



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής
Σχεδίασης και Παραγωγής

&

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ**

Τμήμα Ναυτιλίας και
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών



ΔΙΑΔΥΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ»

ΤΙΤΛΟΣ

ΑΣΦΑΛΕΣΤΕΡΑ ΠΙΟ ΕΞΥΠΝΑ ΚΑΙ ΠΡΑΣΙΝΑ ΠΛΟΙΑ

ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ

ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

SAFETY SMART AND GREEN BOATS USING HYBRID

TECHNOLOGY

Όνοματεπώνυμο Σπουδαστή:

ΜΠΑΡΔΗΣ ΠΕΤΡΟΣ

Όνοματεπώνυμο Υπεύθυνου Καθηγητή:

Δρ. ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ

ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2021

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής

ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ

ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΝΙΚΗΤΑΚΟΣ ΝΙΚΗΤΑΣ

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/Η κάτωθι υπογεγραμμένος Μπάρδης Πέτρος του Ανδρέα, με αριθμό μητρώου 122. φοιτητής του Διϊδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής της Σχολής Μηχανικών Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο δηλών

ΜΠΑΡΔΗΣ ΠΕΤΡΟΣ

Ημερομηνία

02/07/2021



**ΑΣΦΑΛΕΣΤΕΡΑ ΠΙΟ ΕΞΥΠΝΑ ΚΑΙ ΠΡΑΣΙΝΑ ΠΛΟΙΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ
ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**

ΜΠΑΡΔΗΣ ΠΕΤΡΟΣ

Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του Διϋδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο ναυτιλιακός τομέας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια οικονομία και ανάπτυξη αλλά επιφέρει και σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση για αυτό ο σχεδιασμός των πράσινων πλοίων έχει λάβει σημαντική προσοχή με στόχο τη μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και με τη συμμόρφωση στους αυστηρούς κανονισμούς όπου έχει θεσπίσει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) αποδίδοντας δείκτης ενεργειακής αποδοτικότητας σχεδιασμού (EEDI), με στόχο τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (GHG). Η υβριδική τεχνολογία πρόωσης με την χρήση ηλεκτρική ισχύος και κυψελών καυσίμων ηλεκτρική ισχύς θεωρούνται υποψήφιοι για χρήση λόγω της υψηλής απόδοσης, των χαμηλότερων εκπομπών, χαμηλότερη συντήρηση και αθόρυβη λειτουργία. Αυτή η έρευνα πρώτον στοχεύει στη διερεύνηση της χρήσης υβριδικής πρόωσης σε συστήματα για θαλάσσια πρόωση που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου ως κύρια πηγή ισχύος σε συνεργασία με σύστημα αποθήκευσης ενέργειας τις μπαταρίες.

Ακόμη Με την χρήση της Μαθηματική μοντελοποίηση μέσω του Sim Power Systems θα μελετηθούν τα μπλοκ κυψελών καυσίμου και μπαταρίας, μετατροπέων DC-DC προκειμένου να επιλεγεί το κατάλληλο σύστημα σε υβριδική πρόωση.

Για τα συστήματα υβριδικών κυψελών καυσίμου, ο σχεδιασμός μιας κατάλληλης στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας είναι απαραίτητο για τον σωστό χειρισμό της απαιτούμενης κατανομής ισχύος μεταξύ της κυψέλης καυσίμου και συστημάτων μπαταριών. Αυτή η έρευνα στοχεύει στην ανάπτυξη και επιλογή του κατάλληλου συστήματος διαχείρισης ενέργειας (EMS) χρησιμοποιώντας και συγκρίνοντας τις πιο κοινές στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας. Αυτή η βελτίωση έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της λειτουργίας των κυψελών καυσίμου και κατανάλωση υδρογόνου και της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.

Λέξεις Κλειδιά:

IMO Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός

GHG Αερίων Θερμοκηπίου

EEDI Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης

EMS Σύστημα Ενεργειακής Διαχείρισης

ABSTRACT

The shipping sector plays an important role in the global economy and growth but also carries a significant environmental burden, so the design of green ships has received considerable attention in order to reduce the negative environmental impact and to comply with the strict regulations adopted by the International Atomic Energy Agency. (IMO) by assigning a design energy efficiency index (EEDI), aimed at reducing greenhouse gases (GHG). Hybrid propulsion technology using electric power and electric fuel cell cells are considered candidates for use due to high efficiency, lower emissions, lower maintenance and quiet operation. This research first aims to investigate the use of hybrid propulsion in marine propulsion systems that use fuel cells as the main power source in conjunction with a battery energy storage system.

Also, With the use of Mathematical modeling through Sim Power Systems will be studied the fuel cell and battery blocks, DC-DC converters in order to select the appropriate system in hybrid propulsion.

For hybrid fuel cell systems, the design of an appropriate energy management strategy is necessary to properly handle the required power distribution between the fuel cell and battery systems. Also, this research aims to develop and select the appropriate energy management system (EMS) using and comparing the most common energy management strategies. This improvement results in the minimization of fuel cell operation and hydrogen consumption and overall energy consumption.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μπάρδης Πέτρος, του Ανδρέα, με αριθμό μητρώου 122 φοιτητής του Δίδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Τμήματος «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής πριν αναλάβω την εκπόνηση της Διπλωματικής Διατριβής μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

Η Διπλωματική Διατριβή (Δ.Δ.) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και των Ιδρυμάτων και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Δ.Δ., ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που του έχει απονεμίσει ο μεταπτυχιακός τίτλος, αυτός ανακαλείται με απόφαση της ΕΔΕ του ΠΜΣ. Η Ε.Δ.Ε. με νέα απόφασης της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση της Δ.Δ. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού βμήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στον Κανονισμό Λειτουργίας του Π.Μ.Σ..

Ο Δηλών
ΜΠΑΡΔΗΣ ΠΕΤΡΟΣ

Ημερομηνία
19/6/2021



PREFACE

Firstly, I would like to thank my supervisor, Dr. Nikolaou Gregory, for his priceless guidance and his excellent coaching. Also, very special thanks to my partner and my mother for their patience and their constant support. Finally, I want to devote this work to my pass-away father without his help I could not have achieved anything.

Secondly, I want to thank my family, especially my parents, for their encouragement, prayers and sacrifice throughout my life. My lovely wife, I am so blessed of having you and I would like to thank you for your care, support, and being there during all the ups and downs I have been through. Furthermore, thanks to all my friends of the postgraduate programmed. Finally, I wish to thank the Univeristy of for the financial support of my study and all the members of the Electrical & Electronic Engineering department at my home university, for allowing me to grow as an academic researcher

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Συντελεστής περιεκτικότητας σε μάζα (2.2.1).....	35
Πίνακας 2.2 Τεχνολογίες για μειώσεις EEDI και μέτρα σχετικά με το SEEMP (2.22)	39
Πίνακας 4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ Τύποι Υβριδικών[4.3,49,4.5,4.7]	47
Πίνακας 4.2 EMS Φόρτιση μπαταρίας [4.33]	59
Πίνακας 5.1 Πιθανές διαμορφώσεις συστημάτων υβριδικής αποθήκευσης ενέργειας (HESS) [5.4]	64
Πίνακας 5.2 Έλεγχος και βελτιστοποίηση του ηλεκτρικού πλοίου. Συστήματα πρόωσης με υβριδική ενέργεια, Jun. Hou, University of Michigan 2017. [5.11].....	66
Πίνακας 6.1 Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών εφαρμογών του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (ESS). [6.2].	69
Πίνακας 6.2 Επιτρεπόμενη συχνότητα και τάση σύμφωνα με το IEC 60092-101 στα μικροσυστήματα του πλοίου.....	73
Πίνακας 6.3 [6.13]	76
Πίνακας 0.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	82
Πίνακας 7.2 Σύγκριση είδη μπαταριών [7.8,7.9].....	81
Πίνακας 7.3 Energy density and cost per battery type [7.23].....	85
Πίνακας 8.1 Τύποι κυψέλων [8.6]	98
Πίνακας 8.2 Συμπιεσμένη πυκνότητα ενέργειας υδρογόνου σε σύγκριση με ιόντα λιθίου και μπαταρίες μόλυβδού-οξέος [8.23] α) Αποθήκευσης Ενέργειας κατά πυκνότητας ενέργειας και β) Αποθήκευση Ενέργειας κατά βάρος	104
Πίνακας 9.1 Βάρος υδρογόνου για διάφορες εφαρμογές.[9.5,9.6].....	122
Πίνακας 9.2 Καταστάσεις EMS [9.19].....	129

ΛΙΣΤΑ ΣΧΕΔΙΩΝ

ΣΧΗΜΑ 2.1 Ανάπτυξη του διεθνούς ναυτιλιακού εμπορίου [2.1]	29
ΣΧΗΜΑ 2.2 Μέγεθος του παγκόσμιου στόλου κατά αριθμό πλοίων: 1900-2010 [2.2].	30
ΣΧΗΜΑ 2.3 Συνολική κατανάλωση καυσίμων αποστολής [2.3].	31
ΣΧΗΜΑ 2.4 Παγκόσμια ζήτηση ενέργειας από καύσιμα (εκατομμύρια τόνους ισοδυνάμου πετρελαίου) [2.4].	32
ΣΧΗΜΑ 2.5 Ευρώπη Brent spot τιμή FOB [2.5].	32
ΣΧΗΜΑ 2.6 Εκπομπές CO ₂ από τη διεθνή δεξαμενή θαλάσσης (IEA) [1.7].	33
ΣΧΗΜΑ 2.7 ECAs περιοχές όπως ορίζονται	36
ΣΧΗΜΑ 4.1 Τυπική υβριδική αρχιτεκτονική σειρών [4.6]	45
ΣΧΗΜΑ 4.2 Τυπική παράλληλη υβριδική αρχιτεκτονική [4.6].....	46
ΣΧΗΜΑ 4.3 Nemo H2 Amsterdam [4.6]	49
ΣΧΗΜΑ 4.4 Hybrid TUG RT Adrian [4.18].....	50
ΣΧΗΜΑ 4.5 Το Bat Club [4.17].....	51
ΣΧΗΜΑ 4.6 Αρχιτεκτονική συστημάτων πρόωσης κυψελών καυσίμου (η λεζάντα πάει στο κάτω μέρος της εικόνας και με 10αρια γράμματα και λάθος αρίθμηση) (α) Σειριακό υβριδικό Σύστημα Ηλεκτρικής Πρόωσης και β) Παράλληλο υβριδικό Σύστημα Ηλεκτρικής Πρόωσης.....	56
ΣΧΗΜΑ 4.7 Χρήση κυψελών καυσίμων στην Ναυτιλία με διαφορετικές πηγές ενέργειας [4.30]	57
ΣΧΗΜΑ 5.1 Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας, [5.1]	60
ΣΧΗΜΑ 5.2 (α) Τεχνολογική εξέλιξη και (β) Αποδοτικότητα διαφορετικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (5.3)	62
ΣΧΗΜΑ 5.3 Διάγραμμα : Σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [5.4].	63
ΣΧΗΜΑ 5.4 Είδη μέσων αποθήκευσης ενέργειας [5.11]	65
ΣΧΗΜΑ 6.1 Εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας και χρονισμοί εκφόρτωσης τους. 'Energy Storage Systems for Shipboard Microgrids. , Aalborg University, December 2018 [6.1].....	68

ΣΧΗΜΑ 6.3 Εφαρμογή ESS για ξυρίσματος κορυφής και ισοστάθμιση φορτίου. [6.5].	71
ΣΧΗΜΑ 6.4 Εξομάλυνση ισχύος με χρήση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας.[6.6].	72
ΣΧΗΜΑ 6.5 Ενσωμάτωση του BESS με ενσωματωμένα συστήματα ισχύος (IPS) [6.9].	74
ΣΧΗΜΑ 6.6 FESS Σύστημα [4.14].	77
ΣΧΗΜΑ 7.1 Πυκνότητα Ισχύος Μπαταρίας. [7.31]	87
ΣΧΗΜΑ 7.2 Δομή ενός Υπερ.- Πυκνωτή.	92
ΣΧΗΜΑ 7.3 Πλοίο Ar Vag Tredan [7.48].	94
ΣΧΗΜΑ 8.1 Αρχιτεκτονική συστημάτων πρόωσης κυψελών καυσίμου [8.1].	96
ΣΧΗΜΑ 8.2 Βασική κατασκευή ανόδου από ηλεκτρολυτική κάθοδο μιας κυψέλης καυσίμου [8.4].	97
ΣΧΗΜΑ 8.3 Εφαρμογές κυψελών καυσίμου [8.17]	107
ΣΧΗΜΑ 8.4 Ισχύς κυψελών καυσίμου ανά είδος εφαρμογής (8.17).	107
ΣΧΗΜΑ 8.6 Ετήσιος αριθμός έργων κυψελών καυσίμου.	115
ΣΧΗΜΑ 9.1 Ηλεκτρικό ισοδύναμο κυψέλης καυσίμου [9.1].	120
ΣΧΗΜΑ 9.2 Χρόνος απόκρισης κυψελών καυσίμου.	121
ΣΧΗΜΑ 9.3 Διάγραμμα μπλοκ μετατροπέα DC-DC.	123
ΣΧΗΜΑ 9.4 Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου μπαταρίας [9.13]	124
ΣΧΗΜΑ 9.5 Classical PI control energy management strategy [17].	131
ΣΧΗΜΑ 9.6 Βελτιωμένο PI EMS	132
ΣΧΗΜΑ 9.8 Χρήση Fuel Cell συνάρτηση ισχύος μπαταρίας.	134
ΣΧΗΜΑ 9.9 Λειτουργία αποφόρτισης και φόρτωσης στην διάρκεια ενός ταξιδιού	135
ΣΧΗΜΑ 9.10 EMS πολλαπλών σχεδίων.	136

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	10
ΛΙΣΤΑ ΣΧΕΔΙΩΝ.....	11
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	12
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ.....	14
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	27
2. ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	29
2.1 Σημασία της ναυτιλίας.....	29
2.2 Οικονομικές επιπτώσεις της ναυτιλίας.....	30
2.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ναυτιλίας.....	32
2.4 Κανονισμοί.....	34
2.4.1 ΕΕΟΙ.....	34
2.4.2 ECAs.....	35
2.4.3 Κωδικός θορύβου.....	37
2.5 Μέτρα EEDI / SEEMP.....	37
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	41
3.1 Ερευνητικά Ερωτήματα.....	41
4. ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ HYBRID PROPULSION	43
4.1 Υβριδική τεχνολογία - Hybrid systems.....	43
4.2 Πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής και υβριδικής προώθησης στο πλαίσιο του μικρού πλοίου.....	48
4.3 Παραδείγματα ηλεκτρικών και υβριδικών σκαφών.....	49
4.4 Ηλεκτρική πρόωση Υβριδικό Μοντέλο FUEL CELLS –BATERIES.....	54
4.5 Στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας EMS.....	58
5. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	60
5.1 Σύστημα Υβριδικής Αποθήκευσης Ενέργειας HESS.....	62
5.2 Energy Storage Devices for All-Electric Ships.....	64
6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣΣΕ MICROGRIDS-SHIPBORAD.....	67
6.1 Διαχείριση ενέργειας για τα ηλεκτρικά πλοία.....	69
6.2 Εξομάλυνση Ισχύος.....	71
6.3 Διακυμάνσεις συχνότητας και τάσης.....	72

6.4	Ποιότητα ισχύος.....	74
6.5	Προκλήσεις της ενσωμάτωσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας στα μικροστοιχεία του πλοίου.....	77
7.	ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ BATTERIES.....	80
7.1	Εισαγωγή στις Μπαταρίες.....	80
7.2	Super Capacitors Υπέρ πυκνωτές.....	91
8.	ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	95
8.1	Fuel Cells Κύτταρα Καυσίμου.....	96
8.2	Πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου.....	99
8.3	Μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου.....	100
8.4	Εφαρμογές κυψελών καυσίμου.....	101
8.5	Περίληψη 8 ^{ov} .Κεφαλαίου.....	115
9.	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	118
9.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	118
9.2	FUEL CELLS.....	118
9.3	DC-DC CONVERTER.....	122
9.4	BATTERY.....	123
9.5	MOTOR.....	126
9.6	ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	127
9.7	Περίληψη Κεφαλαίου.....	136
10.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	138
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	141

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

- AC: Alternating Current Εναλλασσόμενο ρεύμα
- AFC: Alkaline Fuel Cell Κυψέλη αλκαλικών καυσίμων
- AES All electric ships. Όλα τα ηλεκτρικά του πλοίου
- BESS Battery energy storage system σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας
- CO: Carbon Monoxide Μονοξείδιο του άνθρακα
- CO2: Carbon Dioxide Διοξείδιο του άνθρακα
- CODLOD: Combined Diesel Electric or Diesel Συνδυασμός Diesel μηχανή με Electric μηχανή.
- DC: Direct Current Συνεχές Ρεύμα
- DP Dynamic positioning Δυναμική τοποθέτηση
- ECAs: Emission Control Areas Ελεγχόμενες Περιοχές εκπομπών
- EEDI: Energy Efficiency Design Index Δείκτης σχεδιασμού ενεργειακής απόδοσης.
- EEOI: Energy Efficiency Operational Indicator Λειτουργικός δείκτης ενεργειακής απόδοσης.
- EMS: Energy Management Strategy Στρατηγική διαχείρισης ενέργειας.
- ESS Energy storage system Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.
- EU: European Union Ευρωπαϊκή Ένωση
- FC Fuel Cell. Κυψέλες καυσίμου
- FESS Flywheel energy storage system. Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας Flywheel
- GHG: Greenhouse Gases Αέρια θερμοκηπίου
- HESS Hybrid energy storage system. Σύστημα αποθήκευσης υβριδικής ενέργειας.
Ενσωματωμένο σύστημα τροφοδοσία
- IEA: International Energy Agency Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας
- IMO: International Maritime Organisation Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός
- IPS Integrated power system Ενσωματωμένο σύστημα τροφοδοσία
- ISO: International Organization for Standardization Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης
- LNG: Liquids Natural Gas Υγρά Φυσικό Αέριο
- LPG: Liquids Petroleum Gas Υγρά πετρελαϊκά αέρια
- MARAD: Maritime Administration Ναυτιλιακή διοίκηση

MARPOL: Marine Pollution Θαλάσσια ρύπανση

MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell κυψέλη καυσίμου από ανθρακικό άλας

MDO: Marine Diesel Oil Ναυτιλιακό Καύσιμο

MEPC: Marine Environmental Protection Committee Επιτροπή προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος

MVDC Medium voltage direct current. Μεσαία τάση συνεχούς ρεύματος

NOx: Nitrogen Oxides Οξειδία του αζώτου

PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell Φωσφορική Κυψέλη Καυσίμου

PEM Polymer exchange membrane Μεμβράνη ανταλλαγής πολυμερούς

PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής τύπου Proton

SECA: Sulphur Emission Control Area Περιοχή ελέγχου εκπομπών θείου

SEEMP: Ship Energy Efficiency Management Plan Σχέδιο διαχείρισης ενεργειακής απόδοσης πλοίου

SFC: Specific Fuel Consumption Ειδική κατανάλωση καυσίμου

SMES Superconducting magnetic energy storage. Υπεραγωγική μαγνητική αποθήκευση ενέργειας

SPS Sim Power Systems Matlab Tool Box Εργαλειοθήκη SimPowerSystem
MATLAB

SO2: Sulphur Dioxide Διοξείδιο του θείου.

SOC State of Charge Κατάσταση Φόρτωσης

SOFC: Solid Oxide Fuel Cell Κυψέλη στερεών οξειδίων

VSD Variable speed drives Μεταβλητές ταχύτητες

UNCTAD: The United Nations Conference on Trade and Development Η Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το εμπόριο και την ανάπτυξη

UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change Σύμβαση-πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την αλλαγή του κλίματος

UPS Uninterruptible power supply. Αδιάλειπτη τροφοδοσία ρεύματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο ναυτιλιακός τομέας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην Ευρώπη δημιουργώντας θέσεις εργασίας, ανάπτυξη και σύνδεση της ηπείρου με τον υπόλοιπο κόσμο. Η ανταγωνιστικότητα του τομέα είναι μείζονος σημασίας τόσο για την ευρωπαϊκή οικονομία όσο και για την ανάπτυξή του. Οι ευρωπαϊκοί θαλάσσιοι λιμένες χειρίζονται το 74% των εμπορευμάτων που διαπραγματεύονται με τον υπόλοιπο κόσμο, ενώ αποτελούν βασικό στοιχείο για την προώθηση των θαλάσσιων μεταφορών μικρών αποστάσεων και τη μετακίνηση εμπορευμάτων από οδική σε θάλασσα. Μόνο ο τομέας των θαλάσσιων λιμένων απασχολεί άμεσα και έμμεσα 3 εκατομμύρια άτομα [1.1].

Για να παραμείνει ανταγωνιστικός, ο ευρωπαϊκός ναυτιλιακός τομέας θα πρέπει να στραφεί προς ένα σύγχρονο, καθαρό, αποτελεσματικό και συνδεδεμένο σύστημα κινητικότητας που θα προσφέρει την ελεύθερη κυκλοφορία ανθρώπων και αγαθών.

Η ελαχιστοποίηση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων του πλοίου έχει σαν στόχο την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων. Για το λόγο αυτό έχουν θεσπιστεί αυστηροί κανονισμοί από το Διεθνές Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) για τον έλεγχο των εκπομπών πλοίων. Μία από τις προτεινόμενες λύσεις είναι η υιοθέτηση υβριδικών συστημάτων για την μείωση του ενεργειακού δείκτη (EEDI) για να μπορούν τα πλοία για να συμμορφωθούν με τους νέους διεθνείς κανονισμούς [1,2], [1.3].

Στα υβριδικά συστήματα προτείνεται οι ενεργειακές κυψέλες (Fuel cells) σε συνεργασία με άλλες μορφές ενέργειας αποθήκευσης όπως οι μπαταρίες (Battery) να χρησιμοποιηθούν ως κύρια πηγή ενέργειας. [1.4].

Η παρουσία των κυψελών καυσίμου και των συστημάτων μπαταρίας απαιτεί από κοινού μια στρατηγική διαχείρισης ενέργειας (EMS) για την βελτίωση της ηλεκτρικής διαχείρισης του συστήματος.

Η ανάπτυξη και η επιλογή του κατάλληλου EMS είναι ένα βασικό ζήτημα για το υβριδικό συστήματα πρόωσης κυψελών καυσίμου ώστε να υπάρχει για σωστή διαχείρισης των απαιτούμενων ισχύς μεταξύ της κυψέλης καυσίμου και των συστημάτων μπαταρίας.

Ένα κατάλληλο υβριδικό σύστημα και ένα σωστό EMS μπορούν να επηρεάσουν τη δυναμική συμπεριφορά του υβριδικού συστήματος, την κατανάλωση καυσίμου, την αποδοτικότητα του συστήματος, το βάρος, το μέγεθος και διάρκεια ζωής των συστατικών του [1.5, 1.6]. Επομένως, έχουν γίνει προσπάθειες φτιάχτηκε για να διερευνήσει διαφορετικά EMS. Αυτές οι στρατηγικές μπορεί να στοχεύουν ελαχιστοποιήστε την κατανάλωση υδρογόνου [1.7], μεγιστοποιήστε την απόδοση των κυψελών καυσίμου ή συνολική απόδοση [1.8], να διατηρήσουν την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SOC) σε ένα ορισμένο επίπεδο [1.9,1.10,], ελαχιστοποιώντας το λειτουργικό κόστος [1.11] ή ελαχιστοποίηση του βάρους του υβριδικού συστήματος και μέγεθος [1.12].

Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη ενός κατάλληλου υβριδικού συστήματος και σύστημα διαχείρισης EMS για χρήση στην Ναυτιλία είναι ένα πολύ σημαντικό ερευνητικό θέμα [1.13,1.14], που θα προσπαθήσω να ερευνήσω σε αυτήν την διατριβή.

Σε αυτή την διατριβή θα προσπαθήσω να εξετάσω τα υβριδικά συστήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην Ναυτιλία και την εφαρμογή σε μικρά επιβατικά πλοία και σε Ferry boats. Ακόμη θα γίνει έρευνα στα διάφορα συστήματα διαχείρισης ενέργειας (EMS) που θα μπορούνε να επιλεγθούν σε σύστημα διαχείρισης ενέργειας (HESS).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

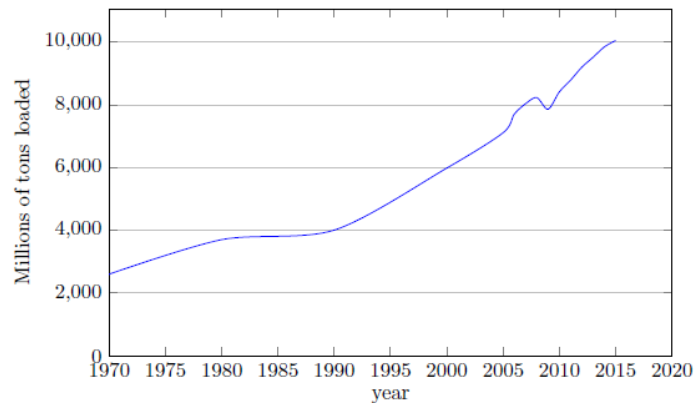
2. ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

2.1 Σημασία της ναυτιλίας

Σύμφωνα με τη Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το Εμπόριο και την Ανάπτυξη (UNCTAD), η ναυτιλία διαχειρίζεται το 80% του παγκόσμιου εμπορίου ,λόγω του συγκριτικά χαμηλού κόστους, της μεγαλύτερης ασφάλειας και της μεγαλύτερης δυναμικότητας από άλλα μέσα μεταφοράς

Η παγκόσμια ζήτηση για ενέργεια, πρώτων υλών αλλά και τροφίμων έχει αυξηθεί σε συνάρτηση με τον παγκόσμιο πληθυσμό ακόμη και την διασύνδεση των οικονομιών αυξάνουν τις θαλάσσιες μεταφορές

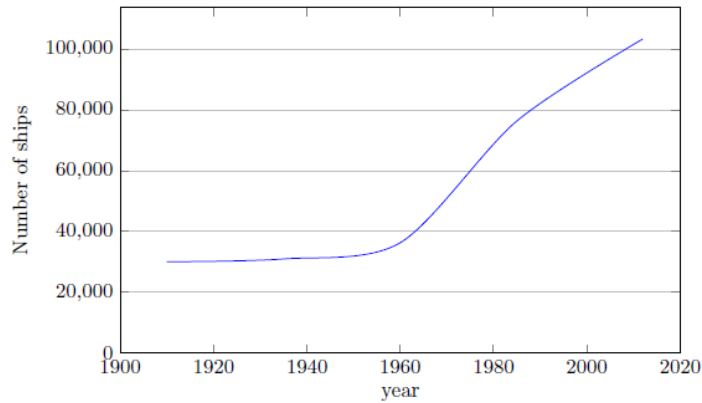
Η ανάπτυξη του διεθνούς ναυτιλιακού εμπορίου έχει αυξηθεί από 2605 εκατομμύρια τόνους το 1970 έως το 9842 εκατομμύρια τόνους το 2014, όπως φαίνεται στο σχήμα [2.1].



ΣΧΗΜΑ 0.1 Ανάπτυξη του διεθνούς ναυτιλιακού εμπορίου [2.1]

Η αύξηση του όγκου των φορτίων που πρόκειται να μεταφερθούν δια θαλάσσης συνέβαλε στην ανάπτυξη του μεγέθους και του αριθμού των πλοίων όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.

Για παράδειγμα, το μέσο μέγεθος πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων διπλασιάστηκε σε 20 χρόνια από 1250 TEU το 1990 σε 3064 ΣΕΕ στις αρχές του 2012 [2.3].



ΣΧΗΜΑ 0.2 Μέγεθος του παγκόσμιου στόλου κατά αριθμό πλοίων: 1900-2010 [2.2].

Η αύξηση των θαλάσσιων δραστηριοτήτων, ο αριθμός των πλοίων και το μέγεθός τους έχουν αρνητικές επιπτώσεις τόσο οικονομικές όσο και περιβαλλοντικές που προκαλούνται από τις εκπομπές πλοίων. Ακόμη η ενεργειακή απόδοση των συστημάτων πρόωσης πλοίων έχει αυξανόμενο ενδιαφέρον από ναυτιλιακές και κατασκευαστικές εταιρείες που ασχολούνται με τον ναυτιλιακό τομέα.

2.2 Οικονομικές επιπτώσεις της ναυτιλίας

Οι ναυτιλιακές βιομηχανίες και η ναυτιλία έχουν άμεσο σημαντικό αντίκτυπο στον τομέα οικονομίας.

Λόγω της αύξησης του μεγέθους και του αριθμού πλοίων, η παγκόσμια χρήση ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3 και δυστυχώς το μεγαλύτερο μέρος θα προέρχεται από ορυκτά καύσιμα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.

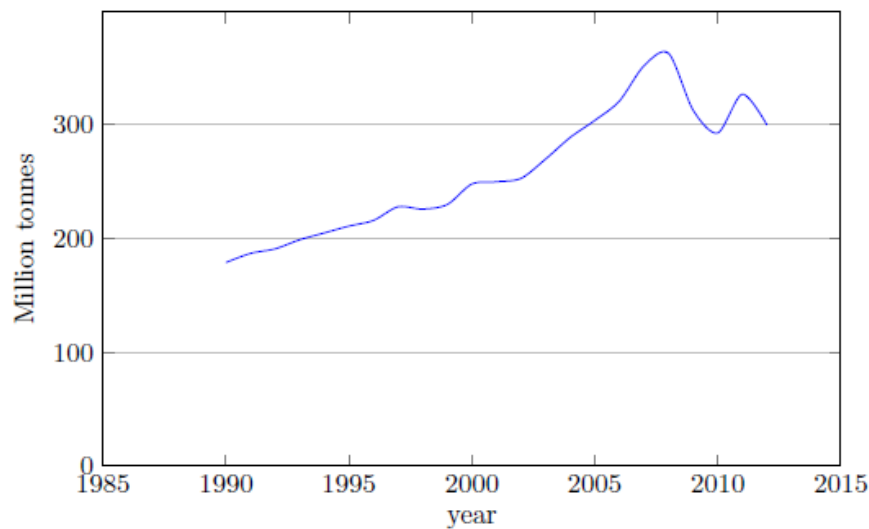
Η συνολική κατανάλωση καυσίμων στη ναυτιλία αυξήθηκε κατά 68% μεταξύ 1990 και 2012 όπου η διεθνής ναυτιλία ήταν υπεύθυνη για την κατανάλωση 257

εκατομμυρίων τόνων καυσίμων το 2012 σύμφωνα με την τελευταία μελέτη του IMO [2.4].

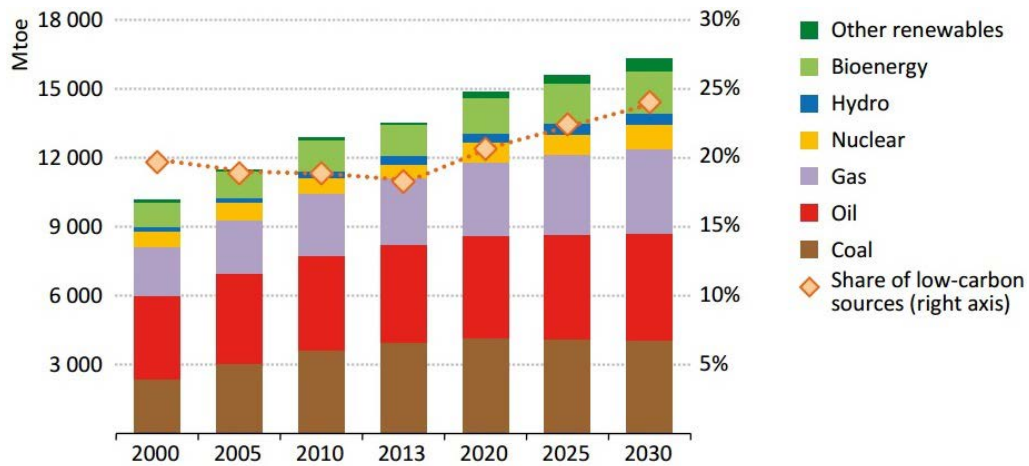
Η αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας είναι προφανές ότι θα οδηγήσει σε αύξηση της τιμής της. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Για παράδειγμα, οι τιμές της Ευρώπης, του αργού πετρελαίου Brent αυξάνεται δι:χρονικά.

Αν και οι τιμές του πετρελαίου μειώνονται τώρα, εξακολουθεί να υπάρχει η επιθυμία να μειωθεί το λειτουργικό κόστος του πλοίου. Επιπλέον, η πτώση των τιμών του πετρελαίου μπορεί να είναι προσωρινές. Έτσι, η ναυτιλιακή βιομηχανία αντιμετωπίζει πίεση για να μειώσει το κόστος λειτουργίας των πλοίων και τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και να συμμορφωθεί με τους αυστηρότερους κανόνες ρύπανσης.

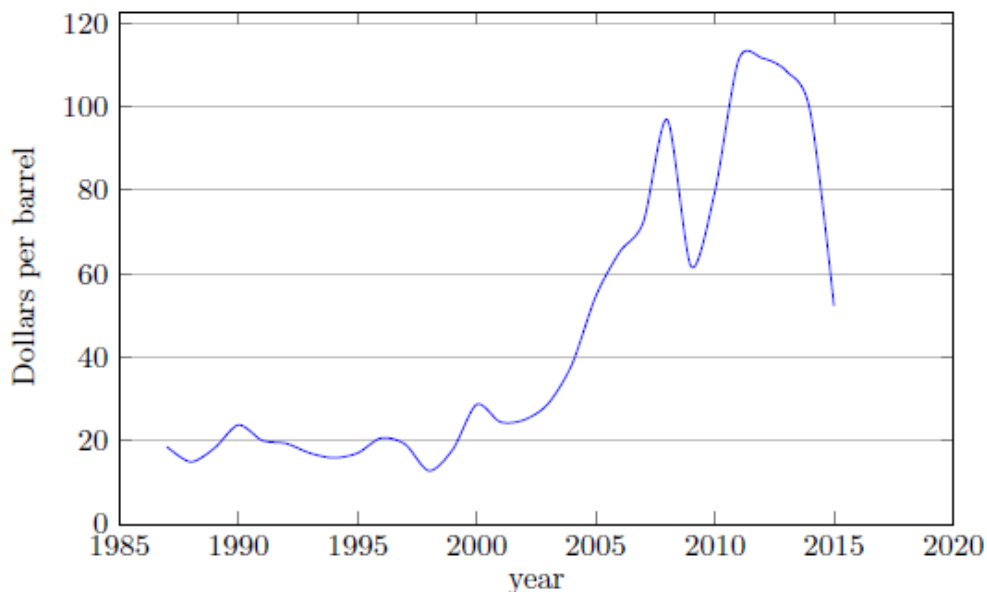
Και οι δύο μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου.



ΣΧΗΜΑ 0.3 Συνολική κατανάλωση καυσίμων αποστολής [2.3].



ΣΧΗΜΑ 0.4 Παγκόσμια ζήτηση ενέργειας από καύσιμα (εκατομμύρια τόνους ισοδυνάμου πετρελαίου) [2.4].



ΣΧΗΜΑ 0.5 Ευρώπη Brent spot τιμή FOB [2.5].

2.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ναυτιλίας

Παράλληλα με τις οικονομικές επιπτώσεις, η ναυτιλία έχει επίσης αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον με διάφορους τρόπους αναφέρονται παρακάτω (2.6):

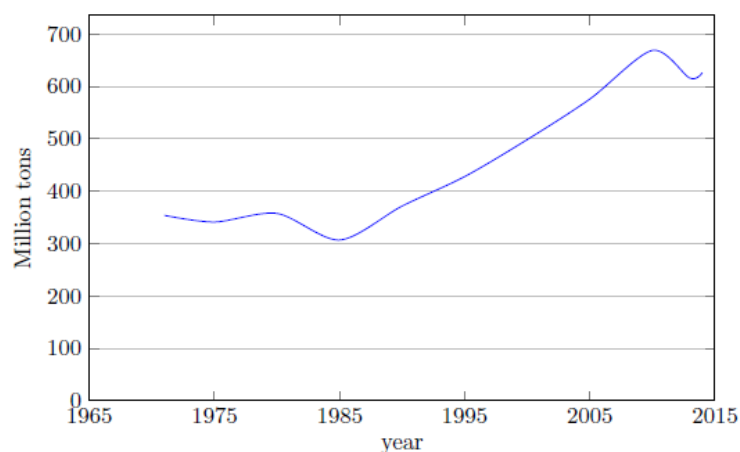
- Η ατμοσφαιρική ρύπανση από τις εκπομπές καυσαερίων, τις εκπομπές φορτίου και τις εκπομπές ψυκτικών μέσων.

- Πετρελαϊκή ρύπανση και τοξικές ουσίες από τη λειτουργία και παράνομη απόρριψη.
- Ρύπανση και φυσικές επιπτώσεις λόγω απώλειας πλοίων και φορτίου.
- Απελευθέρωση τοξικών χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται σε αντιρρυπαντικές βαφές.
- Εκκένωση λειτουργικών αποβλήτων από τα πλοία, συμπεριλαμβανομένης της απόρριψης ακατέργαστων λυμάτων και σκουπιδιών.
- Θόρυβος και σύγκρουση με θαλάσσια θηλαστικά.

Μια πρόσφατη μελέτη του IMO εκτιμά ότι η ναυτιλία το 2012 εξέπεμπε 949 εκατομμύρια τόνους CO₂, που αντιπροσωπεύει περίπου το 2,7% των παγκόσμιων εκπομπών κατά το 2012. Οι 796 εκατομμύρια τόνοι CO₂ οφείλονται στην διεθνή ναυτιλία.

Ελλείψει νέων πολιτικών μείωσης των εκπομπών αερίων, τα σενάρια δείχνουν ότι μέχρι το 2050 οι εκπομπές CO₂ από τις διεθνείς ναυτιλιακές εταιρείες ενδέχεται να αυξηθούν μεταξύ 50% και 250% σε σχέση με τις εκπομπές του 2012 (2.3).

Το σχήμα 1.6 δείχνει μια άλλη μελέτη CO₂ από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA).



ΣΧΗΜΑ 0.6 Εκπομπές CO₂ από τη διεθνή δεξαμενή θαλάσσης (IEA) [1.7].

Επιπλέον, η ναυτιλία είναι επίσης υπεύθυνη για το μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπών NOx όπου φτάνουν περίπου το 20% των συνολικών εκπομπών NOx από όλες τις υπόλοιπες πηγές [2.8], εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας και της καύσης κινητήρα [2.9, 2.10].

Επίσης, σε σύγκριση με άλλες μεταφορές, η ναυτιλία έχει τις υψηλότερες εκπομπές SO₂ λόγω της περιεκτικότητας σε καυσίμο θείου [2.11].

Σύμφωνα με μελέτες της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας για την Ασφάλεια στη Θάλασσα (EMSA), τα πλοία με σημαία της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) είναι υπεύθυνη για περίπου το 45% όλων των εκπομπών από τα οποία περίπου το 20% των εκπομπών εκπέμπονται εντός του ορίου των 12 μιλίων των χωρικών θαλασσών [2.12].

2.4 Κανονισμοί

Προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) των πλοίων, υπάρχει σημαντικό ενδιαφέρον για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των συστημάτων πρόωσης πλοίων, η οποία είναι σημαντική τόσο για τα νεότερα πλοία όσο και για τα υπάρχοντα πλοία. Συνεπώς, υπάρχουν πολιτικές, κανονισμοί και μέτρα μείωσης των εκπομπών όπου προτείνονται και εφαρμόζονται για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όπως ο Επιχειρησιακός Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης (ΕΕΟΙ), ο Σχεδιασμός Ενεργειακής Απόδοσης (ΕΕΔΙ), το σχέδιο διαχείρισης της ενεργειακής απόδοσης πλοίων (SEEMP), την εισαγωγή εκπομπών Περιοχών ελέγχου (ΕCΑ), και τον Κώδικα Θορύβου όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

2.4.1 ΕΕΟΙ

Όσον αφορά τις εκπομπές CO₂, ο IMO ανέπτυξε τον ΕΕΟΙ ώστε να χρησιμοποιηθεί οικειοθελώς για την παρακολούθηση του πλοίου για την απόδοση και

την αποδοτικότητα ως συνάρτηση της εκπεμπόμενης μάζας CO₂ [2.13]. Ο EEOI παρουσιάζεται στην Εξίσωση 1.1

$$EEOI = \frac{\text{actual CO}_2 \text{ emissions}}{\text{performed transport work}} \quad (1.1)$$

Οι πραγματικές εκπομπές CO₂ ισούνται με τη μάζα του καυσίμου που καταναλώνεται πολλαπλασιασμένη με την μάζα CO₂ συντελεστής μετατροπής CF που εξαρτάται από τον τύπο καυσίμου όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1.

Οι εκτελούμενες εργασίες μεταφοράς ισούνται με την απόσταση που πολλαπλασιάζεται με το φορτίο που μεταφέρεται, που μπορεί να είναι ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων ή και οι επιβάτες.

Αυτός ο δείκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον πλοιοκτήτη και τον χειριστή για να αξιολογήσει την επίδοση του πλοίου ή του στόλου τους όσον αφορά τις εκπομπές CO₂, στην οποία ένας μικρότερος EEOI σημαίνει και ένα αποδοτικότερο πλοίο.

Πίνακας 0.1 Συντελεστής περιεκτικότητας σε μάζα άνθρακα [2.1]

Type of fuel	C_F (tonne CO ₂ /tonne fuel)
Diesel/Gas oil	3.206
Light fuel oil	3.15104
Heavy fuel oil	3.1144
Liquefied petroleum gas	3
Liquefied natural gas	2.75

2.4.2 ECAs

Οι καθορισμένες θαλάσσιες περιοχές έχουν εισαχθεί ως Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECAS) με αυστηρές προδιαγραφές, διεθνή πρότυπα εκπομπών για τον

έλεγχο των NO_x, SO_x και σωματιδίων (PM). Όπως το 2005 στη Βαλτική Θάλασσα, το 2006 στη Βόρειο Θάλασσα, το 2011 στο ECA της Βόρειας Αμερικής και το 2013 στο ECA των Ηνωμένων Πολιτειών της Καραϊβικής Θάλασσας που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.7.

Περισσότερες περιοχές εξετάζονται επίσης για να οριστούν ως ECAS εις το άμεσο μέλλον. Επομένως, τα πλοία έχουν αυστηρότερα πρότυπα όσον αφορά τις εκπομπές κινητήρων και των καυσίμων όπου η περιεκτικότητα σε θείο θα πρέπει να είναι 0,1% τον Ιανουάριο του 2015 [2.15]. Πλοία που λειτουργούν εκτός και εντός των ECAS περιοχών θα πρέπει να φέρουν διαφορετικά καύσιμα για να συμμορφωθούν με τα όρια των ECA.

Ωστόσο, προβλέπεται ότι το κόστος καυσίμων θα αυξηθεί έως και κατά 87% για τα πλοία που εργάζονται εντός των ECA λόγω της χρήσης καυσίμου χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο [2.16].



ΣΧΗΜΑ 0.7 ECAs περιοχές όπως ορίζονται από τον IMO [2.17]

2.4.3 Κωδικός θορύβου

Τα υψηλά επίπεδα θορύβου από πλοία αναγνωρίζονται από τον IMO ως απειλή για την υγεία των ναυτικών και για τη ναυτιλία. Ο θόρυβος επηρεάζει τους ανθρώπους που ζουν κοντά σε λιμάνια και δίπλα σε κανάλια, όπως μπορεί να ταξιδέψει και σε μεγάλες αποστάσεις [2.18]. Επίσης, ο θόρυβος έχει επιβλαβείς επιπτώσεις στα θαλάσσια ζώα, καθώς τα ίδια βασίζονται στον ήχο για την επικοινωνία, την προσέλκυση φίλων, τη σίτισή τους και την αίσθηση των εμποδίων.

Ως εκ τούτου, η IMO ανέπτυξε κώδικα θορύβου θέτοντας διεθνή πρότυπα για την προστασία των ναυτικών και των επιβατών από τα υψηλά επίπεδα θορύβου. Έτσι το πλαίσιο διατάξεων και ρυθμίσεων της σύμβασης SOLAS τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιουλίου 2014 [2.19].

Επίσης για τον εντοπισμό και την ελαχιστοποίηση της παρεμπόδισης εισαγωγής θορύβου στο θαλάσσιο περιβάλλον από την εμπορική ναυτιλία προστέθηκε στην επιτροπή προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος (MEPC) το 2008, με αποτέλεσμα να καλείται η επιτροπή να αναπτύξει υποχρεωτικές τεχνικές κατευθυντήριες γραμμές καθώς και την εισαγωγή περιοχών ελέγχου θορύβου [2.20].

2.5 Μέτρα EEDI / SEEMP

Το MEPC δημοσίευσε μια δέσμη τεχνικών και επιχειρησιακών μέτρων που θα χρησιμοποιηθούν από νέα και υπάρχοντα πλοία. Για να μειωθούν οι εκπομπές CO₂ έχουν υιοθετηθεί τα μέτρα EEDI και SEEMP. Ο EEDI θεωρείται ως ένα άλλο μέτρο της αποδοτικότητας του CO₂ από τα πλοία όσον αφορά την ισχύ του πλοίου, τη συγκεκριμένη κατανάλωση καυσίμου (SFC), το καύσιμο CF, τη χωρητικότητα και την ταχύτητα του πλοίου όπως φαίνεται στην Εξίσωση 1.2.

$$EEDI = \frac{power * SFC * CF}{capacity * speed} \quad (1.2)$$

Εκτός από το EEDI και το SEEMP στοχεύει στη βελτίωση της επιχειρησιακής ενεργειακής απόδοσης των πλοίων μέσω τεσσάρων βασικών διαδικασιών [2.21] οι οποίες είναι:

- Σχεδιασμός
- Εφαρμογή
- Παρακολούθηση
- Αυτό αξιολόγηση και βελτίωση.

Οι εργασίες αυτές ολοκληρώθηκαν το 2011 με αποτέλεσμα την τροποποίηση του παραρτήματος VI της MARPOL, καθιστώντας υποχρεωτική την εφαρμογή του Δείκτη Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης για τα νέα πλοία και το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου για όλα τα πλοία που τέθηκαν σε ισχύ τον Ιανουάριο του 2013 και εφαρμόζονται σε όλα τα πλοία χωρητικότητας 400 τόνων και άνω [2.21]. Ο Πίνακας 1.2 παρουσιάζει αυτές τις τεχνολογίες και τα μέτρα που πρότεινε ο ΔΝΟ προς έγκριση ώστε να μειώσει την κατανάλωση καυσίμων του πλοίου και να αυξήσει την αποδοτικότητά του. Ο Deltamarin [2.22] διεξήγαγε μελέτη που ζήτησε ο EMSA προκειμένου να παρασχεθούν στον EMSA διαδρομές και δοκιμές σχετικά με το EEDI για διαφορετικούς τύπους πλοίων για να αξιολογηθεί η δυνατότητα εφαρμογής αυτού του δείκτη. Η μελέτη αυτή κατέληξε ότι η τρέχουσα φιλοσοφία και μεθοδολογία του EEDI δεν είναι κατάλληλες για τις θαλάσσιες μεταφορές μικρών αποστάσεων και των μικρών πλοίων γενικά.

Επίσης, μερικές από τις υπάρχουσες τεχνολογίες προσεγγίζουν τα φυσικά όρια. Αυτός είναι ο λόγος όπου οι μηχανικοί πρέπει να ερευνήσουν εναλλακτικές πηγές ενέργειας, συστήματα πρόωσης και καύσιμα για πλοία προκειμένου να μειωθούν οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να βελτιώσει την ενεργειακή του αποδοτικότητα.

Ενεργοποίηση των πλοίων με χρήση υδρογόνου σε συνδυασμό με κυψέλες καυσίμου έχει δημιουργήσει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον. Το υδρογόνο προσφέρει μεγάλες δυνατότητες ως καύσιμο πλοίων λόγω της υψηλής σε πυκνότητα

ενέργειας και μηδενικών εκπομπών με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή υδρογόνου. Παρόλο που υπάρχουν φθηνότερες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου, τα πραγματικά περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση υδρογόνου μπορεί να φανούν με την παραγωγή του από τις καθαρές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Επιπλέον, η χρήση υδρογόνου ως καύσιμο για μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια άμεσα χωρίς καύση θεωρείται σημαντική για θαλάσσιες εφαρμογές λόγω των πλεονεκτημάτων της, όπως η υψηλή απόδοση ακόμη και σε μερικό φορτίο, η αθόρυβη λειτουργία, η ευελιξία καυσίμου και οι χαμηλές ή μηδενικές εκπομπές όταν χρησιμοποιείται το υδρογόνο ως κύριο καύσιμο [2.23,2.24,2.25].

Πίνακας 0.2 Τεχνολογίες για μειώσεις EEDI και μέτρα σχετικά με το SEEMP (2.22)

EEDI reduction measure	SEEMP related measure
Μέτρο μείωσης του EEDI το μέτρο SEEMP	
Optimised hull dimensions and form	Engine tuning and monitoring
Lightweight construction	Hull condition
Hull coating	Propeller condition
Hull air lubrication system	Reduced auxiliary power
Optimisation of propeller-hull interface and flow devices	Speed reduction (operation)
Contra-rotating propeller	Trim/draft
Engine efficiency improvement	Voyage execution
Waste heat recovery	Weather routing
Gas fuelled (LNG)	Advanced hull coating
Hybrid electric power and propulsion concepts	Propeller upgrade and aft body flow devices
Contra-rotating propeller	Trim/draft
Engine efficiency improvement	Voyage execution
Waste heat recovery	Weather routing
Gas fuelled (LNG)	Advanced hull coating

Η απόδοση των συστημάτων ισχύος που βασίζονται σε κυψέλες καυσίμου μπορεί να βελτιωθεί μέσω υβριδισμού με την προσθήκη ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για τη συμπλήρωση του συστήματος κυψελών καυσίμου. Επιπλέον, η υβριδική ηλεκτρική ενέργεια και οι έννοιες πρόωσης είναι ένα από τα μέτρα του EEDI όπως φαίνεται στον πίνακα 1.2.

Έτσι, η χρήση κυψελών καυσίμου με υδρογόνο σε ένα υβριδικό ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης θα συνδυάσει το πλεονεκτήματα του υδρογόνου, των κυψελών καυσίμου και των υβριδικών συστημάτων ηλεκτρικής προώθησης.

Η παρουσία πολλαπλών πηγών ενέργειας στα συστήματα πρόωσης των υβριδικών κυψελών καυσίμου απαιτούν μια στρατηγική διαχείρισης ενέργειας (EMS) προκειμένου να αξιοποιήσει εις το μέγιστο τα οφέλη των συστημάτων υβριδικών κυψελών καυσίμου και να βελτιώσει την ηλεκτρική ενσωμάτωση των πηγών ενέργειας.

Επίσης, οι θαλάσσιες εφαρμογές κυψελών καυσίμου περιορίζονται μέχρι τώρα για χαμηλή πρόωση, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή τροφοδοτικό έκτακτης ανάγκης [1.26,1.27]. Εκτός αυτού, το υδρογόνο και οι τεχνολογίες που σχετίζονται με τις κυψέλες καυσίμου αναπτύσσονται συνεχώς. Ως εκ τούτου, πιο ολοκληρωμένες εργασίες στον τομέα αυτό απαιτούνται για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των κυψελών καυσίμου ως κύρια πηγή ενέργειας για πλοία με πολλά μεγαβάτ ενέργειας.

Επίσης, η επιλογή και η ανάπτυξη ενός κατάλληλου υβριδικού μοντέλου για θαλάσσια εφαρμογή είναι ένα βασικό ζήτημα για τα υβριδικά συστήματα πρόωσης κυψελών καυσίμου και είναι μια περιοχή να επικεντρωθεί σε αυτή την έρευνα για να συζητήσει τις επιπτώσεις της στην απόδοση των συστημάτων ισχύος που βασίζονται σε κυψέλες καυσίμου.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην αρχή αυτή της διατριβής γίνεται προσέγγιση του ενεργειακού και οικολογικού προβλήματος με την χρήση υδρογονανθράκων ως καύσιμη ύλη στους κινητήρες ενός πλοίου μέσω συλλογής πληροφοριών από διάφορες πηγές'' όπως βιβλιογραφική , ερευνητικές προσεγγίσεις , δημοσιεύσεις και οργανισμούς όπου ασχολούνται με Ναυτιλία και Ενέργεια.

Από την έρευνα αυτή έγινε προσέγγιση στην Πράσινη ναυτιλία με χρήση υβριδικών συστημάτων και ειδικότερα με αξιοποίηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και Fuel cells.

Τα στάδια που θα ακολουθηθούν στην ερευνητικής διατριβής θα είναι τρία.

- ▶ Στο πρώτο στάδιο θα αναλύσει τα διάφορα υβριδικά συστήματα που υπάρχουν για την Ναυτιλία
- ▶ Στο δεύτερο στάδιο θα διερευνηθεί η χρήση των ενεργειακών κυψελών, ηλιακή ενέργειας, Biofuel, LNG και αιολική ενέργεια στο υβριδικό σύστημα ενός πλοίου.
- ▶ Στο τρίτο στάδιο θα γίνει συσχέτιση υβριδικών συστημάτων

Με την ποιοτική μέθοδο έρευνας 'μέσω της μελέτης περίπτωση υβριδικών συστημάτων θα γίνει έρευνα σε σύστημα τα και χρήσης σε μικρά πλοία.

3.1 Ερευνητικά Ερωτήματα

Σε αυτήν την διατριβή θα προσπαθήσουμε να απαντηθούν και να αναλυθούν οι παρακάτω ερωτήσεις

- Η σκοπιμότητα της υβριδικής τεχνολογικής πρόωσης για διαφορετικούς τύπους σκαφών και είδη δρομολόγιων. Μικρών και μεσαίων αποστάσεων
- Ακόμη ερευνάται εάν είναι δυνατόν η χρήση και βελτιστοποίηση υβριδικών συστημάτων στα Πλοία και ποιο σύστημα είναι καλύτερο ανά είδος πλοίου.
- Η παρούσα διατριβή ερευνά εναλλακτικές μορφές ενέργειας όπως οι κυψέλες υδρογόνου καύσιμου σαν δεύτερη πηγή ενέργειας και αποθήκευσης ενέργειας μέσω μπαταριών
- Η έρευνα θα μελετήσει εάν μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη εξοικονόμηση καυσίμων και καλύτερο ενεργειακό δείκτη των πλοίων (EEDI).
- Ακόμη αναμένετε να προκύψει πιθανόν μείωση ρύπων κυρίως σε περιοχές που υπόκεινται σε περιοριστικούς όρους ρύπων σε προστατευόμενες περιοχές (Secas) και κόστος χρήσης σε συνάρτηση με άλλες μορφές ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4. ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ HYBRID PROPULSION

4.1 Υβριδική τεχνολογία - Hybrid systems

Τα υβριδικά οχήματα είναι πλέον καλά εδραιωμένα στη γη, για ένα βιώσιμο τρόπο πράσινης μεταφοράς. Η χρήση πολλαπλών πηγών ενέργειας και η μετατροπή τους επιτρέπει οφέλη που πρέπει να αξιοποιηθούν καλύτερα, αξιοποιώντας τη μεγάλη ανισότητα μεταξύ της κορυφής και χαμηλής ζήτησης ενέργειας [4.1].

Νέες ηλεκτρικές και υβριδικές αρχιτεκτονικές προωθήσεως επιτρέπονται από καινοτόμα και υψηλής απόδοσης εξαρτήματα (μπαταρίες, κυψέλες καυσίμου, υπέρ πυκνωτές) με μεγάλο βαθμό για τη μείωση των ρύπων και των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου.

Υπάρχουν αρκετές μελέτες που διεξάγονται για την ενσωμάτωση τέτοιων αρχιτεκτονικών σε μεγάλα σκάφη, όμως οι μικρές μονάδες επωφελούνται πιο πολύ από τέτοιου είδους συστήματα. Ωστόσο, η ενσωμάτωση αυτών των νέων υβριδικών συστημάτων σε μικρά πλοία που λειτουργούν σε μικρούς κύκλους εργασίας είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν. Οι προδιαγραφές μικρών σκαφών ευνοούν τη μεγιστοποίηση της ικανότητας επιβίβασης επιβατών ή εμπορευμάτων αλλά την ελαχιστοποίηση της ποσότητας ενέργειας στα συστήματα ενέργειας και πρόωσης. Επιπλέον, τυπικά προφίλ αποστολής, για αυτών των ειδών σκάφη, περιλαμβάνουν υψηλές μεταβολές της ταχύτητας που συνεπάγεται και με την ισχυρή ζήτηση της ισχύος.

Η υβριδική πρόωση βασίζεται στον διαχωρισμό ή την ταυτόχρονη χρήση πολλών διαφορετικών πηγών ενέργειας [4.2]. Η επιλογή διαφορετικών πηγών και συνδυασμών πηγών μπορούν να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις ισχύος και ενέργειας του πλοίου που περιλαμβάνουν τις ανάγκες χαμηλής και υψηλής ισχύος, τις ανάγκες ευελιξίας στις αλλαγές του ενεργειακού φορτίου. Η χρήση υβριδικού συστήματος είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης

καυσίμου. Ειδικά για τα σκάφη που απαιτούν υψηλό βαθμό ευελιξίας και πολύ διαφορετικούς κύκλους λειτουργίας.

Υπάρχουν τρεις κύριες αρχιτεκτονικές αλυσίδες για την υβριδική πρόωση:

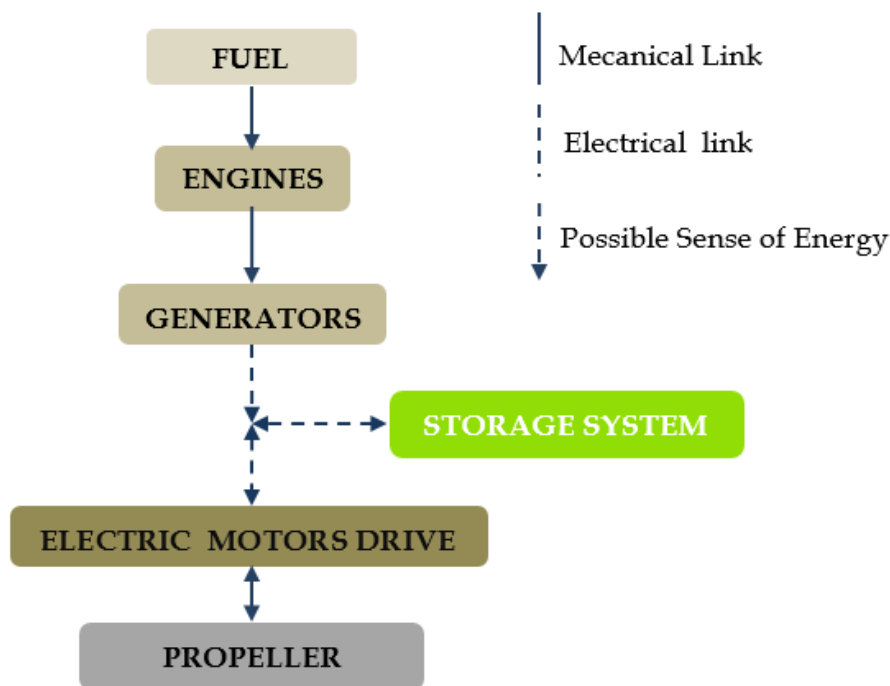
1) Σειρά Υβριδική αρχιτεκτονική

Σε αυτόν τον τύπο αρχιτεκτονικής HPS (Σχήμα 4.1), υπάρχουν δύο είδη (κινητήρες καύσης και ηλεκτρικά συστήματα) που χρησιμοποιούνται στη σειρά [4.2]. Η πρόωση γίνεται από μια μεταβλητή (κινητήρας πρόωσης και ισχύς μετατροπείας). Η ηλεκτρική ισχύς του κινητήρα πρόωσης παρέχεται από ένα σύνολο γεννητριών που κινούνται από κινητήρες καύσης.

Μια άλλη επιλογή είναι να χρησιμοποιήσετε κυψέλες καυσίμου παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια ή συνδυασμό κυψελών καυσίμου και γεννήτριες που κινούνται με κινητήρα καύσης.

Συστήματα αποθήκευση ενέργειας (ESS) (μπαταρία, υπέρ πυκνωτές κ.λπ.) μπορούν να συνδεθούν με το ηλεκτρικό δίκτυο για την παροχή ισχύος πρόωσης. Αυτό το ESS μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τις γεννήτριες η και ξεχωριστά [4.4]. Σε αυτή τη διαμόρφωση, ο ηλεκτρισμός χρησιμοποιείται ως ενέργεια μεταξύ της μηχανής καύσης και της πρόωσης κινητήρα, οπότε δεν θα υπάρχει άμεση μηχανική σύνδεση μεταξύ του κινητήρα και της έλικας[4.5]. Έτσι αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του συστήματος βελτιστοποιώντας το σημείο λειτουργίας της μηχανής καύσης και της έλικας.

Φυσικά, αυτό το πλεονέκτημα θα ήταν πιο σημαντικό εφόσον χρησιμοποιούνται αρκετές γεννήτριες και ESS, επειδή επιτρέπει την παροχή της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης από έναν βέλτιστο συνδυασμό πηγών. Ωστόσο, για τα μικρά πλοία, η δυνατότητα επιλογής διαφορετικών πηγών είναι πολύ περιορισμένη από τον όγκο τους και την μάζας τους.

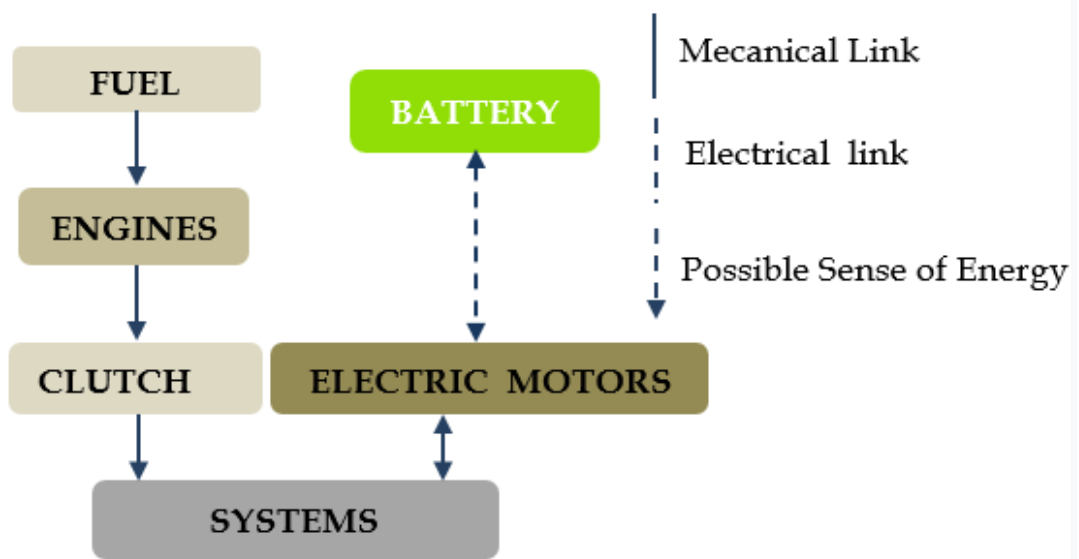


ΣΧΗΜΑ 0.1 Τυπική υβριδική αρχιτεκτονική σειρών [4.6]

2) Παράλληλη υβριδική αρχιτεκτονική

Η παράλληλη υβριδική αρχιτεκτονική (Σχήμα 4.2) συνδυάζει δύο είδη κινητήρων πρόωσης: ηλεκτροκινητήρες και κινητήρες καύσης που συνδέονται μηχανικά με τους ίδιους άξονες κιβώτια ταχυτήτων και συμπλέκτες.

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες και ο κινητήρας είναι που παρέχεται από ηλεκτρικό ESS ή και από ανεξάρτητες πηγές ενέργειας (γεννήτριες που κινούνται από κινητήρες καύσης ή / και κυψέλες καυσίμου για παράδειγμα). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δύο συστήματα πρόωσης μαζί ή χωριστά [2.7].



ΣΧΗΜΑ 0.2 Τυπική παράλληλη υβριδική αρχιτεκτονική [4.6]

Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται σε συστήματα πρόωσης για εργασίες χαμηλής ταχύτητας (κλασικά ηλεκτρικά σύστημα) και σε συνδυασμό με καύση κινητήρα χρησιμοποιείται για υψηλές ταχύτητες. Το πρώτο σύστημα μπορεί επίσης να είναι που χρησιμοποιείται ως σύστημα ώθησης για την παροχή συμπληρωματικής ισχύος κατά τη διάρκεια παροδικών (εκκίνηση, επιτάχυνση κ.λπ.). Αυτή η αρχιτεκτονική μειώνει τον αριθμό των στοιχείων σε σύγκριση με σειρά υβριδισμού και επιτρέπει τη βελτιστοποίηση του μεγέθους του καθενός των ενεργειακών πηγών [4.8].

3) Σειρά-παράλληλη υβριδική αρχιτεκτονική

Η σειριακή και παράλληλη αρχιτεκτονική συνδυάζει τις δύο αρχιτεκτονικές που ορίστηκαν προηγουμένως. Αυτή η σχέση επιτρέπει τη μετάβαση μιας λειτουργίας παράλληλου τύπου σε λειτουργία σειριακού τύπου [4.9-4.5]. Ο Πίνακας 4.1 δίνει μια σύγκριση μεταξύ των αρχιτεκτονικών σειράς και παράλληλης υβριδοποίησης, συγκρίνοντας αποδοτικότητα και περίσσεια ισχύς.

Πίνακας 0.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ Τύποι Υβριδικών[4.3,49,4.5,4.7]

ΤΥΠΟΣ	Σειρά	Παράλληλα
Μεγιστοποίηση του στοιχείου/ κόστους	<ul style="list-style-type: none"> -Για να είναι απόλυτα αποτελεσματικό, το σύστημα πρέπει να συνδυάζει αρκετές πηγές ισχύος με ονομαστική ισχύ ίση με ένα κλάσμα της συνολικής ισχύος. Αυτό οδηγεί σε συμπληρωματικούς όγκους και βάρος του κόστους. - Το μέγεθος των ηλεκτρικών κινητήρων προώθησης αντιστοιχεί στην μέγιστη ισχύ 	<ul style="list-style-type: none"> -Το σύστημα επιτρέπει τη βελτιστοποίηση του μεγέθους κάθε συστήματος προώθησης. -Μείωση μεγέθους ηλεκτρικού κινητήρα. -Συμπληρωματικές δαπάνες και όγκος που σχετίζονται με το πολύπλοκο μηχανικό σύστημα (συμπλέκτες, κιβώτια ταχυτήτων)
Ισχύς και Απόδοση	<ul style="list-style-type: none"> -Η αποτελεσματικότητα περιορίζεται από το πολλαπλασιασμό των συστημάτων σε σειρά (κινητήρας, γεννήτρια, μετασχηματιστής, μετατροπείς, κινητήρες κ.λπ.). - Το σύστημα επιτρέπει έναν ακριβή έλεγχο και βαθμιαία μεταβολή της ταχύτητας του έλικα. Εάν υπάρχουν πολλά χρησιμοποιούνται πηγές, καύση οι κινητήρες μπορούν να λειτουργούν στο μέγιστο αποδοτικότητα 	<ul style="list-style-type: none"> -Καλή απόδοση που σχετίζονται με τον μειωμένο αριθμό εξαρτημάτων της σειράς. -Ακριβής έλεγχος και βαθμιαία μεταβολή της ταχύτητας του έλικα. -Ο κινητήρας καύσης λειτουργεί ως κορυφή αποδοτικότητα
Αξιοπιστία	<ul style="list-style-type: none"> -Το σύστημα είναι αρθρωτό, και προσφέρει πλεονασματικές πηγές ενέργειας. 	<ul style="list-style-type: none"> -Πολύ υψηλό επίπεδο ισχύος δεδομένου ότι μπορεί να παρασχεθεί η δύναμη προωθήσεως ανεξάρτητα από δύο ανεξάρτητα συστήματα. -Πολύπλοκο μηχανικό σύστημα το οποίο μπορεί να έχει ποσοστό αποτυχίας

4.2 Πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής και υβριδικής προώθησης στο πλαίσιο του μικρού πλοίου

Τα Υβριδικά Συστήματα Πρόωσης (HPS) είναι ενδιαφέροντα όταν υπάρχει μεγάλη διακύμανση της ζήτησης ισχύος κατά τη διάρκεια των εργασιών. Οι κανόνες σχεδιασμού αυτού του τύπου συστημάτων μπορούν να διαφέρουν σημαντικά για διαφορετικά τύπους πλοίων, κυρίως λόγω των διαφορετικών τύπων προφίλ αποστολών και απαιτήσεων λειτουργίας.

Τα υβριδικά συστήματα πρόωσης φαίνεται να είναι πολλά υποσχόμενα τεχνολογίες για τον σχεδιασμό μικρών πλοίων υψηλής απόδοσης και φιλικών προς το περιβάλλον Green Ships[4.10,4.11].

- Τα HPS παρέχουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση και σημαντικά μικρότερες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και ρύπων από τα κλασσικά μηχανικά συστήματα [4.12].
- Τα υβριδικά συστήματα είναι αρθρωτά και προσφέρουν πλεόνασμα ισχύος.
- Η χρήση ηλεκτρικών συστημάτων πρόωσης (σύστημα POD και προωθητήρες) επιτρέπει τη βελτίωση ευελιξία με σημαντική μείωση του θορύβου και των κραδασμών [4,12].
- Τα ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης προσφέρουν περισσότερο βαθμό ελευθερίας από πλευράς ναυτικής αρχιτεκτονικής και αυξάνεται ο διαθέσιμος χώρος.
- Το HPS επιτρέπει τη μείωση του επιπέδου δόνησης που μεταδίδεται στη δομή του πλοίου.
- Το HPS οδηγεί σε μείωση της τήρησης των απαιτήσεων για τους κινητήρες καύσης, διότι οι κινητήρες εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούνται πάντα κατά βέλτιστο τρόπο λιγότερο.

4.3 Παραδείγματα ηλεκτρικών και υβριδικών σκαφών

1) Nemo H2

Το έργο ξεκίνησε στο Άμστερνταμ το 2009. Είναι ένα από τα πρώτα σκάφη που αναπτύσσονται με καύσιμα κυψελών. Το Nemo H2 έχει μήκος 22 μέτρα και μπορεί να μεταφέρει 86 επιβάτες. Η πρόωσή του βασίζεται σε ένα σύστημα κυψελών καυσίμου PEMFC (60-70kW) [4.9,4.12].

Όταν το πλοίο δεν είναι σε πλήρη ισχύ, χρεώνονται οι μπαταρίες μολυβδου-οξέος (30-50kW). Αυτά τα βαρίδια μπορούν στη συνέχεια παρέχετε επιπλέον δύναμη όταν χρειάζεται [4.14,4.15].



ΣΧΗΜΑ 0.3 Nemo H2 Amsterdam [4.6]

2) TUG RT Adrian

Μια νέα γενιά υδραυλικών ρυμουλκών προώθησης έχει κατασκευαστεί το 2011. Αυτό το πρώτο ευρωπαϊκό υβριδικό ρυμουλκό, που ονομάζεται RT Adrian (Εικ.) χρησιμοποιείται στο λιμάνι του Ρότερνταμ.

Η υβριδική αρχιτεκτονική, που ονομάζεται ο "Xero Point Hybrid Propulsion System" είναι μια σειρά / παράλληλη υβριδική αρχιτεκτονική που συνδυάζει το ντίζελ κινητήρες, μπαταρίες και γεννήτριες ντίζελ όπως φαίνεται στο σχήμα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σύστημα πρόωσης ως ή ηλεκτροκίνητη λειτουργία (για χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας), ή σε συνδυασμένη λειτουργία για πλήρη ισχύ. Σε αυτή τη συνδυασμένη λειτουργία, οι κινητήρες πρόωσης πετρελαίου, και οι ηλεκτρικοί κινητήρες, χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα.



ΣΧΗΜΑ 0.4 Hybrid TUG RT Adrian [4.18].

Αυτό το σκάφος, μήκους 22,1 μέτρων και 1,7 μέτρων σε βύθισμα, έχει κατασκευαστεί από την STX France ναυπηγείο στο Lorient. Το Ar Vag Tredan τροφοδοτείται από υπερκαταναλωτές. Αυτοί οι σούπερ πυκνωτές χρησιμοποιούνται για την παροχή ισχύος σε δύο προωθητές αζιμούθου των 70kW. Το πλοίο μπορεί να κάνει κρουαζιέρα σε 10 κόμβους κατά τη διάρκεια 2x7μη και εξασφαλίζουν μηδενικές εκπομπές. Σε κάθε στάση, οι 8 ομάδες 16 υπερκαταναλωτών επαναφορτίζονται σε 4 λεπτά [4.16].

3) BatCub

Το BatCub συνίσταται στη χρήση δύο λεωφορείων νερού μήκους 19 μέτρων σε σχήμα καταμαράν. Αυτό το ιδιαίτερο σχήμα γάστρας επιτρέπει την αύξηση του (sea keeping). Το σύστημα ενέργειας / προώθησης βασίζεται σε μια σειρά υβριδική πρόωση (ντίζελ-ηλεκτρική), η οποία λειτουργεί κυρίως στην ηλεκτρική λειτουργία. Κάθε λεωφορείο είναι εξοπλισμένο με σύστημα μπαταριών ιόντων λιθίου των 140kWh. Το σύστημα τροφοδοτεί δύο ηλεκτρικούς κινητήρες για προωστικά και βοηθητικά συστήματα όπως ο φωτισμός και οι επικοινωνίες. Συνδυασμένο με ντίζελ κινητήρα / γεννήτρια, η μπαταρία είναι σε θέση να αποθηκεύσει την ενέργεια που παράγεται από τη γεννήτρια και να παρέχει πρόσθετη ηλεκτρική ισχύ όταν απαιτείται. Η μπαταρία μπορεί να συνδυαστεί με ντίζελ / γεννήτριες κατά τη διάρκεια της φάσης ενίσχυσης.

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν το σκάφος είναι αγκυροβολημένο, οι μπαταρίες φορτίζονται από το ηλεκτρικό δίκτυο του λιμένα. Όταν είναι πλήρως φορτισμένες, οι μπαταρίες μπορούν να παρέχουν 6 ώρες αυτονομίας σε ηλεκτρικές λειτουργίες.



ΣΧΗΜΑ 0.5 Το Bat Club [4.17].

4) KNOSOS PALACE

Το επιβατικό πλοίο KNOSOS PALACE είναι 214 μέτρων, μπορεί να φιλοξενήσει 2320 επιβάτες και 660 αυτοκίνητα. Τέσσερις ντίζελ μηχανές παρέχουν ισχύ σε 2 ελεγχόμενες προπέλες βήματος και δίνουν στο πλοίο την τελική του ταχύτητα 31,6 kn. Αυτό το πλοίο εφαρμόζει μια σειρά υβριδικής διάταξης ντίζελ-ηλεκτρικού, η οποία επιτρέπει τη χρήση μπαταριών για την προώθηση του πλοίου μέσω ηλεκτρική λειτουργία μπαταρίας.

Για χαμηλές ταχύτητες, το σκάφος χρειάζεται 10 MW ισχύς πρόωσης. Για κάθε ώρα λειτουργίας το πλοίο απαιτεί μπαταρία 10 MWh. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η χρήση της μπαταρίας στο πλοίο, επιλέχθηκε η Li-ion υψηλής ενέργειας / μέσης ισχύος μπαταρία. Μια μπαταρία 10 MWh αυτής της διαμόρφωσης ζυγίζει λιγότερο από 100 τόνους και καταλαμβάνει χώρο λιγότερο από 60 m³. Επίσης ζυγίζει 5500 τόνους και είναι μικρότερη από το μισό του βάρους ενός από τους ντίζελ κινητήρες. Η τιμή αυτής της μπαταρίας στο προβλεπόμενο κόστος των 285 \$ / kWh είναι 3,5 εκατομμύρια δολάρια. Αυτό είναι ένα σημαντικό κόστος για ένα πλοίο 125 εκατομμυρίων δολαρίων, αλλά επιτρέπει στο πλοίο να ταξιδεύει 40 λεπτά στα 16,8 kn και 20 λεπτά για διαδικασία ελλιμενισμού στο λιμάνι, που σημαίνει ότι οι κινητήρες ντίζελ μπορούν να σταματήσουν περίπου 20 χλμ από το λιμάνι. Οι ανησυχίες για την ασφάλεια είναι πάντα ένα σημαντικό ζήτημα στα επιβατηγά πλοία.

Η μπαταρία μπορεί σίγουρα να παίζει ρόλο σε αυτό παρέχοντας ισχύ ανεξάρτητη από τις γεννήτριες ντίζελ. Σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης όπου όλα τα ντίζελ αναγκάζονται να κλείσουν, η μπαταρία των 10 MWh θα μπορεί να αποδώσει 4 MW κατά τη διάρκεια 2,5 ωρών, που επαρκεί για να μετακινήσει το πλοίο στα 12 kn. Αυτό υποθέτει ότι η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη. Το πλοίο Knossos έχει μέγιστη ταχύτητα 31,6 kn και επιχειρησιακή ταχύτητα υπηρεσίας 29,5 kn. Για μέγιστη ταχύτητα απαιτείται ισχύς 67,2 MW ενώ για επιχειρησιακή πέφτει στα 55 MW. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορούν να φορτιστούν τρεις

φορές την ονομαστική τους χωρητικότητα, οπότε η μπαταρία των 10 MWh μπορεί να αποδώσει έως και 30 MW κάτω από 80% SOC.

Τα 55 MW που απαιτείται για επιχειρησιακή ταχύτητα αφήνει περιθώριο 12 MW για φόρτιση των μπαταριών. Αυτό σημαίνει ότι 8 MWh είναι ήδη διαθέσιμα για 40 λεπτά μετά την αλλαγή σε ηλεκτρική πρόωση. Αυτή η γρήγορη φόρτιση της μπαταρίας επιτρέπει στο πλοίο να υπάρχει εφεδρική ισχύ για περισσότερο από 5 ώρες [4.18].

Αυτό το παράδειγμα δείχνει σαφώς ότι το η ταχεία φόρτιση των μπαταριών ιόντων λιθίου είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες μπαταριών όταν τοποθετούνται σε πλοία όπως πορθμεία και άλλα επιβατηγά πλοία που είναι αγκυροβολημένα μόνο για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Το κόστος των μπαταριών ιόντων λιθίου μπορεί να αντισταθμιστεί από τη χαμηλότερη κατανάλωση χώρου από άλλους τύπους μπαταριών, επειδή αυτό αφήνει περισσότερο χώρο για τους επιβάτες και τα οχήματα, κάτι που αποτελεί μείζονα σημασία για τους επιβάτες στα σκάφη. Το παράδειγμα αυτό αποδεικνύει επίσης ότι η ικανότητα της μπαταρίας 10 MWh να μετακινεί το πλοίο λίγες ώρες με λογική ταχύτητα 12 kn, μπορεί να υποδηλώνει ότι αυτή η μπαταρία μπορεί να αντικαταστήσει κάποια γεννήτρια έκτακτης ανάγκης [4.19].

Τα υβριδικά συστήματα πρόωσης έχουν μελετηθεί για διάφορους τύπους πλοίων όπως δεξαμενόπλοια, πλοία μεταφοράς φορτίου (χύδην) [4.20], ρυμουλκά [4.21], στρατιωτικά σκάφη [4.23,4.22], OSV [4.24], AHTS [4.25] καθώς πορθμεία [4.23] αλλά και μεταφορείς υγροποιημένου φυσικού αερίου [4.26].

Τα υβριδικά συστήματα είναι τα πιο οικονομικά, ευέλικτα και αξιόπιστα συστήματα με χαμηλότερες εκπομπές και θόρυβο. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, απαιτούνται υβριδικά συστήματα πρόωσης όπου καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο, βάρος και υψηλότερο αρχικό κόστος εγκατάστασης σε σύγκριση με το συμβατικό

σύστημα πρόωσης. Για παράδειγμα, χρειάστηκε προσθήκη βάρους μικρότερη από 2% για να τοποθετηθούν μπαταρίες στο σύστημα πρόωσης ενός δεξαμενόπλοιου ωστόσο, η ισχύς της μπαταρίας θα επαρκούσε για να εισέλθει και να φύγει από το λιμένα εξαλείφοντας το πρόβλημα των εκπομπών στις λιμενικές ζώνες [4.23].

Για ένα πλοίο μεταφοράς χύδην, χρησιμοποιώντας τα υβριδικά συστήματα πρόωσης θα είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής απόδοσης κατά μία τιμή μεταξύ 2% και 10%, γεγονός που θα είχε ως αποτέλεσμα εξοικονόμηση καυσίμων έως και 1,27 εκατομμύρια δολάρια ετησίως [4.20]. Δεδομένου ότι τα πλοία έχουν διαφορετικές διαδρομές, λειτουργίες, προφίλ λειτουργίας και καπετάνιους, και επειδή υπάρχουν διαφορετικές πηγές ενέργειας, πολλές διαμορφώσεις υβριδικού συστήματος πρόωσης μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να ταιριάζουν κάθε περίπτωση.

Ο σχεδιασμός των υβριδικών συστημάτων πρόωσης εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου, το επιχειρησιακό προφίλ, την κατηγορία του, τη διαδρομή και τη λειτουργία. Έτσι, δεν υπάρχει κάποιο είδος υβριδικού συστήματος πρόωσης που είναι ιδανικό για ένα ορισμένων τύπων πλοίων. Ωστόσο, μερικές μελέτες έδειξαν ότι τα υβριδικά συστήματα πρόωσης είναι περισσότερο αποτελεσματικά για τα πλοία με μεγαλύτερες διακυμάνσεις στο προφίλ ταχύτητας, όπως OSV ή για τα πλοία που διαθέτουν σχετικά σύντομα ταξίδια όπως τα πλοία και τα επιβατηγά πλοία. Επίσης, χρησιμοποιώντας τη συμβατική ισχύ οι πηγές στο υβριδικό σύστημα πρόωσης είναι ανεπαρκείς για την επίλυση του προβλήματος των εκπομπών ειδικά για τα πλοία που εργάζονται σε ECA ή λιμάνια που απαιτούν τη χρήση μιας πιο καθαρής πηγής ενέργειας, όπως κυψέλες καυσίμου [4.21,4.23,4.25].

4.4 Ηλεκτρική πρόωση Υβριδικό Μοντέλο FUEL CELLS –BATERIES

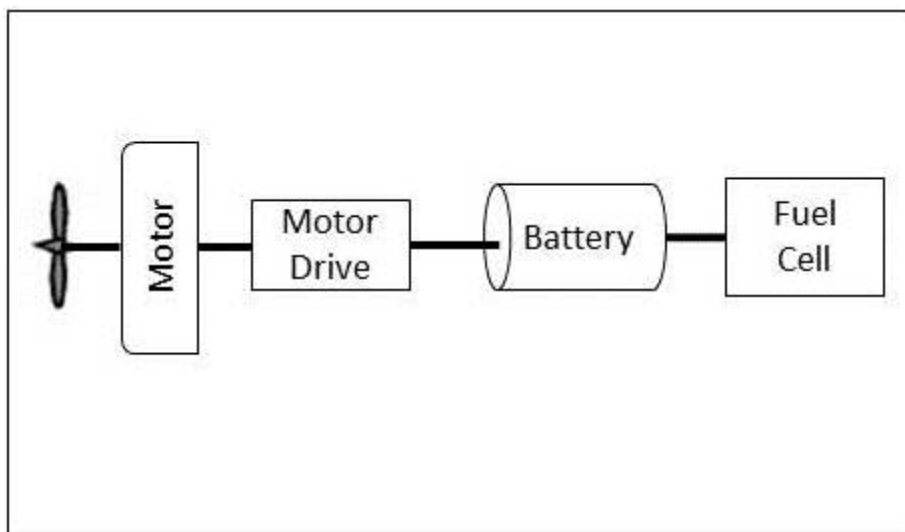
Τα συστήματα προώθησης υβριδικών κυψελών καυσίμου τα οποία συνδυάζουν μια κυψέλη καυσίμου και ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας έχουν χρησιμοποιηθεί

με επιτυχία σε διάφορες εφαρμογές, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία συμβάλλοντας με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και μειωμένες εκπομπές CO₂ [4.27].

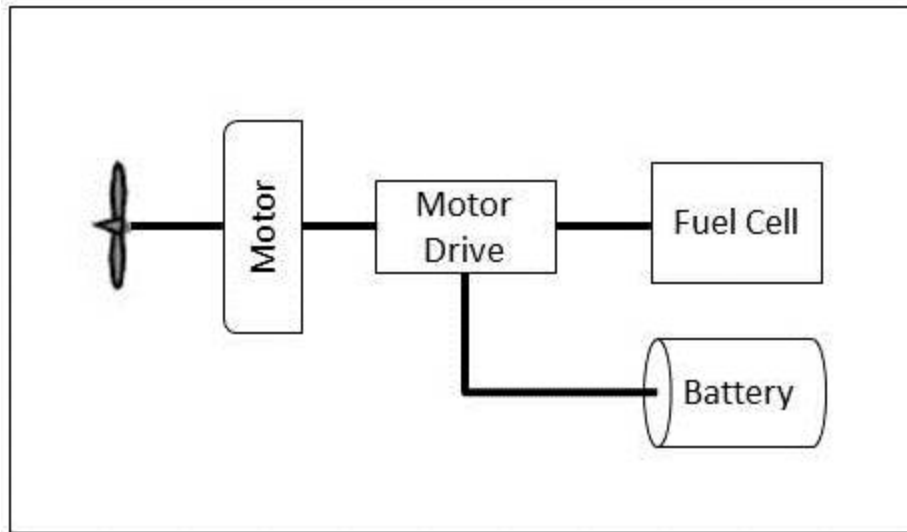
Τα συστήματα αυτά συνδυάζουν υψηλή πυκνότητα ενέργειας στις κυψέλες καυσίμου και η υψηλή πυκνότητα ισχύος των συστημάτων αποθήκευσης που οδηγεί σε υψηλότερη απόδοση αλλά και χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές αέριων. [4.28,4,23].

Στα συστήματα αυτά οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρισμού από καύσιμα όπως υδρογόνο ή μαιθανόλη ανάλογα με τον τύπο κυψελών καυσίμου και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται στην πρόωση με ηλεκτρική ενέργεια με κινητήρες ή χρησιμοποιείται για τη φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας που μπορεί να είναι μπαταρία ή πυκνωτής.

Η αποτελεσματικότητα και η συμπεριφορά αυτών των συστημάτων εξαρτώνται από το βαθμό υβριδισμού και τον τρόπο ελέγχου λειτουργίας [4.29], η οποία θεωρείται βασική εστίαση αυτής της ερευνητικής εργασίας. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες συστημάτων υβριδικών κυψελών, καυσίμου σειρά υβριδικών και παράλληλων υβριδίων όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.



(α)



(β)

ΣΧΗΜΑ 0.6 Αρχιτεκτονική συστημάτων πρόωσης κυψελών καυσίμου (η λεζάντα πάει στο κάτω μέρος της εικόνας και με 10αρια γράμματα και λάθος αρίθμηση) (α) Σειριακό υβριδικό Σύστημα Ηλεκτρικής Πρόωσης και β) Παράλληλο υβριδικό Σύστημα Ηλεκτρικής Πρόωσης

Τα συστήματα κυψελών καυσίμου είναι γνωστά για τα πλεονεκτήματά τους όπως χαμηλό θόρυβο, μηδενικές εκπομπές αερίων NOx και υψηλή απόδοση στο εύρος χαμηλής ισχύος. Επιπλέον ο σχεδιασμός τους είναι αρθρωτός όπου επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωσή τους με άλλα συστήματα παραγωγή ενέργειας.

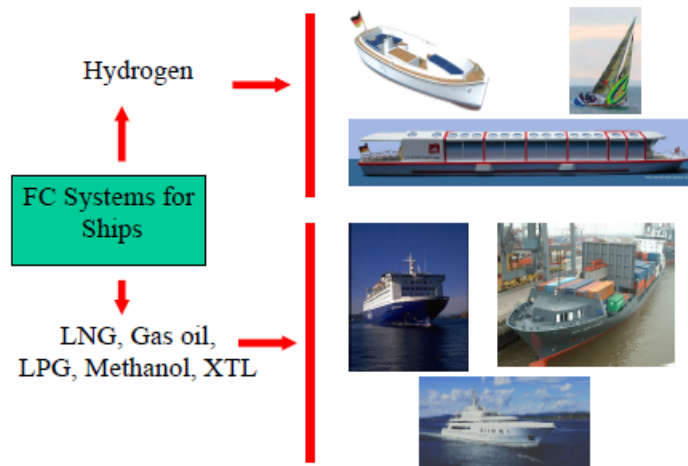
Τα μεγάλα μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου είναι το υψηλό κόστος τους ανεξάρτητα από τον τύπο κυψέλης καυσίμου και τη χαμηλή ειδική ισχύ που διαθέτουν σε όλους τους τύπους κυψελών καυσίμου. Η διάρκεια ζωής των κυψελών καυσίμου είναι επίσης ένα μεγάλο ζήτημα για τους περισσότερους τύπους κυψελών καυσίμου. Επιπλέον, η εφοδιαστική γραμμή καυσίμων και η τιμή των καυσίμων αποτελούν εμπόδιο για την ευρέως εισαγωγής της τεχνολογίας στον Ναυτιλιακό τομέα.

Ωστόσο, σε περιφερειακές εφαρμογές με σχετικά χαμηλή ζήτηση ενέργειας, όπως πορθμεία ή σκάφη αναψυχής, μπορεί να είναι εφικτό να δημιουργηθεί επαρκής τροφοδοσία καυσίμου με την δημιουργία πρατηρίων καυσίμων.

Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις, ειδικά σε εφαρμογές με υψηλή ισχύ όπως τα ferry, Roro πλοία απαιτούν υλικοτεχνική υποδομή για την παράγωγή και αποθήκευση του καυσίμου. (Σχήμα 4.7).

Ο απαιτούμενος όγκος για το καύσιμο γίνεται ο πιο περιοριστικός παράγοντας για αέρια ως εναλλακτικά καύσιμα. Καύσιμα εκτός του υδρογόνου απαιτούν την εφαρμογή συστημάτων αναμορφωτή με κυψέλες καυσίμου. Έτσι και ο IMO έχει ξεκινήσει την ανάπτυξη ενός διεθνούς κώδικα που θα επιτρέπει τη χρήση του σε διαφορετικά αέρια καυσίμου και να μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν υγρά καύσιμα με σημείο ανάφλεξης κάτω των 60 ° C.

Οι εξελίξεις θα υποστηρίξουν επίσης τη χρήση συστημάτων κυψελών καυσίμου στη διεθνή ναυτιλία. [4,30].



ΣΧΗΜΑ 0.7 Χρήση κυψελών καυσίμων στην Ναυτιλία με διαφορετικές πηγές ενέργειας [4.30]

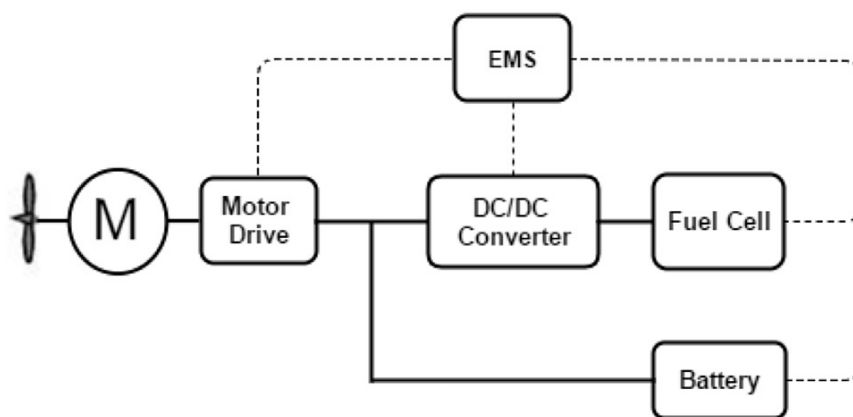
Η εξοικονόμηση καυσίμων στην περίπτωση ενός υβριδικού συστήματος είναι εφικτή και λειτουργική μέσω της σωστής ταξινόμησης έτσι ώστε τα συνολικά σημεία λειτουργίας να πετύχουμε μια βέλτιστη απόδοση για συγκεκριμένο σενάριο λειτουργίας. Το σενάριο λειτουργίας απαιτεί συγκεκριμένα στοιχεία σαν παραδοχές εισόδου και εξόδου ενέργειας για την βέλτιστη μοντελοποίηση και διαχείριση.

4.5 Στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας EMS

Στόχος ενός EMS [4.32] είναι ο διαχωρισμό της απαιτούμενης ισχύος μεταξύ του καυσίμου των συστήματα κυψελών και των μπαταριών με στόχο τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας του συστήματος. Αυτή η στρατηγική ελέγχου βασίζεται σε ντετερμινιστικούς κανόνες που μπορεί να περιέχουν πολλές καταστάσεις λειτουργίας ελέγχοντας τη ροή ενέργειας μεταξύ των συστατικών του υβριδικού συστήματος ισχύος κυψελών καυσίμου [4.32],(Σχήμα 4.8).

Αυτές οι καταστάσεις λειτουργίας βασίζονται στα επιχειρησιακά όρια των κυψελών καυσίμου και των συστημάτων μπαταρίας όπως την απαιτούμενη ισχύ φορτίου και την μπαταρία SOC.

Σε αυτήν τη στρατηγική, η απαιτούμενη ισχύς φορτίου (Pload) του πλοίου είναι σε σύγκριση με διαφορετικούς συνδυασμούς της κυψέλης καυσίμου και όρια λειτουργίας των συστημάτων μπαταρίας και ελάχιστα στοιχεία κυψελών καυσίμου για ελάχιστη ισχύ (PFCmin), βέλτιστη ισχύ κυψελών καυσίμου (PFCopt), μέγιστη ισχύ κυψέλης καυσίμου (PFCmax), βέλτιστη ισχύ εκφόρτισης μπαταρίας (Portdis), βέλτιστη ισχύ φόρτισης μπαταρίας (Portchar) και μπαταρία βέλτιστης ισχύς (PBATopt) λαμβάνοντας υπόψη τα όρια SOC της μπαταρίας όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2.



ΣΧΗΜΑ 0.8 Υβριδικό σύστημα κυψελών καυσίμου / μπαταρίας FCS
Alsterwasser.[4.33].

Οι τιμές των ορίων λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου και της μπαταρίας και τα συστήματα αποφασίζονται με βάση τα όρια των συστημάτων σε μια προσπάθεια να πετύχουμε μεγιστοποίηση της απόδοσης του υβριδικού συστήματος. Σύμφωνα με το P_{load} και το επίπεδο της μπαταρία SOC, καθορίζεται η ισχύς κυψελών καυσίμου. Τότε, η μπαταρία φορτίζεται ή αποφορτίζεται με βάση τη διαφορά μεταξύ της ισχύος των κυψελών καυσίμου και του P_{load} . Το σύστημα λειτουργεί στο ελάχιστο όριο ισχύος του κατά τη διάρκεια χαμηλής απαιτούμενης ισχύς με κανονική και υψηλή μπαταρία SOC όπως στις καταστάσεις 1, 2 και 5.

Το σύστημα κυψελών καυσίμου λειτουργεί στο μέγιστο όριο του όταν η μπαταρία SOC είναι χαμηλή ή κατά τη διάρκεια υψηλής απαιτούμενης ισχύος όπως στο καταστάσεις 4, 9 και 11. Εν τω μεταξύ, το σύστημα κυψελών καυσίμου ακολουθεί την απαιτούμενη ισχύς φορτίου όπως στις καταστάσεις 3, 6, 8 και 10 και λειτουργεί στη βέλτιστη ισχύ του στην κατάσταση 7.[4.33].

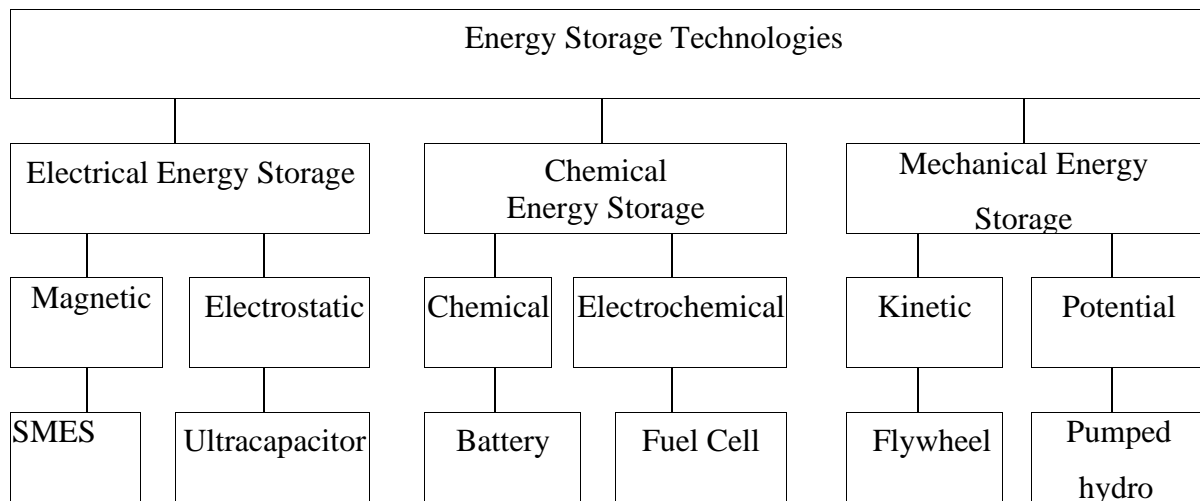
Πίνακας 0.2 EMS Φόρτιση μπαταρίας [4.33]

Table 3 – Summary of a state-based EMS [10].			
Battery SOC	State	Load power	Fuel cell reference power
SOC > 80%	1	$P_{load} \leq P_{FCmin}$	P_{FCmin}
	2	$P_{load} \leq P_{FCmin} + P_{optdis}$	P_{FCmin}
	3	$P_{load} \leq P_{FCmax} + P_{optdis}$	$P_{FC} = P_{load} - P_{optdis}$
	4	$P_{FCmax} + P_{optdis} < P_{load}$	P_{FCmax}
50% ≤ SOC ≤ 80%	5	$P_{load} \leq P_{FCmin}$	P_{FCmin}
	6	$P_{load} \leq P_{FCopt} - P_{BATopt}$	P_{load}
	7	$P_{load} \leq P_{FCopt} + P_{BATopt}$	P_{FCopt}
	8	$P_{load} \leq P_{FCmax}$	P_{load}
	9	$P_{load} > P_{FCmax}$	P_{FCmax}
SOC < 50%	10	$P_{load} \leq P_{FCmax} - P_{optchar}$	$P_{load} + P_{optchar}$
	11	$P_{load} > P_{FCmax} - P_{optchar}$	P_{FCmax}

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνει μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, τη μετατροπή της ισχύος και τον έλεγχο. Οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας αποτελούνται από μπαταρίες, σφόνδυλοι, πυκνωτές, υπεραγωγούς, συστήματα αποθήκευσης μαγνητικής ενέργειας (SMES), κυψέλες καυσίμου (FCs) και υδροηλεκτρική αντλία. Αυτές οι συσκευές διαφέρουν μεταξύ τους όσον αφορά το ρυθμό φόρτισης και απόρριψης, τον κύκλο ζωής, την πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, την αποδοτικότητα κλπ. Γενικά κατατάσσονται σε τρεις ομάδες αναφορικά με τον τύπο της αποθηκευμένης ενέργειας, δηλ. την αποθήκευση ηλεκτρικής, χημικής και μηχανικής ενέργειας όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.



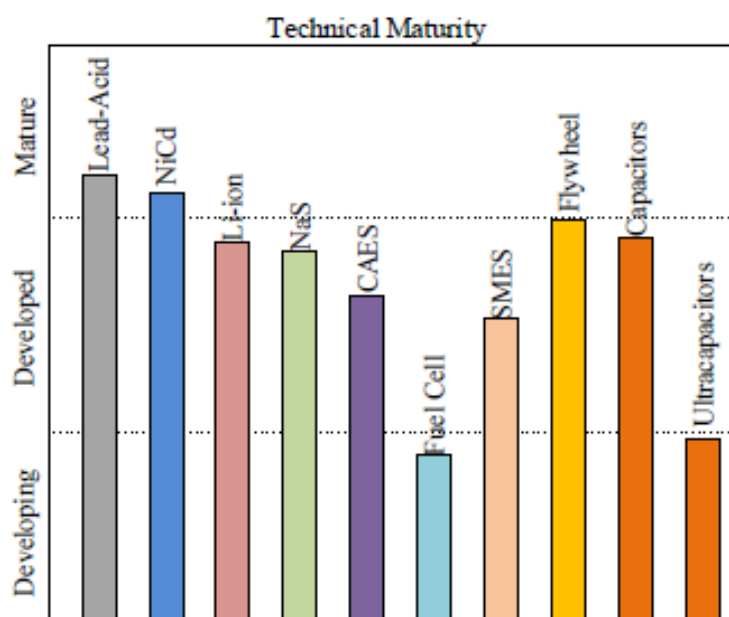
ΣΧΗΜΑ 0.1 Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας, [5.1]

Η τεχνολογική εξέλιξη των διαφορετικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας απεικονίζεται στο σχήμα 5.2, τα οποία χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, ώριμες, αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες τεχνολογίες. Το μόλυβδο-οξύ είναι μια ώριμη τεχνολογία, που έχει χρησιμοποιηθεί για πάνω από 100 χρόνια. NiCd, NaS, σφόνδυλος, υπερ-πυκνωτής και SMES είναι τεχνολογίες που είναι εμπορικά διαθέσιμες. Ωστόσο, μέχρι σήμερα, δεν χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα.

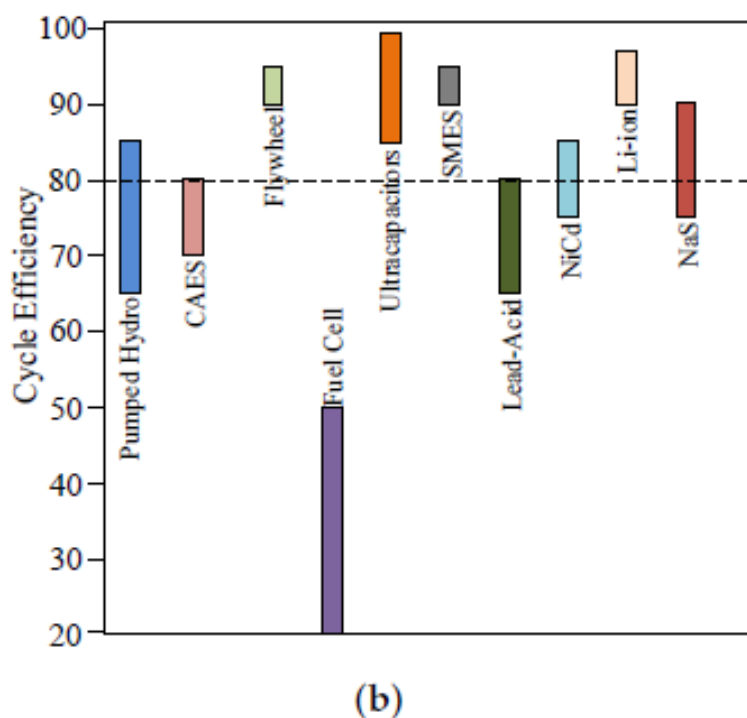
Η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται ακόμα στη φάση ανάπτυξης με δείγματα υψηλής απόδοσης εις το μέλλον, καθώς αποθηκεύει υδρογόνο που η χρήση του είναι σημείο αυτής της έρευνας . Η απόδοση ενός κύκλου του ESS ορίζεται ως $h = E_{out} / E_{in}$

Οπού E_{out} και E_{in} είναι η ενέργεια εξόδου και εισόδου αντίστοιχα.

Η αποτελεσματικότητα της διαφορετικής αποθήκευσης ενέργειας απεικονίζονται στο σχήμα 4β, στο οποίο δείχνει ότι ο σφόνδυλος, ο SMES και ο υπέρ-πυκνωτής έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης. [5.2].



(a)



ΣΧΗΜΑ 0.2 (α) Τεχνολογική εξέλιξη και (β) Αποδοτικότητα διαφορετικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (5.3)

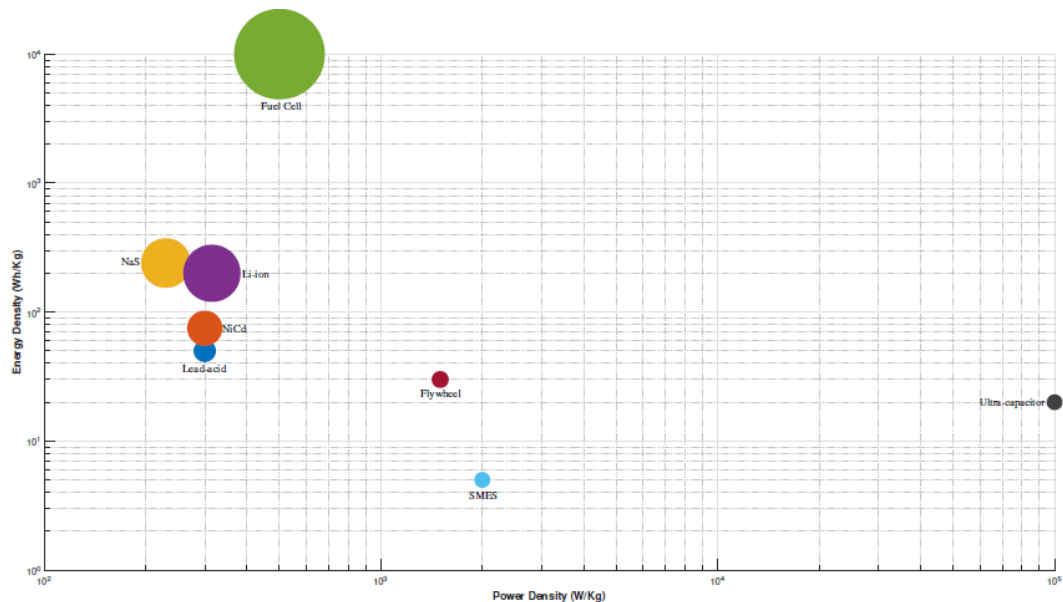
5.1 Σύστημα Υβριδικής Αποθήκευσης Ενέργειας HESS

Το Σύστημα Υβριδικής Αποθήκευσης Ενέργειας (HESS) είναι ένας συνδυασμός από τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά την ενεργειακή χωρητικότητα, τη διάρκεια κύκλου ζωής, τη φόρτιση και το ποσοστό εκφόρτωσης, της πυκνότητας ενέργειας, ισχύος, του ποσοστού απόκρισης, και την διάρκεια ζωής. Το σχήμα 5.3 απεικονίζει την σύγκριση πυκνότητας ενέργειας, πυκνότητας ισχύος και κόστους (\$ / kW).

Οι τεχνολογίες ESS μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τεχνολογίες με υψηλή ενέργεια και ισχύος. Ενεργειακές συσκευές όπως μπαταρία, κυψέλη καυσίμου, υδροηλεκτρική αντλία και CAES μπορούν να τροφοδοτήσουν με ενέργεια για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, αλλά η ισχύς τους είναι χαμηλή. Από την άλλη πλευρά, συσκευές όπως ένας σφόνδυλος, ο υπέρ-πυκνωτής, οι SMES και οι μπαταρίες

μπορούν να τροφοδοτήσουν με υψηλότερη ισχύ, αλλά για μικρότερη χρονική διάρκεια Παρατηρείται ότι η τεχνολογία των μπαταριών μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις δύο κατηγορίες λόγω του ευρύ φάσματος χαρακτηριστικών και μεταβλητότητας που διαθέτουν. Χρησιμοποιώντας υβριδική τεχνολογία με συσκευές υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας θα αποφέρει μια καλύτερη ισχύ σε ένα ESS [5.4].

Με αυτόν τον τρόπο, οι συσκευές υψηλής ενέργειας θα παρέχουν μακροπρόθεσμη ισχύ ενώ οι συσκευές υψηλότερης ισχύος θα τροφοδοτούν για σύντομη χρονική διάρκεια σε περιπτώσεις με υψηλότερες ανάγκες λειτουργίας. Οι εφαρμογές απεικονίζονται στον Σχήμα 5.4.



ΣΧΗΜΑ 0.3 Διάγραμμα : Σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας [5.4].

Πίνακας 0.1 Πιθανές διαμορφώσεις συστημάτων υβριδικής αποθήκευσης ενέργειας (HESS) [5.4]

Energy Supplier	Power Supplier	References
Battery	Ultra-capacitor	[79,80]
	SMES	[81]
	Flywheel	[82,83]
Fuel cell	Flywheel	–
	SMES	[84]
	Ultra-capacitor	[85]
	Battery	[86]
CAES	Flywheel	[87]
	SMES	–
	Ultra-capacitor	[88]
	Battery	–

5.2 Energy Storage Devices for All-Electric Ships

Η σημασία της ανάπτυξης και της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (ESD) στα πλοία επισημαίνεται στον Οδικό Χάρτη Τεχνολογικής Ανάπτυξης το 2007 και το 2013 [5.5], όπου οι μπαταρίες, πυκνωτές (UC), και οι flywheels συζητούνται ως μελλοντικές εφαρμογές ESD.

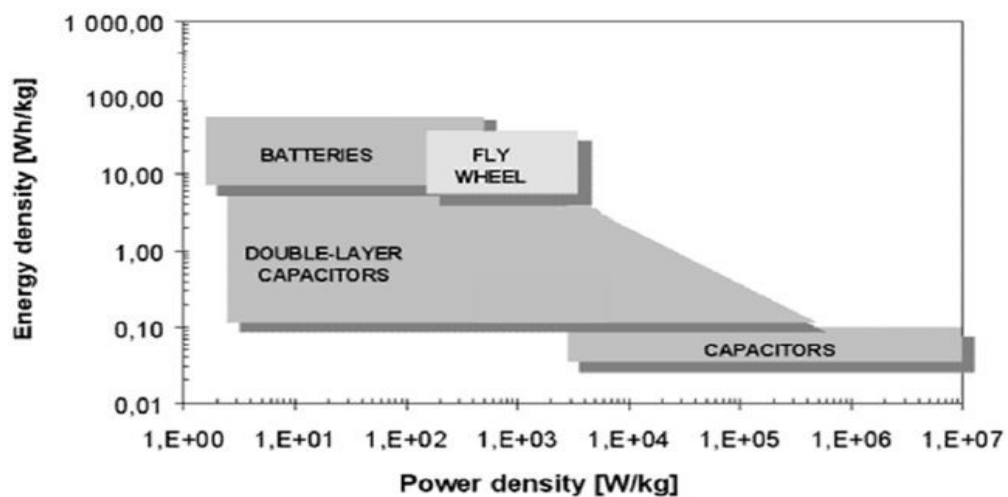
Η μπαταρία είναι η πρώτη ηλεκτροχημική συσκευή με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα αλλά σχετικά χαμηλή πυκνότητα ισχύος. Αντίθετα, οι υπέρ-πυκνωτές (super-capacitor) αποθηκεύουν ενέργεια σε μια ηλεκτρική περιοχή χωρίς χημικές αντιδράσεις για μικρή χρονική διάρκεια, ενώ οι Flywheels αποθηκεύουν ενέργεια μηχανικά με τη μορφή κινητικής ενέργειας.

Και οι δύο αποδίδουν πυκνότητα ισχύος, που είναι πολύ υψηλότερα από εκείνη των μπαταριών. Ωστόσο, το χαμηλότερο ποσοστό πυκνότητας ενέργειας καθιστούν τους υπέρ-πυκνωτές και Flywheels ακατάλληλοι για συνεχή λειτουργία.

Από το γράφημα Ragone των μπαταριών, υπέρ-πυκνωτής (πυκνωτές διπλής στρώσης) και Flywheels υποδηλώνουν ότι πρέπει να υπάρχουν διάφοροι συνδυασμοί για διαφορετικές εφαρμογές. [5.6].

Χρησιμοποιώντας μόνο έναν μόνο τύπο ESD μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του μεγέθους, του βάρους και του κόστους των ηλεκτρικών μεταφορών [5.7].

Ο συνδυασμός των διαφόρων τύπων ESDs ορίζεται ως σύστημα αποθήκευσης υβριδικής ενέργειας (HESS).



ΣΧΗΜΑ 0.4 Είδη μέσων αποθήκευση ενέργειας [5.11]

Τα ESD και τα HESS έχουν ερευνηθεί από την αυτοκινητοβιομηχανία και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές, όπως σε ηλεκτρικά / υβριδικά οχήματα [5.8.1-4], μικρό-δίκτυα [5.9.1-2] και αδιάλειπτα τροφοδοτικά (UPS) [5.10]. Ωστόσο, οι ESD / HESS στις θαλάσσιες εφαρμογές εξακολουθούν να έχουν μην χρησιμοποιούνται ευρέως [5.10].

Τα UCs και οι Flywhels είναι οι καλύτεροι μηχανισμοί για τον μετριασμό των παλμών ισχύος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το φορτίο ισχύος παλμού είναι συνήθως υψηλό και σύντομης διάρκειας. Το UC και το τα Flywheels έχουν υψηλότερη πυκνότητα ισχύος από την μπαταρία. Επιπλέον, το UC και το Flywheel έχουν γρήγορη δυναμική απόκριση ώστε να αντισταθμίζεται το φορτίο ισχύος στιγμιαία. Για φορτίο μακράς διάρκειας, προτιμάται η μπαταρία λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Σε σύγκριση με UC και Flywheels το κύριο μειονεκτήματα της μπαταρίας είναι η σχετικά μικρή διάρκεια ζωής της και η περιορισμένη ικανότητα επαναφόρτιση της λόγω μεγάλου χρόνου φόρτισης .

Επιπλέον, καθώς η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται, η εσωτερική αντίσταση της θα αυξηθεί, οδηγώντας σε αυξημένες απώλειες. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι περιορισμοί της μπαταρία, το σύστημα HESS, έρχεται σαν μια αποδεκτή λύση με την χρήση συμπληρωματικής ενέργειας.

Τα χαρακτηριστικά κάθε ESD συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα. Σημειωτέο ότι τα προτιμώμενα χαρακτηριστικά είναι μπλε και τα ανεπιθύμητα είναι κόκκινα.

Πίνακας 0.2 Έλεγχος και βελτιστοποίηση του ηλεκτρικού πλοίου. Συστήματα πρόωσης με υβριδική ενέργεια, Jun. Hou, University of Michigan 2017. [5.11].

	Battery	UC	Flywheel
Energy density	High	Low	Medium
Power density	Low	High	Medium
Cycle life	Short	Medium	Long
Recharge rate	Low	High	Medium
Self-discharge	Low	Medium	High

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣΣΕ MICROGRIDS-SHIPBORAD

Η τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας έχει αρκετά μειονέκτημα τα αλλά και πάρα πολλά πλεονεκτήματα και κυρίως σε μικρά δίκτυα πλοίων όπου κυρίως έχουν εφαρμογή σε μικρά και μεσαία πλοία.

Το ESS μπορεί να προσφέρει οφέλη στα θαλάσσια σκάφη ως εξής:

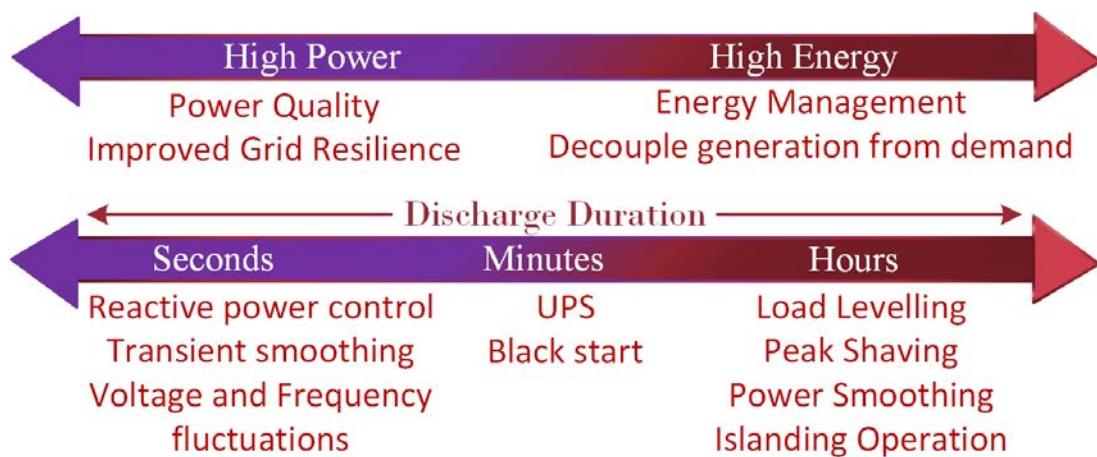
- Βελτιώνει τη σταθερότητα του συστήματος, που προκύπτει λόγω της αργής απόκρισης των κινητήρων στη ζήτηση φορτίου.
- Μειώνει το λειτουργικό κόστος λόγω μικρότερης συντήρησης του κινητήρα και μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου.
- Ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο συσκότισης εγκαθιστώντας ένα ESS ως UPS, έτσι ώστε να παρέχει ταχύτερη απόκριση σε μια διακοπή ρεύματος σε σύγκριση με τις γεννήτριες έκτακτης ανάγκης.
- Το ESS λειτουργεί ως πρόσθετο απόθεμα ισχύος, επομένως παρέχει ισχύ σε περίπτωση βλάβης της γεννήτριας.
- Επιπλέον, μπορεί να ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των γεννητριών που έχουν συνδεθεί στο διαδίκτυο για τη βελτίωση του πλεονασμού του συστήματος ισχύος.
- Το ESS μπορεί επίσης να βοηθήσει στο ψαλίδισμα κορυφής της ενέργειας, στην ισοπέδωση του φορτίου, στην εξομάλυνση της ισχύος, στη συχνότητα και στην τάση διακύμανσης φορτίου και ισχύος.
- Μειώνει τα όρια φορτίου, έτσι επιτρέπει τη γρήγορη απόκριση του σκάφους και ενισχύει τις δυνατότητες ελιγμών.
- Επιτρέπεται η καλύτερη διαχείριση ενέργειας με την αποθεματική ισχύ.

Στο σχήμα 6.1 απεικονίζει τους χρονισμούς εκφόρτωσης διαφορετικών εφαρμογών της αποθηκευμένης ενέργειας.

Μπορεί να διαπιστωθεί ότι για την ελαχιστοποίηση του φορτίου, το ψαλίδισμα κορυφής και η εξομάλυνση της ισχύος είναι εφαρμογές που χρειάζονται πολύ χρόνο για την εκφόρτωση της ενέργειας, η οποία έχει αποθηκευτεί στο ESS. Για αυτό τούτου, μπαταρίες τύπου ιόντων λιθίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτές τις εφαρμογές.

Από την άλλη πλευρά, οι εφαρμογές UPS και εκκίνησης απαιτούν υψηλή πυκνότητα ισχύος, έτσι οι υπέρ-πυκνωτές και οι σφόνδυλοι είναι οι πλέον ιδανικοί για εφαρμογές ESS.

Στον σχήμα 6.2 συγκρίνονται διαφορετικές εφαρμογές συσκευών αποθήκευσης ενέργειας για τα μικροσυστήματα του πλοίου.



ΣΧΗΜΑ 0.1 Εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας και χρονισμοί εκφόρτωσης τους. 'Energy Storage Systems for Shipboard Microgrids. , Aalborg University, December 2018 [6.1].

Πίνακας 0.1 Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών εφαρμογών του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (ESS). [6.2].

Type	Functionality	Stored Capacity
Peak shaving	peak the shaves by energy storage or additional generators	Large
Power smoothing	smooth short term fluctuations by adding local energy storage system	Small
Power ramp-rate limitation	limit the power slew-rate by the addition of energy storage	Small
Load levelling	store energy to ESS when electricity is cheap or when there is light loading and delivers it when the electricity is expensive or when there is a high load demand	Medium

6.1 Διαχείριση ενέργειας για τα ηλεκτρικά πλοία

Στην ισορροπία φόρτωσης αποθηκεύει την ισχύ όταν υπάρχει φόρτιση στο σύστημα τροφοδοσίας, Όταν υπάρχει μεγάλη ζήτηση φορτίου, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας προμηθεύει ενέργεια και επομένως μειώνει τη ζήτηση φορτίου, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα τη μικρότερη οικονομική παραγωγή ενέργειας.

Από την άλλη πλευρά, στις μέτριες απαιτήσεις ενέργειας, ονομάζονται κορυφαία κοψίματα, που συνήθως υιοθετούνται σε μεγαλύτερη κλίμακα από τις εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και μερικές φορές και από εμπορικές εταιρείες προκειμένου να εξοικονομηθούν χρήματα αγορά ενέργεια κατά τη διάρκεια χαμηλής ζήτησης και πουλώντας της κατά τη διάρκεια της υψηλής ζήτησης [6.3].

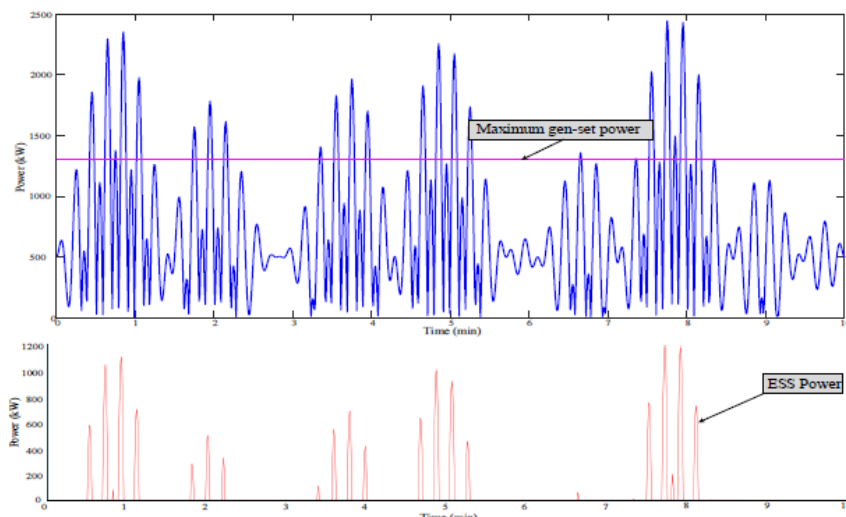
Προς το παρόν, η μπαταρία Lion ESS έχει υιοθετηθεί για να καλύψει τα μεταβλητά φορτία σε ηλεκτρικά πλοία που βρίσκονται σε μικρότερες διαδρομές, όπως MF Ampere (μήκος διαδρομής 5,6 χλμ.), MF Folgefonn (μήκος διαδρομής 5,6 χλμ.), και το Aero Ferry (μήκος διαδρομής περίπου 24 χλμ.).

Τα οικονομικά οφέλη που προέρχονται από το κόστιμο κορυφής (peak) της ενέργειας και τις λειτουργίες ισορροπίας φορτίου [6.3].

Επομένως, το ESS μπορεί να είναι χρήσιμο στη μείωση του μεγέθους και των αριθμού των γεννητριών για την αντιμετώπιση μεταβλητών φορτίων με την ψαλίδιση των (peak) ενέργειας.

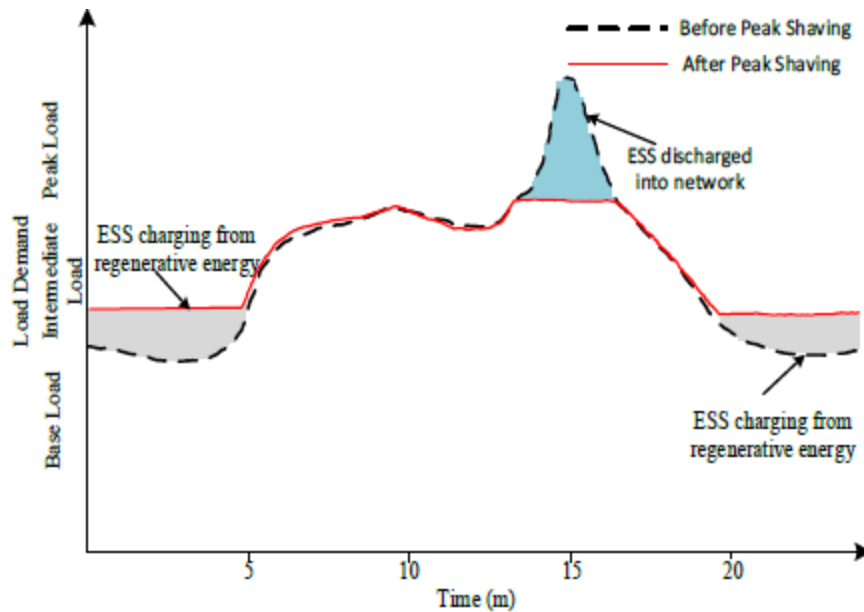
Ακόμη η εξομάλυνση των φορτίων, μειώνει κατά συνέπεια τις εκπομπές, την κατανάλωση καυσίμου καθώς και τη φθορά στις μηχανές. Για παράδειγμα ένα κατανεμημένο ESS περιέχει μια μπαταρία (NaS) που χρησιμοποιείται για το ψαλίδισμα προκειμένου να μετριαστούν οι περιορισμοί της μεταφορικής ικανότητας [6.3]. Ακόμη 1 MW ESS που βασίζεται σε μπαταρία ιόντων λιθίου εγκαθίσταται στο ναυπηγείο Nagasaki για τις εργασίες ψαλιδίσματος κορυφής της ενέργειας [6,4].

Μια προοπτική είναι να χρησιμοποιηθεί το σύστημα ESS για την κορυφή ενέργειας όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3. Όταν ένα θαλάσσιο σκάφος προσεγγίζει κοντά στο λιμάνι και στο λιμάνι απαιτείται γρήγορη απόκριση για ελιγμούς όπου απαιτεί επιπρόσθετη ενέργεια, το σύστημα ESS μπορεί να είναι χρήσιμο σε αυτό το σενάριο πλοήγησης.



ΣΧΗΜΑ 0.2 Εφαρμογή αιχμής στο σκάφος. [6.5].

Σε εφαρμογές όπου απαιτούνται εργασίες ζήτησης ενέργειας όπως σε φόρτωση και εκφόρτωση προϊόντων με χρήση γερανών υπάρχει η δυνατότητα χρήσης του ESS με τέτοιο τρόπο ώστε να βοηθήσει στο ψαλίδισμα των κορυφών ζήτησης ενέργειας και την μείωση του φορτίου όπως φαίνεται στην σχήμα 6.4.



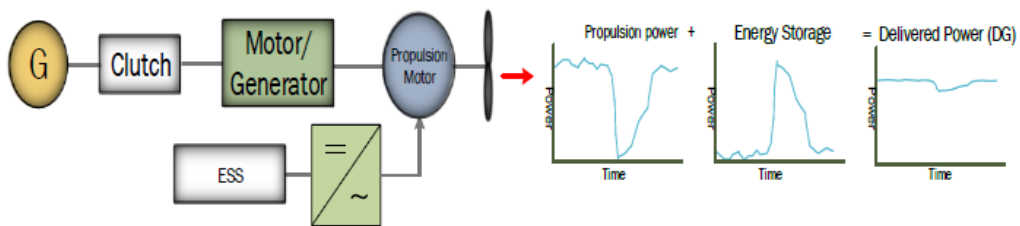
ΣΧΗΜΑ 0.3 Εφαρμογή ESS για ξυρίσματος κορυφής και ισοστάθμιση φορτίου. [6.5].

6.2 Εξομάλυνση Ισχύος

Ο έλεγχος εξομάλυνσης της ισχύος με μπαταρία σε ένα microgrid του πλοίου που βασίζεται στη χρήση μη γραμμικών προγνωστικών ελέγχου [6.6]. Σε μεγάλα σκάφη, οι διακυμάνσεις της ισχύος είναι αρκετά υψηλές, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα σε διακυμάνσεις της συχνότητας να προκαλέσει φθορά των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας και δικτύου. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα, η ενσωμάτωση μπαταριών με μονάδα (DC / AC) είναι μια λύση. Ωστόσο, λόγω ότι οι υψηλές διακυμάνσεις που προκαλούνται από τα φορτία πρόωσης, οι οποίες οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας των μπαταριών, συνιστάται η χρήση φίλτρου διέλευσης ζώνης με βελτιστοποιημένες παραμέτρους συχνότητας αποκοπής με βάση πρότυπο ελέγχου. Μπορούν επίσης να προστεθούν τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως

οι μπαταρίες δίπλα στους κινητήρες προπέλας για την εξομάλυνση των ταλαντώσεων ισχύος όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.5.

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να εξομαλύνει την ενέργεια, δίνοντας ενέργεια στις peak κορυφές και ελέγχοντας την ταχύτητα (MW / λεπτό) προκειμένου να εξαιρεθεί η ταχεία αύξηση της τάσης και ισχύος από τις διακυμάνσεις στο δίκτυο. Ο υπέρ-πυκνωτής, η κυψέλη καυσίμου, η μπαταρία, ο σφόνδυλος και τα SMES είναι οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στην αιολική ενέργεια για εφαρμογές εξομάλυνσης ισχύος άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην Ναυτιλία ,με χρήση microgrids σε ένα πλοίο.



ΣΧΗΜΑ 0.4 Εξομάλυνση ισχύος με χρήση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας.[6.6].

6.3 Διακυμάνσεις συχνότητας και τάσης

Τα βαριά φορτία όπως τα παλμικά φορτία (κινητήρες πρόωσης, αντλίες, προωθητήρες κ.λπ.) μπορούν να τραβήξουν μεγάλη ισχύ σε σύντομο χρονικό διάστημα. Εάν αυτή η ισχύς υπερβαίνει ορισμένα όρια, μπορεί να οδηγήσει σε διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας. Για να αποφευχθούν τέτοιες διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας, οι αρχές τυποποίησης έχουν καθορίσει περιορισμούς για τέτοιες διακυμάνσεις. Μεταξύ αυτών, IEC 60092-101 το οποίο είναι ένα εκτεταμένο πρότυπο, το οποίο καθορίζει τον περιορισμό για τις διακυμάνσεις συχνότητας και τάσης όπως απεικονίζεται στην σχήμα 6.6. Τα άλλα πρότυπα DNV 5.7 και Lloyds Register of

Shipping (LRS) έχουν τους ίδιους περιορισμούς μόνο για τη συχνότητα και για διακυμάνσεις τάσης σε περίπτωση μικρότερης περιόδου, θέτοντας τον περιορισμό μεταξύ 15% έως 20%. Επιπλέον, σε περίπτωση σταθερής κατάστασης, τα πρότυπα DNV είναι περιορισμένα οι διακυμάνσεις τάσης στο 2,5%.

Πίνακας 0.2 Επιτρεπόμενη συχνότητα και τάση σύμφωνα με το IEC 60092-101 στα μικροσυστήματα του πλοίου.

IEC 60092-101			
	Steady State	Transient State	
	Magnitude	Magnitude	Duration
Voltage	-10% to +6%	±20%	1.5 s
Frequency	±5%	±10%	5 s

Το ESS διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση των διακυμάνσεων τάσης και συχνότητας. Ένα HESS βασισμένο στον βελτιωμένο αλγόριθμο παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT), βελτιώνει την απόδοση των εγκαταστάσεων στο σύστημα ισχύος του πλοίου.[6.8].

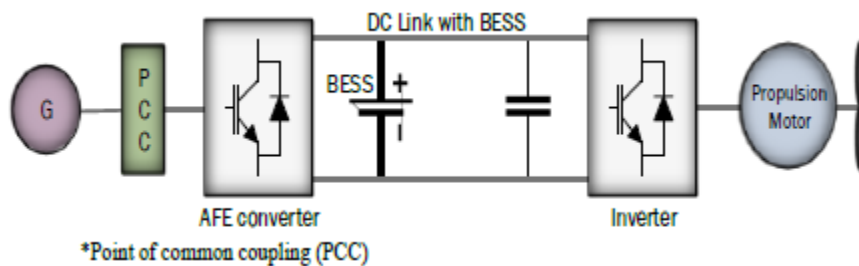
Αυτή η στρατηγική βοηθά στην εξομάλυνση και ρύθμιση των ταλαντώσεων συχνότητας. Ακόμη η ιεραρχική συχνότητα βασισμένη στον αλγόριθμο ελέγχου χρησιμοποιείται για την εκχώρηση ταλαντώσεων χαμηλότερης συχνότητας στη μπαταρία και την υψηλότερη συχνότητα ταλαντώσεις στον υπέρ-πυκνωτή.

Ο βελτιωμένος αλγόριθμος MPPT συμβάλλει περαιτέρω στη μείωση της εγκατεστημένης ισχύς του HESS. Ο Viknash Shagar et al. [6.9] χρησιμοποίησε στρατηγικές ελέγχου, όπως το μοντέλο πρόβλεψης ελέγχου (MPC) για να ελαχιστοποιήσει τις διακυμάνσεις συχνότητας εντός του επιτρεπόμενου ορίου όπως συνιστάται από τα πρότυπα σε ένα σύστημα τροφοδοσίας επί του πλοίου.

Επιπλέον, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες μπορεί να συνδεθεί άμεσα με τη ζεύξη DC του μετατροπέα συχνότητας σε σύγκριση με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις στο οποίο το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας (BESS) είναι συνδεδεμένο μέσω μετατροπέων DC-DC.

Παρατηρείται περαιτέρω ότι οι μεταβολές στα φορτία υπηρεσίας έχουν μικρότερο αντίκτυπο σε σύγκριση στις μεταβολές στα φορτία πρόωσης, οι οποίες έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο στη συχνότητα των γραμμών διαύλου. Επίσης, η BESS έχει ενσωματωθεί σε ένα σύστημα ισχύος του πλοίου για να μετριάσει αυτές τις διακυμάνσεις της συχνότητας.

Ένα τέτοιο σύστημα απεικονίζεται στην σχήμα 6.5 όπου χρησιμοποιείτε ένα 1000 kW BESS με έναν πυκνωτή DC-link και έναν ενεργό εμπρόσθιο (AFE) μετατροπέα προκειμένου να αυξηθεί η τάση και η ποιότητα της συχνότητας μαζί για την καταστολή των αρμονικών του δικτύου.



ΣΧΗΜΑ 0.5 Ενσωμάτωση του BESS με ενσωματωμένα συστήματα ισχύος (IPS) [6.9].

6.4 Ποιότητα ισχύος

Σήμερα, η ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας έχει γίνει ένα σημαντικό θέμα στα microgrids του πλοίου. Τα ζητήματα ποιότητας μπορεί να είναι οι βηματισμοί τάσης, οι διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας, η αρμονική μόλυνση, κλπ.

Η αρμονική παραμόρφωση είναι ένα από τα βασικά ζητήματα, τα οποία προκύπτουν λόγω της παρουσίας μη γραμμικών φορτίων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκτεταμένη χρήση μη γραμμικών φορτίων στο πλοίο microgrids σε παραμόρφωση στην κυματομορφή της τάσης, επηρεάζοντας έτσι ολόκληρο το σύστημα ισχύος.

Η χρήση μετατροπέων που βασίζονται σε ηλεκτρική ισχύ σε πλοία όπως το σύστημα πρόωσης, οι συμπιεστές και οι προωθητήρες έχουν αυξηθεί σε υψηλό επίπεδο αλλά και μέγεθος ισχύος. Στα μη γραμμικά φορτία σε φορητά πλοία μπορεί να φτάσει μέχρι και το 80% του συνόλου ικανότητας επί του σκάφους.

Οι διακυμάνσεις της συχνότητας και η μεγάλη έκταση της αρμονικής παραμόρφωσης σε ένα πλοίο είναι δύσκολο να μετρηθούν. Οι πιο χρησιμοποιούμενες λύσεις για θέματα ποιότητας ισχύος όπως και στα επίγεια δίκτυα είναι η εφαρμογή παθητικών και ενεργών φίλτρων ισχύος [6.10 & 6.11].

Δεδομένου ότι τα μικροσυστήματα του πλοίου μπορούν να θεωρηθούν ως αυτοδύναμα μικροσυστήματα, οι λύσεις που εφαρμόζονται στα χερσαία δίκτυα μπορούν να επεκταθούν και στα μικροσυστήματα πλοίων.

Όσον αφορά το πρότυπο IEC 61000-4-7, το μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα συγχρονισμού μεταξύ της συχνότητας του συστήματος ισχύος και του συγχρονισμού θα πρέπει να είναι εντός της περιοχής 0,03% της ονομαστικής συχνότητας του συστήματος ισχύος. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, μερικές μέθοδοι για την εκτίμηση των αρμονικών σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ισχύος επί του πλοίου με τη χρήση ανάλυσης (Fourier) για διαφορετικές μεθόδους συγχρονισμού και επίπεδα ισχύος [6.12]

Διάφοροι οργανισμοί θαλάσσιας επιτήρησης, στους οποίους περιλαμβάνονται οι DNV, LRS, IEEE Std 45-2002, IEC 60092-101 και το Αμερικανικό Γραφείο Ναυτιλίας (ABS) προτείνουν περιορισμό της ηλεκτρικής ενέργειας επί του πλοίου.

Όπως αναφέρεται στο IEC 60092-101, η συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) δεν πρέπει να υπερβαίνει τον 5%, δεδομένου ότι καμία αρμονική δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3% της βασικής τάσης. Οι περιορισμοί της αρμονικής παραμόρφωσης παρουσιάζονται στον Σχήμα 6.7.

Πίνακας 0.3 [6.13]

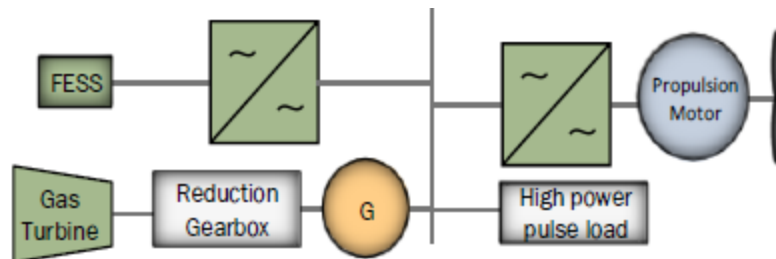
	Different Standards				
	DNV	LRS	IEEE Std 45-2002	IEC 60092-101	ABS
Total harmonic distortion (THD)	8%	8%	5%	5%	5%
Single harmonic distortion	5%	1.5%	3%	3%	3%

Για τις αρμονικές προτείνεται πολύ-αρθρωτή HESS με βάση τον μετατροπέα DC-DC για σύστημα ισχύος του πλοίου μέσου ρεύματος συνεχούς ρεύματος (MVDC) [4.13]. Με τη χρήση μιας εικονικής στρατηγικής που βασίζεται στην χρήση ενεργού φίλτρου συνεχούς ρεύματος, η οποία συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας ισχύος του διαύλου με τη χρήση βοηθητικών συσκευών όπως με τη χρήση της μπαταρίας.

Το FESS προτείνεται ως μια εφικτή προσέγγιση για την εξοικονόμηση σημαντικών καυσίμων στην κατηγορία DDG51 Arleigh Burke για την υποστήριξη παλμικού φορτίου που βασίζεται στην ισχύ.[4.14].

Το FESS επιτρέπει τη χρήση μιας μόνο γεννήτριας στροβίλων κοντά σε ένα πλήρες φορτίο αντί να χρησιμοποιεί την παραδοσιακή πρακτική της λειτουργίας δύο

γεννητριών στροβίλων σε λιγότερο από το μισό φορτίο. Σε αυτή τη στρατηγική, βοηθά στην εξοικονόμηση καυσίμων, βελτιώνει την αξιοπιστία και την ποιότητα της ισχύος του συστήματος ισχύος του πλοίου.



ΣΧΗΜΑ 0.6 FESS Σύστημα [4.14].

6.5 Προκλήσεις της ενσωμάτωσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας στα μικροστοιχεία του πλοίου

Τα ηλεκτρικά πλοία αντιμετωπίζουν τεράστιες διακυμάνσεις φορτίου λόγω του συστήματος πρόωσης, τα οποία επηρεάζουν την αξιοπιστία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και μπορούν να προκαλέσουν φθορά και κατάρρευση του ηλεκτρικού δικτύου.

Ως εκ τούτου, τα σύγχρονα microgrids του πλοίου πρέπει να σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια απόδοσης και λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις διεθνή περιβαλλοντικές ανησυχίες.

Αυτές οι απαιτήσεις απαιτούν να βελτιωθούν οι μέθοδοι σχεδιασμού των σκαφών και η λειτουργία τους. Το ESS μπορεί να θεωρηθεί ως κύρια πηγή ενέργειας ή ως πλεονασματική πηγή ενέργειας. Στη βιομηχανία αλλά και σε συστήματα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν πολλά έργα όπου η αποθήκευση ενέργειας έχει χρησιμοποιηθεί σε επίγεια μικροσυστήματα για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των αλλαγών στα φορτία τις κρίσιμες παραμέτρους του συστήματος. Ωστόσο, στα microgrids του πλοίου, τέτοιες προσεγγίσεις δεν έχουν ακόμη εφαρμοστεί ευρέως. Πρόσφατα, οι τεχνικές ελέγχου που χρησιμοποιούνται είναι ο προσαρμοστικός

έλεγχος, βελτιστοποίηση, έλεγχος αναλογικής ολοκλήρωσης (PI), έλεγχος ενεργού και αντιδραστικής ισχύος (PQ).

Οι απότομες μεταβολές στα φορτία πλοίων λόγω δυναμικών φορτίων , όπως ραντάρ υψηλής ισχύος, επαγωγικά φορτία σε φάση φόρτωσης και εκφόρτωσης προϊόντων, σε μεταβολές του καιρικών φαινομένων αλλάζουν γρήγορα τη ζήτηση ισχύος.

Αυτά τα ζητήματα μπορεί μειώσουν την αποδοτικότητα ολόκληρου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αν δεν χειριστεί σωστά. Επιπλέον, οι τεχνολογίες ESS είναι αρκετά δαπανηρές και βασίζονται σε συσκευές μετατροπής ισχύος ανάλογα με το σύστημα τροφοδοσίας AC ή DC. Σε αυτή την περίπτωση, ίσως θα ήταν η εγκατάσταση ESS ως μέρος των κινητήριων κινήσεων όπως φαίνεται στο σχήμα, προκειμένου να εξαλειφθεί η απαίτηση πρόσθετων συσκευών μετατροπής ισχύος, με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος και το βάρος. Σε αυτό το σενάριο, εγκαθιστώντας ESS παράλληλα με ένα AFE.

Τα πακέτα μπαταριών είναι αρκετά βαριά και χρειάζονται πολύ χώρο αλλά μπορούν να αντικαταστήσουν τουλάχιστον έναν κύριο κινητήρα από το σκάφος. Το άλλο θέμα με την τεχνολογία μπαταριών περιλαμβάνει τη διάρκεια ζωής, η ταχεία φόρτιση και εκφόρτωση των μπαταριών που μπορεί να οδηγήσει σε θερμότητα, η οποία προκαλεί περαιτέρω μείωση τη διάρκειας ζωής μιας μπαταρίας.

Για να λυθεί αυτό πρόβλημα, η επίδραση των υπέρ-πυκνωτών, του σφονδύλου, των κυψελών καυσίμου κ.λπ. μπορεί να είναι επωφελής. Αυτά τα συστήματα εγκατεστημένα με τις μπαταρίες μπορούν να βελτιώσουν την ταχύτητα φόρτισης και εκφόρτωσης, να αυξηθεί ο χρόνος ζωής, να βελτιωθεί πυκνότητα ισχύος.

Η χρήση ενός μόνο συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να μην είναι ιδανική λύση, καθώς οι μπαταρίες μπορούν να παρέχουν μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα, ενώ ο σφόνδυλος, και ο υπέρ-πυκνωτής μπορεί να παρέχουν υψηλότερη πυκνότητα ισχύος. Οι μπαταρίες έχουν επίσης μικρό κύκλο ζωής σε σύγκριση με την υψηλότερη πυκνότητα ισχύος πηγών ενέργειας. Ως εκ τούτου, η χρήση υβριδικού συστήματος δύο συσκευών αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να είναι μια ενδιαφέρουσα λύση για εφαρμογή εις το πλοίο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

7. ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ BATTERIES

7.1 Εισαγωγή στις Μπαταρίες

Τα τελευταία 150 χρόνια η μπαταρία μολύβδου οξέος, ο ψευδάργυρος-άνθρακας ξηρός καθώς και η μπαταρία νικελίου-καδμίου ήταν οι πιο συνηθισμένοι τύποι μπαταριών. Τα τελευταία όμως χρόνια οι μπαταρίες έχουν εξελιχθεί αρκετά.

Οι μπαταρίες είναι συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδραση. Οι μπαταρίες κατηγοριοποιούνται ως πρωτογενείς και δευτερογενείς τύποι

Η μπαταρία μολύβδου οξέος είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μπαταρία στην αγορά. Χρησιμοποιείτε για αδιάλειπτη παροχή ρεύματος (UPS) [7.1-7.4], αυτοκίνητα[7.5- 7.7] . Η αύξηση της ζήτησης ενέργειας και ισχύος από υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα οδηγεί σε μεγάλη ζήτηση μπαταριών οι οποίες είναι σε θέση να παράγουν υψηλότερα πυκνότητα ενέργειας από την μπαταρία μολύβδου-οξέος.

Οι μπαταρίες που μπορούν να παρέχουν βελτιωμένη ενέργεια και ισχύ πυκνότητα είναι μετάλλου νικελίου (NiMH) και λιθίου (ιόντων λιθίου). Αν και το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό, ακόμη υιοθετούνται για διάφορες εφαρμογές, κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία, κάμερες, ιατρικές συσκευές και στα κινητά τηλέφωνα.

Ο Πίνακας 7.1 δείχνει τον διαφορετικό τύπο συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συνάρτηση με την πυκνότητα ισχύος, την ενέργεια την πυκνότητα, το κόστος, την αποδοτικότητα και τη διάρκεια ζωής, ενώ στον Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται διαφορετικοί τύποι αποθήκευσης ενέργειας κατάλληλες για θαλάσσια σκάφη.

Φαίνεται ότι οι μπαταρίες όπως τύπου μόλυβδο οξέως, NiCd, NaS, και Li-ion είναι συσκευές υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας, ενώ ο σφόνδυλος, ο υπέρ-πυκνωτής και τα SMES είναι συσκευές υψηλότερης πυκνότητας ισχύος.[7.8,7.9].

Πίνακας 0.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά ESS [7.8,7.9]

System	Power Density (kW/kg)	Energy Density (kWh/kg)	\$/kW	Efficiency (%)	Life Time (years)	Response Time
Lead Acid	75-300	30-50	300-600	65-80	3-15	ms
NiCd	150-300	50-75	500-1500	75-85	5-20	ms
NaS	150-230	150-240	1000-3000	75-90	10-15	ms
Li-ion	150-315	75-200	1200-4000	90-97	5-100	ms-s
Fuel Cells	500+	800-10,000	10,000+	20-50	10-30	ms-min
SMES	500-2000	0.5-5	200-300	90-95	20+	ms
Flywheel	400-1500	10-30	250-350	90-95	15-20	ms-s
Ultra-capacitor	100,000+	20+	100-300	85-98	4-12	ms

Πίνακας 0.1 Σύγκριση είδη μπαταριών [7.8,7.9]

Type of Battery	Advantages	Disadvantages
Lead Acid	Inexpensive Lead is easily recyclable low self-discharge (2-5% per month)	Shorty cycle-life (around 1500 cycles) Cycle life is affected by depth of charge Low energy density (about 30-50 kWh/kg)
Nickel Cadmium	High energy density (50-75 kWh/kg) High cycle count (1500-3000 cycles)	High degradation High cost Toxicity of cadmium metal
Sodium Sulphur	High energy density (150-240 kWh/kg) No self-discharge No degradation for deep charge High efficiency (75-90%)	Temperature of battery is kept between 300 °C to 350 °C
Lithium-ion	Very high efficiency (90-97%) Very low self-discharge (1-3% per month) Low maintenance	Very high cost Life cycle reduces by deep discharge Need special overcharge protection circuit

7.1.1 Μπαταρίες Μόλυβδου οξέως

Οι μπαταρίες μόλυβδου οξέως είναι οι πιο χρησιμοποιημένες μπαταρίες στον κόσμο από το 1890 [7.10] και εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου το κόστος, περιορισμένος κύκλος ζωής και η μικρότερη πυκνότητα ενέργειας δεν παίζουν σημαντικό ρόλο [7.11].

Χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα όπως τα φωτοβολταϊκά (PV) [7.12], ελαχιστοποιώντας τις διακυμάνσεις της παραγωγής από τα αιολικά συστήματα [7.14], έκτακτης ανάγκης [7.13] και σαν μπαταρίες εκκίνησης για μεταφορά όπως στα οχήματα [7.14].

Έχουν μικρό ποσοστό καθημερινής αυτό εκφόρτωσης, συνήθως μικρότερο από 0,3%, γρήγορος χρόνος απόκρισης, χαμηλό κόστος και σχετικά υψηλή απόδοση.

Η διάρκεια του κύκλου ζωής της είναι περίπου 1500 κύκλοι σε βάθος χρόνου και η απόδοση κυμαίνεται από 80 έως 90%. Επιπλέον, η μπαταρία μόλυβδου-οξέος είναι μια ώριμη τεχνολογία, διαθέσιμη με χαμηλό κόστος, εύκολη ανακυκλώσιμη, και απλούστερη τεχνική φόρτισης [7.15]. Ωστόσο, τα μειονεκτήματα αυτού του τύπου μπαταρίας βρίσκονται χαμηλότερα την πυκνότητα ενέργειας και τη χρήση μόλυβδου (επικίνδυνο υλικό). Επιπλέον, δεν είναι κατάλληλο για απορρίψεις πάνω από 20% της ονομαστικής αξίας του, καθώς μειώνει περαιτέρω τον κύκλο ζωής.

7.1.2 Νικέλιο Κάδμιο

Οι μπαταρίες νικελίου καδμίου (NiCd) χρησιμοποιούνται από το 1915. Η μπαταρία χρησιμοποιεί μεταλλικό κάδμιο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο και οξύ υδροξείδιο του νικελίου στο θετικό ηλεκτρόδιο. Έχει μεγαλύτερο αριθμό κύκλων, υψηλότερη ισχύ και πυκνότητα ενέργειας σε σύγκριση με τις μπαταρίες μόλυβδου-οξέος.

Ο χρόνος ζωής των μπαταριών NiCd σε βαθιά εκφόρτωση κυμαίνεται από 1500 έως 3000 κύκλους όπου εξαρτάται από τον τύπο της χρησιμοποιούμενης πλάκας [5.16]. Αυτός ο τύπος μπαταριών χαρακτηρίζεται από την ικανότητα να εργάζεται ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες όπως από - 20 C έως 40 C.

Επιπλέον, αυτές οι μπαταρίες εφαρμόζονται επί του παρόντος μόνο σε σταθερές εφαρμογές, οι οποίες απαγορεύονται στην Ευρώπη λόγω της τοξικότητας του Κάδμιο και το υψηλότερο κόστος [7.17]. Η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται όταν εκφορτώνεται από 20% έως 50% της ονομαστικής αξίας [7.18].

7.1.3 Νάτριο θείου

Οι μπαταρίες Sodium Sulfur (NaS) αποτελούνται από υγρό νάτριο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο και ο υγρό θείου στο θετικό ηλεκτρόδιο, μεταξύ αυτών των δύο υλικών υπάρχει βαλβίδα αλουμινίου που ενεργεί ως ηλεκτρολύτης. Ο κύκλος ζωής των μπαταριών NaS είναι 4500 που είναι λίγο υψηλότεροι από τις μπαταρίες μόλυβδος – οξέος και η απόδοση τους είναι περίπου 75%.

Από την άλλη πλευρά η θερμοκρασία της μπαταρίας διατηρείται στην περιοχή από 300° C έως 350°C. Προκειμένου να διατηρηθεί αυτή η θερμοκρασίας εντός αυτής της περιοχής, απαιτείται μια πηγή θερμότητας, ώστε να βελτιωθεί η απόδοσή τους χρησιμοποιώντας τον δικό της μηχανισμό, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάσει την απόδοσή τους.[7.19].

7.1.4 Ιόντων λιθίου

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου τα τελευταία χρόνια έχουν μεγαλύτερη αναγνωσιμότητα κυρίως από την αρχή του 2000, λόγω των εφαρμογών τους στον τομέα των κινητών και φορητών εφαρμογών όπως φορητοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

Έχει αποδειχθεί ότι αυτές οι μπαταρίες έχουν εξαιρετική απόδοση ειδικά σε ιατρικές συσκευές και φορητών ηλεκτρονικών [7.20]. Το ονομαστικό επίπεδο τάσης

κάθε κυψέλης είναι περίπου 3,7 βολτ σε σύγκριση με την τάση 1,2 Volt των NiCd. Μπαταριών.

Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας και ισχύος σε σύγκριση με τις μπαταρίες NiCd και μόλυβδου-οξέος. Το κύριο εμπόδιο στη χρήση του είναι το υψηλό κόστος, το οποίο είναι περισσότερο από 600 \$ / kWh λόγω της προστασίας από τις υπερφορτώσεις και της συγκεκριμένης συσκευασίας. Επιπλέον, ο βαθμός απόδοσης είναι αρκετά υψηλός συνήθως στην περιοχή από 95-98%, και η διάρκεια του κύκλου ζωής είναι περίπου 5000.

Η ασφάλεια είναι ένα άλλο σοβαρό ζήτημα στις μπαταρίες ιόντων λιθίου καθώς τα περισσότερα ηλεκτρόδια οξειδίου μετάλλου είναι ασταθή και μπορεί να αποσυντεθεί σε αυξημένη θερμοκρασία. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η κατάσταση, οι μπαταρίες είναι εξοπλισμένοι με μια μονάδα έτσι ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική εκφόρτωση και η υπερβολική φόρτιση.

7.1.5 Μπαταρίες σε Υβριδικά Συστήματα

Στις υβριδικές συστοιχίες επιλέγονται οι μπαταρίες ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας, δεδομένου ότι του χαμηλού κόστους και μπορούν να αποθηκεύσουν μια μεγάλη ποσότητα ενέργειας. [7..21].

Η δύναμή της πυκνότητα (kW / kg) είναι ισορροπημένη και η ηλεκτρική απόδοση παραμένει ικανοποιητική για χρήση σε εφαρμογές υβριδικού συστημάτων. Η επιτυχία του συστήματος εξαρτάται από την ανάπτυξη των κατάλληλων τεχνολογιών[7.22]..

Τα χαρακτηριστικά όπως το βάρος και η λειτουργικότητα θεωρούνται σημαντικά Για την επιλογή του κατάλληλου υβριδικού συστήματος σε θαλασσιές εφαρμογές. Η σύγκριση των διαφορετικών τύπων μπαταριών, τύποι και είδη τεχνολογιών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Τα πραγματικά μεγέθη ενέργειας, πυκνότητας

σύμφωνα με τις τιμές των κατασκευασμένων μπαταριών διαφέρουν από τις θεωρητικές τιμές [7.23].

Από τον Πίνακα 7.3, διαπιστώνετε ότι οι μπαταρίες λιθίου έχουν από την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα.

Πίνακας 0.2 Energy density and cost per battery type [7.23]

Type	Wh/kg	Cost [\$/kWh]	Cost [\$/kg]
Lead acid	35	90	3.2
Vanadium-Bromine	50	300	15
Silver Cadmium	70	-	-
Zinc-Bromine	70	-	-
Sodium/nickel chloride	115	110	12.7
Lithium Ion	150	600	90

Πρόσθετα πλεονεκτήματα των ιόντων λιθίου είναι η επίπεδη χαρακτηριστική καμπύλη της πτώσης τάσης κατά το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου λειτουργίας τους [7.24].

Το βασικό μειονέκτημα της εφαρμογής του λιθίου είναι η μεγάλη τους τιμή που υπερβαίνει τα 600 \$ / kWh. Οι Lead acid μπαταρίες φαίνεται να είναι πιο οικονομικές.

Ωστόσο, η χαμηλή αντοχή υλικού στο θαλάσσιο περιβάλλον, όπως διαβρώσεις και σύντομη διάρκεια ζωής (400) φόρτωσης και εκφόρτωσης καθιστούν πιο ακριβή στον τον κύκλο ζωής ενός πλοίου.

Οι μπαταρίες Μόλυβδου οξέος υποφέρουν από ταχεία πτώση τάσης και σε μεγάλο χρονικό διάστημα αποθήκευσης από την αυτό εκφόρτωση [7.25]. Οι μπαταρίες Vanadium Redox και Sodium/Nickel, Na/NiCl I θεωρούνται δυνητικά βιώσιμοι τύποι αποθήκευσης. Τα βασικά χαρακτηριστικά του νατρίου και χλωριούχου νικελίου είναι το χαμηλό βάρος τους, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και η πυκνότητα ισχύος, η

σταθερή καμπύλη φόρτισης και η απόδοση φόρτισης που φτάνει το 92% σε κανονικές καταστάσεις [7.26].

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες Redox είναι αποτελεσματικοί για την αποθήκευση ενέργειας με μηδενικά προβλήματα αυτό εκφόρτωσης. Όμως Η μεμβράνη που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία αυτή για τον διαχωρισμό των αντιδραστηρίων μεταξύ τους πρέπει να αντικατασταθεί μετά από μια χρονική περίοδο, έτσι αυξάνονται το λειτουργικό κόστος συντήρησης του συστήματος μπαταριών [7.27].

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες REDOX έχουν την δυνατότητα γρήγορης επαναφόρτισης, ενώ ο ανεφοδιασμός μπορεί να επιτευχθεί με ταχεία αντικατάσταση νέων αντιδραστηρίων στα κύτταρα κυψελών, ή με επαναφόρτιση με ηλεκτρικό ρεύμα. Το οποίο είναι πολύ σημαντικό καθώς ο απαιτούμενος χρόνος απόκρισης στις εφαρμογές πλοίων είναι σημαντικός από ότι στην αυτοκινητοβιομηχανία όπου απαιτείται γρήγορη φόρτιση και εκφόρτωση λόγω του κύκλου οδήγησης (π.χ. σε αστικό περιβάλλον όπου υπάρχουν πολλοί κύκλοι επιτάχυνσης / επιβράδυνσης [7.28].

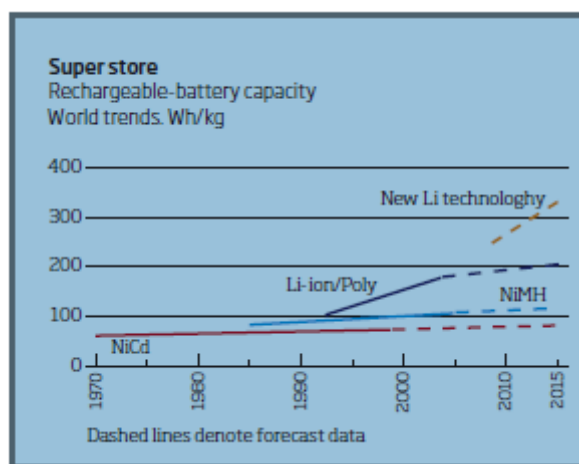
Για εφαρμογή σε πλοίο είναι σημαντικό να υπάρχει ικανότητα φόρτωσης από λιμένα όταν χρησιμοποιείται για παρατεταμένες περιόδους. Αυτό είναι χρήσιμο σε κοντινές διαδρομές όπως τα ferry boats και σκάφη αναψυχής.

Ένα σημαντικό στοιχείο όπως το βάθος εκφόρτωσης των μπαταριών για την επιλογή μιας κατάλληλης τεχνολογίας το οποίο σχετίζεται με την ενεργειακή πυκνότητα και τον χρόνο εκφόρτωσης.

Στις θαλάσσιες εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας απαιτείται μπαταριών απαιτεί υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και μεγάλο χρόνο απόρριψης με σχεδόν σταθερή καμπύλη πτώσης τάσης σε σχέση με το χρόνο. [7.29]. Στην περίπτωση του υβριδικού πλοίου, μπορεί να εφαρμοστεί σε σκάφος όταν εκτελεί εργασίες στο λιμάνι.

Όλο και περισσότερο, οι αρχές λιμένων απαιτούν την σύνδεση μιας εξωτερικής πηγής ενέργειας προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές σε τοπικό επίπεδο και να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των περιοχών ελέγχου των εκπομπών (SECA) – [7.30].

Τα τελευταία χρόνια, υπήρξαν σημαντικές βελτιώσεις (Σχήμα 7.1) όπου στον τομέα και ενέργειας και πυκνότητας ισχύος αρχίζουν και κερδίζουν έδαφος όλο και περισσότερο.



ΣΧΗΜΑ 0.1 Πυκνότητα Ισχύος Μπαταρίας. [7.31]

Αυτοί οι νεότεροι τύποι μπαταριών μπορούν να επαναφορτίζονται πιο γρήγορα, να έχουν παρέχουν καλύτερη απόδοση. Όμως αυτοί οι νεότεροι τύποι μπαταριών δεν έχουν ακόμη ικανοποιητική συμπεριφορά σε αυτόνομη θαλάσσια πρόωση όπου στον τομέα αυτό είναι σημαντική η ισχύς εκτός από μικρά παράκτια ταξίδια.

Οι νέες χημικές ουσίες των μπαταριών περιλαμβάνουν μέταλλα, όπως είναι το μαγνήσιο, νάτριο ή λίθιο ή μέταλλο-οξυγόνο, αναφέρονται και ως μέταλλο-αέρα όπου το μέταλλο είναι ψευδάργυρος, λίθιο ή νάτριο. Μέχρι τώρα ο κορυφαίος υποψήφιος είναι η μπαταρία λιθίου-αέρα. Θεωρητικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μπαταρία λιθίου-αέρα όπου απελευθερώσουν 11.780 Wh από την οξείδωση του ανά κιλό λίθιο.

Σε αντίθεση με άλλες μπαταρίες, οι οποίες φέρουν το απαραίτητο οξειδωτικό μέσα στην μπαταρία, η μπαταρία λιθίου-αέρα αντλεί οξυγόνο από την ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της εκφόρτωσης και την απελευθερώνει κατά τη διάρκεια φόρτισης. Ως εκ τούτου, οι μπαταρίες λιθίου-αέρα μπορούν να είναι πολύ ελαφρύτερες από τις άλλες μπαταρίες.

Παρ όλα αυτά η ανάπτυξη μπαταριών λιθίου-αέρα είναι σε πρώιμο στάδιο και αντιμετώπισε επιτυχίες και αποτυχίες συμπεριλαμβανομένων των προβλημάτων με την εξασθένιση χωρητικότητας, τη διάρκεια του κύκλου ζωής στην τάση φόρτισης και εκφόρτωσης καθώς και σε περιορισμούς στο ρυθμό οξυγόνου διάχυσης.

Δεδομένου ότι πολλές ερευνητικές ομάδες εργάζονται σε αυτόν τον τεχνικό τομέα, οι μπαταρίες lithium – air μπορεί να προσφέρουν έναν σημαντικό πολλαπλασιαστή ενεργειακής πυκνότητας παραπάνω από τις κλασικές μπαταρίες λιθίου.

Για αυτό το λόγο υπάρχει, συνεπώς, σημαντικής έρευνα και χρηματοδότηση για τη βελτίωση της μπαταρίας ιόντων λιθίου καθώς και την ανάπτυξη άλλων μετά την τεχνολογία των μπαταριών ιόντων λιθίου. [7.32].

Μια εναλλακτική ελπιδοφόρα μπαταρία είναι η μπαταρία ιόντων μαγνησίου. Ενεργά προγράμματα έρευνας βρίσκονται σε εξέλιξη δείχνουν αισιόδοξες αναφορές όπου οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ιόντων μαγνησίου, χρησιμοποιώντας καλύτερα νέα υλικά καθόδου, θα μπορούν να δώσουν τριπλή αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας σε σύγκριση με ιόντα λιθίου. Εκτιμήσεις προβλέπουν ότι μέχρι το 2030 το κόστος των ιόντων λιθίου θα είναι κατάλληλες για θαλάσσια πρόωση με λιγότερο κόστος ανά kWh.

Το κόστος της επαναφόρτισης θα συνδέεται με το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος που απαιτείται για την αναπλήρωση των μπαταριών. Σε περίπτωση της θαλάσσιας πρόωσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν ανανεώσιμες πηγές

Φωτοβολταϊκά και micro turbines Και fuel cells ή από πράσινα λιμάνια για γρήγορη φόρτωση σε κοντινά δρομολόγια πλοίων. [7.33].

7.1.6 Μπαταρίες και Εφαρμογές στην Ναυτιλία

Η χρήση ηλεκτροχημικών μπαταριών για τη λειτουργία των πλοίων δεν είναι καθόλου νέα έννοια. Η πρώτη γνωστή βάρκα με μπαταρίες ήταν ένα πλοίο μήκους 24 ποδιών που κατασκευάστηκε στην Αγία Πετρούπολη της Ρωσίας το 1839 και το οποίο μπορούσε να μεταφέρει 14 επιβάτες με ταχύτητα 3 κόμβων. Ωστόσο, μέχρι τα τέλη του 19ου αιώνα, τα ηλεκτρικά σκάφη με μπαταρίες παρήχθησαν και χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλους αριθμούς. Αυτά τα σκάφη ήταν μικρά και χρησιμοποιούνται κυρίως σε ποτάμια και λίμνες εσωτερικής ναυσιπλοΐας εξαιτίας περιορισμών της εμβέλειας και της εξάρτησης από τους σταθμούς φόρτισης των μπαταριών. Η εμφάνιση του κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE) οδήγησε σε δραστική μείωση της δημοτικότητας των πλοίων ηλεκτρικής ενέργειας. [7.34].

Οι Det Norske Veritas και η Germanischer Lloyd (DNV GL), υποστηρίζουν την ασφαλή εισαγωγή μεγάλων συστημάτων μπαταρίας σε θαλάσσιες εφαρμογές με κανόνες όπως υπηρεσίες τύπου έγκρισης, κατευθυντήριες γραμμές και συμβουλευτικές υπηρεσίες. Ακόμη μια μελέτη του DNV GL έδειξε ότι οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό δυναμικό για τη βελτίωση της οικονομίας καυσίμου και τη μείωση των εκπομπών στη ναυτιλιακή βιομηχανία. [7.35].

Σύμφωνα με τον [7.36] Shahan το πρώτο ηλεκτροκίνητο αυτοκίνητο και επιβατηγό οχηματαγωγό στον κόσμο μεταφέρθηκε το 2015. Το πλοίο είναι το νορβηγικό πλοίο: το MF Ampere, το οποίο εκμεταλλεύεται τη διαδρομή Lavik-Orpedal όλο το χρόνο και έχει χωρητικότητα 360 επιβάτες και 120 οχήματα [7.37]. Σύμφωνα με την ενέργεια [7.38] , το πλοίο τροφοδοτείται από 160 μονάδες Corvus AT6500 με συνολική ενεργειακή απόδοση 1040 kWh και βάρος 20 μετρικών τόνων.

Οι μπαταρίες του σκάφους επαναφορτίζονται από σταθμούς φόρτισης στη ξηρά σε κάθε πλευρά της διαδρομής. Οι σταθμοί φόρτισης της ακτής υποστηρίζουν έκαστο 410 KWh με 63 μονάδες Corvus AT6500.

Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης Μπαταριών σε πλοία.

Πλεονεκτήματα

- Η Πρόωση πλοίου με βάση την μπαταρία είναι επωφελής για αέριους ρύπους όπως CO₂, NO_X, SO_X, πτητικές οργανικές και σωματιδιακές εκπομπές κατά τη διάρκεια της λειτουργίας
- Οι μπαταρίες μπορούν να παράσχουν την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ και να επιτρέψουν την απενεργοποίηση πολυάριθμων κινητήρων όταν λειτουργούν για το ίδιο φορτίο. Οι μπαταρίες μπορούν στη συνέχεια να επαναφορτιστούν όταν ο κινητήρας λειτουργεί με χαμηλότερες εκπομπές αερίων SFC, CO₂ και NO_x.

Αυτή η ρύθμιση μπορεί να εξοικονομήσει καύσιμα, να μειώσει τις εκπομπές, να αυξήσει την άνεση λόγω μειωμένου θορύβου και δονήσεις από τους κινητήρες [7.39].

- Οι μπαταρίες μπορούν να παράσχουν εφεδρική ισχύ κατά τη διάρκεια μιας βλάβης των κύριων μηχανών (γεννήτριες ντίζελ και αεριοστρόβιλοι), γεγονός που με τη σειρά της μπορεί να μειώσει την εγκατεστημένη ισχύ σε σκάφη με υψηλή προωστικής κίνησης, και για ανάγκη λειτουργίας επιπλέον πετρελαιοκινητήρων [7.39].
- Οι μπαταρίες μπορούν να επιτρέψουν το ψαλίδισμα της ζητούμενης κορυφής ενέργειας. Η μπαταρία παραδίδει ενέργεια όταν απαιτείται υψηλή ισχύς και επαναφορτίζεται όταν απαιτείται λιγότερη ενέργεια. Αυτό με τη σειρά του επιτρέπει στους κινητήρες να λειτουργούν πιο αποτελεσματικά και η εγκατεστημένη ισχύς μπορεί να μειωθεί (5.40)
- Οι μπαταρίες μπορούν να επιτρέψουν τη συντήρηση του κύριου κινητήρα στη θάλασσα δεδομένου ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόωση.

- Το κόστος αγοράς και εγκατάστασης των μπαταριών πρέπει να ελαχιστοποιείται από τη συνεργασία με άλλες πηγές ενέργειας [7.39].
- Βοηθούν στην διαχείριση ενέργειας μοιράζοντας ιδανικά το δυναμικό φορτίο μεταξύ των μπαταριών και των κύριων μηχανών ισχύος κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση καυσίμου, οι εκπομπές και η συντήρηση των κύριων μηχανών [7.41].
- Λόγω της ταχέως ανάπτυξης της τεχνολογίας της μπαταρίας προσφέρουν μια λύση για την πρόωση μικρότερων πλοίων για μικρές διαδρομές
- Οι Μπαταρίες σε συνδυασμό με άλλες μορφές ενέργειας μπορούν να προσφέρουν μία υβριδική λύση για πρόωση μικρού έως μεσαίου μεγέθους πλοία.

Μειονεκτήματα

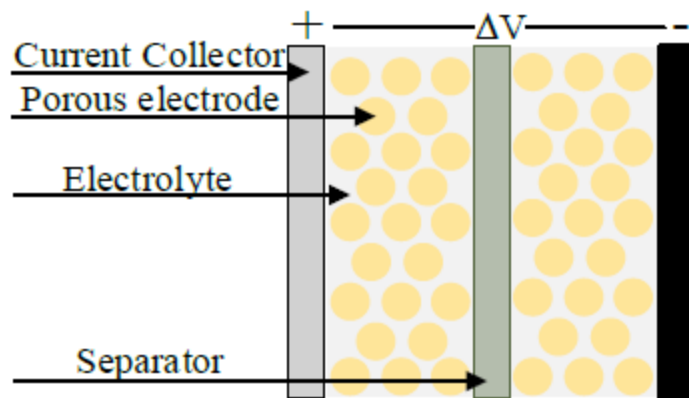
- Το μέγεθος και η ισχύς των μπαταριών αποκλείει τη χρήση τους ως μόνο κύριο μέσο πρόωσης σε μεγάλα πλοία και διαδρομές εξαιρούμενος σε μικρά πλοία κ γραμμών.
- Λόγω ότι η τεχνολογία της μπαταρίας βρίσκεται σε τεχνολογική ανάπτυξη η πλήρης πρόωσης από μπαταρία για μεγάλο πλοίο αναμένεται να πραγματοποιηθεί στο τέλος της επόμενης δεκαετίας.
- Η μπαταρία χρειάζεται αντικατάσταση όταν φτάνει στο όριο ζωής της, αυτό καθορίζεται από τους συνολικούς κύκλους αριθμό φόρτισης / εκφόρτωσης.[7.42].

7.2 Super Capacitors Υπέρ πυκνωτές

Οι πυκνωτές αποθηκεύουν ενέργεια από άποψη ηλεκτρικού πεδίου και είναι γενικά γνωστοί για το υψηλό ποσοστό φόρτισης και εκφόρτωσης. Συνήθως, οι πυκνωτές έχουν αρκετά χαμηλές ισοδύναμες αντιστάσεις ,επιτρέποντας τους να

τροφοδοτούν αποτελεσματικά την ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιούνται γενικά σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ισχύς για μικρή διάρκεια του χρόνου, Όπως αναλαμπές κάμερας, φίλτρα και την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος.

Οι πυκνωτές γενικά κατηγοριοποιούνται από το διηλεκτρικό τους μέσο και υλικό ηλεκτροδίων. Όπως οι υπέρ-πυκνωτές (ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές και ηλεκτροστατικούς πυκνωτές). Στο σχήμα 7.2 απεικονίζει την μεμονωμένη δομή ενός υπέρ-πυκνωτής.



ΣΧΗΜΑ 0.2 Δομή ενός Υπερ.- Πυκνωτή.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των υπέρ-πυκνωτών είναι η υψηλότερη πυκνότητα ισχύος, η ταχύτερη φόρτιση και εκφόρτωση λόγω χαμηλότερης εσωτερικής αντίστασης, αυξημένου κύκλου ζωής, χαμηλής τάσης και υψηλότερου κόστους Watt ανά ώρα (μέχρι 20 φορές σε σύγκριση με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου).

Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα αυτών των ESS είναι υψηλή ευαισθησία στην υπερβολική τάση και, κατά συνέπεια, υπερφόρτιση. Άλλα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν σχετικά χαμηλά πυκνότητα ενέργειας, γραμμική τάση εκφόρτωσης, υψηλή αυτό εκφόρτωση και χαμηλή τάση κυψέλης [7.43].

Ο κύκλος ζωής της μπαταρίας στον τομέα φόρτισης και εκφόρτωσης είναι πολύ μικρός. Ως εκ τούτου, προκειμένου να αυξηθεί ο χρόνος ζωής της μπαταρίας μπορούν

να χρησιμοποιηθούν οι υπέρ πυκνωτές σε συνεργασία με την μπαταρία όπως εφαρμόζονται σε υβριδικά οχήματα [7.44,7.45].

Η χρήση υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων που αποτελείται από μπαταρίες και υπέρ-πυκνωτές εφαρμόστηκε σε ηλεκτρικό λεωφορείο που αναπτύχθηκε από τη Sinautec Automobile τεχνολογίες [7.46,7.47].

Οι μελέτες έχουν αποδείξει ότι με την χρήση μπαταρίας και υπερ-πυκνωτής έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της διάρκειας ζωής, της απόδοσης και της ζωής του κύκλου ζωής της μπαταρίας.

7.2.1 Super Capacitors στην Ναυτιλία

Μια εφαρμογή των υπέρ πυκνωτών στην ναυτιλία έχει εφαρμοσθεί σε ένα μικρό επιβάτη μήκους 22 μέτρων, το Ar Vag Tredan (σχήμα 7.3.)

Αυτό το πλοίο κάνει σύντομα ταξίδια γύρω στα 2,5 Nm με μέγιστη ταχύτητα 10 κόμβων.



ΣΧΗΜΑ 0.3 Πλοίο Ar Vag Tredan [7.48].

Οι υπέρ-πυκνωτές είναι ικανοί για να επιτρέψουν φόρτιση ενέργειας σε ένα γύρο ταξιδιού και η επαναφόρτιση γίνεται κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Η επαναφόρτιση διαρκεί τέσσερα λεπτά μέσω τροφοδοσίας 400V στο πορθμείο. Επιπλέον, φωτοβολταϊκά πάνελ συμβάλλουν στην ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται από το υβριδικό σύστημα.[7.48].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

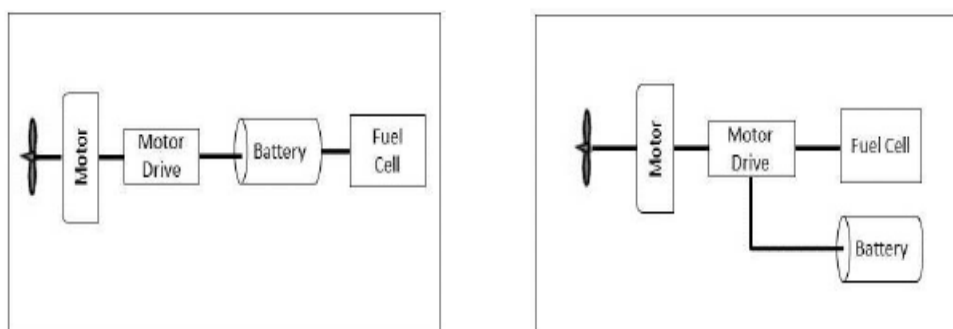
8. ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Συστήματα πρόωσης κυψελών καυσίμου που συνδυάζουν μια κυψέλη καυσίμου και μια αποθήκευση ενέργειας έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε διάφορες εφαρμογές όπως η αυτοκινητοβιομηχανία γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση της αποτελεσματικότητας κατά της μείωσης των εκπομπών CO₂ [8.1].

Αυτά τα συστήματα συνδυάζουν την υψηλή πυκνότητα ενέργειας των κυψελών καυσίμου και την υψηλή πυκνότητα ισχύος αποθήκευσης, με αποτέλεσμα να οδηγούν σε υψηλότερη αποτελεσματικότητα, χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές αερίων.

Στα συστήματα αυτά τα στοιχεία καυσίμου χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρισμού από καύσιμα, όπως υδρογόνο ή υδρογόνο μεθανόλη ανάλογα με τον τύπο κυψελών καυσίμου και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται στην πρόωση χρησιμοποιώντας ηλεκτρικούς κινητήρες ή χρησιμοποιείται για τη φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας που μπορεί να είναι μπαταρία ή έναν πυκνωτή.

Η αποτελεσματικότητα και η συμπεριφορά αυτών των συστημάτων εξαρτώνται από το ποσοστό υβριδικού συστήματος και τη χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία ελέγχου [8.2], η οποία θεωρείται ως κύριο σημείο εστίασης της έρευνας αυτής. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες του υβριδικού συστήματος πρόωσης κυψελών καυσίμου. Σειρά υβριδικών και παράλληλων υβριδίων όπως φαίνεται στο σχήμα 8.1.



ΣΧΗΜΑ 0.1 Αρχιτεκτονική συστημάτων πρόωσης κυψελών καυσίμου [8.1].

8.1 Fuel Cells Κύτταρα Καυσίμου

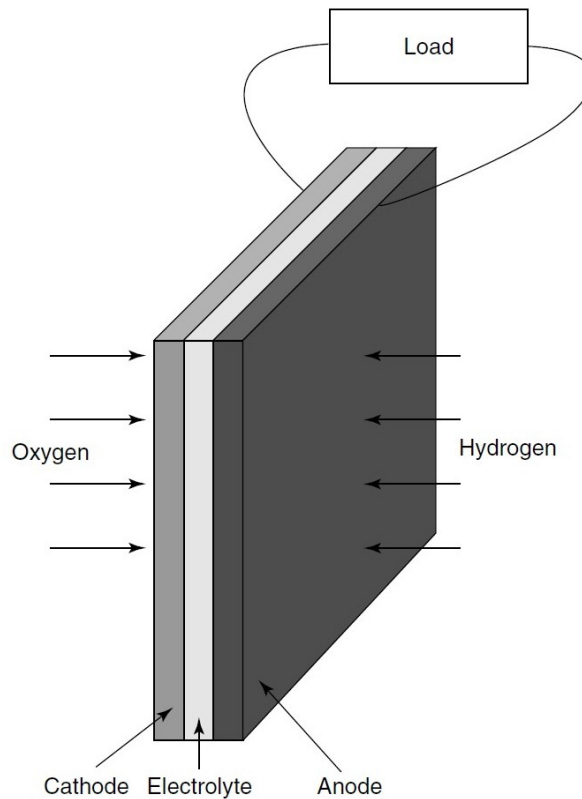
Τα στοιχεία καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν άμεσα τη χημική ενέργεια του καυσίμου ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων χωρίς συμβατική καύση.

Το 1839, η William Grove ανέπτυξε την πρώτη κυψέλη καυσίμου. Απέδειξε ότι χρησιμοποιώντας δύο πλατίνα ηλεκτρόδια που τροφοδοτούνται με υδρογόνο και οξυγόνο, δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα [8.3]. Ωστόσο, το 1838 ο Christian Friedrich Schonbein ανακάλυψε την αρχή της κυψέλης καυσίμου παρατηρώντας την ένταξή της λίγο πριν τη William Grove.

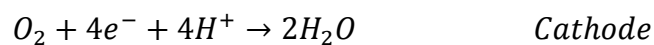
Τα στοιχεία καυσίμου αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, μία άνοδο και μία κάθοδο, χωρισμένα από έναν ηλεκτρολύτη. Ένα παράδειγμα κατασκευής κυψελών καυσίμου παρουσιάζεται στο σχήμα 8.2. [8.4].

Το υδρογόνο παρέχεται στο ανόδου στην οποία οξειδώνονται απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια και οξυγόνο παρέχεται στην κάθοδο όπου μειώνεται η αντίδραση με ηλεκτρόνια που λαμβάνονται από το υδρογόνο σύμφωνα με την Εξίσωση (8.1).

Τα ιόντα ταξιδεύουν μέσω του ηλεκτρολύτη και των ηλεκτρονίων στο εξωτερικό κύκλωμα που παράγει ηλεκτρικό ρεύμα.



ΣΧΗΜΑ 0.2 Βασική κατασκευή ανόδου από ηλεκτρολυτική κάθοδο μιας κυψέλης καυσίμου [8.4].



Εξίσωση 8.1

Τα στοιχεία καυσίμου μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη θερμοκρασία τους. Χαμηλή (10- έως 80 C), ενδιάμεση (120 έως 200 C) και κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας (650 έως 1000 C), αλλά κανονικά τα στοιχεία καυσίμου ταξινομούνται ανάλογα με τον τύπο ηλεκτρολύτη τους [8.5]. Διάφοροι τύποι κυψέλης καυσίμου περιλαμβάνει:

- (PEMFC) Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων που λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία και έχει έναν ηλεκτρολύτη στερεού πολυμερούς.
- (SOFC) Η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου λειτουργεί σε υψηλή θερμοκρασία που σημαίνει ότι υπάρχει δεν χρειάζεται να χρησιμοποιούν ακριβούς καταλύτες.
- (AFC) Χρησιμοποιήθηκε κυψέλη αλκαλικών καυσίμων (AFC) στο σκάφος Apollo Orbiter, αλλά είναι πολύ ευαίσθητο σε CO₂.
- (PAFC), Το κύτταρο καυσίμου φωσφορικού οξέος του οποίου τα ηλεκτρόδια είναι πορώδη, ήταν το πρώτο εμπορικά παραγόμενα.
- (MCFC) Τετηγμένη ανθρακική κυψέλη καυσίμου η οποία έχει υγρό ηλεκτρολύτη και λειτουργεί σε υψηλή θερμοκρασία.
- (DMFC) Απευθείας κυψέλη καυσίμου με μεθανόλη που χρησιμοποιεί μεθανόλη ως καύσιμο.

Αυτοί οι τύποι κυψελών καυσίμου έχουν διαφορετικές ευελιξίες και λειτουργούν σε ευρεία κλίμακα όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.1.[8.6].

Πίνακας 0.1 Τύποι κυψελών [8.6]

Type	Temperature °C	Efficiency %
AFC	50 - 90	50 -70
PAFC	175 - 220	40 - 45
MCFC	600 - 650	50 - 60
SOFC	800 - 1000	50 -60
PEMFC	60 - 100	40 - 50
DMFC	50 - 120	25 - 40

Ένα σύστημα κυψελών καυσίμου αποτελείται από μια στοίβα κυψελών καυσίμου που περιέχει εκατοντάδες συνδυασμούς τα στοιχεία καυσίμου για την αύξηση της ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται και των βοηθητικών στοιχείων (BOP).

Τα συστήματα BOP περιλαμβάνουν την παροχή καυσίμου, την προσφορά οξειδωτικού, το νερό διαχείρισης, διαχείρισης θερμότητας, κλιματισμού ισχύος, οργάνων και ελέγχων αυτών ως αισθητήρες, ελεγκτές κλπ. Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές εφαρμογές όπως φορητές, σταθερές και μεταφορικές εφαρμογές, γεγονός που το καθιστά υποσχόμενο υποκατάστατο των συμβατικών πηγών ενέργειας. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης σε σκληρό περιβάλλον λειτουργίας για στρατιωτικές εφαρμογές καθώς και για πολιτικές εφαρμογές. Ο πίνακας 6.1 δείχνει μια γενική σύγκριση μεταξύ των κυψελών καυσίμου και άλλες ισχύος πηγές.

8.2 Πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου

- Τα στοιχεία καυσίμου fuel cells όπως φαίνεται στον Πίνακα 8.1, έχουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης από έναν συμβατικό θερμοηλεκτρικό σταθμό, [8.7].
Αυτό συμβαίνει επειδή τα στοιχεία καυσίμου μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς αρχικά να μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια.
- Οι κυψέλες καυσίμου επειδή διατηρούν υψηλό βαθμό απόδοσης στο μεγαλύτερο μέρος της ισχύος τους σε αντίθεση με τους στροβίλους και τους κινητήρες εσωτερικής καύσης (ICE) [8.8].
- Οι κυψέλες καυσίμου έχουν χαμηλότερες εκπομπές αερίων από τους κινητήρες ντίζελ πλοίων ή τους αεριοστρόβιλους
- Χρησιμοποιώντας καθαρό υδρογόνο, μόνο το νερό και η θερμότητα είναι οι εκπομπές κυψελών καυσίμου [8.9]. Επίσης, χρησιμοποιώντας το υδρογόνο ή το φυσικό αέριο ως καύσιμο θα μειώσει τη ρύπανση πετρελαίου που

προκαλείται από τη διαρροή κατά την τροφοδοσία ή παράνομη απόρριψη ελαιωδών αποβλήτων.

- Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα προώθησης ανεξάρτητα από τον αέρα για υποβρύχια και οχήματα.
- Αθόρυβη λειτουργία, δεδομένου ότι η κυψέλη καυσίμου δεν έχει κινούμενα εξαρτήματα εκτός από τον θόρυβο που παράγει βοηθητικό εξοπλισμό που σημαίνει λιγότερη ανάγκη για θωράκιση και θα μειώσει τις επιβλαβείς επιπτώσεις του θορύβου στη θαλάσσια ζωή. Αυτός ο αντίκτυπος κατέστησε το MEPC 58ο συνέδριο για τη μείωση θορύβου [8.10].
- Η θερμότητα αποβλήτων των κυψελών καυσίμου που παράγονται από τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα συμπαραγωγής που χρησιμοποιούν οργανικούς κύκλους Rankine, ψύκτες κλπ. γεγονός που μπορεί να αυξήσει τη συνολική αποτελεσματικότητα ορισμένων συστημάτων σε περίπου 90% [8.11].
- Ευέλικτο Καύσιμο επειδή το υδρογόνο, το οποίο είναι το κύριο καύσιμο των κυψελών καυσίμου, μπορεί να παραχθεί από πολλές πηγές, συμπεριλαμβανομένων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν υδρογόνο, εκτός από κάποιες κυψέλες καυσίμου μπορεί να χρησιμοποιήσει μεθανόλη ή αιθανόλη ως καύσιμο.
- Χαμηλότερο κόστος συντήρησης και λειτουργίας, καθώς δεν υπάρχουν κινούμενα εξαρτήματα στις κυψέλες καυσίμου. Για παράδειγμα, για περιόδους ενός έτους ή περισσότερο, αρκετά συστήματα PAFC λειτουργούν συνεχώς με ελάχιστη συντήρηση που απαιτεί ανθρώπινο δυναμικό παρέμβαση [8.12].

8.3 Μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου

- Το κόστος κεφαλαίου της κυψέλης καυσίμου είναι υψηλότερο από τις άλλες επιλογές, καθώς είναι νέο και με εμπορική περιορισμένη τεχνολογία, αλλά η μαζική παραγωγή κυψελών καυσίμου και η ανάπτυξη υδρογόνου υποδομής θα μειώσει το κόστος παραγωγής. Το κόστος κεφαλαίου των κυψελών καυσίμου

βρίσκεται μεταξύ \$ 50 έως 10.000 / kW ανάλογα με την τεχνολογία του [8.13]. Για το MCFC, το κόστος κεφαλαίου ήταν περίπου \$ 1500 / kW έναντι \$ 500 / kW για κινητήρες ντίζελ μέσης ταχύτητας [8.14]. Για PEMFC, το κόστος στοιβάς κυψελών καυσίμου είναι \$ 180 / kW [8.15].

- Απαιτείται περιοδική αντικατάσταση των κυψελών καυσίμου μετά από περίπου 5 χρόνια χρήσης [8.7]. Ο χρόνος ζωής της κυψέλης καυσίμου μπορεί να είναι αρνητικός παράγοντας, αλλά οι περιοχές έρευνας και ανάπτυξης έχουν επικεντρωθεί στην αύξηση της διάρκειας ζωής κάποιων κυψελών καυσίμου στα 10 χρόνια [8.16].
- Τα στοιχεία καυσίμου έχουν καθυστερημένη απόκριση λόγω της ηλεκτροχημικής αντίδρασής τους, έχουν αργή δυναμική και γι' αυτό τα περισσότερα συστήματα κυψελών καυσίμου χρειάζονται συσκευές αποθήκευσης ενέργειας όπου παρέχουν πρόσθετη ισχύ κατά τη διάρκεια αιτήσεων αιχμής και απορροφούν περίσσεια ενέργειας κατά τη διάρκεια χαμηλή ζήτηση ισχύος [8.16].
- Το υδρογόνο δεν είναι άμεσα διαθέσιμο καύσιμο και η παραγωγή του από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξακολουθεί να είναι χαμηλότερη εξαιτίας του υψηλότερου κόστους και τη μειωμένη αποτελεσματικότητα των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επίσης, η υποδομή της δεν είναι ακόμα έτοιμη αλλά ο αριθμός σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου αυξάνεται [8.17].

8.4 Εφαρμογές κυψελών καυσίμου

Λόγω των πλεονεκτημάτων των κυψελών καυσίμου, αυτή η τεχνολογία έχει χρησιμοποιηθεί από την δεκαετία του '50 στη διαστημική βιομηχανία με την επίδειξη της πρώτης 5 kW AFC από τον Francis Bacon στο Πανεπιστήμιο του Cambridge [8.18]. Τα συστήματα ισχύος κυψελών καυσίμου έχουν προσελκύσει την προσοχή και έχουν γίνει κέντρο έρευνας για μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών με ένα ευρύ φάσμα ισχύος, συμπεριλαμβανομένων μεταφορική ισχύ, σταθερή ισχύς όπως η

κατανεμημένη ηλεκτροπαραγωγή (εφαρμογές σε πλέγμα και εκτός δικτύου) και ισχύ για κτίρια [8.19].

8.4.1 Φορητές εφαρμογές κυψελών καυσίμου

Όταν λέμε φορητή ισχύ, εννοούμε συστήματα που παράγουν ένα εύρος ισχύος από λίγα Watts σε μερικές εκατοντάδες και μπορεί να μεταφερθεί από ένα άτομο όπως οι συσκευές φορητών υπολογιστών και κινητά τηλέφωνα αντί για μπαταρίες, για κάμπινγκ, φωτισμό αντί των ηλεκτρικών γεννητριών και για στρατιωτικές εφαρμογές.

Για πολλές από αυτές τις εφαρμογές, τα PEMFC και DMFC είναι πολύ κατάλληλα [8.20, 8.21] Λόγω της απλής κατασκευής τους και της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας. Σε σύγκριση με τις γεννήτριες, οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν αθόρυβα και εκπέμπουν χαμηλότερες εκπομπές αερίων.

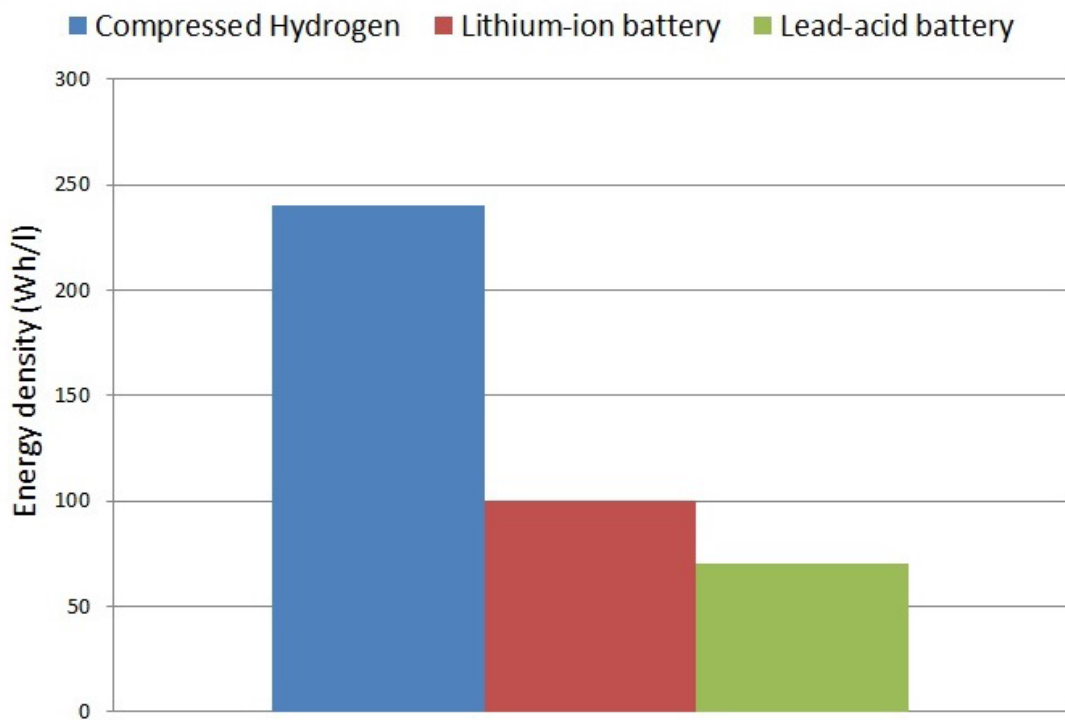
Σε σύγκριση με τις μπαταρίες που έχουν μεγάλα όρια πυκνότητας ενέργειας, η κυψέλη καυσίμου μπορεί να έχει υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας [8.22] η επαναφόρτιση εξαλείφεται και τα φορητά συστήματα κυψελών καυσίμου μπορούν να έχουν μικρότερο βάρος και όγκο για μια ισοδύναμη ποσότητα ενέργειας λόγω της υψηλότερης ενέργειας του υδρογόνου σε πυκνότητα ανά βάρος και όγκο σε σύγκριση με τις μπαταρίες όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3 [8.23].

8.4.2 Σταθερή Εφαρμογή Κυψελών Καυσίμου

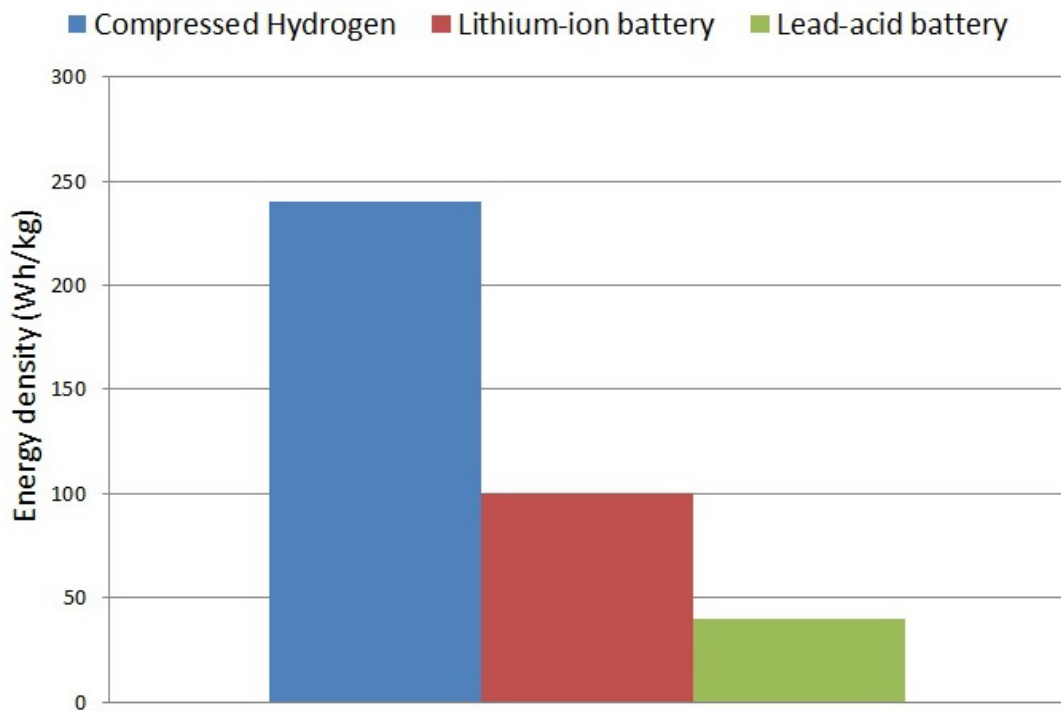
Οι περισσότερες σταθερές εφαρμογές λειτουργούν συνεχώς σε αντίθεση με τη μεταφορά και τις φορητές εφαρμογές, σταθερές εφαρμογές περιλαμβάνουν εμπορικές, βιομηχανικές, οικιακές εφαρμογές και παραγωγή ηλεκτρισμού ως συμπλήρωμα ή αντικατάσταση ενέργειας.

Η ισχύς κυμαίνεται από 1kW για εφεδρική ισχύ έως πολλά MW για μεγάλα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν τέσσερις τύποι κυψελών καυσίμου που κάνουν την μεγαλύτερη εμπορική πρόοδο από τις άλλες τεχνολογίες που είναι PEMFC, PAFC, SOFC και MCFC [8.24].

Τα PEMFC χρησιμοποιούνται για την εφεδρική ισχύ λόγω της ταχείας εκκίνησης ή για την παροχή οικιακών εφαρμογών ηλεκτρισμού, θερμότητας και ζεστού νερού σε συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού (CHP) ή συμπαραγωγής.



(α)



(β)

Πίνακας 0.2 Συμπιεσμένη πυκνότητα ενέργειας υδρογόνου σε σύγκριση με ιόντα λιθίου και μπαταρίες μόλυβδού-οξέος [8.23] α) Αποθήκευση Ενέργειας κατά πυκνότητας ενέργειας και β) Αποθήκευση Ενέργειας κατά βάρος

Στη Γερμανία, η Viessmann ανέπτυξε ένα σύστημα PEMFC για οικιακές εφαρμογές με συνολική αποτελεσματικότητα 76% [8.25]. Στην Ιαπωνία, η Ballard Power Systems έχει αναπτύξει ένα 1 kW για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης με ηλεκτρική ισχύ 42% και συνολικά 85% της συμπαραγωγής .

Για οικιακή εφαρμογή στη Μαλαισία, χρησιμοποιώντας [8.26]. Τα συστήματα συμπαραγωγής PEMFC μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα εξοικονόμηση 30 έως 40% στη χρήση πρωτογενούς ενέργειας [8.27].

Τα συστήματα κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας όπως το SOFC και το MCFC μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα συνδυασμένος κύκλος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση των καυσαερίων υψηλής θερμοκρασίας τους σε καταναμημένες μονάδες παραγωγής ενέργειας · ως κύρια ενέργεια.

Οι SOFC και MCFC είναι πιο κατάλληλες για μονάδες ηλεκτροπαραγωγής μεγάλης κλίμακας από τις κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας, αλλά ο χρόνος έναρξης αυτών των συστημάτων είναι υψηλότερος.

Επιπλέον, κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας τα συστήματα έχουν την ικανότητα να λειτουργούν χωρίς εξωτερική αναμόρφωση καυσίμου που είναι κανονικά φυσικό αέριο [6.28]. Οι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα τροφοδοσίας ή συστήματα συνδυασμένης ψύξης, θέρμανσης και ηλεκτρικής ενέργειας (CCHP) που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, θέρμανση και ψύξη για σπίτια, νοσοκομεία κ.λπ. που αυξάνουν τη συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Τα συστήματα αυτά μπορούν να είναι σε μικρή κλίμακα (κάτω από 1 MW) ή σε μεγάλη κλίμακα. Η χρήση του SOFC και του ψυκτικού συγκροτήματος απορρόφησης σε ένα σύστημα συμπαραγωγής μπορεί να επιτύχει μια ισχύ και η θέρμανση του 84% και η ισχύς και η ψύξη του 89% [8.29].

Το SOFC σε συνδυασμό με τον αεριοστρόβιλο (GT) σε μια μονάδα παραγωγής ενέργειας με τριπλή παραγωγή που βασίζεται στην μείγμα αμμωνίας-νερού που παρουσιάζει άνω του 80% [8.30].

Στην Ελβετία η εταιρία Hexis Ltd. εξέτασε 17 συστήματα SOFC micro-CHP με συνεχή λειτουργία άνω των 13500h παρουσιάζοντας ρυθμό αποδόμησης ισχύος 1,6% / 1000h. Μερικές δοκιμές έδειξαν 36% καθαρή εναλλασσόμενη ισχύ (AC) ενώ μια άλλη δοκιμή έδειξε συνολική αποτελεσματικότητα άνω του 90% [8.31].

Η Ceramic Fuel Cells Ltd. έδειξε έναν κόσμο - ρεκόρ καθαρότητας 60% το 2009 με τη χρήση συστήματος SOFC που τροφοδοτείται με φυσικό αέριο και - συνολική

ικανότητα έως 85% [8.32]. Το υβριδικό σύστημα MCFC με αεριοστρόβιλο μπορεί να φτάσει σε μία ηλεκτρική απόδοση 58,5% για παραγωγή ισχύος 148 kW [8.33].

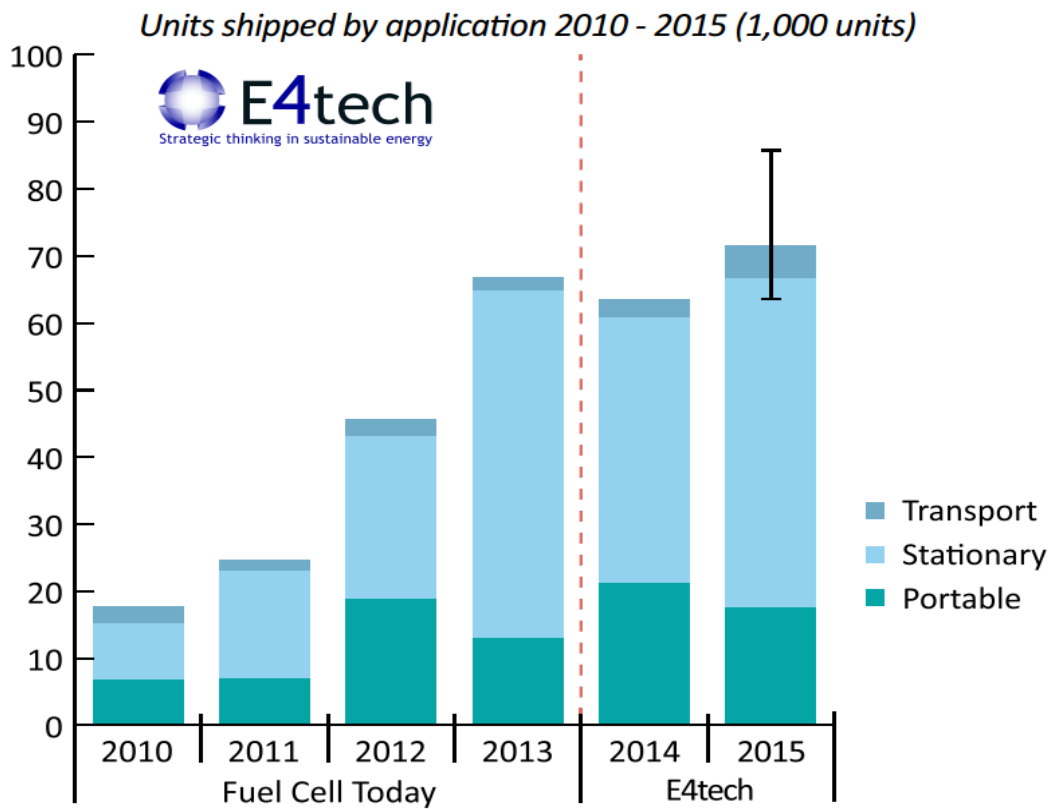
Το PAFC είναι πιο ελκυστικό για την παραγωγή μικρής ισχύος, επειδή ο χρόνος εκκίνησης είναι χαμηλότερος από εκείνη των κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας. Επίσης, η θερμοκρασία λειτουργίας του PAFC είναι υψηλή αρκετά για να παράγει ατμό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αναμόρφωση του ατμού [8.34].

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 8.4 και 8.5, υπάρχει συνεχής αύξηση του αριθμού των αποστολών κυψελών καυσίμου που υπερβαίνουν τις 70.000 μονάδες το 2015, ιδίως σε σταθερές εφαρμογές και αύξηση των μεταφερθέντων μεγαβάτ που υπερβαίνει τα 350 MW το 2015 [8.35].

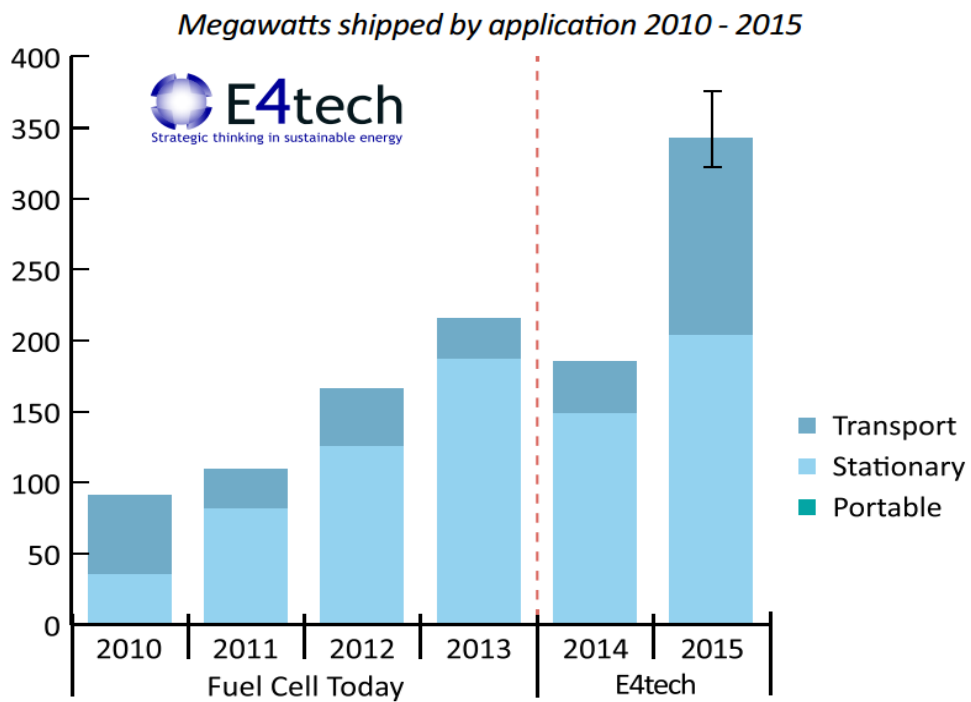
8.4.3 Εφαρμογές για μεταφοράς κυψελών καυσίμου

Πολλές χώρες έχουν επενδύσει δισεκατομμύρια δολάρια στην ανάπτυξη συστημάτων κυψελών καυσίμου για χρήση σε εφαρμογές μεταφοράς. Το κίνητρο τους είναι να κάνουν χρήση των κυψελών καυσίμου με υψηλού βαθμού απόδοση, χαμηλής λειτουργίας θορύβου και κραδασμών. Στις μεταφορές οι εφαρμογές περιλαμβάνουν ελαφρά οχήματα, φορτηγά, τρένα, τραμ και θαλάσσιες μεταφορές.

Οι αυτοκινητοβιομηχανίες σε πολλές χώρες υποστηρίζουν το ερευνητικό έργο για την ανάπτυξη της κυψέλης καυσίμου και να την χρησιμοποιήσει σε οχήματα κυψελών καυσίμου (FCV), επειδή τα κύτταρα καυσίμου θεωρούνται ως η καλύτερη αντικατάσταση του ICE [8.36]. Τα Fuel cells μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βασική μονάδα ισχύος ή ως βοηθητικές μονάδες ισχύος (APU). Εστιάζεται σε δύο τύπους κυψελών καυσίμου οι οποίοι είναι PEMFC και SOFC λόγω του συμπαγούς τους ηλεκτρολύτη [8.37].



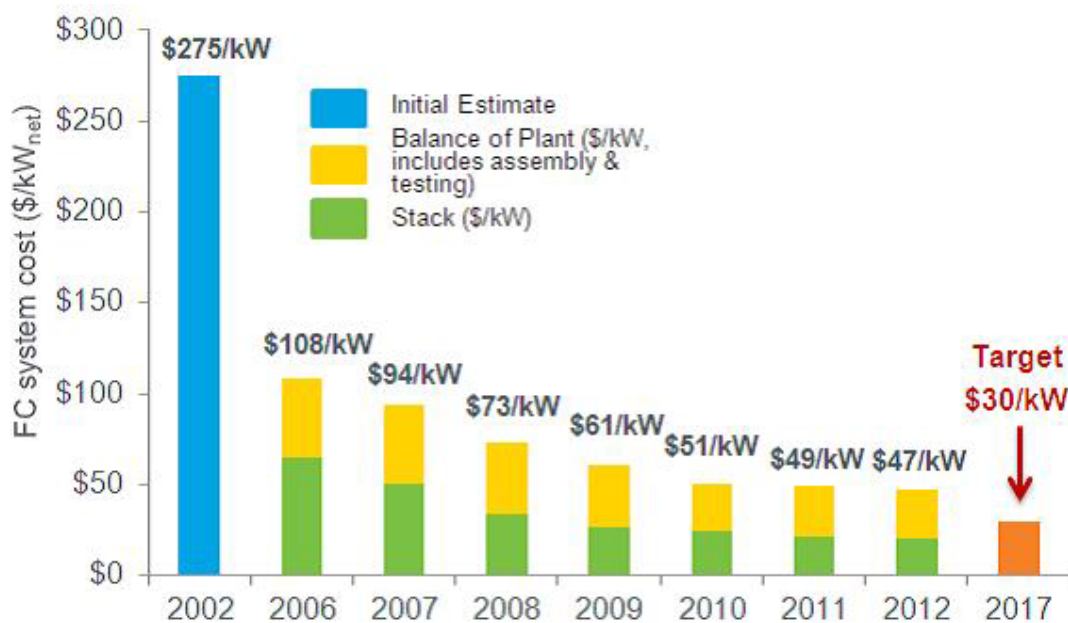
ΣΧΗΜΑ 0.3 Εφαρμογές κυψελών καυσίμου [8.17]



ΣΧΗΜΑ 0.4 Ισχύς κυψελών καυσίμου ανά είδος εφαρμογής (8.17)

Το PEMFC θεωρείται ο πιο ελπιδοφόρος τύπος λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας του, γρήγορη εκκίνηση, υψηλή απόδοση, υψηλή πυκνότητα ισχύος, χαμηλή διάβρωση και ο συμπαγής ηλεκτρολύτης που το καθιστά κατάλληλο αντικαταστάτη για το ICE σε αυτοκίνητα, φορτηγά κλπ.[6.38,6.39].

Κάποιοι φραγμοί στην εμπορευματοποίηση του PEMFC είναι πολύ κοντά στην επίλυσή του και έχει αποδειχθεί ότι η πυκνότητα 1,35 kW / λίτρο μειώνοντας παράλληλα το κόστος των καυσίμων στα οχήματα. Το κόστος των Fuel cells μπορεί να μειωθεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7 όπου η μείωση είναι άνω του 80% με στόχο \$ 30 / kW το 2017 [8.40].



ΣΧΗΜΑ 0.5 Μοντέλο κόστους ενός συστήματος κυψελών καυσίμου PEM των 80 kW που βασίζεται σε προβολή σε μεγάλη παραγωγή (500.000 μονάδες / έτος)

Το SOFC με την υψηλή θερμοκρασία του είναι επίσης κατάλληλο για εφαρμογές στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας APU επειδή η υψηλή θερμοκρασία SOFC δίνει τη δυνατότητα για εσωτερική αναμόρφωση του υδρογονάνθρακες για την παραγωγή πλούσιου σε υδρογόνο αερίου για την κυψέλη καυσίμου [8.41].

Εκτός από υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, υπάρχουν και άλλα πλεονεκτήματα του SOFC, όπως η υψηλή απόδοση ακόμη δεν απαιτούνται ακριβοί καταλύτες, υψηλή πυκνότητα ισχύος [8.42].

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν μελετηθεί για λεωφορεία, τραμ σε συνδυασμό με μπαταρίες σε ορισμένες περιπτώσεις ώστε να ανακτήσουν την ενέργεια κατά τη διάρκεια της πέδησης και να τροφοδοτήσουν επιπλέον ενέργειας κατά την επιτάχυνση. Αυτό το υβριδικό σύστημα κυψέλης καυσίμου / συστοιχίας μπαταριών προτάθηκε για ένα το τραμ δείχνει την ικανότητά του να επιτύχει τον πραγματικό κύκλο οδήγησης. Για μηχανές έλξης, το υβριδικό σύστημα κυψελών καυσίμου δεν μπορούσε να φτάσει πλήρως στο δυναμικό του εξαιτίας της έλλειψης διαθέσιμης ενέργειας κατά τη διάρκεια της πέδησης, η οποία θα απαιτεί είτε μείωση του χρόνου λειτουργίας ή αύξηση της χωρητικότητας των καυσίμων

Μια άλλη μελέτη σχετικά με τις υβριδικές μηχανές κυψελών καυσίμου διαπίστωσε ότι η κλιμάκωση των οχημάτων θα είχε ως αποτέλεσμα περισσότερες προκλήσεις όσον αφορά το υδρογόνο αποθήκευση, μεταφορά θερμότητας και φορτία [8.43,8.44].

Τα PEMFC και το SOFC έχουν επίσης μελετηθεί για να χρησιμοποιηθούν σε αεροσκάφη για να κάνουν χρήση του πλεονεκτήματος ότι είναι πολύ αθόρυβα κάτι που είναι πολύ σημαντικό για την άνεση των επιβατών. Η υψηλή απόδοση και η μείωση καυσίμων όπως και η μείωση των εκπομπών. Εμπορικά αεροσκάφη όπως η Boeing και η Airbus εξέτασε τη χρήση κυψελών καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος επί του σκάφους NASA έχει επίσης μελετήσει τη χρήση κυψελών καυσίμου για αεροσκάφη. Τα αποτελέσματα της Boeing έδειξαν μείωση κατά 20% στην κατανάλωση καυσίμου και τη μείωση του θορύβου κατά 60% με τη χρήση κυψελών καυσίμου [8.45,8.46].

8.4.4 Θαλάσσιες εφαρμογές κυψελών καυσίμου

Γίνονται σχέδια για το σχεδιασμό των λεγόμενων «Πράσινων Πλοίων» για την προστασία του περιβάλλοντος και το κλίμα της γης και να προσπαθήσουμε να μετριάσουμε την ενεργειακή κρίση. Χρησιμοποιώντας υδρογόνο ως καύσιμο για κυψέλες καυσίμου θα μπορούσε να επιτύχει το στόχο αυτό εκπέμποντας μηδενικούς ρύπους. Κρουαζιερόπλοια, ferry boats ρυμουλκά, σκάφη εφοδιασμού ακτών, υποβρύχια, φορτηγίδες μπορούν να χρησιμοποιήσουν κυψέλες καυσίμου, [8.47,8.58].

Τα συστήματα κυψελών καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κύρια προωστική δύναμη, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το πλοίο ως APU ή για τροφοδοτικό έκτακτης ανάγκης. Απ' την δεκαετία του 1960 έχουν χρησιμοποιηθεί σε θαλάσσια εφαρμογές πολλά προγράμματα για το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την παραγωγή κυψελών καυσίμου για χρήση σε θαλάσσιες εφαρμογές. Θαλάσσιες εφαρμογές κυψελών καυσίμου έχουν χρησιμοποιηθεί σε υποβρύχια, AUV, επιβατηγά πλοία, πορθμεία, πανιά βάρκες, γιοτ, σκάφη παρακολούθησης φαλαινών, ερευνητικά σκάφη, OSV, μεταφορείς αυτοκινήτων και εμπόρους σκαφών [8.49,8.50].

Οι ερευνητικές και αναπτυξιακές δραστηριότητες επικεντρώνονται κυρίως σε τρεις τύπους κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία εφαρμογές που είναι PEMFC, MCFC και SOFC.

Στο πλαίσιο του FCSHIP πραγματοποιήθηκε έρευνα για τον κύκλο ζωής και ανάλυση κόστους της χρήσης αυτών των τριών τύπων κυψελών για δύο πλοία, ένα ταχύπλοο πλοίο Ro-Ro μήκους 140 μέτρων και ένα πλοίο 30 μέτρων με φυσικό αέριο ως καύσιμο. Η μελέτη αυτή έδειξε ότι είχε περιβαλλοντική βελτίωση κατά 20-40% αλλά και οικονομικά οφέλη από τη μείωση συμβατικού καυσίμου και λειτουργικών εξόδων. [8.51].

Μια άλλη έρευνα για αξιολόγηση του κύκλου ζωής του σταθμού MCFC σε θαλάσσια εφαρμογή ήταν μια περιβαλλοντική σύγκριση με κινητήρες ντίζελ που βρίσκονται σε επιβατηγό πλοίο ως βοηθητική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η μελέτη αυτή έδειξε ότι η ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων από το σύστημα MCFC ήταν πολύ μικρότερη σε σύγκριση με τους κινητήρες ντίζελ[8.52]

Το πρώτο θαλάσσιο MCFC εγκαταστάθηκε επί του σκάφους «Viking Lady». Είχε γίνει έρευνα δημιουργώντας μοντέλα όπου δείχνουν τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις και τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιώντας μετρημένα δεδομένα που συλλέχθηκαν στο πλοίο από τη μονάδα MCFC που οδήγησε σε χαμηλό σφάλμα πρόβλεψης 4%. Ακόμη ένα άλλο οικονομικό μοντέλο δημιουργήθηκε για ένα PEMFC επί εμπορικού πλοίου όπου χρησιμοποιήθηκε υδρογόνο ως καύσιμο για να μελετηθεί την απόδοση του συστήματος [8.53,8.54].

Για μικρές εφαρμογές πλοίων το υβριδικό σύστημα PEMFC με super capacitors μοντελοποιήθηκε δυναμικά όπου παρουσίαζε τη συμπεριφορά PEMFC κατά τη διάρκεια προσομοιώσεων δίνοντας θετικά στοιχεία για την εφαρμογή του. [8.55].

Το PEMFC έχει μελετηθεί ακόμη για τη λειτουργία APU σε ιστιοπλοϊκό σκάφος με LPG ως καύσιμο που επιτυγχάνει συνολική ικανότητα συστήματος 25% επι της συνολικής ισχύος [6.56].

Επίσης, προτάθηκε PEMFC ως ένας υποψήφιος να αντικαταστήσει τις μπαταρίες σε έναν αμερικανικό καταστροφέα που είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της αποτελεσματικότητας, την εξοικονόμηση καυσίμων και τη μείωση των εκπομπών ρύπων [6.57].

Μια περαιτέρω ανάλυση και κατασκευή των PEMFC και των συστημάτων DMFC κατασκευάστηκαν για ναυτικές εφαρμογές σε επιφανειακά πλοία και

υποβρύχια όπου χρησιμοποιούν το υδρογόνο το οποίο παράγεται από τη μεθανόλη [6.58].

Σε συστήματα CHP για εφαρμογές επί πλοίων μελετήθηκαν χρησιμοποιώντας τα PEMFC και SOFC για να αυξηθεί η συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος [6.59-6.61].

Συγκρίθηκε το SOFC με ένα GT (Gas Turbine) σύστημα τροφοδοσίας για θαλάσσιες εφαρμογές με ένα αεροδυναμικό μοντέλο για την ανάλυση τεσσάρων προτεινόμενων ρυθμίσεων για την οδήγηση του συστήματος θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC) με χρήση μονής και διπλής ενέργειας ψύκτη (chiller) απορρόφησης αυξάνοντας την ενεργειακή απόδοση από 12,1% σε 34,9% για το σύστημα με απλή ψύξη απορρόφησης και σε 43,2% για το σύστημα με διπλό ψύκτη απορρόφησης που καθιστούν τη συνολική αποτελεσματικότητα της υψηλότερο από τα συστήματα με ανάκτηση θερμότητας [8.62].

Επίσης, ένας σχεδιασμός του συστήματος SOFC και γεννήτριας ντίζελ έχει προταθεί για την προμήθεια πλατφόρμας προκειμένου να εκπληρώσει τους νέους κανονισμούς του IMO για το περιβάλλον και τους κανονισμούς SECA [8.63]. Οι ναυτικοί της Νότιας Κορέας και της Βραζιλίας χρησιμοποιούν το υποβρύχιο της κλάσης 214 των κυψελών καυσίμου της κατηγορίας 214 PEMFC [8.64].

Στην Ιαπωνία, οι βιομηχανίες Mitsubishi Heavy ανέπτυξαν ένα AUV χρησιμοποιώντας το PEMFC ως τεχνολογία που ονομάζεται (Urashima), μήκους 11 μ. και συνεχούς πλεύσης 220 χιλιόμετρα το 2004 χρησιμοποιώντας υδρογόνο από ιρίδιού μετάλλου και καθαρό οξυγόνο δίνοντας δύναμη 4 kW στα 120 V [8.65].

Μια άλλη ιαπωνική επιτυχημένη εφαρμογή της κυψέλης καυσίμου ήταν η MALT'S ,η γοργόνα III, η οποία είναι ιστιοφόρο μήκους 5,8 μ. που χρησιμοποιεί

DMFC ως βοηθητική ισχύ και μεθανόλη ως καύσιμο για τη φόρτιση μπαταρίας μολύβδου-οξέως που διασχίζει τον ωκεανό Pacific c 2002 [8.66].

Μια εταιρική σχέση μεταξύ της εταιρείας της Σιγκαπούρης (Horizon FC) και της (Minn Kota) από τις Η.Π.Α. παρουσίασαν ένα σύστημα PEMFC (300W) σε βάρκα με ηλεκτρικό μοτέρ (1500W) το 2007 φτάνοντας σε 45% του βαθμού απόδοσης του συστήματος κυψελών καυσίμου και με ταχύτητα 8 km / h [8.67].

Επίσης, ένα υβριδικό σύστημα PEMFC / μπαταρίας με ηλεκτρική ισχύ 90 kW αναπτύχθηκε για ένα τουριστικό σκάφος μήκους 20 μέτρων στην Κορέα, όπου το σύστημα PEMFC τροφοδοτεί 50 kW της συνολικής ισχύος που παρουσιάζει την αξιόπιστη λειτουργία της και είναι έτοιμη για μελλοντική ανάπτυξη [8.68].

Εκτός από τα υπάρχοντα έργα, υπάρχουν πολλά μελλοντικά σχέδια του μελλοντικού πλοίου που θα χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου για να είναι περισσότερο φιλικό προς το περιβάλλον όπως το NYK Super Eco Ship 2030 με στόχο καθαρής ενέργειας και μηδενικών εκπομπών έως το 2050 [8.69].

Ο (E/S Orcelle) είναι ο μελλοντικός μεταφορέας αυτοκινήτων της Wallenius Wilhelmsen Logistics, ο οποίος θα συνδυάζει κυψέλες καυσίμου, την ηλιακή, την αιολική και την κυματική ενέργεια για να προωθήσουν το πλοίο με μηδενικές εκπομπές [8.70].

Επιπλέον, μηχανοκίνητα οχηματαγωγά καυσίμων με μηδενικές εκπομπές έχει αναπτυχθεί από τη θυγατρική εταιρεία FutureShip της GL για την ναυτιλιακή εταιρεία Scandlines προκειμένου να κατασκευαστεί υβριδικό πλοίο για τη σύνδεση Fehmarn.

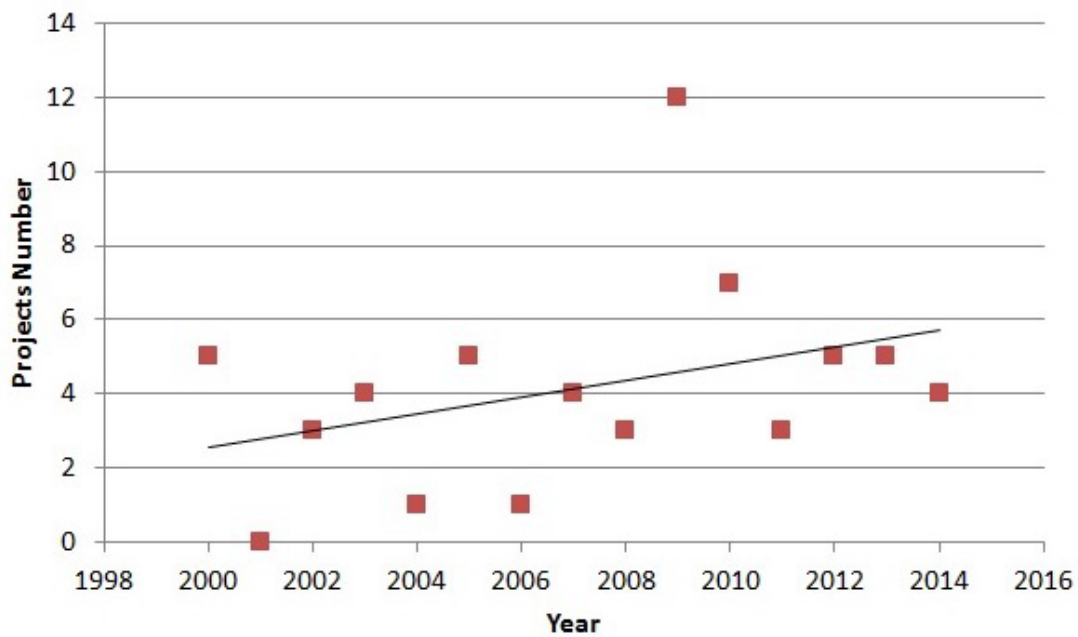
Στη Σκωτία, ο κύριος φορέας εκμετάλλευσης πορθμείων σχεδιάζει να αναπτύξει αυτοκίνητο και οχηματαγωγά μηδενικών εκπομπών, τα οποία θα χρησιμοποιούν το

υδρογόνο ως κυψέλη καυσίμου. Το υδρογόνο θα παράγεται από αιολικά πάρκα κοντά στο λιμάνι όπου θα εξυπηρετεί το πλοίο. Αυτό το σκάφος θα κατασκευαστεί μέσα σε λίγα χρόνια με μια επένδυση ύψους 15 εκατομμυρίων δολαρίων [8.71].

Ένας νορβηγός τεχνικός μηχανικός σχεδιάζει επίσης να χρησιμοποιήσει ένα PEMFC 200 kW σε συνδυασμό με μπαταρίες 100 kWh για να αντικαταστήσει ένα από τους δύο πετρελαιοκινητήρες του οχηματαγωγού (MF Ole Bull). Είναι το πρώτο οχηματαγωγό υδρογόνου στη Νορβηγία [8.72].

Τέλος, υπάρχουν πάνω από 60 έργα έρευνας και ανάπτυξης κυψελών καυσίμου για χρήση στα πλοία και φυσικά είναι πιθανό να υπάρχουν και άλλα μη γνωστά έργα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.8, ο μέσος όρος έργων κυψελών καυσίμου είναι 4 ετησίως με σημαντικό αριθμό έργων το 2009 και ο λόγος είναι πιθανώς η αυξανόμενη περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση. Τα Ηνωμένα Έθνη στο πλαίσιο για την αλλαγή του κλίματος (UNFCCC) το 2007, όταν εκπροσωπούνταν από περισσότερες από 180 χώρες ξεκίνησαν ένα σχέδιο αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής που ανανεώθηκε το 2009 στην επόμενη UNFCCC στην Κοπεγχάγη [8.73].



ΣΧΗΜΑ 0.6 Ετήσιος αριθμός έργων κυψελών καυσίμου

8.5 Περίληψη 8^{ου} Κεφαλαίου

Τα υβριδικά ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης κερδίζουν τώρα τη δημοτικότητα επειδή συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των διαφόρων πηγών ενέργειας που αυξάνουν τη συνολική αποτελεσματικότητα, ευελιξία, μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, θορύβου και εκπομπών. Ωστόσο, προσθέτει πολυπλοκότητα και απαιτεί περισσότερο βάρος και όγκο σε ορισμένες περιπτώσεις ανάλογα με τον τύπο υβριδικού συστήματος. Ως εκ τούτου, οι έννοιες υβριδικής ηλεκτρικής ισχύος και πρόωσης είναι ένα από τα EEDI μέτρα που προτείνει ο IMO για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων.

Επομένως, πρέπει να μελετηθούν περισσότερες καθαρές πηγές ενέργειας όπως η κυψέλη καυσίμου. Χρησιμοποιώντας την κυψέλη καυσίμου ως πηγή ενέργειας με μια μπαταρία ως σύστημα αποθήκευσης κάτι που έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στις εφαρμογές μεταφορών, ιδίως στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Τα στοιχεία καυσίμου έχουν αναπτυχθεί σε θαλάσσιες εφαρμογές από τη δεκαετία του 1960 με επιτυχία όχι μόνο για μικρές εφαρμογές αλλά και για εμπορική ναυτιλία και σε πολλούς τύπους όπως υποβρύχια, AUVs, επιβατηγά σκάφη, θαλάσσιο ταξί, γιοτ, OSV, μεταφορείς αυτοκινήτων, πορθμεία, ερευνητικά σκάφη και εμπορικά πλοία.

Ιδανικότερη προς το παρόν κυψέλη καυσίμου θεωρείται το PEMFC ως ο βέλτιστος τύπος για θαλάσσιες εφαρμογές. Το PEMFC παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας που σημαίνει γρήγορη εκκίνηση, αθόρυβη λειτουργία, υψηλή απόδοση, υψηλή πυκνότητα ισχύος, χαμηλή τη διάβρωση, χαμηλές εκπομπές και συμπαγή ηλεκτρολύτη που την καθιστούν κατάλληλη αντικατάσταση για το ICE σε αυτοκίνητα, φορτηγά κλπ. Επίσης, η PEMFC διαθέτει μεγάλη ισχύ από 12 W και έχει αποδείξει καταλληλότητα στο εχθρικό θαλάσσιο περιβάλλον υπό συνθήκες κραδασμών, κραδασμών και αλατούχου αέρα, επομένως, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί σε αυτήν έρευνα. Επίσης, συζητήθηκαν διάφοροι τύποι συσκευών αποθήκευσης ενέργειας όπου οι μπαταρίες επιλέχθηκαν για εφαρμογές κυψελών καυσίμου λόγω της υψηλότερης της ισχύος και της ενεργειακής πυκνότητας.

Έχουν παρουσιαστεί διαφορετικοί τύποι μπαταριών και έγινε σύγκριση όσον αφορά την ανθεκτικότητα, το κόστος, την ενέργεια και την πυκνότητα ισχύος. Πολλές χώρες έχουν δαπανήσει εκατομμύρια για την ανάπτυξη κυψελών καυσίμου προκειμένου να ξεπεραστούν εμπόδια όσον αφορά την ανθεκτικότητα και το πρώτο κόστος των κυψελών καυσίμου κατά τη μαζική παραγωγή και τη μείωση της χρήση δαπανηρών υλικών όπως η πλατίνα που θα μειώσει το κόστος ενός PEMFC σε 30 \$ / kW το 2017, ενώ το 2002 ήταν 275 \$ / kW και αύξησε τη ζωή του σε 10 χρόνια.

Ο αριθμός σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου αυξάνεται επίσης και θα αυξηθεί όλο και περισσότερο με την ευρύτερη χρήση των κυψελών καυσίμου. Επιπλέον, ένα από τα προβλήματα που αντιμετωπίζει η εξάπλωση των κυψελών καυσίμου στη θαλάσσια εφαρμογή είναι η έλλειψη επικυρωμένων μοντέλων συνολικών

συστημάτων πλοίων που χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου ως πηγή ενέργειας αξιολογεί την αποτελεσματικότητα της χρήσης κυψελών καυσίμου επί των πλοίων, στόχος της οποίας είναι η παρούσα εργασία.

Ένα κατάλληλο εργαλείο προσομοίωσης αναπτύσσεται για να αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά του πλοίου και να προβλέπει απαιτήσεις ισχύος για πραγματικές διαδρομές που θα τροφοδοτούνται από κυψέλες καυσίμου και μπαταρίες μέσω μιας στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας (EMS) σε μια υβριδική πρόωση.

Στο επόμενο κεφάλαιο η μαθηματική μοντελοποίηση του εργαλείου προσομοίωσης ή του πλοίου προσομοιωτή »παρουσιάζεται με επισκόπηση βιβλιογραφίας σχετικά με προηγούμενους προσομοιωτές πλοίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο

9. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Προκειμένου να αντιμετωπίσει την ολοένα αυξανόμενη πίεση στη ναυτιλιακή βιομηχανία να μειώσει την περιβαλλοντικές επιπτώσεις, προτείνεται ένα υβριδικό ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης κυψελών καυσίμου ως μια λύση όπως συζητήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η κυψέλη καυσίμου και η μπαταρία είναι τα κύρια συστατικά του συστήματος υβριδικών κυψελών καυσίμου εκτός από ένα EMS που διαχωρίζει τις απαιτήσεις ισχύος πρόωσης μεταξύ της κυψέλης καυσίμου και των συστημάτων μπαταρίας. Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των υβριδικών συστημάτων πρόωσης κυψελών καυσίμου, και μπαταριών μέσω εξομοίωσης θα μας δώσει το πλεονέκτημα για καλύτερα αποτελέσματα.

Τα μοντέλα προσομοίωσης περιλαμβάνονται στην εργαλειοθήκη SimPowerSystems (SPS) του Simulink ,της κυψέλης καυσίμου [9.1] και μπαταρίας [9.2].

9.2 FUEL CELLS

Η μοντελοποίηση των κυψελών καυσίμου θέλει μεγάλη προσοχή προκειμένου να μελετηθούν και να διερευνηθούν τα στοιχεία τους. Τα μοντέλα κυψελών καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση και τον έλεγχο της απόδοσής του, αυξάνοντας την αποδοτικότητά του, μειώνοντας το σχετικό κόστος και στην ανάλυση της αξιοπιστίας, της σκοπιμότητας, ασφάλεια και κερδοφορία. Λόγω των πλεονεκτημάτων του, το PEMFC έχει χρησιμοποιηθεί και μελετηθεί για διαφορετικά εφαρμογές συμπεριλαμβανομένων φορητών, μεταφορικών και σταθερών εφαρμογών. Η μοντελοποίηση του PEMFC έχει τρεις τάξεις μοντελοποίησης PEMFC. εμπειρικά, ημι-εμπειρικά ή θεωρητικά μοντέλα [9.3]. Μπορεί επίσης να ταξινομούνται σε χημικά, πειραματικά και ηλεκτρικά μοντέλα [9.4].

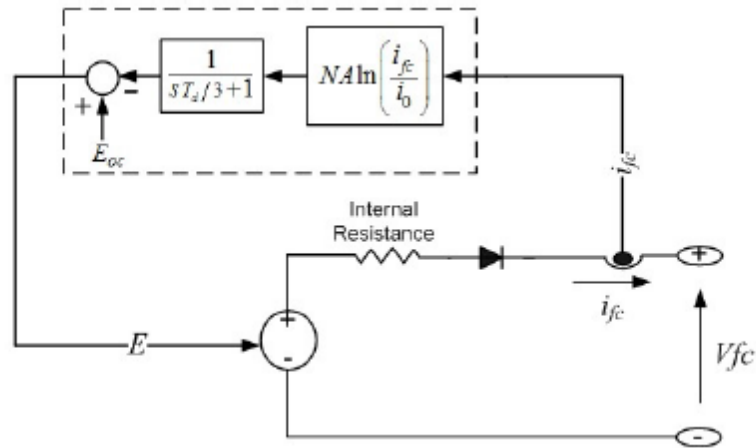
Τα εμπειρικά μοντέλα είναι κατασκευασμένα με βάση πειραματικά δεδομένα για την ανάπτυξη σχέσης μεταξύ εισόδων και εξόδων κυψελών καυσίμου. Επομένως είναι απλό και δεν απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο, αλλά δεν μπορεί να αντιπροσωπεύει καλά το καύσιμο ως προς την απόδοση κυψελών. Από την άλλη πλευρά, αναπτύσσονται θεωρητικά ή μηχανιστικά μοντέλα με βάση την ηλεκτροχημεία και τη φυσική των κυψελών καυσίμου, για αυτό παρέχει λεπτομερή κατανόηση των κυψελών καυσίμου αλλά απαιτεί υπερβολικό υπολογιστικό χρόνο. Τα ημι-εμπειρικά μοντέλα κυψελών καυσίμου συνδυάζονται οι εμπειρικές σχέσεις των κυψελών καυσίμου με τις θεωρητικά παραγόμενες αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις. Επομένως, περιέχει περισσότερες λεπτομέρειες από τα εμπειρικά μοντέλα, αλλά απαιτεί λιγότερα υπολογιστικός χρόνος από τα μηχανιστικά μοντέλα [9.3,9.5].

Ένα γενικό μοντέλο κυψέλης καυσίμου [9.4] αντιπροσωπεύει το δυναμικό και σταθερές καταστάσεις κυψελών καυσίμου που τροφοδοτούνται με υδρογόνο και αέρα. Αυτό το μοντέλο συνδυάζει τα ηλεκτρικά και χημικά χαρακτηριστικά των μοντέλων κυψελών καυσίμου που το καθιστούν κατάλληλο για προσομοιώσεις συστημάτων κυψελών καυσίμου. Επιπλέον, αυτό το μοντέλο είναι ενσωματωμένο στα SimPowerSystems βιβλιοθήκη συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ως γενικό μοντέλο στοίβας κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Σύμφωνα με το μπλοκ κυψελών καυσίμου μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε 4 προκαθορισμένα μοντέλα κυψελών καυσίμου, Τρία είδη PEMFC είναι διαθέσιμα και κυμαίνονται από 1,26 kW έως 50 kW ή και AFC 2,4 kW .

Ένα ισοδύναμο κύκλωμα μοντέλου κυψελών καυσίμου φαίνεται στο σχήμα 9 .1. Η Τάση κυψέλης καυσίμου (V_{fc}) υπολογίζεται ως συνάρτηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (E), Η εσωτερική αντίσταση (R_{ohm}) και το ρεύμα κυψελών καυσίμου (i_{fc}) χρησιμοποιώντας την εξίσωση

$$V_{fc} = E - R_{ohm} \cdot i_{fc} \text{ και η } (E) \text{ υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση}$$

$$E = EOC - N \cdot A \cdot \ln \text{ where EOC: open circuit voltage (V),}$$



ΣΧΗΜΑ 0.1 Ηλεκτρικό ισοδύναμο κυψέλης καυσίμου [9.1].

Όπου Ν: Αριθμός κελιών, A: Κλίση Tafel (V), i_0 : Ανταλλαγή ρεύματος (A), T_d : Χρόνος απόκρισης κυψελών καυσίμου (Sec)

Αυτό το μοντέλο είναι ικανό να προβλέψει την απόδοση των κυψελών καυσίμου τόσο σε σταθερή κατάσταση όσο και σε παροδική λειτουργία, με σφάλμα 1% λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο απόκρισης κυψελών καυσίμου (T_d) ή καύσιμο χρόνος καθίζησης κυψέλης που αντιπροσωπεύει σε χρονική καθυστέρηση της κυψέλης καυσίμου κατά τις ξαφνικές αλλαγές στο ρεύμα κυψελών καυσίμου όπως φαίνεται στο σχήμα 9.2.

Ο χρόνος απόκρισης κυψελών καυσίμου συνήθως παρέχεται από τον κατασκευαστή και εξαρτάται από τον τύπο κυψέλης καυσίμου.

Η κατανάλωση υδρογόνου PEMFC σε γραμμάρια μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση

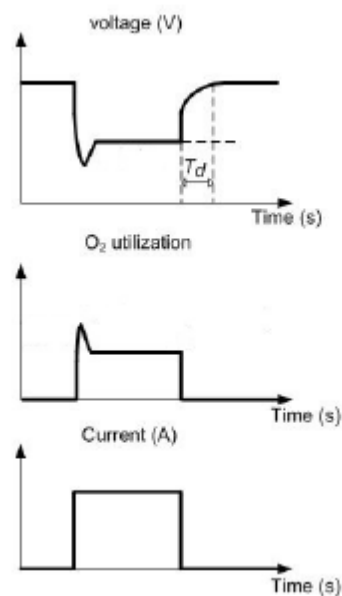
$$H_{2cons} = \frac{N}{F} \int i_{fc} dt$$

Όπου (N) αριθμού κυψελών καυσίμου, ρεύματος κυψέλης καυσίμου (i_{fc}) και Faraday σταθερά (F).

Στη συνέχεια, η κατανάλωση υδρογόνου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κόστους υδρογόνου και της εισόδου ενέργειας στο PEMFC ως συνάρτηση υψηλότερης τιμής θέρμανσης υδρογόνου (HHV_{H2}) ως εξής:

$$Energy_{FC} = H_{2Cons} * HHV_{H_2}$$

Τέλος, το απαιτούμενο βάρος και όγκος συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση του βαρυμετρικού υδρογόνου (ρ_{mH2}) και της ογκομετρικής πυκνότητας (ρ_{vH2}) που εξαρτάται από τη μέθοδο αποθήκευσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.3.



ΣΧΗΜΑ 0.2 Χρόνος απόκρισης κυψελών καυσίμου.

Το βάρος υδρογόνου, το μέγεθος και το κόστος λαμβάνονται υπόψη και θεωρείται ότι το υδρογόνο αποθηκεύεται ως ένα κρυογονικό υγρό σε δεξαμενές όπως προτείνεται στο [9.3] για εφαρμογές θαλάσσιων μεταφορών.

Πίνακας 0.1 Βάρος υδρογόνου για διάφορες εφαρμογές.[9.5,9.6]

	ρ_{mH_2} <i>kgH₂/kg</i>	ρ_{vH_2} <i>kgH₂/m³</i>	Temperature °C	Pressure bar
High pressure gas cylinders	0.012	16	RT	200
	0.032	21	RT	350
	0.06	35	RT	700
Liquid hydrogen in cryogenic tanks	0.142	70.8	-253	1
Adsorbed hydrogen	0.02	20	-80	100
	0.071	29.6	-80	100
Absorbed on interstitial sites in host metals	0.02	115	RT	1

Μπορούμε να παράγουμε υδρογόνο από ηλιακή ενέργεια μέσω ηλεκτρόλυσης με χρήση φωτώ βολταϊκών στοιχείων . Αν και υπάρχουν φθηνότερες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για να έχει ένα πραγματικό καύσιμο μηδενικών εκπομπών και να εξαλείφει την εξάρτηση από καύσιμα πετρελαίου. Ωστόσο, σε περίπτωση χρήσης ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή υδρογόνου, μια τεχνολογία όπως την Carbon Capture and Storage (CCS) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί. Χρησιμοποιώντας υδρογόνο με βάση τα καύσιμα πετρελαίου χωρίς τεχνολογίες όπως το CCS, δεν θα έχουμε μεγάλη μείωση των εκπομπών CO₂.

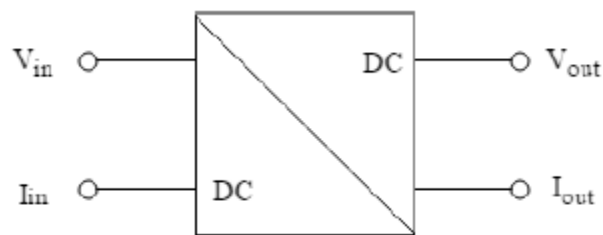
9.3 DC-DC CONVERTER

Η τάση των εξαρτημάτων του υβριδικού συστήματος ποικίλλει ανάλογα με το απαιτούμενο ρεύμα από την πηγή ενέργειας. Επομένως, απαιτείται ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα για τη σταθεροποίηση της τάσης της πηγής ισχύος παρέχοντας ταυτόχρονα την απαιτούμενη ισχύ στο φορτίο. Προκειμένου να ρυθμιστεί η ισχύς εξόδου του PEMFC, χρησιμοποιείται ένας μονό κατευθυντικός μετατροπέας DC-DC. Διαφορετικοί τύποι μετατροπέων περιλαμβάνουν: ενισχυτές μετατροπής που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της τάσης, (buck) μετατροπείς που χρησιμοποιούνται για τη μείωση της τάσης και μετατροπείς (buck-boost) που μπορούν να αυξήσουν την τάση. Το ρεύμα εισαγωγής Ο μετατροπέας DC-DC (I_{in}) ρυθμίζει εκ νέου σύμφωνα με την αναλογία τάσης λειτουργίας (k) [9.8] ως ακολουθεί:

$$k = V_{out}/V_{in}$$

$$I_{in} = I_{out} * k/\eta_{Conv}$$

Όπου (V_{out}) είναι η τάση εξόδου, (V_{in}) είναι η τάση εισόδου και (I_{out}) είναι το απαιτούμενο ρεύμα από το υποσύστημα μετατροπέα DC-DC όπως φαίνεται στο σχήμα. Επιτυγχάνεται 95% σταθερή απόδοση του μετατροπέα (η Conv) [9.9].



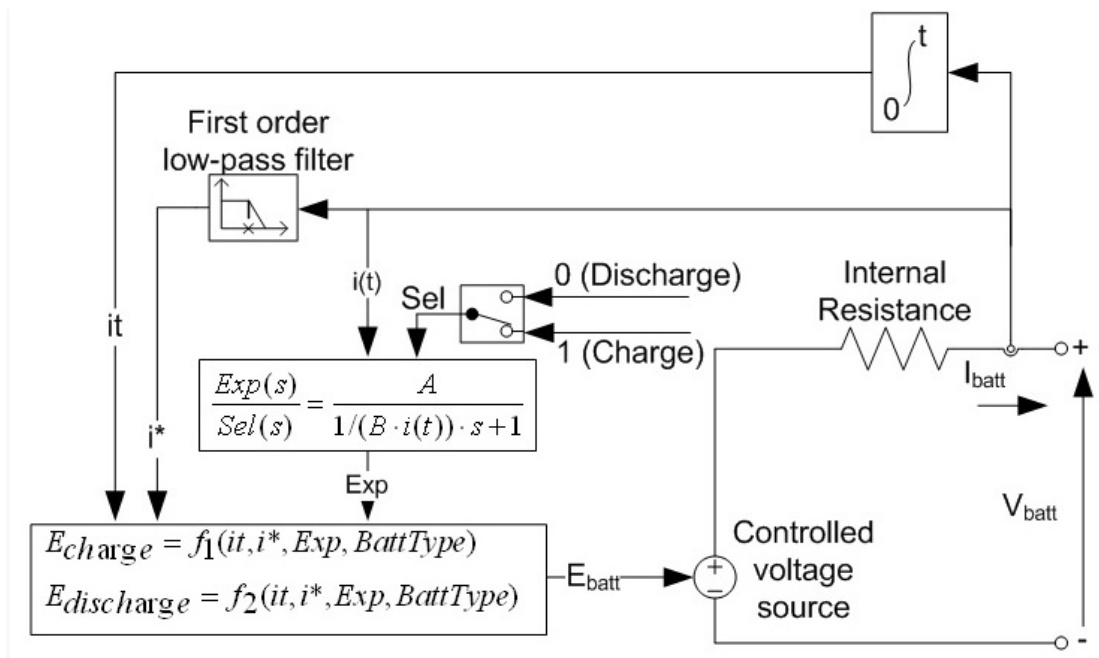
ΣΧΗΜΑ 0.3 Διάγραμμα μπλοκ μετατροπέα DC-DC

9.4 BATTERY

Επειδή οι μπαταρίες θεωρούνται η κύρια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας η μοντελοποίηση των μπαταριών λαμβάνει μεγάλη προσοχή. Η μοντελοποίηση μπαταριών μπορεί να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες, ηλεκτροχημικά μοντέλα και μοντέλα ισοδύναμου κυκλώματος. Τα ηλεκτροχημικά ή μαθηματικά μοντέλα μπαταριών αναπτύσσονται με βάση την shepherd εξίσωση που περιγράφει την ηλεκτροχημική συμπεριφορά των μπαταριών. Εν τω μεταξύ, ισοδύναμο κύκλωμα ή μοντέλα μπαταρίας προσανατολισμένα σε κύκλωμα χρησιμοποιούν συνδυασμό πηγών τάσης, πυκνωτών και αντιστάσεων όπου αντιπροσωπεύουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας.

Τα μοντέλα ηλεκτροχημικών μπαταριών είναι πιο ακριβή από μοντέλα προσανατολισμένα σε κύκλωμα που περιλαμβάνουν μοντελοποίηση διάρκειας ζωής μπαταρίας. Ωστόσο, τα ισοδύναμα μοντέλα κυκλώματα είναι πιο εύχρηστα και απλούστερα [9.10,9.11].

Η βιβλιοθήκη SimPowerSystems περιλαμβάνει μια βελτιωμένη εύχρηστη δυναμική μαθηματική μπαταρία που μπορεί να αντιπροσωπεύει τόσο τη σταθερή κατάσταση όσο και τη δυναμική συμπεριφορά της μπαταρίας λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο απόκρισης της μπαταρίας. Το γενικό μπλοκ μπαταρίας μπορεί να προσομοιώσει τέσσερις τύπους μπαταριών που είναι: οξύ μολύβδου, ιόντων λιθίου, νικελίου-καδμίου ή νικέλιο-μέταλλο-υδρίδιο και έχει επικυρωθεί επίσης έναντι πειραματικών αποτελεσμάτων με ένα μέγιστο σφάλμα 5% αλλά αυξάνεται το σφάλμα σε $\pm 10\%$ όταν μειώνεται η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SOC) κάτω του 20% [9.12], αλλά δεν συνιστάται η πλήρης εκφόρτωση της μπαταρίας. Το σχήμα δείχνει το ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου μπαταρίας [9.13].



ΣΧΗΜΑ 0.4 Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου μπαταρίας [9.13]

Η τάση μπαταρίας (V_{batt}) υπολογίζεται ως συνάρτηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (E_{batt}), εσωτερική αντίσταση (R_{ohm}) και ρεύμα μπαταρίας (i) ως εξής

$$V_{batt} = E_{batt} - R_{ohm} \cdot i$$

Όπου (E_{batt}) εξαρτάται από τον τύπο της μπαταρίας και από το εάν η μπαταρία φορτίζει ή αποφορτίζει και υπολογίζεται ως εξής

$$E_{discharge} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it)$$

$$E_{charge} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1Q} \cdot i - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it)$$

Οπου:

E0: Σταθερή τάση (V), K: Σταθερή πόλωση (A / h) ή αντίσταση πόλωσης (ohm),

Q:Μέγιστη χωρητικότητα μπαταρίας (Ah), i *: Δυναμική ρεύματος χαμηλής συχνότητας (A),

A: Εκθετική τάση (V),και B: Εκθετική χωρητικότητα (Ah) ⁻¹.

Η εξαντλημένη ισχύς και η ενέργεια από την μπαταρία μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$power_{Batt} = V_{Batt} * I_{Batt}$$

$$Energy_{Batt} = \int power_{Batt}$$

Ο αριθμός των καταναλωθέντων κύκλων μπαταρίας (Ncyc) με την πάροδο του χρόνου μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση την χωρητικότητά του (Q) και το καταναλωμένο ρεύμα ως εξής:

$$\int abs(I_{Batt}(t))dt/Q/2$$

Η απαιτούμενη ενέργεια για την επαναφόρτιση της μπαταρίας (EnergyBattCh) πίσω στην αρχική της μπαταρία SOC (SOCini) μπορεί να υπολογιστεί σε συνάρτηση με την τελική μπαταρία SOC (SOCfin), την χωρητικότητα και τάση μπαταρίας ως εξής:

$$Energy_{Battch} = \frac{(SOC_{ini} - SOC_{fni}) * Q * V_{Batt}}{Charging\ efficiency}$$

9.5 MOTOR

Προκειμένου να μετατραπεί η ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ισχύ χρησιμοποιούμε ηλεκτρικούς κινητήρα. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως στα πλοία για πρόωση, αντλίες, ανεμιστήρες, βαρούλκα κ.λπ. Διαφορετικοί τύποι ηλεκτρικών κινητήρων περιλαμβάνουν κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC), σύγχρονοι κινητήρες, επαγωγικοί κινητήρες, κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, υπεραγωγοί υψηλής θερμοκρασίας κινητήρες. Σε αυτό την έρευνα, ο κινητήρας DC επιλέγεται λόγω του εύρους της ταχύτητας, της ροπής του, ομαλής λειτουργίας, χαμηλό κόστος και λιγότερο περίπλοκο σύστημα ελέγχου [9.14].

Οι κινητήρες DC πρέπει να τροφοδοτούνται με ρεύμα DC, που καθιστά την κυψέλη καυσίμου κατάλληλη πηγή ρεύματος. Ο νόμος περί τάσης του Kirchhoff και ο 2ος νόμος του Newton, οι εξισώσεις που διέπουν του κινητήρα DC είναι:

$$J_m \omega + b\omega = K_t i_a$$
$$L \frac{di_a}{dt} + R i_a = V - K_e \omega$$

Όπου (J_m) είναι η ροπή αδράνειας κινητήρα, ω είναι η ταχύτητα περιστροφής, (K_t) είναι η ροπή του κινητήρα σταθερά, είναι το ρεύμα οπλισμού κινητήρα, το L είναι η επαγωγή κινητήρα, το R είναι το ηλεκτρικό κινητήρα αντίσταση, το V είναι η εφαρμοζόμενη τάση και το (K_e) είναι η σταθερά δύναμης του ηλεκτροκινητήρα. Η ροπή που παράγεται από έναν κινητήρα DC (T_m) είναι ανάλογη με το ρεύμα οπλισμού ως εξής υποθέτοντας σταθερό μαγνητικό πεδίο.

$$T_m = K_t i_a$$

Η μηχανική ισχύς του κινητήρα υπολογίζεται κατόπιν ως συνάρτηση της παραγόμενης ροπής και ταχύτητα περιστροφής ως εξής

$$P_m = T_m \omega$$

9.6 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για τα συστήματα πρόωσης υβριδικών κυψελών καυσίμου, ο σωστός διαχωρισμός της απαιτούμενης ενέργειας μεταξύ του καυσίμου κυψέλη και μπαταρίας είναι ένα σοβαρό πρόβλημα που απαιτεί το σχεδιασμό μιας στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας.

Το EMS ελέγχει τη δυναμική συμπεριφορά των υβριδικών συστημάτων, η οποία επηρεάζει το σύστημα ως προς την απόδοση, μέγεθος, βάρος, διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων του, αποδοτικότητα και κατανάλωση καυσίμου.

Επομένως η ανάπτυξη κατάλληλου EMS για υβριδικά συστήματα πρόωσης είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα έρευνας που προσπαθούμε να ερευνήσουμε σε αυτή την εργασία.

Με βάση τη λειτουργία και τις απαιτήσεις του υβριδικού συστήματος πρόωσης, πρέπει να επιλεγεί ένα κατάλληλο EMS.

Οι στόχοι ενός EMS περιλαμβάνουν τη μείωση της κατανάλωσης υδρογόνου [9.15], την αύξηση της αποδοτικότητα κυψελών καυσίμου, μειώνοντας το μέγεθος και το βάρος του συστήματος ισχύος, μειώνοντας το λειτουργικό κόστος, μειώνοντας την πίεση στα εξαρτήματα του συστήματος ισχύος για να παρατείνει τη διάρκεια ζωής τους [9.16]. Οι στόχοι του EMS περιλαμβάνουν επίσης τη μείωση των εκπομπών, τη διατήρηση της μπαταρίας SOC σε ένα ορισμένο επίπεδο [9.17].

Το EMS που έχει αναπτυχθεί απαιτεί από την κυψέλη καυσίμου να παρέχει μια μέση ζήτηση ισχύος σε λειτουργία φορτίου, ενώ το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας εκφορτίζεται ή επαναφορτίζεται όταν απαιτείται η ισχύς και να είναι υψηλότερη ή

χαμηλότερη από την μέση ζήτηση ισχύος που παρέχεται από την κυψέλη καυσίμου [9.18].

Υπάρχουν διάφοροι τύποι EMS, όπως το EMS (based) [9.19], ισοδύναμη κατανάλωση στρατηγική ελαχιστοποίησης (ECMS) [9.20], στρατηγική ασαφούς λογικής βάσει κανόνων [9.21], εξάντληση φορτίων και στρατηγική φόρτισης διατήρησης (CDCS) [9.22], στρατηγική βασισμένου σε μετασχηματισμό κύματος [9.23], μεταβλητή συχνότητα τεχνικές ελέγχου [9.24], κλασικές στρατηγικές PI και PID [9.21], στοχαστικός δυναμικός προγραμματισμός [9.25] και προσαρμοστικός βέλτιστος έλεγχος [9.26].

Ο υπολογιστικός χρόνος και η πολυπλοκότητα κάθε EMS είναι διαφορετικός, επομένως μόνο τέσσερα EMS επιλέχθηκαν για να μοντελοποιηθούν και να συγκριθούν τα οποία είναι EMS, PI EMS, CDCS EMS, και ECMS. Οι επιλεγμένες στρατηγικές που χρησιμοποιούνται πιο συχνά είναι βάση λιγότερης υπολογιστική πολυπλοκότητα, την απλότητα και βάση μικροεπεξεργαστή [9.21].

- EMS

Ο βασικός έλεγχος βασίζεται σε κανόνες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο κάθε στοιχείου του υβριδικού συστήματος για διαφορετικές εφαρμογές μεταφοράς.

Αυτό το είδος στρατηγικής μπορεί να έχει πολλές λειτουργικές καταστάσεις για τα σημεία λειτουργίας των κυψελών καυσίμου και των συστημάτων μπαταρίας σύμφωνα με την απαιτούμενη ισχύ και την μπαταρία SOC λαμβάνοντας υπόψη τα επιχειρησιακά όρια του εξαρτήματα υβριδικού συστήματος [9.27, 9.28 289, 290].

Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα του συστήματος πρόωσης, αναπτύχθηκε ένα EMS [9.19] ώστε να προσδιορίσει τη σωστή κατανομή και την απαιτούμενη ισχύ μεταξύ των εξαρτημάτων του υβριδικού συστήματος κυψέλης / μπαταρίας.

Αυτό το EMS αποτελείται από 11 καταστάσεις για 11 πιθανές περιπτώσεις συνδυασμού μεταξύ SOC μπαταρίας, απαιτούμενης ισχύος φορτίου (P_{load}), ελάχιστης ισχύος κυψέλης καυσίμου (P_{FCmin}), βέλτιστη ισχύς κυψελών καυσίμου (P_{FCopt}), μέγιστη ισχύ κυψελών καυσίμου (P_{FCmax}), βέλτιστη ισχύς εκ φόρτισης μπαταρίας (P_{optdis}), βέλτιστη ισχύς φόρτισης μπαταρίας ($P_{optchar}$) και βέλτιστη ισχύς μπαταρίας (P_{BATopt}) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Πίνακας 0.2 Καταστάσεις EMS [9.19]

Battery SOC	State	Load Power	Fuel cell reference power
SOC > 80%	1	$P_{load} \leq P_{FCmin}$	P_{FCmin}
	2	$P_{load} \leq P_{FCmin} + P_{optdis}$	P_{FCmin}
	3	$P_{load} \leq P_{FCmax} + P_{optdis}$	$P_{FC} = P_{load} - P_{optdis}$
	4	$P_{FCmax} + P_{optdis} < P_{load}$	P_{FCmax}
50% ≤ SOC ≤ 80%	5	$P_{load} \leq P_{FCmin}$	P_{FCmin}
	6	$P_{load} \leq P_{FCopt} - P_{BATopt}$	P_{load}
	7	$P_{load} \leq P_{FCopt} + P_{BATopt}$	P_{FCopt}
	8	$P_{load} \leq P_{FCmax}$	P_{load}
	9	$P_{load} > P_{FCmax}$	P_{FCmax}
SOC < 50%	10	$P_{load} \leq P_{FCmax} - P_{optchar}$	$P_{load} + P_{optchar}$
	11	$P_{load} > P_{FCmax} - P_{optchar}$	P_{FCmax}

Η ελάχιστη και η μέγιστη ισχύς πρέπει να επιλέγονται με βάση τα όρια ρεύματος και τάσης της μπαταρίας και συστήματα κυψελών καυσίμου προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα του συστήματος όπου αποτελεί τον κύριο στόχο του EMS [9.19].

Οι κύριες εισόδους αυτού του EMS είναι η απαιτούμενη ισχύς φορτίου και η μπαταρία SOC που χρησιμοποιούνται για να αποφασίσουν την ισχύ κυψελών καυσίμου. Στη συνέχεια, η διαφορά μεταξύ της απαιτούμενης ισχύος φορτίου και ισχύς καυσίμου χρησιμοποιείται για τη φόρτιση ή την αποφόρτιση της μπαταρίας.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 9.2, η ισχύς της κυψέλης καυσίμου επιλέγεται με βάση το SOC της μπαταρίας και την ισχύ φόρτισης. Η διαφορά μεταξύ ισχύος κυψέλης καυσίμου και ισχύος φορτίου αποταμιεύεται από την μπαταρία εάν το SOC είναι υψηλότερο από 50% όπως στις καταστάσεις 2 και 4

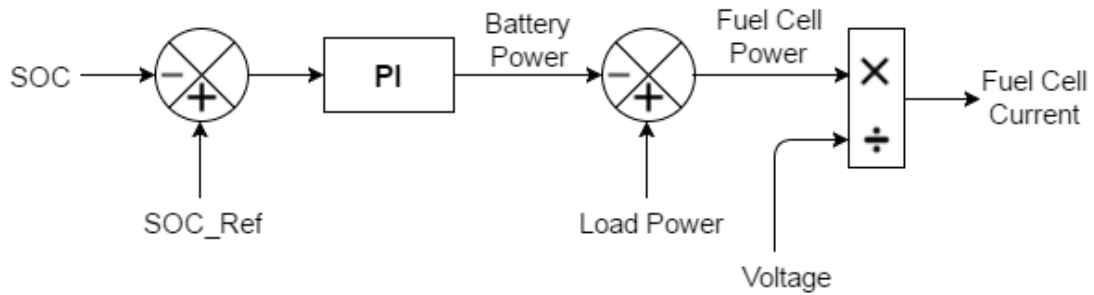
Η διαφορά ισχύος θα χρησιμοποιηθεί για τη φόρτιση της μπαταρία εάν το SOC της είναι μικρότερο από 50% όπως στις καταστάσεις 5 και 10. Στις καταστάσεις 3, 6, 8 και 10, η κυψέλη καυσίμου ρυθμίζεται για να ακολουθήσει την ισχύ φορτίου εν τω μεταξύ σε άλλες καταστάσεις η ισχύς κυψελών καυσίμου είναι σταθερή και η μπαταρία θα αντισταθμίσει την παροδική ισχύ, ή μπαταρία θα φορτιστεί εάν η κυψέλη καυσίμου είναι υψηλότερη από την απαιτούμενη ισχύ φορτίου. Η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί στα βέλτιστα τιμή ισχύος μόνο στην κατάσταση 7.

- PI EMS

Αυτά τα EMS βασίζονται σε PI και PID ελεγκτές όπου έχουν επιλεγθεί λόγω της απλότητάς τους [9.21]. Ο κύριος στόχος του κλασικού PI EMS είναι να διατηρήσει το SOC της μπαταρίας στην ονομαστική του τιμή και να επεκτείνει την διάρκεια ζωής της μπαταρίας [9.17].

Στο κλασικό PI EMS, η τρέχουσα μπαταρία SOC συγκρίνεται με μια τιμή αναφοράς μπαταρία SOC (SOC Ref) για τον έλεγχο της ισχύος της μπαταρίας ή του ρεύματος χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή PI όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.7. Η ισχύς της μπαταρίας αφαιρείται από την ισχύ φόρτωσης για τον υπολογισμό της ισχύος κυψέλης καυσίμου.

Στη συνέχεια, η ισχύς της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου διαιρείται με την τάση για τον υπολογισμό του ρεύματος που έχει παραχθεί από την κυψέλη καυσίμου και την μπαταρία. Με την αποφόρτιση / φόρτιση της μπαταρίας, το SOC της μπαταρίας θα αλλάξει και θα τροφοδοτήσουν πίσω το μπλοκ EMS για να κλείσει το βρόχο του ελεγκτή PI.



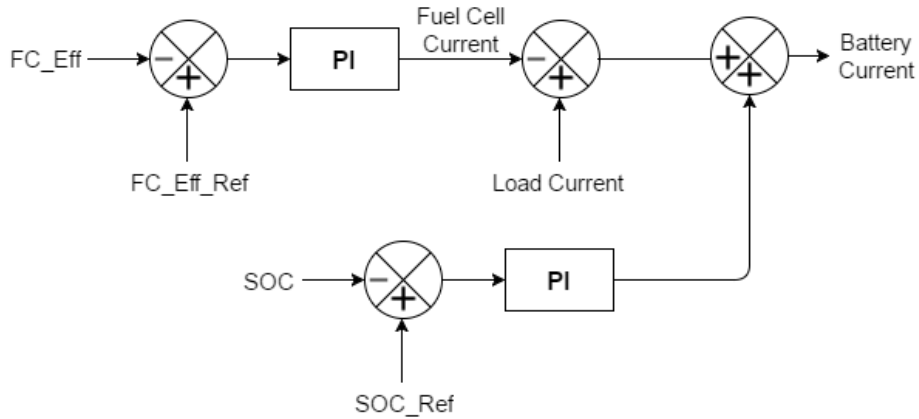
ΣΧΗΜΑ 0.5 Classical PI control energy management strategy [17]

Αυτή η στρατηγική τείνει να χρησιμοποιεί περισσότερη ισχύ από το σύστημα μπαταριών όταν το SOC μπαταρίας είναι πάνω από την τιμή αναφοράς του, ενώ η κυψέλη καυσίμου παρέχει χαμηλή ισχύ. Όταν το SOC μπαταρία πέφτει κάτω από την τιμή αναφοράς του, το σύστημα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιείται για την παροχή ισχύος και φόρτισης η μπαταρία στην τιμή αναφοράς της. Οι είσοδοι αυτού του EMS είναι η μπαταρία SOC και το απαιτούμενο φορτίο με απώτερο στόχο τη διατήρηση της μπαταρίας SOC γύρω από την τιμή αναφοράς της, η οποία ρυθμίζει την κυψέλη καυσίμου ώστε να ακολουθεί την απαιτούμενη ισχύ φορτίου. Όταν η τρέχουσα μπαταρία SOC πέφτει κάτω από την τιμή αναφοράς της. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την απόδοση της κυψέλης καυσίμου, κατανάλωση υδρογόνου και διάρκεια ζωής.

- Βελτιωμένο PI EMS

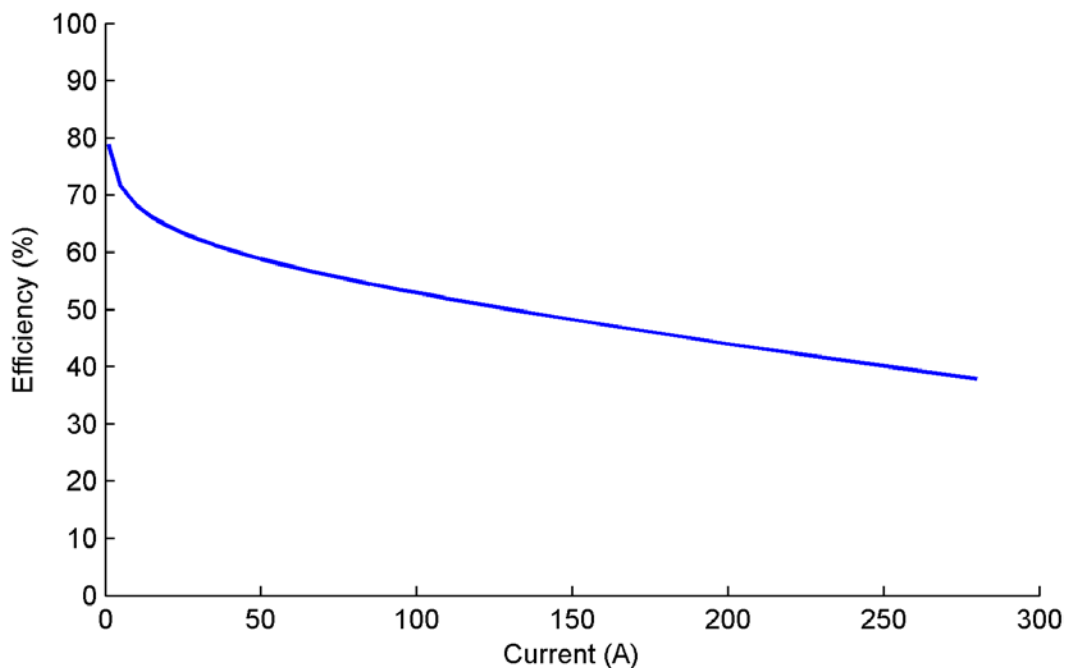
Στο προτεινόμενο PI EMS, λαμβάνεται υπόψη η απόδοση κυψελών καυσίμου (FC E) ως είσοδος συγκρίνοντάς την με μια τιμή αναφοράς (FC E Ref). Το ρεύμα κυψέλης καυσίμου αφαιρείται από το απαιτούμενο ρεύμα φορτίου για να ληφθεί το ρεύμα μπαταρίας. Στη συνέχεια, το ρεύμα της μπαταρίας ενημερώνεται ανάλογα με την απόκλιση μεταξύ της τρέχουσας μπαταρίας SOC και της τιμής αναφοράς της όπως φαίνεται στο σχήμα 9.8, διασφαλίζοντας την απαιτούμενη ισχύς.

Με την κατανάλωση ενέργειας από την μπαταρία και την κυψέλη καυσίμου, η μπαταρία SOC και η κυψέλη καυσίμου θα αλλάξουν και θα τροφοδοτηθούν πίσω στο EMS για να κλείσει τους βρόχους των ελεγκτών PI.



ΣΧΗΜΑ 0.6 Βελτιωμένο PI EMS

Οι ελεγκτές PI μπορούν να χρησιμοποιηθούν αξιόπιστα καθώς η απόδοση κυψελών καυσίμου είναι γραμμική με αρχικό βαθμό απόδοσης 80% σε συνάρτηση με το ρεύμα φορτίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.9 [9.29 291]. Επιπλέον, η χρήση της αποδοτικότητας κυψελών καυσίμου επιτρέπει την κυψέλη καυσίμου να λειτουργεί περισσότερο με υψηλότερη απόδοση που σημαίνει λιγότερη κατανάλωση υδρογόνου, και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Επιπλέον, το προτεινόμενο PI EMS διατηρεί τα απαιτούμενα SOC της μπαταρίας που είναι ο κύριος στόχος του κλασικού PI EMS. [9.30 292].



ΣΧΗΜΑ 0.7 Γραμμική απόδοση PI ελεγκτή συνάρτηση φορτίου

- ECMS

Το ECMS είναι μια από τις πιο κοινές μεθόδους ελέγχου προσέγγισης βελτιστοποίησης σε πραγματικό χρόνο βασίζεται σε λειτουργίες κόστους που δημιουργούν μια σχεδόν βέλτιστη λύση σε περιπτώσεις διάσπασης ισχύος. Το ECMS δεν απαιτεί εκ των προτέρων γνώση της μελλοντικής δύναμης αλλά στηρίζεται στην ελαχιστοποίηση της στιγμιαίας κατανάλωσης καυσίμου του υβριδικού συστήματος [9.31.293]. Αυτή η εφαρμογή προτάθηκε [9.32.294] για ανάπτυξη και βελτιστοποίηση EMS σε υβριδικά οχήματα.

$$P_{FCopt} = \underset{P_{FCopt}}{\operatorname{argmin}} C \quad \underset{P_{FCopt}}{\operatorname{argmin}} (C_{FC} + a \cdot C_{Batt})$$

Η ισοδύναμη κατανάλωση καυσίμου (C) περιλαμβάνει επίσης την πραγματική κατανάλωση υδρογόνου κυψελών καυσίμου (CFC) ως ισοδύναμη κατανάλωση της μπαταρίας (CBatt). Το πρόβλημα βελτιστοποίησης για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης υδρογόνου μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$P_{FCopt} = \underset{P_{FCopt}}{\operatorname{argmin}} C \quad \underset{P_{FCopt}}{\operatorname{argmin}} (C_{FC} + a \cdot C_{Batt})$$

όπου (α) είναι ένας συντελεστής που χρησιμοποιείται για την ης διατήρησης της λειτουργία της μπαταρίας. Υπολογίζεται ως συνάρτηση των ορίων SOC της μπαταρίας ως ακολουθεί:

$$\alpha = 1 - 2\mu \frac{(SOC - 0.5(SOC_H + SOC_L))}{SOC_H - SOC_L}$$

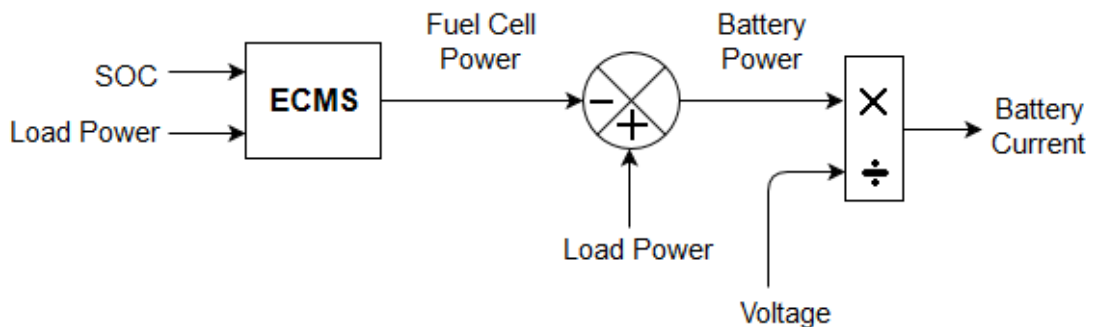
όπου (SOCH) και (SOCL) είναι το άνω και κάτω όριο της μπαταρίας SOC αντίστοιχα. [9.33].

Όπως φαίνεται στο σχήμα 9.10, με βάση την ισχύ φόρτισης και της μπαταρία SOC, αποφασίζεται η ισχύς κυψελών καυσίμου.

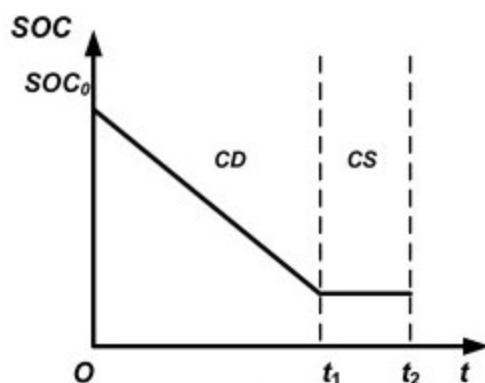
Η ισχύς κυψελών καυσίμου αφαιρείται από την ισχύ φόρτωσης για να υπολογίσει την ισχύ της μπαταρίας. Στη συνέχεια η κυψέλη καυσίμου και οι δυνάμεις της μπαταρίας διαιρούνται με τάση για τον υπολογισμό της τιμής του ρεύματος.

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος καυσίμου, έχει προταθεί η στρατηγική CDCS. Αυτή η στρατηγική δίνει προτεραιότητα στη χρήση της ενέργειας της μπαταρίας έως ότου το SOC της μπαταρίας μειωθεί σε μια συγκεκριμένη τιμή. Στη συνέχεια, ο EMS υποστηρίζει την μπαταρία SOC και το σύστημα κυψελών καυσίμου αρχίζει να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ [9.22].

Κατά την διάρκεια ταξιδιού εφαρμόζεται η λειτουργία εξάντλησης (CD) όταν το σύστημα κυψελών καυσίμου περιστρέφεται ή λειτουργεί με την ελάχιστη ισχύ και το σύστημα μπαταρίας παρέχει την απαιτούμενη ισχύ. Όταν η μπαταρία SOC είναι χαμηλή, το υβριδικό σύστημα κυψελών καυσίμου αλλάζει σε κατάσταση φόρτισης (CS) για το υπόλοιπο ταξίδι όπως φαίνεται στο σχήμα 9.11.



ΣΧΗΜΑ 0.8 Χρήση Fuel Cell συνάρτηση ισχύος μπαταρίας.



ΣΧΗΜΑ 0.9 Λειτουργία αποφόρτισης και φόρτωσης στην διάρκεια ενός ταξιδιού

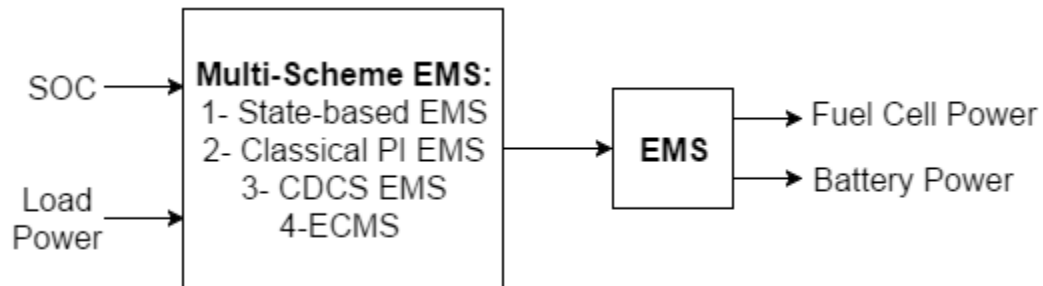
Οι κύριες εισοδοί στο CDCS EMS είναι η απαιτούμενη ισχύς φορτίου η τρέχουσα μπαταρία SOC που χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η ισχύ της μπαταρίας. Ενώ η ισχύς κυψελών καυσίμου υπολογίζεται σύμφωνα με την εφαρμοζόμενο φορτίο και περίοδο εξάντλησης μπαταρίας.

- EMS πολλαπλών σχεδίων

Ένα EMS πολλαπλών σχεδίων έχει πολλές στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας[9.21]. Το ανεπτυγμένο EMS πολλαπλών κατά τη λειτουργία του πλοίου επιλέγει την κατάλληλη στρατηγική άμεσα με βάση την απαιτούμενη ισχύ φορτίου και τρέχουσα μπαταρία SOC για την επίτευξη του απαιτούμενου στόχου. Ενώ τα περισσότερα από τα EMS δίνουν την προσοχή τους στην κατανάλωση υδρογόνου, είναι σημαντικό, πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή στη συνολική κατανάλωση ενέργειας και την απαιτούμενη ενέργεια για την επαναφόρτιση μπαταρία πίσω στο αρχικό SOC. Ο στόχος του ανεπτυγμένου EMS πολλαπλών σχεδίων είναι να ελαχιστοποιηθεί τη συνολική κατανάλωση ενέργειας . Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη ενός κώδικας στο Simulink.

Ο ανεπτυγμένος κώδικας επιτρέπει στο υβριδικό σύστημα να χρησιμοποιεί διαφορετικές στρατηγικές κατά τη διάρκεια του ταξιδιού σύμφωνα με την απαιτούμενη ισχύ φορτίου και την τρέχουσα μπαταρία SOC όπως φαίνεται στο σχήμα 9.12 με τρόπο που μειώνει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας έως το τέλος του ταξίδι στη θάλασσα.

Το ανεπτυγμένο EMS πολλαπλών σχεδίων αποτελείται από τα τέσσερα θεωρούμενα EMS : EMS, ECMS, Classical PI EMS και CDCS και έναν κωδικό που επιλέγει το κατάλληλο EMS αλλάζοντας τις διάφορες στρατηγικές κατά την λειτουργία για την ελαχιστοποίηση της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας σχετικά με την απαιτούμενη ισχύ φορτίου και την τρέχουσα μπαταρία SOC.



ΣΧΗΜΑ 0.10 EMS πολλαπλών σχεδίων

9.7 Περίληψη Κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στον προσομοιωτή πλοίων συμπεριλαμβανομένης μιας βιβλιογραφικής επισκόπησης για προηγούμενους προσομοιωτές πλοίων. Έγινε Μαθηματική μοντελοποίηση μέσω του SimPowerSystems για μπλοκ κυψελών καυσίμου και μπαταρίας. Επίσης, η μαθηματική μοντελοποίηση μετατροπών DC-DC και DC ηλεκτρικού Όπως; και οι υπολογισμοί αποθήκευσης υδρογόνου έχουν ληφθεί υπόψη στην μελέτη του συστήματος.

Παρουσιάστηκαν τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας με επίκεντρο το τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα EMS στρατηγικές οι οποίες είναι: State-based, Classical PI, ECMS και CDCS

Επιπλέον, παρουσιάστηκε μια βελτίωση της κλασικής στρατηγικής PI που λαμβάνει υπόψη την απόδοση της κυψέλης καυσίμου ως είσοδο στη στρατηγική για αύξηση της αποτελεσματικότητας κυψελών καυσίμου και μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.

Η στρατηγική διαχείρισης αναπτύχθηκε για πρώτη φορά για θαλάσσιες εφαρμογές με στόχο την ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας που περιλαμβάνει το αναλωμένο καύσιμο ενέργεια κυψέλης καθώς και ενέργεια που χρησιμοποιείται από την μπαταρία κατά τη λειτουργία και την απαιτούμενη ενέργεια για επαναφόρτιση της μπαταρίας στην αρχική της μπαταρία SOC.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Με γνώμονα τα περιβαλλοντικά προβλήματα και την ανάγκη για βιώσιμη και καθαρή ενέργεια στη ναυτιλία η κυψέλη καυσίμου μπαίνει στο επίκεντρο της ναυτιλιακής βιομηχανίας ως δυνατότητα για καθαρή ενέργεια επί του σκάφους. . Το PEMFC αρχίζει τώρα να μπαίνει στην αγορά. Η κυψέλη καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, ειδικά το MCFC θα κυκλοφορήσει πιθανώς στην αγορά τα επόμενα 5 έως 10 χρόνια. Σύμφωνα με την υψηλή ζήτηση ισχύος κατά τη μεταφορά, η κυψέλη καυσίμου δεν θα αντικαταστήσει τις μεγάλες ισχύος κύριες μηχανές μεγάλων πλοίων στο άμεσο μέλλον. Η υιοθέτηση της κυψέλης καυσίμου θα πραγματοποιηθεί πρώτα στην αντικατάσταση βοηθητικών γεννητριών ισχύος. Ωστόσο, σε ειδικές αγορές και εφαρμογές, η κυψέλη καυσίμου ήδη σήμερα είναι καλή εναλλακτική λύση για τους παραδοσιακούς κινητήρες. Ειδικά για σκάφη αναψυχής, πλοίο εσωτερικής ναυσιπλοΐας, πορθμεία και επίσης μεγάλα επιβατηγά πλοία όπου η κυψέλη καυσίμου μπορεί να είναι μια καλή εναλλακτική λύση.
- Με την τρέχουσα τιμή τεχνολογίας του PEMFC, το πρώτο κόστος και το κόστος συντήρησης υβριδικών συστημάτων κυψελών καυσίμου ακόμη υψηλότερα από τα συμβατικά συστήματα ντίζελ. Ωστόσο, με μαζική παραγωγή κυψελών καυσίμου και την τρέχουσες έρευνες στη βελτίωση της σχεδιασμός κυψελών καυσίμου και υλικά μεμβράνης και χρήση καταλυτικότερου κόστους υλικά, θα μειώσει το πρώτο και το κόστος συντήρησης της κυψέλης καυσίμου και θα το κάνει περισσότερο ανταγωνιστικό με συμβατικές πηγές ενέργειας. Ο εξελιγμένος συνολικός προσομοιωτής πλοίων έδειξε την ικανότητά του να διερευνά διαφορετικά συνδυασμοί κυψελών καυσίμου και μπαταρίας, καθώς και διαφορετικές στρατηγικές διαχείριση ενέργειας στη μελέτη βελτιστοποίησης μεγέθους που πραγματοποιήθηκε για την πρόταση υβριδικού καυσίμου με σύστημα προώθησης κυψέλης / μπαταρίας. Μπορεί, επομένως, να χρησιμοποιηθεί για

υβριδικά συστήματα με βάση τα στοιχεία καυσίμου με διαφορετική υβριδική αναλογία χρησιμοποιώντας διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας.

- Οι προηγμένες στρατηγικές ελέγχου έχουν πρόσφατα ερευνηθεί και εφαρμοστεί στη ναυτιλία εφαρμογές, και μόνο μειώσεις στην κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές, 15–35%, για ορισμένες περιπτώσεις, κάτι που επιτυγχάνεται εν μέρει με την επαναφόρτιση μπαταριών από το δίκτυο. Βελτιώσεις σε άλλα κριτήρια, όπως η διαθεσιμότητα πρόωσης, ο ακτινοβολημένος θόρυβος και το κόστος συντήρησης είναι ζωτικής σημασίας για αποτελεσματικά υβριδικά συστήματα ισχύος και πρόωσης επίσης. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου φαίνεται να είναι μια πολύ ελκυστική λύση για παραγωγή ισχύος επί του πλοίου. Αυτά τα κύτταρα έχουν τη δυνατότητα να είναι πιο αποτελεσματικά και καθαρότερα από τον συμβατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης και τους αεριοστροβίλους. Επιπλέον, μπορούν να είναι πλήρως ενσωματωμένο σε ένα All Electric Ship Concept.
- Μεταξύ των διαφόρων διαθέσιμων τεχνολογιών κυψελών καυσίμου, το PEMFC θεωρείται ως το βέλτιστη τεχνολογία για χρήση σε θαλάσσιες εφαρμογές. Αυτό οφείλεται στα πλεονεκτήματά του ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, όπως στερεός ηλεκτρολύτης, υψηλή απόδοση ακόμη και σε χαμηλά φορτία, χαμηλή λειτουργία θερμοκρασία, γρήγορη εκκίνηση, υψηλή πυκνότητα ισχύος, χαμηλό θόρυβο, και μηδενικές εκπομπές
- Η χρησιμοποιούμενη αρθρωτή προσέγγιση δομικών μονάδων απλοποίησε την ανάπτυξη του προσομοιωτή πλοίων και μπορεί επιτρέψει τη βελτίωσή του για μελλοντικές μελέτες. Επίσης, αύξησε την ευελιξία του προσομοιωτή παρέχοντας τη δυνατότητα εναλλαγής μεταξύ διαφορετικών τρόπων λειτουργίας. Επιπλέον, διαφορετικές πηγές ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προώθηση του πλοίου.

- Το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης των κυψελών καυσίμου και των συστημάτων μπαταρίας πρέπει συμπεριληφθείτε στη συνάρτηση κόστους για την βελτιστοποίησης μεγέθους λόγω του σχετικά υψηλού κόστος και σύντομης διάρκεια ζωής των κυψελών καυσίμου σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές ισχύος.
- Αποδείχθηκε η συγκριτική ανάλυση των στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας ότι η κατανάλωση καυσίμου των υβριδικών συστημάτων κυψελών καυσίμου επιλέγονται βάση το EMS για πλοία με υψηλή διακύμανση στις απαιτήσεις ισχύος.
- Από τα αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας συμπεραίνουμε ότι η απόδοση του συστήματος υβριδικών κυψελών καυσίμου και η κατανάλωση ενέργειας εξαρτώνται σημαντικά από το χρησιμοποιημένο EMS και το επιχειρησιακό προφίλ του πλοίου. Επομένως, θα ήταν ευεργετικό να γίνετε πειραματική εργασία με χρήση μοντέλων πλοίων για τη μελέτη διαφορετικών τύπων διαχείρισης ενέργειας και στρατηγικών συνάρτηση με το επιχειρησιακό προφίλ των πλοίων.
- Οι μελλοντικές εργασίες θα πρέπει επίσης να επικεντρωθούν στην επίδειξη υβριδικής κυψέλης καυσίμου ως σύστημα πρόωσης για εφαρμογές θαλάσσιων μεταφορών. Μια παράκτια περιοχή όπως Πέραμα – Σαλαμίνα, Ρίο – Αντίρριο, όπως και άλλες κοντινές πορθμειακές ζεύξεις θα ήταν μια ιδανική τοποθεσία για ένα υβριδικό πλοίο κυψελών καυσίμου
- Με βάση τα αποτελέσματα αυτού του ερευνητικού έργου, η έννοια της μηδενικής εκπομπής, τα πλοία μπορούν να επιτευχθούν χρησιμοποιώντας ως υβριδικά συστήματα κυψελών καυσίμου, χρησιμοποιώντας υδρογόνο και ενέργεια από συστοιχίες μπαταριών όπου θα τροφοδοτούνται από καθαρές πηγές ενέργειας μέσω ηλεκτρικού δικτύου στα πορθμεία.. Είναι μόνο θέμα χρόνου να βελτιωθούν οι τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου, έτσι ώστε να έχουν υψηλότερο μερίδιο αγοράς.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1.1]. European Commission, 2019b, Maritime- Ports, Date of Είσοδος: 28/01/2020, https://ec.europa.eu/transport/modes/maritime/ports/ports_en
- [1.2] Z. Ahluwalia RK, Wang X. Fuel cell systems for transportation: status and trends. *J Power Sources* 2008; 177:167e76
- [1.3] Dedes EK, Hudson DA, Turnock SR. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping. *Energy Policy* 2012; 40:204e18
- [1.4] Choi CH, Yu S, Han I-S, Kho B-K, Kang D-G, Lee HY, et al. Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat. *Int J Hydrogen*.
- [1.5] Xu L, Ouyang M, Li J, Yang F, Lu L, Hua J. Optimal sizing of plug-in fuel cell electric vehicles using models of vehicle performance and system cost. *Appl Energy* 2013; 103:477e87
- [1.6] Valero I, Bacha S, Rulliere E. Comparison of energy management controls for fuel cell applications. *J Power Sources* 2006; 156:50e6.
- [1.7] Ouyang M, Xu L, Li J, Lu L, Gao D, Xie Q. Performance comparison of two fuel cell hybrid buses with different powertrain and energy management strategies. *J Power Sources* 2006; 163:467e79.
- [1.8] Han J, Charpentier J-F, Tang T. An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat. *Energies* 2014; 7:2799e820.
- [1.9] Motapon SN, Dessaint L, Al-Haddad K. A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft. *IEEE Trans Industrial Electron* 2014; 61:1320e34.
- [1.10] Fadel A, Zhou B. Power management methodologies for fuel cell-battery hybrid vehicles. 2010. Technical Report, SAE Technical Paper.
- [1.11] Thounthong P, Ral S, Davat B. Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications. *J Power Sources* 2009; 193:376e85.
- [1.12] Valero I, Bacha S, Rulliere E. Comparison of energy management controls for fuel cell applications. *J Power Sources* 2006; 156:50e6.

- [1.13] Torreglosa J, Garcia P, Fernandez L, Jurado F. Predictive control for the energy management of a fuel-cell ebattery esupercapacitor tramway. *IEEE Trans Industrial Inf* 2014; 10:276e85.
- [1.14] Xu L, Ouyang M, Li J, Yang F, Lu L, Hua J. Optimal sizing of plug-in fuel cell electric vehicles using models of vehicle performance and system cost. *Appl Energy* 2013; 103:477e87
- [2.1] “Review of maritime transport 2016,” tech. rep., United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), 2016.
- [2.2] D. C. Bose, *Principles of Management and Administration*”. PHI Learning Pvt. Ltd., second ed., September 2012.
- [2.3] “Shipping statistics and market review,” tech. rep., Institute of Shipping Economics and Logistics, Bremen, Germany, 2012
- [2.4] *Reduction of GHG Emissions from Ships - Third IMO GHG Study 2014*. London, UK: International Maritime Organization (IMO), July 2014.
- [2.5] “U.S. ergy information administration, independent statistics and analysis.” http://www.eia.gov/dnav/pet/hist_xls/RBRTEa.xls, 2015.
- [2.6] K. Ware, “Assessment of the impacts of shipping on the marine environment,” tech. rep., Monitoring and Assessment Series OSPAR Commission, 2009.
- [2.7] “CO2 emissions from fuel combustion highlights,” tech. rep., International Energy Agency IEA, Paris, 2016.
- [2.8] S. Kollamthodi, C. Brannigan, M. Harfoot, I. Skinner, C. Whall, L. Lavric, R. Noden, D. Lee, vind Buhaug, K. Martinussen, R. Skejic, I. Valberg, J. C. Brembo, V. Eyring, and J. Faber, *Greenhouse gas emissions from shipping: trends, projections and abatement potential:Final Report. No. 4*, September 2008.
- [2.9] A. Numata, T. Kumagai, Y. Nagae, and S. Osafune, “Increase of thermal efficiency and reduction of NOx emissions in DI diesel engines,” *Technical Review*, vol. 38, pp. 136–140, October 2001.

- [2.10] C. D. Holmes, M. J. Prather, and G. C. M. Vinken, “The climate impact of ship NO_x emissions: an improved estimate accounting for plume chemistry,” *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 14, pp. 6801–6812, 2014.
- [2.11]. V. Eyring, H. W. Kohler, J. van Aardenne, and A. Lauer, “Emissions from international shipping: 1. the last 50 years,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, p. 19842012, 2005.
- [2.12] “Air emissions & EMSA overview.” <http://www.emsa.europa.eu/implementation-tasks/environment/air-pollution/149-air-pollution/96-air-emissions.html>. Accessed on: 24/08/2014.
- [2.13] “IMO secretariat, main events in IMO’s work on limitation and reduction of greenhouse gas emissions from international shipping.” <http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Main%20events%20IMO%20GHG%20work%20-%20October%202011%20final.pdf>, October 2011.
- [2.14] N. Acomi and O. C. Acomi, “Improving the voyage energy efficiency by using EEOI,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 138, pp. 531–536, 2014.
- [2.15]. V. Matthias, I. Bewersdorff, A. Aulinger, and M. Quante, “The contribution of ship emissions to air pollution in the North Sea regions,” *Environmental Pollution*, vol. 158, pp. 2241–2250, 2010.
- [2.16]. V. Matthias, I. Bewersdorff, A. Aulinger, and M. Quante, “The contribution of ship emissions to air pollution in the North Sea regions,” *Environmental Pollution*, vol. 158, pp. 2241–2250, 2010.
- [2.17] “Sulphur regulations: bad for jobs and the environment,” Maritime UK, October 2012. IMO 2019 <https://www.shipownersclub.com/louise-hall-sulphur-requirements-imo-emission-control-areas/>
- [2.18] A. Badino, D. Borelli, T. Gaggero, E. Rizzuto, and C. Schenone, “Control of airborne noise emissions from ships,” in *International Conference on Advances and Challenges in Marine Noise and Vibration (MARNAV)*, (Glasgow, Scotland, UK), pp. 21–29, September 2012.
- [2.19] “Code on noise levels on board ships, 2014 edition.”

- [2.20] “Work programme of the committee and subsidiary bodies, minimizing the introduction of incidental noise from commercial shipping operations into the marine environment to reduce potential adverse impacts on marine life,” June 2008.
- [2.21] “Implementing a ship energy efficiency management plan (SEEMP) - guidance for shipowners and operators,” tech. rep., Lloyd’s Register, June 2012.
- [2.22] “EEDI tests and trials for EMSA,” tech. rep., DELTAMARIN, December 2009.
- [2.23] S. Srinivasan, *Fuel Cell from Fundamentals to Applications*. Springer, 2006.
- [2.24] “EEDI tests and trials for EMSA,” tech. rep., DELTAMARIN, December 2009.
- [2.25] P. P. Edwards, V. L. Kuznetsov, W. I. David, and N. P. Brandon, “Hydrogen and fuel cells: towards a sustainable energy future,” *Energy policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4356–4362, 2008.
- [2.26] G. Sattler, “Fuel cells going on-board,” *Journal of Power Sources*, vol. 86, pp. 61–67, 2000.
- [2.27] J. J. de Troya, C. Ivarez, C. Fernez-Garrido, and L. Carral, “Analysing the possibilities of using fuel cells in ships,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 4, pp. 2853 – 2866, 2016.
- [4.1] Dedes E K, Hudson D A, Turnock S R. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping. *Energy Policy*, 2012, 40: 204-218.
- [4.2]. Tan, A. K. J. (2005). "Vessel-source marine pollution: the law and politics of international regulation (Vol.45). Cambridge University Press.
- [4.3] C.C. Chan; Alain Bouscayrol, Keyu Chen. "Electric, Hybrid, and Fuel- Cell Vehicles: Architectures and Modeling, " *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol 59, No.2, February 2010.
- [4.4]. Jia-Shiun Chen, "Energy Efficiency Comparison between Hydraulic Hybrid and Hybrid Electric Vehicles, " *Energies* 2015, 8, 4697-4723.
- [4.5] Capata, R. (2011). *Lethe@-UDR1 Passenger Sedan Final Proposed, Configuration Journal of Transportation Technologies*, 1(04), 83.

- [4.6] Florian Dupriez-Robin. "Dimensionnement d'une propulsion hybride de voilier, base sur la modélisation par les flux de puissance". Thèse de doctorat. Université de Nantes, 2010. In french.
- [4.7] R. E. Hebner, "Electric ship power system", Research at the University of Texas at Austin, 'in Proc. IEEE Electric Ship Technol. Symp., Jul. 25–27, 2005, pp. 34–38
- [4.8] Enhua Wang, Di Guo, Fuyuan Yang, "System design and energetic Characterization of a four-wheel-driven series–parallel hybrid electric powertrain for heavy-duty applications," Energy Conversion and Management 106 (2015) 1264–1275.
- [4.9] "Application marines et sous-marines des piles à combustible," Mémento de l'Hydrogène, Fiche 9.4.2, Mars 2014, in French.
- [4.10] Roberto Capata and Antonino Coccia, "Procedure for the Design of a Hybrid-Series Vehicle and the Hybridization Degree Choice," Energies 2010, 3, 450–461
- [4.11] E. Ovrum and T. F. Bergh, "Modelling lithium-ion battery hybrid ships crane operation", Applied Energy, Volume 152, 15 August 2015, Pages 162-172.
- [4.12] Hengrong, L. (2012). "Design on IPNCS of electrical propulsion ship based on real-time Ethernet". Energy Procedia, 16, 1707-1713.
- [4.13] Scozzari, R., & Santarelli, M. (2014). "Techno-economic analysis of a small size short range EES (electric energy storage) system for a PV (Photovoltaic) plant serving a SME (small and medium enterprise) in a given regulatory context". Energy, 71, 180-193.
- [4.14] McConnell, V. P. (2010), "Now, voyager? The increasing marine use of fuel cells". Fuel cells bulletin, 2010(5), 12-17.
- [4.15] Chakraborty, Sumit, Dzielendziak, Agnieszka S, Koroglu, Turgay and Yang, Kun (2013), "Evaluation of smart eco-friendly public transport options in coastal cities: towards a green future for the city of Southampton", University of Southampton, 158pp.

- [4.16] Hybrid Propulsion Systems for Small Ships: Context and Challenges
https://www.researchgate.net/publication/308779563_Hybrid_Propulsion_Systems_for_Small_Ships_Context_and_Challenges
- [4.17]. <http://avem.fr/index.php?page=accueil>.
- [4.18]. <http://www.ship-technology.com/projects/knossos/>
- [4.19] Sven De Breucker, Eefje Peeters, Johan Driesen, (2009), ‘Possible applications of Plug-in Hybrid Electric Ships. pp 314-315
- [4.20] E. K. Dedes, D. A. Hudson, and S. R. Turnock, “Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping,” *Energy Policy*, vol. 40, pp. 204–218, 2012.
- [4.21] H. Grimmeliuss, P. de Vos, M. Krijgsman, and E. van Deursen, “Control of hybrid ship drive systems,” in 10th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT), Berlin, downloadable at www.compit.info, 2011.
- [4.22] C. P. Casson, C. J. Wood, D. J. Bricknell, K. Daffey, and R. Partridge, “Power and propulsion for the new global combatant,” 2006.
- [4.23] S. De Breucker, E. Peeters, and J. Driesen, “Possible applications of plug-in hybrid electric ships,” in *Electric Ship Technologies Symposium, 2009. ESTS 2009. IEEE*, pp. 310–317, April 2009.
- [4.24] M.C.D. de Baldasano, F. J. Mateos, L. R. NRivas, and T. J. Leo, “Conceptual design of offshore platform supply vessel based on hybrid diesel generator-fuel cell power plant,” *Applied Energy*, vol. 116, pp. 91–100, 2014.
- [4.25] S. Sortland, Hybrid propulsion system for anchor handling tug supply vessels,” *Wartsila Technical Journal*, vol. 1, pp. 45–48, 2008.
- [4.26] M. Oka, K. Hiraoka, and K. Tsumura, “Development of next-generation LNGC propulsion plant and hybrid system,” *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, vol. 41, no. 6, 2004.

- [4.27] R. Alvarez, P. Schlienger, and M. Weilenmann, "Effect of hybrid system battery performance on determining CO₂ emissions of hybrid electric vehicles in real-world conditions," *Energy Policy*, vol. 38, pp. 6919–6925, November 2010.
- [4.28] P. Thounthong, V.Chunkag, P. Sethakul, S. Sikkabut, S. Pierfederici, and B. Davat, "Energy management of fuel cell/solar cell/super capacitor hybrid power source," *Journal of Power Sources*, vol. 196, pp. 313–324, 2011.
- [4.29] J. Cho, H.-S. Kim, and K. Min, "Transient response of a unit proton-exchange membrane fuel cell under various operating conditions," *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 1, pp. 118–128, 2008.
- [4.30] F. Vogler, G. Würsig., *New Developments for Maritime Fuel Cell Systems, '18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010'*.
- [4.31] Jingang Han, Jean-Frederic Charpentier and Tianhao Tang *An Energy Management System of a Fuel Cell/Battery Hybrid Boat* French Naval Academy Research Institute, French Naval Academy, 29240 Brest Cedex 9, France, 2014 <https://www.mdpi.com/1996-1073/7/5/2799>.
- [4.32] Tie SF, Tan CW. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renew Sustain Energy Rev* 2013; 20:82e102
- [4.33] Ameen M. Bassam, Alexander B. Phillips, Stephen R. Turnock, Philip A. Wilson "Development of a multi-scheme energy management strategy for a hybrid fuel cell driven passenger ship", 2016
- [5.1]. Stan, A.T.; Swierczynski, M.; Stroe, D.I.; Teodorescu, R.; Andreasen, S.J.; Moth, K. A comparative study of lithium ion to lead acid batteries for use in UPS applications. In *Proceedings of the Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Vancouver, BC, Canada, 28 September–2 October 2014; pp. 1–8.
- [5.2]. Nilsson, A.O. Nickel cadmium batteries in UPS design features. In *Proceedings of the Telecommunications Energy Conference*, San Diego, CA, USA, 30 October–2 November 1988; pp. 388–393.
- [5.3]. Harrison, A.I. Batteries and AC phenomena in UPS systems: the battery point of view. In *Proceedings of the Telecommunications Energy Conference*, Florence, Italy, 15–18 October 1989; pp. 5

- [5.4]. Bekiarov, S.B.; Nasiri, A.; Emadi, A. A new reduced parts on-line single-phase UPS system. In Proceedings of the Industrial Electronics Society, IECON'03, Roanoke, VA, USA, 2–6 November 2003; Volume 1, pp. 688–693
- [5.5]. Zaghib, K.; Charest, P.; Guerfi, A.; Shim, J.; Perrier, M.; Striebel, K. Safe Li-ion polymer batteries for HEV applications. *J. Power Sources* 2004, 134, 124–129.
- [5.6]. Karden, E.; Ploumen, S.; Fricke, B.; Miller, T.; Snyder, K. Energy storage devices for future hybrid electric vehicles. *J. Power Sources* 2007, 168, 2–11.
- [5.7]. Burke, A.F. Batteries and ultra-capacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proc. IEEE* 2007, 95, 806–820.
- [5.8]. Zhao, H.; Wu, Q.; Hu, S.; Xu, H.; Rasmussen, C.N. Review of energy storage system for wind power integration support. *Appl. Energy* 2015, 137, 545–553.
- [5.9]. Chatzivasileiadi, A.; Ampatzi, E.; Knight, I. Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 25, 814–830.
- [5.10]. Ibrahim, H.; Ilinca, A.; Perron, J. Energy storage systems characteristics and comparisons. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2008, 12, 1221–1250.
- [5.11]. Vazquez, S.; Lukic, S.M.; Galvan, E.; Franquelo, L.G.; Carrasco, J.M. Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE Trans. Ind. Electr.* 2010, 57, 3881–3895.
- [5.12]. Dufo-López, R.; Lujano-Rojas, J.M.; Bernal-Agustín, J.L. Comparison of different lead-acid battery lifetime prediction models for use in simulation of stand-alone photovoltaic systems. *Appl. Energy* 2014, 115, 242–253.
- [5.13]. Parker, C.D. Lead-acid battery energy-storage systems for electricity supply networks. *J. Power Sources* 2001, 100, 18–28.
- [5.14]. Mohod, S.W.; Aware, M.V. Micro wind power generator with battery energy storage for critical load. *IEEE Syst. J.* 2012, 6, 18–125.
- [5.15]. Lam, L.T.; Louey, R. Development of ultra-battery for hybrid-electric vehicle applications. *J. Power Sources* 2006, 158, 1140–1148.

- [5.16]. Hadjipaschalis, I.; Poullikkas, A.; Efthimiou, V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009, 13, 1513–1522.
- [5.17]. Lukic, S.M.; Cao, J.; Bansal, R.C.; Rodriguez, F.; Emadi, A. Energy storage systems for automotive applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008, 55, 2258–2267.
- [5.18]. Wehrey, M.C. What's new with hybrid electric vehicles. *IEEE Power Energy Mag.* 2004, 2, 34–39.
- [5.19]. <http://dx.doi.org/10.1109/MPAE.2004.1359016>
- [5.20] Venkatesetty, H.V.; Jeong, Y.U. Recent advances in lithium-ion and lithium-polymer batteries. In *Proceedings of the Battery Conference on Applications and Advances*, Long Beach, CA, USA, 18 January 2002; pp. 173–178.
- [5.21]. Baker, J., 2008. New technology and possible advances in energy storage. *Energy Policy* 36, 4368–4373.
- [5.22]. Mohamed, M.R., Sharkh, S.M., Walsh, F.C., 2009. Redox flow batteries for hybrid electric vehicles: progress and challenges. In: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. IEEE, Dearborn, MI, pp. 551–557.
- [5.23]. Linden, D., Reddy, T.B., 2002. *Handbook of Batteries* 3rd edition. McGraw-Hill Handbooks.
- [5.24] Divya, K.C., Ostergaard, J., 2009. Battery energy storage technology for power systems—an overview. *Electric Power Systems Research* 79, 511–520.
- [5.25]. Linden, D., Reddy, T.B., 2002. *Handbook of Batteries* 3rd edition McGraw-Hill Handbooks.
- [5.26]. Galloway, R.C., Dustman, C.H., 2003. ZEBRA Battery—Material Cost Availability and Recycling. EVS-20. Long Beach, CA.
- [5.27]. Ponce de Leon, C., Frias-Ferrer, A., Gonzalez-Garcia, J., Szanto, D.A., Walsh, F.C., 2006. Redox flow cells for energy conversion. *Journal of Power Sources* 160, 716–732.

- [5.28]. Fontaras, G., Pistikopoulos, P., Samaras, Z., 2008. Experimental evaluation of hybrid vehicle fuel economy and pollutant emissions over real-world simulation driving cycles. *Atmospheric Environment* 42, 4023–4035.
- [5.29]. Neglur, S., Ferdowsi, M., 2009. Effect of battery capacity on the performance of plug-in hybrid electric vehicles. In: *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. IEEE, Dearborn, MI, pp. 649–654.
- [5.30] Hall, W.J, 2010. Assessment of CO₂ and priority pollutant reduction by installation of shoreside power. *Resources, Conservation and Recycling* 54, 462–46
- [5.31]. Future Ship Powering Options Exploring alternative methods of ship propulsion Royal Academy Engineering July 2013
- [5.32]. (IDTechEx 2011) <https://www.idtechex.com/energy-harvesting-and-storage-europe-11/eh-index.asp>
- [5.34]. Alnes, O, Eriksen, S, Vartdal, B.J. (2017). Battery-Powered Ships: A Class Society Perspective. *IEEE Electrification Magazine*, 5 (3), 10-21, 10.1109/MELE.2017.2718823
- [5.35]. <https://www.dnvgl.com/maritime/alternative-fuels-and-technologies-in-shipping/fuels-technology.html>
- [5.36]. Shahan, C. (2015). World's First All-Electric Battery-Powered Ferry. Z. Shahan. *Clean Technica*. <https://cleantechnica.com/2015/06/13/worlds-first-electric-battery-powered-ferry/>
- [5.37]. Ship-Technology. (2014). Ampere Electric Powered Ferry <https://www.ship-technology.com/projects/norled-zero-cat-electric-powered-ferry/>
- [5.38]. Corvus energy (2014) World's first all-electric car ferry <http://corvusenergy.com/marine-project/mf-ampere-ferry/>
- [5.39]. Zahedi, B, Norum, L.E, Ludwigsen, K.B. (2014) Optimised efficiency of all-electric ship by DC hybrid power systems. *J Power Sources*, Vol (255), 341-354.
- [5.40]. Dedes, E.K, Hudson, D.A, Turnock, S.R. (2012) Assessing the potential hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping. *Energy Policy*, Vol (40), 204- 218. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.046>

- [5.41]. Geertsma, R.D, Negenborn, R.R, Visser, K, Hopman, JJ. (2017) Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. *Applied Energy* (194), 30-54. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.060>
- [5.42]. Andreas Odengard, Philip Larsson 'ALTERNATIVE HYBRID PROPULSION ON SHIPS A SWOT analysis of gas turbines and diesel engines combined with batteries' Department of Shipping and Marine Technology CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Gotheburg, Sweden, 2018
- [5.43]. Muhammad Umair Mutarraf , Yacine Terriche, Kamran Ali Khan Niazi, Juan C. Vasquez and Josep M. Guerrero 'Energy Storage Systems for Shipboard Microgrids'.Denmark 2018.
- [5.44]. Khaligh, A.; Li, Z. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2010, 59,2806–2814.
- [5.45].. Anstrom, J.R.; Zile, B.; Smith, K.; Hofmann, H.; Batra, A. Simulation and field-testing of hybrid ultra-capacitor/battery energy storage systems for electric and hybrid-electric transit vehicles. In *Proceedings of the Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Charlotte, NC, USA, 15–19 March 2015; Volume 1, pp. 491–497*
- [5.46]. Kouchachvili, L.; Ya ıcı, W.; Entchev, E. Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles. *J. Power Sources* 2018, 374, 237–248.
- [5.47]. Based Buses. Available online: <https://www.treehugger.com/cars/ultracapacitor-buseswork-as-long-as-you-have-lots-of-quick-charge-stations.html> (accessed on 4.5.2020)
- [5.48]. Future Ship Powering Options exploring alternative methods of ship propulsion July 2013 Royal Academy of Engineering Prince Philip House 3 Carlton House Terrace London SW1Y 5DG. www.raeng.org.uk).

- [6.1] Hemmati, R.; Saboori, H. Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 65, 11–23.
- [6.3] Chen, H.; Cong, T.N.; Yang, W.; Tan, C.; Li, Y.; Ding, Y. Progress in electrical energy storage system: A critical overview. *Prog. Nat. Sci.* 2009, 19, 291–312.
- [6.4] Argyrou, M.C.; Christodoulides, P.; Kalogirou, S.A. Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 94, 804–821.
- [6.5] John Kuseian. Naval power systems technology development roadmap. *Electric Ships Office, PMS*, 320, 2013.
- [6.6] RD Geertsma, RR Negenborn, K Visser, and JJ Hopman. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. *Applied Energy*, 194:30–54, 2017.
- [6.7] Robert E Hebner, Kent Davey, John Herbst, David Hall, Jonathan Hahne, Dwayne D Surls, and Abdelhamid Ouroua. Dynamic load and storage integration. *Proceedings of the IEEE*, 103(12):2344–2354, 2015.
- [6.8.1] Siang Fui Tie and Chee Wei Tan. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20:82–102, 2013.
- [6.8.2] Joel R Anstrom, Benjamin Zile, Kandler Smith, H Hofmann, and A Batra. Simulation and field-testing of hybrid ultra-capacitor/battery energy storage systems for electric and hybrid-electric transit vehicles. In *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, volume 1, pages 491–497, 2005.
- [6.8.3] Micah Ortuzar, Jorge Moreno, and Juan Dixon. Ultracapacitor-based auxiliary energy system for an electric vehicle: Implementation and evaluation. *IEEE*
- [6.8.4] Ziyong Song, Jun Hou, Shaobing Xu, Minggao Ouyang, and Jianqiu Li. The influence of driving cycle characteristics on the integrated optimization of hybrid energy storage system for electric city buses. *Energy*, 135:91–100, 2017.

- [6.9.1] Tarik Kousksou, Pascal Bruel, Abdelmajid Jamil, T El Rha_ki, and Youssef Zeraouli. Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 120:59{80, 2014.
- [6.9.2] Gast_on Orlando Suvire, Marcelo Gustavo Molina, and Pedro Enrique Mercado. Improving the integration of wind power generation into ac microgrids using wheel energy storage. *IEEE Transactions on smart grid*, 3(4):1945{1954, 2012. *Transactions on industrial electronics*, 54(4):2147{2156, 2007.
- [6.10] John Kuseian. Naval power systems technology development roadmap. *Electric Ships O_ce*, PMS, 320, 2013.
- [6.11] John Kuseian. Naval power systems technology development roadmap. *Electric Ships O_ce*, PMS, 320, 2013.
- [7.1] Eyer, J.M.; Erdman, B.; Iannucci, J.J., Jr. Innovative Applications of Energy Storage in a Restructured Electricity Marketplace: Phase III Final Report: A Study for the DOE Energy Storage Systems Program (No. SAND2003-2546); Sandia National Laboratorie: Albuquerque, NM, USA, 2005.
- [7.2] Energy Storage System for Ships-Work in Progress. Available online: <http://corvusenergy.com/work-inprogress/> (accessed on 20 September 2020).
- [7.3] Mattern, K.; Ellis, A.; Williams, S.E.; Edwards, C.; Nourai, A.; Porter, D. Application of inverter-based systems for peak shaving and reactive power management. In *Proceedings of the Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Chicago, IL, USA, 21–24 April 2008; pp. 1–4.
- [7.4]. Sonoda, N.; Matsunaga, H.; Gengo, T.; Minami, M.; Oishi, M.; Hashimoto, T. Development of Containerized Energy Storage System with Lithium-ion batteries. *Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Rev.* 2013, 50, 36–41.
- [7.5]. Energy Storage Systems for Shipboard Microgrids. Muhammad Umair Mutarraf *, Yacine Terriche, Kamran Ali Khan Niazi , Juan C. Vasquez and Josep M. Guerrero. Department of Energy Technology, Aalborg University, December 2018 .

- [7.6] Bø, T.I.; Johansen, T.A. Battery power smoothing control in a marine electric power plant using nonlinear model predictive control. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2017, 25, 1449–1456.
- [7.7] Det Norske Veritas. Rules for Classification and Construction. Ship Technology, Seagoing Ships, Electrical Installations of Ships. Available online: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNV/ruleship/2012-01/ts408.pdf> (accessed on 27 August 2020).
- [7.8]. Tang, J.; Xiong, B.; Huang, Y.; Yuan, C.; Su, G. Optimal configuration of energy storage system based on frequency hierarchical control in ship power system with solar photovoltaic plant. *J. Eng.* 2017, 13, 1511–1514.
- [7.9] Shagar, V.; Jayasinghe, S.G.; Enshaei, H. Frequency transient suppression in hybrid electric ship power systems: A model predictive control strategy for converter control with energy storage. *Inventions* 2018, 3, 13.
- [7.10a] Kim, S.Y.; Choe, S.; Ko, S.; Sul, S.K. A Naval Integrated Power System with a Battery Energy Storage System: Fuel efficiency, reliability, and quality of power. *IEEE Electr. Mag.* 2015, 3, 22–33.
- [7.10b] Terriche, Y.; Kerdoun, D.; Djeghloud, H. A new passive compensation technique to economically improve the power quality of two identical single-phase feeders. In *Proceedings of the IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Rome, Italy, 10–13 June 2015; pp. 54–59.
- [7.11]. Terriche, Y.; Golestan, S.; Guerrero, J.M.; Kerdoune, D.; Vasquez, J.C. Matrix pencil method-based reference current generation for shunt active power filters. *IET Power Electron.* 2017, 11, 772–780.
- [7.12] Tarasiuk, T. Comparative study of various methods of DFT calculation in the wake of IEC Standard 61000-4-7. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2009, 58, 3666–3677.
- [7.13] Mo, R.; Li, H. Hybrid energy storage system with active filter function for shipboard MVDC system applications based on isolated modular multilevel DC/DC converter. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 2017, 5, 79–87.
- [7.14]. Hebner, R.E.; Herbst, J.D.; Gattozzi, A.L. Pulsed power loads support and efficiency improvement on navy ships. *Naval Eng. J.* 2010, 122, 23–32.

- [8.1] R. Alvarez, P. Schlienger, and M. Weilenmann, "Effect of hybrid system battery performance on determining CO₂ emissions of hybrid electric vehicles in real-world conditions," *Energy Policy*, vol. 38, pp. 6919-6925, November 2010.
- [8.2] J. Cho, H.-S. Kim, and K. Min, "Transient response of a unit proton-exchange membrane fuel cell under various operating conditions," *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 1, pp. 118-128, 2008.
- [8.3] S. Srinivasan, *Fuel Cell from Fundamentals to Applications*. Springer, 2006
- [8.4] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*. John Wiley & Sons Ltd, second ed., 2003.
- [8.5] S. Srinivasan, *Fuel Cell from Fundamentals to Applications*. Springer, 2006.
- [8.6] K. Sopian and W. R. W. Daud, "Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells," *Renewable Energy*, vol. 31, p. 719-727, 2006.
- [8.7] S. Srinivasan, *Fuel Cell From Fundamentals to Applications*. Springer, 2006.
- [8.8] Y. M. Welaya, M. M. E. Gohary, and N. R. Ammar, "A comparison between fuel cells and other alternatives for marine electric power generation," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 141-149, 2011.
- [8.9] J. J. de Troya, C. Alvarez, C. Fernandez-Garrido, and L. Carral, "Analysing the possibilities of using fuel cells in ships," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 4, pp. 2853-2866, 2016.
- [8.10] K. Ware, "Assessment of the impacts of shipping on the marine environment," tech. rep., Monitoring and Assessment Series OSPAR Commission, 2009.
- [8.11] L. K. C. Tse, S. Wilkins, N. McGlashan, B. Urban, and R. Martinez-Botas, "Solid oxide fuel cell/gas turbine trigeneration system for marine applications," *Journal of Power Sources*, vol. 196, pp. 3149-3162, 2011.
- [8.12] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*. John Wiley & Sons Ltd, second ed., 2003.
- [8.13] S. Srinivasan, *Fuel Cell from Fundamentals to Applications*. Springer, 2006.
- [8.14] Z. Karni, R. Willigan, C. Artze, M. Badal, W. Gordon, J. Halder, R. Levesque, and W. Forsyth, "Comparative life cycle costs of fuel cells and other propulsion

systems," Tech. Rep. CG-D-19-00, U.S. Coast Guard Research and Development Center, January 2000.

[8.15] E. Carlson, P. Kopf, J. Sinha, S. Sriramulu, and Y. Yang, "Cost analysis of PEM fuel cell systems for transportation," tech. rep., National Renewable Energy Laboratory, September 2005.

[8.16] P. Garcia, L. M. Fernandez, C. A. Garcia, and F. Jurado, "Fuel cell-battery hybrid system for transport applications," in International Conference on Electrical Machines and Systems ICEMS, November 2009.

[8.17] D. Hart, F. Lehner, R. Rosa, and J. Lewis, "The fuel cell industry review 2015," tech. rep., E4tech, 2015.

[8.18] A. Kirubakaran and R. N. Shailendra Jain, "A review on fuel cell technologies and power electronic interface," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, pp. 2430-2440, 2009.

[8.19] K. Subramanyan, U. M. Diwekar, and A. Goyal, "Multi-objective optimization for hybrid fuel cells power system under uncertainty," Journal of Power Sources, vol. 132, pp. 99-112, 2004.

[8.20] M. W. Ellis, M. R. V. Spakovsky, and D. J. Nelson, "Fuel cell systems: Efficient, flexible energy conversion for the 21st century," Proceedings of the IEEE, vol. 89, no. 12, pp. 1808-1818, 2001.

[8.21] K. Akiyama, S. Matsumoto, A. Miyasaka, and T. Shodai, "An air-breathing single cell small proton exchange membrane fuel cell system with ab5-type metal hydride and an ultra-low voltage input boost converter," Journal of Power Sources, vol. 186, pp. 37-44, 2009.

[8.22] S. Srinivasan, Fuel Cell from Fundamentals to Applications. Springer, 2006.

[8.23] B. Cook, "Introduction to fuel cells and hydrogen technology," Engineering Science and Education Journal, 2002. 6.24 C. W. Blake and C. H. Rivkin, "Stationary fuel cell application codes and standards: Overview and gap analysis," tech. rep., National Renewable Energy Laboratory, September 2010.

- [8.25] P. Britz and N. Zartnar, \PEM-fuel cell system for residential applications," Fuel Cells, vol. 4, no. 4, pp. 269{275, 2004.
- [8.26] B. Cook, \Introduction to fuel cells and hydrogen technology," Engineering Science and Education Journal, 2002.
- [8.27] T. Mahlia and P. Chan, \Life cycle cost analysis of fuel cell-based cogeneration system for residential application in malaysia," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, pp. 416{426, 2011.
- [8.28] M. W. Ellis, M. R. V. Spakovsky, and D. J. Nelson, \Fuel cell systems: Efficient, flexible energy conversion for the 21st century," Proceedings of the IEEE, vol. 89, no. 12, pp. 1808{1818, 2001.
- [8.29] Z. Yu, J. Han, and X. Cao, \Investigation on performance of an integrated solid oxide fuel cell and absorption chiller tri-generation system," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 36, pp. 12561{12573, 2011
- [8.30] S. Ma, J. Wang, Z. Yan, Y. Dai, and B. Lu, \Thermodynamic analysis of a new combined cooling, heat and power system driven by solid oxide fuel cell based on ammonia water mixture," Journal of Power Sources, vol. 196, pp. 8463{8471, 2011.
- [8.31] A. Mai, B. Iwanschitz, U. Weissen, R. Denzler, D. Haberstock, V. Nerlich, J. Sfeir, and A. Schuler, \Status of hexis SOFC stack development and the galileo 1000 N micro-CHP system," in 216th Electrochemical Society (ECS) Meeting, (Vienna), October 2009.
- [8.32] K. Floger, \Commercialisation of CFCLs residential power station - blugenTM," in Proceedings of 9th European Fuel Cell Forum, (Lucerne), 2010.
- [8.33] A. Liu and Y. Weng, \Performance analysis of a pressurized molten carbonate fuel cell/micro-gas turbine hybrid system," Journal of Power Sources, vol. 195, pp. 204{213, 2010.
- [8.34] L. Carrette, K. A. Friedrich, and U. Stimming, \Fuel cells –fundamentals and applications," Fuel Cells, vol. 1, no. 1, pp. 5{39, 2001.
- [8.35] D. Hart, F. Lehner, R. Rosa, and J. Lewis, \The fuel cell industry review 2015," tech. rep., E4tech, 2015.

- [8.36] A. Emadi, Y. J. Lee, and K. Rajashekara, "Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 6, pp. 2237{2245, 2008.
- [8.37] E. G. Technical Services, "Fuel cell handbook (seventh edition)," tech. rep., November 2004. Contract No.DE-AM26-99FT40575.
- [8.38] A. Kazim, "Economical and environmental assessments of proton exchange membrane fuel cells in public buildings," *Energy Conversion and Management*, vol. 42, pp. 763{772, 2001
- [8.39] J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, and H. Peng, "Control of fuel cell breathing," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 30{46, April 2004.
- [8.40] M. W. Ellis, M. R. V. Spakovsky, and D. J. Nelson, "Fuel cell systems: Ancient, exible energy conversion for the 21st century," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 12, pp. 1808{1818, 2001.
- [8.41] S. Shaer, "Delphi SOFC development update," in 2008 SECA Annual Review Meeting, (Pittsburgh), 2008.
- [8.42] A. Choudhury, H. Chandra, and A. Arora, "Application of solid oxide fuel cell technology for power generation { a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, pp. 430{442, April 2013.
- [8.43] A. R. Miller, J. Peters, B. E. Smith, and O. A. Velev, "Analysis of fuel cell hybrid locomotives," *Journal of Power Sources*, vol. 157, pp. 855{861, 2006.
- [8.44] A. Miller, K. Hess, D. Barnes, and T. Erickson, "System design of a large fuel cell hybrid locomotive," *Journal of Power Sources*, vol. 173, pp. 935{942, 2007.
- [8.45] K. J. Karimi, "Future aircraft power systems- integration challenges," in The Boeing Company, 2007.
- [8.46] J. W. Pratt, L. E. Klebano_, K. Munoz-Ramos, A. A. Akhil, D. B. Curgus, and B. L. Schenkman, "Proton exchange membrane fuel cells for electrical power generation on-board commercial airplanes," tech. rep., Sandia National Laboratories, May 2011.

- [8.47] A. Hajizadeh, A. H. Shahirinia, and D. C. Yu, "Power control of autonomous hybrid diesel generator/ fuel cell marine power system combined with energy storage," in 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), (Malaysia), December 2012.
- [8.48] "Marine applications for fuel cell technology - a technical memorandum," Tech. Rep. OTA-TM-O-37, U.S. Congress, Office of Technology Assessment, February 1986
- [8.49] R. Lawton, J. Bash, and S. Barnett, "Marine applications of fuel cells," in OCEANS '02 MTS/IEEE, vol. 3, pp. 1784-1790, 2002.
- [8.50] C. Georgescu and E. Mamut, "A study concerning the possibilities for using fuel cells systems for maritime propulsion," Romanian Journal of Physics, vol. 51, no. 1-2, pp. 49-56, 2006.
- [8.51] M. Altmann, W. Weindorf, and M. Weinberger, "Life cycle analysis results of fuel cell ships-recommendations for improving cost effectiveness and reducing environmental impacts," tech. rep., July 2004.
- [8.52] S. Alkaner and P. Zhou, "A comparative study on life cycle analysis of molten carbon fuel cells and diesel engines for marine application," Journal of Power Sources, vol. 158, pp. 188-199, 2006.
- [8.53] E. Ovrum and G. Dimopoulos, "A validated dynamic model of the first marine molten carbonate fuel cell," Applied Thermal Engineering, vol. 35, pp. 15-28, 2012.
- [8.54]
-] C. A. Frangopoulos and L. G. Nakos, "Development of a model for thermoeconomic design and operation optimization of a PEM fuel cell system," Energy, vol. 31, pp. 1501-1519, 2006.
- [8.55] N. Benyahia, N. Benamrouche, and T. Rekioua, "Modeling, design and simulation of fuel cell modules for small marine applications," in International Conference on Electrical Machine ICEM, pp. 1989-1995, 2012.
- [8.56] P. Beckhaus, M. Dokupil, A. Heinzl, S. Souzani, and C. Spitta, "On-board fuel cell power supply for sailing yachts," Journal of Power Sources, vol. 145, pp. 639-643, 2005.
- 6.57 L. Luckose, H. L. Hess, and B. K. Johnson, "Fuel cell propulsion system

for marine applications," Electric Ship Technologies Symposium ESTS, pp. 574{580, 2009.

[8.58] T. Leo, J. Durango, and E. Navarro, \Exergy analysis of PEM fuel cells for marine applications," Energy, vol. 35, no. 2, pp. 1164 {1171, 2010. ECOS 2008 21st International Conference, on E_ciciency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems.

[8.59] J. Sun, J. Stebe, and C. Kennell, \Feasibility and design implications of fuel cell power for sealift ships," Naval Engineers Journal, vol. 3, pp. 87{102, 2010.

[8.60] V. Tsourapas, A. Stefanopoulou, and J. Sun, \Dynamics, optimization and control of a fuel cell based combined heat power (CHP) system for shipboard applications," in 2005 American Control Conference, (USA), pp. 1993{1998, June 2005.

[8.61] K. Astr_om, E. Fontell, and S. Virtanen, \Reliability analysis and initial requirements for fc systems and stacks," Journal of Power Sources, vol. 171, pp. 46{54, 2007.

[8.62] L. K. C. Tse, S. Wilkins, N. McGlashan, B. Urban, and R. Martinez-Botas, \Solid oxide fuel cell/gas turbine trigeneration system for marine applications," Journal of Power Sources, vol. 196, pp. 3149{3162, 2011.

[8.63] M. C. D. de Baldasano, F. J. Mateos, L. R. NRivas, and T. J. Leo, \Conceptual design of o_shore platform supply vessel based on hybrid diesel generator-fuel cell power plant," Applied Energy, vol. 116, pp. 91(100, 2014).

[8.64]. G. Weaver and S. Barrett, \Marine applications of fuel cell technology," Fuel Cells Bulletin, pp. 11{12, January 2003.

[8.65] T. Maeda, S. Ishiguro, K. Yokoyama, K. Hirokawa, A. Hashimoto, Y. Okuda, and T. Tani, \Development of fuel cell AUV "URASHIMA"," Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review, vol. 41, no. 6, 2004.

[8.66] V. P. McConnell, \Now, voyager? the increasing marine use of fuel cells," Fuel Cells Bulletin, pp. 12{17, May 2010

- [8.67] Green agship." www.2wglobal.com/www/pdf/Green_Flagship.pdf. Είσοδος : 30/11/2020.
- [8.68] F. Rohde, \The future of the fehmarn link," Germanischer Lloyd nonstop, no. 3, pp. 10{13, 2012.
- [8.69] Nyk super eco ship 2030." <http://www.nyk.com/english/csr/envi/ecoship/>. Accessed on: 30/10/2020. \Green agship." www.2wglobal.com/www/pdf/Green_Flagship.pdf. Accessed on: 30/10/2014.
- [8.71] Scotland plans fuel cell ferry, could run on green hydrogen," Fuel Cells Bulletin, p. 3, January 2013
- [8.72] CMR prototech plans _rst hydrogen ferry in norway, with fuel cells," Fuel Cells bulletin vol. 2016, no. 5, pp. 3 {, 2016. 214 REFERENCES
- [9.1] Fuel cell stack."
<http://uk.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/fuelcellstack.html>.
Accessed on: 18/11/2020.
- [9.2] Battery."
<http://uk.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>. Accessed on: 18/11/2020.
- [9.3] D. Cheddie and N. Munroe, "Review and comparison of approaches to proton exchange membrane fuel cell modeling," *Journal of Power Sources*, vol. 147, no. 1, pp. 72–84, 2005.
- [9.4] S. Njoya, O. Tremblay, and L.-A. Dessaint, "A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC'09. IEEE*, pp. 1722–1729, IEEE, 2009.
- [9.5] S. M. C. Ang, E. S. Fraga, N. P. Brandon, N. J. Samsatli, and D. Brett, "Fuel cell systems optimization—methods and strategies," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 22, pp. 14678–14703, 2011.
- [9.6] Q. Cai, D. J. L. Brett, D. Browning, and N. P. Brandon, "A

sizing-design methodology for hybrid fuel cell power systems and its application to an unmanned underwater vehicle," *Journal of Power Sources*, vol. 195, pp. 6559–6569, 2010.

- [9.7] G. Griths, D. Reece, P. Blackmore, M. Lain, S. Mitchell, and J. Jamieson, "Modeling hybrid energy systems for use in AUVs," *Proc. Unmanned Untethered Submersible Technology*, 2005.
- [9.8] L. Barelli, G. Bidini, and A. Ottaviano, "Optimization of a PEMFC/battery pack power system for a bus application," *Applied energy*, vol. 97, pp. 777-784, 2012
- [9.9] E.G. Technical Services, "Fuel cell handbook (seventh edition)," tech. rep., November 2004. Contract No.DE-AM26-99FT40575.
- [9.10] E. Ovrum and T. Bergh, "Modelling lithium-ion battery hybrid ship crane operation," *Applied Energy*, vol. 152, pp. 162-172, 2015.
- [9.11] O. Tremblay and L.-A. Dessaint, "Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 1-10, 2009.
- [9.12] R. Gupta, R. Lamba, and S. Padhee, "Thyristor based speed control Techniques of dc motor: A comparative analysis," *International Journal of Sciatic and Research Publications*, vol. 2, June 2012.
- [9.13] <http://uk.MathWorks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>.Είσοδος : 30/11/2020.
- [9.14] R. Gupta, R. Lamba, and S. Padhee, "Thyristor based speed control techniques of dc motor: A comparative analysis," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 2, June 2012.
- [9.15] M. Ouyang, L. Xu, J. Li, L. Lu, D. Gao, and Q. Xie, "Performance comparison of two fuel cell hybrid buses with different powertrain and

- energy management strategies," *Journal of Power Sources*, vol. 163, no. 1, pp. 467{479, 2006.
- [9.16] L. Xu, M. Ouyang, J. Li, F. Yang, L. Lu, and J. Hua, \Application of Pontryagin's minimal principle to the energy management strategy of plugin fuel cell electric vehicles," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 24, pp. 10104 {10115, 2013.
- [9.17] A. Fadel and B. Zhou, \Power management methodologies for fuel cell-battery hybrid vehicles," tech. rep., SAE Technical Paper, 2010.
- [9.18] N.-C. Shih, B.-J. Weng, J.-Y. Lee, and Y.-C. Hsiao, \Development of a 20-kw generic hybrid fuel cell power system for small ships and underwater vehicles," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 25, pp. 13894{13901, 2014.
- [9.19] J. Han, J.-F. Charpentier, and T. Tang, \An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat," *Energies*, vol. 7, pp. 2799{2820, 2014.
- [9.20] G. Paganelli, S. Delprat, T. Guerra, J. Rimaux, and J. Santin \Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains," in *Vehicular Technology Conference, 2002. VTC Spring 2002. IEEE 55th*, vol. 4, pp. 2076{2081, 2002.
- [9.21] S. Motapon, L. -A. Dessaint, and K. Al-Haddad, "A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 3, pp. 1320–1334, 2014.
- [9.22] S. J. Moura, D. S. Callaway, H. K. Fathy, and J. L. Stein, "Tradeoffs between battery energy capacity and stochastic optimal power management in plug-in hybrid electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 9, pp. 2979–2988, 2010.
- [9.23] X. Zhang, C. C. Mi, A. Masrur, and D. Daniszewski, \Wavelet-transform-based power management of hybrid vehicles with multiple on-board energy sources including fuel cell, battery and ultracapacitor," *Journal of Power Sources*, vol. 185, no. 2, pp. 1533{1543, 2008.

- [9.24] F. Segura and J. M. Andújar, "Power management based on sliding control applied to fuel cell systems: A further step towards the hybrid control concept," *Applied Energy*, vol. 99, pp. 213–225, 2012.
- [9.25] M.-J. Kim and H. Peng, "Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 165, no. 2, pp. 819–832, 2007.
- [9.26] W.-S. Lin and C.-H. Zheng, "Energy management of a fuel cell/ultracapacitor hybrid power system using an adaptive optimal-control method," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 6, pp. 3280–3289, 2011.
- [9.27] S. F. Tie and C. W. Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 20, pp. 82–102, 2013.
- [9.28] P. Garcia, L. M. Fernandez, C. A. Garcia, and F. Jurado, "Energy management system of fuel-cell-battery hybrid tramway," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 12, pp. 4013–4023, 2010.
- [9.29] W. Choi, J. Howze, and P. Enjeti, "Development of an equivalent circuit model of a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current," *Journal of Power Sources*, vol. 158, no. 2, pp. 1324–1332, 2006.
- [9.30] "MATLAB control system toolbox." <http://uk.mathworks.com/products/control/>, 2016. Accessed: 2021-01-18.
- [9.31] L. Xu, J. Li, J. Hua, X. Li, and M. Ouyang, "Optimal vehicle control strategy of a fuel cell/battery hybrid city bus," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 17, pp. 7323–7333, 2009.
- [9.32] G. Paganelli, S. Delprat, T. M. Guerra, J. Rimaux, and J. J. Santin, "Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains," in *Vehicular Technology Conference, 2002. VTC Spring 2002. IEEE 55th*, vol. 4, pp. 2076–2081, 2002.