστατη απεικόνιση και εικονική αποδόμηση του SDCHM ισχύος 3.7 MW της General Atomics, στην οποία διακρίνεται η εύκολη αντικατάσταση των ψηκτρών (δεξιά). [35]

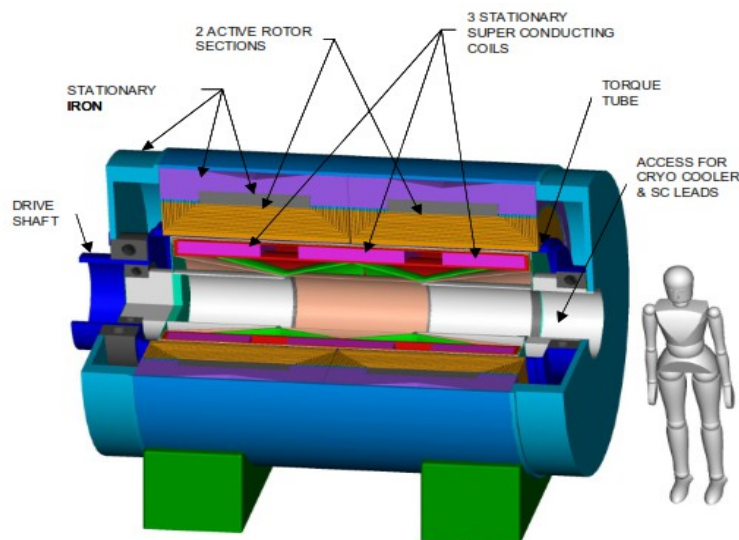
Ο κινητήρας αυτός, σύμφωνα με ανθρώπους της εταιρίας, είναι θεωρητικά καλύτερος από οποιαδήποτε AC εναλλακτική και έχει μια σειρά από ιδιαίτερα πλεονεκτήματα όπως το ότι είναι σχεδόν αθόρυβος, έχει μικρότερο μέγεθος και βάρος από τους AC κινητήρες, είναι 5% αποδοτικότερος και ο έλεγχος είναι πολύ πιο απλός. [27]

Οι SDCHM ισχύος 300kW και 3,7 MW είναι κατασκευασμένοι, λοιπόν, σύμφωνα με το βασικό σχεδιασμό (baseline concept) της εταιρίας ενώ ο 36,5 MW θα είναι σύμφωνα με την προηγμένη τοπολογία (advanced concept). Η βασική διαφορά τους είναι ότι ο πρώτος έχει 2 υπεραγωγία πηνία στο στάτη και μονό σπλισμό στον ρότορα ενώ ο δεύτερος έχει 3 πηνία και διπλό σπλισμό αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 32.



Σχήμα 32: Γραφική απεικόνιση τομής του βασικού (αριστερά) και προηγμένου (δεξιά) σχεδιασμού του ομοπολικού DC κινητήρα με υπεραγωγία πηνία της GA. [34]

Παρακάτω, στο σχήμα 33, απεικονίζεται τρισδιάστατα ένας θεωρητικός κινητήρας της GA προηγμένης σχεδίασης, ισχύος 25 MW που θα λειτουργεί στις 120 rpm, με σημειωμένα τα σημαντικότερα στοιχεία του.



Σχήμα 33: Ο προηγμένης τεχνολογίας SDCHM 25 MW, 120 rpm της GA. [34]

Στον πίνακα 5 παρουσιάζεται η σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών γνωστών κινητήρων, διαφορετικής τεχνολογίας, που χρησιμοποιούνται ήδη στην ηλεκτροπρόωση με τα χαρακτηριστικά των SDCHM της GA, βασικού και προηγμένου σχεδιασμού, προσαρμοσμένα στην κλίμακα του εκάστοτε κινητήρα. Ο AMSC – HTSSM είναι ο σύγχρονος κινητήρας της American Superconductors Corp. τον οποίο αναφέραμε νωρίτερα, ο PMM DERA πρόκειται για έναν κινητήρα μόνιμου μαγνήτη που κατασκευάστηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο, ο PMM DARPA είναι ένας κινητήρας μόνιμου μαγνήτη που φτιάχτηκε για λογαριασμό της Defense Advanced Research Projects Agency των ΗΠΑ και ο AIM είναι ο προηγμένος επαγωγικός κινητήρας της Converteam σε συνεργασία με την Alstom που αναλύσαμε προηγούμενα και χρησιμοποιείται ήδη σε πολλά πλοία του US Navy. Είναι σαφές το πλεονέκτημα που προκύπτει σε όγκο και σε βάρος, ειδικά στην περίπτωση του AIM, όπου ένας ίδιας τάξης μεγέθους προηγμένος SDCHM θα έχει περίπου το μισό βάρος και το 1/5 του όγκου.

Κινητήρας	MW	rpm	Μήκος (m)	Διάμετρος (m)	Βάρος (τόνοι)
AMSC – HTSSM 5000hp	3,7	1800	1,59	1,12	6,81
GA – SDCHM (βασικός)	3,7	1800	1,36	1,00	4,40
GA – SDCHM (προηγμένος)	3,7	1800	1,5	0,74	2,80
PMM DERA	2,45	308	1,55	1,5x1,48	13
GA – SDCHM (βασικός)	2,45	308	1,91	1,40	12
GA – SDCHM (προηγμένος)	2,45	308	2,10	1,03	7,7
PMM DARPA	1,5	1800	1,04	0,74x0,74	1,69
GA – SDCHM (βασικός)	1,5	1800	1,19	0,80	2,2
GA – SDCHM (προηγμένος)	1,5	1800	1,19	0,59	1,4
Converteam – AIM	19	150	4,25	4,0x4,5	117,4
GA – SDCHM (βασικός)	19	150	3,81	2,80	95,6
GA – SDCHM (προηγμένος)	19	150	4,2	2,06	61,2

Πίνακας 5: Σύγκριση γνωστών κινητήρων με τον βασικό και προηγμένο SDCHM της GA. [23]

5.2.6 Συντελεστής καταλληλότητας (goodness factor) G ηλεκτρικής μηχανής.

Η δυσκολία στη σύγκριση των διαφόρων κινητήρων πρόωσης για τα πλοία είναι δικαιολογημένη και οφείλεται στη σχετική σημαντικότητα των διαφορετικών κριτηρίων απόδοσης ανάλογα με την τοπολογία. Ωστόσο, ο συντελεστής καταλληλότητας (goodness factor) G , που μας παρουσιάστηκε πρώτη φορά από τον Laithwaite (*“The goodness of a machine”*, Μάρτιος 1965), μπορεί να είναι ένας πολύτιμος αριθμός για τη σύγκριση των συμβατικών και μη μηχανών από τον μηχανικό που σχεδιάζει τον κινητήρα. Σε μια πρώτη προσέγγιση, ο συντελεστής καταλληλότητας δίνεται από τον τύπο [1]:

$$G = \left\{ \frac{\text{Ισοδύναμη αμιγής συνολική διατομή αγωγού στον ρότορα}}{\text{Ειδική αντίσταση ρότορα} \times \text{Απόσταση διακένου}} \right\} \times \text{Πολικό βήμα} \times \text{Συχνότητα}$$

Η βασική ιδέα έγκειται στο ότι η μηχανή είναι μία διασύνδεση μεταξύ ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικό κύκλωμα. Όσο καλύτερο είναι το ηλεκτρικό κύκλωμα τόσο μεγαλύτερο ρεύμα θα δίνει για μια δεδομένη τάση (για παράδειγμα αν έχει χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση), και όσο καλύτερο είναι ένα μαγνητικό κύκλωμα τόσο μεγαλύτερη μαγνητική ροή θα δίνει για δεδομένη μαγνητεγερτική δύναμη (MMF) (για παράδειγμα αν έχει χαμηλή μαγνητική αντίσταση). [36]

Επομένως, μέσω του συντελεστή καταλληλότητας μπορούμε να συγκρίνουμε μηχανές, και κατ' επέκταση κινητήρες, είτε είναι απλώς σύγχρονοι και ασύγχρονοι είτε είναι ιδιαίτεροι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη όπως οι αξονικής ή οι εγκάρσιας ροής, ούτως ώστε να επιλέξουμε τον πλέον κατάλληλο για την κάθε περίπτωση.

5.2.7 Γενικά συμπεράσματα για τους κινητήρες ηλεκτροπρόωσης.

Η συζήτηση για τους τύπους κινητήρων προς το παρόν φαίνεται να επικεντρώνεται επί της ουσίας στα πλεονεκτήματα των διάφορων ανταγωνιστικών σχεδιασμών. Ο κινητήρας, όμως, αποτελεί απλώς ένα συστατικό μέρος ενός πολύ μεγαλύτερου συστήματος. Αυτό είναι το σύστημα ηλεκτροπρόωσης που περιέχει αρκετά ακόμα κύρια εξαρτήματα, όπως οι μετατροπείς με ηλεκτρονικά ισχύος για τον έλεγχο της ταχύτητας, το σύστημα ψύξης και την κρυογονική εγκατάσταση για τις μηχανές με υπεραγωγούς. Ένας κινητήρας που φαίνεται να είναι καλύτερος όταν εξετάζεται μεμονωμένα μπορεί να μην οδηγήσει υποχρεωτικά στην καλύτερη δυνατή σχεδίαση του συστήματος λόγω των επιπτώσεών του στα άλλα υποσυστήματα. Η τελική επιλογή θα πρέπει να βασίζεται στο συνολικά βέλτιστο σύστημα ηλεκτροπρόωσης με τα εκάστοτε στοιχεία του.

Ορισμένα αξιοσημείωτα στοιχεία της ηλεκτρικής πρόωσης πλοίων είναι τα κάτωθι [1]:

- ✓ Μερικά παλαιά υποβρύχια και κρουαζιερόπλοια χρησιμοποίησαν DC κινητήρες τάξης χαμηλότερης από 8 MW, το οποίο είναι το όριό τους.
- ✓ Οι προωστήριοι κινητήρες που κινούν έλικες και στις δύο άκρες τους, μπροστά και πίσω, απέτυχαν να βελτιώσουν την πρόωση.
- ✓ Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα φτάνουν μέχρι το επίπεδο των 10 MW.
- ✓ Ο προηγμένος επαγωγικός κινητήρας (AIM) έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί στο βέλτιστο βαθμό, μόνο με το δικό του σύστημα οδήγησης μεταβλητής ταχύτητας.
- ✓ Οι κινητήρες αξονικής ροής με μόνιμους μαγνήτες έχουν πολύ μικρό βάρος, αλλά έχουν χαμηλή ανθεκτικότητα σε εξωτερικούς κραδασμούς.

- ✓ Οι εγκάρσιας ροής με μόνιμους μαγνήτες, που αναπτύχθηκαν από το Βρετανικό Πολεμικό Ναυτικό, έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος.
- ✓ Στο ενοποιημένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του Αμερικανικού Πολεμικού Ναυτικού χρησιμοποιείται σύστημα οδήγησης μεταβλητής συχνότητας με μετατροπείς με διαμόρφωση εύρους παλμού (PWM) σε συνδυασμό με AIM. Ο AIM είναι της τάξης των 19 MW, 115 rpm, 4m διάμετρο, με στάτη σχεδιασμένο να αντέχει κραδασμούς έως 18G στην κατακόρυφη διεύθυνση.
- ✓ Οι κινητήρες με υπεραγωγούς μπορούν να θεωρηθούν οι κινητήρες ηλεκτροπρόωσης του μέλλοντος καθώς προσφέρουν σημαντική μείωση στο βάρος, τον όγκο και τα επίπεδα θορύβου, σε σχέση με τους συμβατικούς κινητήρες. [2]

5.3 Βιβλιογραφία 5^ο Κεφαλαίου

- [1] 2012_Patel - Shipboard Propulsion, Power Electronics, and Ocean Energy
- [2] 2013_Trends in Naval Ship Propulsion Drive Motor Technology
- [3] 21.03.2012_ABB_OLA.
- [4] ABB AS_2003.
- [5] 2001_Terwisga et al_Steerable Propulsion Units
- [6] 1523_e_g_2070_e_vsp_2013-04-23_screen
- [7] 1760_e_g_2198_e_emotionalisierung_vsp_2012-08_screen
- [8] <http://www.shipinsight.com/new-voith-schneider-propeller-tugs-offshore-support-vessels/>
- [9] Azipod_General_Presentation
- [10] 16.PropSyst_2p_04.09.12_tcm92-37528
- [11] 2010_Siemens-Schottel Propulsor
- [12] SAM_Dolphin pod
- [13] 2013_Ship Electrical Propulsion System
- [14] 2013_Future_ship_powering_options_report
- [15] INGENIA_Issue 12, May 2002_king_Marine Propulsion.
- [16] A novel idea comes to fruition_ New electric water propulsion motor debuts – AUVAC.
- [17] http://en.wikipedia.org/wiki/USS_Zumwalt
- [18] <http://www.queenelizabethcruises.net/hms-queen-elizabeth-aircraft-carrier/>
- [19] Electric_Warship_I – 1996
- [20] Electric_Warship_VI – 2001
- [21] Electric_Warship_V – 2000
- [22] http://en.wikipedia.org/wiki/Zumwalt-class_destroyer
- [23] 2003_An Evaluation of electric motors for ship propulsion
- [24] 2009_Patterson et al_Simple Modeling and Prototype Experiments for a New High-Thrust, Low-Speed Permanent Magnet Disk Motor
- [25] 2011_Padurariu et al_Design of a Permanent Magnet Transverse Flux Motor for Ship Propulsion System.
- [26] 2012_Padurariu et al_Large Power Permanent Magnet Transverse Flux Motor, Steady-State and Dynamic Behavior
- [27] All systems go as electric solutions power future ships
- [28] 2006_Kalsi; Gamble; Snitchler; Ige - The Status of HTS Ship Propulsion Motor Developments.
- [29] 2010_Snitchler - Progress on high temperature superconductor propulsion motors and direct drive wind generators
- [30] 2011_Gamble; Snitchler; MacDonald - Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor

- [31] 2006_Technical and Theoretical Analysis of HTS Machines and Their Development
- [32] www.superconductorweek.com/free-content-photo-gallery
- [33] 2003_Superconducting motors and generators for naval applications
- [34] 2005_General Atomics_SDCHM
- [35] 2002_Homopolar Motor Technology Development
- [36] 2002_Brice, Patterson_Electric Machine Goodness

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

***Τα βασικότερα μέρη του ΣΗΕ ενός DC-Πλοίου –
Ηλεκτρονικά Ισχύος και Συστήματα Οδήγησης***

Το ενοποιημένο σύστημα ισχύος (Integrated Power System – IPS) των μεγάλων εμπορικών πλοίων χαρακτηρίζεται ως επί το πλείστον, προς το παρόν, από διανομή μέσης τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος (MVAC). Στο IPS η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται, συνήθως, από ντίτζελ γεννήτριες που συνδέονται άμεσα με το δίκτυο μέσης τάσης. Οι επαγωγικοί κινητήρες των πλευρικών προωστήρων πλήρους, οι συμπιεστές κλιματισμού και οι μετασχηματιστές ισχύος που τροφοδοτούν τα φορτία χαμηλής τάσης του δικτύου συνδέονται επίσης με το δίκτυο μέσης τάσης. Οι μεγάλες μονάδες πρόωσης είναι τα μόνα φορτία που απαιτούν την χρήση μετατροπέων ισχύος.

Αντίθετα στο IPS με διανομή μέσης τάσης απαιτούνται πολλά συστήματα με ηλεκτρονικά ισχύος. Τα MVDC αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση για βελτίωση της απόδοσης στο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου και πλεονεκτούν έναντι των MVAC σε διάφορα σημεία, τα οποία αναφέρονται στο IEEE Std 1709™-2010, και συνοψίζονται ως εξής:

δεν υπάρχει ανάγκη για συγχρονισμό των φάσεων των πηγών ενέργειας, απλοποιώντας έτσι τη σύνδεση και αποσύνδεση των διαφορετικού τύπου και μεγέθους ηλεκτρογεννητριών και συσκευών αποθήκευσης,

μείωση του μεγέθους και της ονομαστικής ισχύος των διακοπτικών στοιχείων και των καλωδίων, και εξάλειψη των ογκωδών μετασχηματιστών χαμηλής συχνότητας,

βελτίωση και διευκόλυνση στη διαχείριση των ρευμάτων σφάλματος, της αναδιάρθρωσης του συστήματος και της ροής ισχύος σε συνθήκες μεταβατικές και έκτακτης ανάγκης,

ενισχύεται η ικανότητα εξάλειψης της άεργου ισχύος και η δυνατότητα λειτουργίας πρωτεύοντων κινητήριων μηχανών μεταβλητής ταχύτητας,

άρση των περιορισμών από τη συχνότητα κατά το σχεδιασμό και τη λειτουργία των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα μείωσης στο μέγεθος και το βάρος των γεννητριών και καθιστώντας οικονομικά συμβατή τη χρήση αεριοστρόβιλων, οι οποίοι ως γνωστόν έχουν πολύ λιγότερες εκπομπές βλαβερών καυσαερίων από τους ντίτζελ κινητήρες.

Τα IPS με DC διανομή απαιτούν τη μαζική χρήση των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος για εργασίες όπως: η ανόρθωση της τάσης εξόδου των γεννητριών και η σύνδεση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με το δίκτυο, η παροχή μέσης τάσης στα φορτία υψηλής ισχύος (μονάδες πρόωσης, bow thrusters, συμπιεστές για κλιματισμό), η ρύθμιση των επιπέδων τάσης, η οποία σε συστήματα AC γίνεται με μετασχηματιστές ισχύος, από DC/DC μετατροπείς ισχύος που πολλές φορές ονομάζονται και μετασχηματιστές στερεάς κατάστασης (Solid-State Transformers – SST).

Μπορούμε να πούμε, λοιπόν, ότι τα ηλεκτρονικά ισχύος που έχουμε σε ένα MVDC ηλεκτρικό δίκτυο πλοίου χρησιμεύουν για διεργασίες σε τρία βασικά υποσυστήματα. Αυτά δεν είναι άλλα από το υποσύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, το υποσύστημα χρησιμοποίησης ενέργειας και αυτό της διανομής και προστασίας, τα οποία θα περιγράψουμε στη συνέχεια.

6.1 Ηλεκτρονικά ισχύος στο υποσύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας του MVDC δικτύου

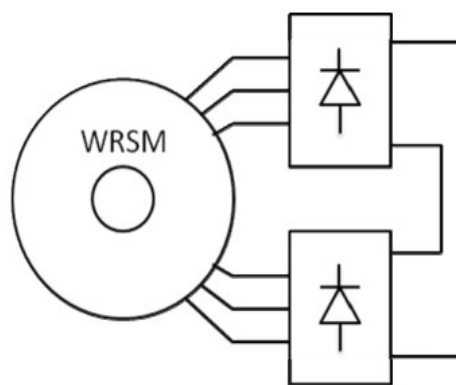
6.1.1 Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος.

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα MVDC δίκτυο η προτιμότερη επιλογή, τουλάχιστον προς το παρόν, φαίνεται να είναι οι στρεφόμενες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί και δοκιμαστεί κατά κόρον σε πλοία με IPS. Οι DC γεννήτριες δεν φαίνεται να αποτελούν επιλογή βραχυπρόθεσμα, λόγω των διαφόρων ζητημάτων τους (βλ. Κεφ. 3.1.2). Η ένταξη κυνελών καυσίμου, από την άλλη, έχει αρχίσει και κερδίζει έδαφος στα MVDC δίκτυα. Η σύνδεση ενός συστήματος παραγωγής με κυψέλες καυσίμου με τον DC ζυγό γίνεται με DC/DC μετατροπείς, οι οποίοι εξετάζονται παρακάτω.

Η σύνδεση των γεννητριών AC με το υπόλοιπο MVDC είναι δυνατή μόνο μέσω ενός AC/DC μετατροπέα, γνωστού και ως ανορθωτή. Στην περίπτωση αυτή, η ευκολότερη και οικονομικότερη λύση είναι η χρήση ενός ανορθωτή με διόδους, εάν είναι δυνατή η ρύθμιση της τάσης, δηλαδή όταν έχουμε γεννήτρια με τυλιγμένο δρομέα. Εάν η ρύθμιση της τάσης δεν είναι εφικτή, δηλαδή στην περίπτωση ενός εναλλάκτη μόνιμου μαγνήτη, πρέπει να προσαρτήσουμε έναν DC/DC μετατροπέα στον ανορθωτή διόδων.

Στα [2] και [3] παρουσιάζονται δύο πρωτότυπες γεννήτριες ισχύος 2 MW πλήρους κλίμακας, 4 πόλων, υψηλής ταχύτητας, οδηγούμενες από αεριοστρόβιλο 22500 ΣΑΛ που κατασκευάστηκαν από μια ιταλική εταιρεία, σε συνεργασία με το Ιταλικό Πολεμικό Ναυτικό.

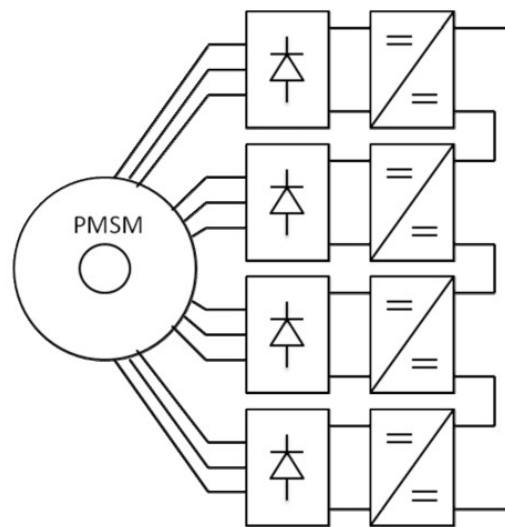
Το πρώτο πρωτότυπο, το σχέδιο του οποίου φαίνεται στο σχήμα 1, αποτελείται από μια σύγχρονη γεννήτρια με τυλιγμένο ρότορα (WRSM) και διπλά τριφασικά τυλίγματα στο στάτη, η οποία είναι προσαρτημένη με τον αεριοστρόβιλο μέσω ενός μειωτήρα στροφών, που μειώνει την ταχύτητα σε 6300rpm. Η γεννήτρια τροφοδοτεί ηλεκτρική ενέργεια το δίκτυο συνεχούς ρεύματος με δύο γέφυρες διόδων σε σειρά, κάθε μία από τις οποίες είναι συνδεδεμένη στο αντίστοιχο τριφασικό τύλιγμα εξόδου της μηχανής.



Σχήμα 1: Σχεδιάγραμμα συστήματος παραγωγής συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος με Σύγχρονη Γεννήτρια Τυλιγμένου Δρομέα (WRSM) συνδεδεμένη με δύο γέφυρες ανόρθωσης διόδων σε σειρά. [1]

Το δεύτερο πρωτότυπο, που αποτυπώνεται στο σχήμα 2, αποτελείται από μία σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSM), απευθείας συνδεδεμένη με τον αεριοστρόβιλο και τετραπλό τριφασικό τύλιγμα. Κάθε τριφασική περιέλιξη στάτη της γεννήτριας παρέχει ισχύ σε

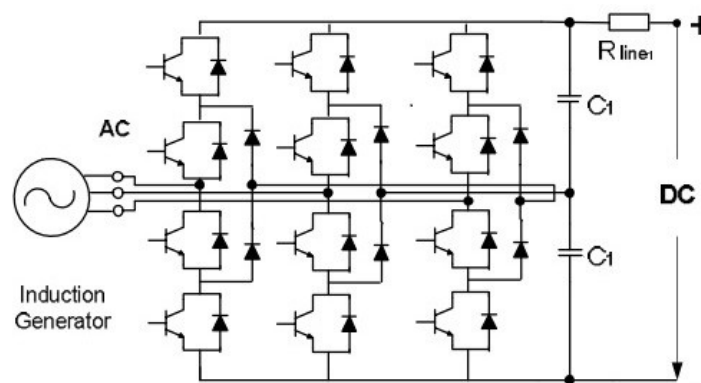
ένα ηλεκτρονικό σύστημα που αποτελείται από έναν μετατροπέα ισχύος DC/DC προσαρτημένο σε γέφυρα ανόρθωσης διόδων. Στη συνέχεια όλα αυτά τα ηλεκτρονικά συστήματα συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά.



Σχήμα 2: Σχεδιάγραμμα συστήματος παραγωγής συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος που αποτελείται από Σύγχρονη Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη (PMSM) με τετραπλό τριφασικό τύλιγμα στάτη και ηλεκτρονικό σύστημα με γέφυρα διόδων και DC/DC μετατροπέα. [1]

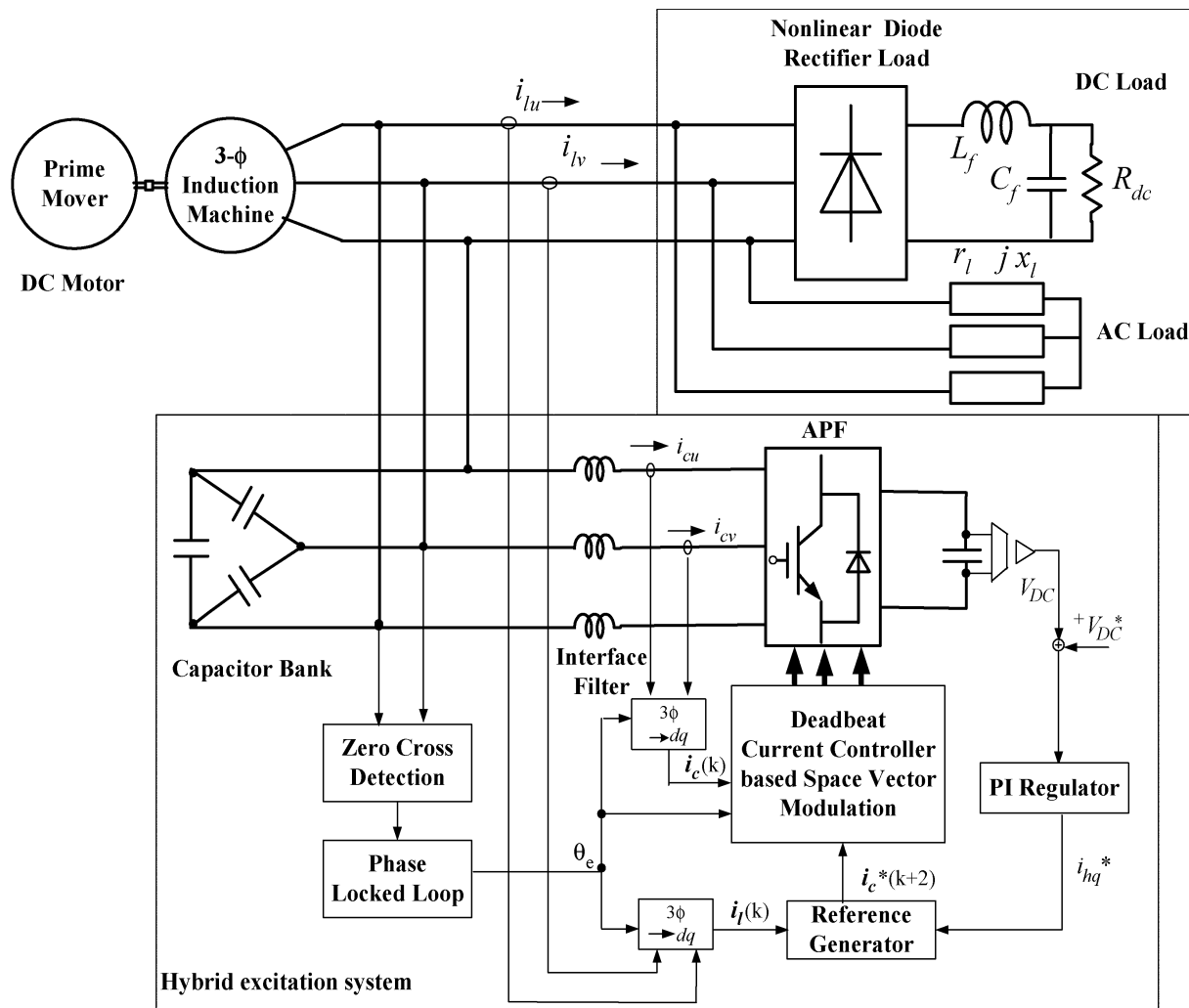
Σύμφωνα με τους συγγραφείς του [1] η δοκιμασμένη τεχνολογία που περιγράφεται παραπάνω είναι η καλύτερη διαθέσιμη επιλογή σήμερα για συστήματα τροφοδοσίας συνεχούς ισχύος σε MVDC δίκτυα. Ωστόσο, στη βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν και άλλες προτάσεις.

Μία από αυτές είναι η χρήση των AC/DC ανορθωτών ισχύος με ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία, όπως IGBTs (Active Front End – AFE). Για παράδειγμα, στο [4], εκτός από τα κλασικά συστήματα με ανορθωτές διόδων, προτείνεται η λειτουργία σε μεταβλητή ταχύτητα σύγχρονων και επαγωγικών γεννητριών, για βελτιστοποίηση της παρεχόμενης ισχύος, που διασυνδέονται με το δίκτυο μέσω μετατροπέων πηγής τάσης (Voltage Source Converters – VSC) δύο και τριών επιπέδων (σχήμα 3). Στη δημοσίευση αυτή απεικονίζονται επιπλέον τα πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν από εργαστηριακά πρωτότυπα λίγων kW των προτεινόμενων συστημάτων.



Σχήμα 3: Ανορθωτής με ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία τριών επιπέδων. [4]

Στο [5] προτείνεται ένα σύστημα (σχήμα 4), το οποίο κατασκευάστηκε σε μικρή εργαστηριακή κλίμακα, και αποτελείται από μια γεννήτρια επαγωγής διασυνδεδεμένη με DC φορτία μέσω ενός ανορθωτή διόδου. Η επαγωγική γεννήτρια απαιτεί ένα σύστημα διέγερσης συνδεδεμένο παράλληλα με τους ακροδέκτες εξόδου της. Στο σύστημα διέγερσης αυτό περιέχεται μια συστοιχία πυκνωτών και μικρού μεγέθους ενεργό φίλτρο ισχύος.



Σχήμα 4: Το σύστημα παραγωγής DC ηλεκτρικής ισχύος που προτείνεται στο [5].

Στο [6], συγκρίνονται διάφορα είδη ανορθωτών ισχύος για την διασύνδεση στο δίκτυο μιας γεννήτριας 5 MVA υψηλής ταχύτητας (400 Hz). Οι δοκιμαζόμενες τοπολογίες μετατροπέων είναι 2 επιπέδων, 3 επιπέδων με διόδους (diode clamp) ή πυκνωτές ελεύθερης διέλευσης (flying capacitor) και τέσσερα είδη μετατροπέων με βοηθητικό κύκλωμα συντονισμού ανά πόλο (Auxiliary Resonant Commutated Pole – ARCP) με ομαλή μετάβαση από την αγωγή στη διακοπή και αντίστροφα (soft switching), και πιο συγκεκριμένα τρεις με δομή τριών επιπέδων και ένα με δομή τεσσάρων επιπέδων. Ωστόσο, η σύγκριση γίνεται με βάση αποτελέσματα προσομοίωσης, ενώ δεν κατασκευάστηκαν ώστε να δοκιμαστούν τα αντίστοιχα πειραματικά πρωτότυπα.

6.1.2 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Τα κυριότερα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που διατίθενται σήμερα είναι οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, τα συστήματα με σφόνδυλο και οι υπερπυκνωτές.

Τα συστήματα αποθήκευσης με σφόνδυλο, η περιστρεφόμενη μάζα συνδέεται με μια ηλεκτρική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ίδια είδη των μετατροπέων ισχύος με αυτά που αναφέραμε μόλις παραπάνω.

Οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές και οι υπερπυκνωτές είναι συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε DC, επομένως απαιτούν αμφίδρομους μετατροπείς DC/DC για να συνδεθούν με το MVDC δίκτυο. Οι μετατροπείς πρέπει να μπορούν χειριστούν υψηλά επίπεδα ισχύος, ακόμη και αν αυτά δεν επιβάλλονται κατά συνεχή τρόπο. Στην ενότητα 3.4.3 περιγράφονται οι DC/DC μετατροπείς ισχύος που είναι σχεδιασμένοι για το υποσύστημα διανομής και προστασίας. Μεταξύ αυτών, οι μετατροπείς με δομή αμφίδρομης ροής ισχύος είναι κατάλληλοι για τους ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές και υπερπυκνωτές.

6.2 Ηλεκτρονικά ισχύος στο υποσύστημα χρησιμοποίησης ηλεκτρικής ενέργειας του MVDC

Το υποσύστημα χρησιμοποίησης αποτελείται από τα μεγάλα φορτία με διανομή ισχύος σε μέση τάση, όπως είναι οι πλευρικοί προωστήρες, οι συμπιεστές για τον κλιματισμό και οι μεγάλες μονάδες ηλεκτροπρόωσης.

Οι πλευρικοί προωστήρες και οι συμπιεστές οδηγούνται συνήθως από επαγωγικούς κινητήρες που είναι συνδεδεμένοι απευθείας στο δίκτυο MVAC. Ωστόσο, στην περίπτωση του MVDC δικτύου είναι απαραίτητο να παρέχεται η ισχύς στους κινητήρες μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα DC/AC και, ως εκ τούτου, αξίζει να εκμεταλλευτούμε τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση συστημάτων οδήγησης με μεταβλητή ταχύτητα. Αυτά μπορεί να είναι συμβατικά ηλεκτρικά συστήματα κίνησης μέσης τάσης με ονομαστική ισχύ της τάξης των εκατοντάδων kW ή λίγων MW, συμπεριλαμβανομένου ενός VSC που τροφοδοτεί έναν επαγωγικό ή έναν κινητήρα μόνιμου μαγνήτη.

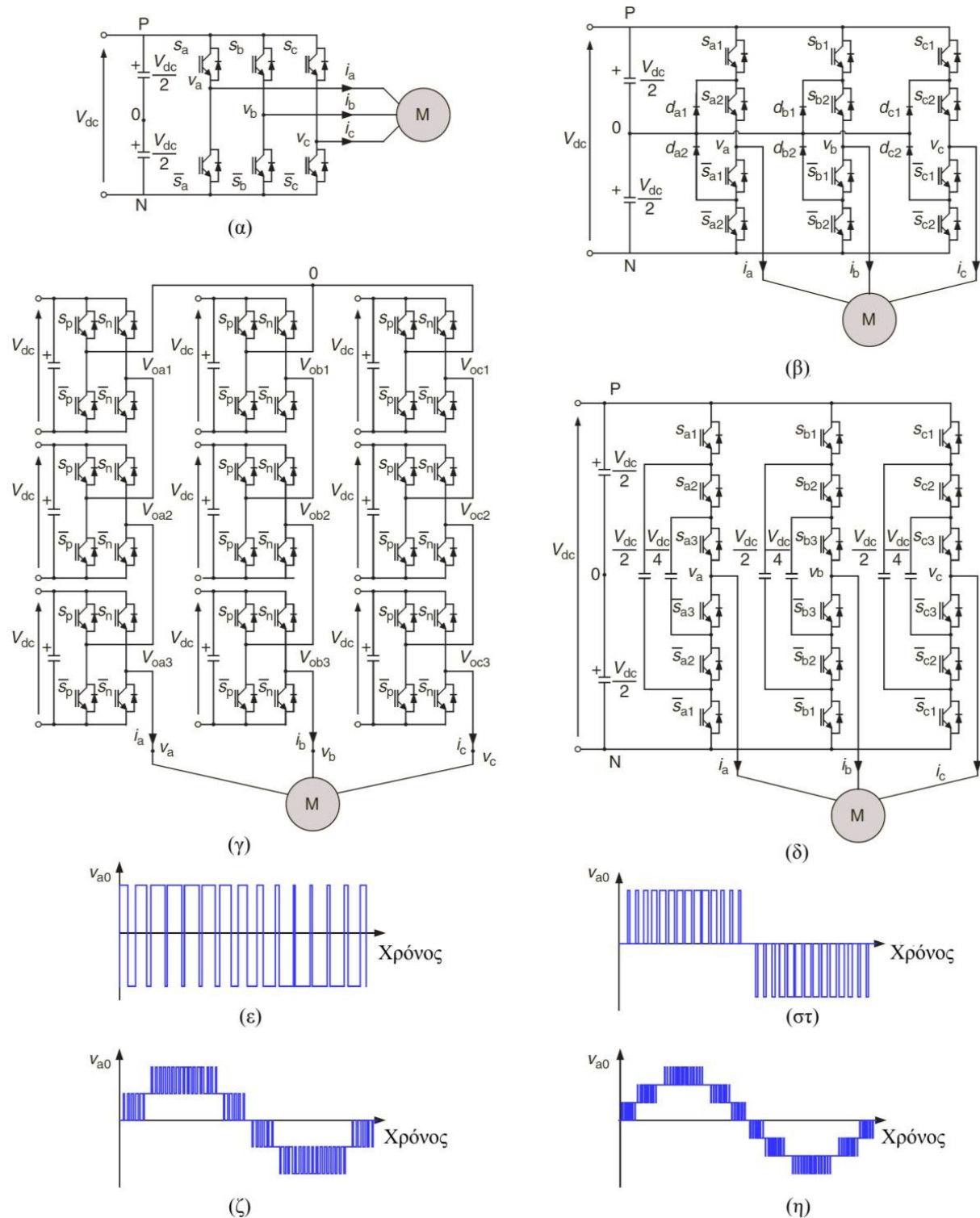
Οι μονάδες ηλεκτροπρόωσης των κρουαζιερόπλοιων, με ισχύ που κυμαίνεται από περιοχές των 10 MW έως και άνω των 20 MW για τα μεγαλύτερα πλοία, παραδοσιακά αποτελούνται από σύγχρονους κινητήρες τυλιγμένου δρομέα που τροφοδοτούνται από AC/AC μετατροπείς συχνότητας με θυρίστορ όπως είναι ο συνδυασμός ανορθωτή και αντιστροφέα μετάβασης από το φορτίο (Load Commutated Inverter – LCI) και ο κυκλομετατροπέας [7]. Ωστόσο, εκτός από τον κλασικό αντιστροφέα πηγής τάσης (Voltage Source Inverter – VSI) δύο επιπέδων που φαίνεται στο σχήμα 5(α), οι βασικότεροι κατασκευαστές ηλεκτρικών μονάδων οδήγησης υψηλής ισχύος παρέχουν στους ναυπηγούς καινοτόμα προϊόντα ([7], [8], [9]), τα οποία χρησιμοποιούν αντιστροφείς πηγής τάσης με μανδάλωση ουδετέρου (Neutral Point Clamped – NPC VSI) [10].

Παράδειγμα τοπολογίας NPC VSI τριών επιπέδων τάσης παρουσιάζεται στο σχήμα 5(β). Τα προτεινόμενα προϊόντα τροφοδοτούνται από δίκτυο MVAC και έχουν για διακοπτικά στοιχεία συνήθως IGBTs υψηλής τάσης και IGCTs, ωστόσο, μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν σε MVDC τροφοδοσίας, με την αφαίρεση, κατά κύριο λόγο, του ανορθωτή που διασυνδέει το ηλεκτρικό σύστημα κίνησης με το δίκτυο AC. Ως εναλλακτικές λύσεις του NPC, για παραγωγή περισσότερων επιπέδων τάσης, στη βιβλιογραφία προτείνονται συστήματα με ηλεκτρονικά ισχύος τα οποία βασίζονται σε αρθρωτά σύνολα στοιχείων, όπως οι μετατροπείς τύπου αλληπάλληλων Η-γεφυρών (cascaded H-bridge – CHB) και flying capacitor (FC).

Ο μετατροπέας CHB φαίνεται στο σχήμα 5(γ) και βασίζεται σε επιμέρους μονοφασικούς αντιστροφείς, γνωστοί και με την ονομασία "κελιά ισχύος" (power cells), συνδεδεμένους σε σειρά με σκοπό να σχηματίσουν μία διακριτή φάση. Η υλοποίηση κάθε κελιού βασίζεται σε στοιχεία χαμηλότερης ονομαστικής τάσης, κάτι που παρέχει τη δυνατότητα για ευκολότερη και φθηνότερη αντικατάσταση σε περιπτώσεις βλαβών. Επίσης κάθε κελί έχει ανεξάρτητη τροφοδοσία DC από τα άλλα και απαιτεί διακριτή πηγή τάσης.

Η τοπολογία του μετατροπέα FC φαίνεται στο σχήμα 5(δ). Η τάση εξόδου παράγεται από απευθείας σύνδεση της φάσης εξόδου στο θετικό ή στον αρνητικό πόλο μέσω αγειώτων πυκνωτών. Ο αριθμός των επιπέδων της τάσης εξόδου εξαρτάται από τον αντίστοιχο αριθμό πυκνωτών και τη σχέση μεταξύ των επιπέδων τάσης, για παράδειγμα ο μετατροπέας του σχήματος 5(δ) παράγει πέντε επίπεδα τάσης στην έξοδό του. Ο συγκεκριμένος μετατροπέας όπως και ο CHB αποτελεί μια αρθρωτή προσέγγιση όπου κάθε κελί περιλαμβάνει ένα πυκνωτή DC και δύο συμπληρωματικούς διακόπτες. Ωστόσο, σε αντίθεση με την περίπτωση του CHB, η προσθήκη επιπλέον κελιών ισχύος δεν αυξάνει την ονομαστική ισχύ της διάταξης αλλά μειώνει το λόγο dV/dt βελτιώνοντας το αρμονικό περιεχόμενο των κυματομορφών εξόδου. Ο μετατροπέας τύπου FC απαιτεί μόνο μία πηγή τάσης DC για την τροφοδοσία όλων

των κελιών και των φάσεων. Έτσι η χρήση μετασχηματιστή αποφεύγεται και ο αριθμός των κελιών μπορεί να αυξηθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις σε ισχύ. Όπως και στην περίπτωση του μετατροπέα NPC, ο FC χρειάζεται μία ειδική στρατηγική ελέγχου για τη ρύθμιση της τάσης των πυκνωτών.



Σχήμα 5: Τοπολογίες και φασικές τάσεις συμβατικών VSI, α) δύο επιπέδων, β) NPC τριών επιπέδων, γ) CHB επτά επιπέδων, δ) FC πέντε επιπέδων, ε) 1φ τάση VSI δύο επιπέδων, στ) 1φ τάση NPC τριών επιπέδων, ζ) 1φ τάση FC πέντε επιπέδων, η) 1φ τάση CHB επτά επιπέδων. [11]

6.3 Ηλεκτρονικά ισχύος στο υποσύστημα διανομής και προστασίας του MVDC

Τη στιγμή αυτή υπάρχουν στην αγορά πολλές αξιόπιστες λύσεις για τα συστήματα μετάδοσης συνεχούς ρεύματος σε υψηλή τάση (HVDC), ωστόσο, οι επιλογές για τη διανομή συνεχούς ρεύματος με μέση τάση είναι ελάχιστες. Παρ' όλα αυτά, τόσο δημόσια ερευνητικά κέντρα όσο και τα τμήματα έρευνας και ανάπτυξης πολλών από τις σημαντικότερες εταιρείες του κλάδου εργάζονται προς αυτή την κατεύθυνση [12].

Η δυνατότητα ώστε να είναι πιθανή η υλοποίηση μιας διανομής σε MVDC εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα δύο βασικών στοιχείων: τα συστήματα προστασίας έναντι DC βραχυκυκλωμάτων, πολύ πιο έντονα από ότι στην περίπτωση εναλλασσόμενου ρεύματος, και υψηλής ισχύος DC/DC ηλεκτρονικοί μετατροπείς με ανεκτό κόστος και απόδοση ώστε να είναι σε θέση να λειτουργήσουν ως μετασχηματιστές στερεάς κατάστασης (SSTs).

Πληροφορίες σχετικά με τα συστήματα προστασίας μπορούν να βρεθούν στα [13] – [18] ούτως ή άλλως αυτό είναι εκτός του θέματος της διπλωματικής. Οι DC/DC μετατροπείς είναι ευρέως διαδεδομένοι για τη χαμηλή ισχύ και υπάρχουν διάφορες παραλλαγές τους. Οι περισσότεροι από αυτούς, όμως, δεν είναι κατάλληλοι για να χειριστούν επίπεδα ισχύος της τάξης των MWs. Οι βασικοί περιορισμοί προκαλούνται από τη φύση των διακοπών υψηλής ισχύος, τη συχνότητα λειτουργίας και την αποδοτικότητα [19].

Για τις εφαρμογές πολύ υψηλής ισχύος, στην πιο πρόσφατη επιστημονική βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν αρκετά παραδείγματα DC/DC μετατροπέων συντονισμού, γεγονός που υποδηλώνει ότι η διεθνής επιστημονική κοινότητα φαίνεται να συμφωνεί στην πρόταση αυτού του είδους των τοπολογιών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως SST στα συστήματα διανομής DC.

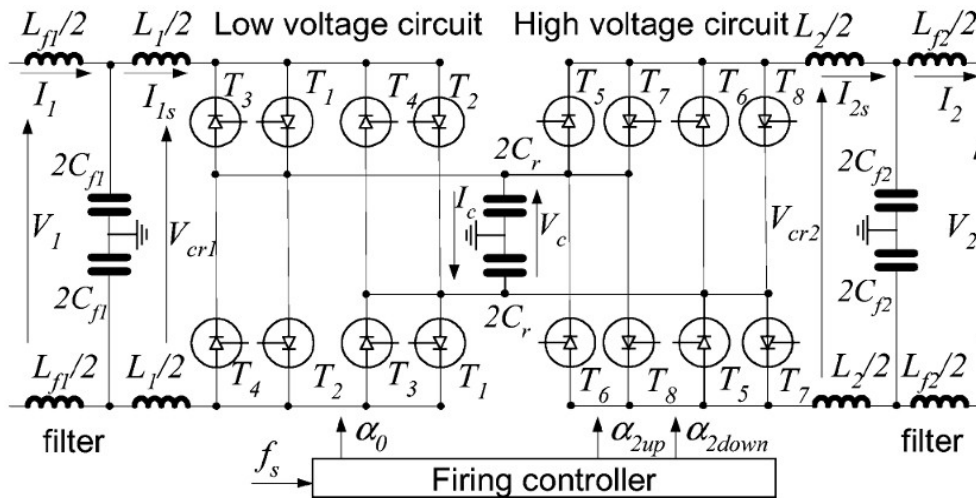
Πολλά είδη μετατροπέων έχουν προταθεί, αλλά μέχρι τώρα οι επιδόσεις τους έχουν δοκιμαστεί μόνο σε περιβάλλοντα προσομοίωσης ή στα εργαστήρια με μειωμένης κλίμακας πρωτότυπα. Οι προτεινόμενοι μετατροπείς, ή τουλάχιστον οι πιο σημαντικοί ανάμεσά τους, έχουν μια κοινή δομή. Αποτελούνται από μια βαθμίδα εισόδου DC/AC, ένα AC κύκλωμα συντονισμού και ένα στάδιο εξόδου AC/DC [19] – [32]. Στην πλειονότητα των δομών, ένας μετασχηματιστής μεσαίας ή υψηλής συχνότητας περιλαμβάνεται για να απομονωθεί γαλβανικά το στάδιο εξόδου από την είσοδο ενός [20].

Υπάρχουν, βέβαια, σημαντικά παραδείγματα μετατροπέων χωρίς γαλβανική απομόνωση. Ένα από τα πιο σημαντικά παραδείγματα είναι ο DC/DC μετατροπέας αμφίδρομου συντονισμού με αμφίδρομο θυρίστορ που παρουσιάζεται στο [21] για την εφαρμογή ως SST (σχήμα 6).

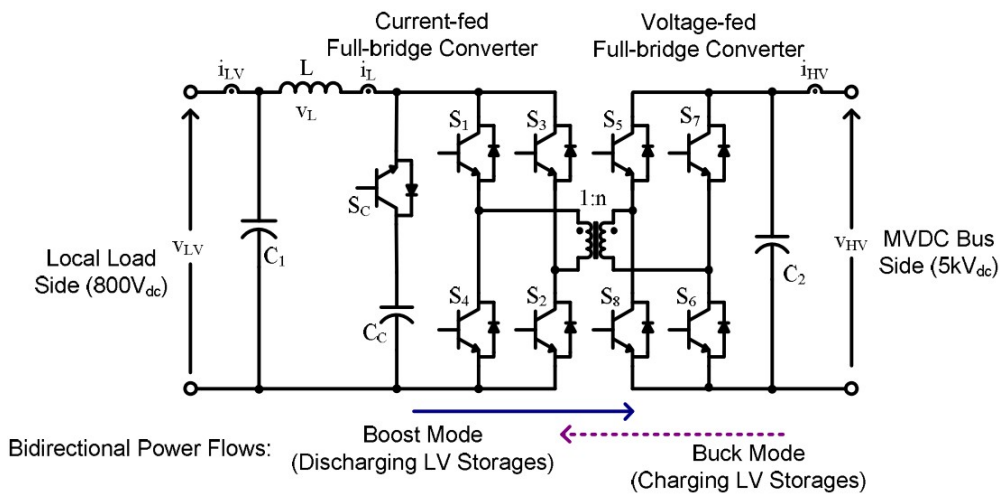
Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό κυκλωματικό διάγραμμα αμφίδρομου μετατροπέα DC/DC που προτείνεται στο [23] για MVDC πλοίου. Η φορά ανύψωσης της τάσης είναι προς τα δεξιά και η φορά υποβιβασμού της προς τα αριστερά, ενώ ο μετατροπέας έχει και υψηλής συχνότητας μετασχηματιστή για γαλβανική απομόνωση. Οι συγγραφείς του [24] ασχολούνται με το σχεδιασμό ενός αμφίδρομου μετατροπέα DC/DC 1 MW με παρόμοια δομή με αυτή που παρουσιάζεται στο [23].

Στο [25] παρουσιάζεται ο μετατροπέας DC/DC που φαίνεται στο σχήμα 8, με ημιγέφυρα τριών επιπέδων τάσης στο στάδιο εισόδου και ένα στάδιο εξόδου με μετατροπέα εναλλαγής (push-pull), ο οποίος τροφοδοτεί φορτία ζωτικής σημασίας χαμηλής τάσης σε συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας πλοίων. Οι εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ένα πρωτότυπο 7 kW που αποδεικνύουν την καλή απόδοση (95%) της προτεινόμενης διάταξης με τάση εισόδου $V_i = 850V$ έως $1250V$, τάση εξόδου $V_o = 68V$ και συχνότητα μετασχηματιστή $f_s = 80kHz$. Πολλές παραλλαγές αυτού του μετατροπέα για υψηλής τάσης

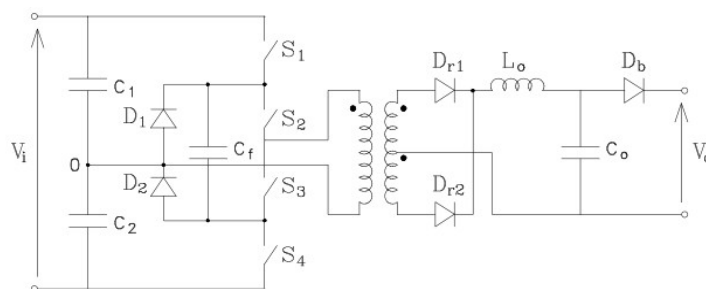
και μέσης ή υψηλής ισχύος εφαρμογές μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία, δύο εκ των σημαντικότερων και πιο πρόσφατων παρουσιάζονται από τους ίδιους συγγραφείς στο [26] και [27] και μία τρίτη στο [28]. Όλες αυτές αποτιμώνται μέσω εργαστηριακών πρωτοτύπων χαμηλής ισχύος.



Σχήμα 6: Παράδειγμα DC/DC μετατροπέα αμφίδρομου συντονισμού με αμφίδρομα θυρίστορ. [21]



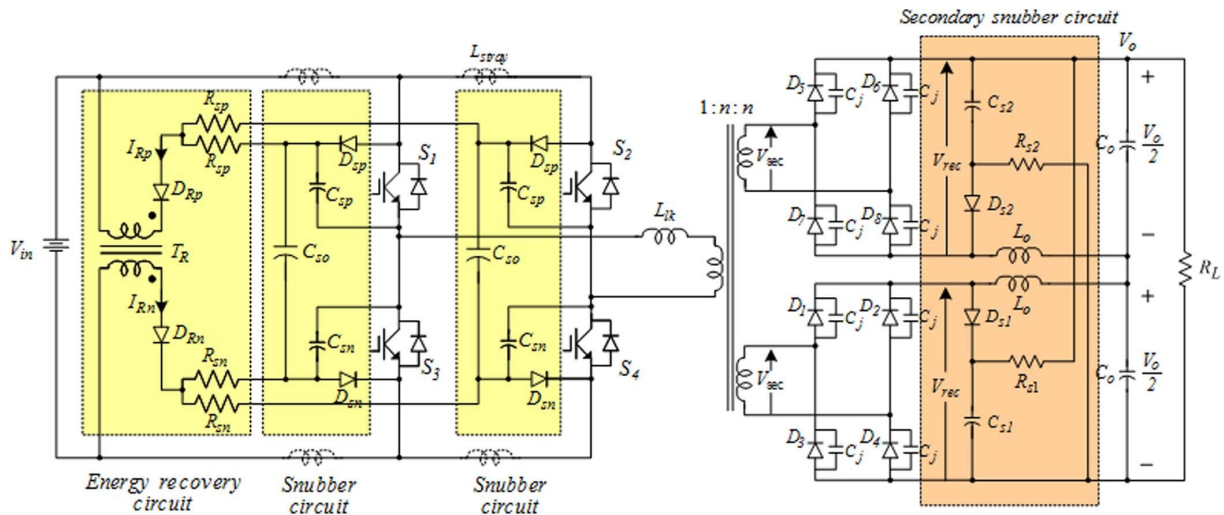
Σχήμα 7: Κυκλωματικό διάγραμμα αμφίδρομου μετατροπέα DC/DC με γαλβανική απομόνωση για δίκτυο MVDC πλοίου. [23]



Σχήμα 8: Τοπολογία DC/DC μετατροπέα με τάση τριών επιπέδων και διέλευση από το μηδέν (3-level ZVS) για παροχή δικτύου DC. [25]

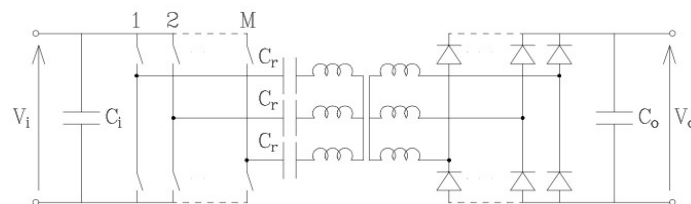
Στη βιβλιογραφία είναι δυνατό να βρεθούν πολλοί ακόμα DC/DC μετατροπείς τύπου SST μεγάλης ισχύος σχεδιασμένοι για άλλες εφαρμογές εκτός από MVDC συστήματα πλοίου. Για παράδειγμα στο [29] εξετάζεται ένας μετατροπέας DC/DC για ανεμογεννήτριες συνδεδεμένες σε DC δίκτυα. Ο μετατροπέας διαθέτει στο στάδιο εισόδου μία πλήρη γέφυρα τριών επιπέδων τάσης, μία γέφυρα διόδων σχήματος H στη βαθμίδα εξόδου και ένα μετασχηματιστή μέσης συχνότητας που συνδέει την πλευρά AC της εισόδου με την πλευρά AC της εξόδου. Τα δεδομένα του μετατροπέα που σχεδιάστηκε είναι: ονομαστική ισχύς $P_n = 2.5\text{MW}$, τάση εισόδου $V_i = 5.4\text{kV}$, τάση εξόδου $V_o = 250\text{V}$, συχνότητα μετασχηματιστή $f_s = 2\text{kHz}$. Ωστόσο, πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ένα εργαστήριο πρωτότυπο 1-kW με μειωμένη τάση εισόδου και συχνότητα $f_s = 5\text{kHz}$.

Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο μετατροπέας για ηλεκτρικό σιδηρόδρομο με αρθρωτή δομή, που αναπτύχθηκε και σχεδιάστηκε στο [30], η τοπολογία του οποίου παρουσιάζεται στο σχήμα 9. Στην περίπτωση αυτή, οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε ένα πρωτότυπο το οποίο αποτελείται από μόνο μία μονάδα ισχύος 70kW με $V_i = 666\text{V}$, $V_o = 750\text{V}$ και $f_s = 13\text{kHz}$.



Σχήμα 9: Η τοπολογία του DC/DC μετατροπέα που προτείνεται στο [30].

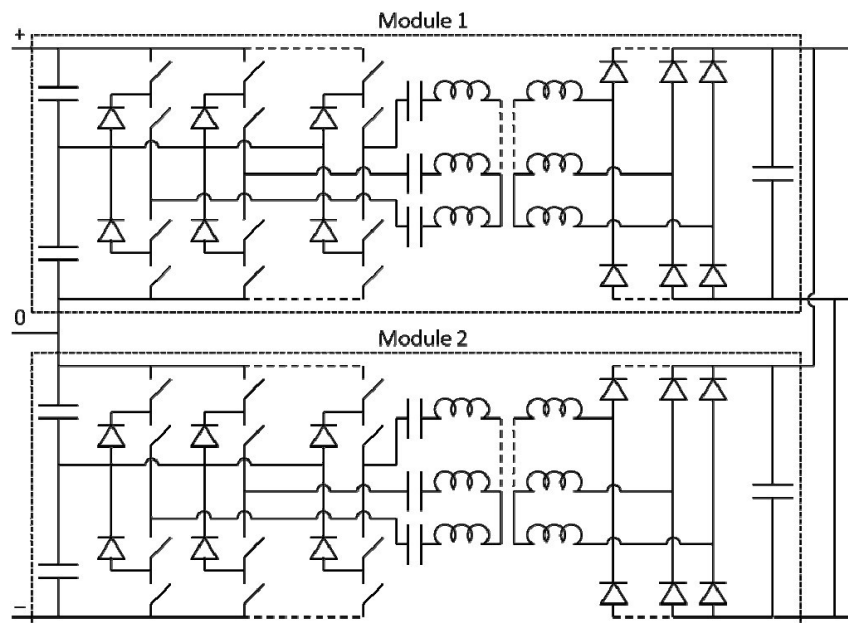
Στα [31] και [32] μελετάται διεξοδικά ο πολυφασικός DC/DC μετατροπέας συντονισμού που φαίνεται στο σχήμα 10. Η λειτουργία του δοκιμάστηκε σε ένα πρωτότυπο 5kW με $V_i = 400\text{V}$ και $f_s = 100\text{kHz}$. Το στάδιο εισόδου αποτελείται από M-φασικό αντιστροφέα δύο επιπέδων τάσης εξοπλισμένο με πλήρως ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία, ενώ το στάδιο εξόδου αποτελείται από αντίστοιχο ανορθωτή με διόδους. Το κύκλωμα συντονισμού φάσης αποτελείται από τους πυκνωτές C_r και τα πηνία του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας εναλλασσόμενου ρεύματος, συνδεδεμένα και τα δύο σε αστέρα ή τρίγωνο, που συνδέουν την πλευρά εισόδου με την εξόδου.



Σχήμα 10: Η τοπολογία του πολυφασικού DC/DC μετατροπέα συντονισμού που μελετάται στα [31] και [32].

Οι συγγραφείς στο [1] τελικά καταλήγουν ότι η καλύτερη λύση για μετασχηματιστή στερεάς κατάστασης στο MVDC δίκτυο ενός πλοίου είναι ένας καινοτόμο πολυφασικό σύστημα DC/DC ηλεκτρονικού μετατροπέα με NPC που απαρτίζεται από δύο μονάδες (two-module NPC multi-phase SST). Η μέθοδος πολλαπλών φάσεων προσφέρει το πλεονέκτημα του διαμοιρασμού της ενεργειακής ροής μεταξύ πολλών στελεχών του μετατροπέα και οδηγεί στην υλοποίηση λύσεων με υψηλή ανοχή σε σφάλματα υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει ένα σύστημα ελέγχου που επιτρέπει την λειτουργία του μετατροπέα με χαμηλότερο επίπεδο ισχύος στην περίπτωση σφάλματος σε ένα τμήμα του. Αν η ροή ισχύος είναι μόνο προς τη μία κατεύθυνση, τα στελέχη της εξόδου μπορεί να χρησιμοποιούν διόδους. Από την άλλη, αν απαιτείται αμφίδρομη ροή ισχύος τότε είναι απαραίτητα πλήρως ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία όπως IGBTs και IGCTs. Επίσης, τα τμήματα του μετατροπέα μπορούν να έχουν δομή δυο ή τριών επιπέδων, ανάλογα με την ονομαστική τάση.

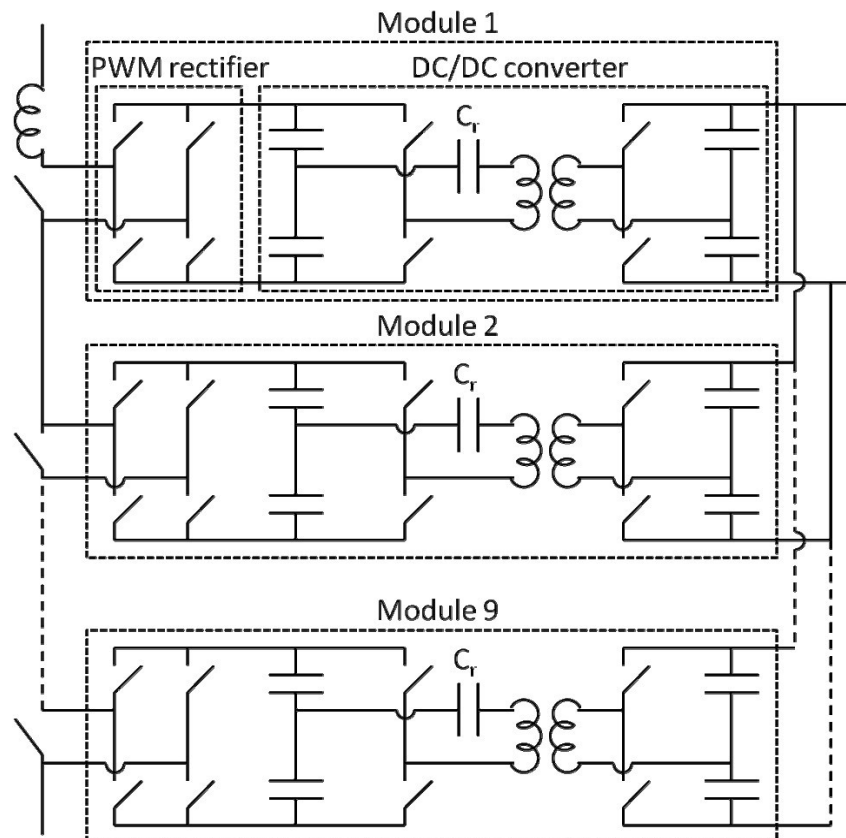
Για τον SST σε συστήματα διανομής DC με τρεις αγωγούς, λοιπόν, οι συγγραφείς του [1] προτείνουν τον DC/DC μετατροπέα πολλαπλών φάσεων που αποτελείται από δύο μονάδες και απεικονίζεται στο σχήμα 11. Τεχνολογία για την υλοποίηση του μετατροπέα θα μπορούσε να είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στους σύγχρονους μετατροπείς των ηλεκτρικών σιδηρόδρομων. Οι μοντέρνοι μετατροπείς των ηλεκτροκινούμενων τρένων, έχουν αρθρωτή δομή όπως αυτή που περιγράφηκε στο [30]. Κάθε λειτουργική μονάδα περιλαμβάνει ένα μετασχηματιστή μέσης συχνότητας, το οποίο συνεπάγεται περιορισμό του βάρους και του μεγέθους. Έχει αποδειχθεί ότι με αυτόν τον τρόπο μετασχηματισμού της τάσης μπορεί να επιτευχθεί μια μείωση του βάρους κατά 50%, συμπεριλαμβανομένου του μετασχηματιστή και του φίλτρου, σε σχέση με τους μετασχηματιστές χαμηλής συχνότητας [33].



Σχήμα 11: DC/DC μετατροπέας τριών επιπέδων τάσης, πολλαπλών φάσεων, αποτελούμενος από δύο μονάδες. [1]

Στο [34] παρουσιάζεται ένα σύστημα αρθρωτών μετατροπέων σιδηροδρόμων που ονομάζεται Power Electronic Traction Transformer (PETT), όπως φαίνεται και στο σχήμα 12. Ένας πιλοτικός PETT έχει εγκατασταθεί σε μία σιδηροδρομική μηχανή ελιγμών που λειτουργεί αυτή τη στιγμή σε έναν ελβετικό σταθμό. Αυτός απαρτίζεται από εννέα στοιχεία (modules) των 1.2 MW έκαστο, εκ των οποίων μόνο τα οκτώ είναι απαραίτητα για τη λειτουργία του μετατροπέα, ενώ ο ένατος είναι για εφεδρεία. Η τάση εισόδου είναι 15kV στα 16.7Hz, η DC

τάση ζεύξης (dc-link) του κάθε στοιχείου είναι 3.6kV και η DC τάση εξόδου είναι 1.5kV. Το συνολικό βάρος, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος ψύξης, είναι 4500kg και η πυκνότητα ισχύος του μετασχηματιστή και του ανορθωτή είναι μεταξύ 0.20-0.35 kVA/kg. Ωστόσο, το σύστημα δεν ήταν βελτιστοποιημένο σε αυτή την πρώτη πιλοτική εγκατάσταση, η οποία προορίζεται κυρίως για την αξιολόγηση της τεχνολογίας. Στους μελλοντικούς PETT που βρίσκονται υπό ανάπτυξη αναμένεται η επίτευξη πυκνότητας ισχύος 0,5-0.75kVA/kg.



Σχήμα 12: Διάγραμμα του δικτύου του μετασχηματιστή DC τάσης Power Electronic Traction Transformer (PETT). [1]

Οι PETT θα μπορούσαν με ελάχιστες τροποποιήσεις να χρησιμοποιηθούν κάλλιστα τόσο στο υποσύστημα διανομής και προστασίας όσο και στο υποσύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ενός πλοίου με MVDC.

6.4 Βιβλιογραφία 6^ο Κεφαλαίου

- [1] 2014_Castellan et al_Power Electronics for All-Electric Ships with MVDC Power Distribution System - an Overview.
- [2] G. Sulligoi, A. Tessarolo, V. Benucci, M. Baret, A. Rebor, A. Taffone, *Modeling, Simulation, and Experimental Validation of a Generation System for Medium-Voltage DC Integrated Power Systems*, IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 46, No. 4, pp. 1304-1310, July/August 2010.
- [3] G. Sulligoi, A. Tessarolo, V. Benucci, A. Millerani Trapani, M. Baret, F. Luise, *Shipboard power generation*, IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 19, No. 4, pp. 47-55, July/August 2013.
- [4] R. Magureanu, M. Albu, V. Bostan, A.-I. Doka, *Synchronous and induction generators operating at variable speed in DC networks*, in Proc. of International Conference on Electrical Machines (ICEM), Paper ID 1347, Vilamoura (Portugal), 6-9 September 2008.
- [5] T. Ahmed, K. Nishida, M. Nakaoka, *A novel stand-alone induction generator system for AC and DC power generation*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 43, No. 6, pp. 1465 – 1474, November/December 2007.
- [6] P. Kollensperger, C. Meyer, U. Schwarzer, S. Schroder, R. W. De Doncker, *High-power converter systems for high-speed generators*, in Proc. of European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden (Germany), 10-15 September 2005.
- [7] S. Castellan, A. Tessarolo, *High-power electric drives for all-electric ships*, in Proc. of International conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), CD paper no. 340, Montecarlo (Monaco), 25-28 March 2010.
- [8] P. Manuelle, B. Singam, S. Siala, *Induction Motors Fed by PWM MV7000 Converters Enhance Electric Propulsion Performance*, in Proc. of European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona (Spain), 8-10 September 2009.
- [9] A.K. Adnanes, *A survey of concepts for electric propulsion in conventional and ice breaking OSVs*, in Proc. of Propulsion & Emission Conference, Gothenburg (Sweden), 21-22 May 2008.
- [10] J. Rodriguez, S. Bernet, P.K. Steimer, I.E. Lizama, *A survey on Neutral-point-clamped inverters*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 7, pp. 2219-2230, July 2010.
- [11] 2012 - Αποστολόπουλος - Έλεγχος κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων.
- [12] C. Davidson, G. de Preville, *The future of high power electronics in transmission and distribution power systems*, in Proc. of European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona (Spain), 8-10 September 2009.
- [13] M.E. Baran, N.R. Mahajan, *Overcurrent protection on voltagesource-converter-based multiterminal DC distribution systems*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, pp. 406412, January 2007.
- [14] R.M. Cuzner, G. Venkataramanan, *The status of DC micro-grid protection*, in Proc. of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Edmonton (Alberta - Canada), 5-9 October 2008.
- [15] R. Schmerda, R. Cuzner, R. Clark, D. Nowak, S. Bunzel, *Shipboard solid-state protection*, IEEE Electrification Magazine, Vol. 1, No.1, pp. 32-39, September 2013.

- [16] 2013_Prousalidis, Kourmpelis - Setting a Computer Simulation Platform for Passenger Ships DC Distribution Networks[RINA CONFERENCE]
- [17] 2013_Kim, Kwasinski_Evaluation of Fault Management Using Active Power Distribution Nodes
- [18] 2014_Advanced DC zonal marine power system protection
- [19] D. Jovcic, *Bidirectional, high-power DC transformer*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, pp. 2276-2283, October 2009.
- [20] R.W. De Doncker, C. Meyer, R.U. Lenke, F. Mura, *Power electronics for future utility applications*, in Proc. of International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp. K-1–K-8, Bangkok (Thailand), 27-30 November 2007.
- [21] D. Jovcic, B.T. Ooi, *Developing DC transmission networks using DC transformers*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 4, pp. 2535-2543, October 2010.
- [22] D. Jovcic, *Step-up DC-DC converter for megawatt size applications*, IET Power Electronics, Vol.2, No.6, pp.675-685, November 2009.
- [23] I.-Y. Chung, W. Liu, M. Andrus, K. Schoder, S. Leng, D.A. Cartes, M. Steurer, *Integration of a bi-directional DC-DC converter model into a large-scale system simulation of a shipboard MVDC power system*, in Proc. of IEEE Electric Ship Technology Symposium, pp. 318-325, Baltimore (MD – USA), 20-22 April 2009.
- [24] G. Ortiz, J. Biela, D. Bortis, J.W. Kolar, *1 Megawatt, 20 kHz, isolated, bidirectional 12kV to 1.2kV DC-DC converter for renewable energy applications*, in Proc. of International Power Electronics Conference, pp. 3212-3219, Sapporo (Japan), 21-24 June 2010.
- [25] B.M. Song, R. McDowell, A. Bushnell, J. Ennis, *A Three-Level DC–DC Converter With Wide-Input Voltage Operations for Ship-Electric-Power-Distribution Systems*, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 32, No. 5, pp. 1856-1863, October 2004.
- [26] B.R. Lin, C.H. Chao, *Analysis, Design, and Implementation of a Soft-Switching Converter With Two Three-Level PWM Circuits*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 4, pp. 1700-1709, April 2013.
- [27] B.R. Lin, C.H. Chao, *Analysis of an interleaved three-level ZVS Converter with series-connected transformers*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 7, pp. 3088-3099, July 2013.
- [28] E. Chu, X. Hou, H. Zhang, M. Wu, X. Liu, *Novel zero-voltage and zero-current switching (ZVZCS) PWM three-level DC/DC converter using output coupled inductor*, IEEE Transaction on Power Electronics, Vol.29, No.3, pp. 1082-1092, March 2014.
- [29] F. Deng, Z. Chen, *Control of Improved Full-Bridge Three-Level DC/DC Converter for Wind Turbines in a DC Grid*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 1, pp. 314-324, January 2013.
- [30] H. Cha, R. Ding, Q. Tang, F.Z. Peng, *Design and Development of High-Power DC–DC Converter for Metro Vehicle System*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44, No. 6, pp. 1795-1804, November/December 2008.
- [31] J. Jacobs, A. Averberg, R.W. De Doncker, *Multi-phase series resonant DC-to-DC converters: stationary investigations*, in Proc. of Power Electronics Specialists Conference, pp. 660-666, Recife (Brasil), 12-16 June 2005.
- [32] J. Jacobs, A. Averberg, S. Schroder, R.W. De Doncker, *Multiphase series resonant DC-to-DC converters: transient investigations*, in Proc. Of Power Electronics Specialists Conference, pp. 1972-1978, Recife (Brasil), 12-16 June 2005.

[33] S. Bernet, *Recent Developments of High Power Converters for Industry and Traction Applications*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 15, No. 6, pp. 1102-1117, November 2000.

[34] M. Claessens, D. Dujic, F. Canales, J.K. Steinke, P. Stefanutti, C. Vetterli, *Traction transformation – A power-electronic traction transformer (PETT)*, ABB Review, No. 1/2012, pp. 1117.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:
Συμπεράσματα – Επίλογος

Στη διπλωματική εργασία αυτή μελετήθηκαν τα ΣΗΕ πλήρως εξηλεκτρισμένων πλοίων στα οποία χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα για τη διανομή ισχύος και παρουσιάστηκαν διάφορες εφαρμογές, με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, καθώς και τα πλέον επικρατούντα συστήματα παραγωγής, αποθήκευσης και κατανάλωσης ενέργειας που θα μπορούσαν να εγκατασταθούν σε ένα τέτοιου είδους ηλεκτρικό δίκτυο.

Όπως φάνηκε, το DC σύστημα είναι κατάλληλο και έχει δοκιμαστεί εδώ και κάποια χρόνια σε μικρά και μεσαία πλοία όπως ρυμουλκά (tugboats), σκάφη ανεφοδιασμού θαλάσσιας πλατφόρμας (PSVs), επιβατηγά (ferries), ποταμόπλοια και γενικά οποιοδήποτε σκάφος έχει έντονες και συχνές διακυμάνσεις ισχύος και πλέουν σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες ή κατοικημένες περιοχές. Η DC διανομή μελετάται και έχει ήδη εφαρμοστεί σε κάποιες περιπτώσεις πολεμικών πλοίων, στα οποία έχουν αυξηθεί κατακόρυφα τα ηλεκτρικά τους φορτία λόγω των νέων οπλικών συστημάτων.

Στις τοπολογίες με συνεχές ρεύμα μπορούμε να επιτύχουμε μεγάλη εξοικονόμηση χώρου, βάρους και καυσίμου ως συνέπεια της μείωσης των διαστάσεων του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, το οποίο έχει τη δυνατότητα για λειτουργία σε υψηλότερες στροφές και στη βέλτιστη ταχύτητα ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ, και της μείωσης του αριθμού και του μεγέθους των μετασχηματιστών.

Για το μέλλον φαίνεται ότι, η εξέλιξη των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, των κυψελών καυσίμου και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, των οποίων η διασύνδεση στο δίκτυο με συνεχή τάση τα καθιστά ιδιαίτερα ευνοϊκά για τα συστήματα που μελετήσαμε, θα είναι μείζονος σημασίας ώστε να επιτευχθεί περαιτέρω εξοικονόμηση χώρου και καυσίμου, αλλά και μείωση των ρύπων, ζητήματα τα οποία είναι τα πλέον φλέγοντα για τη σύγχρονη ναυτιλία. Επιπλέον, αφαιρώντας τους περιορισμούς της σταθερής συχνότητας εξόδου μπορεί να ανοίξει ο δρόμος για ποικίλες τοπολογίες γεννητριών, για μερικές από τις οποίες έχουμε εμπειρία λειτουργίας σε βιομηχανικές εφαρμογές και δεν έχουν ποτέ χρησιμοποιηθεί σε πλοία. Τέτοιες είναι οι διαφόρων ειδών μηχανές υψηλών στροφών, κατάλληλες για να διασυνδεθούν με αεριοστρόβιλους υψηλής ταχύτητας για εξαιρετικά μεγάλης πυκνότητας ισχύος μονάδες παραγωγής με μικρό βάρος και όγκο.

Γενικά, το DC-Ship περιέχει ένα ηλεκτρικό σύστημα στο οποίο είναι δυνατή, πολύ εύκολα, η μεταβολή του αριθμού και του είδους των πηγών ηλεκτρικής ενέργειας και των καταναλωτών, των επιπέδων ισχύος αλλά και επιπλέον εκμοντερνισμοί των σημαντικότερων στοιχείων του. Τα εναλλακτικά τροποποιημένα και εξελιγμένα κυριότερα μέρη του που μπορεί να κατασκευαστούν κατά την επόμενη εικοσαετία –η τυπική διάρκεια ζωής ενός πλοίου– θα είναι πιο εύκολο να εγκατασταθούν σε ένα σκάφος με DC διανομή επειδή δεν θα δεσμεύονται από τα χαρακτηριστικά ενός συγκεκριμένου συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος, ούτε θα απαιτείται επανασχεδιασμός του γενικού ηλεκτρικού πίνακα.