



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

**Διερεύνηση αξιοποίησης συστήματος γεννήτριας
άξονα σε δεξαμενόπλοιο**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστόφορος Μ. Γεωργίου

Επιβλέπων: Ιωάννης Μ. Προυσαλίδης , Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα καθηγητή Ιωάννη Μ. Προυσαλίδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής αυτής της διπλωματικής εργασίας. Μου έδωσε μεγάλη καθοδήγηση και πολύτιμες παρατηρήσεις προκειμένου να μελετήσω το θέμα από διάφορες οπτικές γωνίες.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένεια και τους φίλους μου, για τη συνεχή υποστήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάζει την αξιοποίηση της περίσσειας ισχύος εγκατεστημένου συστήματος γεννήτριας άξονα σε δεξαμενόπλοιο, η οποία προκύπτει μετά από αφαίρεση υδραυλικής αντλίας. Αρχικά, γίνεται μια ανασκόπηση της ιστορίας των γεννητριών άξονα και επεξηγούνται οι παράγοντες που επηρέασαν την εξάπλωση της τεχνολογίας των αξονικών γεννητριών. Στη συνέχεια, η τεχνολογία των γεννητριών άξονα αναλύεται διεξοδικά και επεξηγούνται οι τρόποι λειτουργίας, οι διατάξεις γεννητριών άξονα που είναι διαθέσιμες καθώς και τα πλεονεκτήματα τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική άποψη. Επιπλέον, περιγράφεται η αλληλεπίδραση μεταξύ της κύριας μηχανής και της αξονικής γεννήτριας, προκειμένου να καθίσταται δυνατή, η αξιόπιστη λειτουργία και των δύο μηχανολογικών συστημάτων. Με βάση τα δεδομένα του υπάρχοντος δεξαμενόπλοιου αναλύεται το εγκατεστημένο σύστημα αξονικής γεννήτριας και δημιουργείται ένα ισοδύναμο λειτουργικό προφίλ λαμβάνονται υπόψη τον ηλεκτρικό ισολογισμό και τα εγχειρίδια λειτουργίας του κινητήρα. Με όλα τα απαραίτητα στοιχεία διαθέσιμα, πραγματοποιείται μελέτη σεναρίων για τη βελτίωση του συστήματος τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής άποψης. Εξετάζεται αρχικά, η εγκατάσταση πακέτου μπαταριών προκειμένου να συγκεντρώνει την περίσσεια ισχύος που δεν χρησιμοποιείται εν πλω, και η εκμετάλλευση του, σε διάφορες καταστάσεις του πλοίου. Επιπλέον γίνεται μελέτη απεγκατάστασης της αξονικής γεννήτριας και κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, με τις ήδη εγκατεστημένες βοηθητικές γεννήτριες. Ωστόσο, τα αποτελέσματα, και στις δύο περιπτώσεις, δεν ήταν θετικά. Τέλος, γίνεται τεchnοοικονομική μελέτη, εγκατάστασης ναυτικής πλυντρίδας με χρήση υπολειμματικού καυσίμου έναντι της αποκλειστικής χρήσης αποσταγματικού καυσίμου, για χρονικό ορίζοντα δέκα ετών, και υπολογίζεται η διάρκεια απόσβεσης της επένδυσης.

Abstract

The purpose of this Diploma Thesis is to utilize the excess power of an installed shaft generator system on a tanker, which is a result of a hydraulic pump removal. Firstly, the history of shaft generators is reviewed and the factors that influenced the spread of shaft generator technology are explained. Shaft generator technology is then thoroughly analysed and the modes of operation, the available shaft generator layouts, and the advantages from both an economic and environmental point of view are explained. In addition, the interaction between the main engine and the shaft generator is described in order to enable the reliable operation of both mechanical systems. Based on the data of the existing tanker, the installed shaft generator system is analysed and an equivalent operational profile is created, taking into account the electrical loads and engine operating manuals. With all the necessary data available, a study of various scenarios is carried out to improve the system from both a technical and financial point of view. Initially, the installation of a battery pack, in order to gather the excess power not used on board and exploit it in various states of the ship, is considered. In addition, a study is being conducted to uninstall the shaft generator and cover the energy needs with the already installed auxiliary generators. However, the results, in both cases, were not positive. Finally, a techno-economic study for the installation of a marine scrubber was conducted and compared to the use of distillate fuel for a period of ten years, and the investment's payback period was calculated.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή	17
1.1	Ιστορική αναδρομή.....	17
1.2	Κατηγορίες Αξονικών Γεννητριών.	19
1.2.1	Σύγχρονες Γεννήτριες.....	19
1.2.2	Ασύγχρονες Γεννήτριες	19
1.2.3	Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος.....	19
1.3	Τρόποι Λειτουργίας Αξονικών Γεννητριών.....	19
1.3.1	Γεννήτρια - PTO (Power Take Off).....	19
1.3.2	PTI (Power Take In) – booster mode	20
1.3.3	Υβριδική Λειτουργία.....	20
1.3.4	Electrical Cross Connection Mode.....	21
1.4	Η αξιοποίηση των γεννητριών άξονα στη σημερινή εποχή	22
1.4.1	EEDI – Δείκτης σχεδίασης ενεργειακής απόδοσης	22
1.4.2	EEXI – Δείκτης ενεργειακής απόδοσης υφιστάμενων Πλοίων.....	24
1.4.3	Slow Steaming	24
2	Τύποι και διατάξεις αξονικών γεννητριών λειτουργίας PTO	25
2.1	Τύποι αξονικών γεννητριών	25
2.1.1	PTO Gear Constant Ratio (GCR).....	25
2.1.2	PTO/ RCF (Renk Constant Frequency)	28
2.1.3	PTO/ CFE (Constant Frequency Electrical).....	29
2.1.4	Σύγκριση απόδοσης των τεχνολογιών γεννήτριας άξονα.....	31
2.2	Διατάξεις αξονικών γεννητριών	32
2.2.1	Σύστημα PTO στο πρωραίο τμήμα και εντός της κύριας μηχανής (BW I)...	33
2.2.2	Σύστημα PTO στο πρωραίο τμήμα και εκτός της κύριας μηχανής (BW II) .	34
2.2.3	Σύστημα PTO στο πρωραίο τμήμα και πλευρικά της κύριας μηχανής (BW III)	35
2.2.4	Σύστημα PTO στο πρυμναίο τμήμα και πλευρικά της κύριας μηχανής (BW IV)	36
2.2.5	Σύστημα PTO πάνω στον ενδιάμεσο άξονα (SMG).....	36
2.2.6	Σύστημα PTO στο πρωραίο τμήμα του στροφαλοφόρου άξονα (DMG)	37
2.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αξονικών γεννητριών	39
2.3.1	Πλεονεκτήματα	39
2.3.2	Μειονεκτήματα	40
3	Επίδραση της λειτουργίας PTO στη φόρτιση της κύριας μηχανής	42
3.1	Περιθώρια ισχύος και στροφών που εξετάζονται.....	42

3.1.1	Περιθώριο θάλασσας (Sea margin – SM).....	42
3.1.2	Περιθώριο ελαφριάς φόρτισης (Light running margin - LR)	44
3.1.3	Περιθώριο μηχανής (Engine margin-EM).....	45
3.2	Διάγραμμα φόρτισης κινητήρα με ΡΤΟ.....	46
3.2.1	Λειτουργία με γεννήτρια άξονα (ΡΤΟ) και έλικα δεδομένου βήματος FPP	49
3.2.2	Έλικες ελεγχόμενου βήματος στο διάγραμμα φόρτισης κινητήρα.....	50
3.2.3	Λειτουργία με γεννήτρια άξονα και έλικα ρυθμιζόμενου βήματος CPP(Λειτουργία σταθερών στροφών)	51
3.2.4	Διάγραμμα πεδίου λειτουργίας με γεννήτρια άξονα και έλικα ρυθμιζόμενου βήματος CPP(Λειτουργία καμπύλης συνδυασμού).....	52
4	Μελέτη συστήματος γεννήτριας άξονα σε δεξαμενόπλοιο	53
4.1	Δεδομένα του υπό μελέτη πλοίου	53
4.2	Σύστημα αξονικής γεννήτριας του υπό μελέτη πλοίου	55
4.3	Ηλεκτρικός ισολογισμός του υπό μελέτη πλοίου	59
4.4	Προφίλ λειτουργίας.....	61
5	Μελέτη σεναρίων βελτιστοποίησης εγκατεστημένου συστήματος αξονικής γεννήτριας	67
5.1	Σενάριο 1 ^ο – Εγκατάσταση συστήματος Μπαταριών.....	67
5.1.1	Αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας της μπαταρίας	67
5.1.2	Βασικοί παράμετροι της μπαταρίας	68
5.1.3	Μπαταρίες ιόντων λιθίου	69
5.1.4	Κάθοδος νικελίου-μαγνησίου-κοβαλτίου (NMC).....	70
5.1.5	Κάθοδος λιθίου-σιδήρου-φωσφόρου (LFP).....	71
5.1.6	Διαστασιολόγηση διάταξης μπαταριών στο υπό μελέτη πλοίο	72
5.1.6.1	1 ^η εφαρμογή εγκατάστασης μπαταριών	72
5.1.6.2	2 ^η εφαρμογή εγκατάστασης μπαταριών	77
5.2	Σενάριο 2 ^ο – Κατάργηση εγκατάστασης γεννήτριας άξονα	81
5.2.1	Κατανάλωση καυσίμου κύριας μηχανής.....	81
5.2.2	Κατανάλωση βοηθητικών γεννητριών	82
5.2.3	Ώρες λειτουργίας ΡΤΟ και βοηθητικών γεννητριών	83
5.2.4	Οικονομική ανάλυση.....	84
5.2.4.1	Κόστος καυσίμων (Fuel Costs)	84
5.2.4.2	Περιβαλλοντικοί φόροι (Taxes)	85
5.2.4.3	Λειτουργικά κόστη και κόστη συντήρησης (O&M Costs).....	86
5.2.4.4	Συνολικό κόστος λειτουργίας	87
5.3	Σενάριο 3 ^ο – Εγκατάσταση ναυτικής πλυντρίδας δέσμμευσης οξειδίων του θείου (Scrubber)	88
5.3.1	Εισαγωγή.....	88
5.3.2	Μέθοδοι συμμόρφωσης στους ισχύοντες κανονισμούς	89

5.3.3	Ναυτικές πλυντρίδες δέσμευσης οξειδίων του θείου (Scrubber)	89
5.3.3.1	Τύποι scrubber υγρού τύπου	90
5.3.3.2	Τύποι πύργων απορρόφησης	91
5.3.4	Μελέτη εγκατάστασης ναυτικής πλυντρίδας	92
5.3.4.1	Βασικά χαρακτηριστικά ναυτικής πλυντρίδας	92
5.3.4.2	Ηλεκτρικός Ισολογισμός στην Αναβαθμισμένη Εγκατάσταση και Επιλογή Πλυντρίδας	93
5.3.5	Οικονομική Αξιολόγηση της Μετασκευής	95
5.3.5.1	Κατανάλωση καυσίμου	95
5.3.5.2	Κατανάλωση λιπαντικών κύριας μηχανής	97
5.3.5.3	Λειτουργικά έξοδα λόγω χρήσης ναυτικής πλυντρίδας	98
5.3.5.4	Κόστος εγκατάστασης συστήματος ναυτικής πλυντρίδας	100
5.3.5.5	Οικονομική αξιολόγηση	101
5.3.5.6	Αποτελέσματα μελέτης	102
6	Συμπεράσματα	103
6.1	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	104
7	Βιβλιογραφία	105

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Μεταβολή παγκόσμιας τιμής του πετρελαίου 1946-2022 (WTI, 2022)	17
Σχήμα 1.2: Όρια θείου που εισήγαγε ο IMO σύμφωνα με το παράρτημα VI της MARPOL (WINGD, 2019)	18
Σχήμα 1.3: Περίγραμμα της λειτουργίας PTO (MAN Diesel & Turbo, 2016).....	20
Σχήμα 1.4: Περίγραμμα της λειτουργίας PTO (MAN Diesel & Turbo, 2016).....	20
Σχήμα 1.5: Περίγραμμα της Υβριδικής λειτουργίας (MAN Diesel & Turbo, 2016)	21
Σχήμα 1.6: Περίγραμμα Λειτουργίας PTH (MAN Diesel & Turbo, 2016).....	21
Σχήμα 1.7: Περίγραμμα Λειτουργίας Cross Connection (MAN Diesel & Turbo, 2016)	22
Σχήμα 2.1: Χάρτης απόδοσης έλικας CP και λύση αυξητήρα δύο βημάτων PTO/GCR (MAN Diesel&Turbo, 2020)	26
Σχήμα 2.2: Διατομή σκάφους εξοπλισμένου με γεννήτρια άξονα και έλικα CP. Σύστημα GCR (MAN Energy Solutions, 2021).....	27
Σχήμα 2.3:Σύστημα RENK PTO/RCF, τοποθέτηση στο μπροστινό άκρο του κινητήρα (MAN Diesel&Turbo, 2020)	28
Σχήμα 2.4: Το πακέτο RENK MARHY (MAN Energy Solutions, 2021)	29
Σχήμα 2.5: Αξονική γεννήτρια τύπου PTO-CFE (Πιτταράς, 2012)	30
Σχήμα 2.6: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος προς ταχύτητα περιστροφής προπέλας (MAN Diesel&Turbo, 2020)	31
Σχήμα 2.7: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος προς ισχύ κύριας μηχανής (MAN Diesel&Turbo, 2020)	31
Σχήμα 2.8: Εναλλακτικοί τύποι και διατάξεις συστημάτων γεννήτριας άξονα. (MAN Diesel&Turbo, 2020)	33
Σχήμα 2.9: PTO BW II με εναλλάκτη τοποθετημένο μεταξύ του κιβωτίου ταχυτήτων και της δομής του κινητήρα (MAN Diesel&Turbo, 2020).....	34
Σχήμα 2.10: Ανεξάρτητη διάταξη PTO BWII έξω και μπροστά από τον κινητήρα (MAN Diesel&Turbo, 2020)	35
Σχήμα 2.11: PTO BW III/GCR (Renk) (MAN Diesel & Turbo, 2012)	35
Σχήμα 2.12: PTO BW IV/GCR, Tunnel gear (MAN Diesel & Turbo, 2012)	36
Σχήμα 2.13: Μεγάλη εγκατάσταση PTO SMG/CFE σε μεγάλο σκάφος εμπορευματοκιβωτίων. (MAN Diesel&Turbo, 2020)	37
Σχήμα 2.14 PTO DMG/CFE (MAN Diesel&Turbo, 2020).....	38
Σχήμα 3.1: Σημεία λειτουργίας πρόωσης (Λουκάκης, 2016).....	43
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα φόρτισης μηχανής (Λουκάκης, 2016).....	45
Σχήμα 3.3: Διάγραμμα φόρτισης μηχανής με σημαδεμένες γραμμές (MAN B&W, 2020).....	46
Σχήμα 3.4: Πλοίο με έλικα FPP - Πεδίο επιλογής μηχανής με γεννήτρια άξονα (Λουκάκης, 2016)	49
Σχήμα 3.5: Πλοίο με έλικα FPP - Διάγραμμα φόρτισης μηχανής με γεννήτρια άξονα (Λουκάκης, 2016)	50
Σχήμα 3.6: Καμπύλη συνδυασμού έλικας ρυθμιζόμενου βήματος (MAN B&W, 2020)	51
Σχήμα 3.7: Πλοίο με έλικα CPP. Διάγραμμα φόρτισης μηχανής με γεννήτρια άξονα (Λουκάκης, 2016)	52
Σχήμα 3.8: Διάγραμμα φορτιστής κινητήρα S50ME-C8-GI σε συνδυασμό με γεννήτρια άξονα και έλικα ρυθμιζόμενου βήματος CPP (MAN B&W, 2020)	52
Σχήμα 4.1: 16,500DWT PRODUCT/CHEMICAL IMO II TANKER (ODELY, 2012) ...	54
Σχήμα 4.2: Εύρος λειτουργίας για έλικα CP	55
Σχήμα 4.3: Διάταξη Μηχανοστασίου	56

Σχήμα 4.4: Διαστάσεις σύγχρονης γεννήτριας τύπου SE 500 (AEM Dessau GmbH, 2011).....	57
Σχήμα 4.5: Ηλεκτρονικός ρυθμιστής τάσης (AEM Dessau GmbH, 2011).....	58
Σχήμα 4.6: Περιοχή λειτουργίας αξονικής γεννήτριας.....	59
Σχήμα 4.7: Εύρος λειτουργίας αξονικής γεννήτριας σύμφωνα με λειτουργικό προφίλ.....	66
Σχήμα 5.1: Ηλεκτροχημική λειτουργία μπαταρίας κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση (Frag, 2013).....	68
Σχήμα 5.2: Ηλεκτροχημική αποθήκευση σε κυψέλη ιόντων λιθίου (Anderson, 2009).....	70
Σχήμα 5.3: Τιμές μπαταριών ιόντων λιθίου 2013-2021 (BloombergNEF, 2021)..	70
Σχήμα 5.4: Χαρακτηριστικά NMC (Bakirtzoglou, 2017).....	71
Σχήμα 5.5: Χαρακτηριστικά LFP (Bakirtzoglou, 2017).....	71
Σχήμα 5.6: Διάταξη μπαταριών στο υπό μελέτη πλοίο.....	72
Σχήμα 5.7: Διάταξη μπαταριών (Souflis - Rigas, 2021).....	73
Σχήμα 5.8: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ετήσιων εξοικονομήσεων υπάρχοντος συστήματος PTO	87
Σχήμα 5.9: Αναπαράσταση διάταξης συστήματος closed loop scrubber: (ABS, 2018).....	91
Σχήμα 5.10: Αναπαράσταση συστήματος scrubber με πύργο τύπου U (ALFA LAVAL, 2022).....	92
Σχήμα 5.11: Αριθμός BN σύμφωνα με περιεκτικότητα θείου στο καύσιμο (CHEVRON, 2020).....	98
Σχήμα 5.12: Κατανομή λειτουργικών εξόδων ναυτικής πλυντρίδας.....	100
Σχήμα 5.13: Απόσβεση επένδυσης.....	102

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1.1: Τιμές συντελεστών a, b, c για τον υπολογισμό του απαιτούμενου δείκτη EEDI (DNV, 2013).....	23
Πίνακας 1.2: Τιμές παράγοντα μείωσης X% (DNV, 2013).....	24
Πίνακας 4.1: Γενικά χαρακτηριστικά πλοίου (ODELY, 2012).....	54
Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά κύριας μηχανής.....	54
Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά βοηθητικών γεννητριών.....	54
Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά σύγχρονης γεννήτριας (AEM Dessau GmbH, 2011).....	56
Πίνακας 4.5: Αρχικός ηλεκτρικός ισολογισμός (ODELY, 2012).....	60
Πίνακας 4.6: Ανανεωμένος ηλεκτρικός ισολογισμός.....	61
Πίνακας 4.7: Προφίλ λειτουργίας σε κατάσταση ερματισμού (Ballast).....	62
Πίνακας 4.8: Προφίλ λειτουργίας σε έμφορτη κατάσταση (Laden).....	62
Πίνακας 4.9: Ισοδύναμο προφίλ λειτουργίας δεξαμενόπλοιου DNV.....	64
Πίνακας 4.10: Προφίλ λειτουργίας υπό μελέτη πλοίου χωρίς PTO.....	64
Πίνακας 4.11: Τελικό προφίλ λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου.....	65
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά μπαταριών NMC & LFP.....	73
Πίνακας 5.2: Υπολογισμός πακέτου μπαταρίας.....	75
Πίνακας 5.3: Χρόνος φόρτισης μπαταρίας.....	75
Πίνακας 5.4: Χρόνος εκφόρτισης IN PORT.....	76
Πίνακας 5.5: Χρόνος εκφόρτισης CARGO HANDLING.....	76
Πίνακας 5.6: Ενδεικτικοί Χρόνοι Αγκυροβολίου εντός Λιμανιού.....	77
Πίνακας 5.7: Χρόνος φόρτισης μπαταρίας σε κατάσταση ελιγμών.....	77
Πίνακας 5.8: Υπολογισμός πακέτου μπαταριών σε κατάσταση ελιγμών.....	77
Πίνακας 5.9: Χρόνος εκφόρτισης μπαταρίας σε κατάσταση ελιγμών.....	78
Πίνακας 5.10: Χαρακτηριστικά καταστάσεων ISO για την μέτρηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.....	78
Πίνακας 5.11: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής σε κατάσταση ελιγμών με σύστημα μπαταριών.....	79
Πίνακας 5.12: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής σε κατάσταση ελιγμών χωρίς σύστημα μπαταριών.....	79
Πίνακας 5.13: Υπολογισμός συχνότητας φόρτισης εν πλω.....	79
Πίνακας 5.14: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής εν πλω χωρίς φόρτιση.....	80
Πίνακας 5.15: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής εν πλω με φόρτιση.....	80
Πίνακας 5.16: Υπολογισμός εξοικονόμησης καυσίμου.....	80
Πίνακας 5.17: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης κύριας μηχανής με PTO.....	81
Πίνακας 5.18: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης κύριας μηχανής χωρίς PTO.....	82
Πίνακας 5.19: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου βοηθητικών γεννητριών χωρίς PTO.....	83
Πίνακας 5.20: Ετήσιες ώρες λειτουργίας χωρίς την λειτουργία PTO.....	83
Πίνακας 5.21: Ετήσιες ώρες λειτουργίας με την λειτουργία PTO.....	84
Πίνακας 5.22: Ετήσιο κόστος καυσίμου με και χωρίς PTO.....	85
Πίνακας 5.23: Συντελεστές Μετατροπής καυσίμου σε CO ₂ σύμφωνα με το EEDI (IMO, 2012).....	85
Πίνακας 5.24: Ετήσιο κόστος περιβαλλοντικού φόρου.....	86
Πίνακας 5.25: Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης.....	86
Πίνακας 5.26: Συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας.....	87
Πίνακας 5.27: Εκπομπές CO ₂ σε γραμμάρια ανά τόνο φορτίου και ανά χιλιόμετρο μεταφοράς (Παπαχαριζάνος, 2020).....	88
Πίνακας 5.28: Χαρακτηριστικά closed loop scrubber συστήματος 8MW.....	93

Πίνακας 5.29: Πρώτος ισολογισμός Ισχύος μετά την Εγκατάσταση Συστήματος scrubber	94
Πίνακας 5.30: Τελικός ισολογισμός Ισχύος μετά την Εγκατάσταση Συστήματος scrubber	94
Πίνακας 5.31: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής χωρίς σύστημα scrubber.....	96
Πίνακας 5.32: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής σύστημα scrubber	96
Πίνακας 5.33: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου βοηθητικών γεννητριών χωρίς σύστημα scrubber	96
Πίνακας 5.34: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου βοηθητικών γεννητριών με σύστημα scrubber.....	96
Πίνακας 5.35: Κόστος καυσίμου ετησίως.....	97
Πίνακας 5.36: Κατανάλωση λιπαντικού με και χωρίς σύστημα scrubber.....	97
Πίνακας 5.37: Κόστος κυλινδρέλαιου ετησίως.....	98
Πίνακας 5.38: Ετήσια λειτουργικά έξοδα λόγω χρήσης ναυτικής πλυντρίδας.....	99
Πίνακας 5.39: Κόστος εγκατάστασης συστήματος ναυτικής πλυντρίδας	101

Λίστα Εξιιώσεων

Εξίωση 1.1: EEDI που επιτυγχάνεται από ένα σκάφος στην ταχύτητα αναφοράς του.....	23
Εξίωση 1.2: Απαιτούμενη τιμή EEDI.....	23
Εξίωση 3.1.....	48
Εξίωση 3.2: Εξίωση MAN B&W.....	48
Εξίωση 3.3: Μέγιστο όριο μηχανικής ισχύς PTO.....	48
Εξίωση 3.4: PTO _M	49
Εξίωση 4.1: Σταθμισμένος μέσος.....	63
Εξίωση 4.2: Ηλεκτρική ενέργεια που πρέπει να παρέχεται στον πίνακα διανομής του πλοίου.....	65
Εξίωση 4.3: Η απορροφούμενη ισχύς PTO από κύρια μηχανή.....	65
Εξίωση 5.1: Περιθώριο ισχύος αξονικής γεννήτριας.....	72
Εξίωση 5.2: Ελάχιστη εγκατεστημένη ισχύς στο πλοίο:.....	73
Εξίωση 5.3: Αριθμός των μονάδων συνδεδεμένες σε σειρά.....	74
Εξίωση 5.4: Αριθμός των παράλληλων συστοιχιών μπαταριών.....	74
Εξίωση 5.5: Συνολικός αριθμός των μπαταριών.....	74
Εξίωση 5.6: Εγκατεστημένης ισχύς.....	74
Εξίωση 5.7: Συνολικό βάρος.....	74
Εξίωση 5.8: Συνολικός όγκος.....	74
Εξίωση 5.9: Συνολικός χρόνος φόρτισης [min].....	74
Εξίωση 5.10: Ένταση ρεύματος εκφόρτισης.....	75
Εξίωση 5.11: Ετήσια κατανάλωση καυσίμου.....	78
Εξίωση 5.12: Τιμή ειδικής κατανάλωσης καυσίμου MDO.....	78
Εξίωση 5.13: Κόστος λειτουργίας.....	84
Εξίωση 5.14: Κατανάλωση λιπαντικού κύριας μηχανής.....	97
Εξίωση 5.15: Υπολογισμός καθαρής παρούσας αξίας.....	101
Εξίωση 5.16: Υπολογισμός περιόδου αποπληρωμής.....	102

Λίστα Συντομογραφιών και Συμβόλων

AC	Alternating current
Al	Aluminium
CFE	Constant Frequency Electrical
CO	Carbon Monoxide
CO ₂	Carbon Dioxide
CPP	Controllable Pitch Propellers
DC	Direct Current
DMG	Direct Mounted Generator
DPP	Discounted Payback Period
DWT	Deadweight
ECAS	Emission Control Areas
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EEXI	Energy Efficiency Existing Ship Index
EGCS	Exhaust Gas Cleaning System/Scrubber
FPP	Fixed Pitch Propellers
GCR	Gear Constant Ratio
HFO	Heavy Fuel Oil
IMO	International Maritime Organization
LFP	Lithium Iron Phosphate LiFePO ₄
Li	Lithium
Li-Ion	Lithium-ion
MDO	Marine Diesel Oil
ME	Main Engine
MEPC	Marine Environment Protection Committee
Mn	Manganese
NaOH	Sodium Hydroxide
Ni	Nickel
NMC	Nickel Manganese Cobalt Oxide
NO	Nitrous Monoxide
NO _x	Nitrous Oxides
NPV	Net Present Value
OEM	Original equipment manufacturer
OPEC	Organization of the Petroleum Exporting Countries
PF	Power Factor
PM	Particulate Matter
PMS	Power Management System
PTH	Power Take Home
PTI	Power Take In
PTO	Power Take Off
PWM	Pulse Width Modulated
RCF	Renk Constant Frequency
SFOC	Specific Fuel Oil Consumption
SMCR	Specified Maximum Continuous Rating
SMG	Shaft Mounted Generator
SO _x	Sulphur Oxides

Πρόλογος

Οι θαλάσσιες μεταφορές έχουν αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία 40 χρόνια σε συνολική μεταφορική ικανότητα και σε αριθμό πλοίων. Σχεδόν το 90% του παγκόσμιου εμπορίου μεταφέρεται δια θαλάσσης (ICS, 2014). Ενόψει αυτής της αυξητικής τάσης, οι οδηγίες του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) γίνονται ολοένα και αυστηρότερες, και συνάμα οι πράσινες τεχνολογίες στη ναυτιλία αποτελούν αδήριτη ανάγκη. Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα από μέτρα ενεργειακής απόδοσης, μερικά από τα οποία σχετίζονται στενά με την ηλεκτρική ενέργεια. Μεταξύ των πιο υποσχόμενων εναλλακτικών λύσεων για πλοία, όσον αφορά τις μειωμένες εκπομπές και την κατανάλωση είναι τα συστήματα γεννήτριας άξονα.

Τα συστήματα γεννήτριας άξονα γνωστά και ως Power Take Off systems (PTO's), πρόκεινται, κατά κανόνα, για σύγχρονες γεννήτριες οι οποίες συνδέονται με τον κύριο κινητήρα πρόωσης και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται είτε απευθείας στο κύριο δίκτυο του πλοίου, είτε σε συγκεκριμένα φορτία επί του σκάφους. Η ανάπτυξη τους ξεκίνησε την δεκαετία του 1980 εξαιτίας τα ανάγκης που υπήρχε για εξοικονόμηση καυσίμου (MAN Diesel & Turbo, 2012). Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων συνίστανται στην αποδοτικότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της υψηλότερης απόδοσης των κύριων κινητήρων σε σύγκριση με τους βοηθητικούς, καθώς και του συναφούς μειωμένου κόστους συντήρησης. Επιπλέον, μέσω αυτής της λειτουργίας, τα PTO μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση του κύριου κινητήρα πρόωσης, καθώς μπορούν να μετατοπίσουν το σημείο λειτουργίας του πιο κοντά στο MCR του (MAN Diesel & Turbo, 2012). Επιπλέον, σε αντίστροφη λειτουργία (Power Take In - PTI's) μπορούν να προσφέρουν πρόσθετους βαθμούς ελευθερίας στην πρόωση που λειτουργούν είτε ως ενισχυτικές συσκευές πρόωσης είτε ως σύστημα πρόωσης έκτακτης ανάγκης.

Ωστόσο, ζητήματα όπως η μεταβολή της συχνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος, εξαιτίας της διακύμανσης του φορτίου της έλικας και οι περιορισμοί που προκύπτουν εξαιτίας της άμεσης σύνδεσης με την κύρια μηχανή, συχνά προβληματίζουν στην επιλογή τους. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό, πως απαιτείται μελέτη και ανάλυση, προκειμένου να γίνει σωστή διαστασιολόγηση του συστήματος, και να εξετασθεί αν η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω αξονικών γεννητριών αποτελεί κερδοφόρα επένδυση για ένα πλοίο.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η αξιολόγηση υπάρχοντος συστήματος PTO εγκατεστημένο σε δεξαμενόπλοιο με Μέγιστη Συνεχή Ισχύ (MCR) 6300 kW που παράγεται από τετράχρονο κινητήρα. Μετά από πτώση της απαίτησης σε ηλεκτρική ισχύ εν πλω, λόγω αφαίρεσης υδραυλικής αντλίας (Framo Hydraulic Pump), το σύστημα PTO λειτουργεί σε μειωμένο συντελεστή φορτίου, και συνεπακόλουθα το σημείο λειτουργίας της κύριας μηχανής απομακρύνεται από το σημείο MCR. Πραγματοποιήθηκε μελέτη σεναρίων για την βελτίωση του συστήματος τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής άποψης. Εξετάζεται η εγκατάσταση πακέτου μπαταριών προκειμένου να συγκεντρώνει την περίσσεια ισχύος που δεν χρησιμοποιείται εν πλω, και η εκμετάλλευση του, σε καταστάσεις φορτοεκφόρτωσης (Cargo Handling) και ελιγμών (Manoeuvring). Επιπλέον γίνεται μελέτη απεγκατάστασης της Αξονικής Γεννήτριας και κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, με τις ήδη εγκατεστημένες βοηθητικές γεννήτριες (Auxiliary Generators). Τέλος γίνεται τεχνοοικονομική μελέτη, εγκατάστασης ναυτικής πλυντρίδας (Scrubber).

Τα περιεχόμενα της Διπλωματικής Εργασίας είναι τα ακόλουθα:

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η εξέλιξη των γεννητριών άξονα από την αρχή της εμφάνισής τους στη ναυτιλία έως και σήμερα. Γίνεται αναφορά στις διαθέσιμες λειτουργίες, στις κατηγορίες των γεννητριών και στην αξιοποίηση τους στην σημερινή εποχή.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται οι διάφοροι τύποι και διατάξεις των γεννητριών άξονα λειτουργίας PTO σύμφωνα με την MAN B&W. Επιπλέον, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η αλληλεπίδραση μεταξύ της κύριας μηχανής και της αξονικής γεννήτριας και περιγράφονται οι καμπύλες διαγράμματος φόρτισης της κύριας μηχανής με τη λειτουργία PTO.

Στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται μελέτη και ανάλυση των δεδομένων του υπό μελέτη δεξαμενόπλοιου. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται ανάλυση του εγκατεστημένου συστήματος αξονικής γεννήτριας και του ηλεκτρικού ισολογισμού, ενώ στην συνέχεια υπολογίζεται το προφίλ λειτουργίας του πλοίου.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται μελέτη τριών σεναρίων εκμετάλλευσης της περίσσιας ισχύος της αξονικής γεννήτριας. Αρχικά, σε πρώτο σενάριο αποθηκεύοντας την ενέργεια που προκύπτει σε συστήματα μπαταριών. Στη συνέχεια, στο δεύτερο σενάριο εξετάζεται, η κατάργηση της εγκατεστημένης αξονικής γεννήτριας και η αντικατάσταση της από τις βοηθητικές γεννήτριες. Τέλος, στο τρίτο σενάριο διερευνάται η εγκατάσταση ναυτικής πλυντρίδας.

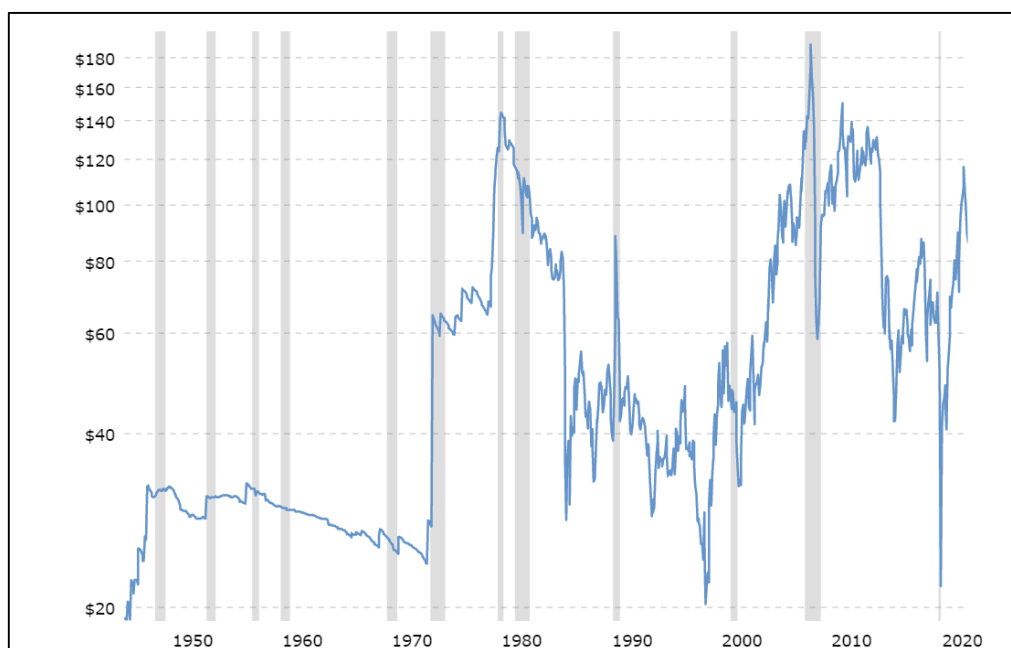
Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη και την ανάλυση των τριών σεναρίων και παρατίθενται προτάσεις περαιτέρω μελέτης και έρευνας που θα μπορούσαν να απασχολήσουν επόμενη εργασία.

1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι απαραίτητη για την ομαλή και ασφαλή λειτουργία ενός πλοίου και η παραγωγή της συχνά διερευνάται ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο οικονομική. Οι γεννήτριες ντίζελ και οι γεννήτριες άξονα είναι οι δύο κύριες μέθοδοι παραγωγής ενέργειας σε ένα πλοίο. Η θεμελιώδης διάκριση είναι ότι οι γεννήτριες άξονα λαμβάνουν μηχανική ισχύ από το αξονικό σύστημα πρόωσης του πλοίου, ενώ οι γεννήτριες ντίζελ, όπως είναι γνωστό, είναι εντελώς ανεξάρτητες από αυτό το σύστημα.

1.1 Ιστορική αναδρομή

Οι δεκαετίες του 1970 και 1980 στιγμάτισαν την ναυτιλία. Αρχικά δύο κρίσεις, μία οικονομική και μία πολιτική, συναντήθηκαν τον Οκτώβριο του 1973, με δραματικές και μακροπρόθεσμες συνέπειες για τις διεθνείς σχέσεις. Στις 6 Οκτωβρίου, η Αίγυπτος και η Συρία εξαπέλυσαν επίθεση στο Ισραήλ και μέσα σε λίγες μέρες, οι μεγάλοι Άραβες παραγωγοί πετρελαίου ανακοίνωσαν την υποστήριξή τους μέσω της χρήσης του «όπλου πετρελαίου», συμπεριλαμβανομένου του μποϊκοτάζ των προμηθειών σε χώρες φιλικές προς το Ισραήλ. Ο Οργανισμός Εξαγωγών Πετρελαιοπαραγωγών Χωρών (OPEC), αποτελούμενου από τις αραβικές χώρες του περσικού κόλπου, την Συρία, την Αίγυπτο και την Τυνησία, δήλωσε τότε μονομερώς μια απότομη αύξηση της τιμής του πετρελαίου. Ως αποτέλεσμα, επικράτησε διεθνής πανικός και παγκόσμια ύφεση. Σε μόλις τρεις μήνες, οι τιμές του αργού πετρελαίου τετραπλασιάστηκαν. Η ευπάθεια της Δύσης είχε αποκαλυφθεί, κρατείτο όμηρος από το πετρέλαιο. Ωστόσο, παρά τις προσπάθειες αντιμετώπισης αυτής της εξάρτησης από τις εισαγωγές πετρελαίου τα επόμενα χρόνια, η Ιρανική Επανάσταση του 1979 προκάλεσε μια περαιτέρω άνοδο των τιμών. (Venn, 2002). Η μεγάλη αύξηση στην τιμή του πετρελαίου, όπως παρατηρείται και στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 1.1) έχει ως επακόλουθο, την εύρεση τρόπων εξοικονόμησης καυσίμου, για την βιωσιμότητα των εταιριών και γενικότερα του εμπορίου.

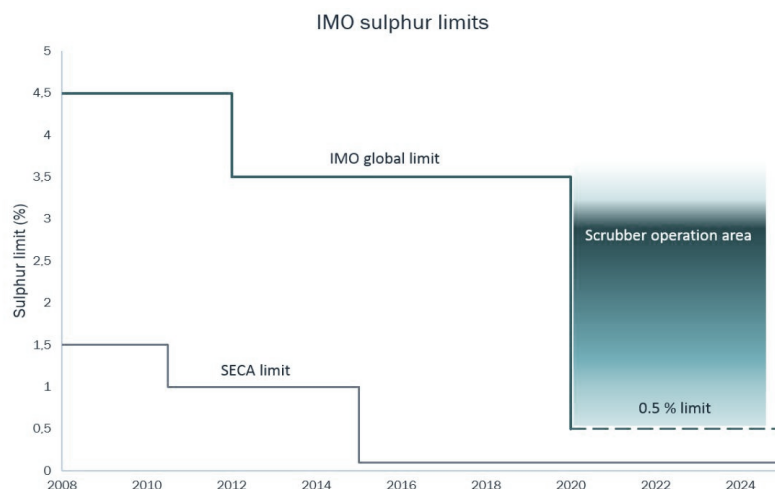


Σχήμα 1.1: Μεταβολή παγκόσμιας τιμής του πετρελαίου 1946-2022 (WTI, 2022)

Εκείνη την περίοδο οι τετράχρονες ντιζελογεννήτριες, αδυνατούσαν να λειτουργήσουν με βαρύ πετρέλαιο (HFO) το οποίο, ήταν μακράν ο πιο οικονομικός τύπος πετρελαίου. Οι γεννήτριες άξονα, οι οποίες λάμβαναν μηχανική ισχύ από τους κύριους δίχρονους κινητήρες, λειτουργούσαν με βαρύ πετρέλαιο. Επιπλέον, ο βαθμός απόδοσης των δίχρονων κινητήρων ντίζελ, ήταν υψηλότερος από αυτόν των τετράχρονων κινητήρων, με αποτέλεσμα χαμηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου στην πρώτη περίπτωση, γεγονός που παρατηρείται μέχρι και σήμερα (MAN Diesel & Turbo, 2012). Καθαυτό τον τρόπο η χρήση αξονικής γεννήτριας οδηγούσε σε σημαντική εξοικονόμηση και καθιερώθηκε ως μια από τις κυριότερες πρακτικές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρά τα σημαντικά οικονομικά οφέλη της μεθόδου των γεννητριών άξονα, παρατηρήθηκαν αρκετά προβλήματα. Το σημαντικότερο εξ αυτών, ήταν η άμεση εξάρτηση των στροφών της γεννήτριας από τις στρόφες της έλικας του πλοίου, γεγονός που προκαλούσε πρόβλημα μη σταθερής ηλεκτρικής συχνότητας. Έτσι ήταν αδύνατη η λειτουργία των περισσοτέρων ηλεκτρικών μηχανημάτων του πλοίου. Επίσης, σε προηγούμενες εφαρμογές, οι αξονικές γεννήτριες δεν μπορούσαν να λειτουργήσουν στο λιμάνι, είτε ήταν εγκατεστημένη γεννήτρια άξονα είτε όχι, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο λιμάνι γενικά καλυπτόταν από τετράχρονη γεννήτρια (Pavlou, et al., 2005).

Στις μέρες μας, αναπτύχθηκαν διαφορετικοί τύποι και διάφορες φυσικές διαμορφώσεις γεννητριών άξονα. Οι αναφορές δείχνουν ότι αρκετοί πλοιοκτήτες εξακολουθούν να θεωρούν μια γεννήτρια άξονα ως ελκυστική επένδυση, σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, δεξαμενόπλοια (MAN Diesel & Turbo, 2012). Λόγω της τεχνολογικής προόδου, οι γεννήτριες ντίζελ είναι πιο αποδοτικές από ποτέ και λειτουργούν με το ίδιο καύσιμο που χρησιμοποιούν οι μεγάλοι δίχρονοι κινητήρες. Ενώ, μετά τον νέο κανονισμό του IMO, ο οποίος τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2020, γνωστός ως «IMO 2020», περιορίζεται το θείο στο καύσιμο που χρησιμοποιείται στα πλοία που λειτουργούν εκτός καθορισμένων περιοχών ελέγχου εκπομπών σε 0,50% m/m (μάζα κατά μάζα) (IMO, 2019). Σε συγκεκριμένες καθορισμένες περιοχές ελέγχου εκπομπών (ECAS) τα όρια ήταν ήδη αυστηρότερα (0,10%) (Σχήμα 1.2). Ως αποτέλεσμα, το οικονομικό βαρύ πετρέλαιο (HFO) με περιεκτικότητα σε θείο 3,5% μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία του κύριου κινητήρα και των γεννητριών ντίζελ μόνο με την εγκατάσταση ναυτικής πλυντρίδας καυσαερίων (Scrubber). Τέλος, η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC) στην 78^η σύνοδο, συμφώνησε να ορίσει ολόκληρη τη Μεσόγειο Θάλασσα ως περιοχή ελέγχου εκπομπών (ECAS), από το 2025 (MEPC, 2022).



Σχήμα 1.2: Όρια θείου που εισήγαγε ο IMO σύμφωνα με το παράρτημα VI της MARPOL (WINGD, 2019)

Υπό αυτές τις συνθήκες, σε συνδυασμό με τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα των αξονικών γεννητριών, τίθεται το ερώτημα αν πλέον οι γεννήτριες άξονα είναι περισσότερο συμφέρουσες από τις ντιζελογεννήτριες για να καλύψουν τις ανάγκες του πλοίου σε ηλεκτρική ενέργεια.

1.2 Κατηγορίες Αξονικών Γεννητριών.

1.2.1 Σύγχρονες Γεννήτριες

Δέχονται κίνηση από μηχανικό, υδραυλικό, ηλεκτρικό σύστημα και έχουν διάταξη που εξασφαλίζει τη λειτουργία της γεννήτριας με σταθερή συχνότητα. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο φαινόμενο της αυτεπαγωγής. Μετατρέπεται η μηχανική ισχύ από τον κύριο κινητήρα σε εναλλασσόμενο ρεύμα με σταθερή τάση και συχνότητα. Στις Σύγχρονες Γεννήτριες η συχνότητα είναι ανάλογη με την περιστροφή του Ρότορα και επομένως σταθερή. Αποτελούν τη κυρίαρχη επιλογή για τις διατάξεις γεννήτριας άξονα (Prousalidis, 2015), (Pavlou, 2005).

1.2.2 Ασύγχρονες Γεννήτριες

Λειτουργούν με μεταβλητή συχνότητα διέγερσης στο κύκλωμα του δρομέα. Ωστόσο, οι ασύγχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως ως ηλεκτροκινητήρες (Prousalidis, 2015), (Pavlou, 2005).

1.2.3 Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος

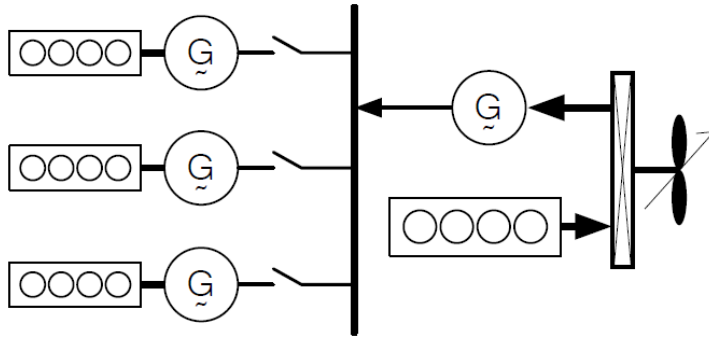
Συνδέονται στο σύστημα ισχύος του πλοίου μέσω της χρήσης ενός μετατροπέα. Αυτή η διαμόρφωση χρησιμοποιήθηκε πρωτίτερα, ωστόσο, το υψηλό κόστος κατασκευής, συντήρησης, λειτουργίας των γεννητριών DC, τις μετατρέπει σε ασύμφορη επιλογή (Prousalidis, 2015), (Pavlou, 2005).

1.3 Τρόποι Λειτουργίας Αξονικών Γεννητριών.

Εκτός από πιο αποδοτική, η Γεννήτρια Άξονα ενισχύει την ευελιξία του Συστήματος Πρόωσης καθώς μπορεί να λειτουργεί με διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας.

1.3.1 Γεννήτρια - PTO (Power Take Off)

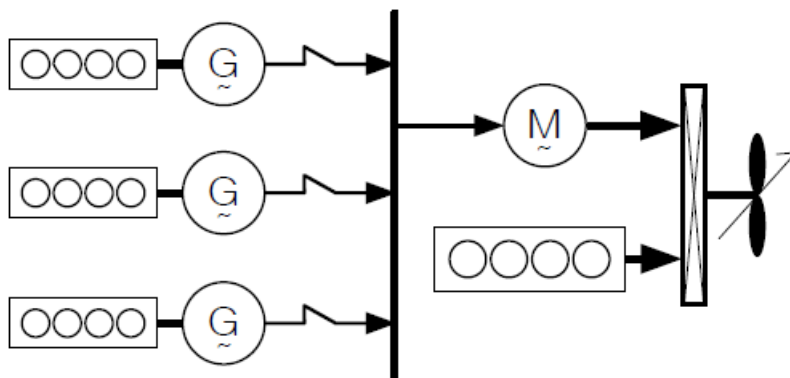
Ο κύριος κινητήρας (ME) παρέχει μηχανική ισχύ στη γεννήτρια άξονα, η οποία συνδέεται απευθείας με αυτόν. Αυτή η λειτουργία χρησιμοποιείται κυρίως κατά την πλεύση όταν η ταχύτητα του άξονα παραμένει σταθερή. Με αυτόν τον τρόπο, η γεννήτρια παράγει την ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται το πλοίο κατά την πλεύση. Υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει πλεόνασμα μηχανικής ισχύος, η γεννήτρια μπορεί να παράγει περαιτέρω ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (E.S.S.) όπως οι μπαταρίες Li-ion. Επιπλέον, η πρόσθετη μηχανική ισχύς που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία PTO, βελτιώνει την αξιοποίηση του ME και κατά συνέπεια την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), ελαχιστοποιώντας τις εκπομπές (SO_x, NO_x, CO₂) και το αποτύπωμα άνθρακα (Carbon Footprint) του πλοίου. Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, το PTO μειώνει τις ώρες εργασίας των βοηθητικών γεννητριών, καθώς η γεννήτρια άξονα παρέχει ισχύ το 60% του χρόνου πλεύσης. Ως αποτέλεσμα, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης μειώνεται δραστικά (Pavlou, 2005), (MAN Diesel & Turbo, 2016).



Σχήμα 1.3: Περιγραφή της λειτουργίας PTO (MAN Diesel & Turbo, 2016)

1.3.2 PTI (Power Take In) – booster mode

Αυτή η λειτουργία χρησιμοποιείται για την επίτευξη μέγιστης ταχύτητας. Η γεννήτρια άξονα λειτουργεί ως ηλεκτροκινητήρας που λαμβάνει ηλεκτρική ισχύ από τις βοηθητικές ντιζελογεννήτριες μέσω του κύριου πίνακα διανομής και παράγει μηχανική ισχύ που παρέχεται στον άξονα της προπέλας. Η λειτουργία PTI προσφέρει ευελιξία, ώστε να μην υπερφορτώνεται η κύρια μηχανή σε προσπάθεια να επιτευχθεί μεγαλύτερη ταχύτητα και σε περίπτωση έκτακτης. Επιπλέον, η μείωση του φορτίου της κύριας μηχανής επιφέρει ελάττωση δονήσεων και θορύβων που προέρχονται από το μηχανοστάσιο, γεγονός σημαντικό σε επιβατηγά πλοία και δεξαμενόπλοια για την μεγαλύτερη άνεση των επιβατών/πελατών. Ωστόσο, αυξάνει την κατανάλωση καθώς λειτουργούν όλοι οι κινητήρες του πλοίου και επομένως αυξάνονται οι εκπομπές ρύπων. Αυτή η λειτουργία δεν έχει ληφθεί υπόψη σε αυτήν τη διατριβή καθώς αναζητούμε βελτιωμένη απόδοση (MAN Diesel & Turbo, 2016).

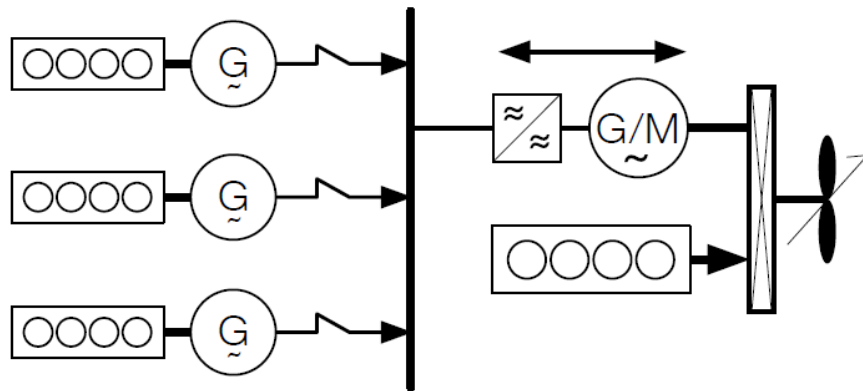


Σχήμα 1.4: Περιγραφή της λειτουργίας PTI (MAN Diesel & Turbo, 2016)

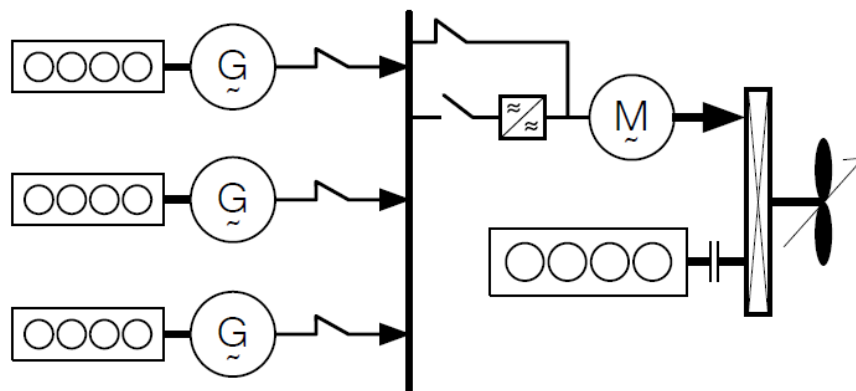
1.3.3 Υβριδική Λειτουργία

Η υβριδική λειτουργία αποτελεί την κατάσταση που συνδυάζει τη λειτουργία PTO και PTI. Η γεννήτρια άξονα μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως γεννήτρια όσο και ως ηλεκτροκινητήρας. Ενισχύεται, έτσι η ευελιξία της διάταξης και μεγιστοποιείται η επιτευχθείσα απόδοση. Μια άλλη ενδιαφέρουσα λειτουργία είναι η Power Take Home (PTH) που είναι χρήσιμη κυρίως για μικρά πλοία με μικρή ζήτηση ισχύος πρόωσης. Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, π.χ. αποτυχία του Κύριου Κινητήρα, η προπέλα μπορεί να λάβει μηχανική ισχύ αποκλειστικά από τη γεννήτρια άξονα, που λειτουργεί ως ηλεκτροκινητήρας όπως στη λειτουργία PTI και παράγει μηχανική ισχύ. Τέλος, είναι δυνατή η χρήση της γεννήτριας άξονα ως

ενίσχυση για την ταχεία πτώση των στροφών της κύριας μηχανής σε περίπτωση που αυτή είναι αναγκαία για την αποφυγή ατυχήματος (crash stop) (MAN Diesel & Turbo, 2016).



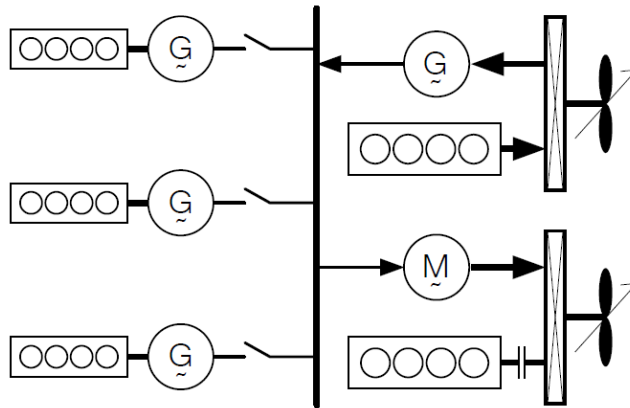
Σχήμα 1.5: Περίγραμμα της Υβριδικής λειτουργίας (MAN Diesel & Turbo, 2016)



Σχήμα 1.6: Περίγραμμα Λειτουργίας PTH (MAN Diesel & Turbo, 2016)

1.3.4 Electrical Cross Connection Mode

Αυτή η διάταξη αναφέρεται μόνο σε διπλέλικα πλοία και προσφέρει τη δυνατότητα μιας κύριας μηχανής να παρέχει ισχύ και σε δύο έλικες. Αυτό συμβαίνει χρησιμοποιώντας τη γεννήτρια άξονα στον έναν άξονα ως PTO και στον άλλο ως PTI που παρέχει την ισχύ πρόωσης. Αυτή η λειτουργία προσφέρει ευελιξία και επιτρέπει υψηλή φόρτιση του κύριου κινητήρα που λειτουργεί. Επιπλέον, επιτυγχάνεται μειωμένη φθορά στο σύστημα πρόωσης.



Σχήμα 1.7: Περίγραμμα Λειτουργίας Cross Connection (MAN Diesel & Turbo, 2016)

1.4 Η αξιοποίηση των γεννητριών άξονα στη σημερινή εποχή

Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου είναι ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο IMO με μια σειρά κανονισμών μέσω της MARPOL. Η παγκόσμια ναυτιλία ευθύνεται για περίπου το 3% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ (IMO, 2014). Κατά συνέπεια, την τελευταία δεκαετία παρατηρούνται στο χώρο της ναυτιλίας συνεχείς αλλαγές που έχουν ως στόχο την εξοικονόμηση καυσίμου και την προστασία του περιβάλλοντος από την εκπομπή ριπών.

Ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης (EEDI) του IMO ισχύει για νέα πλοία, με τον δείκτη ενεργειακής απόδοσης υφιστάμενων Πλοίων (EEXI) να στοχεύει σε υπάρχοντα πλοία. Έχουν οριστεί ανώτατα όρια για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και η τιμή EEDI ή EEXI κάθε πλοίου πρέπει να είναι κάτω από το σχετικό μέγιστο. Οι απαιτήσεις γίνονται αυστηρότερες κάθε πέντε χρόνια προκειμένου να προωθηθεί η συνεχής τεχνική ανάπτυξη (IMO, 2022).

Οι ιδιοκτήτες πλοίων, οι ναυπηγοί και οι κατασκευαστές εξαρτημάτων (OEMs) εξετάζουν διάφορες τεχνολογίες για να διασφαλίσουν ότι τα πλοία, τόσο υπάρχοντα, όσο και νέας κατασκευής, θα συμμορφώνονται με τις αυξανόμενες απαιτήσεις. Οι γεννήτριες άξονα, είναι εύκολο να ενσωματωθούν σε υπάρχοντα και νεότευκτα πλοία και αποτελούν μια δοκιμασμένη και καθιερωμένη λύση, η οποία μπορεί να επηρεάσει το φαινόμενο του slow steaming και το δείκτη EEDI και EEXI (ABB, 2022).

1.4.1 EEDI – Δείκτης σχεδίασης ενεργειακής απόδοσης

Ο «Δείκτη Σχεδίασης για Ενεργειακή Απόδοση» (EEDI), ο οποίος είναι αναγκαίος πλέον για κάθε νέα σχεδίαση πλοίο (Λουκάκης, 2016), λαμβάνει υπόψη την ταχύτητα σχεδιασμού του σκάφους και τα φορτία σχεδιασμού και επομένως δεν απαιτούνται δοκιμές. Βασίζεται σε υπάρχοντες κανονισμούς, ενώ εκφράζει την ποσότητα μάζας CO₂ που εκπέμπεται ανά μεταφορικό έργο, βλ. Εξίσωση 1.1 (ABB, 2022; IMO, 2012).

Το EEDI απαιτεί ένα ελάχιστο επίπεδο ενεργειακής απόδοσης ανά μίλι χωρητικότητας για διαφορετικού τύπου και μεγέθους πλοία. Από την 1η Ιανουαρίου 2013, μετά από μια αρχική φάση δύο ετών, ο σχεδιασμός του νέου πλοίου πρέπει να πληροί το επίπεδο αναφοράς για τον τύπο του πλοίου (IMO, 2022).

Το EEDI είναι βασισμένος στην απόδοση, και αφήνει στη βιομηχανία την επιλογή των τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα συγκεκριμένο σχέδιο πλοίου. Εφόσον επιτυγχάνεται το απαιτούμενο επίπεδο ενεργειακής απόδοσης, οι

σχεδιαστές και οι κατασκευαστές πλοίων είναι ελεύθεροι να χρησιμοποιούν τις πιο οικονομικές λύσεις ώστε το πλοίο να συμμορφώνεται με τους κανονισμούς.

Εξίσωση 1.1: EEDI που επιτυγχάνεται από ένα σκάφος στην ταχύτητα αναφοράς του.

$$EEDI = \frac{CO_2 \text{ emissions}}{Transport \text{ work}} \left[\frac{gCO_2}{tons \cdot nm} \right]$$

- $Transport \text{ work} = \text{Χωρητικότητα} \cdot \text{Ταχύτητα αναφοράς}^1$

Όπως προαναφέρθηκε, έχει οριστεί ένα ανώτατο επιτρεπόμενο όριο, που ο δείκτης EEDI ενός πλοίου δεν πρέπει να υπερβεί(Εξίσωση 1.2) (IMO, 2012).

Εξίσωση 1.2: Απαιτούμενη τιμή EEDI.

$$Req \ EEDI = a \cdot b^{-c}$$

- Οι συντελεστές a, b, c είναι διαφορετικοί ανάλογα με το είδος και την χωρητικότητα κάθε πλοίου, όπως παρατηρείται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.1).

Πίνακας 1.1: Τιμές συντελεστών a, b, c για τον υπολογισμό του απαιτούμενου δείκτη EEDI (DNV, 2013)

Ship type	a	b	c
Bulk carriers	961.79	DWT	0.477
Gas carriers	1120.20	DWT	0.456
Tankers	1218.80	DWT	0.488
Container ships	174.22	DWT	0.201
General cargo ships	107.48	DWT	0.216
Refrigerated cargo ships	227.01	DWT	0.244
Combination carriers	1219.00	DWT	0.488
Vehicle / car carriers	(DWT/GT)-0.7 · 780.36 where DWT/GT < 0.3; (DWT/GT)-0.7 · 1812.63 where DWT/GT ≥ 0.3	DWT	0.471

Επιπλέον, η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του EEDI ενός πλοίου μειώνεται με βάση έναν παράγοντα μείωσης X% κάθε 5 χρόνια. Ο παράγοντας μείωσης όπως φαίνεται στον (Πίνακας 1.2) παίρνει διαφορετικές τιμές ανάλογα με το είδος, την χωρητικότητα και την χρονική περίοδο λειτουργίας ενός πλοίου. Για πλοία με πρόσθετο βάρος (DWT) μεγαλύτερο από αυτό που αναγράφεται στον πίνακα, η μείωση που επέρχεται είναι η μέγιστη ανάλογα με την χρονική περίοδο (phase) λειτουργίας.

¹ Η ταχύτητα αναφοράς υπολογίζεται στο 75% MCR χρησιμοποιώντας τις καμπύλες ισχύος του πλοίου.

Πίνακας 1.2: Τιμές παράγοντα μείωσης X% (DNV, 2013)

Ship type	Size in DWT	Phase 0 1 Jan 2013 – 31 Dec 2014	Phase 1 1 Jan 2015 – 31 Dec 2019	Phase 2 1 Jan 2020 – 31 Dec 2024	Phase 3 1 Jan 2025 and onwards
Bulk carriers	10.000 – 20.000	n/a	0-10	0-20	0-30
Tankers	2.000 – 10.000	n/a	0-10	0-20	0-30
Gas carries	4.000 – 20.000	n/a	0-10	0-20	0-30
Container ships	10.000 – 15.000	n/a	0-10	0-20	0-30
General cargo ships	3.000 – 15.000	n/a	0-10	0-20	0-30
Refrigerated cargo ships	3.000 – 5.000	n/a	0-10	0-20	0-30
Combined carrier	4.000 – 20.000	n/a	0-10	0-20	0-30
Vehicle / car carriers ²	10.000 and above	n/a	5	15	30
Ro-Ro cargo ships	1.000 – 2.000	n/a	0-5	0-20	0-30
LNG carries ³	10.000 and above	n/a	10	20	30

Ωστόσο, αποδεικνύεται από μελέτες ότι ο EEDI, κάνει υπερεκτίμηση της μείωση των εκπομπών σε σύγκριση με την πραγματικότητα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα πλοία λειτουργούν με χαμηλότερη ισχύ από το 75% που χρησιμοποιεί η EEDI ως αναφορά (Lindstad & Bø, 2018).

1.4.2 EEXI – Δείκτης ενεργειακής απόδοσης υφιστάμενων Πλοίων

Το EEXI θα εφαρμοστεί τον Ιούνιο του 2021. Το EEXI είναι ένας δείκτης που αναφέρεται σε υπάρχοντα πλοία. Αυτός ο δείκτης δεν απαιτεί δοκιμές και ακολουθεί παρόμοια φόρμουλα με το EEDI. Για τα υπάρχοντα πλοία που συμμορφώνονται με τη Φάση 2 και τη Φάση 3 του EEDI, ο νέος δείκτης δεν χρειάζεται να υπολογιστεί. Η επίδρασή του στη μείωση των εκπομπών CO₂ μπορεί να αποδειχθεί λιγότερο δραστική από εκείνη του EEDI (DNV, 2021)

Το EEXI ακολουθεί τον ίδιο τύπο με το EEDI για τον υπολογισμό και εκφράζει το g CO₂ που παράγεται ανά [tons nm]. Εάν ένα πλοίο έχει πλεύσει σε φάση προ-EEDI, η ταχύτητα αναφοράς του θα υπολογιστεί σύμφωνα με τις καμπύλες ισχύος του. Ως αποτέλεσμα, τα αδελφά πλοία θα έχουν την ίδια ταχύτητα αναφοράς.

1.4.3 Slow Steaming

Το Slow steaming αναφέρεται στην πρακτική που ακολουθούν τα τελευταία χρόνια οι ναυτιλιακές εταιρίες της λειτουργίας των πλοίων τους σε χαμηλά ή πολύ χαμηλά φορτία επιδιώκοντας την μέγιστη οικονομία καυσίμου ανά ναυτικό μίλι με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα.

Από την θεωρία πρόωσης πλοίου (Πολίτη, 2018) γνωρίζουμε ότι η συνολική αντίσταση του πλοίου είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας πλεύσης. Συνεπώς, με την μείωση της ταχύτητας υπηρεσίας μειώνεται εκθετικά η αντίσταση του πλοίου, με αποτέλεσμα η ισχύς ρυμούλκησης που απαιτείται, και ορίζεται ως το γινόμενο των δυο μεγεθών, να μειώνεται επίσης σε μεγάλο βαθμό και, τέλος, να επιτυγχάνεται ελάττωση της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου.

Το slow steaming προσέφερε σημαντικά οικονομικά οφέλη στις εταιρίες εξαιτίας της εξοικονόμησης του καυσίμου. Η τιμή του πετρελαίου την τελευταία δεκαετία παρουσίασε σημαντική διακύμανση, ο κύριος παράγοντας για την διακύμανση αυτή ήταν η οικονομική κρίση που ξέσπασε το 2008 εξαιτίας της εξοικονόμησης του καυσίμου, του οποίου η τιμή μετά την κρίση του 2008 έχει παρουσιάσει μεγάλη αύξηση. Ενδεικτικά η τιμή του βαρέος πετρελαίου το πρώτο τέταρτο του 2006 ήταν περίπου 300 USD/ton στο ξέσπασμα της κρίσης η τιμή άγγιξε την υψηλότερη τιμή στα χρονικά, το τρίτο τέταρτο του 2008 η τιμή έφτασε περίπου 680 USD/ton (Πυργολιός, 2014).

Παρόλα αυτά, το γεγονός πως η κύρια μηχανή λειτουργεί με πολύ χαμηλή ισχύ, σε επίπεδα χαμηλότερα του 60% της μέγιστης προβλεπόμενης τιμής του κατασκευαστή, προκαλεί αρκετά προβλήματα. Εκτός από μηχανολογικά ζητήματα που αφορούν κυρίως στην λειτουργία του υπερπληρωτή και του συστήματος λιπάνσεως των κυλίνδρων, τα οποία δεν θα απασχολήσουν την παρούσα μελέτη, σημαντική είναι η μείωση της αποδοτικότητας του κινητήρα. Ο βαθμός απόδοσης της κύριας μηχανής περιορίζεται ιδιαίτερα και, συνεπώς, η ειδική κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται σε μη επιθυμητά επίπεδα.

Η χρήση αξονικών γεννητρών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (λειτουργία ΡΤΟ) έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά οφέλη όσον αφορά το παραπάνω θέμα. Με την εκμετάλλευση της περίσσιας ισχύος που προκύπτει λόγω του slow steaming, προκαλείται αύξηση του φορτίου του κινητήρα και συνεπώς και της ισχύος του, καθώς πέρα από τις απαιτήσεις για την ρυμούλκηση του πλοίου καλείται να καλύψει και τις απαιτήσεις της γεννήτριας άξονα για μηχανική ισχύ. Το σημαντικό είναι πως παράλληλα με την αύξηση του φορτίου, οι στροφές και η ταχύτητα του πλοίου δεν μεταβάλλονται, αλλά παραμένουν στα επιθυμητά, για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, επίπεδα. Επομένως, η χρήση αξονικών γεννητριών προκαλεί μείωση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου και αύξηση της αποδοτικότητας του κινητήρα στην περίπτωση του slow steaming, γεγονός με σημαντικό οικονομικό αντίκτυπο στην λειτουργία ενός πλοίου.

2 Τύποι και διατάξεις αξονικών γεννητριών λειτουργίας ΡΤΟ

2.1 Τύποι αξονικών γεννητριών²

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες διαθέσιμες στην αγορά για την επίτευξη λειτουργίας ΡΤΟ. Η σύγκριση αυτών των τεχνολογιών βασίζεται στους βαθμούς απόδοσης, στα παράθυρα λειτουργίας τους, στα εξαρτήματά τους και στην πολυπλοκότητά τους. Μια άλλη ενδιαφέρουσα παράμετρος είναι τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού ρεύματος. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι απαραίτητο το ηλεκτρικό ρεύμα να έχει σταθερή συχνότητα και τάση. Η επεξεργασία των τεχνολογιών γεννήτριας άξονα γίνεται κυρίως με τη λήψη πληροφοριών από την MAN D&T (MAN Diesel & Turbo, 2012).

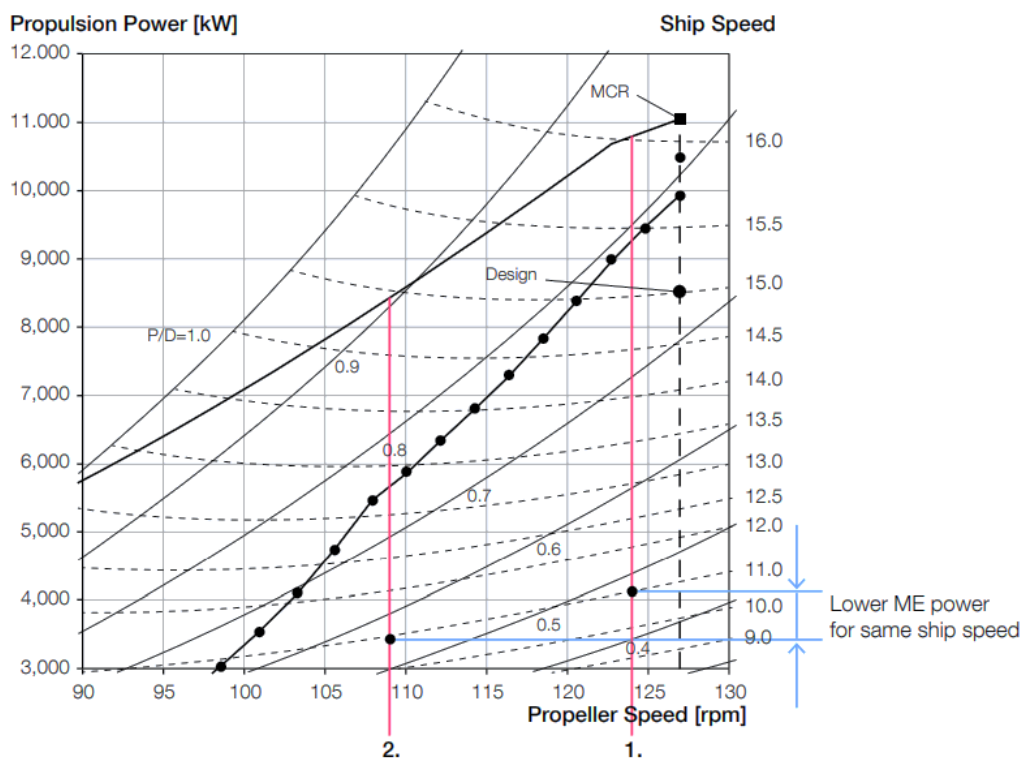
2.1.1 ΡΤΟ Gear Constant Ratio (GCR)

Το σύστημα ΡΤΟ/GCR αποτελεί το απλούστερο σύστημα, καθώς αποτελείται από τη σύγχρονη γεννήτρια και έναν αυξητήρα στροφών (step up gear). Είναι το φθηνότερο διαθέσιμο σύστημα ΡΤΟ και είναι ελκυστικό για πολλούς πλοιοκτήτες προκειμένου να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με σταθερή συχνότητα κατά τη

² Αναφερόμενος στη Γεννήτρια Άξονα, περιγράφεται ως μια διάταξη ΡΤΟ. Ισχύς από τον κύριο κινητήρα χρησιμοποιείται για την κίνηση μιας γεννήτριας με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

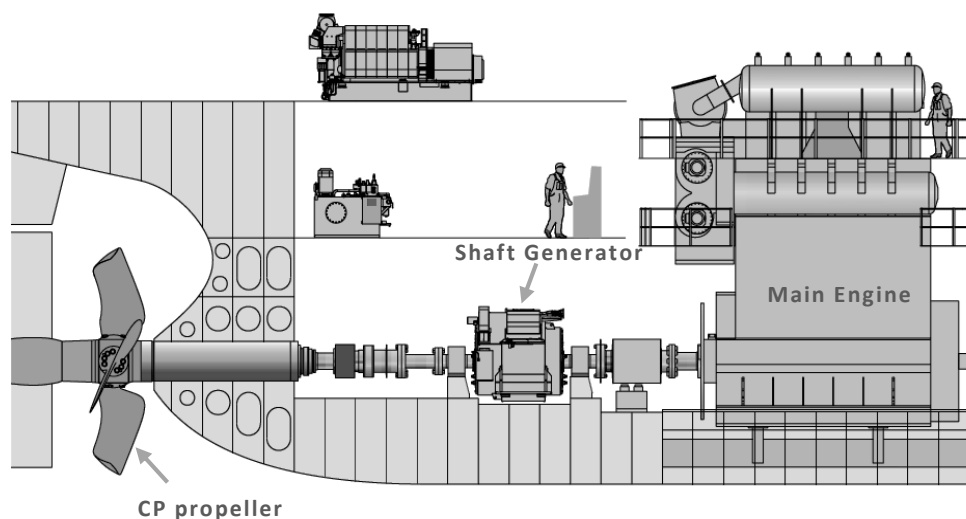
διάρκεια ενός ταξιδιού. Η ηλεκτρική συχνότητα υπολογίζεται ως $f = \frac{p \cdot n}{2 \cdot 60}$, όπου p είναι ο αριθμός των πόλων και n είναι η ταχύτητα του κινητήρα [RPM]. Ως εκ τούτου, είναι κρίσιμο να διατηρηθούν οι στροφές σχετικά σταθερές. Για το λόγο αυτό, οι εφαρμογές GCR συνδυάζονται κυρίως με έλικες ελεγχόμενου βήματος (CPP) για να διασφαλιστεί ότι η σταθερή ταχύτητα και η σταθερή συχνότητα της προπέλας είναι διαθέσιμες σε ένα ευρύ φάσμα ισχύος του κινητήρα. Ωστόσο, λόγω των διακυμάνσεων της συχνότητας που λαμβάνουν χώρα ακόμη και υπό σταθερές στροφές κινητήρα, το σύστημα GCR δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μακροχρόνια παράλληλη λειτουργία με τις βοηθητικές γεννήτριες. Επίσης, η έλικα CP θα λειτουργεί με μειωμένη απόδοση σε σχεδόν μηδενικό βήμα ενώ, το κόστος της, αυξάνει σημαντικά το κόστος του συστήματος. Έτσι, προσφέρονται εναλλακτικές διαμορφώσεις (Sarigiannidis, et al., 2016) (MAN Diesel & Turbo, 2012) (Pavlou, 2005) (MAN Energy Solutions, 2021). Έτσι, προσφέρονται εναλλακτικές διαμορφώσεις. Το κόστος των ελίκων CP, ωστόσο, αυξάνει το κόστος του συστήματος.

Μια ενδιαφέρουσα λύση για να αποφευχθεί η απεμπλοκή της γεννήτριας άξονα θα ήταν η επιλογή αυξητήρα δύο βημάτων (two - step gear) προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η απαιτούμενη ηλεκτρική συχνότητα (MAN Diesel&Turbo, 2020).



Σχήμα 2.1: Χάρτης απόδοσης έλικας CP και λύση αυξητήρα δύο βημάτων PTO/GCR (MAN Diesel&Turbo, 2020)

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1, στις 124 rpm., η δεξιά καμπύλη εύρους ισχύος No.1 βρίσκεται 2-3% κάτω από το 100% rpm. Σε αυτή την ταχύτητα προπέλας, μπορεί να δημιουργήσει ένα από τα δύο γρανάζια ενός συστήματος GCR δύο βημάτων, ηλεκτρική ενέργεια με σταθερή συχνότητα, για παράδειγμα, στους 60 κύκλους. Αλλά χάρη στη διάταξη του κιβωτίου ταχυτήτων δύο βημάτων, οι ίδιοι 60 κύκλοι μπορούν να επιτευχθούν με τη δεύτερη εναλλακτική επιλογή ταχύτητας που βρίσκεται στην αριστερή καμπύλη εμβέλειας ισχύος No.2 (109 rpm). Αυτό σημαίνει ότι το κιβώτιο ταχυτήτων δύο βημάτων μπορεί να παράγει ισχύ με την ίδια απόδοση σε δύο διαφορετικές ταχύτητες προπέλας, παρέχοντας και ευελιξία



Σχήμα 2.2: Διατομή σκάφους εξοπλισμένου με γεννήτρια άξονα και έλικα CP. Σύστημα GCR (MAN Energy Solutions, 2021)

σε χαμηλά φορτία.

Όταν ένα πλοίο έχει thrusters και έλικα CP, ο πίνακας διανομής μπορεί να διαμορφωθεί έτσι ώστε τα thrusters να λαμβάνουν ισχύ από τη γεννήτρια άξονα και οι γεννήτριες να χειρίζονται το υπόλοιπο φορτίο. Επειδή τα thrusters μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες, μπορούν να τροφοδοτούνται από PTO/GCR.

Ένα άλλο σημείο ανησυχίας είναι ότι το PTO/GCR μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο εύρος ισχύος κινητήρα 52% έως 90% ή στο εύρος στροφών κινητήρα 80% έως 97%. Δεδομένου ότι πολλά πλοία λειτουργούν με μειωμένα φορτία προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές ρύπων και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), αυτό το παράθυρο λειτουργίας μπορεί να είναι αρκετά μικρό για πλοία που έχουν προφίλ χαμηλής ταχύτητας. Ως αποτέλεσμα, το PTO/GCR μπορεί να αποκλειστεί για πολλές εφαρμογές.

Σε ένα πλοίο με έλικα σταθερού βήματος (FPP), το σύστημα PTO/GCR θα δημιουργούσε ηλεκτρική ενέργεια μεταβλητής συχνότητας, καθώς μεταβάλλονταν οι στροφές του κινητήρα. Λόγω της αντίστασης ή της απαιτούμενης ταχύτητας πλοίου, η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να μεταβάλλεται. Για να μειωθεί ο αριθμός των βασικών καταναλωτών που απαιτούν σταθερή συχνότητα, θα πρέπει να εγκατασταθούν μικρότεροι προσαρμοσμένοι μετατροπείς συχνότητας. Επειδή το σύστημα PTO/GCR μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο στη θάλασσα, δεν είναι πολύ ευέλικτο. Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί παράλληλα με τις βοηθητικές γεννήτριες, λόγω της μεταβολής της συχνότητας. Θα ήταν συνετό να χρησιμοποιηθεί συμπλέκτης για να αποδεσμεύσετε ο μηχανισμός κατά τη διάρκεια ελιγμών ή γενικά σε καταστάσεις χαμηλής ταχύτητας.

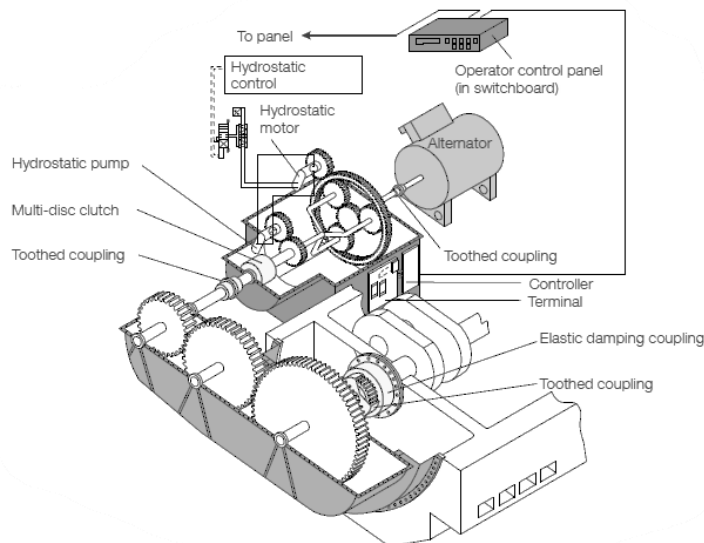
Λόγω των απωλειών 2% και 6% από το κιβώτιο ταχυτήτων και τη γεννήτρια, αντίστοιχα, η απόδοση PTO/GCR είναι περίπου 92% (MAN Diesel&Turbo, 2020).

2.1.2 PTO/ RCF (Renk Constant Frequency)

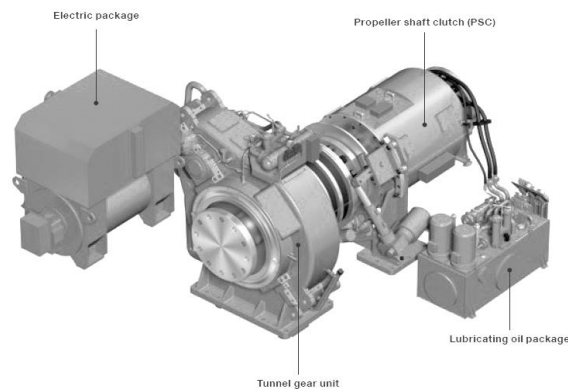
Χρησιμοποιώντας ένα ρυθμιζόμενο πλανητικό κιβώτιο ταχυτήτων, το σύστημα PTO/RCF (Σχήμα 2.3) παράγει ηλεκτρική ενέργεια με σταθερή ηλεκτρική συχνότητα σε ένα ευρύ φάσμα στροφών προπέλας. Αυτό το κιβώτιο ταχυτήτων διασφαλίζει ότι η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στη σύγχρονη γεννήτρια με σταθερές στροφές. Η RENK (Σχήμα 2.4) είναι ο μοναδικός κατασκευαστής του πλανητικού κιβωτίου ταχυτήτων. Διαθέτει ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου που ρυθμίζει το υδραυλικό σύστημα που περιστρέφει ένα επικυκλικό γρανάζι.

Χάρη στο κιβώτιο ταχυτήτων RENK, μπορεί να παρέχεται σταθερή ταχύτητα στη σύγχρονη γεννήτρια σε εύρος 35%. Το εύρος λειτουργίας για ένα τυπικό σύστημα PTO/RCF ορίζεται στο εύρος στροφών κινητήρα από 70% έως 105% ταχύτητα MCR και 34% έως 105% ισχύς MCR. Διατηρώντας σταθερή συχνότητα σε μεγάλο εύρος στροφών κινητήρα, η γεννήτρια άξονα μπορεί να παραλληλιστεί με τις βοηθητικές γεννήτριες σε ένα εύρος στροφών 35% και να χρησιμοποιηθεί με προπέλα σταθερού βήματος (FPP). Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να τροφοδοτηθεί σε όλα τα μηχανήματα του πλοίου.

Η συνολική απόδοση ενός PTO/RCF υπολογίζεται μεταξύ 88% και 91%. Ωστόσο, η αυξημένη πολυπλοκότητα και η περιορισμένη διαθεσιμότητα έχουν ως αποτέλεσμα υψηλότερα έξοδα επένδυσης και συντήρησης, καθιστώντας αυτή την επιλογή λιγότερο ελκυστική (MAN Diesel&Turbo, 2020).



Σχήμα 2.3: Σύστημα RENK PTO/RCF, τοποθέτηση στο μπροστινό άκρο του κινητήρα (MAN Diesel&Turbo, 2020)



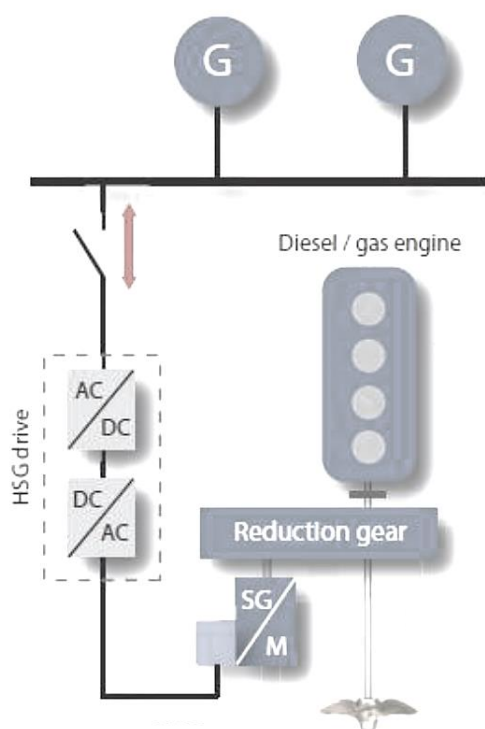
Σχήμα 2.4: Το πακέτο RENK MARHY (MAN Energy Solutions, 2021)

2.1.3 PTO/ CFE (Constant Frequency Electrical)

Το PTO/CFE αποτελεί την πιο ευρέως διαδεδομένη και αξιόπιστη κατηγορία συστήματος αξονικών γεννητριών. Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, ο κύριος κινητήρας περιστρέφεται σε μεταβλητό εύρος στροφών, η έξοδος συχνότητας του PTO δεν μπορεί να είναι σταθερή παρά τις λύσεις των κιβωτίων ταχυτήτων που χρησιμοποιούνται. Η διάταξη CFE, η οποία βασίζεται στην σταθεροποίηση της συχνότητας του ρεύματος, το οποίο παράγεται από την γεννήτρια άξονα του πλοίου, απεικονίζεται παρακάτω (Σχήμα 2.5) και αποτελείται από έναν ανορθωτή (rectifier), έναν μετατροπέα (inverter) και έναν σύγχρονο πυκνωτή (synchronous condenser) (MAN Diesel&Turbo, 2020).

Ο ανορθωτής μετατρέπει το ασταθές εναλλασσόμενο ρεύμα σε DC με σταθερή συχνότητα. Σε αυτό το σημείο του κυκλώματος, μπορεί να εγκατασταθεί ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας για να αξιοποιήσει πιθανή περίσσεια ισχύος που παράγει το πλοίο. Ωστόσο, αυτό προκαλεί ασυνέχεια στη ροή έργου ισχύος, που σημαίνει ότι μέσω της σύνδεσης συνεχούς ρεύματος παρέχεται μόνο η ενεργός ισχύς. Η εγκατάσταση ενός σύγχρονου πυκνωτή απαιτείται για την παραγωγή της άεργης Ισχύς που είναι απαραίτητη για τις ηλεκτρικές ανάγκες του πλοίου.

Ένας Σύγχρονος κινητήρας που λειτουργεί με συντελεστή ισχύος $PF=0$ χρησιμοποιείται ως σύγχρονος πυκνωτής για τη ρύθμιση της ροής της άεργης ισχύος στη διάταξη. Στη συνέχεια, το ρεύμα συνεχούς ρεύματος μετατρέπεται ξανά σε εναλλασσόμενο ρεύμα μέσω του μετατροπέα και παραδίδεται στον πίνακα διανομής του πλοίου (Pavlou, et al., 2005).



Σχήμα 2.5: Αξονική γεννήτρια τύπου PTO-CFE (Πιτταράς, 2012)

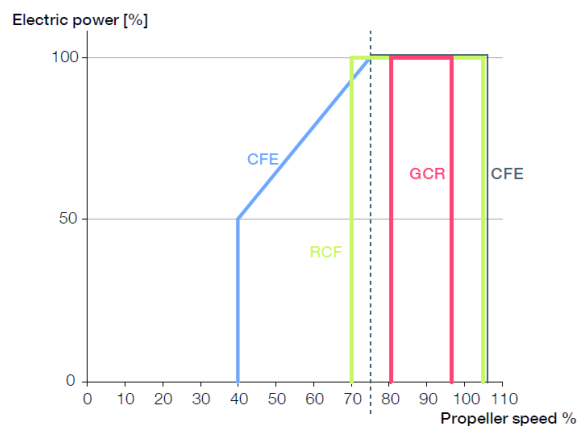
Υπάρχουν δύο επιλογές για αξονικές γεννήτριες σε διάταξη PTO/CFE. Είτε μια γεννήτρια άξονα με χαμηλότερη ονομαστική ταχύτητα μπορεί να συνδεθεί απευθείας στον κινητήρα, ρύθμιση η οποία θα απαιτούσε περισσότερους πόλους για να επιτευχθεί η χαμηλή ταχύτητα που οδηγεί σε μια βαρύτερη και μεγαλύτερη Γεννήτρια. Είτε η χρήση ενός κιβωτίου ταχυτήτων (step-up), επιλογή η οποία αποδεικνύεται αρκετά αποτελεσματική, καθώς το κιβώτιο ταχυτήτων με την κατάλληλη αναλογία παρέχει τη μηχανική ισχύ στη γεννήτρια με την ταχύτητα περιστροφής που απαιτείται. Αυτή η επιλογή αποτελεί συνδυασμό της τεχνολογίας CFE με της τεχνολογίας GCR. Η εφαρμογή ενός κιβωτίου ταχυτήτων μπορεί να εξοικονομήσει χώρο. Η διάταξη CFE λειτουργεί ως ισοδύναμο μιας σύγχρονης γεννήτριας. Η συνολική απόδοση του PTO/CFE είναι περίπου 84% – 88% που σε σύγκριση με τις προηγούμενες διατάξεις αποδεικνύεται ικανοποιητική. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί παράλληλα με ντιζελογεννήτριες και σε συνδυασμό με προπέλες σταθερού βήματος (FPP). Έτσι, προσφέρεται ευρύ παράθυρο λειτουργίας όσον αφορά τις στροφές του κινητήρα και την ηλεκτρική ισχύ που παράγεται (Sarigiannidis, et al., 2016) (Pavlou, 2005) (Pavlou, et al., 2005) (MAN Diesel&Turbo, 2020).

Τα τελευταία χρόνια, έχει κάνει την εμφάνισή του στην ναυτιλία ένα νέο σύστημα με το οποίο είναι δυνατή η σταθεροποίηση της συχνότητας του ρεύματος που παράγεται από τις γεννήτριες άξονα, βασιζόμενο στην τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM). Με τη συγκεκριμένη τεχνική, σε αντίθεση με την παραδοσιακή των θυρίστωρ που αναφέρθηκε προηγουμένως, επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ενεργούς και της άεργους ισχύος του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, με αποτέλεσμα να σταθεροποιείται η συχνότητα αλλά παράλληλα και η τάση του στα επιθυμητά επίπεδα. Συνεπώς, τα πλοία που είναι εξοπλισμένα με σύστημα PWM, παρά το αυξημένο κόστος της επένδυσής του, έχουν την δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος σταθερής τάσης και συχνότητας χωρίς την παρουσία ενός σύγχρονου πυκνωτή, γεγονός που απλοποιεί την διάταξη

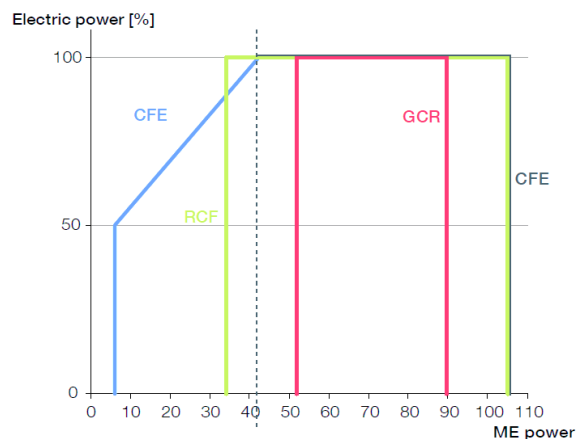
και την εγκατάστασή και μειώνει τα έξοδα συντήρησης του συστήματος (MAN Diesel&Turbo, 2020).

2.1.4 Σύγκριση απόδοσης των τεχνολογιών γεννήτριας άξονα

Βασική πτυχή για την αξιολόγηση των διαθέσιμων τεχνολογιών PTO είναι η ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να παραχθεί ανάλογα με την ταχύτητα και την ισχύ της κύριας μηχανής. Λόγω των συνεχώς αυστηρότερων κανονισμών του IMO (IMO, 2019), οι κινητήρες των πλοίων χρησιμοποιούνται σε μεγάλη ποικιλία στροφών κινητήρα έτσι ώστε να συμμορφώνονται με όλους τους Κανόνες Εκπομπών. Το Slow Steaming(1.4.3) είναι μια κοινή τακτική κατά την οποία τα πλοία μειώνουν την ταχύτητά τους για να μειώσουν την κατανάλωση καυσίμου και αποτελεσματικά τις παραγόμενες εκπομπές ρύπων (MAN Diesel&Turbo, 2020).



Σχήμα 2.6: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος προς ταχύτητα περιστροφής προπέλας (MAN Diesel&Turbo, 2020)



Σχήμα 2.7: Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος προς ισχύ κύριας μηχανής (MAN Diesel&Turbo, 2020)

Όπως είναι κατανοητό με βάση το Σχήμα 2.6 και το Σχήμα 2.7 το ευρύτερο παράθυρο λειτουργίας παρέχεται από την τεχνολογία CFE. Το CFE μπορεί να παρέχει μειωμένη ηλεκτρική ισχύ για συνθήκες μερικού φορτίου. Το μερικό φορτίο είναι διαθέσιμο περίπου από 40% έως 75% ταχύτητα προπέλας και η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται είναι 50% έως 100% της μέγιστης δυνατής ηλεκτρικής ισχύος. Η αντίστοιχη ισχύς κύριας μηχανής κυμαίνεται περίπου από 6,4% έως

42,2%. Τα εύρη αυτά είναι ενδεικτικά, γιατί τα φορτία κινητήρα που προτείνονται για το PTO σύμφωνα με τον κατασκευαστή μπορεί να διαφοροποιούνται.




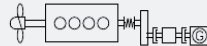

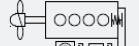

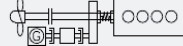

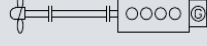

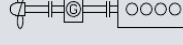

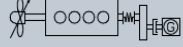

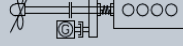
Επίσης, είναι σαφές ότι η λύση GCR έχει το μικρότερο εύρος λειτουργίας (μεταξύ 80,6% και 96,5% στροφών κινητήρα). Ως αποτέλεσμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο στην ανοιχτή θάλασσα με υψηλότερη ταχύτητα πλεύσης. Επίσης, το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα έχει μεταβλητή συχνότητα, που σημαίνει ότι είναι ακατάλληλο για πλοία που απαιτούν σταθερή συχνότητα. Ωστόσο, μπορεί να συνδεθεί με μια προπέλα ελεγχόμενου βήματος (CPP) για να παράγει ρεύμα σε σχετικά σταθερή συχνότητα. Σε συνδυασμό με το μειωμένο κόστος επένδυσης σε σύγκριση με τις άλλες τεχνολογίες, μπορεί να αποδειχθεί ελκυστική επιλογή.

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.6 και το Σχήμα 2.7, η τεχνολογία RCF παρέχει ένα παράθυρο λειτουργίας που κυμαίνεται μεταξύ 34,3% και 105% των στροφών του κινητήρα, το οποίο αποδεικνύεται σημαντικό ενώ παράγει 100% ηλεκτρική ισχύ σε σταθερή συχνότητα. Μπορεί επίσης να λειτουργήσει παράλληλα με τις βοηθητικές γεννήτριες. Ωστόσο, ο πολύπλοκος σχεδιασμός αυτής της τεχνολογίας PTO που καθιστά τη συντήρησή της πιο απαιτητική, μαζί με το γεγονός ότι προσφέρεται από έναν μόνο προμηθευτή, οδηγεί στο να είναι λιγότερο ελκυστική επιλογή.

Συμπερασματικά, η CFE είναι η καταλληλότερη τεχνολογία για πλοία με έλικα σταθερού βήματος, καθώς προσφέρεται ευρύ παράθυρο λειτουργίας, είναι δοκιμασμένη τεχνολογία κατάλληλη για προπέλες σταθερού βήματος, προσφέρεται από πολλούς προμηθευτές στην αγορά και μπορεί να λειτουργεί παράλληλα με ντιζελογεννήτριες παρέχοντας ευελιξία λειτουργίας. Τέλος, μέσω της σύνδεσης AC-DC, η περίσσεια ισχύος που βρίσκεται σε κατάσταση σταθερής συχνότητας DC, μπορεί να αποθηκευτεί με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας στις μπαταρίες. Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την μερική ή πλήρη απενεργοποίηση των βοηθητικών γεννητριών και την αύξηση της απόδοσης καυσίμου και τη μείωση της παραγωγής εκπομπών.

2.2 Διατάξεις αξονικών γεννητριών

Η γεννήτρια άξονα μπορεί να τοποθετηθεί σε διάφορες θέσεις σε σχέση με τον κύριο κινητήρα. Αυτή η παράγραφος επεξεργάζεται αυτές τις διατάξεις, τις πιθανές προκλήσεις, τις απαιτήσεις, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα. Αυτή η ταξινόμηση βασίζεται κυρίως στο εγχειρίδιο MAN B&W (MAN Energy Solutions, 2021) (MAN Diesel&Turbo, 2020) και απεικονίζεται συλλογικά στο Σχήμα 2.8. Όπως φαίνεται, υπάρχουν πολλές επιλογές με σχετικά ίση απόδοση για κάθε τεχνολογία (RCF, CFE και GCR). Οι διατάξεις βασίζονται στη θέση που καταλαμβάνει η γεννήτρια και ο αυξητήρας στροφών σε σχέση με την κινητήρια μηχανή του πλοίου.

Alternative types and layouts of shaft generators		Design	Seating	Total efficiency (%)
PTO/RCF	1a  1b 	BW I/RCF	On engine (vertical generator)	88-91
	2a  2b 	BW II/RCF	On tank top	88-91
	3a  3b 	BW III/RCF	On engine	88-91
	4a  4b 	BW IV/RCF	On tank top	88-91
PTO/CFE	5a  5b 	DMG/CFE	On engine	84-88
	6a  6b 	SMG/CFE	On tank top	84-88
PTO/GCR PTO/CFE	7 	BW I/GCR BW-I/CFE	On engine (vertical generator)	92 81-85
	8 	BW II/GCR BW-II/CFE	On tank top	92 81-85
	9 	BW III/GCR BW-III/CFE	On engine	92 81-85
	10 	BW IV/GCR BW-IV/CFE	On tank top	92 81-85

Σχήμα 2.8: Εναλλακτικοί τύποι και διατάξεις συστημάτων γεννήτριας άξονα. (MAN Diesel&Turbo, 2020)

2.2.1 Σύστημα PTO στο πρωραίο τμήμα και εντός της κύριας μηχανής (BW I)

Αυτή η διάταξη είναι διαθέσιμη για γεννήτριες άξονα GCR και RCF. Περιλαμβάνει ένα κωνικό γρανάζι και ένα αύξησης στροφών που τοποθετούνται απευθείας στο μπροστινό άκρο του στροφαλοφόρου άξονα. Το σύστημα αύξησης στροφών χρησιμοποιείται για την επίτευξη των απαιτούμενων τιμών συχνότητας στην είσοδο της γεννήτριας, ενώ η πλάγια οδόντωση επιτρέπει την κατακόρυφη τοποθέτηση της γεννήτριας πάνω από τα γρανάζια, εξοικονομώντας χώρο. Η λίπανση τους, επιπλέον, επιτυγχάνεται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων με το σύστημα λίπανσης της κύριας μηχανής.

Όσον αφορά την σύνδεση του στροφαλοφόρου με τον άξονα των γραναζιών, είναι αναγκαίο να παρουσιάζεται ευελιξία προκειμένου να αποφεύγεται η μετάδοση των ταλαντώσεων και των δονήσεων από τον πρώτο στον δεύτερο. Η ευελιξία αυτή επιτυγχάνεται με την κατάλληλη χρήση ελατηρίων μεταξύ των δύο αξόνων, για την απόσβεση των εν λόγω ταλαντώσεων. Επίσης, είναι δυνατή η τοποθέτηση ενός σφονδύλου (tuning wheel) στο ελεύθερο άκρο του στροφαλοφόρου, προκειμένου να επέλθει αύξηση της ροπής αδράνειας του συστήματος και συνεπώς περαιτέρω απόσβεση των δονήσεων του σε περίπτωση που καθίσταται αναγκαία.

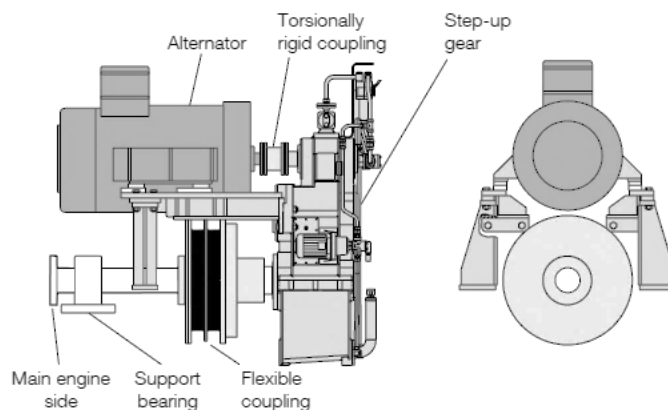
Καθώς μια γεννήτρια PTO μπορεί να λειτουργήσει σε διάφορους τρόπους λειτουργίας, υπάρχει ένας συμπλέκτης πολλαπλών δίσκων πριν από τον άξονα εισόδου RCF Gear για την εμπλοκή και την απεμπλοκή κατά τη λειτουργία του κύριου κινητήρα (MAN Diesel&Turbo, 2020).

2.2.2 Σύστημα PTO στο πρωραίο τμήμα και εκτός της κύριας μηχανής (BW II)

Αυτή η διάταξη μπορεί να περιγραφεί ως παρόμοια με την προηγούμενη, ωστόσο η γεννήτρια άξονα είναι εγκατεστημένη ανεξάρτητα και μπροστά από τον κύριο κινητήρα. Επίσης, τροφοδοτείται από το δικό της σύστημα λίπανσης. Το κιβώτιο ταχυτήτων τοποθετείται μπροστά από τον κινητήρα και ανεξάρτητα από τη δομή του κινητήρα. Είναι διαθέσιμο για τεχνολογίες PTO/GCR και PTO/RCF.

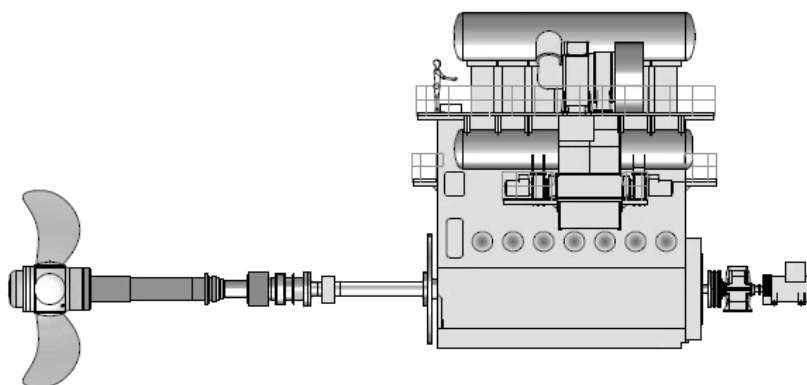
Η ανεξαρτησία κινητήρα – κιβωτίου έχει αρκετά θετικά αποτελέσματα, όπως η μείωση των δονήσεων, καθώς και των αξονικών και στρεπτικών ταλαντώσεων που προκύπτουν από τον στροφαλοφόρο άξονα με αποτέλεσμα να καθίσταται ευκολότερη και απλούστερη η απόσβεσή τους. Το γεγονός αυτό, καθώς και η αυτόνομη λίπανση, διευκολύνουν και μειώνουν σημαντικά τις εργασίες και τις προετοιμασίες που πρέπει να γίνουν στην κύρια μηχανή και το μηχανοστάσιο προκειμένου να λειτουργήσει αξιόπιστα το σύστημα.

Παρόλα αυτά, η διάταξη αυτή αυξάνει σημαντικά το μήκος του συστήματος προώσεως του πλοίου και αρκετές είναι οι περιπτώσεις που δεν είναι δυνατό να υπάρξει επαρκής χώρος για την εγκατάσταση του εξαιτίας της παρουσίας της εγκάρσιας φρακτής που διαχωρίζει το μηχανοστάσιο από τους χώρους φορτίου. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί με σχεδιάσεις όπως αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.9 σε πλάγια όψη και σε πρόσοψη, όπου η αξονική γεννήτρια τοποθετείται μεταξύ του κιβωτίου και του κινητήρα. Ενώ, λύση δίνει και χρήση γραναζιών με λοξές οδοντώσεις προκειμένου η γεννήτρια να τοποθετηθεί κατακόρυφα πάνω από αυτά. Και στις δύο περιπτώσεις, το πρόβλημα δεν λύνεται εξ ολοκλήρου και το, ακόμα και σε μικρότερο βαθμό, αυξημένο μήκος του συστήματος δύναται να συνεχίσει να αποτελεί πρόβλημα σε περιπτώσεις υψηλά περιορισμένου χώρου (MAN Diesel&Turbo, 2020).



Σχήμα 2.9: PTO BW II με εναλλάκτη τοποθετημένο μεταξύ του κιβωτίου ταχυτήτων και της δομής του κινητήρα (MAN Diesel&Turbo, 2020)

Το Σχήμα 2.10 απεικονίζει τη διάταξη BW II όπου η Γεννήτρια τοποθετείται ανεξάρτητα και μπροστά από τον κινητήρα.

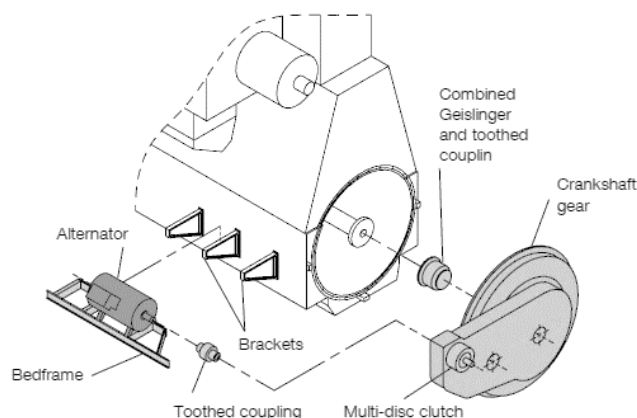


Σχήμα 2.10: Ανεξάρτητη διάταξη PTO BWII έξω και μπροστά από τον κινητήρα (MAN Diesel&Turbo, 2020)

2.2.3 Σύστημα PTO στο πρωραίο τμήμα και πλευρικά της κύριας μηχανής (BW III)

Σε αυτή την περίπτωση, η Γεννήτρια τοποθετείται στο πλάι του κινητήρα, οριζόντια δίπλα στους βραχίονες που υποστηρίζονται από τον κινητήρα. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι βιδωμένο απευθείας στη δομή του μπροστινού άκρου του κινητήρα, επομένως υποστηρίζεται από αυτή τη δομή. Αυτή η διάταξη είναι επίσης διαθέσιμη για τεχνολογίες PTO/GCR και PTO/RCF.

Όπως γίνεται κατανοητό, με τον σχεδιασμό αυτό στην ουσία επιτυγχάνεται ο συνδυασμός των πλεονεκτημάτων των δύο προηγούμενων διατάξεων καθώς η εγκατάσταση γίνεται ευκολότερη και απλούστερη αφού δεν απαιτείται η χρήση γραναζιών με πλάγια οδόντωση και η κατασκευή συστημάτων έδρασης της γεννήτριας στο πρωραίο τμήμα της μηχανής, ενώ παράλληλα η αύξηση του μήκους του συστήματος είναι αμελητέα. Το γεγονός αυτό καθιστά το κόστος επένδυσης της διάταξης BW III, υψηλότερο από τις άλλες διατάξεις. Ωστόσο, παρότι είναι αυξημένο το κεφαλαιουχικό κόστος, μια συμπαγής και απλή διάταξη είναι επωφελής.

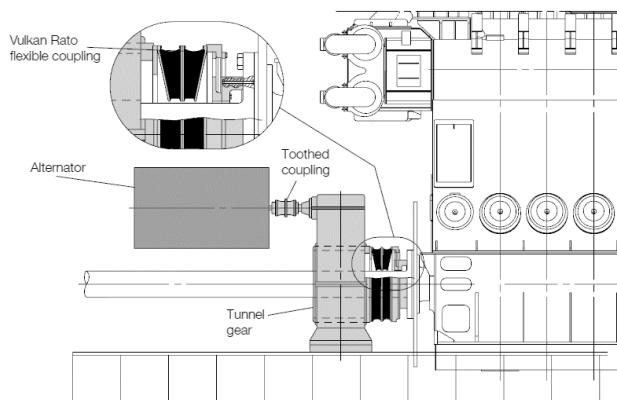


Σχήμα 2.11: PTO BW III/GCR (Renk) (MAN Diesel & Turbo, 2012)

2.2.4 Σύστημα PTO στο πρυμναίο τμήμα και πλευρικά της κύριας μηχανής (BW IV)

Η διάταξη BW IV είναι κυρίως κατάλληλη για λύσεις GCR. Τοποθετείται στην πίσω πλευρά του κύριου κινητήρα ως ανεξάρτητη λύση PTO. Η αξονική γεννήτρια έχει την δυνατότητα να εδράζεται δίπλα στον ενδιάμεσο άξονα αλλά και πάνω από αυτόν σε κατάλληλη πλατφόρμα. Για να είναι αποτελεσματική και αξιόπιστη η σύνδεση των κιβωτίων με τον ενδιάμεσο άξονα, το σύστημα περιλαμβάνει ένα γρανάζι ενσωματωμένο σε έναν κοίλο άξονα με διάμετρο μεγάλη αρκετά, ώστε να είναι δυνατόν να τον διαπεράσει η φλάντζα του άξονα της μηχανής και συνεπώς με την βοήθεια μιας ή περισσοτέρων σφηνών να επέλθει η σύνδεση.

Το βασικό πλεονέκτημα της σχεδίασης BW IV είναι η πλήρης ανεξαρτησία που παρέχει στους αυξητήρες στροφών από τον στροφαλοφόρο άξονα, γεγονός που απλοποιεί σημαντικά τις μελέτες για την απόσβεση των ταλαντώσεων και των δονήσεων που προκύπτουν από αυτόν. Επιπλέον, η απουσία των κιβωτίων στο πρυμναίο τμήμα της μηχανής εξαλείφει το πρόσθετο μήκος που προκύπτει στις προηγούμενες διατάξεις (σε διαφορετικό βαθμό στην κάθε μια), με αποτέλεσμα να εξοικονομείται χώρος και να προσφέρεται ευελιξία σε αρκετές περιπτώσεις που είναι απαραίτητος, όπως η ανάγκη τοποθέτησης ενός σφονδύλου στο ελεύθερο άκρο του στροφαλοφόρου άξονα για την αύξηση της ροπής αδρανείας του. Παρόλα αυτά, η ανάγκη για κατασκευή επιπέδου έδρασης της γεννήτριας όταν αυτή απαιτείται να τοποθετείται πάνω από τον άξονα πρόωσης, καθώς και η αύξηση της πολυπλοκότητας στο τμήμα του ενδιάμεσου άξονα λόγω της συνδεσμολογίας που αναφέρθηκε προηγουμένως, συχνά προβληματίζουν όταν εξετάζεται η εγκατάσταση της παρούσας διάταξης. Αυτή η λύση μπορεί να παρέχει καλύτερη απόσβεση και χειρισμό πιθανών ταλαντώσεων και δονήσεων.



Σχήμα 2.12: PTO BW IV/GCR, Tunnel gear (MAN Diesel & Turbo, 2012)

2.2.5 Σύστημα PTO πάνω στον ενδιάμεσο άξονα (SMG)

Η διάταξη SMG (Shaft Mounted Generator) είναι κυρίως κατάλληλη για τον τύπο συστήματος PTO/CFE. Σε αντίθεση με αυτές που αναφέρθηκαν πιο πάνω, δεν απαιτείται η χρήση κιβωτίων αύξησης στροφών ή εύκαμπτη απαίτηση ζεύξης. Ο ρότορας τοποθετείται στον ενδιάμεσο άξονα της έλικας, στο πρυμναίο άκρο του κινητήρα. Ως αποτέλεσμα, η γεννήτρια περιλαμβάνει τον ενδιάμεσο άξονα προπέλας ως μέρος του και εγκαθίσταται κατάλληλα από τον κατασκευαστή. Το περίβλημα του στάτορα είναι τοποθετημένο σε ξεχωριστή βάση μέσα στο μηχανοστάσιο, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.13. Ο ενδιάμεσος άξονας του πλοίου, λοιπόν, αποτελεί τμήμα της αξονικής γεννήτριας της διάταξης, με αποτέλεσμα οι στρόφες της να ταυτίζονται με τις στρόφες της έλικας, γεγονός που

καθιστά αναγκαία την λειτουργία του συστήματος CFE για την σταθεροποίηση της μεταβλητής συχνότητας του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος.

Όπως είναι κατανοητό ο ρότορας αποκτά την ίδια ταχύτητα περιστροφής με τον άξονα της προπέλας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια σχετικά ασταθή ταχύτητα. Απαιτείται επομένως, η σταθεροποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής συχνότητας για την επίτευξη της απαιτούμενης τιμής των 50 – 60 Hz. Οι μετατροπείς που περιλαμβάνουν έναν ανορθωτή και έναν μετατροπέα διασφαλίζουν ότι ένα ρεύμα AC σταθερής συχνότητας μεταφέρεται στον πίνακα διανομής για τους ηλεκτρικούς καταναλωτές του πλοίου. Σε περίπτωση βλάβης του ρότορα η αντικατάστασή του καθίσταται αρκετά ασύμφορη και δύσκολη διαδικασία, εξαιτίας της άμεσης σχέσης του με τον ελικοφόρο άξονα. Η απουσία γραναζιών και συνεπώς συμπλέκτη έχει ως αποτέλεσμα, επίσης, την αύξηση του φορτίου της κύριας μηχανής, ακόμη και σε περιπτώσεις που η οι χαμηλές στροφές της δεν επιτρέπουν την αποτελεσματική λειτουργία της αξονικής γεννήτριας.

Επιπλέον, για δίχρονους βραδύστροφους κινητήρες θα εξεταστεί καθώς χρησιμοποιούνται στην πλειονότητα των μεγάλων εμπορικών πλοίων. Αυτοί οι κινητήρες έχουν αργή ταχύτητα περιστροφής, την οποία μια σύγχρονη γεννήτρια δεν μπορεί να χειριστεί. Μια μη αποτελεσματική λύση θα ήταν η αύξηση του αριθμού των πόλων, ωστόσο, η πιο αποτελεσματική λύση είναι να τοποθετηθεί ανάμεσα στον άξονα της προπέλας και της γεννήτριας, ένα κιβώτιο ταχυτήτων για να επιτευχθεί η σωστή ταχύτητα περιστροφής. Φυσικά, το κόστος της επένδυσης είναι αυξημένο αλλά επιτυγχάνεται η συμβατότητα με μεγαλύτερη ποικιλία πλοίων. Αυτός ο τύπος διάταξης απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5 όπου το κιβώτιο ταχυτήτων Step-up είναι συνδεδεμένο στον άξονα της προπέλας και η γεννήτρια λειτουργεί με κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής.

Συνολικά, η απλότητα και το χαμηλό κόστος, οδηγούν αρκετές φορές τους πλοιοκτήτες στην προτίμηση της έναντι των διατάξεων γραναζοκιβωτίων.. Το κόστος της διάταξης SMG είναι χαμηλότερο από το DMG/CFE που θα αναλυθεί στην επόμενη παράγραφο (MAN Diesel & Turbo, 2012).



Σχήμα 2.13: Μεγάλη εγκατάσταση PTO SMG/CFE σε μεγάλο σκάφος εμπορευματοκιβωτίων. (MAN Diesel&Turbo, 2020)

2.2.6 Σύστημα PTO στο πρωαίο τμήμα του στροφαλοφόρου άξονα (DMG)

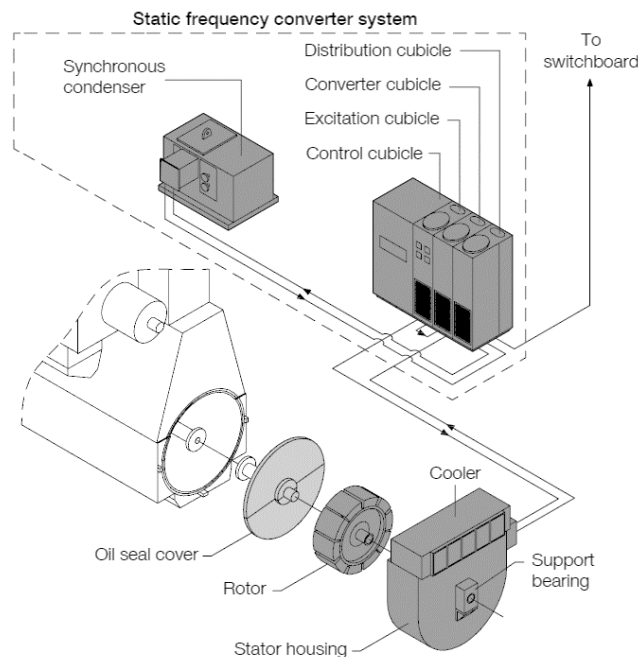
Η διάταξη DMG (Direct Mounted Generator) αποτελείται από μια αξονική γεννήτρια της οποίας ο ρότορας είναι συνδεδεμένος στο ελεύθερο άκρο του

στροφαλοφόρου άξονα αποτελώντας στην ουσία επέκταση του, ενώ ο στάτορας της περικλείεται από μια ανεξάρτητη πρόσθετη κατασκευή στο πρωραίο τμήμα της κύριας μηχανής, κατά παρόμοιο τρόπο με την διάταξη PTO/BW I. Η διάταξη είναι διαθέσιμη μόνο για τύπους συστημάτων PTO/CFE καθώς δεν απαιτείται κιβώτιο αύξησης στροφών.

Η αξονική γεννήτρια, παρόλο που συνδέεται απευθείας με τον στροφαλοφόρο, διαχωρίζεται κατά έναν τρόπο από αυτόν με την βοήθεια ενός συστήματος πλακών στεγανοποίησης, προκειμένου να αποφευχθεί η άμεση επαφή του ρότορα της γεννήτριας με τον στρόφαλο-θάλαμο. Επιπλέον, μεταξύ των δύο αξόνων, είναι δυνατή η εγκατάσταση σφονδύλου, σε περίπτωση που καθίσταται αναγκαία για την απόσβεση των ταλαντώσεων και δονήσεων του στροφαλοφόρου.

Η απουσία κιβωτίου αύξησης στροφών έχει ως αποτέλεσμα την ταύτιση των στροφών του κινητήρα και της γεννήτριας και συνεπώς, οδηγεί στα ίδια ζητήματα που προκύπτουν και στην διάταξη SMG (2.2.5), όσον αφορά την δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με τα επιθυμητά επίπεδα συχνότητας.

Εν τέλει, η συνδεσμολογία του ρότορα της γεννήτριας και του στροφαλοφόρου, που αναφέρεται πιο πάνω, σε περίπτωση ανάγκης για επισκευή ή βελτιστοποίηση του συστήματος, προσφέρει σημαντικά μεγαλύτερη ευελιξία, σε σχέση με την διάταξη SMG. Η παράλληλη αύξηση, που προκαλείται στην πολυπλοκότητα της σχεδίασης και της εγκατάστασης, καθιστά την διάταξη SMG οικονομικότερη, με αποτέλεσμα να προτιμάται και να εμφανίζεται συχνότερα σε εγκαταστάσεις αξονικών γεννητριών τύπου PTO/CFE (MAN Diesel & Turbo, 2012).



Σχήμα 2.14 PTO DMG/CFE (MAN Diesel&Turbo, 2020)

2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των αξονικών γεννητριών

Για την αξιολόγηση της τεχνολογίας της γεννήτριας άξονα, είναι σημαντικό να εντοπιστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Σε αυτή τη σύγκριση, λαμβάνεται υπόψη κάθε πτυχή των πιθανών πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων. Τέτοιες παράμετροι αφορούν το κόστος, τη συντήρηση, τη λειτουργία, την απαίτηση χώρου κ.λπ. Η σύγκριση αυτή αναφέρεται, είτε σε όλους τους τύπους αξονικών γεννητριών, είτε σε ένα συγκεκριμένο.

2.3.1 Πλεονεκτήματα

Όπως αναφέρθηκε ήδη, τα συστήματα γεννήτριας άξονα έχουν χρησιμοποιηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα (1.1). Αυτή η εκμετάλλευση, ειδικά στα εμπορικά πλοία, οφείλεται σε ορισμένους λόγους που σχετίζονται με ελκυστικά οικονομικά οφέλη, μερικοί από τους οποίους απαριθμούνται ακολούθως:

- I. **Κόστος Καυσίμου:** Το σύστημα γεννήτριας άξονα μπορεί να συνδεθεί με τον κύριο κινητήρα. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται με βάση κυρίως καύσιμα, λιγότερο ακριβά από το ντίζελ, δηλαδή βαρύ καύσιμο (HFO) ή φυσικό αέριο (Pavlou, et al., 2005).
- II. **Συντήρηση:** Ο χρόνος λειτουργίας των βοηθητικών γεννητριών μειώνεται σημαντικά, που σημαίνει μειωμένο κόστος συντήρησης και λειτουργίας. Αντίθετα, η προγραμματισμένη συντήρηση μιας γεννήτριας άξονα κατά τα πρώτα χρόνια λειτουργίας περιλαμβάνει μόνο τακτικούς ελέγχους της σωστής λειτουργίας και τακτική αντικατάσταση του λιπαντικού και του φίλτρου λαδιού, εάν η γεννήτρια άξονα διαθέτει ξεχωριστό σύστημα λιπαντικού (MAN Diesel & Turbo, 2012).
- III. **Απαίτηση χώρου:** Η γεννήτρια άξονα είναι εγκατεστημένη κοντά στον κινητήρα ή στη γραμμή του άξονα, και συχνά δεν καταλαμβάνει περισσότερο χώρο από αυτόν που ήδη διατεθεί για την εγκατάσταση του κινητήρα. όπως αναλύθηκε στην Παράγραφο 2.2, υπάρχουν πολλές επιλογές για την εγκατάσταση Γεννήτριες Άξονα που μπορούν να είναι κατάλληλες για τις ανάγκες κάθε πλοίου. Το PTO BW III (2.2.3) και το PTO BW IV (2.2.4) απαιτούν λίγο χώρο για την εγκατάσταση. Το SMG/CFE (2.2.5) και το DMG/CFE (2.2.6) χρειάζονται επιπλέον χώρο αλλού στο μηχανοστάσιο για τους θαλάμους ελέγχου (Pavlou, et al., 2005) (MAN Diesel & Turbo, 2012).
- IV. **Αξιοπιστία:** Η τεχνολογία των γεννητριών αξόνων παρέχει μεγάλη αξιοπιστία, είναι μια δοκιμασμένη τεχνολογία εγκατεστημένη σε πλοία εδώ και δεκαετίες. Είναι αποδεδειγμένο ότι, οι αξονικές γεννήτριες και ο κύριος κινητήρας που τις κινεί, έχουν υψηλότερο δείκτη αξιοπιστίας από τις βοηθητικές γεννήτριες (Prousalidis, et al., 2012) (MAN Diesel & Turbo, 2012).

- V. **Χαμηλό κόστος επένδυσης:** Το κόστος επένδυσης εξαρτάται από τον τύπο και τη μάρκα της γεννήτριας άξονα. Το PTO/GCR μπορεί να αγοραστεί σε σχετικά χαμηλή τιμή, ενώ οι τύποι ελεγχόμενης συχνότητας (PTO/RCF και PTO/CFE) είναι σχετικά ακριβοί (Pavlou, 2005) (MAN Diesel & Turbo, 2012) (Prousalidis, et al., 2012).
- VI. **Χαμηλό κόστος εγκατάστασης:** Η γεννήτρια άξονα δεν απαιτεί ξεχωριστή βάση, κανένα σύστημα καυσαερίων και μόνο λίγες συνδέσεις με τον βοηθητικό εξοπλισμό. Επιπλέον, ο χρόνος που απαιτείται για την εγκατάσταση μιας γεννήτριας άξονα, είναι συνήθως μικρός (MAN Diesel & Turbo, 2012).
- VII. **Μεγάλη διάρκεια ζωής:** Η διάρκεια ζωής τους είναι αποδεδειγμένα μεγαλύτερη από αυτή των βοηθητικών γεννητριών. Μια γεννήτρια άξονα γενικά δεν εκτίθεται σε μεγάλη φθορά, αλλά εξαρτήματα όπως ρουλεμάν, αντλίες λαδιού, συμπλέκτες τριβής κ.λπ. πρέπει αντικαθίστανται μετά από πολλά χρόνια λειτουργίας (Prousalidis, et al., 2012) (MAN Diesel & Turbo, 2012).
- VIII. **Χαμηλό επίπεδο θορύβου:** Το επίπεδο θορύβου των αξονικών γεννητριών αποδεικνύεται ότι είναι αρκετά χαμηλότερο από εκείνο των συμβατικών βοηθητικών γεννητριών που κινούνται από 4-χρονους κινητήρες εσωτερικής καύσης υψηλής ταχύτητας (Prousalidis, et al., 2012) (MAN Diesel & Turbo, 2012).
- IX. **Αποδοτικότητα πλοίου:** Καθώς τα στάδια του δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας (EEDI) του IMO γίνονται πιο αυστηρά, ποτέ δεν ήταν πιο σημαντική η βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας ενός πλοίου. Καταναλώνοντας λιγότερο καύσιμο το πλοίο παράγει λιγότερες εκπομπές και ως αποτέλεσμα, το πλοίο επιτυγχάνει καλύτερη βιωσιμότητα και μπορεί να είναι πλωτό για πολλά χρόνια παρά τους νέους κανονισμούς (MAN Energy Solutions, 2021).

2.3.2 Μειονεκτήματα

Από την άλλη πλευρά, ειδικά στο παρελθόν, έχουν παρατηρηθεί ορισμένα μειονεκτήματα των αξονικών γεννητριών, τα περισσότερα από τα οποία, ωστόσο, έχουν επιλυθεί. Πιο συγκεκριμένα:

- I. **Υψηλότερο φορτίο στον κύριο κινητήρα:** Ανάλογα με το λειτουργικό προφίλ του πλοίου, ένα υψηλότερο φορτίο στο ΜΕ λόγω της αξονικής γεννήτριας μπορεί να αυξήσει την πίεση που ασκείται στον κινητήρα, τη κατανάλωση λαδιού λίπανσης και καυσίμου (Pavlou, et al., 2005) (MAN Diesel & Turbo, 2012).
- II. **Καμία παραγωγή ενέργειας στο λιμάνι:** Είτε είναι εγκατεστημένη γεννήτρια άξονα είτε όχι, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο λιμάνι θα πρέπει γενικά να καλύπτεται από βοηθητικές γεννήτριες. Ωστόσο, στις μέρες μας, η προπέλα μπορεί εύκολα να αποσυνδεθεί από τον κύριο κινητήρα τοποθετώντας συμπλέκτη στη γραμμή του άξονα. Ο συμπλέκτης εφαρμόζεται κυρίως, σε δεξαμενόπλοια με μεγάλη

κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για άντληση φορτίου. Έτσι, είναι δυνατή η χρήση του κύριου κινητήρα και της αξονικής γεννήτριας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο λιμάνι (Pavlou, et al., 2005) (MAN Diesel & Turbo, 2012).

- III. **Μειωμένη απόδοση έλικας και κινητήρα:** Ο κινητήρας με έλικα ελεγχόμενου βήματος, πρέπει να λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα ακόμη και σε μειωμένη φόρτιση (MAN Diesel & Turbo, 2012).
- IV. **Σύνθετη διάταξη άξονα:** η διάταξη του τυπικού 2-χρονου κινητήρα γίνεται πιο περίπλοκη λόγω της αξονικής γεννήτριας καθώς απαιτούνται περισσότερα εξαρτήματα όπως κιβώτιο ταχυτήτων και εύκαμπτοι σύνδεσμοι (MAN Diesel & Turbo, 2012).
- V. **Περιορισμένη δυνατότητα παράλληλης λειτουργίας:** Το PTO/GCR δεν μπορεί να λειτουργεί παράλληλα με τις γεννήτριες παρά μόνο κατά την μετατόπιση του φορτίου από PTO σε γεννήτριες και αντίθετα. Αυτό σημαίνει ότι η κατανομή ισχύος δεν είναι τόσο ευέλικτη όσο με μια εγκατάσταση βοηθητικών γεννητριών (MAN Diesel & Turbo, 2012).
- VI. **Αρνητικός περιβαλλοντικός αντίκτυπος ΡΤΙ:** καθώς το σύστημα ΡΤΙ χρησιμοποιεί την ισχύ των βοηθητικών γεννητριών για να παράγει μηχανική ισχύ, το SFOC του πλοίου αυξάνεται και επομένως παράγονται περισσότερες εκπομπές (Souflis - Rigas, 2021).

Είναι σαφές ότι, τα πλεονεκτήματα υπερτερούν κατά πολύ των μειονεκτημάτων. Επιλέγοντας την κατάλληλη τεχνολογία για τις ανάγκες κάθε πλοίου, τα μειονεκτήματα μπορούν να ελαχιστοποιηθούν και η επένδυση μπορεί να αποδειχθεί εξαιρετικά πετυχημένη. Τα συστήματα γεννήτριας άξονα θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν ιδιαίτερα σε πλοία που ταξιδεύουν μεγάλες αποστάσεις και με σημαντικό φορτίο, όπου οι δείκτες απόδοσης μπορεί να είναι πιο ελκυστικοί από αυτούς που αντιστοιχούν σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με γεννήτριες ντίζελ. Σε κάθε περίπτωση, στις μέρες μας, η λειτουργία των αξονικών γεννητριών ελέγχεται από σύγχρονα συστήματα διαχείρισης ισχύος (PMS) κατάλληλα ανεπτυγμένα για να εξυπηρετούν όλες τις τρέχουσες ανάγκες και τάσεις που απαιτούνται.

3 Επίδραση της λειτουργίας ΡΤΟ στη φόρτιση της κύριας μηχανής

Η επιλογή της κατάλληλης γεννήτριας άξονα εξαρτάται από την ισχύ που είναι διαθέσιμη από τον κινητήρα. Την πιο αντιπροσωπευτική ανάλυση της κατανομής ισχύος κινητήρα, δίνει το διάγραμμα φόρτισης κινητήρα που διαμορφώνεται σύμφωνα με το σημείο MCR κάθε πλοίου.

Σε αυτό το κεφάλαιο, οι καμπύλες των διαγραμμάτων φόρτισης επεξηγούνται διεξοδικά. Είναι σημαντικό τα διάφορα περιθώρια που εξασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία του πλοίου σε διάφορες συνθήκες να είναι σωστά καθορισμένα. Η λάθος σχεδίαση, έλλειψη ισχύος και ταχύτητας προπέλας θα αυξήσει τη φόρτιση του κινητήρα και θα έχει ως αποτέλεσμα αυξημένο θερμικό φορτίο και κατανάλωση καυσίμου.

Έτσι, έχοντας εξηγήσει όλες τις παραμέτρους των διαγραμμάτων, είναι σημαντικό να επεξεργαστούμε τα σημεία λειτουργίας και να αναλύσουμε τα περιθώρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη χρήση ΡΤΟ. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε την επίδραση του ΡΤΟ, στη φόρτιση της κύριας μηχανής, και τις αλλαγές που συμβαίνουν, έτσι ώστε η ενσωμάτωση του συστήματος ΡΤΟ να βελτιώσει την απόδοση του κινητήρα.

3.1 Περιθώρια ισχύος και στροφών που εξετάζονται

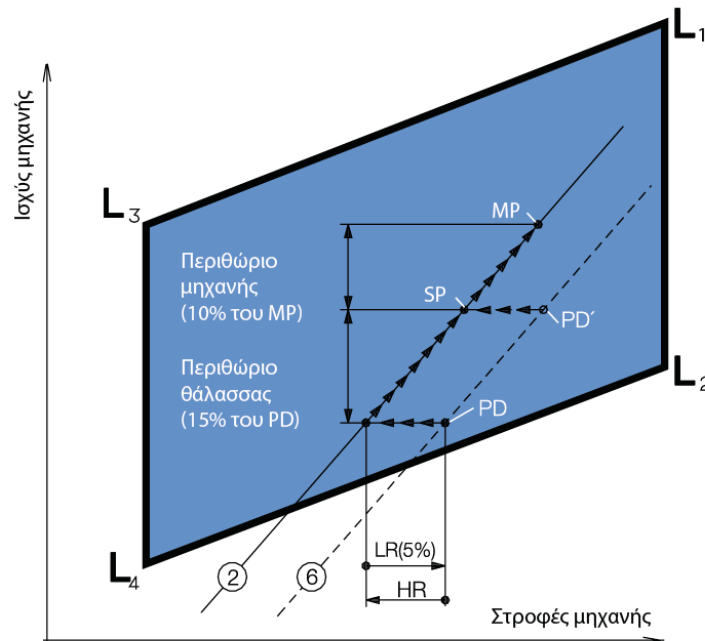
Πέρα από τις φυσικές προετοιμασίες του κινητήρα για την εγκατάσταση μιας γεννήτριας άξονα, η διάταξη του κινητήρα από άποψη ισχύος και ταχύτητας επηρεάζεται επίσης. Το πλοίο δεν πλέει σε ιδανικές συνθήκες και οι απρόβλεπτες καιρικές συνθήκες δεν μπορούν να αναπαρασταθούν και να μοντελοποιηθούν με απόλυτη επιτυχία. Συνεπώς, είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψη περιθώρια, προκειμένου να είναι δυνατή η παρουσία περίσσιας ισχύος και φορτίου στο κινητήρα ώστε να μην παρουσιαστεί πρόβλημα υπερφόρτωσης, είτε σε επείγουσες καταστάσεις κατά την διάρκεια ενός ταξιδιού, είτε μακροχρόνια όπου η ρύπανση της γάστρας και της έλικας θα είναι αναπόφευκτη και θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης του πλοίου. Τα περιθώρια θα οριστούν με αγγλικούς όρους και είναι: Engine Margin (EM), Sea Margin (SM), Light Running Margin (LR). Αυτά τα περιθώρια επεξηγούνται έτσι ώστε τα σχεδιαστικά σημεία λειτουργίας να μπορούν να καθοριστούν καλά. Σημεία σχεδιασμού θεωρούνται τα σημεία στα οποία ο κινητήρας παράγει τη μέγιστη ισχύ εξόδου του (MCR). Ένα άλλο κρίσιμο σημείο είναι το σημείο σταθερής λειτουργίας (NCR) στο οποίο το πλοίο φτάνει την ταχύτητά του.

Επιπλέον, αυτά τα περιθώρια ισχύος είναι σημαντικό να υπολογιστούν σωστά, έτσι ώστε οι καμπύλες που είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό της ισχύος του ΡΤΟ να παρέχουν αρκετή ισχύ ώστε η αξονικά γεννήτρια να λειτουργεί υπό ρεαλιστικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων κακών καιρικών συνθηκών και ρυπασμένης γάστρας (Λουκάκης, 2016) (MAN B&W, 2020).

3.1.1 Περιθώριο θάλασσας (Sea margin – SM)

Η απαιτούμενη αύξηση σε ισχύ, έτσι ώστε η ταχύτητα δοκιμών (σημείο PD στο Σχήμα 3.1) “να διατηρηθεί” και στη μέση κατάσταση υπηρεσίας (σημείο SP) και να αποτελέσει τη διατηρούμενη ταχύτητα υπηρεσίας V_{SP} του πλοίου, ορίζεται ως το περιθώριο θάλασσας (sea margin). Το περιθώριο αυτό είναι παραδοσιακά περίπου 15% της ισχύος στο σημείο PD όπως δείχνεται στο Σχήμα 3.1. Το ποσοστό αυτό την πράξη αλλάζει ανάλογα με τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη ή και του ναυλωτή και για μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μπορεί ενίοτε να είναι 20% - 30%. Η θέση του σημείου αναφοράς PD (συνεπώς και του σημείου PD') και

το μέγεθος του περιθωρίου θάλασσας αποτελούν μέρος του συμβολαίου ναυπήγησης του πλοίου (Λουκάκης, 2016).



- ② Καμπύλη βαρείας έλικας/Ρυπασμένη γάστρα και κακός καιρός
- ⑥ Καμπύλη ελαφράς έλικας/Καθαρή γάστρα και ήρεμος καιρός
- MP: Προσδιορισμένο σημείο πρόωσης σε MCR
- SP: Σημείο πρόωσης συνεχούς υπηρεσίας
- PD: Σημείο σχεδίασης έλικας
- PD': Εναλλακτικό σημείο σχεδίασης έλικας
- LR: Ποσοστό ελαφράς φόρτισης
- HR: Ποσοστό βαρείας φόρτισης

Σχήμα 3.1: Σημεία λειτουργίας πρόωσης (Λουκάκης, 2016)

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται το διάγραμμα περιοχής λειτουργίας ενός κινητήρα και η επιρροή που έχουν τα περιθώρια προκειμένου να προσδιοριστεί το μέγιστο σημείο συνεχούς λειτουργίας του (MCR).

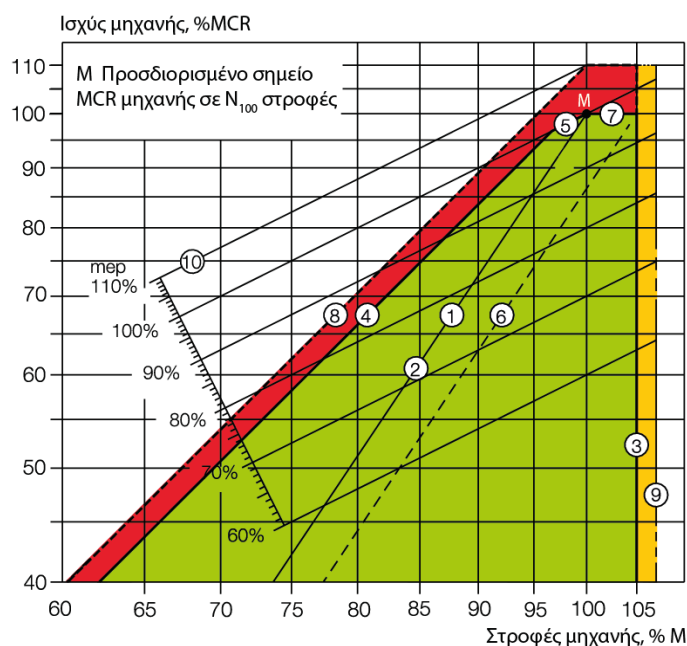
Το σημείο PD (propeller design point) αναφέρεται στο ζεύγος ισχύος και στροφών του κινητήρα σε ιδανικές συνθήκες καιρού και κατάστασης έλικας και γάστρας. Με τον προσδιορισμό του σημείου αυτού είναι δυνατή επίσης η κατασκευή της διακεκομμένης καμπύλης 6, η οποία αναπαριστά τις απαιτήσεις της έλικας σε ισχύ για διαφορετικές τιμές στροφών στις εν λόγω συνθήκες. Η καμπύλη σχεδιάζεται σύμφωνα την θεμελιώδη σχέση του νόμου της έλικας $P=C \cdot n^3$, όπου η σταθερά C εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά, την γεωμετρία της έλικας και τις συνθήκες λειτουργίας της κύριας μηχανής.

Στη συνέχεια, παρατηρείται μετατόπιση του σημείου PD προς τα δεξιά επιφέροντας μείωση στην τιμή των στροφών διατηρώντας σταθερή την ισχύ. Η μείωση αυτή λαμβάνεται σύμφωνα με το light running margin (LR) που στην προκειμένη περίπτωση έχει ληφθεί ίσο με 5%. Η σχεδίαση της καμπύλης 2, η οποία απεικονίζει τις απαιτήσεις της έλικας σε καταστάσεις καιρού και ρυπασμένης έλικας και γάστρας, είναι πλέον εφικτή με την χρήση της θεμελιώδους σχέσης που προαναφέρθηκε. Έπειτα, επέρχεται επιπλέον αύξηση της ισχύος, εξαιτίας του sea margin, κατά 15% της αντίστοιχης του σημείου PD. Το σημείο SP (service propulsion point) αναφέρεται στο ζεύγος ισχύος και στροφών του κινητήρα για

την επίτευξη της ταχύτητας υπηρεσίας και προκύπτει, ως το σημείο της καμπύλης 2 με την αυξημένη τιμή της ισχύος εξαιτίας του sea margin. Τέλος, με αύξηση 10% που αντιστοιχεί στο engine margin προκύπτει με παρόμοια διαδικασία το σημείο MP (MCR point) το οποίο είναι το σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας του κινητήρα και βάσει του οποίου θα γίνει η διαστασιολόγηση της κύριας μηχανής του πλοίου. Γίνεται ευκολά αντιληπτή λοιπόν, η σημασία των εν λόγω περιθωρίων προκειμένου να λειτουργεί σε ασφαλή επίπεδα ισχύος και στροφών ο κινητήρας και να καθίσταται δυνατή η εγκατάσταση αξονικών γεννητριών σε λειτουργία ΡΤΟ χωρίς να προκαλείται υπερφόρτωση του.

3.1.2 Περιθώριο ελαφριάς φόρτισης (Light running margin - LR)

Το περιθώριο ελαφριάς φόρτισης είναι ένα πολύ κρίσιμο περιθώριο που διασφαλίζει την επαρκή απόδοση του πλοίου όταν συμβαίνει ρύπανση και φθορά του πλοίου. Αυτό το περιθώριο είναι ανάλογο με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Η φθορά της γάστρας λόγω της έκθεσης της στο θαλάσσιο περιβάλλον έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη μικρότερης ταχύτητας περιστροφής για την ίδια ποσότητα ισχύος σε σύγκριση με ένα πλοίο καθαρής γάστρας. Η καμπύλη δοκιμών (καμπύλη 6) στο διάγραμμα φόρτισης, Σχήμα 3.1, θα πρέπει να απέχει κατά ένα ποσοστό LR (3% έως 7%) μείωσης των στροφών από την καμπύλη χαρακτηριστικών ονομαστικής έλικας (5% δείχνεται στο Σχήμα 3.1), που περνάει από το σημείο MP (SMCR), και είναι παράλληλη προς αυτή. Αυτό είναι αναγκαίο έτσι ώστε να υπάρχει επαρκές περιθώριο ροπής, όταν η πλήρης ισχύς πρέπει να επιτευχθεί υπό αντίξοες συνθήκες. Συνήθως, η έλικα βελτιστοποιείται υδροδυναμικά στο σημείο PD (ή PD'). Η ταχύτητα δοκιμών που αντιστοιχεί στο σημείο PD, δεν έχει ξεκάθαρη σχέση με την «ταχύτητα υπηρεσίας» και σίγουρα δεν είναι η ταχύτητα του πλοίου στο σημείο SP. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι υπευθυνότητα του ναυπηγείου να προσδιορίσει αρκετά μεγάλα περιθώρια ελαφριάς φόρτισης, έτσι ώστε η συνεχής λειτουργία της μηχανής υπό όλες τις συνθήκες υπηρεσίας μεταξύ διαδοχικών δεξαμενισμών να κείται προς τα δεξιά της καμπύλης χαρακτηριστικών ονομαστικής έλικας, Σχήμα 3.2.



- Γραμμή 1: Καμπύλη έλικας δια του σημείου SMCR (M) – καμπύλη επιλογής μηχανής
- Γραμμή 2: Καμπύλη βαριάς έλικας – Ρυπασμένη γάστρα και αντίξοες καιρικές συνθήκες
- Γραμμή 3: Όριο στροφών (105%N₁₀₀)
- Γραμμή 4: Όριο ροπής / στροφών
- Γραμμή 5: Όριο μέσης ενεργής πίεσης
- Γραμμή 6: Καμπύλη ελαφράς έλικας / Καθαρή γάστρα και καλός καιρός / Καμπύλη σχεδίασης έλικας
- Γραμμή 7: Όριο ισχύος για συνεχή λειτουργία
- Γραμμή 8: Όριο υπερφόρτισης
- Γραμμή 9: Όριο στροφών δοκιμών ταχύτητας – ισχύος
- Γραμμή 10: Γραμμές σταθερής μέσης ενεργής πίεσης

Σχήμα 3.2: Διάγραμμα φόρτισης μηχανής (Λουκάκης, 2016)

3.1.3 Περιθώριο μηχανής (Engine margin-EM)

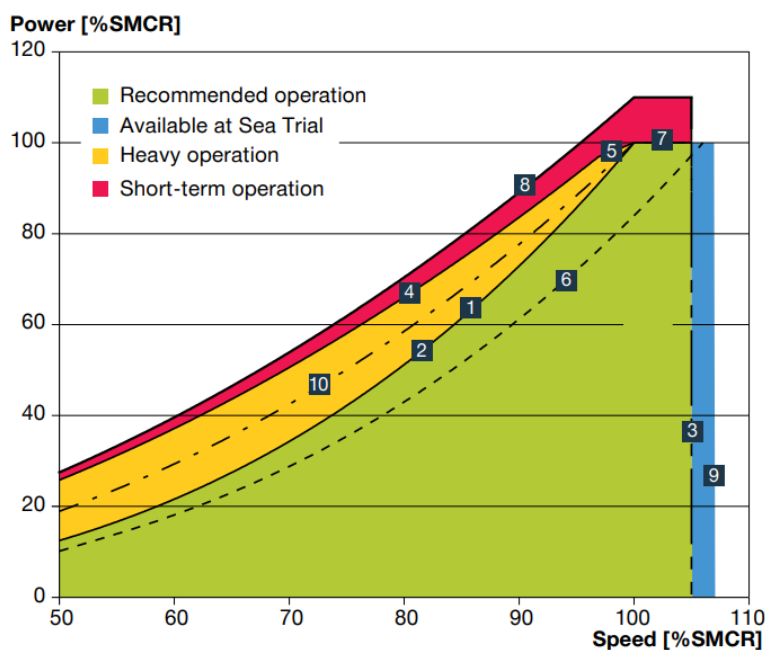
Το περιθώριο μηχανής είναι ένα άλλο χρήσιμο περιθώριο που υπολογίζεται έτσι ώστε ο κινητήρας να μπορεί να λειτουργεί ομαλά. Είναι μια αύξηση στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να είναι διαθέσιμη, ώστε να διασφαλιστεί ότι ο κινητήρας έχει επαρκή περίσσεια ισχύος σε περίπτωση που απαιτείται επιτάχυνση. Επίσης, ο κινητήρας που λειτουργεί συνεχώς στη μέγιστη ισχύ του θα σήμαινε ότι η Κατανάλωση του Κινητήρα αυξάνεται και το φορτίο που ασκείται στον κινητήρα θα είναι υψηλότερο. Είναι πιθανό, στην περίπτωση αυτή να χρειαστούν περισσότερα έξοδα υπηρεσιών για τη συντήρηση του κινητήρα.

Οι περισσότεροι πλοιοκτήτες προδιαγράφουν το σημείο SP του έμφορτου πλοίου να απαιτεί 85% έως 90% του SMCR για μεγάλες δίχρονες μηχανές. Το υπόλοιπο 10% με 15% έχει χρήση για αύξηση της λειτουργικότητας του πλοίου με την πάροδο του χρόνου. Το παραπάνω ποσοστό συνήθως αφαιρείται από το SMCR και έτσι η 100% ισχύς (σημείο MP Σχήμα 3.1) ορίζεται με διαίρεση της απαιτούμενης ισχύος στο σημείο PD με 0.85 ή 0.90, βλ. Σχήμα 3.1 (Λουκάκης, 2016).

3.2 Διάγραμμα φόρτισης κινητήρα με ΡΤΟ

Το διάγραμμα φόρτισης (load diagram) καθορίζει τα όρια της ισχύος και των στροφών ενός κινητήρα, ο οποίος έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με το σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας (MCR), που έχει προσδιοριστεί με βάση τις απαιτήσεις του πλοίου και τα περιθώρια που αναφέρθηκαν στη προηγούμενη παράγραφο. Η ανάλυση του εν λόγω διαγράμματος είναι ιδιαίτερα σημαντική, σε περίπτωση που μελετάται η εγκατάσταση ενός συστήματος αξονικής γεννήτριας για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (PTO mode), προκειμένου η αύξηση το φορτίου του κινητήρα να μην επιφέρει κινδύνους υπερφόρτωσης. Επιπλέον, η οριοθέτηση που παρατηρείται στο διάγραμμα οδηγεί και στην κατανόηση της μεγάλης σημασίας και ευελιξίας που προσφέρει το περιθώριο ήπιας λειτουργίας (light running margin).

Παρακάτω, απεικονίζεται το διάγραμμα φόρτισης ενός κινητήρα της MAN B&W, όπου οι αριθμημένες καμπύλες καθορίζουν τα όρια ισχύος και στροφών για την λειτουργία του (MAN B&W, 2020).



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα φόρτισης μηχανής με σημαδεμένες γραμμές (MAN B&W, 2020)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, οι περιοχές λειτουργίας καθορίζονται για να κατανοήσουμε το εύρος ισχύος που είναι διαθέσιμο ανάλογα με την κάθε κατάσταση. Η περιοχή πρασίνου που περιορίζεται από τις γραμμές 1, 3, 7 απεικονίζει την περιοχή λειτουργίας. Η κίτρινη περιοχή μπορεί να επιτραπεί για βαριά λειτουργία ή κατάσταση επιτάχυνσης με πρόσθετη αντίσταση. Τέλος, η κόκκινη περιοχή είναι μόνο για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά αυτού του διαγράμματος παραμένουν αμετάβλητα ανεξάρτητα από το MCR. Αυτό σημαίνει ότι οι αναλογίες κάθε καμπύλης και η θέση της είναι παρόμοιες ανεξάρτητα από την ποσότητα ισχύος.

- Γραμμή 1: Καμπύλη λειτουργίας του κινητήρα, είναι οι στροφές που αντιστοιχούν για κάθε τιμή ισχύος. Σχεδιάζεται σύμφωνα με τον νόμο της έλικας ($P=C \cdot n^3$) και λαμβάνοντας υπόψη το σημείο μέγιστης συνεχούς λειτουργίας (MCR) που βρίσκεται πάνω σε αυτήν. Εξαιτίας, της παρουσίας των προαναφερθέντων περιθωρίων στις συντεταγμένες του σημείου MCR, οι κύριες μηχανές οι οποίες δεν έχουν σύστημα PTO, λειτουργούν στα δεξιά της εν λόγω καμπύλης για το μεγαλύτερο διάστημα του χρόνου λειτουργίας τους.
- Γραμμή 2: Καμπύλη η οποία αφορά τις απαιτήσεις της έλικας σε μηχανική ισχύ για συνθήκες ρυπασμένης γάστρας και έλικας και έντονων καιρικών φαινομένων. Σχεδιάζεται σύμφωνα με τον νόμο της έλικας ($P=C \cdot n^3$) και σύμφωνα με την τιμή του light running margin καθώς στην ουσία περιγράφει την καμπύλη ήπιας λειτουργίας [6] μετατοπισμένη κατά την τιμή του περιθωρίου αυτού. Η γραμμή [2], έτσι, προσδιορίζει τις απαιτήσεις σε μηχανική ισχύ που πρέπει να καλύψει ο κινητήρας για την πρόωση του πλοίου, σε συνθήκες επιβαρυσμένης λειτουργίας και επομένως συμπίπτει με την γραμμή [1] σε περίπτωση που δεν εφαρμόζεται αξονική γεννήτρια στο σύστημα. Επιπρόσθετα, διαχωρίζει την περιοχή ήπιας (recommended operation) από την περιοχή επιβαρυσμένης λειτουργίας (heavy operation) όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο διάγραμμα.
- Γραμμή 3: Προσδιορίζει τη μεγαλύτερη τιμή των στροφών που μπορεί να επιτύχει ο κινητήρας για συνεχή λειτουργία. Δεν επηρεάζει, ούτε επηρεάζεται από το σύστημα PTO και δεν θα αναλυθεί περαιτέρω.
- Γραμμή 4: Προσδιορίζει τα όρια της ροπής που είναι δυνατόν να φέρει ο κινητήρας χωρίς να υπερφορτωθεί. Παρόλο που η μεθοδολογία σχεδίασης της είναι διαφορετική για τον κάθε κατασκευαστή, οι διαφορές που παρουσιάζονται ποιοτικά είναι μικρές. Η σημασία της καμπύλης είναι προφανώς μεγάλη, καθώς σε περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργεί σε περιοχές αριστερά από αυτήν έχει ως αποτέλεσμα υπερφόρτωση, η οποία άμα έχει μεγάλη διάρκεια μπορεί να επιφέρει αρκετά προβλήματα στη λειτουργία των στοιχείων μηχανών του.
- Γραμμή 5: Προσδιορίζει την μέγιστη δυνατή μέση πίεση, στην οποία είναι ικανή, η κύρια μηχανή, να λειτουργήσει χωρίς να προκληθεί υπερφόρτωση. Είναι σημαντική μόνο σε περιπτώσεις υψηλής ισχύος και στροφών καθώς για μικρότερες τιμές η γραμμή [4] είναι αυστηρότερο όριο υπερφόρτωσης του κινητήρα, όπως παρατηρείται και στο διάγραμμα.
- Γραμμή 6: Προσδιορίζει τη καμπύλη που απεικονίζει τη ζήτηση ισχύος της προπέλας για καθαρή γάστρα και ήρεμο καιρό (ήπιος άνεμος, κύμα). Η ποσοστιαία διαφορά των στροφών της καμπύλης αυτής με τις αντίστοιχες της καμπύλης 2 για δεδομένη τιμή ισχύος αποτελεί το light running margin. Αυτή η καμπύλη μπορεί να δημιουργηθεί είτε με θεωρητικές εξισώσεις είτε με πειραματικά δεδομένα από τη δεξαμενή δοκιμών. Αυτή η καμπύλη ορίζεται από τον νόμο της έλικας και συμμορφώνεται με την εξίσωση:

Εξίσωση 3.1

$$\frac{P_{LR}}{P_{MCR}} = C \left(\frac{n}{n_{MCR}} \right)^3 \text{ and } C = \left(\frac{1}{1 + LR} \right)^3$$

όπου LR: Light Running margin %

Το περιθώριο στροφών μεταξύ της καμπύλης 6 και της καμπύλης 1 αντιστοιχεί στο περιθώριο LR. Είναι σαφές ότι ένα μεγαλύτερο περιθώριο LR οδηγεί σε μεγαλύτερο παράθυρο ασφαλείας από την περιοχή βαρέως φορτίου. Ως αποτέλεσμα, ένα μεγαλύτερο περιθώριο LR συμβάλλει στην ευρύτερη διαθέσιμη ισχύ για χρήση PTO. Ωστόσο, το περιθώριο LR δεν μπορεί να αυξηθεί εκτενώς, καθώς μπορεί να μειώσει τον βαθμό απόδοσης του κινητήρα και της προπέλας.

- Γραμμή 7: Προσδιορίζει τη μέγιστη τιμή ισχύος που είναι εφικτό να επιτύχει ο κινητήρας για συνεχή λειτουργία.
- Γραμμή 8: Προσδιορίζει το όριο της υπερφόρτωσης που δύναται να υποστεί ο κινητήρας σε κάθε περίπτωση που αυτή καθίσταται αναπόφευκτη. Η λειτουργία του κινητήρα στη περιοχή που ορίζουν οι καμπύλες [8] και [4] είναι εφικτή μόνο για περιορισμένο χρονικό διάστημα (περίπου 1 ώρα) και σε περιπτώσεις ανάγκης. Για τις μεθόδους σχεδίασης της ισχύει ότι και στην καμπύλη [4].
- Γραμμή 9: Περιγράφει τη μέγιστη τιμή στροφών που μπορεί να επιτύχει ο κινητήρας σε καταστάσεις δοκιμών.
- Γραμμή 10: Η καμπύλη αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για το σύστημα των αξονικών γεννητριών, ορίζει το όριο διάταξης για τον συνδυασμό προπέλας και PTO. Αυτή η γραμμή απεικονίζει το περιθώριο ισχύος που μπορεί να παρασχεθεί για χρήση PTO. Οι δύο κύριοι κατασκευαστές κινητήρων θαλάσσης ακολουθούν μια ελαφρώς διαφορετική προσέγγιση όσον αφορά την εξίσωση που θέτει αυτό το όριο.

Εξίσωση 3.2: Εξίσωση MAN B&W

$$PTO_{layout\ limit} = P_{MCR} \left(\frac{n}{n_{MCR}} \right)^{2.4}$$

Το περιθώριο ισχύος που είναι διαθέσιμο για χρήση PTO μπορεί να βρεθεί από τη διαφορά των κατακόρυφων συντεταγμένων των σημείων της γραμμής 10 και της γραμμής 6. Είναι σαφές ότι το LR έχει μεγάλη επιρροή στην ισχύ που είναι διαθέσιμη για το PTO.

Επίσης, ένα μέγιστο όριο για τη μηχανική ισχύ PTO υπολογίζεται από:

Εξίσωση 3.3: Μέγιστο όριο μηχανικής ισχύς PTO

$$PTO_M(n) \leq P_{MCR} \left(\frac{n}{n_{MCR}} \right)^{2.4} - \left(\frac{n}{n_{MCR}} \right)^3 \left(\frac{1}{1 + LR} \right)^3$$

Το PTO_M ορίζεται από το ποσοστό απόδοσης της γεννήτριας άξονα (η_{PTO}) που θεωρείται περίπου 88% - 90%.

Εξίσωση 3.4: PTO_M

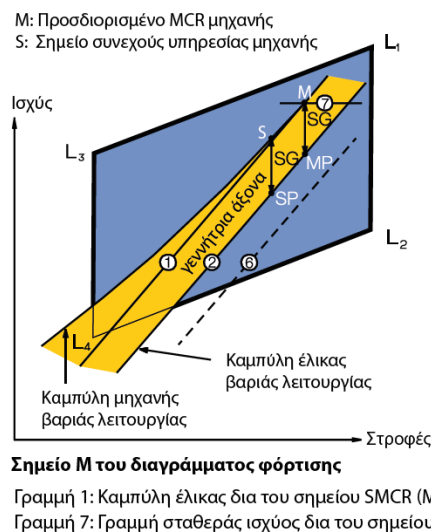
$$PTO_M = \frac{P_E}{n_{PTO}}$$

όπου P_E : Ηλεκτρική ενέργεια που θα παράγεται από το SG

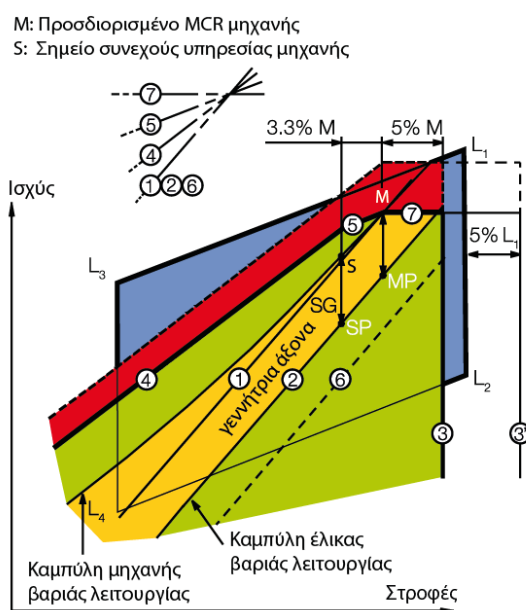
Συνεπώς, η ισχύς που απορροφά το σύστημα PTO (PTO_M) οριοθετείται από τις καμπύλες 6 και 10. Το γεγονός πως η οριοθέτηση πραγματοποιείται από την καμπύλη 10 και όχι από τις 4 και 5, οι οποίες αποτελούν το όριο υπερφόρτωσης του κινητήρα, προσδίδει ευελιξία στο σύστημα και καθιστά την λειτουργία του δυνατή ακόμη και σε περιπτώσεις επιβαρυσμένης λειτουργίας όπου το light running margin δύναται να έχει υποχωρήσει αισθητά. Παρόλα αυτά, σε καταστάσεις έντονης κακοκαιρίας ή σοβαρής βλάβης, όπου το φορτίο της μηχανής αυξάνεται σε πολύ υψηλό βαθμό, η λειτουργία της γεννήτριας άξονα χρειάζεται να σταματήσει και οι απαιτήσεις του πλοίου σε ηλεκτρικό ρεύμα να καλύπτονται εξ ολοκλήρου από τις γεννήτριες ντίζελ.

3.2.1 Λειτουργία με γεννήτρια άξονα (PTO) και έλικα δεδομένου βήματος FPP

Όταν υπάρχει εγκατεστημένη γεννήτρια άξονα η οποία απορροφά ισχύ (PTO), η μηχανή θα πρέπει να μπορεί να παρέχει την παραπάνω ισχύ συγχρόνως με την ισχύ που απαιτεί η πρόωση του πλοίου. Αυτό δείχνεται στο Σχήμα 3.4: Πλοίο με έλικα FPP - Πεδίο επιλογής μηχανής με γεννήτρια άξονα, όπου για το σημείο M η ισχύς είναι $M=MP+SG$ και έτσι ορίζεται η γραμμή πεδίου λειτουργίας της μηχανής. Μετά τον προσδιορισμό του σημείου M, μπορεί να χαραχτεί το αντίστοιχο διάγραμμα φόρτισης, Σχήμα 3.5: Πλοίο με έλικα FPP - Διάγραμμα φόρτισης μηχανής με γεννήτρια άξονα (Λουκάκης, 2016).



Σχήμα 3.4: Πλοίο με έλικα FPP - Πεδίο επιλογής μηχανής με γεννήτρια άξονα (Λουκάκης, 2016)



Σχήμα 3.5: Πλοίο με έλικα FPP - Διάγραμμα φόρτισης μηχανής με γεννήτρια άξονα (Λουκάκης, 2016)

3.2.2 Έλικες ελεγχόμενου βήματος στο διάγραμμα φόρτισης κινητήρα

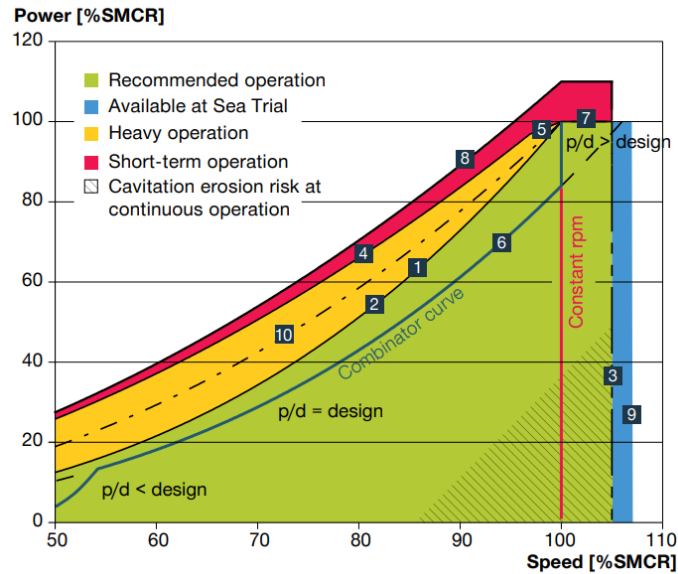
Υπάρχουν τρεις επιλογές κατά τη λειτουργία ενός πλοίου με έλικα CP:

- Σταθερές στροφές κινητήρα
- Σταθερή καμπύλη συνδυασμού (combinator curve)
- Έλεγχος βήματος και στροφών ξεχωριστά (συνήθως βασίζεται σε κάποια καμπύλη συνδυασμού)

Η λειτουργία σε μια σταθερή καμπύλη συνδυασμού σημαίνει ότι ακολουθεί μια καμπύλη βελτιστοποιημένη για βέλτιστη ρύθμιση της ταχύτητας και του βήματος της έλικας. Η ταχύτητα του πλοίου είναι γραμμική συνάρτηση της θέσης του μοχλού ελέγχου του πλοίου. Για κάθε θέση αυτού του μοχλού αντιστοιχεί ένα συγκεκριμένο ζεύγος τιμών στροφών έλικας και βήματος. Έτσι πάνω στο πεδίο λειτουργίας της μηχανής, στροφών – ισχύος, μπορούμε να χαράξουμε την καμπύλη στροφών ισχύος η οποία ακολουθείται για την προς τα πρόσω πορεία του πλοίου, το ίδιο δηλαδή που θα μπορούσαμε να κάνουμε με μια έλικα μόνιμου βήματος. Η καμπύλη αυτή είναι γνωστή ως καμπύλη συνδυασμού (combinator curve), βλ. Σχήμα 3.6 (Λουκάκης, 2016) (MAN B&W, 2020).

Το διάγραμμα φορτίου κινητήρα δεν επηρεάζεται από τον συνδυασμό με έλικα CP.

Οι έλικες CP έχουν ενδιαφέρον εάν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο πλοίο είναι υψηλή και το λειτουργικό προφίλ περιλαμβάνει μεγάλες διακυμάνσεις στην ταχύτητα του πλοίου. Εάν οι στροφές του κινητήρα είναι ανεξάρτητες από την ταχύτητα του πλοίου (με την μεταβολή του βήματος), τότε οι στροφές του κινητήρα μπορούν να διατηρηθούν υψηλές σε χαμηλές ταχύτητες του πλοίου, και έτσι να διασφαλιστεί η σταθερή διαθεσιμότητα πλήρους ισχύος PTO.



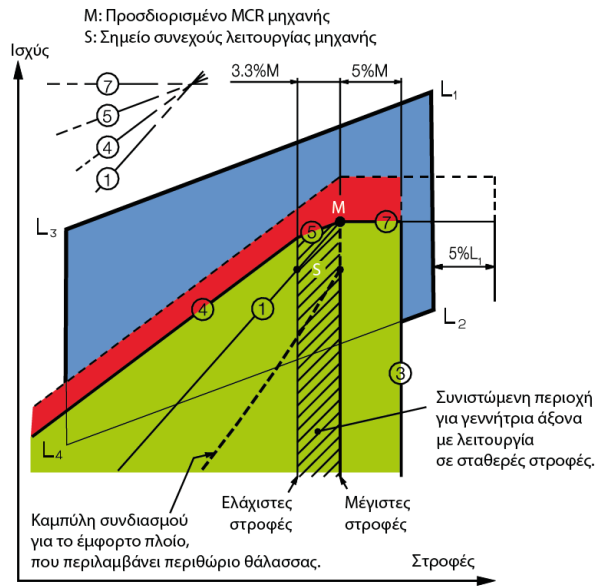
Σχήμα 3.6: Καμπύλη συνδυασμού έλικας ρυθμιζόμενου βήματος (MAN B&W, 2020)

3.2.3 Λειτουργία με γεννήτρια άξονα και έλικα ρυθμιζόμενου βήματος CPP(Λειτουργία σταθερών στροφών)

Το πλεονέκτημα της λειτουργίας σε σταθερές στροφές είναι ότι επιτρέπει την εύκολη εγκατάσταση ενός σύγχρονου PTO. Το μειονέκτημα της λειτουργίας σε σταθερές στροφές είναι ότι, σε χαμηλές ταχύτητες, οι απώλειες τριβής στην προπέλα και στον κινητήρα θα είναι σχετικά υψηλότερες από ό,τι αν ακολουθούσε μια καμπύλη συνδυασμού.

Παρόλο που η απόδοση είναι χαμηλή σε χαμηλά φορτία, το ίδιο ισχύει και για την κατανάλωση ενέργειας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή ποινή στη συνολική κατανάλωση καυσίμου, επομένως, οι σταθερές στροφές ανά λεπτό μπορεί να είναι ελκυστική επιλογή εάν απαιτείτε ένα πολύ απλό σύστημα.

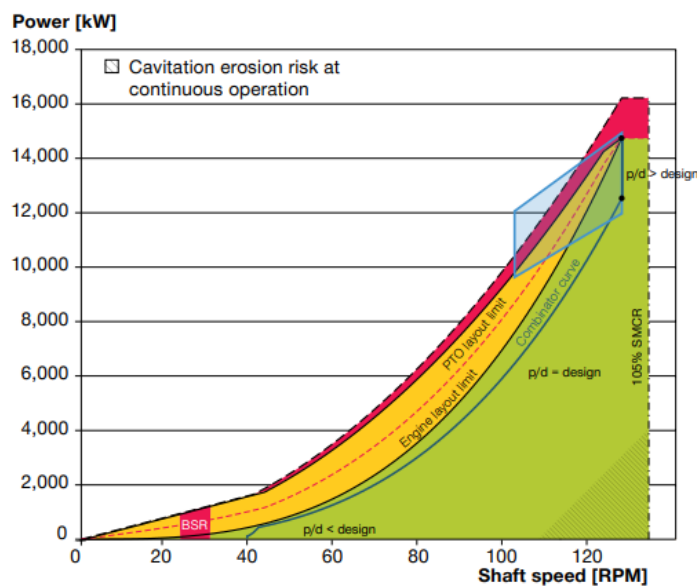
Η σκιασμένη περιοχή στο Σχήμα 3.7 δείχνει την υποδεικνυόμενη περιοχή στροφών της μηχανής, μεταξύ του 100% και του 96.7% των στροφών N_{100} , που αντιστοιχούν στο σημείο M, όταν η γεννήτρια άξονα λειτουργεί σε σταθερές στροφές. Το σημείο υπηρεσίας S μπορεί να οριστεί οπουδήποτε μέσα στη σκιασμένη περιοχή. Συνεπώς, όταν το προσδιορισμένου MCR σημείο M της μηχανής έχει υπολογιστεί να περιλαμβάνει τα περιθώρια μηχανής και θάλασσας καθώς και την ισχύ της γεννήτριας άξονα, μπορεί να χαραχτεί το διάγραμμα φόρτισης, όπως δείχνεται στο Σχήμα 3.7. Η θέση της καμπύλης συνδυασμού πρέπει να εξασφαλίζει επαρκές περιθώριο βαριάς λειτουργίας, αφήνοντας συγχρόνως λογική απόσταση από τις οριακές καμπύλες (4) και (5).



Σχήμα 3.7: Πλοίο με έλικα CPP. Διάγραμμα φόρτισης μηχανής με γεννήτρια άξονα (Λουκάκης, 2016)

3.2.4 Διάγραμμα πεδίου λειτουργίας με γεννήτρια άξονα και έλικα ρυθμιζόμενου βήματος CPP (Λειτουργία καμπύλης συνδυασμού)

Ακολουθώντας μια καμπύλη συνδυασμού, οι σχετικές απώλειες τριβής δεν αυξάνονται σε χαμηλότερες ταχύτητες πλεύσης. Συμπεριλαμβάνονται ηλεκτρονικά ισχύος, για τη μετατροπή των μεταβλητών ηλεκτρικών συχνοτήτων που παράγονται από το PTO στη σταθερή συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου. Με το πολύ μειωμένο κόστος για τα ηλεκτρονικά ισχύος που μπορούν να εξασφαλίσουν σταθερή συχνότητα στις κυμαινόμενες στροφές, αποτελεί μια ελκυστική επιλογή. Ακολουθεί διάγραμμα φορτιστής κινητήρα σε συνδυασμό με γεννήτρια άξονα και έλικα ρυθμιζόμενου βήματος CPP



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα φορτιστής κινητήρα S50ME-C8-GI σε συνδυασμό με γεννήτρια άξονα και έλικα ρυθμιζόμενου βήματος CPP (MAN B&W, 2020)

4 Μελέτη συστήματος γεννήτριας άξονα σε δεξαμενόπλοιο

Αφού έχουν αναλυθεί τα οφέλη και τα ζητήματα που προκύπτουν από την λειτουργία των γεννητριών άξονα, καθώς και οι διάφοροι τρόποι με τους οποίους καθίσταται δυνατή η λειτουργία τους, στο παρόν κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το ηλεκτρικό δίκτυο του υπό μελέτη πλοίου. Επίσης παρουσιάζεται αναλυτικά το σύστημα αξονικής γεννήτριας και περιγράφονται οι καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου. Τέλος παρουσιάζεται ο ηλεκτρικός ισολογισμός και γίνεται διερεύνηση αξιοποίησης της περίσσειας ισχύος μέσα από διάφορα σενάρια τα οποία θα εξεταστούν παρακάτω.

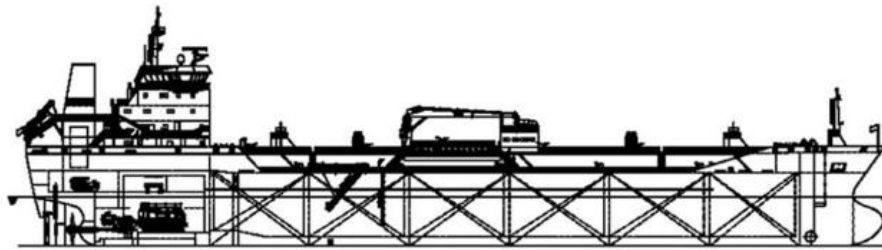
4.1 Δεδομένα του υπό μελέτη πλοίου

Το πλοίο στο οποίο θα εξετασθεί είναι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δεξαμενόπλοιο 16,500 DWT τύπου PRODUCT/CHEMICAL Carrier IMO II. Το πλοίο είναι ενισχυμένο για πάγο. Έξι μέρη δεξαμενών φορτίου διπλού τοιχώματος και ένα ζεύγος slop tanks³ με φαινολική εποξική επίστρωση. Το σύστημα διαχωρισμού του φορτίου επιτρέπει την ταυτόχρονη εκφόρτωση οκτώ τύπων φορτίου. Όλες οι σωληνώσεις φορτίου είναι από ανοξείδωτο χάλυβα. Επιπλέον το πλοίο είναι ικανό να μεταφέρει προϊόντα πετρελαίου με σημείο ανάφλεξης <60°C, φυτικά έλαια και χημικές ουσίες IMO II που μπορούν να μεταφερθούν νόμιμα σύμφωνα με την κλάση, την τεχνική κατασκευή και χωρίς να είναι επιβλαβές για το σύστημα φορτίου (ODELY, 2012). Τα δεξαμενόπλοια τύπου δύο (IMO II) είναι σχεδιασμένα για τη μεταφορά προϊόντων του κεφαλαίου 17 του κώδικα IBC⁴ με σημαντικά σοβαρούς περιβαλλοντικούς κινδύνους και κινδύνους για την ασφάλεια που απαιτούν σημαντικά προληπτικά μέτρα για να αποτραπεί η διαφυγή τέτοιου φορτίου (IMO, 2020).

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το υπό μελέτη πλοίο. Ακολουθώντας, στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου και στο Πίνακα 4.2 και Πίνακα 4.3 τα χαρακτηριστικά των κύριων και βοηθητικών μηχανών του, τα οποία αντλήθηκαν από δεδομένα της κατασκευάστριας εταιρείας (ODELY, 2012). Στο Σχήμα 4.2 σχεδιάστηκε το εύρος λειτουργίας της κύριας μηχανής για έλικα ελεγχόμενου βήματος σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή (MAK, 2012).

³ Δεξαμενές σε δεξαμενόπλοια πετρελαίου που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή αποστραγγίσεων, πλύσεων δεξαμενών και άλλων ελαιωδών μιγμάτων.

⁴ Το Κεφάλαιο 17 του κώδικα IBC παραθέτει κάθε προϊόν και τις απαιτήσεις μεταφοράς του, όπως τύπο πλοίου, τύπος δεξαμενής, κατηγορία ρύπανσης, αερισμός, περιβαλλοντικός έλεγχος δεξαμενής, ηλεκτρικός εξοπλισμός, μετρητές, ανίχνευση ατμών, πυροπροστασία καθώς και πρόσθετες ειδικές απαιτήσεις με βάση την τοξικότητα, ευαισθησία στη θερμότητα, αντιδραστικότητα νερού, κίνδυνος πολυμερισμού και άλλες ιδιότητες (DNV GL, 2020).



Σχήμα 4.1: 16,500DWT PRODUCT/CHEMICAL IMO II TANKER (ODELY, 2012)

Πίνακας 4.1: Γενικά χαρακτηριστικά πλοίου (ODELY, 2012)

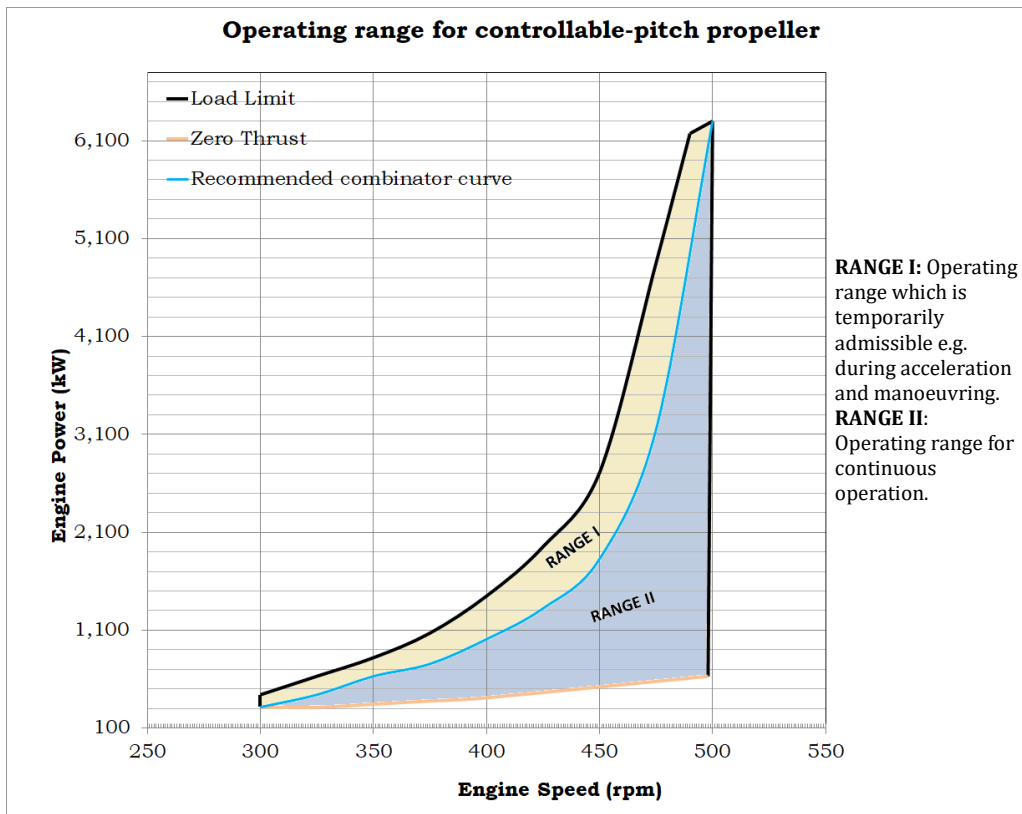
PRINCIPAL PARTICULARS				CAPACITY			
Loa abt.	144.22	M	Service speed	Abt. 14.9 kn	d_{designed}	Cargo Hold (100%)	
Lpp	134.00	M	(CSR+15%SM)			Include slop tanks	19,500 m ³
B	23.00	M	Endurance	6,900	n.mile	Liquid Tank	
D	12.40	m	Complement	23	P	F.O.T.	570 m ³
d_{designed}	8.40	m	G. tonnage	abt. 11,500		F.W.T.	240 m ³
DWT	15,100	t				W.B.T.	8,100 m ³
Ds	8.90	m					
DWT	16,500	t					
CLASS NOTATION							
ABS ✱ A1 (E) CHEMICAL CARRIER, OIL CARRIER ESP; ✱ AMS ✱ ACCU, ICE 1A, VEC							

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά κύριας μηχανής

MAIN ENGINE	
Type	MAK 7M43C 1 set
MCR	6300 kW x 500 r/min
CSR	5670 kW
Propeller	4 blade, CPP

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά βοηθητικών γεννητριών

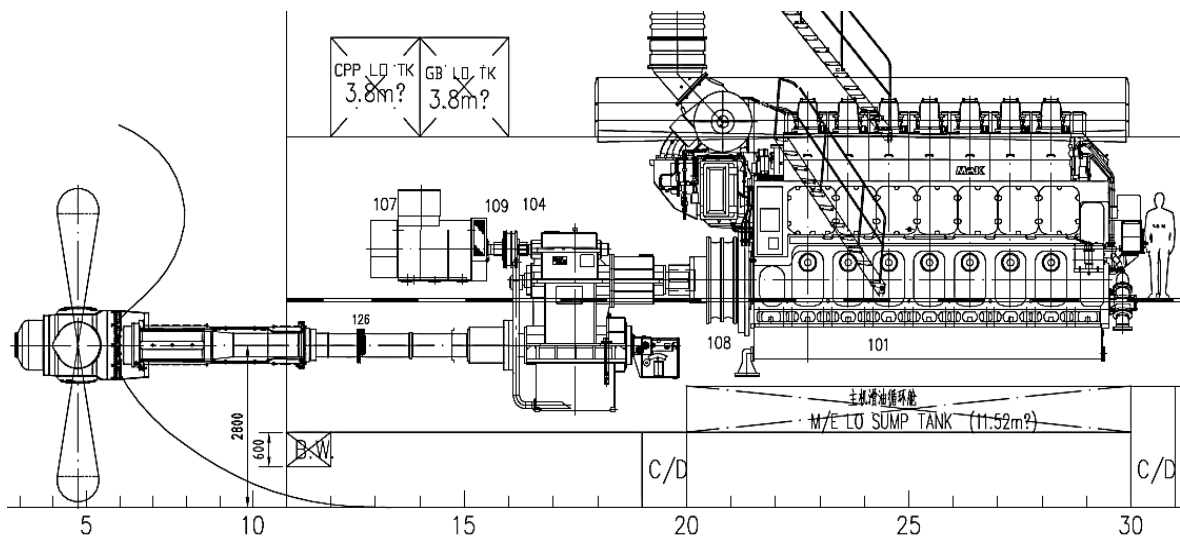
AUXILIARY GENERATORS	
Type	MAN 5L23H/30H 680kW x 720 r/min
No. of set	2
Type	MAN 7L23H/30H 1120kW x 900 r/min
No. of set	1



Σχήμα 4.2: Εύρος λειτουργίας για έλικα CP

4.2 Σύστημα αξονικής γεννήτριας του υπό μελέτη πλοίου

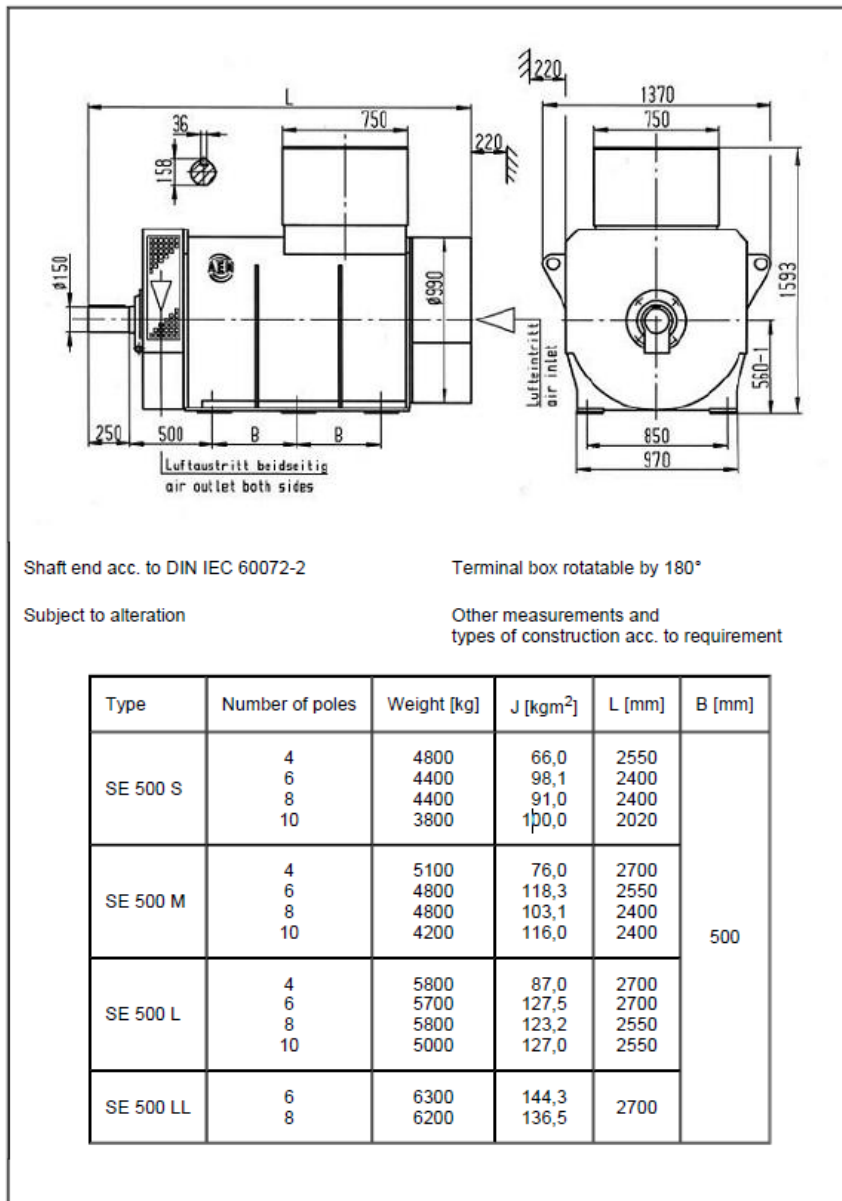
Η διάταξη του μηχανοστασίου του υπό μελέτη πλοίου φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Το πλοίο διαθέτει μια κύρια τετράχρονη μηχανή της εταιρείας Caterpillar Motoren (101). Η μηχανή συνδέεται μέσω εύκαμπτου συνδέσμου (ME flexible coupling - 108) στο μειωτήρα στροφών (104) με λόγο μείωσης 4.5:1. Ο μειωτήρας συνδέεται με την γεννήτρια άξονα (107) της εταιρείας AEM Dessau μέσω ενός εύκαμπτου συνδέσμου (SG flexible coupling - 109) και με τον άξονα ώσης της προπέλας. Τα χαρακτηριστικά και οι διαστάσεις της αξονικής γεννήτριας (Synchronous generator) δίνονται πιο κάτω (Πίνακας 4.4, Σχήμα 4.4) (ODELY, 2012).



Σχήμα 4.3: Διάταξη Μηχανοστασίου

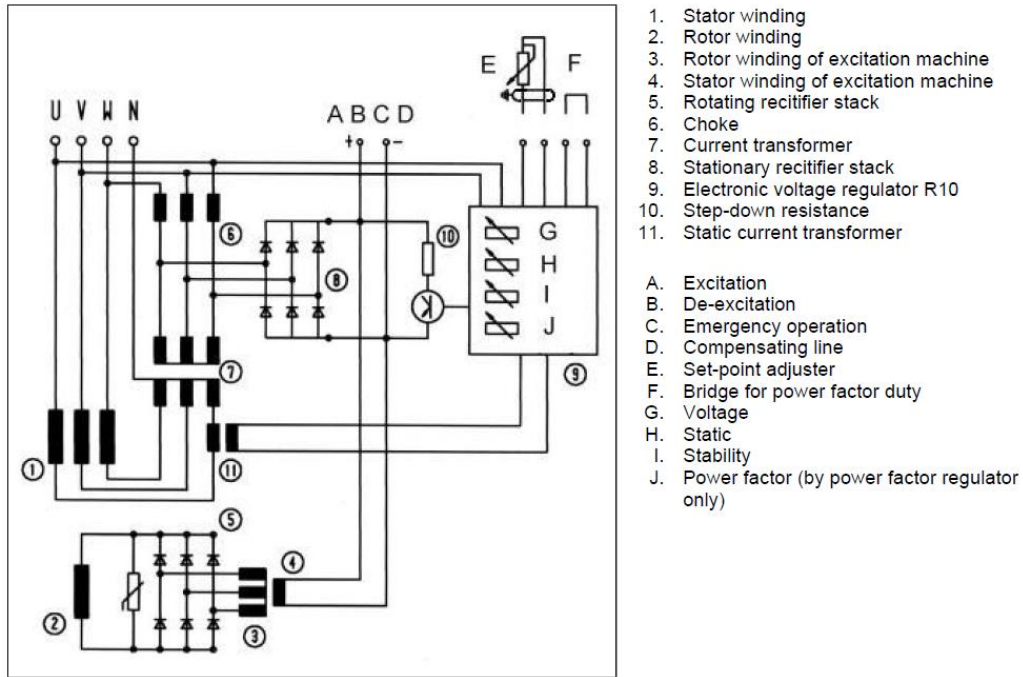
Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά σύγχρονης γεννήτριας (AEM Dessau GmbH, 2011)

Synchronous generator	
Manufacturer	AEM
Model	500 S4
Type	SE
Rated Power S - [kVA]	1900
Frequency f - [Hz]	60
Poles	4
Voltage	450
Power Factor PF	0.8
Power Output [kW]	1500



Σχήμα 4.4: Διαστάσεις σύγχρονης γεννήτριας τύπου SE 500 (AEM Dessau GmbH, 2011)

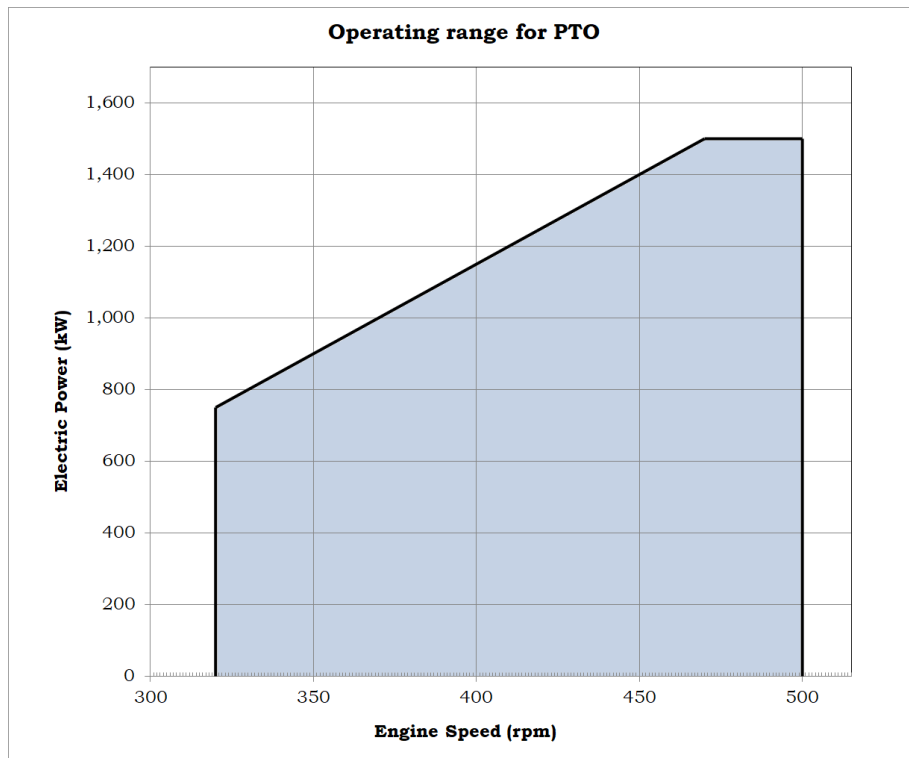
Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία της σύγχρονης γεννήτριας είναι τύπου SE (Compounding system for low voltage) και είναι εξοπλισμένη την παρακάτω συσκευή διέγερσης (Excitation device, Σχήμα 4.5)



Σχήμα 4.5: Ηλεκτρονικός ρυθμιστής τάσης (AEM Dessau GmbH, 2011)

Όπως παρατηρείται και σύμφωνα με τη θεωρία του κεφαλαίου 2.1, ο τύπος του συστήματος πρόκειται για συνδυασμό των τύπων PTO/GCR και PTO/CFE. Τα κύρια στοιχεία που το αποτελούν είναι μια εγκατάσταση γραναζοκιβωτίων (tunnel gear), η γεννήτρια άξονα και ένα σύστημα μετατροπής και σταθεροποίησης της συχνότητας και της τάσης του παραγόμενου εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Το σύστημα μετατροπής συχνότητας έχει ως στόχο την αντιμετώπιση των διακυμάνσεων φορτίου και στροφών της έλικας σταθεροποιώντας και ρυθμίζοντας την συχνότητα και την τάση του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος στις επιθυμητές τιμές. Αποτελείται από έναν ανορθωτή ο οποίος μετατρέπει το παραγόμενο εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα σε συνεχές και από έναν μετατροπέα ο οποίος μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο σταθερής συχνότητας.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα λειτουργίας της γεννήτριας άξονα, στο οποίο περιγράφεται η σχέση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος με τις στροφές της κύριας μηχανής. Η σχεδιάσή του πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του τύπου CFE που περιεγράφηκαν στο κεφάλαιο 2.1.3. και του διαγράμματος λειτουργίας της μηχανής (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.6: Περιοχή λειτουργίας αξονικής γεννήτριας

Το σύστημα, όπως φαίνεται.(Σχήμα 4.6) έχει τη δυνατότητα να παράγει το 100% της ηλεκτρικής του ισχύος ($PTO_{e,output,max}$) όταν οι στροφές της κύριας μηχανής ξεπερνούν τις 470 [rpm] ενώ για χαμηλότερες τιμές μέχρι και 320 [rpm], η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μειώνεται γραμμικά.

4.3 Ηλεκτρικός ισολογισμός του υπό μελέτη πλοίου

Ηλεκτρικός ισολογισμός είναι ο υπολογισμός της πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος του συνόλου των καταναλωτών σε ένα πλοίο στις διάφορες χαρακτηριστικές καταστάσεις λειτουργίας του, όπως για παράδειγμα στη κανονική πορεία, στη λειτουργία ελιγμών κ.λπ. Ο προσδιορισμός του ηλεκτρικού φορτίου με λεπτομέρεια είναι εφικτός όταν έχουν καθοριστεί με ακρίβεια τα στοιχεία των καταναλωτών ηλεκτρισμού στο πλοίο. Με τη βοήθεια του ηλεκτρικού ισολογισμού επιλέγονται οι γεννήτριες που θα χρησιμοποιηθούν για τη τροφοδότηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου (Αθ.Φραγκόπουλος & Προυσαλίδης, 2005). Ο αρχικός ισολογισμός του υπό μελέτη πλοίου φαίνεται πιο κάτω(Πίνακας 4.4)

Πίνακας 4.5: Αρχικός ηλεκτρικός ισολογισμός (ODELY, 2012)

ODELY	POWER LOADS ESTIMATING TABLE										
	ITEM	POWER CONSUMPTION									
		NORMAL RUN.(KW)		EMERG. (KW)		LEAVING PORT(KW)		CARGO HANDLING(KW)		IN PORT (KW) - IDLE	
		C.L.	I.L.	C.L.	I.L.	C.L.	I.L.	C.L.	I.L.	CL.	I.L.
E/R MACHINERY	745.6	137.1	65.8		194.5	206.7	1535	120.7	115.5	473.2	
AIR COND. & FAN	115.8	30.4	0.9		116.6	30.4	118.8	30.4	111.7	30.4	
DECK MACHINERIES	9.93		42.82		811.9	92.79	4		4		
GALLEY EQUIPMENT		64.96				64.96		64.92		64.96	
LIGHTING	28.15	3	14.05		29.61	3	31.61		14.21		
COMMUNICATION. EQUIPMENT	6.8	3	5		6.8	3		1		1.65	
TOTAL CONTINUOUS LOAD (KW)	906.3		128.6		1159.4		1689.4		245.4		
TOTAL INTERMITTENT LOAD (KW)	238.5				397.9		216.0		568.6		
I.L. DIVERSITY FACTOR (%)	40		40		40		40		40		
EQUIV. LOAD FOR I.L. (KW)	95.4				159.16		86.4		227.44		
TOTAL REQUIRED POWER (KW)	1001.7		128.6		1318.6		1775.8		472.8		
GENERATOR IN SERVICE (N _x KW)			1 x 150		1 x 640		2 x 640, 1 x 1000		1 x 640		
SHAFT GENERATOR IN SERVICE(I _x KW)	1 X 1500				1 X 1500(FOR B/T ONLY)						
SHAFT GENERATOR IN SERVICE TOTAL POWER(KW)	1500		150		1500		2280		640		
LOAD FACTOR (%)	66.8%		85.7%		87.9%		77.9%		73.9%		
STAND-BY GENERATOR (N _x KW)	2x640,1x1000				1 x640, 1 x1000				1 x64 00		

Όπως φαίνεται πιο πάνω (Πίνακας 4.5) το σύνολο απαιτούμενης ισχύς, στην κατάσταση κανονικής πλεύσης (NORMAL RUN), είναι στα 1001.7 kW και ο συντελεστής φόρτισης στο 66,8%. Μετά από μετατροπή το αντικείμενο 29 των μηχανημάτων του μηχανοστασίου (FRAMO HYDRAULIC PUMP) πρέπει να διαγραφεί στη κατάσταση κανονικής πλεύσης (NORMAL RUN). Έτσι, σε αυτή την λειτουργία, η συνολική απαιτούμενη ισχύς είναι 462,7 kW (1001,7-539 kW) μόνο. Ο ανανεωμένος ηλεκτρικός ισολογισμός φαίνεται πιο κάτω(Πίνακας 4.6).

Πίνακας 4.6: Ανανεωμένος ηλεκτρικός ισολογισμός

ODELY	POWER LOADS ESTIMATING TABLE										
	ITEM	POWER CONSUMPTION									
		NORMAL RUN.(KW)		EMERG. (KW)		LEAVING PORT(KW)		CARGO HANDLING(KW)		IN PORT (KW) - IDLE	
C.L.	I.L.	C.L.	I.L.	C.L.	I.L.	C.L.	I.L.	CL.	I.L.		
E/R MACHINERY	745.6	137.1	65.8		194.5	206.7	1535	120.7	115.5	473.2	
AIR COND. & FAN	115.8	30.4	0.9		116.6	30.4	118.8	30.4	111.7	30.4	
DECK MACHINERIES	9.93		42.82		811.9	92.79	4		4		
GALLEY EQUIPMENT		64.96				64.96		64.92		64.96	
LIGHTING	28.15	3	14.05		29.61	3	31.61		14.21		
COMMUNICATION. EQUIPMENT	6.8	3	5		6.8	3		1		1.65	
TOTAL CONTINUOUS LOAD (KW)	906.3		128.6		1159.4		1689.4		245.4		
TOTAL INTERMITTENT LOAD (KW)	238.5				397.9		216.0		568.6		
I.L. DIVERSITY FACTOR (%)	40		40		40		40		40		
EQUIV. LOAD FOR I.L. (KW)	95.4				159.16		86.4		227.44		
TOTAL REQUIRED POWER (KW)	462.7		128.6		1318.6		1775.8		472.8		
GENERATOR IN SERVICE (NxKW)			1 x 150		1 x 640		2 x 640, 1 x 1000		1 x 640		
SHAFT GENERATOR IN SERVICE(IXKW)	1 X 1500				1 X 1500(FOR B/T ONLY)						
SHAFT GENERATOR IN SERVICE TOTAL POWER(KW)	1500		150		1500		2280		640		
LOAD FACTOR (%)	30.8%		85.7%		87.9%		77.9%		73.9%		
STAND-BY GENERATOR (NxKW)	2x640,1x1000				1 x640, 1 x1000				1 x64 00		

Παρατηρείται ότι συντελεστής φόρτισης μειώνεται στο 30.8% . Αποτελεί πολύ σημαντική μείωση γεγονός το οποίο θα οδηγήσει σε υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου, χαμηλότερο βαθμό απόδοσης και υψηλότερες εκπομπές αερίων. Ιδανικά το σύστημα αξονικής γεννήτριας έπρεπε να είναι μελετημένο και κατάλληλα διαστασιολογημένο ώστε να λειτουργεί στο 75 με 100% της ονομαστικής του ισχύος (Prousalidis, 2015).

Συνεπώς δεν γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων αξονικής γεννήτριας, ενώ η κύρια μηχανή λειτουργεί σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης. Σ' αυτή τη διπλωματική αναζητούνται τρόποι εκμετάλλευσης της περίσσειας ισχύος που προκύπτει με τα νέα δεδομένα, μέσα από διάφορα σενάρια τα οποία θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια.

4.4 Προφίλ λειτουργίας

Το προφίλ λειτουργίας ενός πλοίου δίνει πληροφορίες σχετικά με βασικά χαρακτηριστικά του, όπως η ταχύτητα του και η ισχύς λειτουργίας της κύριας μηχανής, καθώς και την συχνότητα με την οποία αυτά εμφανίζονται κατά την διάρκεια των ταξιδιών του. Γίνεται εύκολα αντιληπτό λοιπόν, πως καθίσταται απαραίτητο, προκειμένου να εξεταστούν τα σενάρια εκμετάλλευσης της περίσσειας ισχύος.

Παρακάτω, απεικονίζεται, σύμφωνα με τα δεδομένα του DNV GL, το προφίλ λειτουργίας πανομοιότυπου δεξαμενόπλοιου το οποίο έχει επίσης περίσσεια ισχύος.

Πίνακας 4.7: Προφίλ λειτουργίας σε κατάσταση ερματισμού (Ballast)

Load	State	Condition	Speed [knots]	Frequency [year]	ME Load Factor
BALLAST	PORT	Harbour	0	3,75%	0%
	PORT	Loading	0	1,42%	0%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	1	0,13%	8%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	2	0,11%	16%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	3	0,15%	25%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	4	2,56%	5%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	5	2,11%	6%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	6	2,11%	8%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	7	0,40%	16%
	NORMAL RUN	At Sea	8	0,89%	21%
	NORMAL RUN	At Sea	9	4,35%	20%
	NORMAL RUN	At Sea	10	1,86%	28%
	NORMAL RUN	At Sea	11	2,78%	35%
	NORMAL RUN	At Sea	12	9,03%	43%
	NORMAL RUN	At Sea	13	3,85%	46%
	NORMAL RUN	At Sea	14	1,76%	56%
	NORMAL RUN	At Sea	15	1,34%	63%
	NORMAL RUN	At Sea	16	1,72%	73%

Πίνακας 4.8: Προφίλ λειτουργίας σε έμφορτη κατάσταση (Laden)

Load	State	Condition	Speed [knots]	Frequency [year]	Load Factor
LADEN	PORT	Harbour	0	10,97%	0%
	PORT	Unloading	0	0,77%	0%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	1	0,13%	14%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	2	0,08%	10%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	3	0,04%	10%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	4	0,02%	21%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	5	0,11%	25%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	6	0,20%	25%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	7	0,34%	31%
	NORMAL RUN	At Sea	8	0,53%	39%
	NORMAL RUN	At Sea	9	0,75%	37%
	NORMAL RUN	At Sea	10	3,38%	47%
	NORMAL RUN	At Sea	11	18,77%	53%
	NORMAL RUN	At Sea	12	12,44%	51%
	NORMAL RUN	At Sea	13	6,38%	60%
	NORMAL RUN	At Sea	14	4,67%	65%
	NORMAL RUN	At Sea	15	0,04%	65%

Στην πρώτη στήλη των πινάκων προσδιορίζεται η κατάσταση φόρτωσης του δεξαμενόπλοιου, αν βρίσκεται, δηλαδή, σε κατάσταση ερματισμού (ballast) ή είναι

φορτωμένο (laden). Αξίζει να παρατηρηθεί, πως για όμοιες τιμές ταχύτητας πλεύσης απαιτούνται μεγαλύτερα ποσά ισχύος στην φορτωμένη κατάσταση, καθώς η αύξηση του εκτοπίσματος του πλοίου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του βυθίσματός του, της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας και συνεπώς της αντίστασης τριβής λόγω συνεκτικότητας που δέχεται από την θάλασσα.

Στην δεύτερη στήλη αναφέρονται οι λειτουργίες του πλοίου όταν αυτό βρίσκεται εν πλω, διαχωρίζοντας την κατάσταση ελιγμών (maneuvering – entlean port) από την απλή πλεύση στην ανοιχτή θάλασσα (sailing – normal run), ενώ στην τρίτη αναφέρονται λειτουργίες όταν βρίσκεται εν όρμω, διαχωρίζοντας την διαδικασία φόρτωσης (loading), εκφόρτωσης (unloading), καθώς και την περίπτωση που το πλοίο παραμένει αγκυροβολημένο στο λιμάνι (harbor).

Στις επόμενες στήλες προσδιορίζονται οι ταχύτητες που λειτουργεί το πλοίο, καθώς και οι αντίστοιχες συχνότητες για τις οποίες αυτές επιτυγχάνονται κατά την διάρκεια ενός χρόνου. Παρατηρείται, πώς και στις δύο καταστάσεις φόρτωσης, οι ταχύτητες οι οποίες επιτυγχάνονται συχνότερα κυμαίνονται μεταξύ 11 και 13 κόμβων. Στην συνέχεια, φαίνεται η ποσοστιαία σχέση της κάθε ισχύος με την αντίστοιχη της μέγιστης συνεχούς λειτουργίας της κύριας μηχανής.

Η μεγάλη ποσότητα των τιμών των ταχυτήτων και των αντίστοιχων συχνοτήτων και ισχύων της κύριας μηχανής του προφίλ λειτουργίας, οδηγεί σε υπερανάλυση των δεδομένων, η οποία δεν είναι απαραίτητη για την επερχόμενη μελέτη και παράλληλα την καθιστά ιδιαίτερα χρονοβόρα και πολύπλοκη. Για τον λόγο αυτό, υφίσταται η ανάγκη υπολογισμού μέσω των όρων των παραπάνω μεγεθών, με κατάλληλο τρόπο, ώστε να συμπυκνούνται τα δεδομένα του πίνακα χωρίς να παρατηρηθεί αλλοίωση των πληροφοριών που προκύπτουν από αυτά. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την χρήση του σταθμισμένου μέσου, του οποίου ο τύπος απεικονίζεται παρακάτω:

Εξίσωση 4.1: Σταθμισμένος μέσος

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k (w_i x_i)}{\sum_{i=1}^k (w_i)}$$

όπου w_i ο συντελεστής βαρύτητας του i στοιχείου x_i

Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα οριστούν οι σταθμισμένοι μέσοι των ταχυτήτων και του ποσοστού φόρτισης του κινητήρα, θέτοντας τις τιμές της συχνότητας ως τους αντίστοιχους συντελεστές βαρύτητας. Βασικός στόχος, είναι ο υπολογισμός τριών ταχυτήτων και ισχύων για κάθε κατάσταση φόρτωσης, από τις οποίες η μία θα αντιπροσωπεύει την κατάσταση ελιγμών ενώ οι άλλες δύο την απλή πλεύση του πλοίου.

Συνεπώς, υπολογίσθηκε ο σταθμισμένος μέσος των ταχυτήτων:

- α) 1 έως 7 κόμβων, που αντιστοιχούν στις ταχύτητες ελιγμού του πλοίου
- β) 8 έως 11 κόμβων, που αντιστοιχούν στις ταχύτητες στη κατάσταση πλεύσης, για τις οποίες η απαιτούμενη ισχύς είναι χαμηλότερη του 40% του MCR
- γ) 12 έως 16 κόμβων

Όμοια για την έμφορτη κατάσταση προέκυψε ο σταθμισμένος μέσος των ταχυτήτων:

- α) 1 έως 7 κόμβων, που αντιστοιχούν στις ταχύτητες ελιγμού
- β) 8 έως 12 κόμβων
- γ) 13 έως 15 κόμβων

Στην περίπτωση της κατάστασης ερματισμού ο διαχωρισμός των ταχυτήτων πλεύσης 8 έως 11 κόμβων πραγματοποιείται, διότι οι συγκεκριμένες αντιστοιχούν σε επίπεδα ισχύος του κινητήρα μικρότερα του 40% του MCR. Το κριτήριο αυτό παρατηρείται για δύο μονάχα ταχύτητες σε μικρή συχνότητα όταν το πλοίο είναι φορτωμένο και συνεπώς δεν λαμβάνεται υπόψη στην κατάσταση αυτή.

Παράλληλα, υπολογίζονται και οι σταθμισμένοι μέσοι των ποσοστών φόρτισης που αντιστοιχούν στις παραπάνω έξι κατηγορίες ταχυτήτων, ενώ η συχνότητα κάθε κατηγορίας προκύπτει αθροιστικά, αποτελώντας στην ουσία τον παρονομαστή του τύπου του σταθμισμένου μέσου.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.9: Ισοδύναμο προφίλ λειτουργίας δεξαμενόπλοιου DNV

Load	State	Condition	Speed [knots]	Frequency [year]	Load Factor
Ballast	PORT	Harbour	0	3,75%	0%
	PORT	Loading	0	1,50%	0%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	5	7,50%	7%
	NORMAL RUN	At Sea	9,5	10,00%	26%
	NORMAL RUN	At Sea	13	17,50%	49%
Laden	PORT	Harbour	0	11,00%	0%
	PORT	Unloading	0	0,75%	0%
	ENT&LEAV PORT	At Sea	5	1,00%	24%
	NORMAL RUN	At Sea	11	36,00%	51%
	NORMAL RUN	At Sea	13,5	11,00%	62%

Στη συνέχεια σύμφωνα με τα πιο πάνω αποτελέσματα, προκύπτει το ισοδύναμο προφίλ λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου χωρίς την αξονική γεννήτρια.

Πίνακας 4.10: Προφίλ λειτουργίας υπό μελέτη πλοίου χωρίς PTO

STATE	SPEED	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		M/E POWER KW	LOAD M/E
	knots		%	DAYS/YEAR	KW	%
NORMAL RUN	9.5	BALLAST	10	36.5	1638.0	26
	13	BALLAST	17.5	63.9	3087.0	49
	11	LADEN	36	131.4	3213.0	51
	13.5	LADEN	11	40.2	3906.0	62
ENT&LEAV PORT	5	BALLAST	7.5	27.4	441.0	7
	5	LADEN	1	3.7	1512.0	24
IN PORT	0	BALLAST	3.75	13.7	0	0
	0	LADEN	11	40.2	0	0
CARGO HANDLING	0	BALLAST	1.5	5.5	0	0
	0	LADEN	0.75	2.7	0	0

Για τον υπολογισμό του λειτουργικού προφίλ με τη χρήση αξονικής γεννήτριας, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος, που χρειάζεται να παράγεται για την κάλυψη των αναγκών του πλοίου σε ηλεκτρισμό όταν χρησιμοποιείται το σύστημα PTO. Σύμφωνα, λοιπόν, με τις απαιτήσεις του υπό μελέτη πλοίου σε ηλεκτρικό φορτίο, που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4.3 στον πίνακα ηλεκτρικού ισολογισμού (Πίνακας 4.6), βρίσκεται ηλεκτρική ισχύς που απορροφάται από το ηλεκτρικό δίκτυο σε κάθε κατάσταση. Λαμβάνοντας, επιπλέον, υπόψη τις απώλειες που προκαλούνται λόγω της παρουσίας του ανορθωτή, του μετατροπέα και της σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο, οι οποίες θεωρούνται 2% για κάθε περίπτωση, η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια που πρέπει να παρέχεται στον πίνακα διανομής του πλοίου υπολογίζεται ως εξής:

Εξίσωση 4.2: Ηλεκτρική ενέργεια που πρέπει να παρέχεται στον πίνακα διανομής του πλοίου

$$PTO_{e,input} = \frac{PTO_{e,output}}{\eta_{rectif} \cdot \eta_{converter} \cdot \eta_{grid}}$$

Στη συνέχεια, χρειάζεται να προσδιοριστεί η συνολική ισχύς η οποία απορροφά το σύστημα PTO από την κύρια μηχανή. Η απορροφούμενη ισχύς $PTO_{absorbed}$ προκύπτει από την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, διαιρεμένη με το βαθμό απόδοσης της γεννήτριας και του αξονικού συστήματος οι οποίοι λαμβάνονται 95%.

Εξίσωση 4.3: Η απορροφούμενη ισχύς PTO από κύρια μηχανή

$$PTO_{absorbed} = \frac{PTO_{e,input}}{\eta_{shaft} \cdot \eta_{generator}}$$

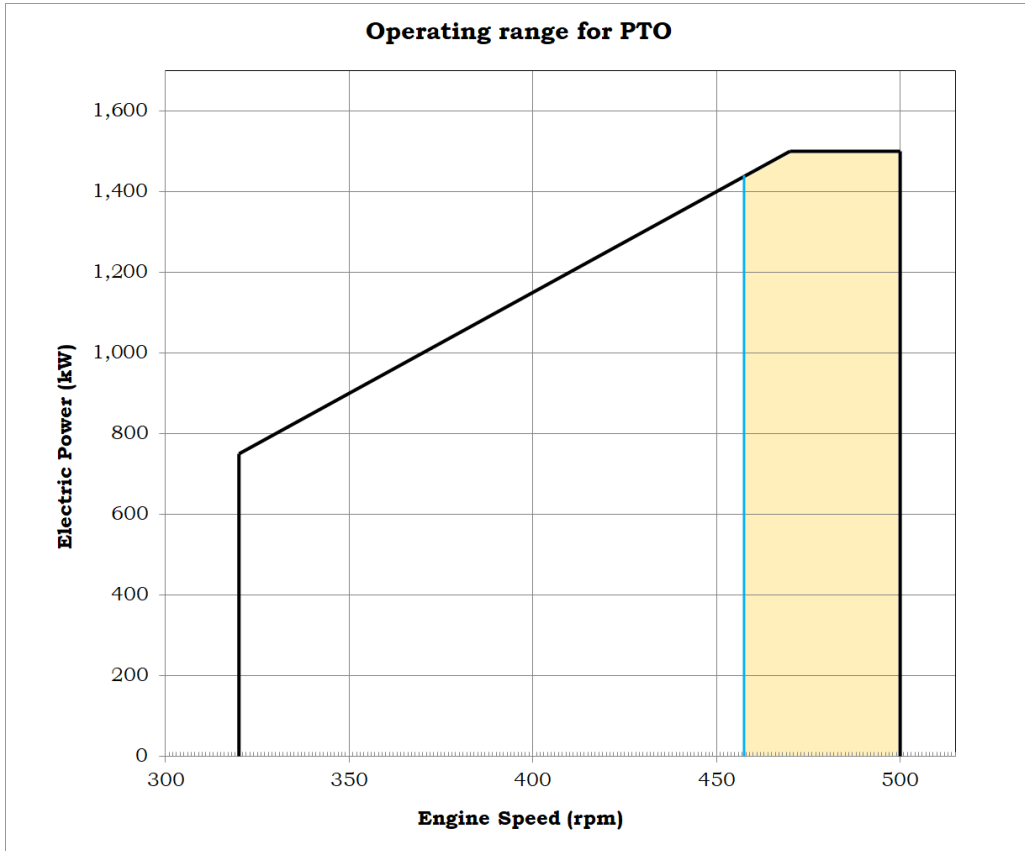
Έτσι, με την πρόσθεση της ισχύς της κύριας μηχανής και της ισχύς που απορροφά το σύστημα της αξονικής γεννήτριας, προκύπτει το τελικό προφίλ λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου.

Πίνακας 4.11: Τελικό προφίλ λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου

STATE	SPEED	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		M/E POWER KW	LOAD M/E
	knots		%	DAYS/YEAR	KW	
NORMAL RUN	9.5	BALLAST	10	36.5	2182.7	34.6
	13	BALLAST	17.5	63.9	3631.7	57.6
	11	LADEN	36	131.4	3757.7	59.6
	13.5	LADEN	11	40.2	4450.7	70.6
ENT&LEAV PORT	5	BALLAST	7.5	27.4	1993.3	31.6
	5	LADEN	1	3.7	3064.3	48.6
IN PORT	0	BALLAST	3.75	13.7	0	0.0
	0	LADEN	11	40.2	0	0.0
CARGO HANDLING	0	BALLAST	1.5	5.5	0	0.0
	0	LADEN	0.75	2.7	0	0.0

Παρατηρούμαι ότι η χαμηλότερη φόρτιση του κινητήρα είναι στο 31.6% που αντιστοιχεί σε 1993.3 kW. Μέσω τη καμπύλης συνδυασμού της έλικας (Σχήμα 4.2), του εύρους λειτουργίας της αξονικής γεννήτριας (Σχήμα 4.6) και του ηλεκτρικού ισολογισμού (Πίνακας 4.6) εξάγουμε το συμπέρασμα, ότι η αξονική γεννήτρια μπορεί να καλύψει όλες τις ανάγκες στις καταστάσεις εν πλω (NORMAL RUN) και ελιγμών (ENT&LEAV PORT), τόσο σε κατάσταση ερματισμού όσο και έμφορτη (Σχήμα 4.7). Τέλος, παρατηρείται ότι υπάρχει περίσσεια ισχύος με τη μεγαλύτερη

φόρτιση να είναι στο 70.6%. Πιο κάτω φαίνεται το εύρος λειτουργίας της αξονικής γεννήτριας ως προς τις στροφές της μηχανής από φόρτιση 31.6% μέχρι 100%. Στο 31.6% στις 457 [rpm] η γεννήτρια άξονα μπορεί να παράγει 1450 kW ηλεκτρικής ισχύς (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Εύρος λειτουργίας αξονικής γεννήτριας σύμφωνα με λειτουργικό προφίλ

5 Μελέτη σεναρίων βελτιστοποίησης εγκατεστημένου συστήματος αξονικής γεννήτριας

Η διάταξη ΡΤΟ, που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.2, αποδείχθηκε ότι έχει περίσσεια ισχύος την οποία θα προσπαθήσουμε να εκμεταλλευτούμε μέσα από τη διερεύνηση διαφόρων σεναρίων. Στόχος αρχικά, είναι η αξιολόγηση της εξοικονόμησης καυσίμου που επιτυγχάνεται. Αυτές οι εξοικονομήσεις υπολογίζονται σε ετήσια βάση. Στη συνέχεια, αυτές οι εξοικονομήσεις εάν είναι συμφέρουσες χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση μελέτης σκοπιμότητας για αυτήν την τεχνολογία χρησιμοποιώντας το κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας. Η εφαρμογή της τεχνολογίας αξιολογείται από διάφορες οπτικές γωνίες για να καταλήξουμε σε ένα ασφαλές συμπέρασμα για τη σκοπιμότητά της και τα οφέλη που μπορούν να επιτευχθούν. Τα σενάρια που θα μελετηθούν είναι η εγκατάσταση μπαταριών, οι οποίες θα φορτίζονται σε κατάσταση εν πλω και θα χρησιμοποιούνται για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών σε άλλες καταστάσεις. Στη συνέχεια, θα μελετηθεί η απεγκατάσταση του συστήματος ΡΤΟ και τέλος η εγκατάσταση ναυτικής πλυντρίδας (Scrubber).

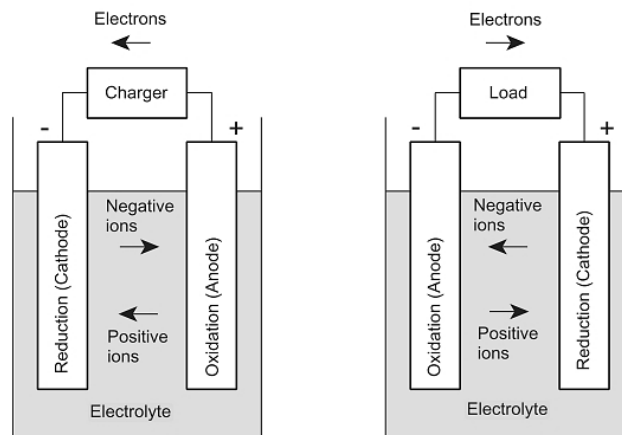
5.1 Σενάριο 1^ο – Εγκατάσταση συστήματος Μπαταριών

Σε αυτό το κεφάλαιο επεξηγείται συνοπτικά η τεχνολογία της μπαταρίας. Αναλύεται η αρχή λειτουργίας μιας μπαταρίας και τα κύρια χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση μιας μπαταρίας. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Καθορίζονται τα κύρια εξαρτήματα αυτών των μπαταριών. Αναλύονται επίσης οι κύριες χημείες καθόδου που προσφέρουν επιθυμητά χαρακτηριστικά όπως υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και ρυθμός απόδοσης και μεγάλος κύκλος ζωής με ασφάλεια. Τέλος, γίνεται επίσης μια υλοποίηση και επιλογή ενός πακέτου μπαταριών για το πλοίο μελέτης περίπτωσης. Το πακέτο μπαταριών αξιολογείται σε διάφορες καταστάσεις εάν μπορεί να δημιουργήσει επαρκή εξοικονόμηση καυσίμου για να καταστεί εφικτή αυτή η επένδυση.

5.1.1 Αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας της μπαταρίας

Η μπαταρία είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή αποθήκευσης που μπορεί να αποθηκεύσει ηλεκτρική ενέργεια αφού τη μετατρέψει σε χημική. Τα βασικά συστατικά ενός στοιχείου μπαταρίας είναι η άνοδος και η κάθοδος, που σχηματίζουν τα ηλεκτρόδια, τον ηλεκτρολύτη και τον διαχωριστή (Bakirtzoglou, 2017). Τα εξαρτήματα απεικονίζονται στο Σχήμα 5.1 (EMSA, 2021). Επομένως, μια μπαταρία αποτελείται από δύο αντίθετους πόλους, ένα θετικό ηλεκτρόδιο που ονομάζεται κάθοδος και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο που ονομάζεται άνοδος. Τα ηλεκτρόδια είναι αγώγιμες πλάκες (Stavrakakis, 2010) και ανάμεσα τους μπορεί να τοποθετηθεί ένας διαχωριστής για να αποφευχθεί η επαφή τους. Όταν απαιτείται αυτή η ενέργεια, μπορεί να παρασχεθεί σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, με χημικές αντιδράσεις που ξεκινούν τη ροή των ηλεκτρονίων. Αυτό συμβαίνει κατά τη φάση αποφόρτισης της μπαταρίας. Στο εσωτερικό της μπαταρίας χρησιμοποιείται ένα υλικό που είναι επίσης αγώγιμο και ονομάζεται ηλεκτρολύτης. Ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει στα ιόντα να μεταφέρονται εμπρός και πίσω μεταξύ αυτών των πόλων μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος/φορτίου με ηλεκτροχημική αντίδραση. Ως αποτέλεσμα, όταν οι πόλοι συνδέονται με ένα ηλεκτρικό αγώγιμο υλικό, τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος και τα ιόντα περνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα να ρέει μέσω του εξωτερικού κυκλώματος και να

αποθηκεύεται ή να παράγεται ενέργεια στην μπαταρία. Όταν το ρεύμα συνεχούς ρεύματος που προέρχεται από μια εξωτερική πηγή ρέει μέσω της αποφορτισμένης μπαταρίας, η μπαταρία φορτίζεται και η ηλεκτρική ενέργεια με αντίστροφες χημικές αντιδράσεις αποθηκεύεται ως χημική (EMSA, 2021) (Stavrakakis, 2010).



Σχήμα 5.1: Ηλεκτροχημική λειτουργία μπαταρίας κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση (Farag, 2013)

Η μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα κελιά (cells) συνδεδεμένα σε σειρά, παράλληλα ή και τα δύο. Κάθε κελί περιλαμβάνει:

- α) Άνοδο ή αρνητικό ηλεκτρόδιο: που παρέχει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση.
- β) Κάθοδο ή θετικό ηλεκτρόδιο: που δέχεται ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα.
- γ) Ηλεκτρολύτη (συνήθως υγρός και μερικές φορές στερεός): παρέχει το μέσο για τη μεταφορά των ιόντων εντός της κυψέλης μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Κριτήριο για την επιλογή του ηλεκτρολύτη μπορεί να είναι η υψηλή αγωγιμότητά του, η μη αντιδραστικότητα με υλικά ηλεκτροδίων, η ασφάλεια, η μη αναφλεξιμότητα και οι σταθερές ιδιότητες για μια ποικιλία θερμοκρασιών (Bakirtzoglou, 2017) (Stavrakakis, 2010).

5.1.2 Βασικές παράμετροι της μπαταρίας

Οι βασικοί παράμετροι που μπορούν να περιγράψουν την απόδοση μιας μπαταρίας είναι:

- I. **Χωρητικότητα:** εκφράζει την ενέργεια σε αμπέρ-ώρες [Ah] που μπορεί να παρέχει μια μπαταρία κατά τη διάρκεια ενός κύκλου εκφόρτισης.
- II. **Ποσοστό απόδοσης:** είναι η αναλογία των Ah που αποφορτίζονται από μια μπαταρία και των Ah που παρέχονται στην μπαταρία για φόρτιση σε μια συγκεκριμένη περίοδο.
- III. **Ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης:** εκφράζονται από το μέγιστο ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης σε αμπέρ και έτσι το ρυθμό με τον οποίο μπορεί να φορτιστεί ή να αποφορτιστεί μια μπαταρία.

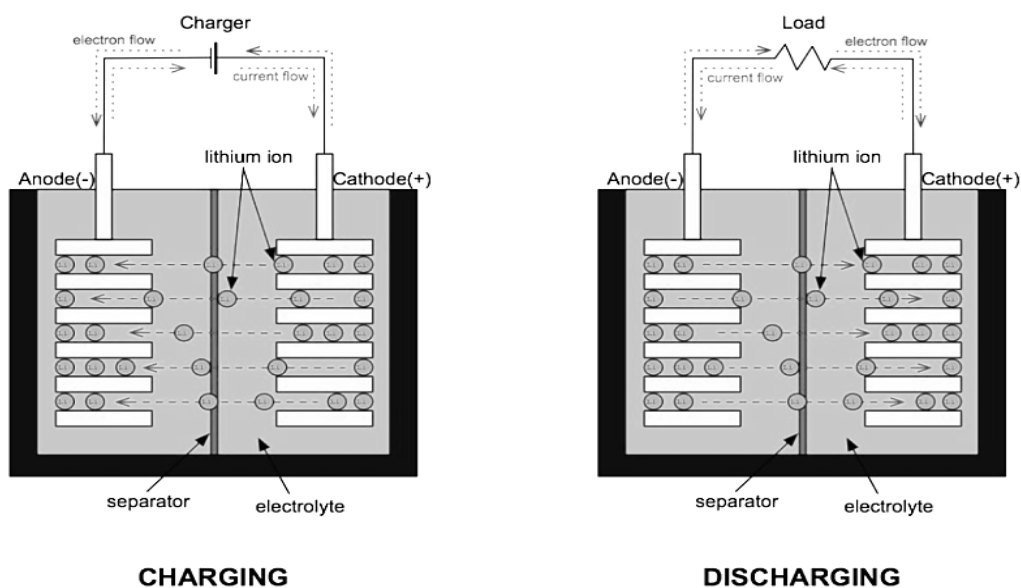
- IV. **Διάρκεια ζωής μπαταρίας:** εκφράζει τον αριθμό των κύκλων λειτουργίας που παρέχει μια μπαταρία κατά τη διάρκεια του ωφέλιμου κύκλου ζωής της. Ο ωφέλιμος κύκλος ζωής είναι μέχρι το σημείο που είναι διαθέσιμο το 80% της Ονομαστικής Χωρητικότητας. Επίσης, όταν μια μπαταρία εκτίθεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ο κύκλος ζωής της μειώνεται.
- V. **Κατάσταση φόρτισης (SOC):** εκφράζει την ποσότητα της μπαταρίας που είναι φορτισμένη σε σχέση με το 100%. Η αντίθετη ποσότητα Βάθος εκφόρτισης (DOD) εκφράζει την ποσότητα της μπαταρίας που έχει αποφορτιστεί σε σχέση με το πλήρες 100%. Για παράδειγμα, όταν το SOC είναι 40%, τότε το DOD είναι 60%.
- VI. **Ειδική ενέργεια [Wh/kg] και ενεργειακή πυκνότητα [Wh/L]:** βασική παράμετρος όταν εξετάζονται εφαρμογές κρίσιμες για το βάρος και κρίσιμες για τον όγκο εφαρμογές αντίστοιχα
- VII. **Ο ρυθμός C_p :** είναι ίσος με kW/kWh και υποδεικνύει την ποσότητα ισχύος που μπορεί να παραχθεί για μια σταθερή ποσότητα ενέργειας. Μια μπαταρία είναι ταυτόχρονα δεξαμενή καυσίμου και κινητήρας. Τυπικά υψηλότερος ρυθμός C_p οδηγεί σε μικρότερο κύκλο ζωής της μπαταρίας.

5.1.3 Μπαταρίες ιόντων λιθίου

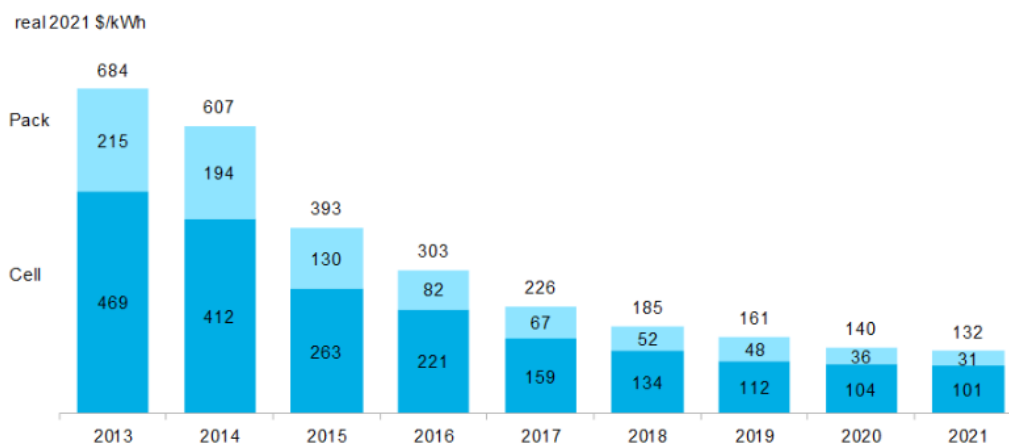
Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion) είναι ο πιο κοινός τύπος που χρησιμοποιείται για μεγάλες βιομηχανικές συσκευές. Ως προς την κατασκευή τους, μπορούν να αποτελούνται από διαφορετικό υλικό και χημικές ιδιότητες στα ηλεκτρόδια και στον ηλεκτρολύτη. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής. Το κοινό χαρακτηριστικό τους είναι η μεταφορά ιόντων λιθίου στον ηλεκτρολύτη, όπου κατά τη διάρκεια της φόρτισης, τα θετικά φορτισμένα ιόντα λιθίου μεταφέρονται μέσω ενός διαχωριστή από την κάθοδο στην άνοδο (Σχήμα 5.2). Αυτό το ηλεκτρικό δυναμικό αποθηκεύεται με τη μορφή ιόντων λιθίου που συλλέγονται στο αρνητικό ηλεκτρόδιο και μπορεί να παρασχεθεί ως ηλεκτρική ενέργεια, όταν ένα φορτίο συνδέεται στο εξωτερικό κύκλωμα της μπαταρίας (EMSA, 2021).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι παρέχει πολύ υψηλή ειδική ενέργεια [100 -220 Wh/kg] σε σύγκριση με άλλες χημικές μπαταρίες. Επίσης, η ενεργειακή πυκνότητα είναι η υψηλότερη [200 - 330 kWh/m³] σε σύγκριση με τις μπαταρίες που διατίθενται στο εμπόριο. Αυτό οφείλεται στο λίθιο [Li] που είναι το ελαφρύτερο στερεό στοιχείο. Η διάρκεια ζωής τους είναι επίσης σχετικά υψηλή και το ποσοστό απόδοσής τους μπορεί να φτάσει έως και το 100% (Stavrakakis, 2010).

Στα μειονεκτήματα της τεχνολογίας, είναι ότι μπορεί να συνδυαστεί με εύφλεκτο ηλεκτρολύτη και η διαθεσιμότητα των υλικών μπορεί να είναι περιορισμένη. Τέλος, το κόστος των μπαταριών Li-ion είναι πολύ υψηλό, αλλά μειώνεται σταδιακά. Οι τιμές των μπαταριών ιόντων λιθίου, ήταν πάνω από 1.200 \$/kWh το 2010, έχουν μειωθεί κατά 89%, στα 132 \$/kWh το 2021 (BloombergNEF, 2021). Λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα σύστημα διαχείρισης μπαταρίας είναι επίσης απαραίτητο, το κόστος αυξάνεται. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με τη χημεία της καθόδου τους, καθώς οι περισσότερες από αυτές χρησιμοποιούν άνθρακα ή γραφίτη για την άνοδο τους. Οι 2 πιο δημοφιλείς χημικές καθόδοι είναι η NMC και η LFP. Γίνεται αναφορά σε αυτές τις καθόδους, επειδή ήταν οι επιλογές που αξιολογήθηκαν για την μελέτη.



Σχήμα 5.2: Ηλεκτροχημική αποθήκευση σε κυψέλη ιόντων λιθίου (Anderson, 2009)

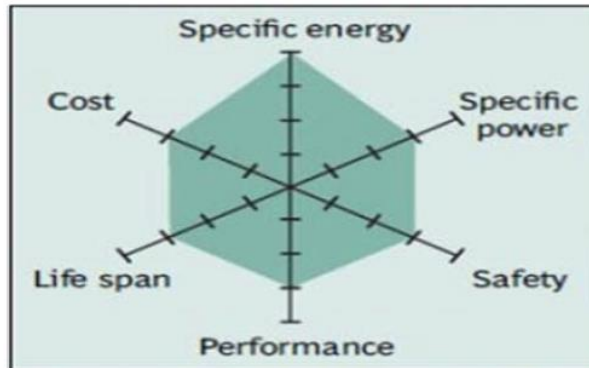


Σχήμα 5.3: Τιμές μπαταριών ιόντων λιθίου 2013-2021 (BloombergNEF, 2021)

5.1.4 Κάθοδος νικελίου-μαγγανίου-κοβαλτίου (NMC)

Οι κάθοδοι NMC αναπτύχθηκαν πρόσφατα και αποτελούν την κορυφαία επιλογή για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Αποτελούνται από ένα συνδυασμό ιδιοτήτων νικελίου, κοβαλτίου και μαγγανίου. Το νικέλιο [Ni] και το κοβάλτιο [Co] συμβάλλουν στην υψηλή ειδική ενέργεια, ενώ το μαγγάνιο [Mn] μπορεί να επηρεάσει θετικά τη σταθερότητα και αξιοπιστία στην χημική αντίδραση. Ανάλογα με τις αναλογίες αυτών των στοιχείων στην κάθοδο, οι ιδιότητες της μπαταρίας μπορούν να τροποποιηθούν σχετικά με την πυκνότητα ισχύος, την ενεργειακή πυκνότητα, το κόστος, την ασφάλεια, τη χωρητικότητα και τη σταθερότητα. Ανάλογα με το μείγμα Ni, Mn και Co, παράγονται διαφορετικές μπαταρίες NMC. Η αναλογία κάθε στοιχείου απεικονίζεται στο όνομά τους. Για παράδειγμα, το NMC 333 συμβολίζει ίσες ποσότητες Ni, Mn, Co ή NMC 622 σημαίνει 60% Ni, 20% Mn και 20% Co. Επίσης όταν το κοβάλτιο μειώνεται, δημιουργείται μεγάλο όφελος για το κόστος και την ενεργειακή πυκνότητα, ωστόσο είναι στοιχείο που επηρεάζει σημαντικά την απόδοση και τη διάρκεια

ζωής της μπαταρίας. Επίσης, το οξείδιο που παρατηρείται στο ηλεκτρόδιο της καθόδου αυξάνει τον κίνδυνο ανάφλεξης στη περίπτωση παρουσίας υψηλών θερμοκρασιών, γεγονός που καθιστά αναγκαία την εφαρμογή προφυλάξεων για τον περιορισμό του κινδύνου.

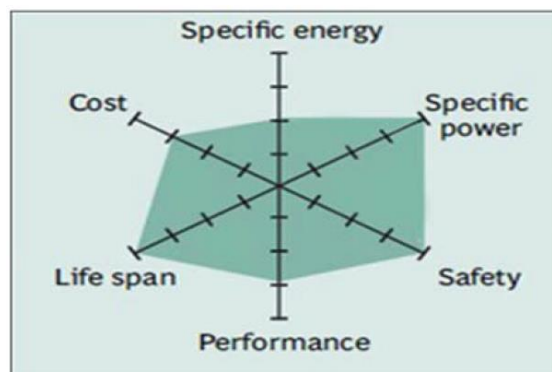


Σχήμα 5.4: Χαρακτηριστικά NMC (Bakirtzoglou, 2017)

5.1.5 Κάθοδος λιθίου-σιδήρου-φωσφόρου (LFP)

Η βασική διαφορά των μπαταριών LFP παρατηρείται στην δομή της καθόδου. Αποτελείται από φώσφορο-ολιβίνη αντί για μεταλλικά οξείδια όπως στην περίπτωση του NMC. Ένα κρίσιμο πλεονέκτημα αυτής της καθόδου είναι ότι δεν περιέχει πηγή οξυγόνου στην κάθοδο, πράγμα που σημαίνει ότι ο κίνδυνος κατά τη διάρκεια μιας υψηλής θερμικής καταπόνησης, μειώνεται δραστικά. Αυτή η κάθοδος αντιμετωπίζει καλύτερα τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Συνολικά παρέχει καλύτερα χαρακτηριστικά ασφαλείας.

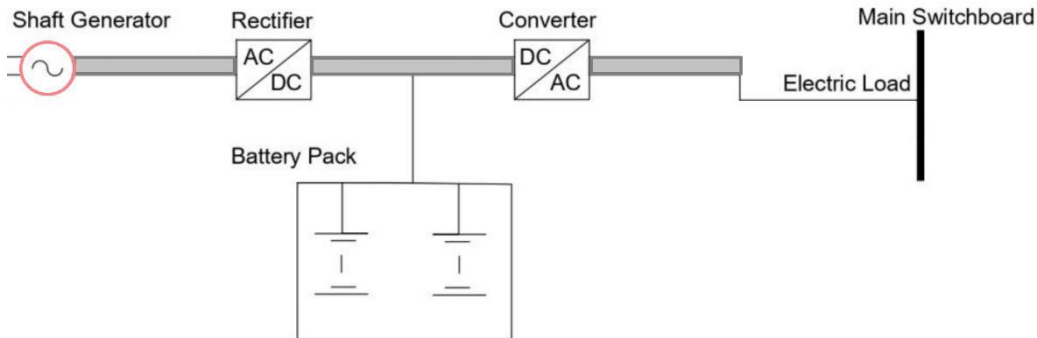
Ωστόσο, Η ειδική ενέργεια [90-120 Wh/kg], όμως, και η δυνατότητα αποθήκευσης παρουσιάζουν αρκετά χαμηλά επίπεδα, συγκριτικά με τις άλλες μπαταρίες της αγοράς, όπως και η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να παραχθεί. Τα μεγέθη αυτά, ωστόσο, δύναται να αυξηθούν ως ένα βαθμό προσθέτοντας στην δομή της καθόδου κατάλληλα στοιχεία και ενώσεις, χωρίς όμως να επιτευχθούν τα επίπεδα που παρουσιάζονται στις μπαταρίες NMC. Παρόλα αυτά η αξιοπιστία και η ασφάλεια που επιφέρουν οι μπαταρίες LFP, καθώς και η τεχνογνωσία που επικρατεί για αυτές, τις κατατάσσουν αρκετές φορές υψηλότερα στη προτίμηση των καταναλωτών (Bakirtzoglou, 2017).



Σχήμα 5.5: Χαρακτηριστικά LFP (Bakirtzoglou, 2017)

5.1.6 Διαστασιολόγηση διάταξης μπαταριών στο υπό μελέτη πλοίο

Όπως έχει ήδη εξηγηθεί, οι μπαταρίες λειτουργούν με συνεχές ρεύμα. Επομένως, οι μπαταρίες θα εγκατασταθούν στη διάταξη μετά τον ανορθωτή (rectifier) έτσι ώστε να λαμβάνουν το σταθερό ρεύμα DC. Η συμπερίληψη των μπαταριών στη διάταξη της γεννήτριας άξονα απεικονίζεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6: Διάταξη μπαταριών στο υπό μελέτη πλοίο

Η εν λόγω διαμοίραση των τιμών ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο και τις μπαταρίες γίνεται μέσω ενός συστήματος διαχείρισης ισχύος (power management system). Η περίσσια ισχύος η οποία θα χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μπαταριών υπολογίζεται παρακάτω, λαμβάνοντας υπόψη τον βαθμό απόδοσης του ανορθωτή και την διαφορά της μέγιστης παραγόμενης ισχύος της γεννήτριας άξονα (PTO) από την αντίστοιχη απαιτούμενη ενέργεια για την λειτουργία του πλοίου (Εξίσωση 5.1):

Εξίσωση 5.1: Περιθώριο ισχύος αξονικής γεννήτριας

$$P_{SG_{margin}} = (P_{e,out,max} \cdot load\ factor\% - P_{required}) \cdot \eta_{rectifier}$$

Η φόρτιση θα γίνεται σε κατάσταση εν πλω, ορίζουμε τον συντελεστή φόρτισης στο 85% αφήνοντας έτσι περιθώριο ισχύος. Έτσι, η διαθέσιμη ισχύς που χρησιμοποιείται για φόρτιση των μπαταριών, με βαθμός απόδοσης ανορθωτή στο 98%, υπολογίζεται ίση με:

$$P_{SG_{margin}} = 796.05\ kW$$

Η εν λόγω τιμή αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον προσδιορισμό του χρόνου φόρτισης και γενικότερα για την μελέτη της εφαρμογής των μπαταριών.

5.1.6.1 1^η εφαρμογή εγκατάστασης μπαταριών

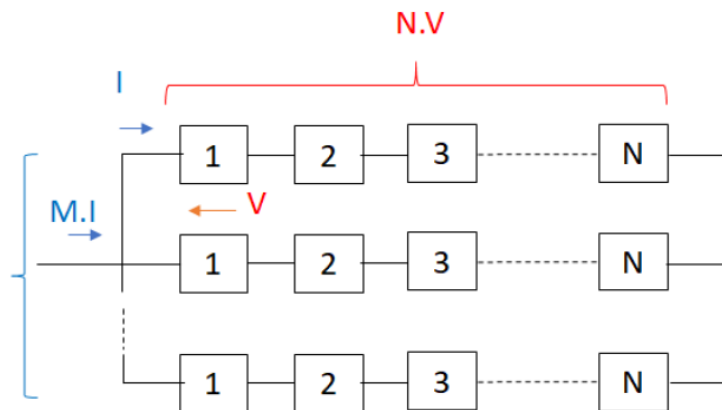
Η διαστασιολόγηση της διάταξης έγινε με την προϋπόθεση ότι η συνολική χωρητικότητα δεν θα ξεπεράσει τις **5000 kWh** εξαιτίας κυρίως του κόστους της επένδυσης και του όγκου. Προκειμένου λοιπόν να πληρείται το εν λόγω κριτήριο επιλέχθηκε κατάλληλος αριθμός μπαταριών διατεταγμένων σε m παράλληλες συνδέσεις και n συνδέσεις σε σειρά (Σχήμα 5.7). Το γινόμενο του αριθμού n με την ονομαστική τάση της κάθε μπαταρίας, αντιστοιχεί στη συνολική τάση του συστήματος, ενώ του αριθμού m με την χωρητικότητα της κάθε μπαταρίας σε αμπερώρια, στη συνολική αντίστοιχη χωρητικότητα.

Πιο κάτω φαίνονται τα χαρακτηριστικά των μπαταριών με διαφορετικές καθόδους NMC και LFP (Πίνακας 5.1).

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά μπαταριών NMC & LFP

Cathodes	NMC	LFP
Voltage [V]	48	48
Capacity [Ah]	60	105
Storage Energy [kWh]	2,88	5.04
Weight [kg]	16.55	37.5
Specific Energy [kWh/t]	105	185
Volume [cub. metres]	0,012	0.026
Cycle life [no of cycles]	1000+	3000
Discharge Current [A]	60	70
Charge Current [A]	10	20

Στον Πίνακα 5.1, λοιπόν, συγκρίνονται οι δύο κατηγορίες και παρατηρείται σημαντική διαφορά στο συνολικό βάρος και όγκο του συστήματος. Το βάρος και ο όγκος των μπαταριών LFP είναι περίπου 2 φορές μεγαλύτερο από των NMC για πανομοιότυπη αποθηκευτική ικανότητα, γεγονός, που σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στη περιγραφή των ιδιοτήτων των δύο τύπων στην αρχή του κεφαλαίου, αναμενόταν. Ωστόσο, η ασφάλεια, η σταθερότητα και ο μεγαλύτερος κύκλος ζωής που προσφέρουν οι μπαταρίες LFP τις καθιστούν καταλληλότερες. Επομένως, στο εξής η έρευνα θα πραγματοποιηθεί για την εγκατάσταση με τις μπαταρίες LFP.



Σχήμα 5.7: Διάταξη μπαταριών (Souflis - Rigas, 2021)

Γνωρίζουμε την χωρητικότητα των μπαταριών LFP που επιλέξαμε, έτσι συντάχθηκαν οι παρακάτω εξισώσεις και μεθοδολογίες από στοιχεία που συλλέχθηκαν από την διπλωματική εργασία του Μπακιρτζόγλου (Bakirtzoglou, 2017), υπολογίζοντας έτσι τον απαιτούμενο αριθμό μπαταριών, την εγκατεστημένη ισχύς και τέλος τον όγκο και βάρος του πακέτου.

Εξίσωση 5.2: Ελάχιστη εγκατεστημένη ισχύς στο πλοίο:

$$E_{ΕΛΑΧ. ΕΓΚΑΤ.} = 5000 \text{ kW}$$

Εξίσωση 5.3: Αριθμός των μονάδων συνδεδεμένες σε σειρά

$$N_{\text{ΜΠΑΤ. ΣΕΙΡΑ}} = \frac{V_{\text{ΣΥΣΤ.}}}{V_{\text{ΜΠΑΤ.}}}$$

Όπου:

$V_{\text{ΣΥΣΤ.}}$: Τάση κεντρικού διαύλου του συστήματος (V)

$V_{\text{ΜΠΑΤ.}}$: Ονομαστική τάση της μονάδας μπαταριών (V)

Εξίσωση 5.4: Αριθμός των παράλληλων συστοιχιών μπαταριών

$$N_{\text{ΜΠΑΤ. ΠΑΡΑΛ.}} = \frac{E_{\text{ΕΛΑΧ.ΕΓΚΑΤ.}}}{N_{\text{ΜΠΑΤ. ΣΕΙΡΑ}} * V_{\text{ΜΠΑΤ.}} * Ah_{\text{ΜΠΑΤ.}}}$$

Όπου:

$Ah_{\text{ΜΠΑΤ.}}$: Ονομαστική χωρητικότητα της μονάδας μπαταριών (Ah)

Εξίσωση 5.5: Συνολικός αριθμός των μπαταριών

$$N_{\text{ΜΠΑΤ. ΣΥΝ.}} = N_{\text{ΣΥΣΤ.}} * N_{\text{ΜΠΑΤ. ΣΥΣΤ.}} * N_{\text{ΜΠΑΤ. ΣΕΙΡΑ.}}$$

Όπου:

$N_{\text{ΣΥΣΤ.}}$: Αριθμός συστοιχιών μπαταριών

$N_{\text{ΜΠΑΤ.ΣΥΣΤ.}}$: Αριθμός μπαταριών ανά συστοιχία

Εξίσωση 5.6: Εγκατεστημένη ισχύς

$$E_{\text{ΕΓΚΑΤ.}} = N_{\text{ΜΠΑΤ. ΣΥΝ.}} * V_{\text{ΜΠΑΤ.}} * Ah_{\text{ΜΠΑΤ.}}$$

Εξίσωση 5.7: Συνολικό βάρος

$$W_{\text{ΣΥΝ.}} = N_{\text{ΜΠΑΤ. ΣΥΝ.}} * W_{\text{ΜΠΑΤ.}}$$

Όπου:

$W_{\text{ΜΠΑΤ.}}$: Βάρος μίας μονάδας μπαταρίας (tn)

Εξίσωση 5.8: Συνολικός όγκος

$$V_{\text{ΣΥΝ.}} = N_{\text{ΜΠΑΤ. ΣΥΝ.}} * V_{\text{ΜΠΑΤ.}}$$

Όπου:

$V_{\text{ΜΠΑΤ.}}$: Όγκος μίας μονάδας μπαταρίας (m³)

Εξίσωση 5.9: Συνολικός χρόνος φόρτισης [min]

$$T_{\text{ΦΟΡ.}} = \frac{E_{\text{ΕΓΚΑΤ.}}}{P_{\text{SG}_{\text{margin}}}} * 60$$

Με την βοήθεια των πιο πάνω εξισώσεων υπολογίστηκαν τα ακόλουθα:

Πίνακας 5.2: Υπολογισμός πακέτου μπαταρίας

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΚΕΤΟΥ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ		
Ε ΕΛΑΧ.ΕΓΚΑΤ	5000.0	kWh
N ΜΠΑΤ.ΣΕΙΡΑ	10	
N ΜΠΑΤ.ΠΑΡΑΛ	143	
N ΜΠΑΤ ΣΥΝΟΛΟ	1430	
Ε ΕΓΚΑΤ	5148.0	kWh
Voltage	480	V
W ΣΥΝΟΛ	45.76	tn
∇ ΣΥΝΟΛ	47.19	m ³

Πίνακας 5.3: Χρόνος φόρτισης μπαταρίας

ΧΡΟΝΟΣ ΠΛΗΡΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ		
Ισχύς φόρτισης	796.054	kW
Χρόνος Φόρτισης	388.0	min
	06:28:00	hour:min:sec

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή οι μπαταρίες φορτίζονται κατά την πλεύση του πλοίου με την χρήση της περίσσιας ισχύος της αξονικής γεννήτριας, όπως έχει προαναφερθεί. Στη συνέχεια, εξετάζεται η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί να, χρησιμοποιείται προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες του πλοίου σε ηλεκτρισμό κατά την παραμονή του στο λιμάνι (IN PORT - IDLE) και κατά τη διάρκεια διαχείρισης του εμπορεύματος (CARGO HANDLING), μέχρι να γίνει η εκφόρτιση των μπαταριών. Τέλος, για τον υπολογισμό του χρόνου εκφόρτισης, προσδιορίζεται η ένταση του ρεύματος εκφόρτισης κάθε μπαταρίας κατά την λειτουργία τους στην παρούσα εφαρμογή ως εξής:

Εξίσωση 5.10: Ένταση ρεύματος εκφόρτισης

$$Discharging\ Current = \frac{P_{required}}{V \cdot N_{ΜΠΑΤ. ΠΑΡΑΛ.} \cdot \eta_{inverter} \cdot \eta_{grid}}$$

Στην κατάσταση παραμονής στο λιμάνι (IN PORT - IDLE) βγαίνει εκτός η βοηθητική γεννήτρια των 640kW και καλύπτονται όλες οι ανάγκες από τη μπαταρία, ενώ κατά τη διάρκεια διαχείρισης του εμπορεύματος (CARGO HANDLING) βγαίνει εκτός η βοηθητική γεννήτρια των 1000kW και καλύπτονται όλες οι ανάγκες από τη μπαταρία και τις δύο γεννήτριες των 640kW. Οι υπολογισμοί φαίνονται πιο κάτω:

Πίνακας 5.4: Χρόνος εκφόρτισης IN PORT

IN PORT - IDLE		
Total Required Power	472.8	KW
Discharging Current	7.650917	A
Discharging time	588.2	min
	09:48:00	hour:min:sec

Πίνακας 5.5: Χρόνος εκφόρτισης CARGO HANDLING

CARGO HANDLING		
Total Required Power	1775.8	KW
2X640kW AND BATTERIES (CANCEL 1X1000)		
Aux. Gen. 2X640 * load factor%	1088	KW
Batteries Power	687.8	KW
Discharging Current	11.12914	A
Discharging time	404.3	min
	06:44:00	hour:min:sec

Η τιμή της έντασης του ρεύματος εκφόρτισης είναι μικρότερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη (70A) και στις δύο περιπτώσεις. Ακολουθώντας, με βάση την χωρητικότητα της κάθε μπαταρίας 105Ah (Πίνακας 5.1), προκύπτει πως η εγκατεστημένη διάταξη μπορεί να καλύπτει για ένα ταξίδι τις ανάγκες του πλοίου σε ηλεκτρικό φορτίο κατά τη παραμονή του στο λιμάνι, για περίπου 10 ώρες και κατά την διαχείριση του εμπορεύματος στο λιμάνι για περίπου 7 ώρες.

Στη πρώτη περίπτωση, τιμή αυτή, κάνοντας την υπόθεση πως το υπό μελέτη πλοίο εκτελεί 10 ταξίδια ετησίως και λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα δεξαμενόπλοιο μεταφοράς προϊόντων πετρελαίου και χημικών παραμένει στο λιμάνι ως και κάποιες μέρες (Bailey & Solomon, 2004) κατά μέσο όρο 39 ώρες (Πίνακας 5.6) συμπεραίνεται ότι οι 10 ώρες κάλυψης των μπαταριών δεν φτάνουν για την κάλυψη των αναγκών.

Στη δεύτερη περίπτωση, για δεξαμενόπλοια μεταφοράς προϊόντων πετρελαίου και χημικών, με μέγεθος παρόμοιο με το υπό μελέτη, ο χρόνος εκφόρτωσης είναι 16-18 ώρες, έτσι πάλι οι 7 ώρες κάλυψης των μπαταριών δεν φτάνουν για την κάλυψη των αναγκών.

Λαμβάνοντας υπόψη το μεγάλο κόστος αγοράς των μπαταριών, που σύμφωνα με το Σχήμα 5.3 είναι στα \$685,000.00, και τη μερική κάλυψη των αναγκών σε ισχύ από τη μπαταρία, είναι σαφές, πως κατά την εφαρμογή του εν λόγω σεναρίου η επένδυση της διάταξης των μπαταριών είναι αδύνατο να αποβεί κερδοφόρα.

Παρακάτω φαίνονται οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες τιμές του χρόνου αγκυροβολίου εντός λιμανιού (at berth) (Port of Long Beach, 2010).

Πίνακας 5.6: Ενδεικτικοί Χρόνοι Αγκυροβολίου εντός Λιμανιού

Vessel Type	Berth Hotelling Time, hours		
	Min	Max	Avg
Tanker - Aframax	15.6	165.7	45.4
Tanker - Chemical	8.2	131.9	39.0
Tanker - Handyboat	9.9	154.2	56.2
Tanker - Panamax	11.9	243.5	57.2
Tanker - Suezmax	5.4	78.5	31.8
Tanker - VLCC	13.2	50.4	27.7

5.1.6.2 2^η εφαρμογή εγκατάστασης μπαταριών

Στο παρόν σενάριο έγινε προσπάθεια για την εκμετάλλευση των μπαταριών όταν το πλοίο βρίσκεται σε κατάσταση ελιγμών (ENT&LEAV PORT). Οι μπαταρίες φορτίζονται μέσω της αξονικής γεννήτριας και στη συνέχεια συμμετέχουν αναλαμβάνοντας την κάλυψη του φορτίου, το οποίο ανέρχεται σε 1138kW. Στην κατάσταση αυτή το πλοίο θα χρησιμοποιεί την μπαταρία μια ώρα, όσο διαρκούν περίπου οι ελιγμοί. Συνεπώς, θα χρειαστούμε πολύ μικρότερο αριθμό μπαταριών μειώνοντας έτσι το κόστος.

Προκειμένου η τιμή της έντασης του ρεύματος εκφόρτισης είναι μικρότερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη (70A) έγιναν οι πιο κάτω υπολογισμοί με την βοήθεια των εξισώσεων που συλλέχθηκαν από την διπλωματική εργασία του Μπακιρτζόγλου (Εξίσωση 5.3 : Εξίσωση 5.10).

Πίνακας 5.8: Υπολογισμός πακέτου μπαταριών σε κατάσταση ελιγμών

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΚΕΤΟΥ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ		
Ε ΕΛΑΧ.ΕΓΚΑΤ	2150.0	kWh
N ΜΠΑΤ.ΣΕΙΡΑ	10	
N ΜΠΑΤ.ΠΑΡΑΛ	44	
N ΜΠΑΤ ΣΥΝΟΛΟ	440	
Ε ΕΓΚΑΤ	2217.6	kWh
Voltage	480	V
W ΣΥΝΟΛ	16.50	tn
∇ ΣΥΝΟΛ	11.44	m ³

Πίνακας 5.7: Χρόνος φόρτισης μπαταρίας σε κατάσταση ελιγμών

ΧΡΟΝΟΣ ΠΛΗΡΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ		
Ισχύς φόρτισης	796.054	kW
Χρόνος Φόρτισης	167.1	min
	02:47:00	hour:min:sec

Στη συνέχεια προκειμένου να προσδιοριστεί η εξοικονόμηση σε καύσιμο, υπολογίζεται, για την περίπτωση λειτουργίας του κινητήρα χωρίς και με εγκατάσταση συστήματος μπαταριών αντίστοιχα. Υπολογίζεται η κατανάλωση κατά τη φόρτιση εν πλω και κατά την χρήση των μπαταριών για τις ανάγκες των ελιγμών. Η κάθε περίπτωση υπολογίζεται σε τόνους ανά χρόνο, σύμφωνα με την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC), την ισχύ (P) της κύριας μηχανής και τις

Πίνακας 5.9: Χρόνος εκφόρτισης μπαταρίας σε κατάσταση ελιγμών

ENT&LEAV PORT	
Total Required Power	1318.6 KW
Discharging Current	69.34 A
Discharging time	90.9 min
	01:30:00 hour:min:sec

μέρες (days) που αντιστοιχούν στην εν λόγω περίπτωση, με την παρακάτω σχέση:

Εξίσωση 5.11: Ετήσια κατανάλωση καυσίμου

$$Fuel\ Consumption\ \left[\frac{t}{year} \right] = \frac{SFOC \cdot P \cdot 24 \cdot days}{10^6}$$

Οι Κατασκευαστές παρέχουν το SFOC για χαρακτηριστικά φορτία (100%, 85% κ.λπ.). Προκειμένου να υπολογιστούν τα ακριβή SFOC για κάθε φορτίο που αντιστοιχεί σε κάθε κατάσταση ταχύτητας, έγινε μια παρεμβολή σύμφωνα με τα δεδομένα του κατασκευαστή (MAK, 2012).

Κύριο καύσιμο του υπό μελέτη πλοίου είναι το MDO. Η τιμή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου λαμβάνεται για κάθε τιμή ισχύος σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

Εξίσωση 5.12: Τιμή ειδικής κατανάλωσης καυσίμου MDO

$$SFOC = SFOC_{ISO} \cdot \frac{\vartheta_{U\ ISO}}{\vartheta_{U\ MDO}}$$

Όπου: $SFOC_{ISO}$ η ειδική κατανάλωση καυσίμου στις καταστάσεις ISO, που λαμβάνεται από την κατασκευαστική εταιρεία της κύριας μηχανής (MAK, 2012). Τα χαρακτηριστικά των καταστάσεων ISO παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.10).

$\vartheta_{U\ ISO}$: θερμογόνος ικανότητα καυσίμου στις καταστάσεις ISO ίση με 42700 kJ/kg.

$\vartheta_{U\ MDO}$: θερμογόνος ικανότητα καυσίμου που καταναλώνει η κύρια μηχανή ίση με 42900 kJ/kg.

Πίνακας 5.10: Χαρακτηριστικά καταστάσεων ISO για την μέτρηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου

ISO	
Θερμοκρασία αέρα σάρωσης πριν την είσοδο στον υπερπληρωτή	25 °C
Θερμοκρασία ψυκτικού στην είσοδο του ψυγείου του αέρα σάρωσης	29 °C
Κατώτατη θερμογόνος ικανότητα καυσίμου	42700 kJ/kg

Πίνακας 5.11: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής σε κατάσταση ελιγμών με σύστημα μπαταριών

ME Consumptions using Battery System ENT&LEAV PORT per day, per year								
SPEED	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		M/E POWER	LOAD M/E	SFOC	CONSUMPTION	
knots		%	DAYS/YEAR	KW	%	g/kWh	t/day	t/year
5	BALLAST	7.5	27.4	441.0	7.0	195.13	2.07	56.54
5	LADEN	1	3.7	1512.0	24.0	190.39	6.91	25.22
							SUM [t]	81.75

Πίνακας 5.12: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής σε κατάσταση ελιγμών χωρίς σύστημα μπαταριών

ME Consumptions without using Battery System ENT&LEAV PORT per day, per year								
SPEED	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		M/E POWER	LOAD M/E	SFOC	CONSUMPTION	
knots		%	DAYS/YEAR	KW	%	g/kWh	t/day	t/year
5	BALLAST	7.5	27.4	1993.3	31.6	188.26	9.01	246.54
5	LADEN	1	3.7	3064.3	48.6	183.52	13.50	49.26
							SUM [t]	295.81

Με τη βοήθεια μαθηματικών αναλογιών υπολογίζεται η συχνότητα φόρτισης με τη χρήση αξονικής γεννήτριας εν πλω.

Πίνακας 5.13: Υπολογισμός συχνότητας φόρτισης εν πλω

STATE	FREQUENCY PER YEAR %		CHARGING FREQUENCY PER YEAR %			
	ENT&LEAV	CHARGING	SPEED	LOAD	SAILING FREQ	CHARGING FREQ
BALLAST	7.5	13.80	9.5	BALLAST	10	5.0
LADEN	1	1.84	13	BALLAST	17.5	8.8
			11	LADEN	36	1.4
			13.5	LADEN	11	0.4

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του κεφαλαίου 4.4 (Εξίσωση 4.2 και Εξίσωση 4.3), υπολογίζουμε την ισχύ που πρέπει να παρέχει στον πίνακα ελέγχου η γεννήτρια άξονα και την ισχύ που απορροφά από την κύρια μηχανή κατά τη φόρτιση. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε το φορτίο τη κύριας μηχανής, κατά την φόρτιση των μπαταριών εν πλω, και να υπολογίσουμε την κατανάλωση καυσίμου.

$$PTO_{e,input_{CHARG}} = 1337.4 \text{ kW}$$

$$PTO_{absorbed_{CHARG}} = 1481.9 \text{ kW}$$

Πίνακας 5.14: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής εν πλω χωρίς φόρτιση

ME Consumptions without using Battery System(not Charging) per day, per year								
SPEED	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		M/E POWER	LOAD M/E	SFOC	CONSUMPTION	
knots		%	DAYS/YEAR	KW	%	g/kWh	t/day	t/year
9.5	BALLAST	5.0	18.3	2182.7	34.6	187.42	9.82	179.80
13	BALLAST	8.8	32.0	3631.7	57.6	181.01	15.78	505.62
11	LADEN	1.4	5.1	3757.7	59.6	180.45	16.27	83.70
13.5	LADEN	0.4	1.6	4450.7	70.6	177.39	18.95	29.78
							SUM [t]	798.89

Πίνακας 5.15: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής εν πλω με φόρτιση

ME Consumptions using Battery System(Charging) per day, per year								
SPEED	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		M/E POWER	LOAD M/E	SFOC	CONSUMPTION	
knots		%	DAYS/YEAR	KW	%	g/kWh	t/day	t/year
9.5	BALLAST	5.0	18.3	3119.9	49.5	183.28	13.72	251.31
13	BALLAST	8.8	32.0	4568.9	72.5	176.87	19.39	621.52
11	LADEN	1.4	5.1	4694.9	74.5	176.31	19.87	102.17
13.5	LADEN	0.4	1.6	5387.9	85.5	174.22	22.53	35.40
							SUM [t]	1010.41

Οι αυξημένες τιμές της ισχύος, λοιπόν, οι οποίες στην ουσία προκύπτουν από το άθροισμα της ισχύος του πρώτου πίνακα που αντιστοιχεί στην ισχύ προώσεως με την ισχύ που απορροφάει η διάταξη ($P_{TO_{absorbed}}$), έχουν ως αποτέλεσμα όπως φαίνεται πιο πάνω (Πίνακας 5.14, Πίνακας 5.15) η ειδική κατανάλωση της κύριας μηχανής να βελτιώνεται. Ωστόσο, παρά την εν λόγω μείωση, το γεγονός πως ο κινητήρας λειτουργεί σε υψηλότερο φορτίο, οδηγεί στην συνολική αύξηση στην κατανάλωση καυσίμου.

Τέλος, δημιουργήθηκε ο πιο κάτω πίνακας που περιέχει τη συνολική κατανάλωση ανά κατάσταση και τεχνολογία, προκειμένου να συνοψιστεί η εξοικονόμηση στην κατανάλωση με τη χρήση του συστήματος των μπαταριών.

Πίνακας 5.16: Υπολογισμός εξοικονόμησης καυσίμου

Savings Calculation per year		
BATTERY SYSTEM SAVING	214.05	t/year
CHARGING CONSUMPTION	-211.52	t/year
SAVINGS	2.54	t/year

Όπως παρατηρείται, τα αποτελέσματα της δεύτερης εφαρμογής όσον αφορά την ετήσια κατανάλωση καυσίμου (2.54 t/year), παρουσιάζουν ελάχιστη εξοικονόμηση. Το αρχικό κόστος αγοράς των μπαταριών ανέρχεται, για την συγκεκριμένη εφαρμογή, στα \$300,000.00 χωρίς το σύστημα διαχείρισης των μπαταριών, και οι μπαταρίες πρέπει να αντικαθίστανται κάθε 10 χρόνια. Επομένως η επένδυση δεν δύναται να παρουσιαστεί βιώσιμη ούτε στην εν λόγω περίπτωση.

5.2 Σενάριο 2^ο – Κατάργηση εγκατάστασης γεννήτριας άξονα

Σε αυτό το κεφάλαιο καταστρώνεται σενάριο κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του υπό μελέτη πλοίου σε όλες τις καταστάσεις από τις βοηθητικές ντιζελογεννήτριες που είναι ήδη εγκατεστημένες στο πλοίο (Πίνακας 4.3). Σκοπός είναι να εξεταστεί αν η λειτουργία βοηθητικών γεννητριών σε καλύτερο βαθμό φόρτισης (load factor) από γεννήτρια άξονα, είναι πιο οικονομική. Υπολογίζεται η κατανάλωση της κύριας μηχανής και των βοηθητικών γεννητριών με και χωρίς το σύστημα αξονικής γεννήτριας. Επίσης κρίνεται σκόπιμο να υπολογιστούν ώρες λειτουργίας των βοηθητικών γεννητριών καθώς αυτό επιφέρει επιπλέον κόστος συντήρησης. Τέλος, γίνεται σύγκριση κατανάλωσης καυσίμου, εκπομπής αερίων και κόστους συντήρησης των δυο περιπτώσεων

5.2.1 Κατανάλωση καυσίμου κύριας μηχανής

Η κατανάλωση καυσίμου, στις δυο περιπτώσεις, υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που έγινε στο κεφάλαιο 5.1.6.2 για τις καταστάσεις εν πλω (NORMAL RUN) και ελιγμών (ENT&LEAV PORT), καθώς μόνο σ' αυτές τις καταστάσεις χρησιμοποιείται η γεννήτρια άξονα.

Πίνακας 5.17: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης κύριας μηχανής με PTO

ME Consumptions with PTO per day, per year									
STATE	SPEED	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		M/E POWER KW	LOAD M/E	SFOC	CONSUMPTION	
	knots		%	DAYS/YEAR	KW	%	g/kWh	t/day	t/year
NORMAL RUN	9.5	BALLAST	10	36.5	2182.7	34.6	187.4	9.82	358.36
	13	BALLAST	17.5	63.9	3631.7	57.6	181.0	15.78	1007.77
	11	LADEN	36	131.4	3757.7	59.6	180.5	16.27	2138.44
	13.5	LADEN	11	40.2	4450.7	70.6	177.4	18.95	760.77
ENT&LEAV PORT	5	BALLAST	7.5	27.4	1993.3	31.6	188.3	9.01	246.54
	5	LADEN	1	3.7	3064.3	48.6	183.5	13.50	49.26
								SUM [t]	4561.14

Οι νέες τιμές ισχύος της κύριας μηχανής προκύπτουν από τη διαφορά της ισχύος του πρώτου πίνακα (Πίνακας 5.17) που αντιστοιχεί στην ισχύ προώσεως χωρίς την ισχύ που απορροφάει η διάταξη (PTO_{absorbed}) στις δυο καταστάσεις πλεύσης.

Απορροφούμενη ισχύς PTO εν πλω:

$$PTO_{e,input_{NORM}} = 491.6 \text{ kW}, \quad PTO_{absorbed_{NORM}} = 544.7 \text{ kW}$$

Απορροφούμενη ισχύς PTO σε κατάσταση ελιγμών:

$$PTO_{e,input_{E\&L}} = 1400.9 \text{ kW}, \quad PTO_{absorbed_{E\&L}} = 1552.3 \text{ kW}$$

Πίνακας 5.18: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης κύριας μηχανής χωρίς PTO

ME Consumptions without PTO per day, per year									
STATE	SPEED	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		LOAD M/E	M/E POWER KW	SFOC	CONSUMPTION	
	knots		%	DAYS/YEAR	%	KW	g/kWh	t/day	t/year
NORMAL RUN	9.5	BALLAST	10	36.5	26.0	1638.0	189.8	7.46	272.39
	13	BALLAST	17.5	63.9	49.0	3087.0	183.4	13.59	868.02
	11	LADEN	36	131.4	51.0	3213.0	182.9	14.10	1852.87
	13.5	LADEN	11	40.2	62.0	3906.0	179.8	16.85	676.73
ENT&LEAV PORT	5	BALLAST	7.5	27.4	7.0	441.0	195.1	2.07	56.54
	5	LADEN	1	3.7	24.0	1512.0	190.4	6.91	25.22
								SUM [t]	3751.75

Συνοψίζοντας τους πιο πάνω πίνακες (Πίνακας 5.17, Πίνακας 5.18) σε ετήσια βάση, η κατανάλωση MDO μειώθηκε κατά 809,39 τόνους. Αυτό είναι ένα λογικό αποτέλεσμα καθώς ο κινητήρας παράγει περισσότερη ισχύ ώστε η γεννήτρια άξονα να λειτουργήσει, παρά τη μείωση των ειδικών καταναλώσεων.

5.2.2 Κατανάλωση βοηθητικών γεννητριών

Η μεθοδολογία, για την κατανάλωση των βοηθητικών γεννητριών, είναι παρόμοια με αυτήν της κύριας μηχανής. Τα δεδομένα παρέχονται από τον οδηγό (project guide) της MAN (MAN D&T, 2014). Εξετάζεται και συγκρίνεται με παρόμοιο τρόπο η ετήσια κατανάλωση καυσίμου των γεννητριών ντίζελ. Το φορτίο, καθώς και ο αριθμός των μηχανών που λειτουργούν προκύπτουν από τις απαιτήσεις του πλοίου σε ηλεκτρισμό, όπως περιγράφηκαν (Πίνακας 4.6).

Όστε να έχουμε καλό βαθμό φόρτισης και καλύτερη κατανάλωση καυσίμου επιλέγουμε οι ανάγκες εν πλω να καλύπτονται από μια γεννήτρια των 640 kW και για τις ανάγκες των ελιγμών μια γεννήτρια των 640 kW και μια των 1000 kW. Η τιμή της ισχύος για κάθε κατάσταση, προκύπτει από το πηλίκο των απαιτήσεων (Πίνακας 4.6) προς τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης των βοηθητικών γεννητριών, ο οποίος σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία είναι στο 95% (MAN Energy Solutions, 2014).

Πίνακας 5.19: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου βοηθητικών γεννητριών χωρίς PTO

Generators Consumptions without PTO per day, per year												
STATE	D/G IN USE	SPEED	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		LOAD	N01 D/G	N02 D/G	SC		CONSUMPTION	
		knots		%	DAYS/YEAR	%	KW	KW	g/KWh		t/day	t/year
NORMAL RUN	1X640kW	9.5	BALLAST	10	36.5	72.3	482.0	0	191.54	0	2.22	80.87
		13	BALLAST	17.5	63.9	72.3	482.0	0	191.54	0	2.22	141.52
		11	LADEN	36	131.4	72.3	482.0	0	191.54	0	2.22	291.13
		13.5	LADEN	11	40.2	72.3	482.0	0	191.54	0	2.22	88.96
ENT&LEAV PORT	1X640 + 1X1000 kW	5	BALLAST	7.5	27.4	80.4	536.0	837.5	191.64	193.63	6.36	174.03
		5	LADEN	1	3.7	80.4	536.0	837.5	191.64	193.63	6.36	23.20
											SUM [t]	799.71

Όπως παρατηρείται, στις καταστάσεις λειτουργίας χωρίς PTO, η ετήσια κατανάλωση των βοηθητικών γεννητριών, ανέρχεται στους 799.71 τόνους. Επομένως, αθροίζοντας το σύνολο καυσίμου κύριας μηχανής και βοηθητικών γεννητριών χωρίς PTO (4551.46 t/year) η συνολική κατανάλωση καυσίμου του πλοίου μειώνεται κατά 9,68 τόνους ετησίως. Πολύ μικρή, εξοικονόμηση η οποία οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η γεννήτρια άξονα λειτουργεί σε πολύ χαμηλό βαθμό φόρτισης.

5.2.3 Ώρες λειτουργίας PTO και βοηθητικών γεννητριών

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η λειτουργία του συστήματος PTO έχει θετική επίδραση στο κόστος συντήρησης των βοηθητικών γεννητριών. Καθώς η μηχανική ισχύς της αξονικής γεννήτριας προσφέρεται από την κύρια μηχανή και όχι από άλλες ανεξάρτητες μηχανές εσωτερικής καύσης, μειώνει σημαντικά τα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας συγκριτικά με τις γεννήτριες ντιζελ. Επομένως, στους παρακάτω πίνακες, παρουσιάζεται ο ετήσιος χρόνος λειτουργίας των ντιζελογεννητριών και της αξονικής γεννήτριας για την περίπτωση χωρίς και με χρήση του συστήματος PTO, στις καταστάσεις πλεύσης που καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες η αξονική γεννήτρια. Η ισχύς της αξονικής γεννήτριας λαμβάνεται η ισχύς εισόδου PTO_{absorbed}.

Πίνακας 5.20: Ετήσιες ώρες λειτουργίας χωρίς την λειτουργία PTO

Operating Hours without PTO												
STATE	D/G IN USE	SPEED	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		N01 D/G	N02 D/G	No of operat. D/G	S/G Power	Operating Hours		
		knots		%	DAYS/YEAR	KW	KW		KW	D/G	S/G	
NORMAL RUN	1X640kW	9.5	BALLAST	10	36.5	462.7	0	1	0	876.00	0	
		13	BALLAST	17.5	63.9	462.7	0	1	0	1533.00	0	
		11	LADEN	36	131.4	462.7	0	1	0	3153.60	0	
		13.5	LADEN	11	40.2	462.7	0	1	0	963.60	0	
ENT&LEAV PORT	1X640 + 1X1000 kW	5	BALLAST	7.5	27.4	514.6	804.0	2	0	1314.00	0	
		5	LADEN	1	3.7	514.6	804.0	2	0	175.20	0	
										SUM [h]	8015.40	0.0

Πίνακας 5.21: Ετήσιες ώρες λειτουργίας με την λειτουργία PTO

Operating Hours with PTO											
STATE	D/G IN USE	SPEED	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		N01 D/G	N02 D/G	No of operat. D/G	S/G Power	Operating Hours	
		knots		%	DAYS/YEAR	KW	KW		KW	D/G	S/G
NORMAL RUN	1X640kW	9.5	BALLAST	10	36.5	0	0	0	491.61	0	876
		13	BALLAST	17.5	63.9	0	0	0	491.61	0	1533
		11	LADEN	36	131.4	0	0	0	491.61	0	3154
		13.5	LADEN	11	40.2	0	0	0	491.61	0	964
ENT&LEAV PORT	1X640 + 1X100 kW	5	BALLAST	7.5	27.4	0	0	0	1400.95	0	657
		5	LADEN	1	3.7	0	0	0	1400.95	0	88
									SUM [h]	0.00	7270.8

Συμπεραίνεται ότι, με την λειτουργία του επιλεγμένου συστήματος PTO παρατηρείται μείωση στην ετήσια λειτουργία των βοηθητικών γεννητριών. Ιδιαίτερα, κατά την κατάσταση ελιγμών, λόγω της λειτουργείας δύο γεννητριών, οι ώρες λειτουργίας αυξάνονται. Το οικονομικό αντίκτυπο των εν λόγω αποτελεσμάτων θα περιγραφεί σε επόμενη υπο-παράγραφο.

5.2.4 Οικονομική ανάλυση

Προκειμένου να εξετασθεί το προκείμενο σενάριο λειτουργίας για το υπό μελέτη δεξαμενόπλοιο, είναι απαραίτητο να προσδιορισθεί το ετήσιο κόστος λειτουργίας. Για τον υπολογισμό του συγκεκριμένου κόστους, λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα που προέκυψαν προηγουμένως όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου και του χρόνου λειτουργίας των γεννητριών. Παρουσιάζεται, πιο κάτω, η σχέση υπολογισμού του Λειτουργικού Κόστους (OPEX) χάρη στα οποία θα εξάγουμε συμπέρασμα εάν το σενάριο θα είναι κερδοφόρο. Γενικά το OPEX υπολογίζεται από την εξίσωση:

Εξίσωση 5.13: Κόστος λειτουργίας

$$Operating\ Costs = Fuel\ Costs + O\&M\ Costs + Taxes$$

5.2.4.1 Κόστος καυσίμων (Fuel Costs)

Αρχικά υπολογίστηκε η εξοικονόμηση πόρων χάρη στο Καύσιμο χάρη στη λειτουργία των γεννητριών σε καλύτερο βαθμό φόρτισης.

Οι τιμές [\$/τόνο] ποικίλλουν πολύ ανάλογα με τις τάσεις της αγοράς και τις παγκόσμιες τάσεις. Μετά από έρευνα σχετικά με τις τιμές ανεφοδιασμού καυσίμων (Ship & Bunker, 2022), καταλήγουμε στη πιο κάτω τιμή, οι οποία είναι ο μέσος όρος 20 λιμανιών σε περίοδο τριών ετών. Ασφαλώς, η συγκεκριμένη τιμή είναι μέση ενδεικτική, καθώς εξαρτάται από το λιμάνι ανεφοδιασμού και επιπρόσθετα μεταβάλλεται με μεγάλη συχνότητα κατά την διάρκεια του χρόνου.

$$Fuel\ Cost = 690 \left[\frac{\$}{ton} \right]$$

Με αυτά τα δεδομένα ακολουθεί ο πίνακας υπολογισμών:

Πίνακας 5.22: Ετήσιο κόστος καυσίμου με και χωρίς PTO

Annual Fuel Cost					
STATE	MDO - ME		MDO - Aux. G		SUM
	t/year	\$/year	t/year	\$/year	\$/year
with PTO	4561.14	3,147,188.0	0.0	0.0	3,147,188.0
without PTO	3751.75	2,588,706.5	799.71	551,799.0	3,140,505.5
			Savings with PTO		-6,682.4

Παρατηρείται ότι χωρίς την λειτουργία της γεννήτριας εξοικονομούμε από το καύσιμο \$6,682.4 ετησίως.

5.2.4.2 Περιβαλλοντικοί φόροι (Taxes)

Είναι ο φόρος που πρόκειται να επιβληθεί σε κάθε περίπτωση, όσον αφορά τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα CO₂ της κύριας και των βοηθητικών μηχανών του πλοίου. Η αξία του θεωρείται 55 \$/τόνο. (Statista, 2021). Ο υπολογισμός του παραγόμενου CO₂ γίνεται σύμφωνα με τον αδιάστατο συντελεστή C_F, ο οποίος μετατρέπει τους τόνους καυσίμου που καταναλώνονται, ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε άνθρακα, σε τόνους CO₂. που προβλέπονται από τον Κανονισμό EEDI (IMO, 2012).

Πίνακας 5.23: Συντελεστές Μετατροπής καυσίμου σε CO₂ σύμφωνα με το EEDI (IMO, 2012)

Type of fuel	Reference	Carbon Content	C _F [t-CO ₂ / t-Fuel]
Diesel/Gas Oil	ISO 8217 Grades DMX to DMB	0.8744	3.206
Light Fuel Oil (LFO)	ISO 8217 Grades RMA to RMD	0.8594	3.151
Heavy Fuel Oil (HFO)	ISO 8217 Grades RME to RMK	0.8493	3.114
Liquefied Petroleum Gas (LPG)	Propane	0.8182	3.000
	Butane	0.8264	3.030
Liquefied Natural Gas (LNG)		0.7500	2.750

Έτσι, προσδιορίζεται η τιμή του αδιάστατου συντελεστή C_F για MDO (Diesel/Gas oil):

$$C_{F,MDO} = 3.206 \left[t - CO_2 / t - Fuel \right]$$

Τα αποτελέσματα φαίνονται στο πίνακα πιο κάτω:

Πίνακας 5.24: Ετήσιο κόστος περιβαλλοντικού φόρου

Annual Carbon Tax				
STATE	ME	Aux. G	CO ₂	Carbon Tax
	t/year	t/year	t	\$/year
with PTO	4561.14	0.0	13802.0	759110.86
without PTO	3751.75	799.7	13772.7	757499.04
Savings with PTO				-1,611.8

Παρατηρείται, ότι χωρίς την λειτουργία της γεννήτριας άξονα, καθώς καταναλώνουμε λιγότερο καύσιμο, εξοικονομείται από τους περιβαλλοντικούς φόρους \$1,611.8 ετησίως.

5.2.4.3 Λειτουργικά κόστη και κόστη συντήρησης (O&M Costs)

Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό κόστος που υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του PTO, οδηγεί σε μεγάλη εξοικονόμηση. Η εξοικονόμηση επιτυγχάνεται χάρη στη χρήση λιγότερου χρόνου στις βοηθητικές γεννήτριες. Μετά από αναζήτηση μέσω της εταιρείας F&D, βρέθηκε ότι το Κόστος Συντήρησης θεωρείται ότι είναι 0.01\$ ανά kWh (0.01 \$/kWh) (Facilities Net, 2002). Αντίθετα, οι γεννήτριες άξονα έχουν μειώσει σε μεγάλο βαθμό το κόστος O&M. Σύμφωνα με τη μελέτη General Electric, το κόστος για τις γεννήτριες άξονα O&M θεωρείται ότι είναι το 5% της συντήρησης για τις βοηθητικές γεννήτριες (Προμπονάς, 2021). Αυτή η προσέγγιση είναι λογική καθώς η γεννήτρια άξονα σε σύγκριση με τις βοηθητικές βασίζεται στο ME. Έτσι, δεν χρειάζεται συντήρηση και λίπανση των συνδέσμων. Η SG είναι μια σύγχρονη γεννήτρια που είναι πολύ αξιόπιστη και ως εκ τούτου απαιτεί λιγότερα έξοδα για τη συντήρηση.

Επίσης, μια άλλη σημαντική πτυχή του υπολογισμού της μείωσης του κόστους O&M είναι οι ώρες λειτουργίας, οι οποίες υπολογίστηκαν πιο πάνω (Πίνακας 5.20, Πίνακας 5.21). Η συμβολή της γεννήτριας άξονα στην εξοικονόμηση Λειτουργίας και Συντήρησης (O&M) αποδεικνύεται ζωτικής σημασίας και παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.25: Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης

Annual O&M Cost					
STATE	DG		SG		O&M
	Operating hours	KWh	Operating hours	KWh	\$/year
with PTO	0.00	0.0	7270.8	4251494.4	2,125.7
without PTO	8015.40	4983272.3	0.0	0.0	49,832.7
Savings with PTO					47,707.0

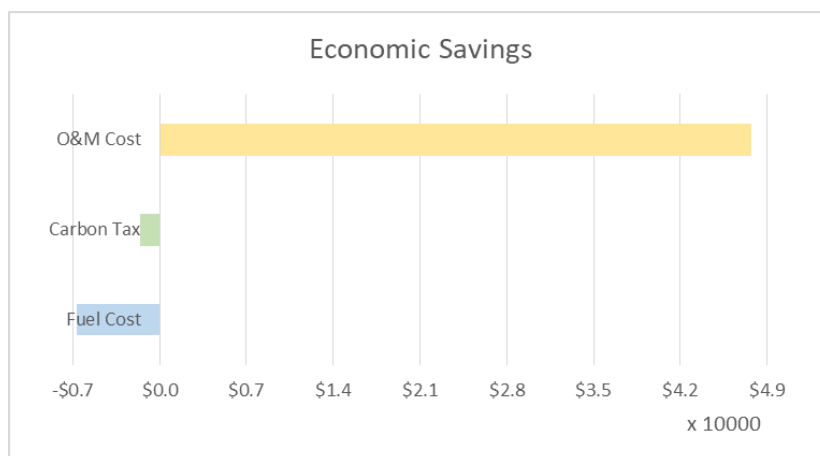
Παρατηρείται, ότι με την λειτουργία της γεννήτριας άξονα, εξοικονομείται από τους περιβαλλοντικούς φόρους \$47,707.0 ετησίως. Συγκριτικά με τα προηγούμενα λειτουργικά έξοδα είναι αρκετά μεγάλο ποσό.

5.2.4.4 Συνολικό κόστος λειτουργίας

Η συνολική ετήσια εξοικονόμηση λόγω PTO είναι: \$39,412.7 και υπολογίζεται αθροίζοντας τα αθροίσματα των πιο πάνω πινάκων (Πίνακας 5.22, Πίνακας 5.24, Πίνακας 5.25) σύμφωνα με την Εξίσωση 5.13.

Πίνακας 5.26: Συνολικό ετήσιο κόστος λειτουργίας

Operating Cost					
STATE	Fuel Cost		Carbon Tax		O&M
	t/year	\$/year	t/year	\$/year	\$/year
with PTO	4561.14	3,147,188.0	13802.0	759110.9	2,125.7
without PTO	4551.46	3,140,505.5	13772.7	757499.0	49,832.7
Total savings with PTO					39,412.7



Σχήμα 5.8: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ετήσιων εξοικονομήσεων υπάρχοντος συστήματος PTO

Συμπερασματικά τόσο από το πίνακα (Πίνακας 5.26), όσο και από το διάγραμμα (Σχήμα 5.8) παρατηρούμαι ότι το σύστημα PTO είναι πιο κερδοφόρο κατά \$39,412.7 από τη χρήση βοηθητικών γεννητριών. Ωστόσο, προβληματίζει το γεγονός ότι οι βοηθητικές γεννήτριες είναι πιο οικονομικές σε κατανάλωση καυσίμου και φορολογία. Καθώς η εξοικονόμηση καυσίμου και ο καλύτερος δείκτης ενεργειακής απόδοσης, όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 2.3.1, είναι από τα σημαντικά πλεονεκτήματα των αξονικών γεννητριών.

Έτσι, το προκείμενο σενάριο αποδεικνύει το κακό σημείο λειτουργίας του υπάρχοντος συστήματος αξονικής γεννήτριας και τη σημαντικότητα μια σωστής μελέτης, ώστε να γίνεται εκμετάλλευση όλων των πλεονεκτημάτων μια τέτοιας επένδυσης υψηλού κόστους.

5.3 Σενάριο 3^ο – Εγκατάσταση ναυτικής πλυντρίδας δέσμμευσης οξειδίων του θείου (Scrubber)

Σε αυτό το κεφάλαιο επεξηγείται συνοπτικά η τεχνολογία της ναυτικής πλυντρίδας (Scrubber). Αναλύεται η αρχή λειτουργίας της ναυτικής πλυντρίδας και τα κύρια χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος. Επεξηγείται επίσης, ο λόγος που οδηγεί στη μελέτη εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος και τα οφέλη που μπορεί να επιφέρει. Στη συνέχεια, γίνεται μια υλοποίηση και επιλογή ενός συστήματος ναυτικής πλυντρίδας για το πλοίο μελέτης περίπτωσης. Το σύστημα αξιολογείται σε διάφορες καταστάσεις εάν μπορεί να επιφέρει επαρκή εξοικονόμηση καυσίμου για να καταστεί εφικτή αυτή η επένδυση.

Τέλος, αυτές οι εξοικονομήσεις χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση μελέτης σκοπιμότητας για αυτήν την τεχνολογία χρησιμοποιώντας το κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ). Η εφαρμογή της τεχνολογίας αξιολογείται από διάφορες οπτικές γωνίες για να καταλήξουμε σε ένα συμπέρασμα για τη σκοπιμότητά της και τα οφέλη που μπορούν να επιτευχθούν.

5.3.1 Εισαγωγή

Αν και η ναυτιλία είναι ο ευγενέστερος τρόπος μεταφοράς φορτίου όσον αφορά τις εκπομπές ανά τόνο φορτίου, σε σχέση με τις αεροπορικές και χερσαίες μεταφορές (Πίνακας 5.27), αποτελεί σημαντικό μέρος των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών (Kattner L., et al., 2015). Τα εμπορικά πλοία χρησιμοποιούν ένα από τα πιο ακατέργαστα και βρώμικα καύσιμα στην αγορά (Stanley, 2007) το οποίο έχει περίπου εκατό φορές την ποσότητα θείου από το καύσιμο ντίζελ χερσαίων μεταφορικών μέσων (CARB, 2003). Τα καύσιμα πλοίων αποτελούνται κυρίως από άνθρακα, σε ποσοστό που κυμαίνεται μεταξύ 84,9% και 87,4%, και υδρογόνο (υδρογονάνθρακες πετρελαίου), ενώ περιέχουν επίσης ακαθαρσίες των οποίων η περιεκτικότητα ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου (απόσταγμα – MDO, MGO ή υπολειμματικό – HFO) (IMO, 2014). Το κατώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας αποτελείται κυρίως από άζωτο (78% κατ' όγκο) και οξυγόνο (21% κατ' όγκο) και σε μικρότερο βαθμό από αργό, διοξείδιο του άνθρακα, υδρατμούς και άλλα αέρια (Κοτρίκλα, 2015). Οι κινητήρες καταναλώνουν καύσιμο, το οποίο καίγεται μαζί με το οξυγόνο του αέρα, με αποτέλεσμα την εκπομπή καυσαερίων.

Πίνακας 5.27: Εκπομπές CO₂ σε γραμμάρια ανά τόνο φορτίου και ανά χιλιόμετρο μεταφοράς (Παπαχαριζάνος, 2020)

ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂
ΕΝΑΕΡΙΕΣ	450-500g
ΧΕΡΣΑΙΕΣ	30-150g
ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ	10-40g

Τα καυσαέρια των ναυτικών κινητήρων πετρελαίου αποτελούν μίγμα σωματιδίων, ατμών και αερίων (CARB, 1998). Κατά βάση, αποτελούνται από οξυγόνο (O₂), άζωτο (N₂), υδρατμούς (H₂O) και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Σε πολύ μικρότερα ποσοστά περιέχονται οξείδια του θείου (SO_x) και οξείδια του αζώτου (NO_x)

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) είναι ένας από τους οργανισμούς ο οποίος ευθύνεται για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος από τους

ναυτικούς ρύπους μέσω κανονισμών στους οποίους πρέπει να συμμορφώνονται όλα τα πλοία των κρατών μελών του (Κεφάλαιο 1.1). Η έκδοση του, MARPOL (Annex VI) που αφορά τη προστασία από τη ρύπανση στη θάλασσα, τέθηκε σε ισχύ το 2005 και θεμελιώνει τα όρια στις εκπομπές των κύριων ρύπων σε καυσαέρια των πλοίων, δηλαδή στα οξειδία του αζώτου (NO_x) και στα οξειδία του θείου (SO_x). Αφού τέθηκε σε ισχύ το παράρτημα VI της MARPOL το 2005, η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC), συμφώνησε να αναθεωρήσει το παράρτημα VI της MARPOL προκειμένου να αυξηθούν σημαντικά τα όρια εκπομπών υπό το πρίσμα των τεχνολογικών εξελίξεων και της μέχρι τότε εμπειρίας. Ως αποτέλεσμα τριετούς μελέτης, η MEPC εξέδωσε το αναθεωρημένο Παράρτημα VI της MARPOL και τον Τεχνικό Κώδικα NO_x του 2008, ο οποίος ήρθε σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2010.1

Το παράρτημα VI της MARPOL σε αρχική φάση υποχρέωνε τα πλοία να χρησιμοποιούν, σε παγκόσμιο επίπεδο, καύσιμο με μέγιστο όριο περιεκτικότητας σε θείο, 4,5% κ.β. Το όριο μειώθηκε στο 3.5% το 2012 και τέλος στο 0.5% από το 2020 (Σχήμα 1.2). Επιπρόσθετα, σε ζώνες SECAs το όριο περιεκτικότητας των καυσίμων σε θείο αρχικά δεν έπρεπε να ξεπερνάει το 1,5% κ.β. Ωστόσο, η οδηγία το 2010 άλλαξε πάλι όπου τέθηκε η μέγιστη τιμή περιεκτικότητας σε 1%, και το 2015 μειώθηκε ακόμα περισσότερο φτάνοντας το 0.1%. Η χρήση καυσίμου χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο δεν είναι υποχρεωτική (ABS, 2018). Εναλλακτικά, τα πλοία μπορούν να καταναλώνουν καύσιμα υψηλής περιεκτικότητας σε θείο (HFO) εγκαθιστώντας σύστημα καθαρισμού των καυσαερίων ή οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία μειώνει τις εκπομπές SO_x στα επιτρεπόμενα όρια.

5.3.2 Μέθοδοι συμμόρφωσης στους ισχύοντες κανονισμούς

Τα πλοία υποχρεούνται να συμμορφώνονται στους κανονισμούς για τη μείωση των εκπομπών SO_x και NO_x όπως αυτοί έχουν συνοπτικά αναλυθεί(κεφάλαιο 5.3.1). Σε ό,τι αφορά τις εκπομπές NO_x, δεν θα γίνει περαιτέρω ανάλυση, καθώς σύμφωνα με τα αποτελέσματα των εργοστασιακών δοκιμών της κύριας μηχανής και των ηλεκτρογεννητριών, ο κινητήρας του υπό μελέτη πλοίου συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του Tier II. Για τη συμμόρφωση με τα επιτρεπτά όρια εκπομπών SO_x, τρεις είναι οι επιλογές που επικρατούν (Yang, 2012)

- α. Χρήση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο,
- β. Εγκατάσταση συστήματος για καύση υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG)
- γ. Εγκατάσταση συστήματος Scrubber

Κάθε μία από τις προαναφερθείσες επιλογές έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αφορούν στην πολυπλοκότητα της εγκατάστασης του εκάστοτε συστήματος, το αρχικό κόστος εγκατάστασης, τα λειτουργικά έξοδα και τέλος τον πλου του πλοίου.

5.3.3 Ναυτικές πλυντρίδες δέσμευσης οξειδίων του θείου (Scrubber)

Οι ναυτικές πλυντρίδες δέσμευσης οξειδίων του θείου (Scrubber) τοποθετούνται συνήθως μετά την κύρια μηχανή ή τον λέβητα, με σκοπό την επεξεργασία των καυσαερίων χρησιμοποιώντας θαλασσινό νερό, χημικά επεξεργασμένο γλυκό νερό ή άλλα στοιχεία ξηρού τύπου τα οποία εγκλωβίζουν τα

οξειδία του θείου και μειώνουν τις ποσότητες των αιωρούμενων σωματιδίων. Στην κάθε περίπτωση, παρατηρείται δημιουργία απόβλητων τα οποία περιέχουν τις ουσίες που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον καθαρισμό των καυσαερίων σε συνδυασμό με τα σωματίδια SO_x και PM που αφαιρέθηκαν από αυτά. Κάθε σύστημα scrubber, το οποίο μειώνει τα ποσοστά των SO_2 στα καυσαέρια, αναγνωρίζεται από τον IMO βάσει της MEPC 184(59). Όλα τα διαθέσιμα εμπορικά συστήματα εγγυώνται την επεξεργασία των καυσαερίων ώστε να ικανοποιούνται και οι δύο απαιτήσεις περιεκτικότητας σε θείο (0.5% m/m, 0.1% m/m) ανάλογα με την περιοχή πλεύσης του πλοίου (DNV GL, 2018)

Τα συστήματα Scrubber μειώνουν τις εκπομπές SO_x και PM κατά 90-99% και 60-85% αντίστοιχα. Υπάρχουν δύο τύποι, είναι ο ξηρός και ο υγρός τύπος. Στη κατηγορία ξηρού τύπου η απορρόφηση του SO_2 γίνεται μέσω της επαφής του καυσαερίου με μια στερεά ουσία σε μορφή πολύ μικρών κόκκων. Η στερεά ουσία αυτή, δρα είτε ως καταλύτης για την οξείδωση του SO_2 στην περίπτωση του άνθρακα, ορισμένων μετάλλων (βανάδιο) και ορυκτών (ζεόλιθος) και του διοξειδίου του πυριτίου, είτε ως αντιδρών στην περίπτωση ξηρού ασβέστη (Μάλλης, 2019). Η κατηγορία αυτή, απαιτεί υψηλότερο κεφάλαιο επένδυσης και την ίδια ώρα μεγαλύτερο χώρο εγκατάστασης από ότι αντίστοιχα συστήματα υγρού τύπου. Έτσι, στη ναυτιλία είναι επικρατέστερη η χρήση συστημάτων υγρού τύπου (Panasiuk, 2015).

Τέλος, εκτός των περιορισμών στην περιεκτικότητα των καυσίμων σε θείο η ρίψη των υδάτων των ναυτικών πλυντρίδων στη θάλασσα υπόκειται επίσης σε περιορισμούς, με σκοπό την προστασία των ευαίσθητων περιοχών. Ως ευαίσθητες περιοχές χαρακτηρίζονται οι θαλάσσιες περιοχές οι οποίες έχουν περιορισμένη δυνατότητα εξουδετέρωσης των όξινων αποβλήτων λόγω χαμηλού pH και συναλλαγής με γειτονικές περιοχές, καθώς και εκείνες οι οποίες έχουν σημαντικά οικολογικά χαρακτηριστικά.

5.3.3.1 Τύποι scrubber υγρού τύπου

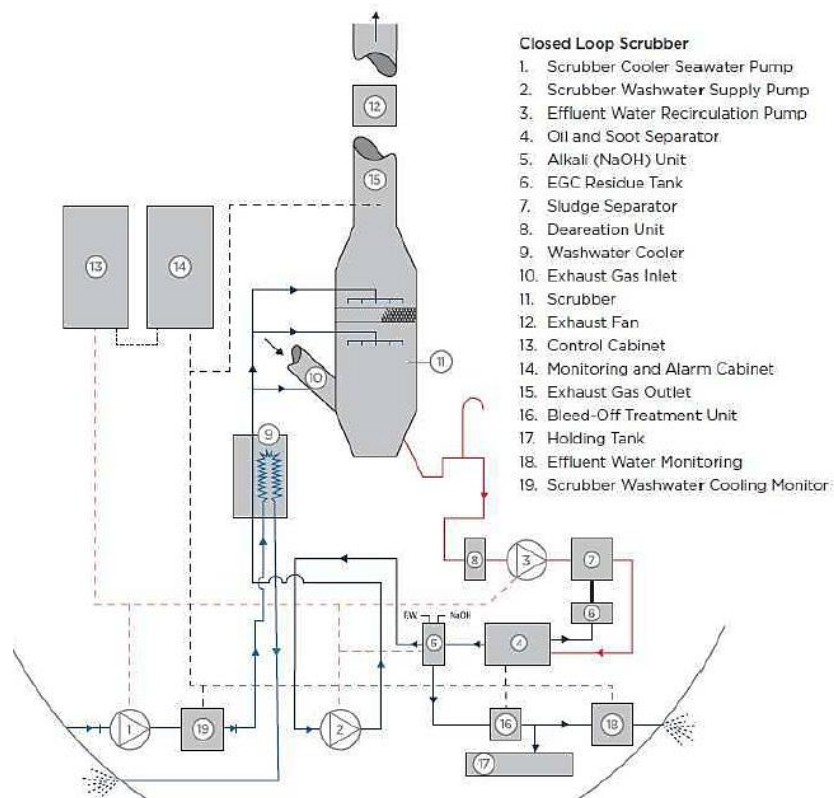
. Στη παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται επεξήγηση των scrubber υγρού τύπου τα οποία διακρίνονται σε ανοιχτού βρόχου, κλειστού βρόχου και υβριδικού συστήματος λειτουργίας.

Κατά τη λειτουργία ανοιχτού βρόχου (open loop) χρησιμοποιείται ως μέσο καθαρισμού των καυσαερίων το θαλασσινό νερό, το οποίο διέρχεται μέσα από το σύστημα, αντιδρά με τα SO_x παράγοντας θειώδη και θειικά άλατα νατρίου και του ασβεστίου και στη συνέχεια γίνεται αποβολή στη θάλασσα (ABS, 2018). Παρόλο που, η εγκατάσταση τέτοιου τύπου συστήματος, είναι σχετικά απλή και πιο οικονομική από τους άλλους δύο τύπους (Reynolds, et al., 2011), είναι περιορισμένη η χρήση του διότι δεν έχει την δυνατότητα να λειτουργεί σε περιοχές όπου είναι απαγορευμένη ή περιορισμένη η απόρριψη του νερού πλύσης. Αυτές οι περιοχές θα ονομαστούν ECA alike και περιλαμβάνουν χώρες όπως η Αργεντινή, η Κίνα, η Βραζιλία και η Σιγκαπούρη. Η επιλογή ενός τέτοιου συστήματος θεωρείται κατάλληλη όταν το πλοίο πλέει αποκλειστικά ή κατά κύριο λόγο σε ανοιχτή θάλασσα.

Κατά τη λειτουργία κλειστού βρόχου (closed loop) χρησιμοποιείται ως μέσο πλύσης των καυσαερίων γλυκό νερό με υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) γνωστό και ως καυστική σόδα, το οποίο ανακυκλώνεται στο σύστημα. Το NaOH έχει τη δυνατότητα να εξουδετερώσει το SO_2 σχηματίζοντας θειικό νάτριο (Na_2SO_4). Στα συστήματα κλειστού βρόχου είναι μικρές οι ποσότητες των εκπλυμάτων που απορρίπτονται. Με την απόρριψη, αντικαθίσταται αντίστοιχη ποσότητα γλυκού νερού με σκοπό την αραίωση των συγκεντρώσεων του θειικού νατρίου. Με την προσθήκη μίας δεξαμενής αποθήκευσης των εκπλυμάτων, τα συστήματα κλειστού βρόχου, μπορούν να λειτουργήσουν με μηδενικές απορρίψεις για χρονική περίοδο,

η οποία εξαρτάται από το μέγεθος της δεξαμενής. Η εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος κλειστού βρόχου είναι πιο περίπλοκη από αυτή του ανοιχτού και έτσι, το κόστος εγκατάστασης είναι υψηλότερο περίπου κατά 18% (Reynolds, et al., 2011). Ένα τέτοιο σύστημα είναι καταλληλότερο όταν το πλοίο πλέει αποκλειστικά ή στο μεγαλύτερο μέρος της διάρκειας ζωής του σε περιοχές ECA.

Το υβριδικό σύστημα λειτουργεί ως ναυτική πλυντρίδα ανοιχτού ή κλειστού βρόχου ανάλογα με την περιοχή στην οποία πλέει τη δεδομένη στιγμή το πλοίο. Η μετάβαση από λειτουργία ανοιχτού σε κλειστό βρόχου και αντίστροφα διαρκεί περίπου 10 με 20 δευτερόλεπτα σε αντίθεση με την αλλαγή καυσίμου όπου, για παράδειγμα, η αλλαγή από LSF0 σε MGO διαρκεί περίπου 2 ώρες (Hoogeveen, 2017). Η εγκατάσταση ενός υβριδικού συστήματος αποτελεί την πιο περιπλοκή από τις τρεις επιλογές, παρόλα αυτά το κόστος εγκατάστασης είναι μόλις 6.7% υψηλότερο από αυτό του ανοικτού βρόχου (Reynolds, et al., 2011). Η επιλογή ενός υβριδικού συστήματος είναι καταλληλότερη για πλοία που πλέουν σε περιοχές ECA αλλά και σε ανοιχτή θάλασσα. Τέλος, παρατηρείται πληθώρα επιλογών μέσω των οποίων μπορεί να επιτευχθεί η συμμόρφωση με τους κανονισμούς για τη μείωση των εκπομπών θείου από τα καυσαέρια. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου προκύπτει αναλύοντας τα χαρακτηριστικά και την πορεία του πλοίου.



Σχήμα 5.9: Αναπαράσταση διάταξης συστήματος closed loop scrubber: (ABS, 2018)

5.3.3.2 Τύποι πύργων απορρόφησης

Όπως προαναφέρθηκε, η δέσμευση των ρυπογόνων σωματιδίων πραγματοποιείται μέσω της σύγκρουσης τους με τα σωματίδια του νερού, ενώ παράλληλα ο ρυθμός δέσμευσης αυτών εξαρτάται από την παροχή του διαλύματος καθαρισμού, τον κορεσμό του σε SO₂ και τη θερμοκρασία καυσαερίων. Για τη

διαδικασία αυτή, δύο τύποι πύργων απορρόφησης διακρίνονται, ο τύπος [U] και ο τύπος [I] (Inline).

Ο πύργος τύπου U είναι σύστημα προ-επεξεργασίας καυσαερίων. Καθώς, η σύγκρουση σωματιδιακών των ρύπων απαιτεί υψηλές σχετικές ταχύτητες των ρευμάτων καυσαερίων και νερού πλύσης, χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την ταχύτητα των καυσαερίων και τα ρεύματα νερού πλύσης και να δημιουργήσουν σταγονίδια νερού πλύσης. Στα συστήματα προ-επεξεργασίας χρησιμοποιείται συνήθως το 20% της παροχής νερού πλύσης εξασφαλίζοντας την απομάκρυνση του 60% των SO_x και ενός μέρους των PM, ενώ παράλληλα μειώνεται η θερμοκρασία των καυσαερίων στους 60°C. Η πτώση θερμοκρασίας στους 60°C έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου τους και συνεπώς τη μείωση των διαστάσεων του scrubber. Κατά το δεύτερο στάδιο επεξεργασίας των καυσαερίων, επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του 98% των SO_x.

Οι πύργοι τύπου I (Inline), καθώς έχουν μεγαλύτερο ύψος και μικρότερη διάμετρο από τους αντίστοιχους πύργους τύπου U, έχουν σημαντικά ευκολότερη εγκατάσταση. Έτσι, προτείνεται για πλοία περιορισμένου χώρου. Κατά τη λειτουργία τους, εισέρχονται τα καυσαέρια από τη βάση του πύργου, όπου μέσω ψεκασμού αναμειγνύονται με το νερό πλύσης με τη βοήθεια στρωμάτων ακροφυσίων. Δεν είναι αναγκαία η χρήση ανεμιστήρων, δεδομένου ότι έχουν περιορισμένη πτώση πίεσης λόγω του ότι δεν έχουν σύστημα προ-επεξεργασίας. Το μειονέκτημά τους είναι η σχετικά μειωμένη απόδοση δέσμευσης των SO_x συγκριτικά με τους τύπους U, με αποτέλεσμα κάποιες εταιρίες να ορίζουν μικρότερα ποσοστά θείου στο καύσιμο για την αποδοτική λειτουργία τους. Για παράδειγμα, η εταιρία Wärtsilä ορίζει μέγιστο ποσοστό θείου για τα συστήματα I, 2.5% και για τα συστήματα U, 3.5% (Paulsrud, 2015).

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάζεται μόνο το σύστημα τύπου U.



Σχήμα 5.10: Αναπαράσταση συστήματος scrubber με πύργο τύπου U (ALFA LAVAL, 2022)

5.3.4 Μελέτη εγκατάστασης ναυτικής πλυντρίδας

Παρακάτω θα ακολουθήσει η μελέτη εγκατάστασης πλυντρίδας ως μέρος μετασκευής στο υπό μελέτη δεξαμενόπλοιο, με χρήση καυσίμου HFO για την υπολειπόμενη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, η οποία ισοδυναμεί με δέκα έτη (Reynolds, et al., 2011).

5.3.4.1 Βασικά χαρακτηριστικά ναυτικής πλυντρίδας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει μελέτη εγκατάστασης ναυτικής πλυντρίδας closed loop. Η επιλογή της ναυτικής πλυντρίδας έγινε σύμφωνα με το μέγεθος της κύριας μηχανής. Το υπό μελέτη πλοίο έχει κύριο κινητήρα με μέγιστο

σημείο λειτουργίας τα 6.3 MW (Πίνακας 4.2) και σύμφωνα με το δεδομένο αυτό έγινε επιλογή ναυτικής πλυντρίδας για σύστημα 8 MW της εταιρίας Alfa Laval. Πιο κάτω (Πίνακας 5.28) αναγράφονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη συστήματος, δηλαδή η ενεργειακή απαίτηση για τη λειτουργία του εκάστοτε συστήματος, ο ρυθμός παραγωγής υαλώδους υπολείμματος και ο απαιτούμενος όγκος κατανάλωσης καυστικής σόδας για την καταπολέμηση των αέριων ρύπων (Παπαχαριζάνος, 2020).

Πίνακας 5.28: Χαρακτηριστικά closed loop scrubber συστήματος 8MW

Scrubber Data	
Operating Procedure (Wet/Dry)	Wet
Operating Mode (Open /Closed/Hybrid Loop)	Closed
Heavy Fuel Oil Sulphur Content (% m/m)	3.5
Ratio Emission Limit (SO ₂ /CO ₂)	4.3 (ECA Compliance)
Bleed-off water (m ³ /h)	3.5
Electric load (kW)	190
Electrical load Open Loop W.T.S. (kW)	N/A
Scrubbing water flow (m ³ /h)	675
Cooling water flow (Closed Loop) (m ³ /h)	240
Alkaline Solution (50% NaOH) Consumption (Closed Loop) (liter/h)	155
Sludge Production Rate (liter/h)	25

5.3.4.2 Ηλεκτρικός Ισολογισμός στην Αναβαθμισμένη Εγκατάσταση και Επιλογή Πλυντρίδας

Με την άθροιση των πραγματικών φορτίων των καταναλωτών σε λειτουργία προκύπτει το συνολικό φορτίο των γεννητριών, που απαιτείται. Ο αριθμός των γεννητριών που είναι σε λειτουργία στην κάθε κατάσταση πριν την αναβάθμιση είναι δεδομένος. Αρχικά θα θεωρηθεί ότι μετά την εγκατάσταση του συστήματος καθαρισμού των καυσαερίων θα λειτουργεί ίσος αριθμός γεννητριών με πριν την εγκατάσταση (Πίνακας 5.29). Στο φορτίο των γεννητριών πριν την εγκατάσταση θα προστεθεί το φορτίο του συστήματος scrubber για τον υπολογισμό της επιπρόσθετης κατανάλωσης καυσίμου. Από τα δεδομένα των κατασκευαστών γνωρίζουμε τη μέγιστη ισχύ λειτουργίας των συστημάτων και των επιμέρους τμημάτων τους.

Προτιμάται γενικά οι γεννήτριες να λειτουργούν σε συντελεστή 70-85% της MCR, όπου έχουν την ελάχιστη ειδική κατανάλωση καυσίμου. Στα χαμηλότερα φορτία η ειδική κατανάλωση αυξάνεται σημαντικά. Επίσης δε συνίσταται η συνεχής λειτουργία των γεννητριών στα όρια της ισχύος τους.

Πίνακας 5.29: Πρώτος ισολογισμός Ισχύος μετά την Εγκατάσταση Συστήματος scrubber

FIRST POWER LOADS ESTIMATING TABLE					
SPECIFICATION	CONDITIONS				
	NORMAL RUN.(KW)	EMERG. (KW)	LEAVING PORT(KW)	CARGO HANDLING(KW)	IN PORT (KW) - IDLE
SCRUBBER REQUIRED LOAD (KW)	190	190	190	190	190
TOTAL REQUIRED POWER (KW)	652.7	128.6	1508.6	1965.8	662.8
GENERATOR IN SERVICE (N×KW)		1 x 150		2 x 640, 1 x 1000	1 x 640
SHAFT GENERATOR IN SERVICE(I×KW)	1 X 1500		1 X 1500		
SHAFT GENERATOR IN SERVICE TOTAL POWER(KW)	1500	150	1500	2280	640
LOAD FACTOR (%)	43.5%	85.7%	100.6%	86.2%	103.6%

Στην κατάσταση Ent & Leaving Port και In Port (idle) παρατηρείται ότι δεν μπορούν να καλυφθούν οι ανάγκες από αυτή την επιλογή γεννητριών. Έτσι, γίνονται μετατροπές στις γεννήτριες σε λειτουργία στις συγκεκριμένες καταστάσεις. Στην κατάσταση Ent & Leaving Port προστίθεται μια γεννήτρια 640 kW και στην κατάσταση In Port (idle) μπαίνει σε λειτουργία η γεννήτρια 1000 kW και απενεργοποιείται αυτή των 640 kW. Ο νέος ισολογισμός που προκύπτει φαίνεται πιο κάτω(Πίνακας 5.30).

Πίνακας 5.30: Τελικός ισολογισμός Ισχύος μετά την Εγκατάσταση Συστήματος scrubber

FINAL POWER LOADS ESTIMATING TABLE					
SPECIFICATION	CONDITIONS				
	NORMAL RUN.(KW)	EMERG. (KW)	LEAVING PORT(KW)	CARGO HANDLING(KW)	IN PORT (KW) - IDLE
SCRUBBER REQUIRED LOAD (KW)	190	190	190	190	190
TOTAL REQUIRED POWER (KW)	652.7	128.6	1508.6	1965.8	662.8
GENERATOR IN SERVICE (N×KW)		1 x 150	1 x 640	2 x 640, 1 x 1000	1 x 1000
SHAFT GENERATOR IN SERVICE(I×KW)	1 X 1500		1 X 1500		
SHAFT GENERATOR IN SERVICE TOTAL POWER(KW)	1500	150	2140	2280	1000
LOAD FACTOR (%)	43.5%	85.7%	70.5%	86.2%	66.3%

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιοποίηση της περίσσειας ισχύος, και παρατηρείται ότι στην κατάσταση Normal Run δεν είναι ικανοποιητικός ο βαθμός φόρτισης. Ωστόσο, είναι μια αύξηση της τάξης του 12.7%, η οποία θα βελτιώσει την ειδική κατανάλωση καυσίμου της κύριας μηχανής.

5.3.5 Οικονομική Αξιολόγηση της Μετασκευής

Παρακάτω θα ακολουθήσει η σύγκριση της επένδυσης εγκατάστασης πλυντρίδας ως μέρος μετασκευής στο υπό μελέτη δεξαμενόπλοιο, με χρήση καυσίμου HFO, και της επιλογής χρήσης καυσίμου MGO.

Συγκεκριμένα, η οικονομική ανάλυση αποτελείται από:

- α. τη μελέτη των ημερήσιων σταθερών λειτουργικών εξόδων(κατανάλωση καυσίμου και λιπαντικού)
- β. το κόστος της μετασκευής.
- γ. εξόδων λόγω χρήσης συστήματος scrubber
- δ. το ποσόν που εξοικονομείται λόγω χρήσης φθηνότερου καυσίμου
- ε. τον υπολογισμό του δείκτη ΚΠΑ μέσω του οποίου αξιολογείται η επένδυση.

5.3.5.1 Κατανάλωση καυσίμου

Στο αρχικό σενάριο θα χρησιμοποιηθεί καύσιμο MGO από την κύρια μηχανή και τις γεννήτριες σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας, ενώ με την εγκατάσταση του συστήματος scrubber κλειστού βρόγχου, θα καταναλώνεται σε όλες τις καταστάσεις και περιοχές καύσιμο HFO. Στην κάθε περίπτωση εγκατάσταση ή μη συστήματος EGCS, οι τιμές ειδικής κατανάλωσης θα πρέπει να διορθωθούν για το αυξημένο ενεργειακό περιεχόμενο του MGO και για το χαμηλότερο του HFO σύμφωνα με την εξίσωση που περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.1.6.2 (Εξίσωση 5.12) καθώς οι ειδικές καταναλώσεις δίνονται για κατάσταση ISO από τους κατασκευαστές. Η θερμογόνος δύναμη του HFO ισούται με 40.7 MJ/kg, και του MGO με 42.9 MJ/kg (Lahtinen, 2016).

Στη συνέχεια, για λειτουργία με καύσιμο HFO απαιτείται η θέρμανση και ο καθαρισμός του καυσίμου ενώ για τη λειτουργία με καύσιμο MGO είναι απαραίτητη η ψύξη του καυσίμου. Οι παραπάνω διεργασίες αντιστοιχούν σε επιπλέον φορτία και μπορούν να εκφραστούν ως ποσοστά της συνολικής της κατανάλωσης καυσίμου. Για την ψύξη του MGO απαιτείται αύξηση 0.18% στην ειδική κατανάλωση. Για τον καθαρισμό (separation) του HFO η αύξηση στην ειδική κατανάλωση διαφοροποιείται στη βιβλιογραφία και επιλέγεται η μέση τιμή όλων των τιμών. Έτσι, η τιμή διόρθωσης της κατανάλωσης για την επεξεργασία και τη θέρμανση του HFO θα προκύψει ίση με 2.0%. Οι διορθωμένες τιμές της ειδικής κατανάλωσης για τη λειτουργία με HFO και σύστημα EGCS και MGO χωρίς σύστημα EGCS παρουσιάζονται ενσωματωμένες στην ειδική κατανάλωση στους πιο κάτω πίνακες για την κύρια μηχανή και τις βοηθητικές γεννήτριες.

Πίνακας 5.31: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής χωρίς σύστημα scrubber

ME Consumptions without Scrubber per day, per year										
STATE	SPEED	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		M/E POWER	LOAD M/E	SFOC MDO + 0.18%		CONSUMPTION	
	knots		%	DAYS/YEAR	KW	%	g/kWh		t/day	t/year
NORMAL RUN	9.5	BALLAST	10	36.5	2182.7	34.6	187.76		9.84	359.01
	13	BALLAST	17.5	63.9	3631.7	57.6	181.34		15.81	1009.58
	11	LADEN	36	131.4	3757.7	59.6	180.78		16.30	2142.29
	13.5	LADEN	11	40.2	4450.7	70.6	177.71		18.98	762.14
ENT&LEAV PORT	5	BALLAST	7.5	27.4	1993.3	31.6	188.60		9.02	246.99
	5	LADEN	1	3.7	3064.3	48.6	183.85		13.52	49.35
									SUM [t]	4569.35

Πίνακας 5.32: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου κύριας μηχανής σύστημα scrubber

ME Consumptions with Scrubber per day, per year										
STATE	SPEED	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		M/E POWER	LOAD M/E	SFOC HFO + 2%		CONSUMPTION	
	knots		%	DAYS/YEAR	KW	%	g/kWh		t/day	t/year
NORMAL RUN	9.5	BALLAST	10	36.5	2393.2	38.0	200.50		11.52	420.35
	13	BALLAST	17.5	63.9	3842.2	61.0	193.61		17.85	1140.40
	11	LADEN	36	131.4	3968.2	63.0	193.01		18.38	2415.39
	13.5	LADEN	11	40.2	4661.2	74.0	189.71		21.22	852.12
ENT&LEAV PORT	5	BALLAST	7.5	27.4	1764.9	28.0	203.5		8.62	235.96
	5	LADEN	1	3.7	2835.9	45.0	198.4		13.50	49.29
									SUM [t]	5113.50

Πίνακας 5.33: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου βοηθητικών γεννητριών χωρίς σύστημα scrubber

Generators Consumptions without Scrubber per day, per year													
STATE	D/G IN USE	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		LOAD	N01 D/G	N02 D/G	N03 D/G	SFOC MDO + 0.18%			CONSUMPTION	
			%	DAYS/YEAR	%	KW	KW	KW	g/KWh			t/day	t/year
IN PORT	1X640kW	BALLAST	3.75	13.7	73.9	472.84	0.00	0.00	191.63	0.00	0.00	2.17	29.77
		LADEN	11	40.2	73.9	472.84	0.00	0.00	191.63	0.00	0.00	2.17	87.31
CARGO HANDLING	2X640 + 1X1000 kW	BALLAST	1.5	5.5	77.9	498.47	498.47	778.86	191.74	191.74	193.73	8.21	44.94
		LADEN	0.75	2.7	77.9	498.47	498.47	778.86	191.74	191.74	193.73	8.21	22.47
											SUM [t]	184.49	

Πίνακας 5.34: Χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου βοηθητικών γεννητριών με σύστημα scrubber

Generators Consumptions with Scrubber per day, per year													
STATE	D/G IN USE	LOAD	FREQUENCY PER YEAR		LOAD	N01 D/G	N02 D/G	N03 D/G	SFOC HFO + 2%			CONSUMPTION	
			%	DAYS/YEAR	%	KW	KW	KW	g/KWh			t/day	t/year
IN PORT	1X1000kW	BALLAST	3.75	13.7	66.3	0.00	0.00	662.84	0.00	0.00	209.10	3.33	45.53
		LADEN	11	40.2	66.3	0.00	0.00	662.84	0.00	0.00	209.10	3.33	133.55
CARGO HANDLING	2X640 + 1X1000 kW	BALLAST	1.5	5.5	86.2	561.80	561.80	842.19	206.66	206.66	208.80	9.79	53.62
		LADEN	0.75	2.7	86.2	561.80	561.80	842.19	206.66	206.66	208.80	9.79	26.81
ENT&LEAV PORT	1X640kW	BALLAST	7.5	27.4	60.0	384	0.00	0.00	208.03	0.00	0.00	1.92	52.48
		LADEN	1	3.7	60.0	384	0.00	0.00	208.03	0.00	0.00	1.92	7.00
											SUM [t]	318.99	

Οι τιμές [\$/τόνο] ποικίλλουν πολύ ανάλογα με τις τάσεις της αγοράς και τις παγκόσμιες τάσεις. Μετά από έρευνα σχετικά με τις τιμές ανεφοδιασμού καυσίμων (Ship & Bunker, 2022), καταλήγουμε στις πιο κάτω τιμές, οι οποίες είναι ο μέσος όρος 20 λιμανιών σε περίοδο τριών ετών. Ασφαλώς, οι συγκεκριμένες τιμές είναι ενδεικτικές, καθώς εξαρτάται από το λιμάνι ανεφοδιασμού και επιπρόσθετα μεταβάλλεται με μεγάλη συχνότητα κατά την διάρκεια του χρόνου.

$$Fuel\ Cost_{MDO} = 690 \left[\frac{\$}{ton} \right], \quad Fuel\ Cost_{HFO} = 425 \left[\frac{\$}{ton} \right]$$

Πίνακας 5.35: Κόστος καυσίμου ετησίως

Fuel Savings per year		
FUEL	HFO 380	MDO
CONSUMPTION [t/year]	5432.49	4753.84
PRICE [€]	425	690
COST [€/year]	\$2,308,808.04	\$3,280,152.34
SAVINGS [€/YEAR]	\$971,344.29	

Παρατηρείται ότι λόγω χαμηλότερης τιμής του HFO, παρόλο που χρησιμοποιούνται περισσότεροι τόνοι καυσίμου, γίνεται εξοικονόμηση \$971,344.29 ετησίως.

5.3.5.2 Κατανάλωση λιπαντικών κύριας μηχανής

Η διαδικασία υπολογισμού της κατανάλωσης λιπαντικών από την κύρια μηχανή έγινε σύμφωνα με το εγχειρίδιο της κατασκευάστριας εταιρίας (MAK, 2012). Σύμφωνα με αυτήν, η ειδική κατανάλωση λιπαντικού είναι 0.6 g/kWh.

Ο υπολογισμός της ειδικής κατανάλωσης λιπαντικών στην κύρια μηχανή πραγματοποιείται μέσω της πιο κάτω εξίσωσης (Εξίσωση 5.14), στην οποία ως P ορίζεται το φορτίο λειτουργίας του κινητήρα, ως H οι ώρες λειτουργίας και ως B_{fr} η ειδική κατανάλωση λιπαντικών.

Εξίσωση 5.14: Κατανάλωση λιπαντικού κύριας μηχανής

$$Lub\ Oil\ Consumption = P \cdot H \cdot B_{fr}$$

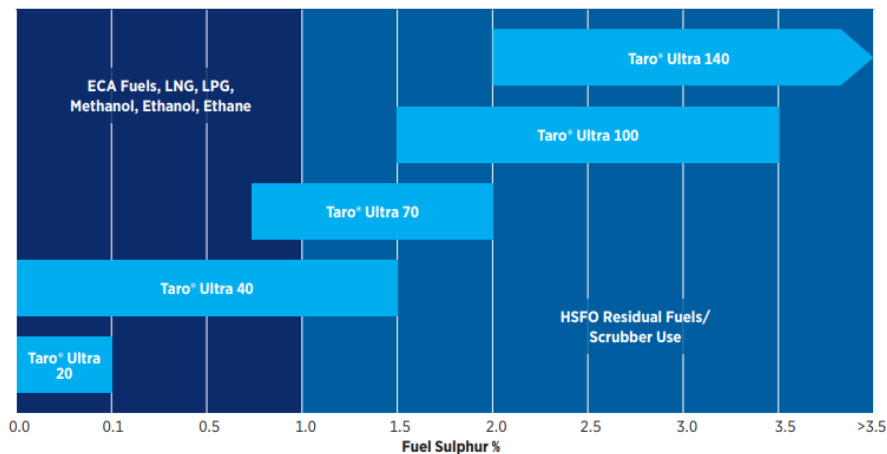
Έτσι, υπολογίζεται η κατανάλωση λιπαντικού για καύσιμο HFO (με σύστημα scrubber) και MDO (χωρίς σύστημα scrubber).

Πίνακας 5.36: Κατανάλωση λιπαντικού με και χωρίς σύστημα scrubber

Lubricant Oil Consumption with basic feed rate 0.6 g/kWh						
STATE	SPEED	LOAD	M/E kWh		LUB OIL tonnes	
	knots		HFO	MDO	HFO	MDO
NORMAL RUN	9.5	BALLAST	2.10E+06	1.91E+06	1.26	1.15
	13	BALLAST	5.89E+06	5.57E+06	3.53	3.34
	11	LADEN	1.25E+07	1.19E+07	7.51	7.11
	13.5	LADEN	4.49E+06	4.29E+06	2.69	2.57
ENT&LEAV PORT	5	BALLAST	1.41E+06	1.31E+06	0.85	0.79
	5	LADEN	2.82E+05	2.68E+05	0.17	0.16
SUM [t]					16.01	15.12

Η χρήση HFO λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητας σε θείο μπορεί να προκαλέσει αυξημένη διαβρωτική κατάσταση στην κύρια μηχανή, εκτός εάν αυξηθεί ο αριθμός BN⁵ του κυλινδρέλαιου ή ο ρυθμός τροφοδοσίας. Υπάρχει σημαντικός κίνδυνος που σχετίζεται με τη χρήση λιπαντικού κυλίνδρου πολύ χαμηλού BN με καύσιμο υψηλής περιεκτικότητας σε θείο. Εάν το επίπεδο BN του λιπαντικού είναι πολύ χαμηλό και ο ρυθμός τροφοδοσίας δεν είναι βελτιστοποιημένος, τότε ένας κινητήρας θα υποστεί σοβαρή διαβρωτική φθορά (CHEVRON, 2020).

Το είδος του λιπαντικού ορίζεται από το ποσοστό περιεκτικότητας σε θείο σύμφωνα με το πιο κάτω σχήμα(Σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11: Αριθμός BN σύμφωνα με περιεκτικότητα θείου στο καύσιμο (CHEVRON, 2020)

Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί BN 40 για MDO (0.1%) και BN100 για HFO (3.5%). Πιο κάτω φαίνονται οι τιμές των δύο λιπαντικών (Παπαχαριζάνος, 2020).

$$Lub Cost_{BN40} = 4890 \left[\frac{\$}{ton} \right], \quad Lub Cost_{BN100} = 5450 \left[\frac{\$}{ton} \right]$$

Πίνακας 5.37: Κόστος κυλινδρέλαιου ετησίως

Lub Oil Cost per year	
BN100	BN40
\$87,264.49	\$73,926.77

Παρατηρείται με τη χρήση MDO (χωρίς scrubber) εξοικονομούνται \$13,337.71 ετησίως.

5.3.5.3 Λειτουργικά έξοδα λόγω χρήσης ναυτικής πλυντρίδας

Η λειτουργία ναυτικής πλυντρίδας **κλειστού βρόχου**, όπως είναι στη παρούσα μελέτη, απαιτεί χρήση υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) ώστε, να γίνεται δέσμευση του θείου που βρίσκεται σε υψηλή περιεκτικότητα στο HFO. Μέσω αυτής της διαδικασίας, δημιουργείται το ιλυώδες υπόλειμμα (sludge) το οποίο αποθηκεύεται

⁵ Ο αριθμός βάσης (BN) είναι μια ιδιότητα που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση των λιπαντικών κινητήρα εσωτερικής καύσης. Ορίζεται ως η ικανότητα του λαδιού να εξουδετερώνει τα οξέα που σχηματίζονται ως υποπροϊόν της καύσης, των χημικών αντιδράσεων και της αποδόμησης του λαδιού. Τυπικά, όσο υψηλότερο είναι το BN, τόσο περισσότερο οξύ θα μπορεί να εξουδετερώσει.

σε κατάλληλες δεξαμενές του πλοίου, όπως προβλέπει η λειτουργία κλειστού βρόγχου, μέχρι να μεταφερθεί στις ειδικές εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων των λιμανιών.

Σύμφωνα με ABS, γίνεται χρήση υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) με πυκνότητα ίση με 1.58 kg/lit και με ρυθμό παραγωγής ίσο με 155 lit/h. Το κόστος του συγκεκριμένου χημικού (υδροξειδίου του νατρίου/καυστική σόδα) κυμαίνεται από 50 έως 250 \$/t. Στη συγκεκριμένη μελέτη λάβαμε μία μέση τιμή 150 \$/t.

Λόγω έλλειψης δεδομένων, θεωρούμε πως το scrubber λειτουργεί σε όλες τις καταστάσεις στο μέγιστο φορτίο, δηλαδή στα 190kW, καθώς η παραγόμενη ποσότητα ιλύδους υπολείμματος εξαρτάται από το φορτίο λειτουργίας του κινητήρα. Έτσι, έχουμε παραγωγή ιλύδους υπολείμματος 25 lit/h με πυκνότητα 1.2 kg/lit (ABS, 2018). Το κόστος επεξεργασίας και μεταφοράς του υπολείμματος ανέρχεται στα 139,69 \$/t (Μάλλης, 2019).

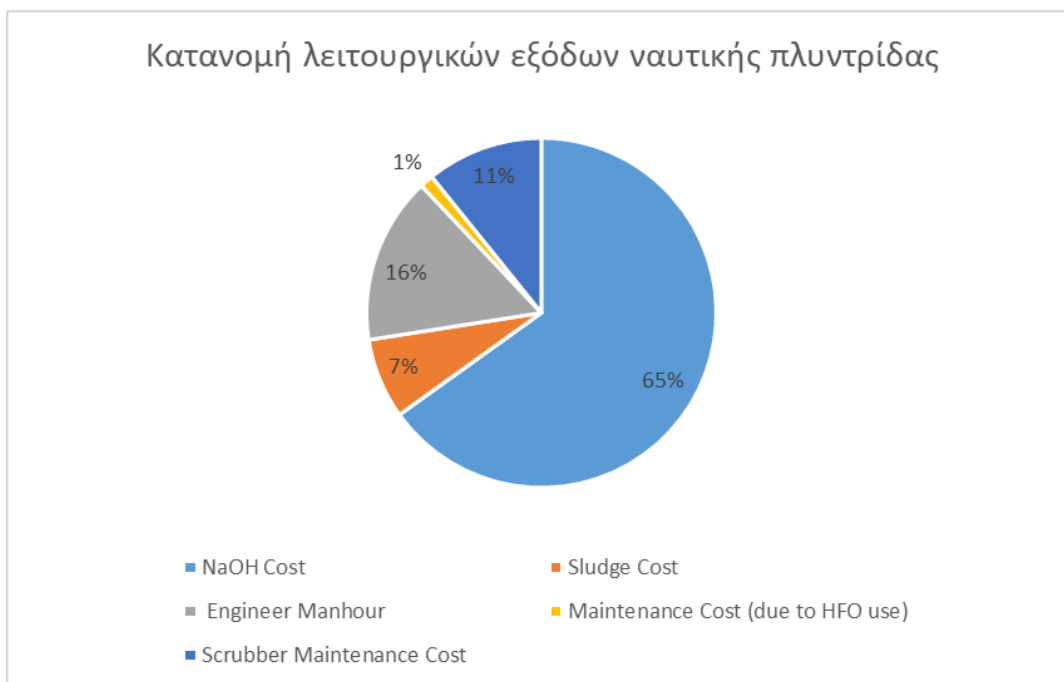
Το ετήσιο κόστος συντήρησης ενός συστήματος EGCS ισούται με το 4% του κόστους εξοπλισμού (Reynolds, et al., 2011). Επίσης, για τη λειτουργία της κύριας μηχανής και των γεννητριών με HFO, απαιτείται ένα επιπρόσθετο κόστος συντήρησης σε σχέση με τη λειτουργία για MGO. Το επιπλέον κόστος για τη συντήρηση ισούται με 0.22 \$/MWh (Μάλλης, 2019).

Στο ετήσιο λειτουργικό κόστος ενός συστήματος EGCS πρέπει να προστεθεί το κόστος για τις εργατοώρες του υπεύθυνου μηχανικού. Γενικά οι απολαβές των μηχανικών εξαρτώνται από τους κανονισμούς της σημαίας του πλοίου. Το ετήσιο κόστος εργατοωρών θεωρείται ίσο με \$76,255 (Μάλλης, 2019).

Πραγματοποιώντας τις κατάλληλες πράξεις, υπολογίζεται το ετήσιο κόστος λειτουργίας, συντήρησης και εργατοωρών.

Πίνακας 5.38: Ετήσια λειτουργικά έξοδα λόγω χρήσης ναυτικής πλυντρίδας

NaOH Cost per year	
Production [lit/h]	155
Density [kg/lit]	1.57
Price [\$/t]	150
Yearly expense [\$]	321,584.20
Sludge Cost per year	
Production [lit/h]	25
Density [kg/lit]	1.2
Transportation [\$/t]	139.69
Yearly expense [\$]	36,710.53
Operating Engineer Manhour	
Cost (\$/y)	76,255.31
Main & Aux Engines Maintenance Cost (due to HFO use)	
(\$/MWh)	0.22
Yearly expense [\$]	6,144.67
Scrubber Maintenance Cost	
4% Total Equipment Cost	
Yearly expense [\$]	53,333.36



Σχήμα 5.12: Κατανομή λειτουργικών εξόδων ναυτικής πλυντρίδας

Αθροίζοντας τα λειτουργικά έξοδα του πιο πάνω πίνακα καθώς και του επιπρόσθετου κόστους κυλινδρέλαιου λόγω χρήσης HFO, τα ετήσια λειτουργικά έξοδα με τη χρήση συστήματος ναυτικής πλυντρίδας ανέρχονται στα **\$507,365.78**.

5.3.5.4 Κόστος εγκατάστασης συστήματος ναυτικής πλυντρίδας

Από τα διαθέσιμα δεδομένα των κατασκευαστών και της διπλωματικής εργασίας του Παπαχριτζάνου, το αρχικό κόστος επένδυσης του συστήματος EGCS είναι από τα γνωστά μεγέθη.

Το συνολικό κόστος μίας ναυτικής πλυντρίδας για μέγεθος κινητήρα 8MW για σύστημα κλειστού βρόχου ανέρχεται στα \$2,000,000.00 (Παπαχαριζάνος, 2020). Σε κάθε περίπτωση, το συνολικό κόστος απαρτίζεται από τα κόστη εξοπλισμού και τοποθέτησης, με το δεύτερο να ανέρχεται στο 50% του πρώτου (Reynolds, et al., 2011). Όσον αφορά τα επιμέρους στοιχεία στο κόστος εξοπλισμού, σημειώνεται πως το κόστος της μελέτης αποτελεί το 7%, ενώ το κόστος για την εκπαίδευση του πληρώματος και την απόκτηση των σχετικών αρχείων, αποτελεί το 2% (Reynolds, et al., 2011).

Πίνακας 5.39: Κόστος εγκατάστασης συστήματος ναυτικής πλυντρίδας

Scrubber Cost Data	
Cost [\$] CLOSED LOOP	
Design	93,333.38
Training & Documentation	26,666.68
Parts	1,213,334.00
Total Equipment	1,333,334.00
Installation	666,666.00
Total	2,000,000.00

5.3.5.5 Οικονομική αξιολόγηση

Για την αξιολόγηση της κάθε επένδυσης, χρησιμοποιείται το κριτήριο καθαρής παρούσας αξίας (ΚΠΑ ή NPV) και του χρόνου αποπληρωμής επένδυσης (DPP).

Ως καθαρή παρούσα αξία (NPV), ορίζεται το άθροισμα των παρούσων αξιών των εισερχομένων και εξερχομένων ταμειακών ροών κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου. Μετράει το πλεόνασμα ή την έλλειψη ταμειακών ροών, σε όρους παρούσας αξίας, σε σχέση με το κόστος κεφαλαίων (cost of funds) που χρησιμοποιήθηκαν για την επένδυση. Ο τύπος υπολογισμού της καθαρής παρούσας δίνεται από την Εξίσωση 5.15.

Εξίσωση 5.15: Υπολογισμός καθαρής παρούσας αξίας

$$NPV = -CAPEX + \sum_{t=1}^N \frac{Revenue}{(1+r)^t}$$

όπου **r**: είναι ο συντελεστής ανατοκισμού στην παρούσα μελέτη θεωρείται ίσος με $r=5\%$.

t: έτος της επένδυσης (χρονική περίοδος) $t=10$

Revenue: Ετήσιες ταμειακές ροές: είναι οι ταμειακές εισροές – εκροές ανά έτος (Revenue= \$463,978.52)

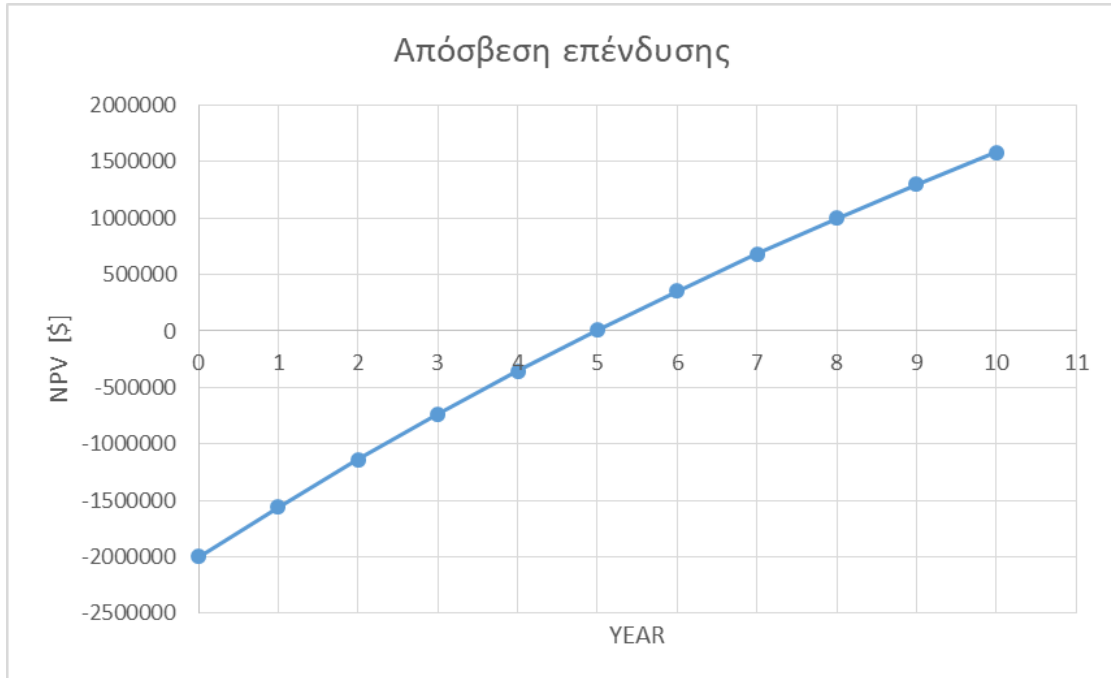
CAPEX: αρχική επένδυση (CAPEX= \$2,000,000.00)

N: αριθμός των επιμέρους χρονικών περιόδων (ετών)

Ως περίοδος αποπληρωμής μίας επένδυσης (DPP-discounted payback period) ορίζεται ο αριθμός ετών μέχρις ότου τα καθαρά έσοδα της επένδυσης ισοφαρίσουν το αρχικό της κόστος (ΨΑΡΑΥΤΗΣ, 2005). Ο υπολογισμός της περιόδου αποπληρωμής προκύπτει από την Εξίσωση 5.16.

Εξίσωση 5.16: Υπολογισμός περιόδου αποπληρωμής

$$DPP = \frac{-\ln\left(1 - \frac{CAPEX \cdot r}{Revenue}\right)}{\ln(1 + r)}$$



Σχήμα 5.13: Απόσβεση επένδυσης

Η περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται στα 4.98 έτη (DPP=4.98 years).

5.3.5.6 Αποτελέσματα μελέτης

Το γεγονός αυτό γίνεται αντιληπτό και στο διάγραμμα όπου παρουσιάζεται το κέρδος που επιφέρει το σύστημα της αξονικής γεννήτριας σε διάρκεια εικοσαετίας από την χρονιά της επένδυσης. Το 5ο έτος είναι εκείνο κατά το οποίο η εγκατάσταση ξεκινά να εμφανίζεται κερδοφόρα, με το συνολικό κέρδος να τείνει σε τιμές των 1.6M\$ το 10ο έτος λειτουργίας.

Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν δύναται ασφαλώς να παρουσιάζουν ένα ποσοστό απόκλισης, καθώς αρκετές τιμές που ήταν αναγκαίες για τον υπολογισμό λήφθηκαν κατά προσέγγιση. Ωστόσο, καθίσταται σαφές και δίχως αμφιβολία το γεγονός πως η επιλεγμένη εγκατάσταση αποτελεί μία κερδοφόρα επένδυση για την λειτουργία του υπό μελέτη δεξαμενοπλοίου. Επίσης, άλλες μελέτες δείχνουν ότι ένα σύστημα EGCS κλειστού βρόγχου, σε διάφορα σενάρια έχει χρόνο απόσβεσης 3.6 έτη (Andersson, et al., 2020).

6 Συμπεράσματα

Στις μέρες μας, η παγκόσμια οικονομία αναπτύσσεται, η τιμή των καυσίμων παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις και οι κανονισμοί του IMO γίνονται ολοένα και αυστηρότεροι. Έτσι, για τη συμμόρφωση με τα τρέχοντα δεδομένα, σημειώθηκε αξιοσημείωτη αύξηση των εγκαταστάσεων γεννητριών άξονα στον παγκόσμιο εμπορικό στόλο.

Είναι αποδεδειγμένο, μετά από σχεδόν μισό αιώνα εφαρμογής των γεννητριών άξονα, ότι μπορούν να προσφέρουν πολύπλευρα οφέλη. Κριτήριο σωστής αξιοποίησης ενός τέτοιου συστήματος και των πλεονεκτημάτων του, είναι η κατάλληλη επιλογή τεχνολογίας και η σωστή διαστασιολόγηση κύριας μηχανής και γεννήτριας, για τις ανάγκες κάθε πλοίου. Τα μειονεκτήματα έτσι, ελαχιστοποιούνται και η επένδυση μπορεί να αποδειχθεί εξαιρετικά πετυχημένη.

Αυτή η διπλωματική εργασία μελετά την ενσωματωμένη γεννήτρια άξονα σε έναν πραγματικό δεξαμενόπλοιο τύπου PRODUCT/CHEMICAL carrier. Το υπό μελέτη δεξαμενόπλοιο περιλαμβάνει ένα τετράχρονο μεσόστροφο κινητήρα με MCR 6300kW και σύγχρονη γεννήτρια άξονα με δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος 1500 kW. Η γεννήτρια άξονα, μετά από μετατροπή στον ηλεκτρικό ισολογισμό, παρουσιάζει πολύ χαμηλό βαθμό φόρτισης με αποτέλεσμα να υπάρχει περίσσεια ισχύος και η κύρια μηχανή να μην αποδίδει στα επιθυμητά όρια, για βελτιστοποίηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Η διπλωματική επικεντρώθηκε στους τρόπους αξιοποίησης της περίσσειας ισχύος εξετάζοντας λοιπόν τρία σενάρια.

Για την μελέτη του συστήματος λήφθηκαν υπόψη το σχέδιο ηλεκτρικού ισολογισμού του πλοίου, το προφίλ λειτουργίας και τα εγχειρίδια λειτουργίας της κύριας και των βοηθητικών μηχανών, αλλά και της γεννήτριας άξονα.

Η εγκατάσταση διάταξης πακέτου μπαταριών, χωρητικότητας 5.0MWh, μελετήθηκε ως επιλογή για την αποθήκευση της περίσσειας ισχύος κατά την πλεύση. Ωστόσο, το υψηλό κόστος επένδυσης κεφαλαίου \$685,000.00, και η μερική κάλυψη των αναγκών σε ισχύ λόγω των αυξημένων απαιτήσεων ηλεκτρικού φορτίου του πλοίου στο λιμάνι και στη διαχείριση του φορτίου, σήμαιναν ότι δεν μπορούσε να δημιουργήσει επαρκή απόσβεση και εξοικονόμηση πόρων. Επομένως, μελετήθηκε η εγκατάσταση μικρότερου πακέτου μπαταριών (2.1MWh) και η αξιοποίηση του σε κατάσταση ελιγμών, η οποία έχει μικρότερη διάρκεια και συνεπώς λιγότερες απαιτήσεις σε ηλεκτρικό φορτίο. Μετά από διερεύνηση στα αποτελέσματα της κατανάλωσης καυσίμου, παρουσιάζεται εξοικονόμηση 2.54 τόνων καυσίμου ετησίως. Παρ' όλ' αυτά, με το αρχικό κόστος αγοράς των μπαταριών υπολογίζεται στα \$300,000.00, για την συγκεκριμένη εφαρμογή και έτσι η εξοικονόμηση καυσίμου δεν είναι επαρκής.

Με την μελέτη διακοπής της λειτουργίας του συστήματος και αντικατάστασης του από τις υπάρχοντες βοηθητικές γεννήτριες, αποδείχθηκε πως είναι δυνατή η εξοικονόμηση 9,68 τόνων καυσίμου ετησίως (\$6,682.0) και η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 29,3 τόνους (\$1,611.0). Γεγονός που προβληματίζει καθώς η εξοικονόμηση καυσίμου και η μείωση εκπομπών αποτελούν τα σημαντικότερα οφέλη που μπορεί να προσφέρει η γεννήτρια άξονα, και επιβεβαιώνει την κακή διαστασιολόγηση του συστήματος που παρατηρήθηκε. Ωστόσο, λόγω των περισσότερων ωρών λειτουργίας των βοηθητικών γεννητριών και του χαμηλού κόστους συντήρησης του συστήματος PTO, υπολογίζεται ετήσια εξοικονόμηση \$47,707.0. Έτσι, το παρόν σενάριο θα αποβεί ζημιογόνο στην πλοιοκτήτρια εταιρεία παρά την εξοικονόμηση πόρων.

Η εγκατάσταση συστήματος ναυτικής πλυντρίδας κλειστού βρόγχου, ισχύος 190kW, που εξετάσθηκε στη συνέχεια για την εκμετάλλευση της περίσσιας ισχύος της αξονικής γεννήτριας, αποδείχθηκε, από οικονομικής άποψης, ότι μπορεί να γίνει κερδοφόρα. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των καταναλώσεων καυσίμου και λιπαντικών για κάθε κατάσταση πλεύσης. Όσον αφορά τα καύσιμα παρόλο που καταναλώνονται 679 τόνοι περισσότερου καυσίμου με την εγκατάσταση scrubber, λόγω της χαμηλότερης τιμής του HFO σε σχέση με το MDO (μέσος όρος τιμής καυσίμων 20 λιμανιών σε περίοδο τριών ετών Σεπ 2019 – Σεπ 2022), εξοικονομούνται \$971,344.29 ετησίως. Ενώ όσον αφορά τα λιπαντικά λόγω της χρήσης HFO είναι αναγκαία η χρήση λιπαντικού με υψηλότερο δείκτη BN, το οποίο έχει επιπλέον κόστος \$13,337.71 ετησίως. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν τα λειτουργικά έξοδα και κόστος εγκατάστασης του συστήματος, στα \$507,365.78 και \$2,000,000.00 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της μελέτης αξιολογήθηκαν με βάση τους δείκτες NPV και DPP για επένδυση διάρκειας 10 ετών και αποδείχθηκε ότι, με βάση τα δεδομένα της αγοράς, η επένδυση γίνεται κερδοφόρα το 5^ο έτος και μπορεί να προσφέρει συνολικό κέρδος περίπου 1.6M\$.

6.1 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Με βάση αυτή τη Διπλωματική Εργασία γεννιούνται πολλές ιδέες για περαιτέρω έρευνα:

- α) Οι μπαταρίες ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας θα μπορούσαν να ερευνηθούν περαιτέρω προκειμένου να ανταποκρίνονται καλύτερα στις ηλεκτρικές ανάγκες του πλοίου και να χρησιμοποιούν πιο αποτελεσματικά και για περισσότερη διάρκεια την περίσσεια ισχύος.
- β) Το προφίλ λειτουργίας του πλοίου θα μπορούσε να ερευνηθεί περαιτέρω ώστε να βρεθεί το ιδανικό φορτίο κύριας μηχανής του πλοίου και η ισοδύναμη ταχύτητα του πλοίου ανά κατάσταση που θα οδηγούσε σε καλύτερη εξοικονόμηση καυσίμου.
- γ) Να εξεταστεί η επίδραση της αξονικής γεννήτριας στο δείκτη CII (Carbon Intensity Indicator).
- δ) Να εξεταστεί η λειτουργία της κύριας μηχανής με εναλλακτικά καύσιμα.
- ε) Να γίνει μελέτη του εγκατεστημένου συστήματος αξονικής γεννήτριας σε λειτουργία PTI (Power Take In)
- στ) Η μετασκευή εγκατάστασης ενός Scrubber να ελεγχθεί ως προς την επάρκεια χώρου, το βάρος, την ευστάθεια, την αντίσταση και την αντοχή.

7 Βιβλιογραφία

- [1] ABB, 2022. High efficiency ABB permanent magnet shaft generator solutions. *Towards an energy efficient future for shipping*, FEB.
- [2] ABS, 2018. ABS ADVISORY ON EXHAUST GAS SCRUBBER SYSTEMS. In: s.l.:s.n.
- [3] AEM Dessau GmbH, 2011. *Three-phase synchronous generators - Catalogue*. s.l.:s.n.
- [4] ALFA LAVAL, 2022. *PureSOx*. [Online] Available at: <https://www.alfalaval.it/prodotti/soluzioni-di-processo/soluzioni-di-tutela-ambientale/puresox/>
- [5] Anderson, D. L., 2009. *AN EVALUATION OF CURRENT AND FUTURE COSTS FOR LITHIUM-ION BATTERIES FOR USE IN ELECTRIFIED VEHICLE POWERTRAINS*, s.l.: Duke University.
- [6] Andersson, K., Jeong, B. & Jang, H., 2020. Life Cycle and Cost Assessment of a Marine Scrubber Installation. *Journal of International Maritime Safety*, pp. 162-176.
- [7] Bailey, D. & Solomon, G., 2004. Environmental Impact Assessment Review 24 (7-8). In: *Pollution prevention at ports: clearing the air..* s.l.:s.n., pp. 749-774.
- [8] Bakirtzoglou, 2017. *Techno-economical feasibility study on the retrofit of double ended Ro/Pax ferries into battery-powered ones*. Athens: SNAME NTUA.
- [9] BloombergNEF, 2021. *Annual battery price survey*. [Online] Available at: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>
- [10] CARB, 1998. *Draft Diesel Exposure Assessment. A-7..* s.l.:California Air Resources Board .
- [11] CARB, 2003. *Draft State and Federal Element of South Coast State Implementation Plan. II-F*, s.l.: California Air Resources Board.
- [12] CHEVRON, 2020. The 2020 global sulphur cap and the role of cylinder oil lubricants. *marine lubricants*.
- [13] DNV GL, 2018. Global Sulphur Cap 2020. In: *Marine Engineering*. s.l.:s.n., pp. 53(1), 48-55.
- [14] DNV GL, 2020. *Tanker, Fit for the future*. [Online] Available at: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Fit-for-the-future.html#:~:text=Chapter%2017%20of%20the%20IBC,on%20toxicity%2C%20heat%20sensitivity%2C%20water>
- [15] DNV, 2013. Additional Rules and Guidelines, Energy Efficiency, Guidelines for Determination of the Energy Efficiency Design Index. In: *Rules for classification and construction*. s.l.:s.n.
- [16] DNV, 2021. *EEXI Overview- Implementation*. [Online] Available at: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/eexi/implementation.html>
- [17] EMSA, 2021. Study on Electrical Energy Storage for Ships. *Battery systems for maritime applications*.
- [18] Facilities Net, 2002. *Exploring New Technologies*. [Online] Available at: <https://www.facilitiesnet.com/powercommunication/article/Onsite-Options--1679>
- [19] Farag, M., 2013. Lithium-Ion Batteries: Modelling and State of Charge Estimation.

- [20] Hoogeveen, R., 2017. Filtration+ Separation. In: *Record breaking marine scrubber installed on ship..* s.l.:s.n., pp. 18-20.
- [21] ICS, 2014. Shipping, World Trade and the Reduction of CO₂. *International Chamber of Shipping* .
- [22] IMO, 2019. Cutting sulphur oxide emissions. *IMO 2020*.
- [23] IMO, 2020. *International Code for the Construction and Equipment of Ships carrying Dangerous Chemicals in Bulk (IBC Code)*. [Online] Available at: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/IBCCode.aspx>
- [24] IMO, 2022. [Online] Available at: www.imo.org
- [25] Kattner L., M.-Ü.B. et al., 2015. *Monitoring compliance with sulfur content regulations of shipping fuel by in situ measurements of ship emissions*. s.l.:s.n.
- [26] Lahtinen, J., 2016. Closed-loop Exhaust Gas Scrubber Onboard a Merchant Ship-Technical. *Economical, Environmental and Operational Viewpoints*.
- [27] Lindstad, E. & Bø, T. I., 2018. Potential power setups, fuels and hull designs capable of satisfying future EEDI requirements. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Norway: s.n., pp. 276-290.
- [28] MAN B&W, 2020. Basic Principles of ship propulsion. *MAN Energy Solutions*.
- [29] MAN D&T, 2014. L23/30H Project Guide - Marine. *Four-stroke GenSet compliant with IMO Tier II*.
- [30] MAN Diesel & Turbo, 2012. Shaft Generators Power Take Off from the Main Engine. *Engine Shaft Power Main Generator Gear System*.
- [31] MAN Diesel & Turbo, 2016. Flexibility and maximum efficiency optimally combined. *Hybrid Propulsion*.
- [32] MAN Diesel&Turbo, 2020. Shaft generators for low speed main engines.
- [33] MAN Energy Solutions, 2014. Introducing MAN L23/30H GenSet.
- [34] MAN Energy Solutions, 2021. Shaft generators for low speed main engines.
- [35] MEPC, 2022. *IDENTIFICATION AND PROTECTION OF SPECIAL AREAS, ECAs AND PSSAs*. s.l., IMO.
- [36] ODELY, 2012. *16,500DWT PRODUCT/CHEMICAL IMO II TANKER*. [Online] Available at: <http://en.odely.com/product/122.html>
- [37] Panasiuk, I. & T. L., 2015. The evaluation of investments efficiency of SO_x scrubber installation.. In: *Transportation Research Part D*. s.l.:s.n., pp. 87-96.
- [38] Paulsrud, H., 2015. A Practical Guide to Wärtsilä Scrubber Systems. *Journal of the JIME50*, pp. 40-42.
- [39] Pavlou, I., 2005. Analysis of a Ship Electric Power Plant with Shaft Generator. *SNAME, NTUA*.
- [40] Pavlou, I. et al., 2005. Studying ship electric energy systems. pp. 156-162.
- [41] Port of Long Beach, 2010. 2009 Air Emissions Inventory.
- [42] Prousalidis, J., 2015. Electrotechnology Lectures. *SNAME, NTUA*.
- [43] Prousalidis, J. et al., 2012. Exploiting shaft generators to improve ship efficiency. *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*.
- [44] Reynolds, K. et al., 2011. Exhaust Gas Cleaning Systems Selection Guide. In: *Ship Operations Cooperative Program (SOCP)*. s.l.:s.n., pp. Rev. A, 154.
- [45] Sarigiannidis, A. G., Chatzinikolaou, E. & Patsios, C., 2016. Shaft Generator System Design and Ship Operation Improvement Involving SFOC Minimization. *Electric Grid Conditioning, and Auxiliary Propulsion*.
- [46] Ship & Bunker, 2022. *Global 20 Ports Average*. [Online] Available at: <https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-g20-global-20-ports-average#MGO>
- [47] Souflis - Rigas, A., 2021. Assessing the implementation of Shaft Generators (PTO) onboard LNG carriers. Issue NTUA.

- [48] Stanley, B., 2007. *Shipping industry faces rough seas over role in air pollution*. s.l.:The Wall Street Journal..
- [49] Statista, 2021. *CARBON TAXES, How the World Puts a Price on Carbon*. [Online] Available at: <https://www.statista.com/chart/17095/highest-carbon-taxes-in-the-world/>
- [50] Stavrakakis, G., 2010. *Energy Storage Systems*. s.l.:TUC.
- [51] Venn, F., 2002. *The Oil Crisis*. 1st Edition ed. London: Routledge.
- [52] West Texas Intermediate, 2022. *Crude Oil Prices*, Cushing, Oklahoma: s.n.
- [53] WINGD, 2019. 2020 IMO global 0.50 percent fuel sulphur regulation. *WinGD operation guideline*.
- [54] Yang, Z. L. Z. D. C. O. J. I. D. B. S. W. J. H. M., 2012. Selection of techniques for reducing shipping NO_x and SO_x emissions. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. s.l.:s.n., pp. 478-486.
- [55] Αθ.Φραγκόπουλος, Χ. & Προυσαλίδης, Ι., 2005. *Ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις Πλοίου*. Τεύχος Α ed. Αθήνα: ΕΜΠ.
- [56] IMO, 2012. *Resolution MEPC.212(63): 2012 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained EEDI for new ships*, s.l.: s.n.
- [57] IMO, 2014. *Third IMO GHG study*, London: International Maritime Organization.
- [58] Κοτρίκλα, Α.-Μ., 2015. Ατμοσφαιρική ρύπανση από τη ναυτιλία. In: *Ναυτιλία και περιβάλλον*. s.l.:s.n., pp. 143-180.
- [59] Λουκάκης, Θ., 2016. *Εφαρμοσμένη Πρόωση Πλοίου, Επιλογή Κύριας Μηχανής*. Α΄ Έκδοση ed. Αθήνα: ΕΜΠ.
- [60] ΜΑΚ, 2012. *M43C Project guide*. s.l.:Caterpillar Motoren GmbH & Co. KG.
- [61] Μάλλης, Ε., 2019. *Διερεύνηση Θεμάτων Κάλυψης Ενεργειακών Αναγκών*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- [62] Παπαχαριζάνος, Θ. Μ., 2020. *Διερεύνηση επένδυσης εγκατάστασης ναυτικής πλυντρίδας σε πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- [63] Πιτταράς, Α.-Δ., 2012. *Σχεδιασμός και μελέτη ηλεκτρογεννήτριας συνδεδεμένης στο αξονικό σύστημα πλοίου*. Αθήνα: s.n.
- [64] Πολίτη, Γ. Κ., 2018. *ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΩΣΗ ΠΛΟΙΟΥ*. 5η Έκδοση ed. Αθήνα: ΕΜΠ.
- [65] Προμπονάς, Γ., 2021. *Διερεύνηση αξιοποίησης συστημάτων αξονικών γεννητριών (PTI/PTO) σε δεξαμενόπλοια τύπου VLCC*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- [66] Πυργολιός, Π., 2014. *Μελέτη Δίχρονου Ναυτικού Κινητήρα σε Μερικά Φορτία και Διερεύνηση της Επίδρασης που έχει η Αποκοπή Υπερπληρωτή*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- [67] ΨΑΡΑΥΤΗΣ, Χ. Ν., 2005. *ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ Ι*. Αθήνα: ΕΜΠ.