



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
“Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη”

“Εφαρμογές Κυψελών Καυσίμου στη Ναυτιλία -
Προοπτικές για Μεγάλης Ισχύος Μονάδες”

Διπλωματική Εργασία
του μεταπτυχιακού φοιτητή
Μπακαλάρου Ανδρέα
με Α.Μ. 08117829

Επιβλέποντες Καθηγητές
Λυρίδης Δημήτριος
Κλαδάς Αντώνιος
Προυσαλίδης Ιωάννης

ΑΘΗΝΑ
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2019

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
2. ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	6
3. ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	9
4. ΤΥΠΟΙ FC	11
4.1. Βασικά Στοιχεία Κυψελών Καυσίμου	11
4.2. Κυψέλες Καυσίμου Τετηγμένου Άνθρακα (MCFCs)	11
4.3. Κυψέλες Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFCs)	12
4.4. Κυψέλες Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFCs)	12
4.5. Κυψέλες Καυσίμου Στερεού Οξειδίου (SOFCs)	12
4.6. Κυψέλες Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης (DMFCs)	12
4.7. Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (AFC)	13
4.8. Περαιτέρω Χαρακτηριστικά	13
4.8.1. Οφέλη χρήσης κυψελών καυσίμου	13
4.8.2. Βοηθητικός εξοπλισμός - Balance of Plant (BoP)	13
5. ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΣΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	14
5.1. Εισαγωγή	14
5.2. Πετρέλαιο Ντίζελ	15
5.3. Φυσικό Αέριο NG	15
5.4. Μεθανόλη	16
5.5. Διμεθυλαιθέρας	16
5.6. Αμμωνία	16
5.7. Υδρογόνο	17
5.7.1. Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου	17
5.7.1.1. Υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα	17
5.7.1.1.1. Παραγωγή από φυσικό αέριο/ υδρογονάνθρακες	17
5.7.1.1.2. Παραγωγή από άνθρακα	20
5.7.2. Υδρογόνο από τη διάσπαση του νερού	20
5.7.2.1. Ηλεκτρόλυση του νερού	20
5.7.2.2. Αλκαλική ηλεκτρόλυση	21
5.7.2.3. Ηλεκτρόλυση σε πολυμερικής μεμβράνης ηλεκτρολύτες (PEM)	21
5.7.2.4. Ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες	22
5.7.2.5. Άλλες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου	22
5.7.2.5.1. Φωτο-ηλεκτρόλυση (Φωτόλυση)	22

5.7.2.5.2. Φωτο-βιολογική παραγωγή	22
5.7.2.5.3. Θερμοχημική διάσπαση του νερού	22
5.7.2.5.4. Υδρογόνο από βιομάζα	23
5.7.3. Μέθοδοι αποθήκευσης	23
5.7.3.1. Αποθήκευση με συμπίεση	23
5.7.3.2. Αποθήκευση με υγροποίηση	24
5.7.3.3. Αποθήκευση σε προηγμένα υλικά	24
5.7.3.3.1. Προσροφητικά υλικά	25
5.7.3.3.2. Μεταλλικά υδρίδια	25
5.7.3.3.3. LOHC	26
5.7.4. Καθαρισμός υδρογόνου	26
5.7.4.1. Καθαρισμός του CO από το υδρογόνο	26
5.7.4.2. Διαχωρισμός μεμβράνης	27
5.7.4.3. Pressure swing adsorption	27
5.7.4.4. Αποθείωση (Des)	28
5.7.4.5. Δέσμευση και αποθήκευση του CO ₂	28
6. ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	29
6.1. Το Πλήρως Ηλεκτρικό Πλοίο (All Electric Ship)	29
6.2. Ηλεκτρική Απόδοση	30
6.2.1. Συμβατικοί ναυτιλιακοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας	30
6.2.2. Αποδόσεις συστημάτων κυψελών καυσίμου	30
6.2.3. Συνδυασμένοι κύκλοι	31
6.3. Ισχύς και Πυκνότητα Ενέργειας	32
6.3.1. Σύγκριση ναυτιλιακών συστημάτων κυψελών καυσίμου	32
6.4. Μεταβάσεις Φορτίου και Εκκίνηση Συστήματος	33
6.5. Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας	34
6.6. Περιβαλλοντική Επίπτωση Κυψελών Καυσίμου	35
6.7. Ασφάλεια και Διαθεσιμότητα	37
6.8. Οικονομικά Δεδομένα	38
7. ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	39
7.1. Έργα Έρευνας Ναυτιλιακών Κυψελών Καυσίμου	39
7.1.1. Χρήση συστημάτων κυψελών καυσίμου σε υποβρύχια	39
7.1.2. Συνεργασία Siemens με την TKMS	42

7.1.2.1. Εξέλιξη του συστήματος	42
7.1.2.2. Εφοδιαστικά καύσιμα στα PEMFC των υποβρυχίων TKMS	43
7.1.2.3. Αναλυτική περιγραφή του συστήματος PEMFC της Siemens	44
7.1.2.3.1. Λειτουργία και σχεδιασμός	45
7.1.2.3.2. Μονάδες και σταθμός παραγωγής ενέργειας	46
7.1.2.3.3. Μονάδα παραγωγής κυψελών καυσίμου PEM	48
7.1.2.3.4. Διαχείριση Ενέργειας	50
7.1.3. Μέτρα ασφαλείας κατά την παραλαβή αντιδρώντων αερίων συστήματος αναερόβιας πρόωσης στα ελληνικά υποβρύχια τ. 214	51
7.1.3.1. Οξυγόνο	51
7.1.3.2. Υδρογόνο	52
7.1.4. Ανεφοδιασμός με αντιδρώντα αέρια των Υ/Β τ. 214	54
7.1.4.1. Ανεφοδιασμός με υδρογόνο	54
7.1.4.2. Ανεφοδιασμός με οξυγόνο	55
7.2. Πρόοδος των Κυψελών Καυσίμου στην Εμπορική Ναυτιλία	55
7.2.1. Αρχικά projects	55
7.2.1.1. SSFC	55
7.2.1.2. DESIRE	56
7.2.1.3. FCSHIP	56
7.2.1.4. FELLOWSHIP	56
7.2.1.5. FELICITAS (2005-2008)	56
7.2.1.6. MC-WAP	57
7.2.1.7. ZEMSHIP	57
7.2.1.8. METHAPU (2006-2010)	57
7.2.1.9. NEMO H2	57
7.2.1.10. Το πρότζεκτ e4ships (2009-2016)	58
7.2.2. Σύγχρονα projects	59
7.2.2.1. WATER-GO-ROUND	59
7.2.2.2. ENERGY OBSERVER	59
7.2.2.3. Η ΚΟΙΝΟΠΡΑΞΙΑ HYON AS	59
7.2.2.4. Zero Emission Fast Ferry – ZEFF	60
7.2.2.5. SEASHUTTLE	60
7.2.3. Πλοία τροφοδοτούμενα με κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) από τη Samsung Heavy Industries	61

7.2.4. Το σύστημα ONBOARD MICROGRID της ABB	62
7.2.5 Οι μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Li-ion)	62
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ - ΑΝΤΙ ΕΠΙΛΟΓΟΥ	64
ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	66

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανασκόπηση των εφαρμογών των προοπτικών της χρήσης των κυψελών καυσίμου στη Ναυτιλία. Θα γίνει μία σύντομη ιστορική αναδρομή και εν συνεχεία περιγραφή των τύπων κυψελών καυσίμου. Εν συνεχεία μια επισκόπηση των τύπων και συστημάτων κυψελών καυσίμου, του βοηθητικού εξοπλισμού καθώς και των εφοδιαστικών καυσίμων. Θα γίνει μία σύντομη αναφορά στις ναυτιλιακές εφαρμογές των κυψελών καυσίμου όσον αφορά την απόδοση, την κατανάλωση καυσίμου, την ισχύ και πυκνότητα ενέργειας τη βαρυμετρική και ογκομετρική πυκνότητα, τη δυναμική συμπεριφορά, τις δυνατότητες παρακολούθησης του φορτίου, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, την ασφάλεια, την οικονομία και τις δυνατότητες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Κατόπιν, θα γίνει μία αναφορά στα συστήματα κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούνται στα υποβρύχια ανά τον κόσμο, με έμφαση στο σύστημα της SIEMENS που χρησιμοποιεί η Γερμανική TKMS και κατέχουν τα Ελληνικά Υ/Β τ.214, παραθέτοντας επίσης τα λαμβανόμενα μέτρα κατά τον ανεφοδιασμό με τα αντιδρώντα αέρια. Τέλος θα αναφερθούν το σύνολο των πρότζεκτ, παλαιότερων και σύγχρονων, για συστήματα κυψελών καυσίμου σε ναυτιλιακές εφαρμογές.

2. ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου ανακαλύφθηκε πριν από 150 χρόνια περίπου, και συγκεκριμένα η ιστορία τους άρχισε το 1839 από το Βρετανό δικηγόρο/επιστήμονα Sir William Grove (1811 - 1896). Ο Grove εκτελώντας απλά πειράματα διαπίστωσε ότι η ηλεκτρόλυση του νερού σε αραιό θειικό οξύ είναι διαδικασία αντιστρέψιμη. Χρησιμοποιώντας δύο ηλεκτρόδια πλατίνας ημιβυθισμένα σε υδατικό όξινο διάλυμα και το υπόλοιπο απομονωμένο χωριστά σε δύο δεξαμενές που περιέχουν οξυγόνο και υδρογόνο, κατάφερε να παρατηρήσει ότι παραγόταν ηλεκτρική ενέργεια. Διαπίστωσε επίσης ότι με συνδυασμό πολλών κυψελών σε σειρά θα μπορούσε να παράγει αρκετό ηλεκτρικό ρεύμα για να κάνει την ηλεκτρόλυση του νερού. Σε τελικό στάδιο, το οξυγόνο και το υδρογόνο επανενώνονται.

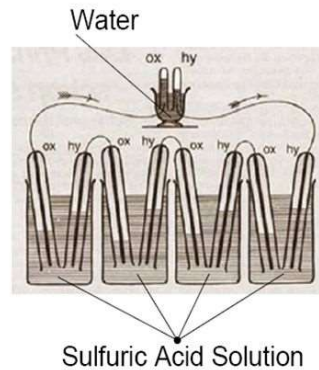
First Fuel Cell

Sir William Robert Grove, (11 July 1811 – 1 August 1896) was a Welsh judge and physical scientist. He invented the first fuel cell in 1839.



Copyright 2014 by Noriko Hikosaka Behling

Grove's 1839 gas voltaic battery diagram



2

Σχήμα 2.1 Η πρώτη κυψέλη καυσίμου του Sir William Grove

Η συσκευή αυτή ορίστηκε από τον Grove σαν μια μπαταρία βολταϊκού αερίου (gas voltaic battery), η οποία στην συνέχεια ορίστηκε ως η πρώτη κυψέλη καυσίμου. Εν συνεχεία, το 1889 ο χημικός Ludwig Mond (1839 - 1909) και ο βοηθός του Charles Langer επινόησαν τον όρο «κυψέλη καυσίμου» καθώς προσπαθούσαν να κατασκευάσουν την πρώτη συσκευή χρησιμοποιώντας ατμοσφαιρικό αέρα και βιομηχανικά αέρια του άνθρακα. Κατέληξαν ωστόσο ότι θα έπρεπε να ξεπεραστούν πολλά εμπόδια. Το 1893, ο Sir Friedrich Wilhelm Ostwald (1853 - 1932), Γερμανός χημικός, ανέπτυξε ένα μεγάλο κομμάτι της αρχής λειτουργίας των κυψελών καυσίμου και τα ευρήματα του αυτά αποτέλεσαν τη βάση για μελλοντικά πειράματα.

Λίγο αργότερα, το 1932 ο μηχανικός Dr. Thomas Francis Bacon στο πανεπιστήμιο του Cambridge της Αγγλίας επανέφερε στο προσκήνιο την κυψέλη καυσίμου που είχαν αναπτύξει οι Mond και Langer, εφαρμόζοντας διάφορες τροποποιήσεις στο αρχικό σχέδιο και δημιούργησε έτσι μία συσκευή γνωστή ως ονομάστηκε «Κυψέλη Bacon» και ήταν στην ουσία η πρώτη αλκαλική κυψέλη καυσίμου (Alkaline Fuel Cell - AFC). Το 1959, ο Bacon παρουσίασε μια κυψέλη καυσίμου ικανή να παράγει 6 kW ηλεκτρική ισχύ. Το ίδιο έτος ο Harry Karl Ihrig κατασκεύασε το πρώτο όχημα που χρησιμοποιεί κυψέλη καυσίμου, με ικανότητα ιπποδύναμης 20hp (15kW).



Σχήμα 2.2 Το πρώτο όχημα 20hp του Ihrig

Από τα μέσα της δεκαετίας του '50 και τις αρχές της δεκαετίας του '60, έχουμε την εμφάνιση ενός ζωηρού ενδιαφέροντος για την κυψέλη καυσίμου. Η NASA έψαχνε έναν τρόπο να τροφοδοτήσει μια σειρά από επικείμενες διαστημικές πτήσεις, καθώς η χρήση μπαταριών για την τροφοδοσία είχε ήδη αποκλειστεί λόγω του πολύ μεγάλου βάρους που είχαν. Επίσης για εκείνη την εποχή η ηλιακή ενέργεια ήταν αρκετά ακριβή και η πυρηνική ενέργεια πολύ επικίνδυνη. Για το λόγο αυτό η κυψέλη καυσίμου αποτέλεσε μια πιθανή λύση στην αναζήτηση της NASA για εναλλακτικό τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η NASA ξεκίνησε τη χρηματοδότηση ερευνών για την ανάπτυξη πρακτικά εφαρμόσιμων κυψελών καυσίμου που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια των διαστημικών πτήσεων. Οι έρευνες αυτές οδήγησαν στην κατασκευή της πρώτης κυψέλης καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC). Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τα διαστημικά προγράμματα Gemini, Apollo και Spacelab να χρησιμοποιήσουν κυψέλες καυσίμου οι οποίες βοήθησαν τον άνθρωπο να ταξιδέψει στο φεγγάρι το 1968.

Λίγο αργότερα, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '70, η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου άρχισε να αναπτύσσεται κυρίως σε συστήματα που χρησιμοποιούνται από τους ανθρώπους σε καθημερινή βάση. Το πετρελαϊκό εμπάργκο του 1973 και του 1979 έδωσε ώθηση στην ερευνητική προσπάθεια για τις κυψέλες καυσίμου, καθώς οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και οι ευρωπαϊκές χώρες αναζητούσαν τρόπους για μείωση της εξάρτησής τους από τις εισαγωγές πετρελαίου. Αρκετές εταιρείες και κυβερνητικές οργανώσεις ξεκίνησαν σοβαρή έρευνα για την αντιμετώπιση διαφόρων εμποδίων έτσι ώστε να υπάρξει εμπορική εκμετάλλευση των κυψελών καυσίμου.

Κατά τη χρονική περίοδο 1970 και 1980, όλη η ερευνητική προσπάθεια είχε επικεντρωθεί στην ανάπτυξη των υλικών που ήταν απαραίτητα, προσδιορίζοντας τη βέλτιστη πηγή καυσίμου και μειώνοντας δραστικά το κόστος της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

Το 1995, η Καναδική εταιρία Ballard Power Systems Inc. ανακοίνωσε την κατασκευή συστοιχίας κυψελών καυσίμου ισχύος 30 kW με πυκνότητα ισχύος 1kW/lit. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει μεγάλα τεχνολογικά άλματα με αποτέλεσμα οι κυψέλες να έχουν πλέον εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, σε οικιακή ή βιομηχανική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε επιβατικά οχήματα όσο και σε μέσα μαζικής μεταφοράς ενώ έχουν βρεί πληθώρα εφαρμογών στη ναυτιλία.

3. ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) είναι ένας οργανισμός των Ηνωμένων Εθνών που έχει ως αποστολή να εξασφαλίζει "Ασφαλή και Αποτελεσματική Ναυτιλία σε Καθαρούς Ωκεανούς". Σύμφωνα με εκτιμήσεις του IMO, η θαλάσσια ναυτιλία συνεισφέρει σημαντικά στις παγκόσμιες εκπομπές ρύπων των αερίων θερμοκηπίου (GHG), στις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), στα σωματίδια (PM), στους επικίνδυνους ατμοσφαιρικούς ρύπους, και στα NOx. Επίσης υπολογίζεται ότι συνεισφέρει πάνω από 1 δισεκατομμύριο τόνους CO2 ετησίως, ποσοστό 3-5% εκπομπών και άνω του 5% των παγκόσμιων εκπομπών SOx.

Χωρίς δράση, ο IMO προβλέπει μια αύξηση κατά 250% των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου έως το 2050 λόγω της αύξησης της ναυτιλίας σε μια πιο παγκοσμιοποιημένη οικονομία. Αναγνωρίζοντας το γεγονός αυτό, τον Απρίλιο του 2018, ο IMO υιοθέτησε ένα ψήφισμα αρχικής στρατηγικής για τη σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία. Σύμφωνα με το ψήφισμα αυτό υποχρεούνται οι κατασκευαστές πλοίων να μειώσουν μέχρι το 2025 κατά 30% τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου ενώ στοχεύει μέχρι το 2050, η διεθνής ναυτιλιακή βιομηχανία να μειώσει τις εκπομπές αυτές τουλάχιστον κατά 50% από τα επίπεδα του 2008. Επιπλέον, πρόσφατα υιοθέτησε αυστηρά όρια εκπομπών στον κανονισμό Tier III, κυρίως όσον αφορά τις εκπομπές NOx και SOx.

Η πρόοδος της τεχνολογίας πρόωσης στη ναυτιλία δεν έχει συμβαδίσει με την αντίστοιχη για τις οδικές μεταφορές για διάφορους λόγους, ο πιο σημαντικός ,λόγω της έλλειψης αυστηρών κανονισμών σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ναυτιλίας. Επιπρόσθετα, με το κόστος ιδιοκτησίας να είναι το κύριο κριτήριο, οικονομικοί αλλά ρυπογόνοι πετρελαιοκινητήρες και φθηνά βαρέα καύσιμα καθίστανται κύριες επιλογές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη ναυτιλία. Οι νέοι κανονισμοί ωστόσο, θέλουν να αλλάξουν την πρακτική αυτή. Ειδικά για περιοχές ελέγχου εκπομπών (ECA), οι απαιτήσεις αυτές είναι ιδιαίτερα αυστηρές και θα είναι δύσκολο να εκπληρωθούν με τους παραδοσιακούς κινητήρες ντίζελ και καύσιμα . Οι πλοιοκτήτες πρέπει να υιοθετήσουν λύσεις για τη μείωση των εκπομπών καυσαερίων εντός αυτών και άλλων μελλοντικών ορίων.

Στη ναυτιλία, οι τεχνολογικές βελτιώσεις τις τελευταίες δεκαετίες έχουν μειώσει την κατανάλωση καυσίμου και τις επιπτώσεις των πλοίων στο περιβάλλον. Αυτές περιλαμβάνουν: βελτιώσεις κινητήρα, όπως επανακυκλοφορία καυσαερίων, δύο στάδια υπερσυμπίεσης, κύκλος Miller αργής μετάκαυσης , σχεδιασμός θαλάμου έξυπνης καύσης και προηγμένα συστήματα έγχυσης καυσίμου , μετεπεξεργασία καυσαερίων, όπως πλυντρίδες (scrabbers) ή επιλεκτική καταλυτική αναγωγή και τέλος η χρήση διαφορετικών καυσίμων, για παράδειγμα ντίζελ χαμηλού θείου ή υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) .

Ενας συνδυασμός αυτών των μεθόδων απαιτείται, και αυτό είναι πιθανό να αυξήσει το μέγεθος, την πολυπλοκότητα, την κατανάλωση καυσίμου και τη συντήρηση της ναυτιλιακής εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας. Ως εκ τούτου, κρίνεται πλέον απαραίτητο να γίνει μία επιθετική μετάβαση μακριά από την ισχύ του ντίζελ.

Μεταξύ των πιθανών εναλλακτικών λύσεων, οι κυψέλες καυσίμου θεωρούνται ότι είναι μια από τις πιο ελπιδοφόρες μελλοντικές τεχνολογίες καθώς είναι αποδοτικές ως προς το καύσιμο ενώ έχουν λίγες επιβλαβείς εκπομπές. Οι επεκτεινόμενες υποδομές του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) και η ανεπτυγμένη κατάσταση των κυψελών καυσίμου με φυσικό αέριο μπορεί να διευκολύνει την εισαγωγή των αερίων καυσίμων και των κυψελών καυσίμου σε πλοία. Συνδυασμένοι κύκλοι κυψελών καυσίμου, συνδυασμός με βοηθητικά συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και οι βελτιώσεις προσδιορίζονται ως θέματα για περαιτέρω μελέτη.

Οι κυψέλες καυσίμου, σε αντίθεση με τις μηχανές ντίζελ που η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω θερμικής και μηχανικής ενέργειας, μετατρέπουν τη χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια, παραλείποντας έτσι την έμμεση οδό μέσω της θερμικής ενέργειας σε κινητήρες καύσης. Η απουσία εκτεταμένης, υψηλής θερμοκρασίας καύσης μειώνουν τη δημιουργία NO_x, το θόρυβο και τις δονήσεις, ενώ οι υψηλές αποδόσεις μπορούν ακόμα να επιτευχθούν.

Επίσης, με τις κυψέλες καυσίμου, λόγω της αρθρότητας στη δομή τους, η παραγωγή ενέργειας μπορεί να διανεμηθεί στο πλοίο χωρίς τη συνέπεια της αυξημένης κατανάλωσης καυσίμου, ενώ οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας μεταφοράς μειώνονται και βελτιώνεται η εναλλαξιμότητα. Επιπλέον, συστήματα κυψελών καυσίμου έχουν καλά χαρακτηριστικά μερικού φορτίου, καθώς αυξημένες μηχανικές απώλειες επηρεάζουν μόνο το παρασιτικό φορτίο των βοηθητικών εξαρτημάτων, όπως οι συμπιεστές, ενώ οι ηλεκτροχημικές απώλειες μειώνονται.

Τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου συχνά γίνονται καλύτερα αντιληπτά σε εξειδικευμένες εφαρμογές με ένα συγκεκριμένο σύνολο αυστηρών απαιτήσεων που οι άλλες τεχνολογίες δεν ικανοποιούν επαρκώς. Τέτοια παραδείγματα είναι τα εφεδρικά συστήματα ισχύος (π.χ. τηλεπικοινωνίες), τα κέντρα δεδομένων, η αυτοκινητοβιομηχανία και οι στρατιωτικές εφαρμογές.

Οι προοπτικές της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου έχουν δώσει κίνητρα σε πολλές μελέτες για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων τους και της δυνατότητας εφαρμογής τέτοιων συστημάτων στο περιβάλλον της ναυτιλίας. Επιπλέον, μια σειρά συστημάτων επίδειξης έχουν αναπτυχθεί και δοκιμαστεί σε πλοία. Αυτές οι έρευνες ποικίλλουν από τη μελέτη σκοπιμότητας διαφόρων συστημάτων κυψελών καυσίμου με καύσιμο ντίζελ, υδρογόνο ή άλλα, στην εμπορική εφαρμογή και την αναερόβια πρόωση (AIP) για τα υποβρύχια. Το εάν τα συστήματα κυψελών καυσίμου θα εφαρμοστούν γενικότερα στη ναυτιλία εξαρτάται από την ικανότητά τους να πληρούν τις απαιτήσεις παραγωγής ισχύος επί του πλοίου. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου διαφέρουν ουσιαστικά το ένα από το άλλο και δεν είναι σαφές ποιο σύστημα έχει τις καλύτερες μελλοντικές προοπτικές. Το επιλεγμένο σύστημα κυψελών καυσίμου και το εφοδιαστικό καύσιμο θα έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην καταλληλότητα για ναυτιλιακές εφαρμογές.

4. ΤΥΠΟΙ FC

4.1. Βασικά Στοιχεία Κυψελών Καυσίμου

Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες καύσης που καίνε καύσιμο, στις κυψέλες καυσίμου υφίστανται μια χημική διαδικασία για τη μετατροπή του πλούσιου σε υδρογόνο καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι κυψέλες καυσίμου δεν χρειάζεται να επαναφορτίζονται περιοδικά όπως οι μπαταρίες, αλλά συνεχίζουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια εφόσον παρέχεται πηγή καυσίμου.

Μια κυψέλη καυσίμου αποτελείται από μια άνοδο, μια κάθοδο και μια μεμβράνη ηλεκτρολύτη. Λειτουργεί περνώντας υδρογόνο μέσω της ανόδου και του οξυγόνου μέσω της καθόδου. Στην άνοδο, τα μόρια υδρογόνου χωρίζονται σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια. Τα πρωτόνια διέρχονται μέσω της μεμβράνης ηλεκτρολύτη, ενώ τα ηλεκτρόνια ωθούνται μέσω κυκλώματος, δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα και θερμότητα. Στην κάθοδο, τα πρωτόνια, τα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο συνδυάζονται για να παράγουν μόρια νερού.

Λόγω της υψηλής απόδοσής τους, οι κυψέλες καυσίμου είναι πολύ καθαρές, με τα μόνα προϊόντα τους να είναι η ηλεκτρική ενέργεια, η θερμότητα και το νερό. Επιπλέον, καθώς οι κυψέλες καυσίμου δεν έχουν κινούμενα μέρη, λειτουργούν σχεδόν σιωπηλά.

Επιπρόσθετα οι κυψέλες καυσίμου είναι επεκτάσιμες. Αυτό σημαίνει ότι μεμονωμένες κυψέλες καυσίμου μπορούν να συγκεντρωθούν μεταξύ τους για να σχηματίσουν στοίβες, και με τη σειρά τους αυτές οι στοίβες μπορούν να συνδυαστούν σε μεγαλύτερα συστήματα. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου ποικίλλουν σημαντικά σε μέγεθος και ισχύ, από φορητά συστήματα για επαναφόρτιση μπαταριών smartphone έως αντικαταστάσεις κινητήρων καύσης για ηλεκτρικά οχήματα, σε μεγάλες εγκαταστάσεις πολλαπλών MW που παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Παρακάτω παρατίθενται μερικές από τις συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες κυψέλες καυσίμου.

4.2. Κυψέλες Καυσίμου Τετηγμένου Άνθρακα (MCFCs)

Οι κυψέλες καυσίμου τετηγμένου άνθρακα (MCFCs) λειτουργούν σε θερμοκρασίες άνω των 650 °C, χρησιμοποιώντας ένα τετηγμένο μίγμα ανθρακικού άλατος αιωρούμενο σε κεραμικό πλέγμα ως ηλεκτρολύτη. Αυτή η υψηλή θερμοκρασία επιτρέπει στους MCFCs να χρησιμοποιούν καταλύτες εκτός πλατίνας μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται «εσωτερική αναμόρφωση», μειώνοντας το συνολικό κόστος του συστήματος. Οι MCFCs μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν φυσικό αέριο απευθείας ως πηγή καυσίμου, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες επιτρέπουν την εσωτερική αναμόρφωση του φυσικού αερίου σε υδρογόνο εντός του ίδιου του συστήματος. Οι MCFCs μπορούν να φτάσουν σε απόδοση 50-60% και 70% - 80% σε συνδυασμένες εφαρμογές θερμότητας και ισχύος (CHP). Αυτές οι κυψέλες καυσίμου αναπτύσσονται συνήθως σε σταθερές εφαρμογές, παρέχοντας υψηλής ποιότητας πρωτογενή και εφεδρική ενέργεια στις επιχειρήσεις κοινής ωφελείας και στις επιχειρήσεις.

4.3. Κυψέλες Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFCs)

Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFCs) χρησιμοποιούν πολυμερή μεμβράνη για τον ηλεκτρολύτη και ένα πολύτιμο μέταλλο, συνήθως πλατίνα, για τον καταλύτη. Αυτό που διακρίνει αυτές τις κυψέλες καυσίμου από τις άλλες είναι η ικανότητα τους να λειτουργούν σε ψυχρότερες θερμοκρασίες σε σχέση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, μεταξύ 27 και 93 °C. Το καθαρό αέριο υδρογόνο είναι το τυπικό καύσιμο για τα PEMFCs εξαιτίας της χρήσης των πολύτιμων μετάλλων και των χαμηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας.

Τα PEMFCs λειτουργούν με απόδοση μεταξύ 40% και 60% και είναι ικανά να χειριστούν μεγάλες και ξαφνικές μεταβολές στην ισχύ εξόδου. Τα PEMFCs είναι κατάλληλα για αυτοκίνητα και άλλα ειδικά οχήματα όπως περνοφόρα ανυψωτικά οχήματα που πρέπει να ξεκινήσουν γρήγορα ή να επιταχυνθούν. Επιπλέον, τα PEMFCs μπορούν να κλιμακωθούν σε σταθερές εφαρμογές για χρήση σε τηλεπικοινωνίες, κέντρα δεδομένων και κατοικίες. Αυτού του τύπου οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να διακριθούν σε υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας, HT/ LT - PEMFCs.

4.4. Κυψέλες Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFCs)

Οι PAFCs χρησιμοποιούν υγρό φωσφορικό οξύ και κεραμικό ηλεκτρολύτη και καταλύτη λευκοχρύσου. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν φυσικά παρόμοια με την κυψέλη καυσίμου PEM και σε παρόμοιο επίπεδο απόδοσης. Εντούτοις, οι PAFCs λειτουργούν σε υψηλότερη θερμοκρασία, επιτρέποντάς τους να χειρίζονται μικρές ποσότητες ακαθαρσιών των καυσίμων. Οι PAFCs χρησιμοποιούνται συνήθως σε λειτουργία συμπαραγωγής για να παράγουν όχι μόνο την ηλεκτρική ενέργεια, αλλά και τη θερμότητα που πρέπει να δεσμεύεται για θέρμανση και ψύξη. Οι PAFCs εμφανίζονται συχνά σε εφαρμογές υψηλής απαίτησης ενέργειας, όπως νοσοκομεία, σχολεία και κέντρα παραγωγής και επεξεργασίας.

4.5. Κυψέλες Καυσίμου Στερεού Οξειδίου (SOFCs)

Τα SOFCs είναι οι κυψέλες καυσίμου με τις υψηλότερες θερμοκρασίες, λειτουργώντας σε περίπου 980 °C. Τα SOFCs χρησιμοποιούν πυκνό στρώμα κεραμικού ως ηλεκτρολύτη, το οποίο σε υψηλές θερμοκρασίες επιτρέπει την αγωγιμότητα των ιόντων οξυγόνου. Παρόμοια με τα MCFCs, τα SOFCs χρησιμοποιούν επίσης έναν καταλύτη εκτός πλατίνας που χρησιμοποιεί εσωτερική αναμόρφωση και τροφοδοτούνται συνήθως από φυσικό αέριο. Μέσω αυτής της διαδικασίας, τα SOFCs μπορούν να επιτύχουν ηλεκτρική απόδοση από 50% έως 60% και 70% -80% σε συνδυασμένες εφαρμογές θερμότητας και ισχύος. Τα SOFCs χρησιμοποιούνται σε μια σειρά εφαρμογών, από μικρές βοηθητικές οικιακές μονάδες που τροφοδοτούν με θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια σε σπίτια, μέχρι μεγάλης κλίμακας στατικές γεννήτριες ισχύος για μεγαλύτερα κτίρια και επιχειρήσεις.

4.6. Κυψέλες Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης (DMFCs)

Κυρίως όπως τα PEMFCs, οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFCs) χρησιμοποιούν μια πολυμερική μεμβράνη ως ηλεκτρολύτη και συνήθως καταλύτη πλατίνας.

Ωστόσο, σε αντίθεση με τα PEMFCs, τα DMFCs αντλούν υδρογόνο από υγρή μεθανόλη, αντί να χρησιμοποιούν απευθείας καύσιμο υδρογόνο. Τα DMFCs λειτουργούν επίσης σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, μεταξύ 51 και 122 °C. Οι εφαρμογές των DMFCs κυμαίνονται από μικρά ηλεκτρονικά, όπως φορτιστές μπαταριών και φορητούς υπολογιστές, σε μεγαλύτερες εφαρμογές όπως η στατική εφεδρική ισχύ για τηλεπικοινωνίες.

4.7. Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (AFC)

Τα AFCs είναι καλύτερα γνωστά για το ρόλο τους στην αποστολή της NASA, Apollo, για την παροχή νερού και ηλεκτρισμού στο πλήρωμα. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν πορώδεις ηλεκτρολύτες κορεσμένους με αλκαλικό διάλυμα και έχουν αλκαλική μεμβράνη όπως υποδηλώνει το όνομά τους. Το AFC είναι ένας από τους πιο αποδοτικούς τύπους κυψελών καυσίμου, με δυνατότητα ηλεκτρικής απόδοσης 60% και από 80% έως 90% σε συνδυασμένες εφαρμογές θερμότητας και ισχύος. Τα AFCs χρησιμοποιούν υδρογόνο ως πηγή καυσίμου, αν και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα και μπορούν να αποτύχουν όταν εκτίθενται σε διοξείδιο του άνθρακα και γι' αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως σε ελεγχόμενες αεροδιαστημικές και υποβρύχιες εφαρμογές.

4.8. Περαιτέρω Χαρακτηριστικά

4.8.1. Οφέλη χρήσης κυψελών καυσίμου

Συνοπτικά, τα οφέλη από τη χρήση κυψελών καυσίμου θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι τα εξής:

- Χαμηλές προς μηδενικές εκπομπές
- Υψηλή απόδοση
- Αξιοπιστία
- Ευελιξία καυσίμων
- Ενεργειακή ασφάλεια
- Αντοχή
- Ευελιξία
- Ήσυχη ή/ και αθόρυβη λειτουργία

4.8.2. Βοηθητικός εξοπλισμός - Balance of Plant (BoP)

Βοηθητικά εξαρτήματα απαιτούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με μια κυψέλη καυσίμου. Αυτά τα εξαρτήματα συνήθως αναφέρονται ως στοιχεία ισορροπίας της εγκατάστασης (Balance of Plant - BoP), και αποτελούν ένα μεγάλο μέρος του συνολικού συστήματος. Μπορούμε να κάνουμε διάκριση μεταξύ θερμών και ψυχρών εξαρτημάτων BoP στα συστήματα κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας και εξοπλισμού επεξεργασίας καυσίμων. Τα θερμά εξαρτήματα BoP περιλαμβάνουν για παράδειγμα, εναλλάκτες θερμότητας και επεξεργαστές καυσίμων, ενώ η διαχείριση ενέργειας και τα συστήματα ελέγχου ταξινομούνται ως ψυχρά εξαρτήματα. Πολλά στοιχεία BoP καταναλώνουν παρασιτική ισχύ και πρόσθετο καύσιμο.

Μια κατηγορία εξαρτημάτων BoP χρησιμοποιείται για την παροχή καυσίμου και οξειδωτικού στην κυψέλη και περιλαμβάνει αντλίες, φουσητήρες και συμπιεστές. Ανάλογα με τον τύπο της κυψέλης καυσίμου, ενδέχεται να υπάρχουν εναλλάκτες θερμότητας για να φτάσουν οι ροές αερίου στη σωστή θερμοκρασία και εξατμιστές όταν χρησιμοποιούνται υγρά καύσιμα. Οι ροές αερίων χρειάζονται συχνά φίλτράρισμα και ύγρανση, και τα

καυσαέρια ενδέχεται να περιέχουν σημαντική ποσότητα καυσίμων συστατικών, τα οποία συνήθως καίγονται σε καταλυτικό καυστήρα. Όλες οι ροές αερίου ρυθμίζονται με συστήματα ελέγχου και ενεργοποιητές, όπως ελεγκτές ταχύτητας φυσητήρων, βαλβίδες και ρυθμιστές πίεσης.

Τα υψηλής θερμοκρασίας συστήματα κυψελών καυσίμου είναι συχνά εξοπλισμένα με καυστήρες για να θερμαίνουν το σύστημα κατά την εκκίνηση. Παρόλο που οι υψηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου συνήθως ψύχονται με καθόδους αέρα, οι διαβαθμίσεις της θερμοκρασίας σε κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας είναι πολύ μικρές για να επιτευχθεί επαρκής ψύξη με αυτόν τον τρόπο. Επομένως, αυτά τα συστήματα θα έχουν συνήθως ένα ξεχωριστό σύστημα ψύξης.

Δεδομένου ότι οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια DC με μεταβλητή τάση και ρεύμα, εξοπλισμός διαχείρισης ενέργειας, όπως μετατροπείς DC σε AC ή DC σε DC, χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε τάση και συχνότητα του δικτύου. Ο εξοπλισμός επεξεργασίας καυσίμου είναι ένα άλλο σημαντικό μέρος του BoP με σημαντική επίδραση στη συνολική αποδοτικότητα .

5. ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΣΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

5.1. Εισαγωγή

Η διαθεσιμότητα των καυσίμων αποτελεί σημαντικό παράγοντα εφαρμογής των κυψελών καυσίμου στα πλοία. Για τα υποβρύχια, το καθαρό υδρογόνο είναι καλή επιλογή για το σύστημα AIP, επειδή το PEMFC επιτρέπει την επίτευξη των απαιτήσεων στάθμης θορύβου που σχετίζονται με αυτή τη στρατιωτική εφαρμογή. Για τα πλοία επιφανείας, τα κλασσικά καύσιμα με βάση τους υδρογονάνθρακες πρέπει να θεωρηθούν ως η πρώτη επιλογή καυσίμων λαμβάνοντας υπόψη την χαμηλή ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας του υδρογόνου και τις δυσκολίες απόκτησης υδρογόνου στα λιμάνια. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας με αναμορφωτή καυσίμου μπορούν να είναι μια καλή λύση για την εξέλιξη των ναυτιλιακών συστημάτων FC στο μέλλον. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την αποσύνθεση υδρογόνου από τα παραδοσιακά καύσιμα υδρογονανθράκων. Ωστόσο, δυστυχώς χαρακτηρίζονται από αργή εκκίνηση.

Το πετρέλαιο ντίζελ είναι σήμερα ο κύριος φορέας ενέργειας στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Οι συμβατικοί κινητήρες ντίζελ-γεννήτριας είναι σχεδιασμένοι εξ ολοκλήρου για αυτά τα καύσιμα, αλλά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις κυψέλες καυσίμου απευθείας. Παρόλο που η άμεση ηλεκτροχημική οξείδωση των διαφόρων καυσίμων είναι δυνατή σε ορισμένους τύπους κυψελών καυσίμου, η σχετικά γρήγορη κινητική οξείδωσης του υδρογόνου κυριαρχεί σε πρακτικές πυκνότητες ισχύος. Αυτό υπονοεί ότι οι περισσότερες κυψέλες καυσίμου λειτουργούν αποτελεσματικά με υδρογόνο. Ειδικά οι κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας οξειδούν αποκλειστικά το υδρογόνο, ενώ μπορεί να υπάρχουν μερικά εναλλακτικά καύσιμα, όπως το μεθάνιο και το CO που μετατρέπονται εσωτερικά σε πλούσιο αέριο υδρογόνο στις κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας.

Οι περισσότερες μελέτες θαλάσσιων εφαρμογών κυψελών καυσίμου θεωρούν τη μετατροπή του ντίζελ σε υδρογόνο στο πλοίο, δεδομένου ότι μια υποδομή πετρελαίου ντίζελ είναι άμεσα διαθέσιμη και το υδρογόνο είναι σημαντικά πιο ακριβό και σημαντικά λιγότερο ενεργειακά πυκνό. Ωστόσο, ο επεξεργαστής καυσίμου ντίζελ αυξάνει την πολυπλοκότητα,

το κόστος και το μέγεθος του συστήματος κυψελών καυσίμου. Επί πλέον, η ανάγκη να μειωθούν και τελικά να αποφευχθούν οι εκπομπές GHG καθιστά απαραίτητη την εξέταση εναλλακτικών μέσων αποθήκευσης καυσίμου.

Παρόλο που η χρήση ορυκτών καυσίμων είναι πιθανώς ακόμα απαραίτητη στο κοντινό μέλλον, ανανεώσιμες εναλλακτικές λύσεις, όπως για παράδειγμα τα βιοκαύσιμα ή τα λεγόμενα ηλιακά καύσιμα, θα αποκτήσουν μεγαλύτερη σημασία μακροπρόθεσμα.

Η μεταπήδηση προς καθαρότερα ορυκτά και ανανεώσιμα καύσιμα προβλέπεται στο μέλλον, αλλά η υιοθεσία τους θα εξαρτηθεί, μεταξύ άλλων, από τη διαθεσιμότητα, την υποδομή, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, την ασφάλεια, την τιμή, τους κανονισμούς και την τεχνική καταλληλότητα. Η επιλογή αποθήκευσης και διανομής καυσίμων αποτελούν σημαντικά στοιχεία διερεύνησης. Πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα εφοδιαστικά καύσιμα που θα συζητηθούν μπορούν αποτελεσματικά να θεωρούνται ως φορείς υδρογόνου και ως τέτοια θα εξεταστούν.

5.2. Πετρέλαιο Ντίζελ

Τα καύσιμα ντίζελ ανήκουν στα βαρύτερα κλάσματα απόσταξης αργού πετρελαίου. Οι αλυσίδες άνθρακα είναι σχετικά μεγάλες, καταλήγοντας σε ένα ιξώδες και πυκνό καύσιμο, το οποίο είναι συνήθως δύσκολο να μεταποιηθεί σε ένα πλούσιο σε υδρογόνο αέριο. Η υψηλή περιεκτικότητα σε θείο είναι ένα επιπλέον πρόβλημα, καθώς αμφοτέρω ο εξοπλισμός επεξεργασίας καυσίμου και η κυψέλη καυσίμου έχουν περιορισμένες ανοχές σε θείο. Ως εκ τούτου, η περιεκτικότητα σε θείο θα πρέπει να μειωθεί δραματικά για την εφαρμογή σε κυψέλες καυσίμου. Εναλλακτικά, το πετρέλαιο ντίζελ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο μπορεί να συντεθεί με τη διαδικασία Fischer - Tropsch. Αυτά τα συνθετικά καύσιμα ντίζελ μπορούν να προέρχονται από ορυκτές πρώτες ύλες, συνήθως NG, αλλά και από βιοαέριο ή CO₂ και ανανεώσιμη ενέργεια, χρησιμοποιώντας διαδικασίες μετατροπής ενέργειας σε αέριο και αέριο σε υγρό.

Το ντίζελ θεωρείται ακατάλληλο καύσιμο για συστήματα κυψελών καυσίμου λόγω των επιπλοκών επεξεργασίας καυσίμων. Ωστόσο, είναι το πιο ερευνηθέν καύσιμο για θαλάσσια συστήματα κυψελών καυσίμου, καθώς είναι φθηνό, ενεργειακά πυκνό, και η υποδομή είναι πλήρως ανεπτυγμένη. Αναλόγως το σύστημα κυψελών καυσίμου και τον τύπο καυσίμου ντίζελ, διάφορα βήματα για την επεξεργασία του καυσίμου απαιτούνται για να αποκτηθεί ένα αέριο τροφοδοσίας με επαρκή καθαρότητα. Αυτά τα βήματα επεξεργασίας θα μειώσουν τόσο τη συνολική απόδοση όσο και την πυκνότητα ισχύος του συνολικού συστήματος.

5.3. Φυσικό Αέριο NG

Η χρήση του φυσικού αερίου για τη χερσαίες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει αυξηθεί κατά τις τελευταίες δεκαετίες, κυρίως λόγω της αυξανόμενης διαθεσιμότητας και των μειωμένων εκπομπών. Η σύνθεσή του μπορεί να ποικίλει σημαντικά για τις διάφορες πηγές του, αλλά συνήθως περιέχει κυρίως μεθάνιο, μερικά υψηλότερα αλκάνια και μικρές ποσότητες προσμίξεων. Αν και αυτή τη στιγμή παράγεται από ορυκτές πρώτες ύλες, μπορεί να παραχθεί από βιομάζα ή να συντεθεί από CO₂ και ανανεώσιμο υδρογόνο στο μέλλον. Αποθηκευμένο σε κρυογονικές συνθήκες, κάτω των -162 °C σε

περιβαλλοντική πίεση, αναφέρεται ως υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG). Παρόλο που δεν είναι ακόμη διαθέσιμο παντού, η υποδομή LNG επεκτείνεται. Εναλλακτικά, το NG μπορεί να είναι συμπιεσμένο (CNG). Η αποδοτική ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα και των δύο LNG και CNG είναι χαμηλή σε σύγκριση με τα καύσιμα ντίζελ.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το NG είναι σήμερα η πιο σημαντική πηγή υδρογόνου και μεθανόλης. Η παραγωγή του υδρογόνου από το LNG πάνω στο πλοίο είναι πιθανώς φθηνότερη, αποτελεσματικότερη και πιο πυκνή από τη χρήση υδρογόνου που παράγεται αλλού. Επιπρόσθετα, μπορεί να ανοίξει το δρόμο για τη χρήση μελλοντικών ανανεώσιμων αέριων καυσίμων επί του σκάφους. Η επεξεργασία καυσίμων είναι σχετικά απλή, και το θείο αφαιρείται εύκολα με προσροφητικά στοιχεία. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι πολλά συστήματα κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας έχουν ήδη σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούν NG και έχουν αποδείξει υψηλές ηλεκτρικές αποδόσεις.

5.4. Μεθανόλη

Η μεθανόλη (MeOH) είναι ένας άλλος σημαντικός φορέας υδρογόνου, με το κύριο πλεονέκτημα ότι είναι υγρή σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος και μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί στη συμβατική υποδομή υγρών καυσίμων με ελάχιστες προσαρμογές. Ωστόσο, η ενεργειακή πυκνότητα του καθαρού καυσίμου είναι σημαντικά χαμηλότερη από τα καύσιμα ντίζελ και είναι διαβρωτική προς ορισμένα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στην τρέχουσα υποδομή. Αν και η MeOH μπορεί να παραχθεί από διάφορες πηγές, όπως π.χ. το συνθετικό αέριο, τη βιομάζα και το υδρογόνο με CO₂, το μεγαλύτερο μέρος της ακόμα παράγεται από NG.

Η MeOH μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης, αλλά η απόδοση της είναι φτωχή. Εναλλακτικά, μπορεί να αναμορφωθεί σε μέτριες θερμοκρασίες, είτε σε ένα ξεχωριστό σύστημα είτε ενσωματωμένο στο σύστημα κυψελών καυσίμου. Οι αναμορφωτές μεθανόλης έχουν ενσωματωθεί με επιτυχία στα συστήματα HT-PEMFC.

5.5. Διμεθυλαιθέρας

Ο διμεθυλαιθέρας (DME) λαμβάνεται με αφύγρανση της MeOH ή με απευθείας από το συνθετικό αέριο γνωστό και ως syngas. Μπορεί να αποθηκευτεί σε υγρή μορφή στις σχετικά χαμηλές πιέσεις των 5 Bar, παρόμοια με το υγροποιημένο πετρελαϊκό αέριο (LPG). Επιπλέον, η ενεργειακή πυκνότητα είναι κάπως υψηλότερη από της MeOH και είναι μη τοξικός. Δεδομένου ότι δεν περιέχει δεσμούς άνθρακα-άνθρακα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες εσωτερικής καύσης χωρίς σχηματισμό αιθάλης. Η απουσία αυτών των δεσμών μπορεί να μειώσει την ευαισθησία στην παραγωγή οπτόανθρακα στα συστήματα κυψελών καυσίμου, κάτι που είναι κοινό πρόβλημα για καύσιμα με δεσμούς άνθρακα-άνθρακα, για παράδειγμα η αιθανόλη.

5.6. Αμμωνία

Τα ναυτιλιακά καύσιμα που συζητήθηκαν μέχρι τώρα μπορούν να συντεθούν από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια και CO₂. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένα χωρίς άνθρακα καύσιμο λαμβάνεται μόνο εάν το CO₂ που απαιτείται για τη σύνθεση αυτή δεσμεύεται από την ατμόσφαιρα. Ωστόσο, το CO₂ είναι δύσκολο να εξαχθεί από την ατμόσφαιρα, δεδομένου

ότι η συγκέντρωση είναι πολύ χαμηλή. Το άζωτο, από την άλλη πλευρά, είναι διαθέσιμο σε αφθονία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φορέας υδρογόνου με τη μορφή αμμωνίας. Η αμμωνία είναι υγρή σε θερμοκρασία $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ και σε ατμοσφαιρική πίεση ή υπό μέτρια πίεση των 10 bar. Η ενεργειακή της πυκνότητα είναι κάπως χαμηλότερη από αυτή της MeOH , και μπορεί να αποσυντεθεί σε υδρογόνο σε θερμοκρασίες μεταξύ 300 και $520\text{ }^{\circ}\text{C}$. Δεδομένου ότι δεν περιέχει άνθρακα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε κυψέλες καυσίμου χωρίς δηλητηρίαση από το CO ή τον κίνδυνο οπτανθρακοποίησης. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της αμμωνίας είναι η σοβαρή τοξικότητα στον άνθρωπο και τα ζώα.

5.7. Υδρογόνο

Το υδρογόνο είναι το πιο άφθονο στοιχείο στο σύμπαν, αλλά σπάνια βρίσκεται στην καθαρή του μορφή. Το υδρογόνο μπορεί να εξαχθεί από διάφορες πηγές, όπως η βιομάζα ή η ηλεκτρόλυση, ωστόσο παράγεται κυρίως από NG. Το υδρογόνο είναι κατάλληλο για κυψέλες καυσίμου, καθώς η κινητική ηλεκτροχημικής οξείδωσης είναι γρήγορη, ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς εκτεταμένη προεπεξεργασία. Ως αποτέλεσμα, τα καθαρά συστήματα υδρογόνου μπορούν να επιτύχουν αξιοσημείωτη συνολική πυκνότητα ισχύος. Μετατροπή υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια με κυψέλες καυσίμου είναι συνήθως πιο αποτελεσματική από ό, τι με κινητήρες εσωτερικής καύσης.

5.7.1. Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου

5.7.1.1. Υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από τα περισσότερα ορυκτά καύσιμα (π.χ. κάρβουνο, φυσικό αέριο, πετρέλαιο, κ.λπ.). Δεδομένου ότι το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται ως παραπροϊόν, το CO_2 πρέπει να συλλέγεται και να αποθηκεύεται προκειμένου να εξασφαλιστεί μια βιώσιμη (με μηδενικές εκπομπές) διεργασία.

5.7.1.1.1 Παραγωγή από φυσικό αέριο/ υδρογονάνθρακες

Έναντι των υπολοίπων ορυκτών καυσίμων, το φυσικό αέριο αποτελεί μία ιδανική, από οικονομικής άποψης, πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου, επειδή είναι ευρέως διαθέσιμο, είναι εύκολο να διαχειριστεί και έχει υψηλή αναλογία υδρογόνου-άνθρακα, η οποία ελαχιστοποιεί το σχηματισμό CO_2 ως παραπροϊόν. Το υδρογόνο σήμερα μπορεί να παραχθεί από το φυσικό αέριο και τους υδρογονάνθρακες χρησιμοποιώντας τη διαδικασία της αναμόρφωσης.

Η αναμόρφωση είναι η πιο ευρέως εφαρμοζόμενη μέθοδος μετατροπής καυσίμων υδρογονάνθρακων σε ένα μείγμα υδρογόνου και CO , που συνήθως αναφέρεται ως συνθετικό αέριο (syngas). Πολλά συστήματα κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούν καύσιμα υδρογονάνθρακα είναι εξοπλισμένα με έναν εξωτερικό αναμορφωτή. Ελαφροί υδρογονάνθρακες μπορούν να αναμορφωθούν εσωτερικά εάν υπάρχει υψηλή απορριπτόμενη θερμότητα διαθέσιμη. Σε συστήματα κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας η απορριπτόμενη θερμότητα από την ηλεκτροχημική αντίδραση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναμόρφωση του καυσίμου σε έμμεση εσωτερική αναμόρφωση

(IRR). Σε κυψέλες καυσίμου απευθείας εσωτερικής αναμόρφωσης (DIR), οι υδρογονάνθρακες μετατρέπονται απευθείας στην άνοδο χρησιμοποιώντας και αμφότερα θερμότητα και ατμό από την ηλεκτροχημική οξείδωση του υδρογόνου.

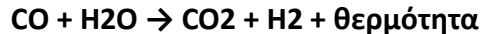
Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι αναμόρφωσης, οι πιο κοινές είναι οι εξής:

- Αναμόρφωση ατμού (SMR)

Αναμόρφωση ατμού μπορεί να γίνει σε όλους τους υδρογονάνθρακες, συνήθως του μεθανίου καθώς αποτελεί το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου. Σε όλες τις περιπτώσεις απαιτείται η παρουσία κατάλληλων καταλυτών, συνηθέστερο το Ni. Η αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιημένη και λιγότερο δαπανηρή μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου. Είναι μία από τις κυριότερες διεργασίες που χρησιμοποιούνται στις πετροχημικές και χημικές βιομηχανίες για παραγωγή H₂ σε μεγάλη κλίμακα. Η SMR περιλαμβάνει την ενδόθερμη αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό προς παραγωγή αερίου σύνθεσης (μίγμα υδρογόνου και μονοξειδίου άνθρακα) και φαίνεται στην κάτωθι εξίσωση:



Η θερμότητα παρέχεται συχνά από την καύση ενός ποσοστού του καυσίμου. Η διεργασία πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες από 700 έως 850 °C και σε πιέσεις από 3 έως 25 bar. Όπως φαίνεται και στην ανωτέρω εξίσωση, το προϊόν της αντίδρασης (αέριο σύνθεσης) περιέχει CO, σε ποσοστό περίπου 12%, που μπορεί να μετατραπεί περαιτέρω σε CO₂ και περίσσεια H₂ μέσω της αντίδρασης μετατόπισης του υδραερίου, με περίσσεια ατμού και φαίνεται στην εξίσωση:



Προκειμένου να ληφθεί καθαρό υδρογόνο, το αέριο τελικά καθαρίζεται σε μια μονάδα ρόφησης με εναλλαγή πίεσης (PSA – θα αναλυθεί παρακάτω).

Μια νέα τεχνική που ονομάζεται "sorption enhanced reaction process" (SERP) προσφέρει την δυνατότητα της ταυτόχρονης διεξαγωγής της αντίδρασης και του διαχωρισμού σε ένα στάδιο. Ο ατμός και το μεθάνιο εισάγονται στους 440–550°C σε έναν αντιδραστήρα που περιέχει έναν καταλύτη αναμόρφωσης και ένα προσροφητικό υλικό για την απομάκρυνση του CO₂¹. Το όφελος αυτής της διεργασίας αφορά στην παραγωγή καθαρού H₂ (90%), μειώνοντας ταυτόχρονα τα επακόλουθα στάδια καθαρισμού του υδρογόνου. Τέλος, οι Moller et al.² πρότειναν ότι μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση καυσίμου μέχρι 40% με τη χρήση μιας διαδικασίας αναμόρφωσης με ηλιακή ενέργεια. Σε αυτή την μέθοδο χρησιμοποιείται ένα σύστημα ηλιακών συλλεκτών για την συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας, έτσι ώστε να παρασχεθεί η απαιτούμενη ποσότητα θερμότητας.

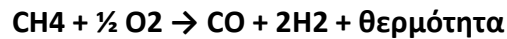
- Μερική οξείδωση (PAX)

Η διεργασία της μερικής οξείδωσης χρησιμοποιείται στα διυλιστήρια για τη μετατροπή των υδρογονανθρακικών παραπροϊόντων σε υδρογόνο, CO, CO₂ και νερό. Το μεθάνιο μπορεί να μετατραπεί σε υδρογόνο μέσω της μερικής οξείδωσης, η οποία μπορεί να

¹ Reijers et al., 2003 και Hufton et al., 2000.

² Moller et al., 2004.

πραγματοποιηθεί καταλυτικά ή μη καταλυτικά ή με συνδυασμό και των δύο³. Η μερική οξείδωση είναι μια διεργασία αναμόρφωσης στην οποία τα καύσιμα καίγονται μερικώς (το οξυγόνο που τροφοδοτείται στο σύστημα είναι υπό-στοιχειομετρικό) σε μια εξώθερμη αντίδραση που παρέχει την απαιτούμενη θερμότητα για άλλες αντιδράσεις στο σύστημα αναμόρφωσης ώστε να παραχθεί μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο, και φαίνεται στην κάτωθι εξίσωση:



Το παραγόμενο CO μετατρέπεται σε H₂, όπως περιγράφεται ανωτέρω στην αναμόρφωση ατμού.

Επιπλέον, το υδρογόνο μπορεί επίσης να παραχθεί από το πετρέλαιο, τη βενζίνη, και τη μεθανόλη μέσω της αναμόρφωσής τους. Αυτή όμως η διεργασία μερικής οξείδωσης απαιτεί επίσης τη χρήση καθαρού οξυγόνου, και όπως με την περίπτωση αεριοποίησης του άνθρακα, είναι λιγότερο αποδοτική και εκπέμπει περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα σε σχέση με την αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει τις πετροχημικές βιομηχανίες να εστιάσουν και αυτές το ενδιαφέρον τους στην ανάπτυξη τεχνολογιών απομάκρυνσης και δέσμευσης του άνθρακα⁴. Αυτή η μη-καταλυτική διεργασία λαμβάνει χώρα στους 1300-1500 °C και σε πιέσεις 30-100 bar. Η μερική οξείδωση ακολουθείται από μια διεργασία αποθείωσης, μετατόπισης προς CO και τέλος απομάκρυνσης του CO₂. Η μέθοδος της μερικής οξείδωσης των βαρέων υδρογονανθράκων αφορά μόνο στην παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα.

- Αυτοθερμική αναμόρφωση (ATR)

Η αυτόθερμη μετατροπή του μεθανίου σε H₂ πραγματοποιείται στους 850°C, όπου συνδυάζονται οι διεργασίες της μερικής οξείδωσης και της καταλυτικής αναμόρφωσης⁵. Με χρήση της μεθόδου αυτής είναι δυνατό να επιτευχθεί μετατροπή μεθανίου 60-65% με εκλεκτικότητα 80% προς παραγωγή υδρογόνου. Σύμφωνα με το μηχανισμό της διαδοχικής καύσης/ αναμόρφωσης του μεθανίου, το CH₄ αρχικά οξειδώνεται προς CO₂ και H₂O, ενώ παράγεται αέριο σύνθεσης από την περαιτέρω διεργασία αναμόρφωσης του υδρογονάνθρακα. Ο δεύτερος μηχανισμός βασίζεται στην άμεση μερική οξείδωση του CH₄, όπου το CO₂ και το H₂O παράγονται μέσω των παράλληλων αντιδράσεων καύσης ή από την περαιτέρω οξείδωση του CO και του H₂.

- Πυρόλυση υδρογονανθράκων

Οι υδρογονάνθρακες μπορούν να μετατραπούν σε υδρογόνο χωρίς να παράγεται CO₂, εάν διασπώνται σε μια αρκετά υψηλή θερμοκρασία (που παρέχεται από έναν καυστήρα πλάσματος) απουσία οξυγόνου⁶. Το μεθάνιο παρουσία ενός καταλύτη μπορεί να διασπαστεί και να παραγάγει υδρογόνο και άνθρακα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:



³ Damen et al., 2006.

⁴ Dunn, 2002.

⁵ Damen et al., 2006.

⁶ Kandiyoti et al., 2006.

Ο άνθρακας μπορεί είτε να απομονωθεί είτε να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω από διάφορες βιομηχανίες, π.χ. στη μεταλλουργική βιομηχανία είτε στην κατασκευή ελαστικών αυτοκινήτου. Αυτή η διαδικασία έχει αναπτυχθεί εμπορικά από τη Νορβηγική εταιρεία Aker Kvaerner.

5.7.1.1.2. Παραγωγή από άνθρακα

Ο άνθρακας μπορεί επίσης να αναμορφωθεί για να παραχθεί υδρογόνο, μέσω ποικίλων διεργασιών αεριοποίησης (π.χ. σταθερής κλίνης, ρευστοστερεάς κλίνης κ.α.)⁷. Η συγκεκριμένη διεργασία εφαρμόζεται εμπορικά αλλά μπορεί να θεωρηθεί ανταγωνιστικότερη της αναμόρφωσης του μεθανίου μόνο σε περιπτώσεις όπου το φυσικό αέριο είναι ακριβό.

Η αεριοποίηση του άνθρακα είναι μια διεργασία που μετατρέπει το στερεό άνθρακα σε ένα αέριο μίγμα που αποτελείται κυρίως από H₂, CO, CO₂ και CH₄. Μια χαρακτηριστική αντίδραση που περιγράφει την παραπάνω διεργασία παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση στην οποία ο άνθρακας μετατρέπεται σε αέριο σύνθεσης:



Ο άνθρακας μπορεί να αεριοποιηθεί με πολλούς τρόπους διαφοροποιώντας το μίγμα άνθρακα, οξυγόνου και ατμού μέσα στον αεριοποιητή⁸. Δεδομένου ότι αυτή η αντίδραση είναι ενδόθερμη, απαιτείται επιπλέον θερμότητα, όπως και με την αναμόρφωση του μεθανίου. Το CO που παράγεται μετατρέπεται περαιτέρω σε CO₂ και H₂ μέσω της αντίδρασης μετατόπισης του υδραερίου. Σε αντίθεση με το H₂, το τελικό προϊόν αποτελείται από σχετικά καθαρό CO₂, έτοιμο να συμπιεστεί και να αποθηκευθεί (CCS). Η παραγωγή υδρογόνου από τον άνθρακα είναι εμπορικά ώριμη, αλλά είναι περισσότερο πολύπλοκη σε σχέση με την παραγωγή υδρογόνου με τη μέθοδο SMR. Για τις περισσότερες εφαρμογές απαιτείται ο τελικός καθαρισμός του H₂. Το κόστος του παραγόμενου υδρογόνου είναι επίσης υψηλότερο εξαιτίας του αεριοποιητή και της απαίτησης για O₂.

5.7.2. Υδρογόνο από τη διάσπαση του νερού

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από την διάσπαση του νερού μέσω διάφορων διεργασιών, από την ηλεκτρόλυση του νερού, φωτο(ηλιακή)-ηλεκτρόλυση, φωτο-βιολογική παραγωγή έως την διάσπαση του νερού σε υψηλή θερμοκρασία.

5.7.2.1. Ηλεκτρόλυση του νερού

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τον διαχωρισμό του νερού στα συστατικά του, π.χ. σε υδρογόνο και οξυγόνο, όπως απεικονίζεται στην Εξίσωση:



⁷ Shoko et al., 2006.

⁸ Shoko et al., 2006.

Σήμερα, περίπου 4% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου παράγεται από την ηλεκτρόλυση του νερού⁹. Αυτή η διεργασία είναι ήδη οικονομικά αποδοτική για την παραγωγή υπερ-καθαρού υδρογόνου σε μικρές ποσότητες, εντούτοις, εξακολουθεί να παραμένει ακριβή για εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας, λόγω κυρίως της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία κοστίζει αυτήν την περίοδο τρεις έως πέντε φορές περισσότερο έναντι των αντίστοιχων πρώτων υλών ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, αναμένεται να μειωθεί λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή απόδοση των νέων συστημάτων και την ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες είναι δυνατό να συνδυαστούν με την ηλεκτρόλυση του νερού.

5.7.2.2. Αλκαλική ηλεκτρόλυση

Οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιούν ένα υδατικό διάλυμα ΚΟΗ ως ηλεκτρολύτη¹⁰. Η αλκαλική ηλεκτρόλυση είναι η καταλληλότερη για σταθερές εφαρμογές που διεξάγονται σε πιέσεις μέχρι 25 bar. Οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης έχουν εμπορευματοποιηθεί εδώ και πολύ καιρό. Οι ακόλουθες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται μέσα στην κυψέλη αλκαλικής ηλεκτρόλυσης:

Ηλεκτρολύτης $4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{OH}^-$	Κάθοδος $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$	Άνοδος $4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$
Συνολική Αντίδραση $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2$		

Συνήθως, οι εμπορικές διατάξεις ηλεκτρόλυσης αποτελούνται από ένα πλήθος ηλεκτρολυτικών κυψελών σε μορφή συστοιχίας.

5.7.2.3. Ηλεκτρόλυση σε πολυμερικής μεμβράνης ηλεκτρολύτες (PEM)

Ηλεκτρόλυση με τη γνωστή μας κυψέλη τύπου PEM περιγράφεται στις εξισώσεις:

Άνοδος $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	Κάθοδος $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------

Ο ηλεκτρολύτης είναι μια οργανική πολυμερική μεμβράνη, στην οποία τα πρωτόνια που παράγονται στην άνοδο μεταφέρονται στην κάθοδο. Οι PEM συσκευές ηλεκτρόλυσης μπορούν να σχεδιαστούν για να λειτουργούν σε πιέσεις μέχρι αρκετές εκατοντάδες bar, και είναι κατάλληλες τόσο για σταθερές όσο και για κινητές εφαρμογές¹¹. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των PEM σε σχέση με τις αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης είναι ευελιξία τους όσον αφορά την λειτουργία τους σε ένα μεγάλο εύρος δυναμικοτήτων, η ασφάλεια τους

⁹ Berry, 2004.

¹⁰ Floch et al., 2007.

¹¹ Grigoriev et al., 2006.

λόγω της απουσίας του ηλεκτρολύτη ΚΟΗ, η συνεκτικότερη κατασκευή λόγω των υψηλότερων πυκνοτήτων ισχύος που είναι δυνατό να επιτευχθούν και οι υψηλότερες πιέσεις λειτουργίας (καμία ανάγκη για περαιτέρω συμπίεση).

5.7.2.4. Ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες

Η υψηλής θερμοκρασίας ηλεκτρόλυση του ατμού βασίζεται στην αντίστροφη λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας¹². Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για να διαχωριστεί το νερό στους 1000°C είναι αρκετά χαμηλότερη από την ηλεκτρόλυση στους 100°C. Αυτό σημαίνει ότι μια υψηλής θερμοκρασίας συσκευή ηλεκτρόλυσης μπορεί να λειτουργήσει σε σημαντικά υψηλότερες αποδόσεις από μια διάταξη ηλεκτρόλυσης που λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες. Μια χαρακτηριστική τεχνολογία αυτής της κατηγορίας είναι η κυψέλη ηλεκτρόλυσης στερεού ηλεκτρολύτη (SOEC).

5.7.2.5. Άλλες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου

5.7.2.5.1. Φωτο-ηλεκτρόλυση (Φωτόλυση)

Η φωτο-ηλεκτρόλυση του νερού είναι η διεργασία με την οποία το φως του ήλιου χρησιμοποιείται για να διεγείρει τους ημιαγωγούς που βρίσκονται σε υγρή φάση σε μία συσκευή που μετατρέπει το φως σε χημική ενέργεια προκειμένου να διασπάσει το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Το κόστος τέτοιων παρόμοιων συστημάτων μπορεί να είναι μικρότερο σε σχέση με τα συνδυασμένα συστήματα φωτοβολταϊκών-ηλεκτρόλυσης (τεχνολογία δύο βημάτων). Η άμεση παραγωγή του υδρογόνου μέσω της διάσπασης του νερού από το φως του ήλιου απαιτεί μια διάταξη συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας (συστοιχία ηλιακών κατόπτρων) και ειδικών καταλυτικών συστημάτων αποδοτικών για την διάσπαση του νερού.

5.7.2.5.2. Φωτο-βιολογική παραγωγή

Η φωτο-βιολογική παραγωγή του υδρογόνου είναι βασισμένη σε δύο βήματα: τη φωτοσύνθεση και την παραγωγή του υδρογόνου που καταλύεται από υδρογενάσες, π.χ., πράσινη άλγη και κυανοβακτήρια¹³, και φαίνονται στις παρακάτω εξισώσεις:

Φωτοσύνθεση: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2$ Παραγωγή Υδρογόνου: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$

5.7.2.5.3. Θερμοχημική διάσπαση του νερού

Η διάσπαση του νερού σε υψηλή θερμοκρασία πραγματοποιείται περίπου στους 3000°C. Σε αυτήν την θερμοκρασία, διασπάται το 10% του νερού και το υπόλοιπο 90% μπορεί να ανακυκλωθεί. Για να μειωθεί η θερμοκρασία, έχουν προταθεί άλλες διεργασίες για το διαχωρισμό του νερού σε υψηλή θερμοκρασία¹⁴, όπως:

- Θερμο-χημικοί κύκλοι,
- Υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν τη θερμική διάσπαση και ηλεκτρόλυση,

¹² Herring et al., 2007.

¹³ Melis, 2002.

¹⁴ Marban et al., 2007.

- Άμεση καταλυτική διάσπαση του νερού ("θερμο-φυσικός κύκλος"),
- Χημική διάσπαση του νερού με χρήση τεχνολογίας πλάσματος σε έναν κύκλο CO₂ δύο σταδίων.

5.7.2.5.4. Υδρογόνο από βιομάζα

Η βιομάζα είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που θα μπορούσε να διαδραματίσει έναν ουσιαστικό και σημαντικό ρόλο σε ένα διαφοροποιημένο και βιώσιμο ενεργειακό μίγμα. Η βιομάζα μπορεί να οριστεί ως οποιαδήποτε ανανεώσιμη πηγή άνθρακα, όπως τα ξύλα, τα υπολείμματα από το ξύλο, οι γεωργικοί καρποί και τα υπολείμματά τους. Τα βιομηχανικά και αστικά απόβλητα θεωρούνται επίσης συχνά ως βιομάζα λόγω των υψηλών ποσοστών τους σε οργανικά απόβλητα¹⁵.

Οι διεργασίες για την παραγωγή του υδρογόνου από βιομάζα μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες¹⁶:

- Άμεσοι μέθοδοι παραγωγής (π.χ., αεριοποίηση, πυρόλυση όμοια με αυτή στην περίπτωση του άνθρακα).
- Έμμεσοι τρόποι παραγωγής μέσω της αναμόρφωσης των παραγόμενων βιοκαυσίμων (π.χ. βιοαέριο, βιοέλαιο).
- Διεργασίες μεταβολισμού για την διάσπαση του νερού μέσω της φωτοσύνθεσης, ή για την διεξαγωγή της αντίδρασης μετατόπισης του υδραερίου με χρήση φωτοβιολογικών οργανισμών.

5.7.3. Μέθοδοι αποθήκευσης

5.7.3.1. Αποθήκευση με συμπίεση

Η πυκνότητα του υδρογόνου είναι περίπου 0,08988 g/L στην αέρια κατάσταση σε 1 atm. Ωστόσο συμπιεσμένο υδρογόνο θα επιτύχει πυκνότητα 31.04g/L στα 350bar. Το υδρογόνο αποθηκεύεται συχνά σε φιάλες υπό πίεση 350 bar , στοχεύοντας τα 700 bar (Compressed Gas Hydrogen - CGH₂) και αποτελεί εμπορικά πολύ ώριμη τεχνολογία αποθήκευσης. Με δεδομένο ότι το υδρογόνο έχει χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα όγκου, πρέπει να συμπιεστεί σε πολύ υψηλές πιέσεις ώστε να αποθηκευτεί επαρκής ποσότητα υδρογόνου σε περιορισμένο όγκο, ένα πρόβλημα που συναντάται ιδιαίτερα σε κινητές εφαρμογές. Βιομηχανικά πρότυπα για αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου είναι στα 350 bar, με έναν απώτερο στόχο τα 700 bar.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της αποθήκευσης συμπιεσμένου υδρογόνου (CGH₂) είναι ότι αποτελεί μία σχετικά απλή και ταχεία διαδικασία. Τα κύρια μειονεκτήματα σχετίζονται με τις σχετικά χαμηλές ογκομετρικές και σταθμικές πυκνότητες, συγκρινόμενες με διαφορετικές μεθόδους αποθήκευσης. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα για τη διαδεδομένη χρήση της μεθόδου είναι η φοβία του κοινού για τα θέματα ασφαλείας που σχετίζεται με τις εξαιρετικά υψηλές πιέσεις των δοχείων υδρογόνου κατά τη λειτουργία ενός κοινού επιβατικού αυτοκινήτου.

¹⁵ Ni et al., 2006.

¹⁶ Ni et al., 2006.

5.7.3.2. Αποθήκευση με υγροποίηση

Εναλλακτικά, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί κρυογονικά, αναφέρεται ως κρυοσυμπυκνωμένο υδρογόνο (LH₂) και είναι σήμερα η πιο ενεργειακά πυκνή φυσική μέθοδος αποθήκευσης. Το υγρό υδρογόνο αποθηκεύεται σε ατμοσφαιρική πίεση σε κρυογενικές δεξαμενές σε θερμοκρασία -253 °C με πυκνότητα 70,8 g/lit, η οποία είναι σχεδόν διπλάσια της πυκνότητας του συμπιεσμένου υδρογόνου στα 700 bar (περίπου 40g/lit). Μία κρυογενική δεξαμενή 68 lt μπορεί να περιέχει περίπου 5 kg LH₂, το οποίο είναι επαρκές για να κινήσει ένα επιβατικό αυτοκίνητο για απόσταση 500 km. Δεξαμενές LH₂ μπορούν να πληρωθούν σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα και είναι πολύ πιο ασφαλείς σε κρυογενικές θερμοκρασίες από ότι οι υψηλής πίεσης δεξαμενές υδρογόνου.

Το κύριο μειονέκτημα της αποθήκευσης υγροποιημένου υδρογόνου είναι η υψηλή κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με τις διαδικασίες ρευστοποίησης και τη συνεχή «εξάτμιση» κατά την αποθήκευση¹⁷. Η απαιτούμενη ενέργεια για να υγροποιηθεί το υδρογόνο είναι περίπου το 30-40% του ενεργειακού περιεχομένου του αερίου και για το λόγο αυτό μειώνει σημαντικά τη συνολική απόδοση του συστήματος. Οι χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας συγκρινόμενες με τις περιβαλλοντικές συνθήκες θερμοκρασίας 27 °C, οδηγούν σε αναπόφευκτη ροή θερμότητας προς το περιβάλλον εξαιτίας των τριών βασικών μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας: αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία, από τους οποίους ο πρώτος και ο τρίτος είναι οι κυρίαρχοι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας προς το περιβάλλον¹⁸.

5.7.3.3. Αποθήκευση σε προηγμένα υλικά

Μια εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές μεθόδους αποθήκευσης υδρογόνου αποτελεί η αποθήκευση υδρογόνου σε προηγμένα στερεά υλικά τα οποία λειτουργούν ως μικρο-δεξαμενές αποθήκευσης του υδρογόνου σε ατομική ή μοριακή μορφή. Η παραπάνω μέθοδος αποθήκευσης αναφέρεται συχνά ως μέθοδος αποθήκευσης «στερεού» υδρογόνου διότι το υδρογόνο αποτελεί μέρος του στερεού υλικού μέσω φυσικοχημικών δεσμών.

Στην παρούσα φάση υπάρχουν δύο θεμελιώδεις μηχανισμοί αποθήκευσης στερεού υδρογόνου με αντιστρεπτό τρόπο: η απορρόφηση και η προσρόφηση. Κατά την απορρόφηση το υδρογόνο απορροφάται από τον κύριο όγκο του υλικού που δρα ως σπόγγος. Σε απλά κρυσταλλικά μεταλλικά υδρίδια η απορρόφηση λαμβάνει χώρα με την ενσωμάτωση του υδρογόνου σε ατομική μορφή στις ενδόθετες θέσεις του κρυσταλλικού πλέγματος¹⁹ μέσα από μια σειρά σταδίων. Η προσρόφηση από την άλλη μεριά λαμβάνει χώρα μέσα από την αλληλεπίδραση των μορίων του υδρογόνου με τα τοιχώματα των πόρων του προσροφητικού υλικού και διακρίνεται σε φυσική και χημική ρόφηση ανάλογα με τις δυνάμεις προσρόφησης που λαμβάνουν χώρα σε κάθε περίπτωση. Ένας τρίτος μηχανισμός αποθήκευσης «στερεού» υδρογόνου λαμβάνει χώρα μέσω χημικών αντιδράσεων²⁰.

¹⁷ Zhang et al., 2005.

¹⁸ von Helmolt and Eberle, 2007 και, Felderhoff et al., 2007.

¹⁹ Schlapbach and Züttel, 2001.

²⁰ Stone et al., 2005 και Schlapbach and Züttel, 2001.

5.7.3.3.1. Προσροφητικά υλικά

Η αποθήκευση του υδρογόνου μέσω προσρόφησης σε σχετικά χαμηλές πιέσεις (≤ 150 bar) και θερμοκρασία δωματίου παρέχει το πλεονέκτημα της αυξημένης ασφάλειας σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες όπου απαιτείται είτε πολύ υψηλή πίεση είτε πολύ χαμηλή θερμοκρασία. Ανθρακούχα προσροφητικά υλικά (ενεργοί άνθρακες, νανο-σωλήνες και νανο-ίνες άνθρακα, κ.α.) αποτέλεσαν αντικείμενο έρευνας ωστόσο, σήμερα τα ανθρακούχα υλικά έχουν πάψει να θεωρούνται ικανά μέσα αποθήκευσης υδρογόνου για εμπορικές εφαρμογές. Άλλες ιδέες που αφορούν τον εμποτισμό της επιφάνειας του υλικού με οξειδία μετάλλων για την ενίσχυση των δυνάμεων αλληλεπίδρασης βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο έρευνας²¹. Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί πιο εξεζητημένα υλικά και πορώδεις δομές τόσο σε πειραματικό όσο και σε θεωρητικό επίπεδο²² η μετάβαση όμως από το στάδιο της έρευνας σε αυτό της παραγωγής αποτελεί μια μακρόχρονη και καθόλου εγγυημένη διαδικασία.

5.7.3.3.2. Μεταλλικά υδρίδια

Τα μεταλλικά υδρίδια μελετώνται ως πιθανοί φορείς αποθήκευσης υδρογόνου από τη δεκαετία του '70. Η αρχή της αποθήκευσης σε μεταλλικά υδρίδια βασίζεται στο γεγονός ότι άτομα του υδρογόνου σχηματίζουν δεσμούς με τα άτομα του μεταλλικού πλέγματος σε χαμηλές πιέσεις. Τα μεταλλικά υδρίδια διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες με βάση τους τύπους των πλεγμάτων των μεταλλικών ενώσεων που χρησιμοποιούνται ως αποθηκευτικά μέσα²³. Τα σύνθετα υλικά από μέταλλα μετάπτωσης εξακολουθούν να είναι σημαντικά για την χρήση τους ως μέσα αποθήκευσης υδρογόνου. Πολλές μελέτες έχουν γίνει με σκοπό να βελτιωθούν οι ικανότητες απορρόφησης υδρογόνου (και προφανώς και εκρόφησης) γεγονός που οδήγησε στην ανακάλυψη νέων μεταλλικών υδριδίων βασισμένα σε ενώσεις σπανίων γαιών – μετάλλων μετάπτωσης βασισμένων στο Ti ή στο Zr, στο Mg αλλά και σε ενώσεις στερεάς μορφής βασισμένες στο V. Τα βασικότερα προβλήματα που εμφανίζονται στη χρήση των μεταλλικών υδριδίων για αποθήκευση του υδρογόνου είναι η αντιστρεπτότητα κατά την περιοδική φόρτιση-αποφόρτιση του υλικού, οι χαμηλοί ρυθμοί φόρτισης-αποφόρτισης καθώς και το μεγάλο βάρος των υλικών αυτών ειδικά σε κινητές εφαρμογές.

Ένα σημαντικό αρνητικό της μεθόδου αυτής είναι το μεγάλο βάρος σε συνδυασμό με το μικρό ποσοστό του υδρογόνου επί του συνολικού βάρους. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι τόσο η προσρόφηση όσο και η απορρόφηση είναι εξώθερμες διεργασίες, κατά συνέπεια κατά τον σχεδιασμό τους απαιτείται η παράλληλη ανάπτυξη συστήματος διαχείρισης της παραγόμενης θερμότητας. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται πολύπλοκες γεωμετρικές διατάξεις εναλλακτών θερμότητας όπως πολλαπλοί αυλοί, εσωτερικές σπείρες εναλλακτών, κλπ.²⁴.

²¹ Li et al., 2007.

²² Li et al., 1999 και Rowsell et al., 2005.

²³ Sakintun et al., 2007.

²⁴ Dimitrakakis et al., 2008.

5.7.3.3.3. LOHC

Επιπρόσθετα, η μεγάλων αποστάσεων μεταφορά και η μακροπρόθεσμη αποθήκευση του υδρογόνου μπορούν να πραγματοποιηθούν με μία νέα τεχνολογία γνωστή ως Liquid Organic Hydrogen Carriers, (LOHC) βάσει ενός κύκλου δύο σταδίων: (1) φόρτωση υδρογόνου (υδρογόνωση) στο μόριο LOHC (δηλαδή, το υδρογόνο δεσμεύεται ομοιοπολικά στο LOHC) και (2) εκφόρτωση του υδρογόνου (αφυδρογόνωση) μετά τη μεταφορά και την αποθήκευση. Δεδομένου ότι το LOHC είναι υγρό σε συνθήκες περιβάλλοντος και παρουσιάζει παρόμοιες ιδιότητες με υγρά με βάση το αργό πετρέλαιο (π.χ. ντίζελ και βενζίνη), ο χειρισμός και η αποθήκευση πραγματοποιούνται με γνωστές μεθόδους. Επομένως, η σταδιακή προσαρμογή της υπάρχουσας υποδομής με βάση το αργό πετρέλαιο είναι βασικά δυνατή.

Υπάρχουν διάφορα LOHC, με διάφορα πειραματικά αποτελέσματα να δείχνουν ότι η μεθανόλη είναι η φθηνότερη επιλογή LOHC για αποθήκευση και μεταφορά, ακολουθούμενη από το διβενζυλοτολουόλιο και το τολουόλιο. Για ένα χρόνο αποθήκευσης 60 ημερών παρουσιάζουν οικονομικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με το συμπιεσμένο υδρογόνο (CGH₂). Επομένως αυτές οι επιλογές LOHC είναι ιδιαίτερα επωφελείς για εφαρμογές μακροπρόθεσμης αποθήκευσης / μεταφορές μεγάλων αποστάσεων. Η ενεργειακή απόδοση των συστημάτων εξαρτάται κυρίως από την πηγή της θερμότητας αφυδρογόνωσης. Δύο επιλογές, η αφυδρογόνωση που προκαλείται από την καύση υδρογόνου εναντίον της αφυδρογόνωσης που προκαλείται από την αποβαλλόμενη θερμότητα, έχουν αξιολογηθεί σε αυτή τη μελέτη. Τα συστήματα που λειτουργούν με την αποβαλλόμενη θερμότητα λειτουργούν πολύ καλύτερα από την άποψη της απόδοσης. Συνολικά, τα LOHC μπορούν να παράσχουν τεχνολογικά αποδοτικές και οικονομικά ελπιδοφόρες λύσεις αποθήκευσης στο πλαίσιο μιας βιώσιμης οικονομίας υδρογόνου.

5.7.4. Καθαρισμός υδρογόνου

5.7.4.1. Καθαρισμός του CO από το υδρογόνο

Οι απαιτήσεις καθαρότητας καυσίμου εξαρτώνται από τον τύπο της κυψέλης καυσίμου. Για παράδειγμα, κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας απαιτούν υδρογόνο με σχετικά υψηλή καθαρότητα. Το πιο σημαντικό, τα αέρια που ανταγωνίζονται με το υδρογόνο για επιφανειακή προσρόφηση επί του καταλύτη από πλατίνα, και κυρίως το CO, αναστέλλει τις θέσεις αντίδρασης και, ως εκ τούτου, επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση της κυψέλης. Αντίθετα, οι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας δέχονται καύσιμα χαμηλότερης ποιότητας, μπορούν να χρησιμοποιήσουν CO ως το καύσιμο και η επεξεργασία καυσίμου μπορεί να πραγματοποιηθεί απευθείας στην κυψέλη καυσίμου.

Επομένως, ο καθαρισμός του υδρογόνου είναι ένα απαραίτητο βήμα για πολλά συστήματα LT-PEMFC που χρησιμοποιούν καύσιμα υδρογονανθράκων, λόγω της ευαισθησίας αυτού του είδους της κυψέλης καυσίμου σε μολυσματικές ουσίες, το πιο αξιοσημείωτο CO που πρέπει να μειωθεί στα επιτρεπόμενα επίπεδα. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί κάποιες μέθοδοι για τη μείωση του περιεχομένου CO που οδηγεί επίσης στη μεγιστοποίηση της απόδοσης υδρογόνου.

Οι πιο κοινές μέθοδοι καθαρισμού CO είναι οι εξής:

- Μετατόπιση αερίου νερού

Η αντίδραση μετατόπισης αερίου νερού (WGS) ακολουθεί συνήθως μετά την αντίδραση αναμόρφωσης. Το CO που προκύπτει κατά τη διάρκεια της αναμόρφωσης αντιδρά περαιτέρω με ατμό και σχηματίζει υδρογόνο και CO₂.

- Προτιμησιακή οξείδωση

Η επιτρεπόμενη συγκέντρωση CO στις κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας είναι συνήθως χαμηλότερη από αυτή που λαμβάνεται σε αντιδραστήρες μετατόπισης. Για να επιτευχθεί αυτό, η προτιμησιακή οξείδωση (PrOX), επίσης γνωστή ως εκλεκτική οξείδωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τελική μέθοδος καθαρισμού, όπου παρέχεται αέρας για την οξείδωση του CO σε CO₂. Σημαντικά πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας είναι η απλότητα και η χαμηλή πίεση της αντίδρασης και, ως εκ τούτου, σχετικά χαμηλό κόστος και μικρό μέγεθος. Στη διαδικασία αυτή, κάποιο υδρογόνο αναπόφευκτα οξειδώνεται, μειώνοντας τη συγκέντρωση υδρογόνου στο αέριο προϊόν.

- Επιλεκτική μεθάνωση

Η επιλεκτική μεθάνωση (SMET) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας εναλλακτικός τρόπος για τη μείωση της συγκέντρωσης CO στο καύσιμο, αν και στην πραγματικότητα είναι αντίστροφη SR του μεθανίου. Λαμβάνεται ένα αέριο προϊόν υψηλής θερμοκρασίας σε σύγκριση με τον αντιδραστήρα PrOX, πράγμα που είναι ιδιαίτερα ευεργετικό εάν το αέριο ουράς της κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιείται περαιτέρω, για παράδειγμα σε καυστήρες ή θερμικές μηχανές.

5.7.4.2. Διαχωρισμός μεμβράνης

Ο διαχωρισμός μεμβράνης είναι μία διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη λήψη αερίου προϊόντος σχετικά υψηλής καθαρότητας. Υπάρχει μία ποικιλία τύπων για την παραγωγή υδρογόνου. Από αυτά, πυκνές μεταλλικές και κεραμικές μεμβράνες έχουν την υψηλότερη εκλεκτικότητα για το υδρογόνο. Εναλλακτικά, πορώδη κεραμικά και άνθρακας, καθώς και πυκνά πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά η επιλεκτικότητά τους είναι πιο περιορισμένη.

Η σύγχρονης τεχνολογίας μεμβράνες διαχωρισμού υδρογόνου είναι κατασκευασμένες από κράματα παλλαδίου-αργύρου και συνεπώς είναι σχετικά δαπανηρά. Για υψηλές θερμοκρασίες μέχρι 900 ° C είναι κατασκευασμένες με βάση το πυρίτιο. Ανάλογα με τον τύπο της μεμβράνης και τις συνθήκες διεργασίας, μια σημαντική ποσότητα υδρογόνου χάνεται στη διαδικασία.

5.7.4.3. Pressure swing adsorption

Η PRESSURE SWING ADSORPTION (PSA) είναι μια άλλη συχνά χρησιμοποιούμενη διαδικασία καθαρισμού του υδρογόνου. Στην PSA, το συνθετικό αέριο τροφοδοτείται σε δοχείο πίεσης, που περιέχει ένα στερεό προσροφητικό. Η ισχυρότερη προσρόφηση βαρύτερων μορίων στο προσροφητικό οδηγεί σε ροή υψηλής καθαρότητας υδρογόνου στην έξοδο του αντιδραστήρα. Το προσροφητικό υλικό αναγεννάται εύκολα μειώνοντας την πίεση. Η διαδικασία PSA είναι απλή, αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική.

Τα μειονεκτήματα είναι το σχετικά μεγάλο μέγεθος, η αυξημένη πίεση και η παρασιτική κατανάλωση ισχύος των συμπιεστών.

5.7.4.4. Αποθείωση (Des)

Τα ορυκτά καύσιμα περιέχουν ενώσεις θείου σε έναν ορισμένο βαθμό. Δεδομένου ότι το θείο απενεργοποιεί τους καταλύτες που χρησιμοποιούνται στους αναμορφωτές, τους αντιδραστήρες μετατόπισης και τις κυψέλες καυσίμου, η DeS απαιτείται συνήθως σε συστήματα κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα. Υπάρχουν αρκετές τεχνικές για να γίνει, από την υγρή απόξεση μέχρι την υδροαποθείωση, και σε συνθήκες επεξεργασίας που κυμαίνονται από το ατμοσφαιρικές μέχρι 1200 °C και 50 bar.

Ποια διαδικασία αποθείωσης είναι η πλέον κατάλληλη εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου και τις ανοχές σε θείο. Τα επιφανειακά προσροφητικά παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τα συστήματα κυψελών καυσίμου, καθώς μοιάζουν με μία απλή μέθοδο η οποία είναι ικανή να μειώσει την περιεκτικότητα σε θείο σε χαμηλά επίπεδα. Ένα μειονέκτημα του επιφανειακού προσροφητικού είναι η ανάγκη είτε για αντικατάσταση είτε για αναγέννηση. Το θειούχο υδρογόνο μπορεί να απομακρυνθεί από ένα ρεύμα αερίου σε μέτριες θερμοκρασίες μεταξύ 300 και 550 °C.

5.7.4.5. Δέσμευση και αποθήκευση του CO₂

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα κύριο παραπροϊόν σε όλες τις τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου που βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα και η ποσότητά του ποικίλει ανάλογα με την αναλογία υδρογόνου/ άνθρακα στο χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Συνεπώς, για να αναπτυχθεί μια βιώσιμη (με μηδενικές εκπομπές) τεχνολογία για την παραγωγή του υδρογόνου, το CO₂ πρέπει να συλλέγεται και να αποθηκεύεται²⁵. Η δέσμευση του άνθρακα από την παραγωγή του υδρογόνου περιλαμβάνει την απομάκρυνση των ανθρακούχων προϊόντων από τα απαέρια του αεριοποιητή ή του ατμοαναμορφωτή του μεθανίου και την αποθήκευσή τους σε υπόγεια μη πληρωμένα πεδία εξόρυξης πετρελαίου ή αερίου, βαθιά κοιτάσματα άνθρακα ή σε βαθύ ωκεανό. Διάφορες εταιρείες παραγωγής ενέργειας και ηλεκτρικής ισχύος επιδιώκουν την δέσμευση του άνθρακα, αν και οι τεχνολογίες αυτές αναμένεται να καταστούν εμπορικά βιώσιμες την επόμενη δεκαετία²⁶.

Υπάρχουν τρεις κυρίως τρόποι να δεσμευθεί το CO₂ σε μια διεργασία καύσης:

- Μετά την καύση: Το CO₂ μπορεί να απομακρυνθεί από τα απαέρια της διεργασίας καύσης με χημική προσρόφηση σε διάλυμα αμινών. Το διάλυμα μπορεί να αναγεννηθεί με χρήση θερμότητας και να επαναχρησιμοποιηθεί. Η διεργασία αυτή είναι ιδιαίτερος γνωστή και δοκιμασμένη. Ωστόσο, οδηγεί σε μείωση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης κατά 24% και αύξηση του κόστους επένδυσης κατά 61% (εκφρασμένη σε \$/kW)²⁷.
- Πριν την καύση: Το CO₂ δεσμεύεται κατά την παραγωγή του υδρογόνου μέσω των διεργασιών αεριοποίησης του άνθρακα ή κατά την παραγωγή H₂ από φυσικό αέριο. Έτσι

²⁵ Damen et al., 2007.

²⁶ Dunn, 2002.

²⁷ Herzog et al., 2009.

το καύσιμο μετασχηματίζεται από άνθρακα ή υδρογονάνθρακα σε H₂ και το CO₂ δεσμεύεται κατά την παραγωγή. Η διεργασία αυτή είναι πολύ περισσότερο οικονομική από τη διεργασία δέσμευσης μετά την καύση αλλά απαιτεί αρχικό σχεδιασμό της μονάδας και δεν αποτελεί επιλογή για υπάρχουσες μονάδες παραγωγής ενέργειας με βάση τον κονιορτοποιημένο άνθρακα.

- Καύση με οξυγόνο (Oxyfuel-combustion): Εάν η καύση δεν πραγματοποιηθεί με αέρα αλλά με καθαρό οξυγόνο, τότε η ποσότητα καυσαερίων μειώνεται σημαντικά, λόγω απουσίας N₂ στα απαέρια. Επομένως, τα απαέρια αποτελούνται βασικά από CO₂ και H₂O. Επομένως το CO₂ μπορεί να διαχωριστεί με συμπύκνωση των υδρατμών. Η αύξηση του κόστους εδώ προέρχεται από τη φάση παραγωγής του καθαρού O₂ και από την ανακυκλοφορία καυσαερίου με σκοπό να μειωθεί η θερμοκρασία της καύσης με καθαρό O₂.

6. ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

6.1. Το Πλήρως Ηλεκτρικό Πλοίο (All Electric Ship)

Το Πλήρως Ηλεκτρικό σκάφος (AES) αποτελεί πλέον μια κλασσική λύση για τα ενεργειακά συστήματα σε στρατιωτικά και πολιτικά πλοία όπου προηγμένες τεχνικές ηλεκτρικής πρόωσης και στοιχεία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Σε αυτή τη λύση, το σύστημα διανομής ισχύος για πρόωση, οι αισθητήρες, τα όπλα (για τα στρατιωτικά πλοία) και το γενικό δίκτυο των πλοίων είναι πλήρως ηλεκτρικό. Η έννοια του AES επιτρέπει την καλύτερη διαχείριση της ενέργειας, ευελιξία και χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου από τους κινητήρες ντίζελ ή τους αεριοστροβίλους.

Σε αυτό το πλαίσιο το σύστημα κυψελών καυσίμου μπορεί να είναι μια ελκυστική λύση για την πλήρη ενσωμάτωση των πηγών ενέργειας στην έννοια AES. Για μια υπάρχουσα πλατφόρμα πολεμικών πλοίων επιφανείας όπως η κατηγορία καταδρομικών πλοίων DDG-51, εκτιμάται ότι η χρήση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας βασισμένο σε κυψέλες καυσίμου 3-6MW θα είχε ως αποτέλεσμα εξοικονόμηση καυσίμου κατά 30% ετησίως.

Οι ονομαστικές ισχύς του ενεργειακού σταθμού ενός πλοίου ποικίλλουν ανάλογα με τις προδιαγραφές του. Η ισχύς για ένα υποβρύχιο AIP είναι μικρότερη από 500kW, αλλά μπορεί να φτάσει πάνω από 100MW για πλοία επιφανείας (το επιβατηγό πλοίο "Queen H Mary 2" έχει για παράδειγμα ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 118 MW). Ακόμη και αν μπορεί να παρατηρηθεί ότι ένα υψηλό επίπεδο συμπαγούς δομής και πυκνότητας ισχύος είναι μια κοινή απαίτηση στις ναυτικές εφαρμογές, αυτό το σημείο είναι ιδιαίτερα δύσκολο για το υποβρύχιο.

Ο σκοπός μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μία εφαρμογή μέσου μεταφοράς είναι να παρέχει μια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας για ένα χρονικό διάστημα, είτε για πρόωση είτε για βοηθητική ισχύ ή και για τα δύο. Η καταλληλότητα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σημαντικές πτυχές που καθορίζουν την καταλληλότητα ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής για ναυτιλιακή χρήση είναι:

- Ηλεκτρική απόδοση,
- Ισχύς και ενεργειακή πυκνότητα,
- Μεταβατικά φορτία και εκκίνηση του συστήματος,

- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις,
- Ασφάλεια και αξιοπιστία,
- Οικονομικά θέματα.

Θα γίνει μία επιφανειακή σύγκριση των συστημάτων κυψελών καυσίμου με συμβατικές ναυτιλιακές λύσεις σύμφωνα με τα κριτήρια που αναφέρονται παραπάνω.

6.2. Ηλεκτρική Απόδοση

Η υψηλότερη ηλεκτρική απόδοση σε σύγκριση με τις συμβατικές γεννήτριες είναι ένα σημαντικό κίνητρο για την εφαρμογή τεχνολογίας κυψελών καυσίμου σε πλοία. Η υψηλή απόδοση είναι εν μέρει αποτέλεσμα της άμεσης μετατροπής της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια, ενώ οι μηχανές εσωτερικής καύσης μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω θερμικής και μηχανικής ενέργειας. Καθώς τα ορυκτά καύσιμα μπορεί να παραμείνουν μια σημαντική πηγή ενέργειας στο εγγύς μέλλον, βελτιώσεις στην αποδοτικότητα θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε καθαρή εξοικονόμηση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG).

6.2.1. Συμβατικοί ναυτιλιακοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας

Στα πλοία, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται συνήθως με γεννήτριες ντίζελ. Οι γεννήτριες βαρέως τύπου παρέχουν ισχύ σε ένα αποτελεσματικό και οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Στοιχεία που παρέχονται από τους κατασκευαστές αποκαλύπτουν μέγιστη απόδοση περίπου 45% για τη γεννήτρια πετρελαίου στην κλίμακα των MW. Φτωχής καύσης γεννήτρια αερίου με ανάφλεξη σπινθήρα στην ίδια κατηγορία ισχύος αναφέρεται ότι επιτυγχάνει απόδοση έως 47%.

Τα σύνολα γεννήτριας γενικά δεν λειτουργούν στο πιο αποδοτικά λειτουργικό σημείο. Τα περισσότερα πλοία έχουν εγκατεστημένη σημαντική πλεονάζουσα παραγωγή ισχύος, τόσο για τα ανώτατα φορτία όσο και για τις απαιτήσεις εναλλαξιμότητας και εφεδρικής ισχύος. Οι μηχανικές απώλειες είναι σχετικά μεγάλες σε μερικό φορτίο, καθώς η περιστροφική ταχύτητα πρέπει να διατηρηθεί για να συμπέσει με τη συχνότητα του δικτύου. Συνεπώς, ανάλογα με τον τύπο της γεννήτριας και το λειτουργικό σημείο, οι πρακτικές αποδόσεις των υπερσύγχρονων γεννητριών ντίζελ βαρέως τύπου συνήθως αναφέρεται ότι κυμαίνονται από 25 έως 40%.

Οι γεννήτριες αεριοστροβίλων εφαρμόζονται μερικές φορές στον τομέα της ναυτιλίας. Έχουν υψηλότερη ειδική ισχύ και απαιτούν ελάχιστη συντήρηση σε σύγκριση με τις παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης. Με κορυφαίες αποδόσεις από 30 έως 40% για ναυτιλιακές γεννήτριες αεριοστροβίλων βαρέως τύπου και συνεπώς χαμηλότερες πρακτικά αποδόσεις, είναι κάπως λιγότερο ελκυστικές από την σκοπιά κατανάλωσης καυσίμου.

6.2.2. Αποδόσεις συστημάτων κυψελών καυσίμου

Στις αρχές της δεκαετίας του '90 στην πρώιμη δημοσίευσή του, ο Adams ισχυρίζεται ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τις κυψέλες καυσίμου είναι έως και δύο φορές πιο αποτελεσματική από τη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας με γεννήτριες ντίζελ. Σε άλλη δημοσίευση του Sattler αναφέρει αποδόσεις που ποικίλουν από περίπου 40%, για τους

PEMFCs με αναμορφωμένους υδρογονάνθρακες, έως και 60% για τα συστήματα SOFC που τροφοδοτούνται με NG. Σύμφωνα με μια έκθεση για πολιτική εφαρμογή ναυτιλιακών κυψελών καυσίμου, που δημοσιεύθηκε από τη Στρατηγική Ομάδα Μηχανικών Συστημάτων Rolls-Royce, τα SOFC αποτελούν την πιο ελπιδοφόρα τεχνολογία, ως διακριτή βελτίωση της απόδοσης που μπορεί να επιτευχθεί με βάση τον υφιστάμενο εξοπλισμό.

Παρόλο που τα PEMFC επέδειξαν ηλεκτρική απόδοση έως 70% με καθαρό υδρογόνο και οξυγόνο, η συνολική απόδοση δεν υπερβαίνει το 40% όταν είναι εφοδιασμένα με αναμορφωτές ντίζελ. Αυτό εξαλείφει ένα σημαντικό πλεονέκτημα που σχετίζεται με συστήματα κυψελών καυσίμου, δεδομένου ότι τα οφέλη περιορίζονται σε μειώσεις εκπομπών, εκπεμπόμενου θορύβου, δονήσεις και υπέρυθρες υπογραφές.

Για τα συστήματα MCFC, όταν τροφοδοτούνται με ντίζελ αναμένεται να επιτύχουν υψηλότερες αποδόσεις από τα PEMFC. Μόνο μερική αναμόρφωση του καυσίμου είναι επαρκής για τα συστήματα MCFC και αυτό μπορεί να επιτευχθεί σε χαμηλότερα επίπεδα θερμοκρασιών. Επιπλέον, η αποβαλλόμενη θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας από τη στοιβία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σκοπό αυτό.

Η τεχνολογία SOFC προσελκύει πρόσφατα περισσότερη προσοχή, καθώς αναμένονται μεγαλύτερες αποδόσεις.

Τα χαρακτηριστικά μερικού φορτίου είναι διαφορετικά στα συστήματα κυψελών καυσίμου και η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται συνήθως σε σχετικά χαμηλά φορτία. Ακόμα, η απόδοση τυπικά μειώνεται για ακόμη χαμηλότερα φορτία, αφού η παρασιτική κατανάλωση του ΒοΡ γίνεται σχετικά μεγάλη. Ωστόσο, μπορεί να είναι περιορισμένης ανησυχίας το εάν ένα μέρος του στοιχείου της κυψέλης καυσίμου μπορεί να απενεργοποιηθεί σε συνθήκες χαμηλού φορτίου.

6.2.3. Συνδυασμένοι κύκλοι

Οι ηλεκτρικές αποδόσεις μπορούν να αυξηθούν όταν οι κύκλοι ισχύος συνδυαστούν. Ο αεριοστρόβιλος με γεννήτριες ατμού ανάκτησης θερμότητας, όπου ο κύκλος Brayton είναι εφοδιασμένος με κατώτατο σημείο κύκλου Rankine, είναι ένα πολύ γνωστό παράδειγμα μονάδας παραγωγής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου. Εξαιρετικές αποδόσεις έως 60% και καλά χαρακτηριστικά μερικού φορτίου επιτυγχάνονται με ένα συνδυασμό αυτών των κύκλων. Η αποβαλλόμενη θερμότητα μπορεί να ανακτηθεί από παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης επίσης, αλλά το κέρδος στην ηλεκτρική απόδοση είναι συνήθως λιγότερο ουσιαστικό. Παρόλο που συνδυασμένες ηλεκτρικές αποδόσεις μέχρι 55% προβλέπονται για τα συστήματα αυτά, το κέρδος είναι μικρότερο από το 5 % στις περισσότερες περιπτώσεις, ενώ το σύστημα είναι ακριβό και περίπλοκο.

Οι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας μπορούν να εξοπλιστούν με κύκλους Rankine χαμηλής θερμοκρασίας, διότι τα θερμά καυσαέρια από την κυψέλη καυσίμου εξακολουθούν να περιέχουν θερμοχημική ενέργεια. Το αχρησιμοποίητο καύσιμο συνήθως καίγεται σε καταλυτικό μετατροπέα, αυξάνοντας τη θερμοκρασία των καυσαερίων ακόμα περισσότερο. Η ενσωμάτωση με τους αεριοστρόβιλους είναι ιδιαίτερα πλεονεκτική, δεδομένου ότι παρέχει καλή ενσωμάτωση με τη ροή αέρα καθόδου. Γενικά, προβλέπονται αποδόσεις έως 70% για συμπαραγωγή συστημάτων κυψελών καυσίμου/ αεριοστρόβιλων, αν και μερικές μελέτες προβλέπουν ακόμη υψηλότερες αποδόσεις.

Τα υβρίδια SOFC - αεριοστροβίλων έχουν μελετηθεί για ναυτιλιακή εφαρμογή σε ένα σύστημα σχεδιασμένο από τους Tse et al., όπου παράγεται ηλεκτρισμός, θερμότητα και ψύξη για ένα πολυτελές γιοτ. Εναλλακτικές επιλογές για τη χρήση της αποβαλλόμενης θερμότητας των κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας για επιπλέον παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι κινητήρες Stirling και έμμεση ζεύξη αεριοστροβίλων.

Μία άλλη πρόταση που έχει αποτυπωθεί είναι, το υπόλοιπο καύσιμο αντί να καίγεται σε καταλυτικό μετατροπέα, να καίγεται σε παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης, και θα μπορούσε να επιτευχθεί υψηλή συνδυασμένη απόδοση έως και 70%. Με παρόμοιο τρόπο, πλούσιο σε υδρογόνο απόβλητο αέριο ανόδου από κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να καθαριστεί και να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας. Αυτό επιτρέπει τη χρήση της ηλεκτροχημικής αποβαλλόμενης θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας για την αναμόρφωση, ενώ ένα μέρος της ισχύος παρέχεται με κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας.

6.3. Ισχύς και Πυκνότητα Ενέργειας

Ο όγκος και το βάρος των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι κρίσιμες πτυχές σχεδιασμού για οποιεσδήποτε εφαρμογές μέσω μεταφοράς, δεδομένου ότι ο όγκος και το βάρος είναι συνήθως περιορισμένοι για πρακτικούς λόγους, ενώ ένα ορισμένο ποσό ισχύος και αντοχής απαιτείται. Ανάλογα με τον τύπο της εφαρμογής και της μονάδας παραγωγής ενέργειας, ο σχεδιασμός είναι συνήθως είτε με κριτήριο όγκο, είτε με κριτήριο βάρους ή και τα δύο. Για παράδειγμα, εάν οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος εφαρμοστούν σε αυτοκίνητα, το επιτρεπόμενο βάρος είναι πιθανό να περιορίσει το μέγεθος της μπαταρίας και, συνεπώς, του εύρους αυτονομίας, ενώ εάν επιλεγθούν κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, ο όγκος των δεξαμενών υδρογόνου είναι πιο πιθανό να περιορίσει την αυτονομία του αυτοκινήτου.

6.3.1. Σύγκριση ναυτιλιακών συστημάτων κυψελών καυσίμου

Σαν γενική ιδέα, φαίνεται ότι οι χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν υδροποιημένο υδρογόνο παρέχουν μία συμπαγή λύση για πλοία με ένα διάστημα ανεφοδιασμού δεκάδων ωρών, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε μεγέθη ολικού συστήματος έως και πέντε φορές μεγαλύτερα από τις κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας και περισσότερο ενεργειακά πυκνά καύσιμα για τα πλοία με απαιτήσεις μεγαλύτερων αποστολών.

Γενικά, τα συστήματα κυψελών καυσίμου πρέπει να πληρούν ειδικές υψηλού επιπέδου απαιτήσεις των ναυτικών συστημάτων. Αυτές οι προδιαγραφές σχετίζονται με την απόδοση, την αξιοπιστία, τη συντηρησιμότητα, τη διάρκεια ζωής των κυψελών, το θαλάσσιο περιβάλλον, τη δόνηση και το επίπεδο θορύβου.

Οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν υψηλή ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας σε σύγκριση με τις μπαταρίες. Η σχεδίαση των σύγχρονων πλοίων γίνεται συνήθως με κριτήριο τον όγκο, αν και συγκεκριμένα σχέδια (π.χ. σκάφη υψηλής ταχύτητας) επωφελούνται επίσης από το χαμηλό βάρος. Όπως η συνολική απόδοση του συστήματος, η ισχύς και η πυκνότητα ενέργειας των συστημάτων κυψελών καυσίμου προσδιορίζονται από τον συνδυασμό του τύπου κυψελών καυσίμου και του ναυτιλιακού καυσίμου. Ο Adams συγκρίνει το βάρος και τον όγκο της τυπικής γεννήτριας ντιζελ με πολλά συστήματα κυψελών καυσίμου

εξοπλισμένα με αναμορφωτές NG, και συμπεραίνει ότι τα συστήματα κυψελών καυσίμου καταλαμβάνουν περισσότερο χώρο από τις γεννήτριες ντίζελ για την ίδια ποσότητα ισχύος. Ωστόσο, η δυνατότητα να μειωθεί ο όγκος των δεξαμενών αποθήκευσης λόγω της μειωμένης κατανάλωσης καυσίμου δεν λαμβάνεται υπόψη.

Τα συστήματα SOFC αναμένεται να επιτύχουν υψηλότερες πυκνότητες ισχύος από ότι τα MCFC, ενώ έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά. Δοκιμαστικά σχέδια ναυτιλιακών συστημάτων SOFC έχουν συζητηθεί σε αριθμός μελετών, αναφέροντας πυκνότητες ισχύος που κυμαίνονται από 20 W/kg και 8 W/L έως 230 W/kg και 60 W/L. Η υψηλότερες πυκνότητες ισχύος επιτυγχάνονται με PEMFCs. Ωστόσο, η επεξεργασία των καυσίμων συστατικών των συστημάτων PEMFC μειώνουν σημαντικά την αποδοτική πυκνότητα αν δεν λειτουργούν με καθαρό υδρογόνο.

Για παράδειγμα, ένας λεπτομερής σχεδιασμός για ένα σκάφος της Ακτοφυλακής των ΗΠΑ αποκάλυψε ότι, αν και το σύστημα MCFC ήταν βαρύτερο από την αρχική γεννήτρια ντίζελ, η αφαίρεση του συστήματος εξαγωγών καυσαερίων, πλακών ηχομόνωσης και μικρότερα συστήματα ψύξης είχε ως αποτέλεσμα καθαρή μείωση βάρους.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η αθροιστικότητα των κυψελών καυσίμου δίνει ένα πρόσθετο βαθμό ελευθερίας στη διάταξη του ενεργειακού συστήματος, επιτρέποντας στους σχεδιαστές πλοίων να χρησιμοποιούν αποδοτικότερα τον διαθέσιμο χώρο. Επιπλέον, η πυκνότητα ισχύος δεν έχει ακόμη αποτελέσει σημαντικό αντικείμενο σχεδιασμού για όλα τα συστήματα κυψελών καυσίμου, όπως ιδιαίτερα τα συστήματα κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας έχουν αναπτυχθεί κυρίως για σταθερή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπου η πυκνότητα ισχύος είναι περιορισμένης σημασίας.

6.4. Μεταβάσεις Φορτίου και Εκκίνηση Συστήματος

Ανάλογα με τον τύπο του πλοίου και το προφίλ λειτουργίας του, η απαίτηση ηλεκτρικής ισχύος υπόκειται συνήθως σε σημαντικές αλλαγές σε διάφορα χρονοδιαγράμματα. Επιπλέον, οι χρόνοι εκκίνησης του συστήματος θα πρέπει να είναι λογικοί και τουλάχιστον συγκρίσιμοι με τις συμβατικές γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας. Εφόσον η ηλεκτροδότηση της διανομής ενέργειας στο πλοίο είναι ούτως ή άλλως απαραίτητη, εφόσον η τεχνολογία κυψελών καυσίμου υιοθετηθεί, ο υβριδισμός με βοηθητικά στοιχεία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων εάν τα συστήματα κυψελών καυσίμου από μόνα τους δεν είναι σε θέση να το κάνουν.

Ο τύπος της κυψέλης καυσίμου και το ναυτιλιακό καύσιμο καθορίζουν πολλά χαρακτηριστικά του συστήματος. Για παράδειγμα, τα συστήματα PEMFC που τροφοδοτούνται με υδρογόνο αποδέχονται σημαντικά βήματα φόρτωσης σε δευτερόλεπτα, αλλά η μεταβατική απόδοση εξαρτάται κυρίως από τον εξοπλισμό επεξεργασίας καυσίμων αν λειτουργούν με NG. Η χρήση ενός ρυθμιστή υδρογόνου θα μπορούσε, τουλάχιστον εν μέρει, να ξεπεράσει αυτό το ζήτημα.

Ακόμη και αν ένα σύστημα κυψελών καυσίμου είναι ικανό να ανταποκρίνεται στις απαιτούμενες απαιτήσεις μεταβατικού φορτίου ή μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ για ένα μικρό χρονικό διάστημα, αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε αυξημένο ρυθμό υποβάθμισης. Επομένως, ακόμη και τα LT-PEMFC, τα οποία έχουν καλές δυνατότητες μεταβατικής

απόκρισης, συχνά συνδυάζονται με υπερπυκνωτές για αποθήκευση ενέργειας. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα να μειωθεί το απαιτούμενο μέγεθος της στοίβας κυψελών καυσίμου, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του βάρους και του κόστους.

Οι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας έχουν μεγάλους χρόνους εκκίνησης φορές και επιτρέπονται μόνο αργές αλλαγές φορτίου, δεδομένου ότι η υψηλή θερμοκρασία απαιτεί θέρμανση μιας μεγάλης θερμοκικής μάζας. Οι επιτρεπτές διαβαθμίσεις θερμοκρασίας στα SOFC περιορίζονται από τα εύθραυστα κεραμικά υλικά που είναι κατασκευασμένα. Τα υποστηριζόμενα με μέταλλα SOFC αναφέρεται ότι είναι πιο στιβαρά και επιτρέπουν γρήγορο θερμικό κύκλο. Ακόμα, τα συστήματα κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας έχουν ένα αξιοσημείωτο BoP, και η αυξημένη θερμοκή μάζα και αλληλεξάρτηση των μεμονωμένων εξαρτημάτων περιορίζουν τις μεταβατικές δυνατότητές τους.

Συνδυασμός με αεριοστρόβιλους, που χαρακτηρίζεται από σχετικά ταχεία εκκίνηση και ακολούθηση φορτίων, φαίνεται υποσχόμενο να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς των συστημάτων κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας. Ωστόσο, δεδομένου ότι η κυψέλη καυσίμου και ο αεριοστρόβιλος είναι στενά συνδεδεμένα σε τέτοια συστήματα η μεταβατική συμπεριφορά του βραδύτερου στοιχείου μπορεί να περιορίσει τη συνολική δυναμική του συστήματος. Για παράδειγμα, ταχείες μεταβολές στη στροβιλομηχανή μπορεί να προκαλέσει μη αποδεκτές συνθήκες λειτουργίας στη στοίβα SOFC.

Σε γενικές γραμμές, ο αριθμός των στοιχείων του συστήματος και η συνολική θερμοκή μάζα φαίνεται να είναι καλοί δείκτες για την εκκίνηση του συστήματος και τους χρόνους απόκρισης φορτίου. Απλούστευση του BoP και εξοπλισμός επεξεργασίας των καυσίμων θα μπορούσε να είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για την ενίσχυση της μεταβατικής απόδοσης. Δυστυχώς, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου. Οι αντιδραστήρες CPOX, για παράδειγμα, μπορούν να επιτύχουν σύντομη εκκίνηση και χρόνους απόκρισης φορτίου, αλλά η συνολική απόδοση του συστήματος σε σύγκριση με το SR είναι χαμηλή.

6.5. Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας

Διάφορα στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας με καλές μεταβατικές δυνατότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιστάθμιση της περιορισμένης δυναμικής των συστημάτων κυψελών καυσίμου. Για το σκοπό αυτό, οι κάτωθι μορφές είναι οι κατάλληλες καθώς ο λόγος ισχύος-ενέργειας αυτών των στοιχείων είναι σχετικά υψηλός, γεγονός που τους επιτρέπει να εκφορτίζουν σε δευτερόλεπτα έως λεπτά:

- Χημική μορφή (μπαταρίες)
- Μηχανική μορφή υπό την μορφή κινητικής ενέργειας σε σφόνδυλο (flywheels)
- Υπό μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου, λόγω διαφορετικού ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς (υπερπυκνωτές)

Από την άποψη της πυκνότητας ισχύος, οι μπαταρίες είναι καλύτερα εφαρμόσιμες για παροχή ισχύος για λεπτά και έως και ώρες. Ωστόσο, η ειδική ισχύς και ο αριθμός των κύκλων φόρτισης είναι περιορισμένοι. Επομένως, φαίνεται να είναι πιο κατάλληλες για την κάλυψη φορτίων κατά τη διάρκεια της ψυχρής εκκίνησης του συστήματος κυψελών καυσίμου και μεγάλων μεταβατικών.

Η ειδική χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας των υπερπυκνωτών είναι περιορισμένη σε σύγκριση με τις μπαταρίες, αλλά η πυκνότητα ισχύος τους είναι υψηλή, επιτρέποντάς τους να φορτίζουν και να εκφορτίζονται σε δευτερόλεπτα. Επιπλέον, μπορούν κάνουν πολλούς κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης χωρίς σημαντική απώλεια χωρητικότητας και ισχύος. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τους υπερπυκνωτές πιο κατάλληλους για την μείωση μεγίστων φορτίων και μείωση της κατανάλωσης ισχύος.

Οι σφόνδυλοι τοποθετούνται μεταξύ των μπαταριών και των υπερπυκνωτών από άποψη ισχύος και ενεργειακής πυκνότητας. Συνήθεις σφόνδυλοι είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα και έχουν περιορισμένη πυκνότητα, αλλά είναι σχετικά παλαιοί. Οι προηγμένοι σύνθετοι σφόνδυλοι τους ξεπερνούν, αλλά η κατάσταση εξέλιξής τους είναι πιο περιορισμένη. Παρόλο που οι αποδόσεις προσροφόμενης προς ανακτόμενης ενέργειας (αποδόσεις AC/AC) των σφονδύλων είναι συνήθως κάπως χαμηλότερες από τις μπαταρίες και των υπερπυκνωτών, αναμένεται να προσφέρουν εξοικονόμηση κόστους.

Ένα μέρος της ενέργειας χάνεται σε οποιοδήποτε σύστημα αποθήκευσης βοηθητικής ηλεκτρικής ενέργειας, και αυτό δεν πρέπει να υπερβαίνει την ισχύ που αποκτάται από την αργή συσκευή μετατροπής πρωτογενούς ισχύος. Κατά προτίμηση, οι απώλειες στον εξοπλισμό βοηθητικής αποθήκευσης είναι μικρές σε σύγκριση με το κέρδος απόδοσης στο σύστημα κυψελών καυσίμου. Επιπλέον, η συμπερίληψη εξοπλισμού αποθήκευσης βοηθητικής ηλεκτρικής ενέργειας μειώνει τη συνολική πυκνότητα ισχύος της εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Προσεκτική κλιμάκωση της συσκευής αποθήκευσης θα είναι αναγκαία για τη μεγιστοποίηση της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου και το κόστος κεφαλαίου και τη μεγιστοποίηση της πυκνότητας ισχύος του συστήματος.

6.6. Περιβαλλοντική Επίπτωση Κυψελών Καυσίμου

Η ενδεχόμενη μείωση των τοπικών εκπομπών κατά τη λειτουργία τους είναι ένα σημαντικό κίνητρο για την εφαρμογή συστημάτων κυψελών καυσίμου στα πλοία, δεδομένου ότι αυτά τυπικά υπόκεινται σε περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Καθόλου SOX, χαμηλά NOX και 40% μειωμένες εκπομπές CO₂ έχουν επιτευχθεί με ένα θαλάσσιο σύστημα SOFC 20 kW τροφοδοτούμενο με MeOH στο έργο METHAPU που θα παρουσιαστεί παρακάτω.

Οι μηχανές αερίου έχουν σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές NOX και PM σε σύγκριση με τους κινητήρες ντίζελ, αλλά διαρροές καυσίμου στην ατμόσφαιρα οδηγούν σε πολύ υψηλότερες εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs), κυρίως μεθανίου και CO.

Τα συστήματα κυψελών καυσίμου κατά τη διάρκεια της λειτουργικής τους ζωής έχουν ουσιαστικά μηδενικές εκπομπές NOX, PM, VOCs και CO, και η μεγαλύτερη ηλεκτρική απόδοση οδηγεί σε μειωμένες εκπομπές CO₂.

Ωστόσο, αυτό αντιπροσωπεύει μόνο ένα μέρος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου ζωής. Δίπλα στον αντίκτυπο κατά τη διάρκεια της λειτουργικής τους ζωής, η πλήρης περιβαλλοντική επιβάρυνση από τους ναυτιλιακούς παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από συνεισφορές από:

- Κατασκευή
- Συντήρηση
- Παροπλισμός - απενεργοποίηση

- Τροφοδοσία καυσίμου

Τα στάδια κατασκευής, συντήρησης και παροπλισμού μπορεί να είναι σημαντικά δεδομένου ότι οι διαδικασίες παραγωγής εντατικής ενέργειας και οι περιορισμένοι χρόνοι ζωής των συστημάτων κυψελών καυσίμου μπορούν να οδηγήσουν σε καθαρή αύξηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Οι εκτιμήσεις για την παροχή του καυσίμου λαμβάνουν υπόψη την παραγωγή, επεξεργασία και μεταφορά των καυσίμων. Για παράδειγμα, αν και υπάρχουν μειωμένες εκπομπές CO₂ από δεξαμενή σε ηλεκτρική ενέργεια για το LNG σε σύγκριση με το MGO, έχει υποστηριχθεί ότι οι εκπομπές μεθανίου που συνδέονται με την παραγωγή και τη διανομή του, μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις να οδηγήσει σε καθαρή αύξηση της επιβάρυνσης των GHG.

Σε αντίθεση με τα στάδια κατασκευής, συντήρησης και παροπλισμού, οι εκτιμήσεις παροχής καυσίμου είναι μόνο εξειδικευμένες για κυψέλες καυσίμου. Πιο αυστηρές απαιτήσεις ποιότητας καυσίμου μπορεί να επιβάλλει πρόσθετη επεξεργασία καυσίμου και το παρεχόμενο καύσιμο μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του συστήματος κυψελών καυσίμου. Άλλες πτυχές της παροχής του καυσίμων, όπως η προέλευση και η μεταφορά, είναι παρόμοιες για συστήματα κυψελών καυσίμου και κινητήρων εσωτερικής καύσης και έχουν μία σημαντική συμβολή στον περιβαλλοντική επιβάρυνση της παραγωγής ηλεκτρισμού στη ναυτιλία.

Έχουν διεξαχθεί τρεις αξιολογήσεις κύκλου ζωής για τα ναυτιλιακά συστήματα κυψελών καυσίμου. Δύο από αυτές θεωρούν τη συνεχή χρήση καυσίμων ντίζελ για τις παραδοσιακές μηχανές-γεννήτριες, ενώ τα ανανεώσιμα καύσιμα θεωρούνται μόνο για το σύστημα κυψελών καυσίμου. Ωστόσο, η πλήρης αξιολόγηση του κύκλου ζωής πρέπει να αξιολογεί τη χρήση ανανεώσιμων καυσίμων σε συμβατικές γεννήτριες επίσης.

Στην πρώτη αξιολόγηση, οι Altmann et al. αναλύουν την απόδοση του κύκλου ζωής των κινητήρων ντίζελ, που τροφοδοτούνται με βαρύ μαζούτ, καθώς και κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιούν καύσιμα ντίζελ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο ή LNG και χαμηλής θερμοκρασίας PEMFC με υδρογόνο από διάφορες πηγές. Οι εκπομπές επικίνδυνων ρύπων βρέθηκαν πολύ χαμηλότερες για τα συστήματα κυψελών καυσίμου. Παρόλο που εξετάζονται διαφορετικές επιλογές καυσίμου για το εξεταζόμενο σύστημα, διάφορες πηγές υδρογόνου αναλύονται για το σύστημα PEMFC που δείχνει ότι οι μειωμένες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου επιτυγχάνονται μόνο εάν το υδρογόνο παράγεται από ανανεώσιμη πηγή.

Στη δεύτερη μελέτη των Strazza et al. ένα παραδοσιακό σύνολο γεννήτριας-ντίζελ συγκρίνεται με ένα ναυτιλιακό σύστημα SOFC. Αντί για συχνή αντικατάσταση της στοίβας, συντήρηση μετά από κάθε 6000 ώρες λειτουργίας θεωρείται επαρκής. Παρόμοια με την προηγούμενη μελέτη των Altmann et al., αναλύονται διάφορες επιλογές καυσίμου για το σύστημα SOFC, ενώ για τον κινητήρα εσωτερικής καύσης θεωρείται μόνο το πετρέλαιο ντίζελ. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της λειτουργίας και την κατασκευή του SOFC είναι χαμηλές σε σύγκριση με την εξόρυξη καυσίμου και τη φάση διύλισης.

Οι Alkaner et al. συγκρίνουν μια συμβατική γεννήτρια ντίζελ με σύστημα MCFC τροφοδοτούμενο με ντίζελ. Καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι ο καθαρός περιβαλλοντικός αντίκτυπος του συστήματος MCFC είναι χαμηλότερος, κυρίως λόγω των μειωμένων εκπομπών κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής του. Ωστόσο, η φάση κατασκευής του

MCFC είναι υπεύθυνη για μια σημαντικά υψηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο από εκείνο της γεννήτριας ντίζελ. Αυτό είναι εν μέρει λόγω της απαραίτητης αντικατάστασης της στοιβας κάθε 5 χρόνια. Οι απαιτήσεις συντήρησης για τη γεννήτρια πετρελαίου παραμελούνται στη μελέτη αυτή.

Οι γεννήτριες κυψελών καυσίμου μπορούν να προσφέρουν μια εναλλακτική επιλογή γνωστή ως cold-ironing ή πιο απλά σύνδεση ξηράς, όπου τα πλοία συνδέονται με χερσαίο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κατά την παραμονή στον προβλήτα. Οι Pratt et al. ανέλυσαν ένα δοκιμαστικό σύστημα PEMFC που τροφοδοτείται με υδρογόνο τοποθετημένο σε φορτηγίδα για σκοπούς cold-ironing, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να είναι τεχνικά και εμπορικά εφικτό.

Οι γενικές πτυχές των αξιολογήσεων κύκλου ζωής των συστημάτων κυψελών καυσίμου συζητούνται από τον Rehnt. Παρουσιάζει μια λεπτομερή ανάλυση συστημάτων κυψελών καυσίμου χαμηλών και υψηλών θερμοκρασιών, για κινητές εφαρμογές επίσης ως στατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και επισημαίνονται μερικές σημαντικές αβεβαιότητες. Για παράδειγμα οι μέθοδοι παραγωγής κυψελών καυσίμου ποικίλλουν και είναι ακόμη πιθανό να αλλάξουν και η πιθανότητα ανακύκλωσης είναι συχνά άγνωστη. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι τα συστήματα κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας έχουν σαφή περιβαλλοντικά οφέλη σε σχέση με συμβατικές γεννήτριες κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου ζωής, λόγω εξοικονόμησης καυσίμων και μείωσης των εκπομπών κατά τη διάρκεια της λειτουργικής τους ζωής. Οι κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας έχουν αυτή τη δυνατότητα εάν είναι διαθέσιμο ανανεώσιμο υδρογόνο, για παράδειγμα παραγόμενο μέσω ηλεκτρόλυσης.

6.7. Ασφάλεια και Διαθεσιμότητα

Όπως κάθε μονάδα παραγωγής ενέργειας για ναυτιλιακές εφαρμογές, τα συστήματα κυψελών καυσίμου θα πρέπει να συμμορφώνονται με τα πρότυπα ταξινόμησης (classification standards). Αυτοί οι κανονισμοί συνήθως διαφέρουν από αυτούς για χερσαία συστήματα και εξασφαλίζουν ότι ένα σκάφος μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια και αξιοπιστία. Μεμονωμένες αστοχίες θα πρέπει να αποφεύγονται, δεδομένου ότι η πλήρης απώλεια ενέργειας που οφείλεται σε μία έκτακτη διακοπή δεν είναι επιθυμητή. Αναμένεται ότι ένας σχεδιασμός συστήματος κυψελών καυσίμου με εναλλαξιμότητα, εξοπλισμένο με επαρκή εξαερισμό, κατάσβεση πυρκαγιάς, συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου, θα πληροί όλες τις απαιτήσεις ταξινόμησης.

Τα συστήματα κυψελών καυσίμου έχουν λίγα μηχανικά μέρη και τείνουν να υποβαθμίζονται παρά να αποτυγχάνουν, πράγμα που οδηγεί σε υψηλή διαθεσιμότητα. Αυτό ενισχύεται περαιτέρω από την αρθρωτότητα των συστημάτων κυψελών καυσίμου, που επιτρέπει καθαρή, σιωπηρή και αξιόπιστη καταναεμημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δίπλα σε μεγάλους καταναλωτές. Αυτό αυξάνει την εφεδρική του ηλεκτρικού δικτύου και είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους ορισμένες εταιρείες έχουν, αν και ακόμη μέτρια, εμπορική επιτυχία εφαρμόζοντας συστήματα κυψελών καυσίμου σε κέντρα δεδομένων και εφεδρική παραγωγή ενέργειας για συστήματα τηλεπικοινωνιών.

Δίπλα στο ίδιο το σύστημα κυψέλης καυσίμου, οι κανόνες ταξινόμησης στα ναυτιλιακά καύσιμα έχουν ιδιαίτερη σημασία. Καύσιμα που είναι είτε επιβλαβή, επικίνδυνα

ή έχουν σημεία ανάφλεξης κάτω των 60° C, θα χρειαστούν ειδικά προληπτικά μέτρα πριν επιτραπεί η χρήση τους επί του σκάφους. Ορισμένα καύσιμα, όπως η αμμωνία και το MeOH, είναι τοξικά για τον άνθρωπο και τα ζώα, ενώ άλλες εναλλακτικές λύσεις, όπως το υδρογόνο και το DME, έχουν πλεονέκτημα ότι είναι μη τοξικά, μη μεταλλαξιογόνα και μη καρκινογόνα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι συμβατικά καύσιμα ντίζελ είναι επίσης τοξικά.

Τα πτητικά καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης, όπως το υδρογόνο και το NG, επιβάλλουν τον κίνδυνο έκρηξης σε κλειστούς χώρους. Αυτά τα καύσιμα θα πρέπει να συμμορφώνονται με την αρχή των δύο φραγμών για την παροχή αερίου, η οποία είτε επιτυγχάνεται με αγωγούς διπλού τοιχώματος, αεραγωγούς ή αεροστεγανών περιβλημάτων. Αυτό μπορεί να είναι απαραίτητο και για τις σωληνώσεις εξόδου, καθώς μπορεί να περιέχουν ακόμη ίχνη υδρογόνου και CO. Τα ζητήματα αυτά αντιμετωπίζονται με τον πρόσφατα εγκριθέντα Διεθνή Κώδικα Ασφάλειας για Πλοία που χρησιμοποιούν Αέρια ή άλλα καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης (IGF CODE), αν και ο κώδικας αυτός αρχικά επικεντρώνεται στο LNG και η εφαρμογή του να περιορίζεται στα σκάφη που υπάγονται στη Διεθνή Σύμβαση για την Ασφάλεια της Ανθρώπινης Ζωής στη Θάλασσα (SOLAS).

Υπάρχει κάποια επίγνωση αυτών των ζητημάτων από τους σχεδιαστές των κυψελών καυσίμου και τους νηογνώμονες, που αντικατοπτρίζεται σε δύο δημοσιεύσεις. Συγκεκριμένα, η δημοσίευση των Vogler et al. ασχολείται με διάφορα ζητήματα σχετικά με την ασφάλεια του αερίου, όπως ο εξαερισμός, η προστασία από εκρήξεις και αποθήκευση υπό υψηλή πίεση. Οι Ludvigsen et al. εξετάζουν σύντομα δύο διαφορετικές σημειώσεις ταξινόμησης για τα ναυτιλιακά συστήματα κυψελών καυσίμου, FC-SAFETY και FC-POWER, τα οποία αναπτύσσονται από την DNV. Ωστόσο, τα ισχύοντα πρότυπα από τους οργανισμούς ταξινόμησης βασίζονται σε περιορισμένη εμπειρία με ένα μικρό αριθμό συστημάτων. Η επικοινωνία μεταξύ των σχεδιαστών συστημάτων και των νηογνομόνων θα πρέπει να οδηγήσει σε ασφαλείς, αλλά όχι υπερβολικά αυστηρούς, κανόνες για τα μελλοντικές εφαρμογές κυψελών καυσίμου. Επιπλέον, η δυνατότητα βελτίωσης της εφεδρικότητας και της αξιοπιστίας του ηλεκτρικού δικτύου πρέπει να μελετηθεί περαιτέρω.

6.8. Οικονομικά Δεδομένα

Η ανάπτυξη ναυτιλιακών συστημάτων κυψελών καυσίμου ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970, και ακολούθησαν τα πρώτα έργα επίδειξης της τεχνολογίας τις επόμενες δύο δεκαετίες. Ακόμα, τα συστήματα κυψελών καυσίμου δεν έχουν κανένα σημαντικό μερίδιο αγοράς, ενώ τα υψηλά κόστη αναφέρονται συχνά ως ο κύριος λόγος. Τα PAFC, SOFC και MCFC έχουν σήμερα τη μέγιστη προηγμένη κατάσταση ανάπτυξης, και μέχρι στιγμής αρκετά MW έχουν εγκατασταθεί για σταθερή ισχύ. Ο HT-PEMFC, αναμένεται να είναι πιο αποδοτικός και λιγότερο δαπανηρός από τον PAFC, αν και οι δύο τύποι κυψελών καυσίμου εξακολουθούν να αγωνίζονται με μία περιορισμένη διάρκεια ζωής.

Τα συστήματα κυψελών καυσίμου στην τρέχουσα κατάσταση ανάπτυξης τους είναι σημαντικά ακριβότερα από τις συμβατικές γεννήτριες, αλλά πολλές εταιρείες βλέπουν τη δυνατότητα να μειωθεί το κόστος της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου. Ειδικά τα LT-PEMFCs για τον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας έχουν δει σημαντικές περικοπές των τιμών τα τελευταία χρόνια. Ένα επίπεδο τιμών των 50 \$/kW θα τους έθετε σε άμεσο ανταγωνισμό με τους κινητήρες ντίζελ, αν και ζητήματα ορίου ζωής και το υψηλό κόστος

του BOP, ιδίως εάν χρησιμοποιούνται καύσιμα υδρογονανθράκων, εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικά ζητήματα. Βέβαια οι τρέχουσες τιμές ορισμένων εταιρειών αυτοκινήτων με κυψέλες καυσίμου θεωρούνται μη ρεαλιστικές, και ως μία προσπάθεια να γίνουν προσιτά και ελκυστικά στο ευρύ κοινό.

Αν και το αναμενόμενο επίπεδο τιμών των συστημάτων κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας είναι υψηλότερο, η μειωμένη κατανάλωση καυσίμων υδρογονανθράκων μπορεί να προσφέρει αξιοπρεπή απόδοση των επενδύσεων για τα συστήματα αυτά. Η ανάγκη για ακριβή πλατίνα παραλείπεται σε κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, αλλά τα ενεργά στρώματά τους βασίζονται σε οξειδία σπανίων γαιών. Αν και αυτά είναι πολύ φθηνότερα από την πλατίνα, μια ουσιαστικά μεγαλύτερη ποσότητα απαιτείται. Επιπλέον, η υψηλή λειτουργική θερμοκρασία περιορίζει τις επιλογές των υλικών για άλλα στοιχεία της στοίβας, η ειδική ισχύς είναι συνήθως χαμηλότερη και το κόστος κατασκευής είναι σχετικά υψηλό.

Επίσης ο περιορισμένος χρόνος ζωής της στοίβας έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα. Ο χρόνος ζωής της στοίβας πριν κάποια χρόνια ήταν 2-3 χρόνια. Σήμερα έχουν γίνει προσπάθειες από μερικούς κατασκευαστές να τοποθετήσουν τη διάρκεια ζωής στην περιοχή των 5-7 ετών, ενώ για το μέλλον, σε σταθμούς πλοίων επιδιώκεται να επιτευχθεί διάρκεια ζωής 10 έως και 20 χρόνια.

Τα συστήματα κυψελών καυσίμου παρέχουν ήδη μία οικονομικά ελκυστική επιλογή σε συγκεκριμένες επιχειρηματικές περιπτώσεις, όπως διαχείριση υλικών-εμπορευμάτων και εφεδρική ισχύς, για να είναι οικονομικά ελκυστικό για ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών θα πρέπει να επιτευχθεί ένας σημαντικός όγκος της αγοράς. Αυτό ίσως σήμαινε ότι η αγορά κυψελών καυσίμου θα εξαρτηθεί από τα προγράμματα κρατικής στήριξης για αρκετές δεκαετίες, πράγμα που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η σταδιακή εκμάθηση και έρευνα δεν πρέπει να είναι η μόνη οδός για τη μείωση του κόστους.

7. ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

7.1. Έργα Έρευνας Ναυτιλιακών Κυψελών Καυσίμου

Αρκετά ερευνητικά έργα και πρότζεκτ έχουν πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, που κυμαίνονται από ναυτικά προγράμματα έως βιομηχανικά έργα. Τα πιο αξιοσημείωτα έργα παρουσιάζονται συνοπτικά σε αυτό το κεφάλαιο.

7.1.1. Χρήση συστημάτων κυψελών καυσίμου σε υποβρύχια

Οι ένοπλες δυνάμεις παγκοσμίως αναπτύσσουν και επενδύουν σε νέες τεχνολογίες και καινοτομίες. Το επίπεδο χρηματοδότησης που διατίθεται για στρατιωτικά έργα μπορεί να λειτουργήσουν ως καταλύτης για την ανάπτυξη της τεχνολογίας, τα οφέλη των οποίων συνήθως επεκτείνονται και σε εμπορικό επίπεδο με την πάροδο του χρόνου.

Δεν προκαλεί, λοιπόν, έκπληξη ότι οι κυψέλες καυσίμου έχουν ενδιαφέρον για το στρατό εδώ και πολλά χρόνια. Τα στρατιωτικά υποβρύχια χαρακτηρίζονται από πολύ αυστηρές απαιτήσεις. Απαιτούν μυστική-ανεκτόπιστη λειτουργία, μεγάλης διάρκειας υποβρύχιας επιχειρήσεις, χαμηλό επίπεδο θορύβου, και χαμηλές μαγνητικές υπογραφές. Οι

κυψέλες καυσίμου, εκτός από την προσφορά μακροχρόνιας και ελαφριάς ισχύος που είναι περιβαλλοντικά ανεβλαβής, προσφέρουν επίσης τα στρατηγικά πλεονεκτήματα της σχεδόν αθόρυβης λειτουργίας, χωρίς τοξικά παράγωγα και χαμηλής θερμικής υπογραφής (τουλάχιστον για συστήματα PEMFC και DMFC). Το αμερικανικό Υπουργείο Άμυνας (DOD) και το Γερμανικό Bundeswehr ήταν ιδιαίτερα αξιοσημείωτοι υποστηρικτές των κυψελών καυσίμου για στρατιωτική και εξ αποστάσεως ισχύ τα τελευταία χρόνια.

Τα συστήματα ηλεκτρολυτών από εταιρείες όπως η Giner και η Proton OnSite χρησιμοποιούνται συνήθως σε υποβρύχια για την παραγωγή οξυγόνου για τη διατήρηση του αναπνεύσιμου αέρα. Μια εξέλιξη αυτής της εφαρμογής είναι η χρήση συστημάτων πρόωσης κυψελών καυσίμου.

Τα συμβατικά υποβρύχια είναι κλασικά εξοπλισμένα με σύστημα πρόωσης γεννήτριας με κινητήρα ντίζελ. Η ενέργεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες για υποβρύχιες επιχειρήσεις. Σε αυτήν την περίπτωση, η ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας περιορίζει έντονα το εύρος των υποβρυχίων επιχειρήσεων. Γι' αυτό οι κυψέλες καυσίμου είναι ένας ελκυστικός υποψήφιος για την εκπλήρωση των προδιαγραφών που σχετίζονται με την πηγή ενέργειας του υποβρυχίου αναερόβιας πρόωσης -Air Independent Propulsion (AIP). Χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση, αθόρυβη λειτουργία και αρθρωτή και ευέλικτη σχεδίαση.

Τα οφέλη του συστήματος πρόωσης κυψελών καυσίμου ενισχύθηκαν πρόσφατα σχετικά, όταν το γερμανικής σχεδίασης υποβρύχιο U32 κλάσης 212, έθεσε ένα νέο ρεκόρ για τα μη πυρηνικά υποβρύχια με το να περάσει δεκαοκτώ (18) ημέρες σε μετακίνηση εν καταδύσει χωρίς εκτέλεση διαδικασίας αναπνευστήρα (διαδικασία λειτουργίας γεννητριών για φόρτιση των μπαταριών σε κατάδυση). Παρόλο που η εφαρμογή αυτή θα παραμείνει πάντα εξειδικευμένη - η αγορά υποβρυχίων δεν είναι πιθανό να αυξηθεί σε όγκο - είναι μια απόδειξη για τα χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου ότι αποτελούν μια συναρπαστική πρόταση σε πολλές εφαρμογές, τόσο στρατιωτικές όσο και εμπορικές.



Στη δεκαετία του '70, διεξήχθησαν οι πρώτες μελέτες σχετικά με τα συστήματα πρόωσης των υποβρυχίων χρησιμοποιώντας κυψέλες καυσίμου. Ωστόσο, το PEMFC απεδείχθη ότι δεν ήταν ώριμη τεχνολογία. Από τη δεκαετία του '80 το γερμανικό ναυτικό σε συνεργασία με τη Siemens Corp. έχει αναπτύξει έρευνα και εκτελέσει δοκιμές στο σύστημα FC για υποβρύχιες εφαρμογές. Το 1984, το σύστημα AFC AIP 100 kW (σύστημα FC που κατασκευάστηκε από τη Siemens) που δοκιμάστηκε αρχικά σε εργαστήριο πειραμάτων ξηράς τοποθετήθηκε σε γερμανικό υποβρύχιο **Class 205 U1** για πρακτικές δοκιμές πλοήγησης. Αυτές οι δοκιμές δείχνουν τη σκοπιμότητα της κυψέλης καυσίμου για υποβρύχιες εφαρμογές.



Τον παππού των υποβρυχίων AIP σε υπηρεσία αποτελεί η κλάση υποβρυχίων της Σουηδίας **Gotland**, κατασκευής το 1995. Ήταν το πρώτο υποβρύχιο εξοπλισμένο με προηγμένο σύστημα πρόωσης με μηχανές μετατροπής θερμότητας Stirling. Με μόλις 1.600 τόνους βυθισμένου εκτοπίσματος, τα τρία σκάφη Gotland είναι μικρότερα από πολλά ντίζελ-ηλεκτρικά υποβρύχια, αλλά η Σουηδία έχει ελάχιστη ανάγκη για μεγάλα υποβρύχια στα περιορισμένα όρια του κόλπου της Bothnia και της Βαλτικής Θάλασσας.

Το Υπουργείο Εθνικής Άμυνας του Καναδά (DND) ξεκίνησε επίσης ένα έργο για το AIP για υποβρύχιο με βάση το PEMFC που σχεδιάστηκε από την Ballard Corp. στη δεκαετία του 80.

Ένα άλλο έργο, το **Project 677 Lada** ξεκίνησε από το 1993 στη Ρωσία. Στόχος αυτού του έργου ήταν ο σχεδιασμός υποβρυχίων με βάση το PEMFC AIP. Το γραφείο Rubin κατασκεύασε το σύστημα FC του υποβρυχίου.



Έτερος τύπος υποβρυχίου με αναερόβια πρόωση είναι τα τύπου **Scorpene**, σχεδίασης από τα Γαλλικά Ναυπηγεία (DCN) και την Ισπανική εταιρεία Navantia, ενώ πλέον κατασκευάζονται από τη Γαλλική εταιρεία Naval Group. Τα υποβρύχια αυτά είναι συμβατικά και εξοπλίζονται επιπλέον με σύστημα αναερόβιας πρόωσης, όπου στην ουσία πρόκειται για μια τροποποιημένη έκδοση του πυρηνικού προωστικού συστήματος με θερμότητα που παράγεται από αιθανόλη και οξυγόνο. Η καύση της αιθανόλης και του αποθηκευμένου οξυγόνου, σε πίεση 60 atm (6,1 MPa), παράγει ατμό που τροφοδοτεί μια συμβατική μονάδα παραγωγής ενέργειας τουρμπίνας. Βρίσκεται σε εξέλιξη η ανάπτυξη δεύτερης γενιάς συστήματος κυψελών καυσίμου με υδρογόνο. Τέλος, η Ινδία, μία από τις χώρες που διαθέτει αυτόν τον τύπο υποβρυχίου, κατασκεύασε 4 σε δικά της ναυπηγεία και έχει εφοδιάσει τα 2 με δικό της σύστημα κυψελών καυσίμου.

Παράλληλα, κατά την περίοδο αυτή, το Ισπανικό Ναυτικό κατασκευάζει ένα νέο τύπο υποβρυχίου, από το εργοστάσιο Navantia. Αυτό το υποβρύχιο χρησιμοποιεί κυψέλη καυσίμου PEM 300kW με αναμορφωτή αιθανόλης που παρέχεται από την UTC Power Corp.



Τέλος, βρίσκεται σε εξέλιξη το ινδικό πρόγραμμα DRDO για την κατασκευή ενός συστήματος (AIP) με βάση τις κυψέλες καυσίμου για τα ινδικά υποβρύχια. Το πρότζεκτ αυτό διέσχισε πολλά ορόσημα ώστε να επιτευχθεί τεχνολογική ωριμότητα, ενώ μεγάλη ώθηση έδωσε η πρόσφατη ολοκλήρωση και λειτουργία ενός χερσαίου πρωτοτύπου του συστήματος αυτού.

7.1.2. Συνεργασία Siemens με την TKMS

7.1.2.1. Εξέλιξη του συστήματος

Με την ανάπτυξη του PEMFC, το υποβρύχιο κλάσης 212 εξοπλισμένο με PEMFC AIP άρχισε να παράγεται το 1998 για το γερμανικό ναυτικό. Η συνολική ισχύς του συστήματος κυψελών καυσίμου είναι περίπου 300kW. Αποτελείται από εννέα μονάδες κυψελών καυσίμου 34kW "SiNavy" PEM (BZM34) από τη Siemens Corp. Αυτές οι μονάδες συνδέονται απευθείας με το κεντρικό σύστημα τροφοδοσίας DC χωρίς μετατροπέα DC/DC.



Το 2005, ξεκίνησε το υποβρύχιο κλάσης 214. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιεί δύο μονάδες κυψελών καυσίμου PEM των 120 kW "SiNavy" (BZM 120) της Siemens Corp. Είναι συνδεδεμένο με το κύριο δίκτυο μεταφοράς του πλοίου με μετατροπέα DC/DC. Η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί σε θερμοκρασία μεταξύ 70-80 °C και επιτυγχάνει υψηλή απόδοση (56% με πλήρες φορτίο). Το υποβρύχιο κλάσης 214 με κυψέλη καυσίμου AIP και μπαταρίες δείχνει ότι αυτό το σύστημα έχει υψηλότερες δυνατότητες από άποψη μέγιστης ταχύτητας, διάρκειας παραμονής σε κατάδυση, και διανυθείσας απόστασης από ένα σύστημα με μόνο μπαταρίες. Η πρόσφατη έκδοση του υποβρυχίου κλάσης 209/1400 μπορεί να εξοπλιστεί με PEMFC που του δίνει τη δυνατότητα να λειτουργεί σε μια υποβρύχια απόσταση των 12.000nm, διάρκειας 50 ημερών στους 10 κόμβους.

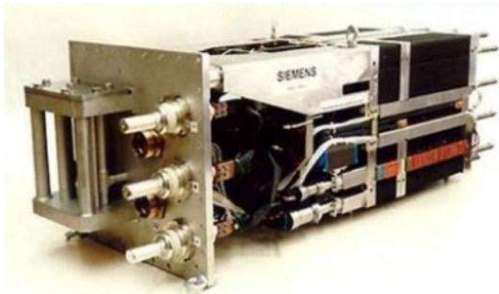
Τα γερμανικά ναυπηγεία προσέφεραν και μεγαλύτερες παραλλαγές των υποβρυχίων 212/214 στους τύπους 216 και 218, αμφότερα με σύστημα AIP FUEL CELL. Ο τύπος 216 προοριζόταν για πώληση στο βασιλικό αυστραλιανό ναυτικό, αλλά επιλέχθηκε τελικά το

γαλλικό Barracuda. Δύο Y/B 218SSG βρίσκονται υπό κατασκευή για τη Σιγκαπούρη και θα ολοκληρωθούν το 2020.

Τέλος, τα γερμανικά ναυπηγεία έχουν κατασκευάσει μια παραλλαγή των υποβρυχίων



τύπου 212, γνωστή ως κλάση Dolphin 2, για το Ισραηλινό Ναυτικό τα οποία φέρουν σύστημα FUEL CELL. Όπως είναι αναμενόμενο για αυτού του τύπου τα υποβρύχια δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία. Ωστόσο, βασικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι είναι τα μοναδικά υποβρύχια κατασκευασμένα στα συγκεκριμένα Ναυπηγεία, τα οποία φέρουν πυρηνικές κεφαλές. Στο διπλανό σχήμα φαίνονται οι δύο τύποι FCM 34 και FCM 120 της SIEMENS. Αξίζει να σημειωθεί ότι μέχρι και σήμερα χρησιμοποιούνται οι ίδιοι τύποι module.



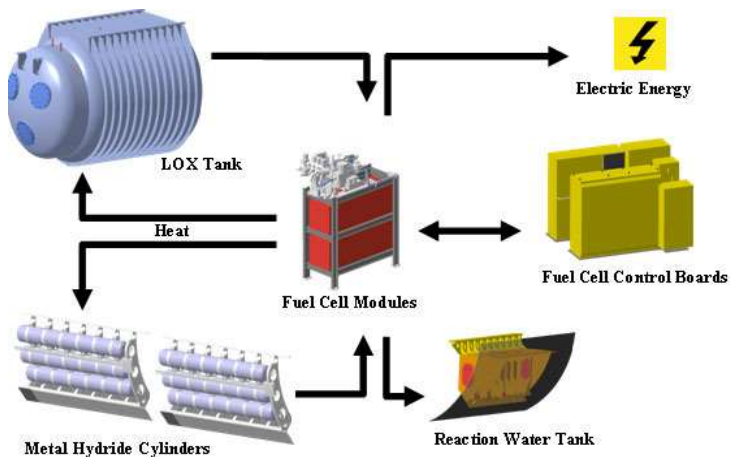
7.1.2.2. Εφοδιαστικά καύσιμα στα PEMFC των υποβρυχίων TKMS

Στα υποβρύχια που χρησιμοποιούν PEMFC, αντιδραστήρια καύσιμα της κυψέλης καυσίμου είναι το υγρό οξυγόνο, καθαρότητας 2.5 (99,5% ή ιατρικό) και το αέριο υδρογόνο καθαρότητας 5.0 (99,999%). Το μόνο αποτέλεσμα της διαδικασίας εκτός από την ηλεκτρική ενέργεια, είναι η αποβαλλόμενη θερμότητα, το νερό και μικρές ποσότητες υπολειμματικών αερίων που δίδονται στην ατμόσφαιρα του υποβρυχίου στο νερό αντιδράσεως. Αυτό το νερό αντιδράσεως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικούς σκοπούς, όπως η εξισορρόπηση βάρους για να αποφευχθούν οι ανάγκες που σχετίζονται με τη διαδικασία της ζύγισης του υποβρυχίου.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή των υποβρυχίων η μεγιστοποίηση της ογκομετρικής και βαρυμετρικής πυκνότητας ενέργειας του αποθηκευμένου καυσίμου είναι σημαντική πρόκληση. Βασικές απαιτήσεις ενός συστήματος αποθήκευσης είναι ο χαμηλός συνολικός όγκος και βάρος του, καθώς η χωρητικότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου και οξυγόνου περιορίζει τον χρόνο υποβρύχιας λειτουργίας και μέγιστης διανυθείσας απόστασης ενός υποβρυχίου με FC.

Στο κάτωθι σχεδιάγραμμα φαίνεται ο σχεδιασμός του συνολικού συστήματος, από την αποθήκευση των αερίων, στο σύστημα κυψελών καυσίμου με τις δεξαμενές ύδατος αντιδράσεως και τη διανομή ενέργειας.

Το οξυγόνο αποθηκεύεται κλασικά σε υγρή μορφή σε δεξαμενές με διπλά τοιχώματα, μονωμένες σε κενό και υαλοσφαιρίδια μεταξύ των δύο τοιχωμάτων. Το



υδρογόνο αποθηκεύεται σε φιάλες υδριδίου μετάλλων (μαγνησίου). Για να αποδόσει το υδρογόνο, το υδρίδιο θα πρέπει να ζεσταθεί.

Εναλλακτικές μορφές αποθήκευσης όπως είδαμε ανωτέρω δεν είναι κατάλληλες για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Το υγρό υδρογόνο φαίνεται να είναι ενδιαφέρον από πλευράς

χωρητικότητας αποθήκευσης, απαιτεί ωστόσο μια μονάδα ψύξης για τη διατήρηση μιας κρυογονικής κατάστασης, που προσθέτει επιπλέον κόστος και όγκο. Τέλος, λόγω του κινδύνου έκρηξης, η φυσική αποθήκευση υδρογόνου δεν πληροί τις απαιτήσεις ασφάλειας για το υποβρύχιο.

Η λύση με τις φιάλες μεταλλικών υδριδίων επιτρέπει μια καλή ασφάλεια και συγκριτικά μεγαλύτερη πυκνότητα όγκου. Το κυριότερο μειονέκτημα του συστήματος αποθήκευσης είναι το χαμηλό ποσοστό βάρους του υδρογόνου. Αυτό το ποσοστό είναι περίπου 2% για κράμα τιτανίου-σιδήρου και έως 7,7% για φιάλη υδριδίου του μαγνησίου. Ωστόσο, η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας του τελευταίου περιορίζει την εφαρμογή του σε υποβρύχια.

Λόγω αυτών των μειονεκτημάτων έχουν μελετηθεί κυψέλες καυσίμου PEM με αναμορφωτή. Η HDW ξεκίνησε ένα πρόγραμμα για την ανάπτυξη ενός αναμορφωτή μεθανόλης ατμού με υψηλή αναλογία H/C, υψηλή απόδοση της διαδικασίας αναμόρφωσης και χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας 250 °C. Για μεγαλύτερα υποβρύχια με ακόμη μεγαλύτερης διάρκειας απαιτήσεις αποστολής, η παραγωγή υδρογόνου επί του πλοίου από MeOH έχει επιδειχθεί.

Επίσης έχουν μελετηθεί συστήματα DMFC για υποβρύχιο AIP. Το σύστημα DMFC μπορεί να χρησιμοποιήσει μεθανόλη ως καύσιμο και να λειτουργεί σε θερμοκρασία 50 °C-120° C, η οποία αντιπροσωπεύει ένα πλεονέκτημα έναντι του συστήματος PEMFC με αναμόρφωση μεθανόλης. Θεωρητική σύγκριση ενός AIP με βάση το PEMFC με αναμόρφωση μεθανόλης και ενός AIP βασισμένο σε DMFC παρουσιάστηκε σε μία μελέτη που δείχνει ότι η τελευταία επιτυγχάνει καλύτερη ικανότητα μείωσης του βάρους και του όγκου σε αρκετά παρόμοια απόδοση από ότι το προηγούμενο. Ωστόσο, τα τεχνικά εμπόδια του DMFC περιορίζουν τις θαλάσσιες εφαρμογές.

7.1.2.3. Αναλυτική περιγραφή του συστήματος PEMFC της Siemens

Εκτός από αυτά τα βασικά πλεονεκτήματα ενός συστήματος Fuel Cell, η κυψέλη καυσίμου με μια στερεή ιοντο-αγώγιμη πολυμερική μεμβράνη (πολυμερής μεμβράνη ηλεκτρολυτών - PEM) έχει περισσότερες θετικές ιδιότητες:

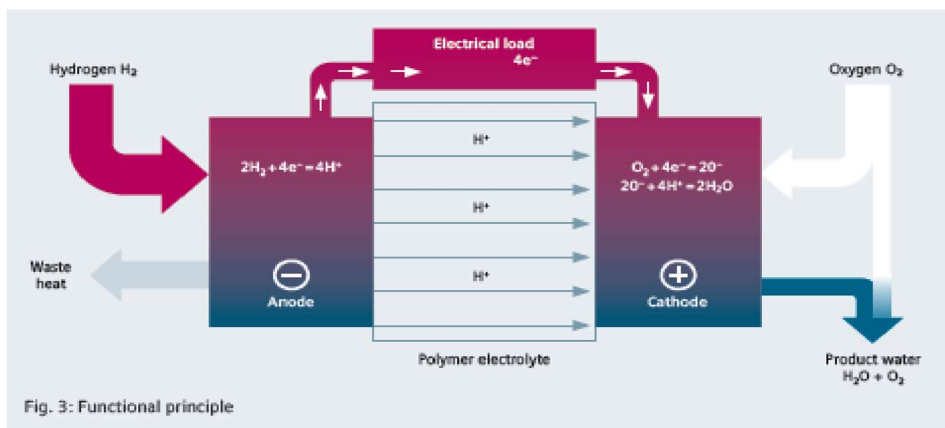
- Γρήγορη ενεργοποίηση, απενεργοποίηση,
- Χαμηλή τάση υποβάθμισης και μεγάλη διάρκεια ζωής,
- Ευνοϊκό φορτίο και συμπεριφορά θερμοκρασίας - κύκλου,

- Δυνατότητα λειτουργίας υπερφόρτωσης,
- Χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας (80° Celsius),
- Απουσία υγρού-διαβρωτικού ηλεκτρολύτη.

Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν την κυψέλη καυσίμου SINAVY PEM μια ιδανική μονάδα ισχύος. Η Siemens προσφέρει δύο τύπους κυψελών καυσίμου SINAVY PEM, το FCM 34 και το FCM 120.

7.1.2.3.1. Λειτουργία και σχεδιασμός

Μια απλοποιημένη αναπαράσταση της βασικής λειτουργίας και του σχεδιασμού των κυψελών καυσίμου SINAVY PEM απεικονίζεται στο κάτωθι σχήμα:



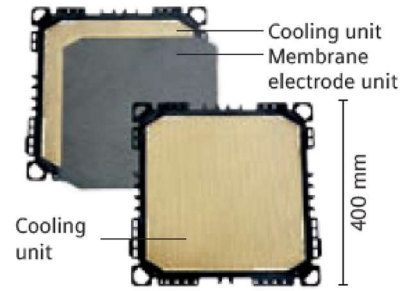
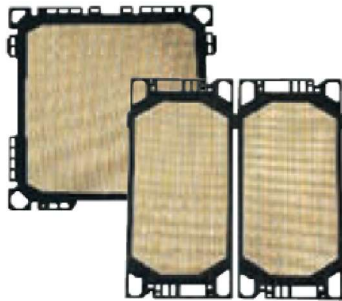
Το ηλεκτροχημικό στοιχείο στο οποίο η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια είναι η μονάδα μεμβράνης ηλεκτροδίων. Αποτελείται από τον πολυμερή ηλεκτρολύτη, τα ηλεκτρόδια διάχυσης αερίου με καταλύτη πλατίνας (λευκόχρυσου) και φύλλα άνθρακα σε κάθε πλευρά.

Μετά την αφαίρεση των ηλεκτρονίων από το υδρογόνο, ρέουν από την άνοδο μέσω του ηλεκτρικού φορτίου στην κάθοδο - τα προκύπτοντα πρωτόνια μεταναστεύουν από την άνοδο στην κάθοδο όπου συνδυάζονται με οξυγόνο (και τα ηλεκτρόνια) για να σχηματίσουν νερό.

Η θεωρητική τάση ενός στοιχείου καυσίμου H₂/O₂ είναι 1,48 V (αναφέρεται στην ανώτερη θερμοκή τιμή του υδρογόνου). Σε συνθήκες μηδενικού φορτίου, λίγο περισσότερο από ένα βολτ ανά κύτταρο είναι διαθέσιμο.

Οι μονάδες ψύξης ή οι διπολικές πλάκες, σε συνδυασμό με στρώματα διάχυσης άνθρακα, κατανέμουν ομοιόμορφα τα αντιδραστήρια σε ολόκληρη την περιοχή του κυττάρου, μεταφέρουν τα ηλεκτρόνια δια μέσου της στοίβας, αφαιρούν τη θερμότητα από τα ηλεκτρόδια και ξεχωρίζουν τα αέρια (media) μεταξύ τους.

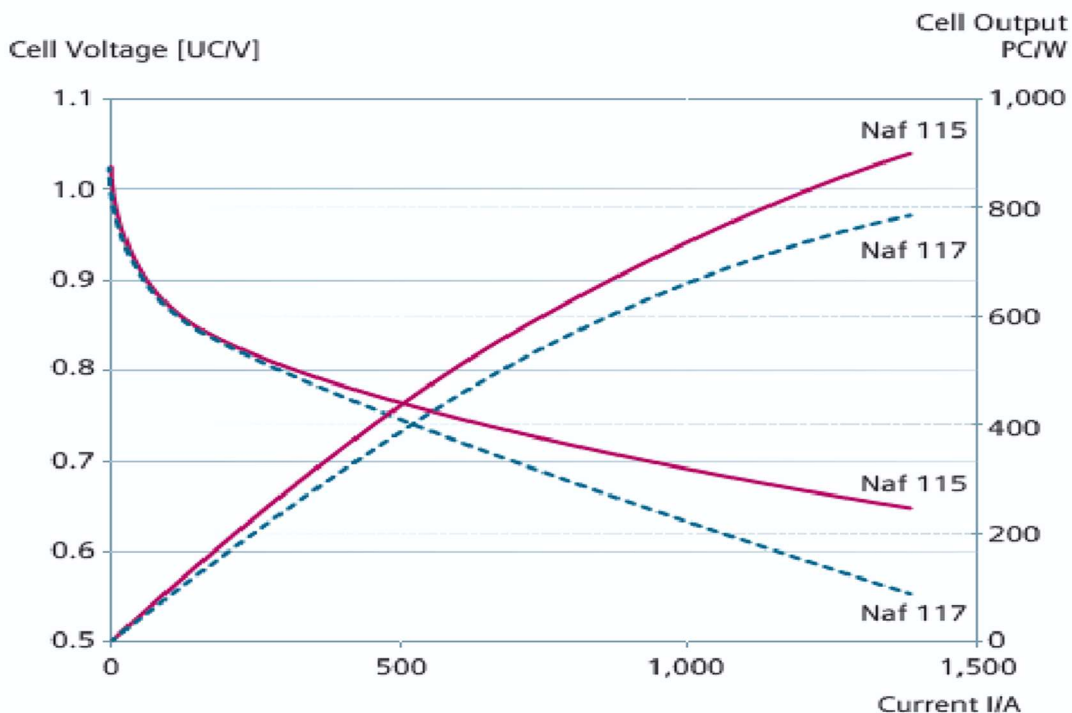
Η διπλανή εικόνα δείχνει τα δύο βασικά συστατικά ενός κυττάρου με εξωτερικές διαστάσεις 400 x 400 mm, όπως χρησιμοποιείται στη μονάδα FCM 34.



Βλέπουμε τη διπολική πλάκα των μονάδων FCM 34 και FCM 120. Δύο κύτταρα του FCM 120 παράγουν περίπου τη διπλάσια ισχύ του ενός κυττάρου τύπου FCM 34 με σχεδόν την ίδια ενεργή περιοχή.

Το θεωρητικά υψηλό αναπτυξιακό δυναμικό όσον αφορά στο υλικό της μεμβράνης φαίνεται στο κάτωθι σχήμα. Με βελτιωμένα υλικά, η πυκνότητα ισχύος μπορεί σχεδόν να διπλασιαστεί.

Η τάση μιας κυψέλης καυσίμου SINAVY PEM σε σχέση με το χρόνο λειτουργίας είναι σταθερή και τα ποσοστά υποβάθμισης είναι λιγότερα από 2 $\mu\text{V}/\text{ώρα}$ ανά κυψέλη για την μονάδα FCM 34. Σημαντικά χαμηλότερα τιμές κατά την λειτουργία ενός FCM 120.



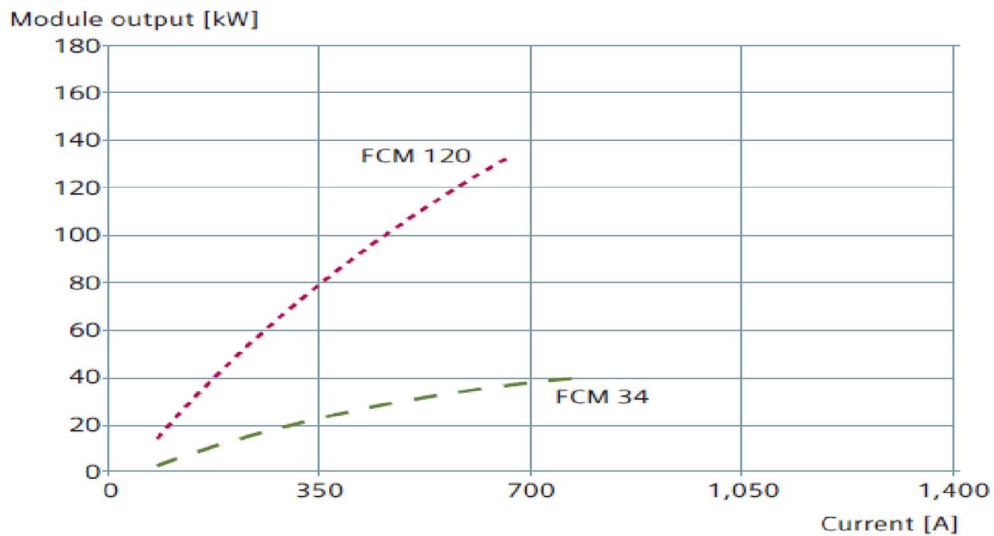
7.1.2.3.2. Μονάδες και σταθμός παραγωγής ενέργειας

Η Siemens έχει καταβάλει κάθε προσπάθεια για την ενσωμάτωση της στοίβας κυψελών καυσίμου PEM, των βαλβίδων, σωληνώσεων και αισθητήρων καθώς και των αντίστοιχων ηλεκτρονικών στοιχείων ελέγχου και των βοηθητικών συστημάτων σε ένα μόνο module κάνοντας την καλύτερη δυνατή χρήση των περιορισμένων χώρου στο σκάφος. Οι

βοηθητικές συσκευές περιλαμβάνουν τον εξοπλισμό για παροχή H₂, O₂ και N₂ για το νερό αντιδράσεως, για την απομάκρυνση της αποβαλλόμενης θερμότητας και των υπολειμματικών αερίων.

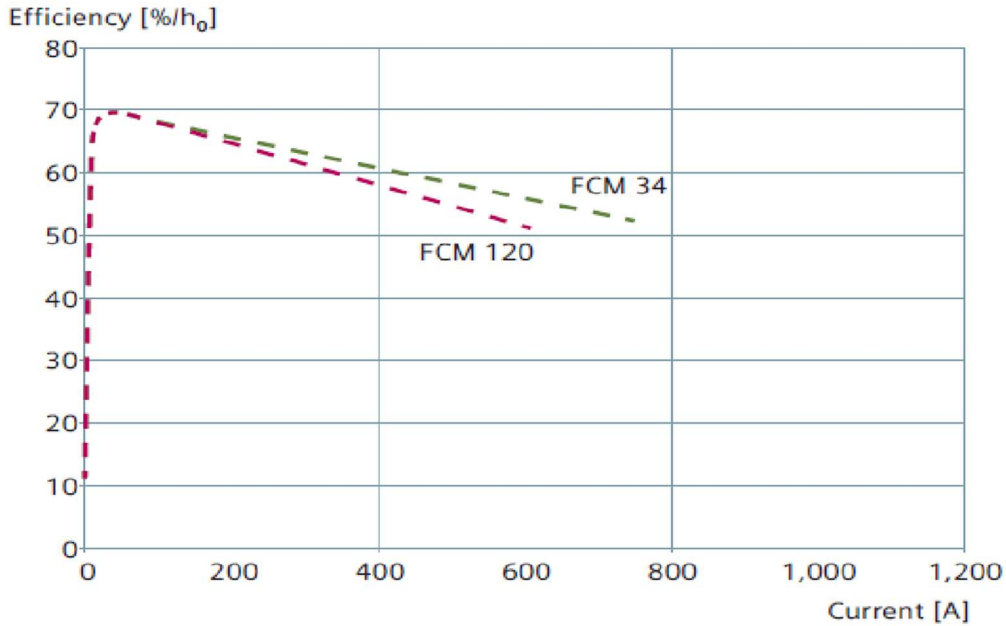
Το Module πληρώνεται με αδρανές αέριο N₂ στα 3.0 bar abs. για την αποτροπή της απελευθέρωσης του H₂ και/ ή του O₂ σε περίπτωση διαρροών. Έτσι, ο χειριστής μπορεί να χρησιμοποιήσει την κυψέλη καυσίμου PEM ως μαύρο κουτί χωρίς να χρειάζεται να ενδιαφέρεται για τις διαδικασίες μέσα στο module.

Η μονάδα κυψέλης καυσίμου PEM μπορεί να λειτουργήσει σε ρεύματα διάφορων στατικών και δυναμικών φορτίων. Ρεύματα κάτω των 650 A για FCM 34 ή κάτω από 560 A για μονάδες FCM 120 μπορούν να εφαρμοστούν σε συνεχή λειτουργία. Η ισχύς εξόδου / χαρακτηριστικά ρεύματος για τις μονάδες FCM 34 εμφανίζονται στο κάτωθι σχήμα:



Για ρεύματα πάνω από το ονομαστικό ρεύμα, ο χρόνος φόρτωσης είναι περιορισμένος λόγω ανεπαρκούς απομάκρυνσης θερμότητας στις τιμές αυτές. Μπορούν να εφαρμοστούν και φορτία μέχρι και το διπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος για λίγο χρονικό διάστημα.

Στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, η συνολική απόδοση είναι κατά προσέγγιση 59 τοις εκατό σε σχέση με τη τιμή χαμηλότερης θερμότητας του H₂ (LHV). Αυξάνει στο εύρος μερικού φορτίου, φθάνοντας μέγιστο περίπου 69 % με συντελεστή φορτίου περίπου 20 % του ονομαστικού ρεύματος (κατά προσέγγιση 100 A) όπως φαίνεται στο κάτωθι σχήμα:



Οι ιδιότητες των μονάδων FCM 34 και FCM 120 αναφέρονται στον κάτωθι πίνακα:

Technical data	FCM 34	FCM 120
Rated power	approx. 34 kW	approx. 120 kW
Voltage range	approx. 54 VDC	approx. 215 VDC
Efficiency at rated load	> 58%	> 53%
Efficiency at 20 % load	approx. 71%	approx. 68%
Operating temperature	70–75° C	approx. 70° C
H ₂ pressure	2.3 bar abs.	2.4 bar abs.
O ₂ pressure	2.6 bar abs.	2.7 bar abs.
Dimensions	H = 47 cm W = 47 cm L = 143 cm	H = 50 cm W = 53 cm L = 176 cm
Weight (without module electronics)	630 kg	930 kg

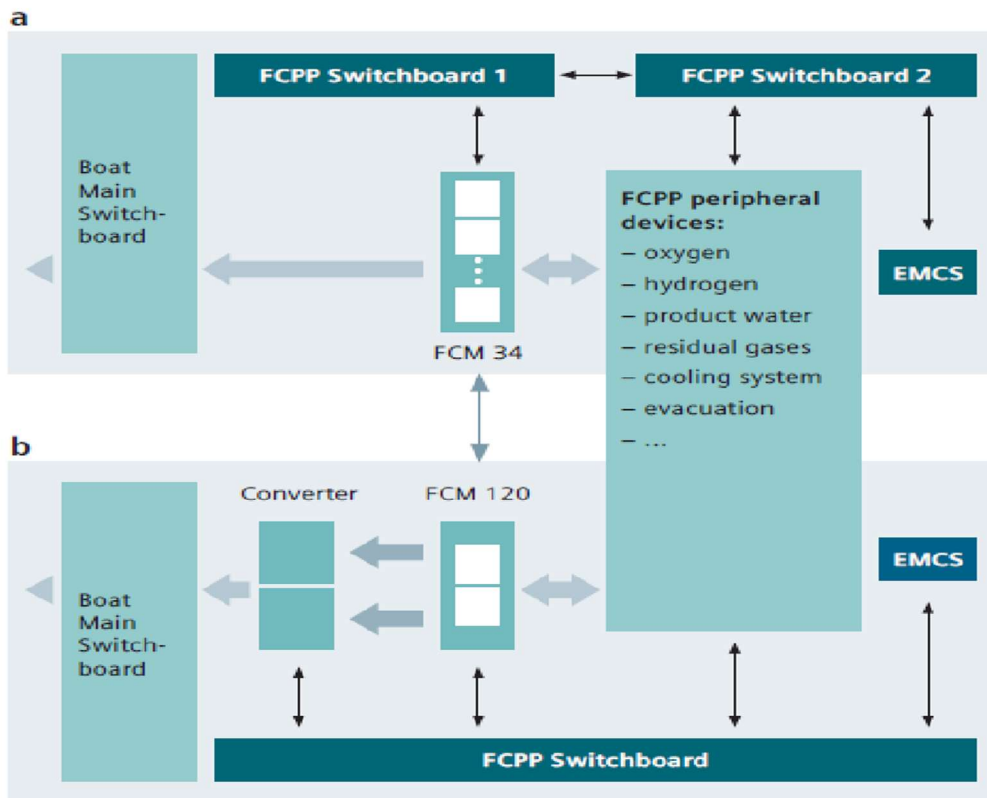
7.1.2.3.3. Μονάδα παραγωγής κυψελών καυσίμου PEM

Οι κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας για τις μονάδες κυψελών καυσίμου σε υποβρύχιες εφαρμογές παρέχονται από ένα σύστημα στο οποίο είναι συνδεδεμένες οι μονάδες κυψελών καυσίμου (module) και περιλαμβάνει :

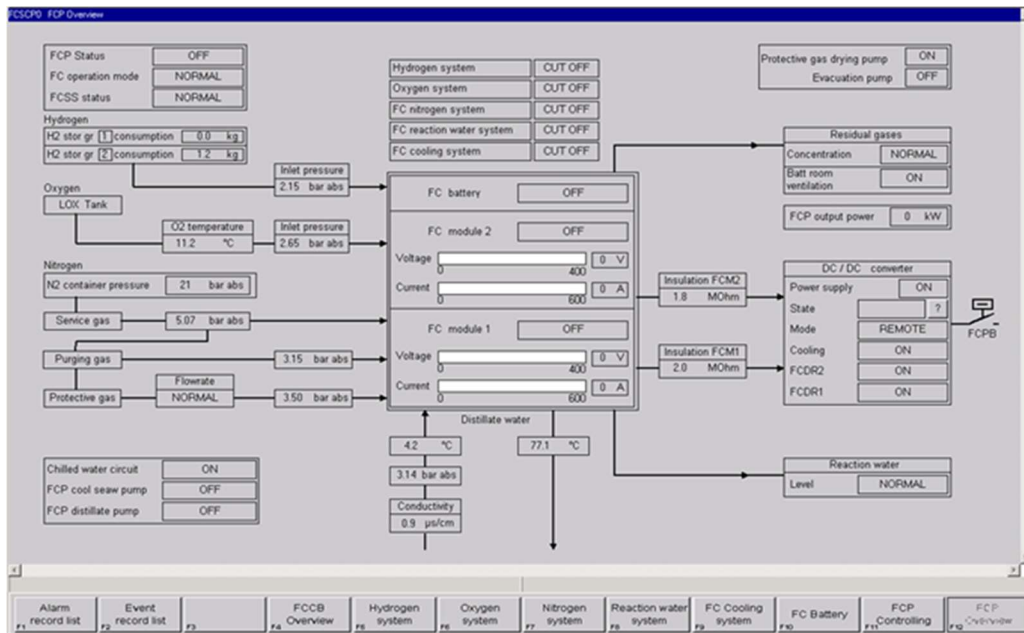
- την παροχή υδρογόνου και οξυγόνου,
- μονάδες για :
 - ψύξη
 - υπολειμματικό αέριο
 - νερό αντίδρασης
- βοηθητικά συστήματα για λειτουργίες όπως
 - ξήρανση με αδρανές αέριο

- εκχύλιση για το ψυκτικό υγρό (απαεριοποίηση)
- παροχή αζώτου
- σύστημα εκκένωσης
- σύστημα πρόωσης πλοίου για να το προμηθεύσει με την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Ο έλεγχος και οπτικοποίηση από τον χειριστή του συστήματος κυψελών καυσίμου διευκολύνεται από την ολοκληρωμένη πλατφόρμα διαχείρισης ή απευθείας μέσω του πίνακα ελέγχου του συστήματος της κυψέλης καυσίμου. Το **κάτωθι σχήμα** δίνει μια απλοποιημένη επισκόπηση του συστήματος AIP. Παρατηρούμε ότι στο FCM 120 παρεμβάλεται μετατροπέας, ενώ το FCM 34 συνδέεται απ'ευθείας στο δίκτυο του πλοίου.

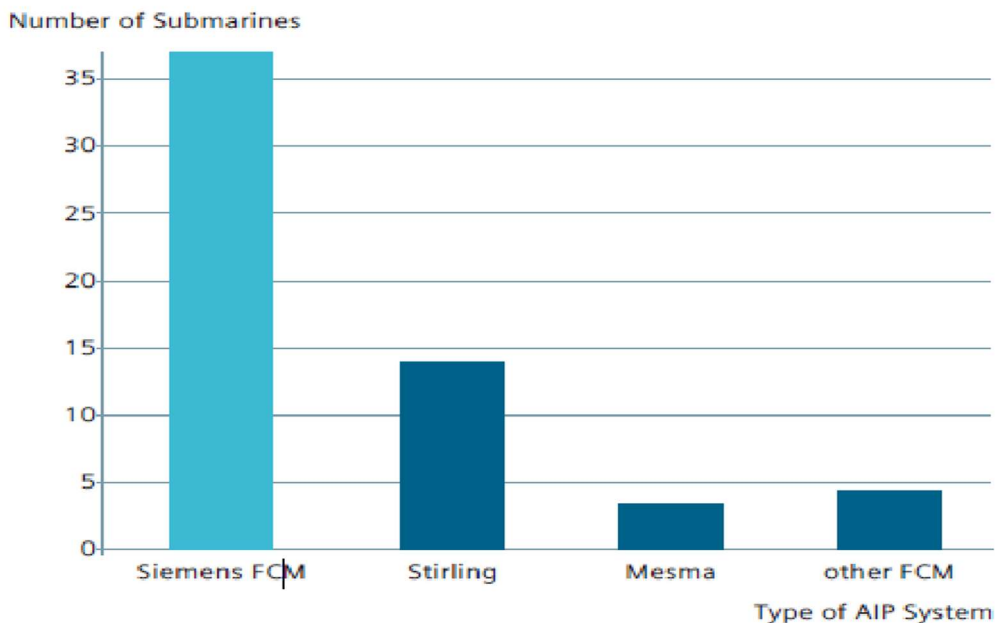


Μία ενδεικτική επισκόπηση της πλατφόρμας (HMI – Human Machine Interface) φαίνεται στην κάτωθι εικόνα. Υπάρχει πλήρη οπτικοποίηση του συνολικού συστήματος, αποτελούμενο από τα δύο modules, το σύνολο των βοηθητικών δικτύων και συστημάτων, τα αντιδρώντα αέρα, τον μετατροπέα DC/DC. Επίσης μέσω αυτής της πλατφόρμας εκτελείται ο χειρισμός του συνολικού συστήματος.



Το σύστημα κυψελών καυσίμου στο σύνολό του - η πλήρης μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της κυψέλης καυσίμου, ιδίως τα συστήματα παροχής και διάθεσης που περιγράφονται παραπάνω για τη λειτουργία AIP, συμπεριλαμβανομένης της χωρικής και της λειτουργική ολοκλήρωση επί του σκάφους - έχει αναπτυχθεί από την HDW (Howaldtswerke Deutsche Werft AG).

Παρακάτω βλέπουμε μία σύγκριση των εγκατεστημένων συστημάτων AIP στα υποβρύχια.



7.1.2.3.4. Διαχείριση Ενέργειας

Η πηγή ενέργειας των υποβρυχίων είναι κυρίως μπαταρίες Ni-Cd. Στα πιο καινούρια έχουν τοποθετηθεί και συστοιχίες LiOH. Όλοι οι καταναλωτές από τον ηλεκτρικό κινητήρα πρόωσης που είναι και ο μεγαλύτερος καταναλωτής, τα μηχανήματα, οι αντλίες εξυπηρετούνται από τις μπαταρίες που αποτελούνται από πολλά στοιχεία. Το σύστημα

κυψελών καυσίμου παράγει ρεύμα το οποίο τροφοδοτεί το κύριο δίκτυο διανομής ισχύος του πλοίου, είτε απευθείας είτε μέσω μετατροπέα DC/DC.

Όταν υπάρχει μετατροπέας DC/DC, το σύστημα δύναται να λειτουργήσει με 3 τρόπους:

1. Κανονική Λειτουργία

- a. Η απαιτούμενη ισχύς του δικτύου είναι μικρότερη από την μέγιστη ονομαστική ισχύ του συστήματος FC, ο μετατροπέας DC/DC ελέγχει την τάση εξόδου με τέτοιο τρόπο ώστε η μέση τιμή του ρεύματος της συστοιχίας να είναι μηδέν (0). Δηλαδή το FC παράγει τόσο ρεύμα όσο απαιτείται για τις καταναλώσεις του δικτύου.
- b. Η απαιτούμενη ισχύς του δικτύου είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη ονομαστική ισχύ του συστήματος FC, η συστοιχία αυτόματα τροφοδοτεί την διαφορά ανάμεσα στην απαιτούμενη ισχύ και τις ισχύς που δίνει το FC.

2. Απομονωμένη Λειτουργία

Τροφοδότηση από το FC χωρίς μπαταρίες απ'ευθείας στο δίκτυο. Ο μετατροπέας DC/DC θα αυξήσει την ισχύ εξόδου μέχρι τα μέγιστα όρια του (ρεύμα ή τάση). Αυτή η λειτουργία είναι λειτουργία ανάγκης.

3. Λειτουργία Φόρτισης

Το σύστημα FC λειτουργεί στη μέγιστη ισχύ ανεξαρτήτως από την απαιτούμενη ισχύ του δικτύου. Με τη λειτουργία αυτή, εάν η απαιτούμενη ισχύς του δικτύου είναι μικρότερη από την ισχύ που δίνει το FC οι μπαταρίες φορτίζονται.

7.1.2.3.5. Safety System

Το σύστημα προστατεύεται από ένα αυτόνομο σύστημα, το οποίο ελέγχει συγκεκριμένες συνθήκες κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος κυψελών καυσίμου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι συνθήκες αφορούν καταστάσεις ανάγκης όπως εκδήλωση πυρκαγιάς, διαρροή υδρογόνου ή εισροή ύδατος στο Y/B. Στις περιπτώσεις αυτές, το Safety System θα απενεργοποιήσει αυτομάτως το σύστημα και θα κλείσει όλες τις βαλβίδες.

7.1.3. Μέτρα ασφαλείας κατά την παραλαβή αντιδρώντων αερίων συστήματος αναερόβιας πρόωσης στα ελληνικά υποβρύχια τ. 214

7.1.3.1. Οξυγόνο

- Αέρια μορφή (GOX)

α. Είναι άοσμο και βαρύτερο από τον αέρα

β. Είναι μη τοξικό, ωστόσο σε περίπτωση εισπνοής αέρα με περιεκτικότητα μεγαλύτερη του 75% σε οξυγόνο μπορεί να προκληθεί ναυτία, απώλεια προσανατολισμού, δύσπνοια, συσπάσεις.

γ. Θα πρέπει να αποφεύγεται η παρουσία πηγών ανάφλεξης ή θέρμανσης καθώς ακόμα και μικρή αύξηση της περιεκτικότητας του αέρα με οξυγόνο μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη των υλικών.

- Υγρή μορφή (LOX)

- α. Το οξυγόνο είναι σε υγρή μορφή σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία (-183 °C) και έχει μία μπλε απόχρωση.
- β. Δεν είναι τοξικό, ωστόσο απαιτούνται μέτρα προστασίας κατά τον ανεφοδιασμό του λόγω της πολύ χαμηλής θερμοκρασίας του.
- γ. Επαφή του δέρματος με το υγρό οξυγόνο προκαλεί κρυοπάγημα και έγκαυμα.
- δ. Η εισπνοή παγωμένου αερίου οξυγόνου προκαλεί κρυοπάγημα στους πνεύμονες, ενώ συνεχής έκθεση σε κρύους ατμούς οξυγόνου μπορεί να προκαλέσει υποθερμία.
- ε. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ορισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική όπως ο χάλυβας, το πλαστικό και το λάστιχο γίνονται ψαθυρά σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.

- Πρώτες βοήθειες

- α. Καταρχάς θα πρέπει να εντοπιστεί και να αντιμετωπιστεί το αίτιο που προκάλεσε το ατύχημα. Η αντιμετώπιση ενός τέτοιου ατυχήματος θα πρέπει να είναι ίδια με ενός εγκαύματος λόγω έκθεσης σε φλόγα.
- β. Ο τραυματίας θα πρέπει να μεταφερθεί σε ζεστό μέρος (περίπου 22 °C), αν κριθεί απαραίτητο και σε νοσοκομείο ενώ δεν πρέπει να γίνει χρήση άμεσων πηγών θερμότητας.
- γ. Θα πρέπει να γίνει ρίψη άφθονου χλιαρού (όχι θερμοκρασίας πάνω από 42 °C), ενώ σε περίπτωση υποθερμίας θα πρέπει να γίνει χρήση κουβέρτας.

7.1.3.2. Υδρογόνο

Το Υδρογόνο έχει τις κάτωθι ιδιότητες:

- α. Είναι αέριο άχρωμο, άοσμο, άγευστο και πολύ ελαφρύτερο από τον αέρα (σχετική πυκνότητα: 0,07).
- β. Δεν είναι τοξικό, ωστόσο σε μεγάλη συγκέντρωση μπορεί να προκαλέσει ασφυξία καθώς μειώνεται αντίστοιχα η περιεκτικότητα του αέρα σε οξυγόνο.
- γ. Είναι μη διαβρωτικό, ωστόσο εξαιρετικά ευφλεκτο με θερμοκρασία αυτανάφλεξης 572 °C. Δημιουργεί εκρηκτικό μείγμα σε μεγάλο εύρος περιεκτικότητας (4-75% κ.ο. στον αέρα και 4,7-93,9 % κ.ο. σε οξυγόνο στους 20 °C). Μετά την ανάφλεξή του καίγεται αλλά δεν είναι ορατή η φλόγα.
- δ. Το υδρογόνο είναι καλός αγωγός. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση διαρροής στην ατμόσφαιρα, κάθε στατικό φορτίο, είτε δημιουργήθηκε από τον εξοπλισμό είτε από κεραυνό θα ακολουθήσει την πηγή της διαρροής δημιουργώντας πυρκαϊά ή/και έκρηξη.
- ε. Διαρροή υδρογόνου υπό πίεση συχνά θα δημιουργήσει έντονο θόρυβο λόγω του χαμηλού μοριακού του βάρους.

- Πιθανοί κίνδυνοι από διαρροή

Η διαρροή υδρογόνου θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως πυρκαϊά αερίων καυσίμων. Ως αέριο κατά πολύ ελαφρύτερο του αέρα διαφεύγει προς τα πάνω. Δεν αποκλείεται όμως στο σημείο διαρροής να σχηματιστεί εκρηκτικό μίγμα με τον ατμοσφαιρικό αέρα (όρια εκρηκτικότητας 4-75 % κ.ο.). Αυξημένος είναι ο κίνδυνος όταν διαρρεύσει μέσα σε κλειστό χώρο. Οποσδήποτε πρέπει να αποφεύγουμε την παρουσία οποιασδήποτε πηγής έναυσης του επικίνδυνου μίγματος. Βάση υπολογισμών από μια οπή διαμέτρου 0,1 mm προκαλείται

διαρροή της τάξεως των $8,3 \times 10^{-5}$ kg/sec στα 200 bar. Στην καλύτερη των περιπτώσεων εκρηκτική ατμόσφαιρα μπορεί να σχηματιστεί στο σημείο διαρροής και σε απόσταση 0,7 μέτρων από αυτό.

- Μέτρα σε περίπτωση διαρροής

α. προσπαθούμε να σταματήσουμε τη διαρροή (από την πηγή),
β. εξασφαλίζουμε ότι η ατμόσφαιρα δεν είναι επικίνδυνη, π.χ. explosimeter, αισθητήρες,
γ. εισερχόμαστε στο χώρο με αυτόνομη αναπνευστική συσκευή,
δ. απομακρύνουμε πηγές ανάφλεξης,
ε. αερίζουμε τον χώρο.

- Μέτρα για την καταπολέμηση πυρκαγιάς υδρογόνου

Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι είναι εξαιρετικά εύφλεκτο και η φλόγα του είναι αόρατη. Περαιτέρω:

α. εφόσον είναι δυνατόν σταματάμε τη διαρροή,
β. απομακρύνουμε το δοχείο από τη φωτιά ή το ψύχουμε με κατάβρεξη από προστατευμένη θέση,
γ. εάν το αέριο έχει αναφλεγεί το σβήνουμε μόνον εάν αυτό είναι δυνατό και απολύτως αναγκαίο,
δ. μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα τα γνωστά μέτρα πυρόσβεσης.

Πολύ σημαντικό είναι ότι η θερμική επίδραση της πυρκαγιάς μπορεί να προκαλέσει τη διάρρηξη φιαλών/ συστοιχιών.

- Επιπτώσεις στον άνθρωπο από εισπνοή

α. Προκαλείται ασφυξία από την υψηλή συγκέντρωση του αερίου σε κλειστό χώρο και τη μείωση της συγκέντρωσης του οξυγόνου στην ατμόσφαιρα.
β. Περιεκτικότητα 30% κ.ο. σε H₂ στον αέρα οδηγεί σε συμπτώματα ασφυξίας (δυσκολία αναπνοής, εξασθένηση αντιδράσεων και μυϊκού συντονισμού).
γ. Περιεκτικότητα 50% κ.ο. H₂ στον αέρα οδηγεί σε απώλεια των αισθήσεων και θάνατο χωρίς προειδοποίηση.
δ. Τα συμπτώματα ασφυξίας εμφανίζονται σταδιακά και το θύμα σπανίως τα αντιλαμβάνεται έγκαιρα, συνήθως είναι πολύ αργά.
ε. Χρησιμοποιούμε αυτόνομη αναπνευστική συσκευή, μεταφέρουμε το θύμα στον καθαρό αέρα και το διατηρούμε ζεστό και ήρεμο και εν συνεχεία καλούμε γιατρό.
στ. Σε περίπτωση διακοπής της αναπνοής υποβοηθούμε με τεχνητή αναπνοή
ζ. Το κατώτερο όριο ανάφλεξης του υδρογόνου στον αέρα επιτυγχάνεται σε συγκέντρωση χαμηλότερη από αυτή που προκαλεί ασφυξία και απώλεια των αισθήσεων.

- Μέτρα κατά τη χρήση, αποθήκευση

α. Γειώνουμε τον εξοπλισμό (κέντρα, συστοιχίες, δίκτυα)
β. Αποφεύγουμε την εισροή νερού στα δοχεία με υδρογόνο (κλείστρα κλειστά)
γ. Χρησιμοποιούμε τον κατάλληλο εξοπλισμό (κέντρα, σωληνώσεις, φιάλες)
δ. Απομακρύνουμε πιθανές πηγές ανάφλεξης
ε. Δεν το αποθηκεύουμε μαζί με οξειδωτικά και εύφλεκτα αέρια (π.χ. Οξυγόνο)

- στ. Δεν το αποθηκεύουμε σε θερμοκρασία υψηλότερη των 50 οC
- ζ. Καθαρίζουμε τον εξοπλισμό από τον αέρα πριν από τη διοχέτευση υδρογόνου (purging)
- η. Το χρησιμοποιούμε μόνο για εφαρμογές που προορίζεται (π.χ. όχι φούσκωμα μπαλονιών)
- θ. Όπου είναι απαραίτητο χρησιμοποιούμε επιπρόσθετα μέτρα ασφαλείας (π.χ. αισθητήρες)
- η. Χρησιμοποιούμε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό αντιακρηκτικού τύπου
- ζ. Τηρούμε αυστηρά τις προβλεπόμενες ζώνες ασφαλείας (Ex-Zones)

- Βίαιες αντιδράσεις και επικίνδυνα μίγματα

Πριν από τη χρήση σε νέες διεργασίες ή πειράματα εξετάζουμε τη συμβατότητα με τα χρησιμοποιούμενα υλικά.

- Με το χλώριο και το βρώμιο **σχηματίζει εκρηκτικά μίγματα** που αναφλέγονται πολύ εύκολα, ακόμη και με την ηλιακή ακτινοβολία.
- Με το Λευκόχρυσο, το κοκκοποιημένο νικέλιο, τα οξείδια του χαλκού και οξείδια του αζώτου **αναφλέγεται** σε επαφή με αυτά τα υλικά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Με Διοξίνες μαζί με νικέλιο, το χλωροτριφλωρίδιο, το λίθιο, το μαγνήσιο μαζί με ανθρακικό ασβέστιο, το τριφλωρίδιο του αζώτου, το διφλωρίδιο του οξυγόνου, το παλλάδιο μαζί με ισοπροπυλική αλκοόλη **αντιδρά βίαια**.

7.1.4. Ανεφοδιασμός με αντιδρώντα αέρια των Y/B τ. 214

α. Εκτελείται σε προβλήτα ειδικών προδιαγραφών, απομακρυσμένη από τα λοιπά πλοία που ελλιμενίζονται στο Ναύσταθμο Σαλαμίνας και οριοθετούνται ζώνες ασφαλείας.

β. Προ έναρξης της διαδικασίας εκτελείται ενημέρωση επί θεμάτων ασφαλείας (Safety Briefing) από τον τεχνικό της αναδόχου εταιρείας και τον επικεφαλής/ υπεύθυνο του Y/B (Αο Μηχανικό).

γ. Η σύνδεση των σωλήνων παροχής αερίων από τον προβλήτα στο κατάστρωμα του Υποβρυχίου γίνεται με μεταλλικές κλίμακες.

δ. Δεν εκτελείται οποιαδήποτε άλλη εργασία παράλληλα με την παραλαβή των αερίων, όπως ο ανεφοδιασμός καυσίμου ή φόρτιση της συστοιχίας.

ε. Δεν επιτρέπεται στην ευρύτερη περιοχή το κάπνισμα, η χρήση ανοιχτής φλόγας, κινητών τηλεφώνων και ηλεκτρικών εργαλείων, καθώς και η λειτουργία μηχανημάτων με αποβολή υψηλής θερμοκρασίας και δημιουργία σπινθηρισμών.

στ. Γίνεται χρήση μόνο υλικών, και λιπαντικών που πληρούν τις προδιαγραφές που ορίζει ο κατασκευαστής και είναι κατάλληλα για τις βαλβίδες και τον εξοπλισμό του H₂ και του O₂.

ζ. Το προσωπικό που εκτελεί τον ανεφοδιασμό φέρει τα κατάλληλα μέτρα ατομικής προστασίας ήτοι γάντια ανθεκτικά σε ψύχος και φλόγα, προστατευτικά γυαλιά, μη εύφλεκτη ενδυμασία (μη συνθετικά υλικά) και κράνος.

η. Η διαδικασία γίνεται πάντα με την παρουσία της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας του ΠΝ.

7.1.4.1. Ανεφοδιασμός με υδρογόνο

Στο Y/B παραμένει μόνο το απαραίτητο προσωπικό που εμπλέκεται με τη διαδικασία ανεφοδιασμού, ενώ τηρείται ετοιμότητα αγήματος πυρκαϊάς από το προσωπικό της ένδον φυλακής. Κατόπιν:

- α. Λαμβάνονται μέτρα αποφυγής δημιουργίας στατικών ηλεκτρικών φορτίων

β. Συνδέονται γειώσεις στο σωλήνα παροχής, στο βυτίο και στο σύνολο του εξοπλισμού.

γ. Γίνεται χρήση καμινάδας εξαερισμού του σωλήνα παροχής υδρογόνου

δ. Εκτελείται καθαρισμός και υδραυλική δοκιμή του σωλήνα παροχής μετά του συνδέσμου στο Υποβρύχιο, προ έναρξης παραλαβής, με αδρανές αέριο (Αργόν).

ε. Εκτελείται συνεχής έλεγχος διαρροών με κατάλληλους ανιχνευτές.

στ. Καθόσον το δίκτυο του υδρογόνου είναι διπλό σωλήνωμα με συγκεκριμένη πίεση αζώτου εντός του ενδιάμεσου χώρου, εκτελείται συνεχής παρακολούθηση της εν λόγω πίεσης αζώτου. Αύξηση της πίεσης του αζώτου σημαίνει διαρρή του εσωτερικού σωληνώματος.

ζ. Διακοπή της διαδικασίας παραλαβής σε περίπτωση καταιγίδας.

η. Απαγορεύεται η παράλληλη παραλαβή οξυγόνου ή εξαερισμού αυτού στην ατμόσφαιρα.

θ. Η παροχή του υδρογόνου σε Kg/h ελέγχεται από ειδικό σταθμό της εταιρείας LINDE HELLAS. Ο σταθμός συνδέεται με το βυτίο το οποίο παρέχει το υδρογόνο μετά από μειωτήρα πίεσης. Στο σταθμό γίνεται εκ νέου μείωση της πίεσης και ρύθμιση της παροχής παραλαβής στη μέγιστη απορροφητική ικανότητα των μεταλλικών υδριδίων. Ο σταθμός εκτός από τοπικό χειρισμό, υφίσταται η δυνατότητα εξ' αποστάσεως ελέγχου του ενσύρματα ή ασύρματα.

ι. Η μετάγγιση γίνεται επί της ουσίας με διαφορά πίεσης, με φυσική ροή μεταξύ του βυτίου και των φιαλών του Y/B, και ως εκ τούτου η διατήρηση της μέγιστης παροχής και ο ρυθμός παραλαβής εξαρτάται από την πίεση και τον όγκο των φιαλών του βυτίου καθώς και την πίεση των φιαλών του Y/B.

ια. Η απορρόφηση του υδρογόνου από το υδρίδιο είναι μία εξώθερμη διαδικασία, ενώ αύξηση της θερμοκρασίας των φιαλών οδηγεί σε αύξηση της πίεσης αυτών. Ως αποτέλεσμα, μειώνεται η διαφορά πίεσης με τις φιάλες του βυτίου και δυσχεραίνεται η διαδικασία παραλαβής. Γι' αυτό είναι σημαντική η συνεχής ψύξη των φιαλών κατά τη διάρκεια του ανεφοδιασμού.

7.1.4.2. Ανεφοδιασμός με οξυγόνο

Ο ανεφοδιασμός του υποβρυχίου με οξυγόνο είναι διαδικασία απλούστερη από την παραλαβή του υδρογόνου. Ωστόσο, μία από τις βασικές αρχές που τον διέπουν είναι ότι απαγορεύεται η παράλληλη παραλαβή υδρογόνου.

Για λόγους ασφαλείας, το δίκτυο παραλαβής του οξυγόνου είναι διπλό σωλήνωμα.

7.2. Πρόοδος των Κυψελών Καυσίμου στην Εμπορική Ναυτιλία

7.2.1. Αρχικά projects

7.2.1.1. SSFC

Το έργο κυψελών καυσίμων πλοίων (Ship Service Fuel Cell - SSFC) ξεκίνησε το 1997 και στόχευε στο να αναπτυχθούν συστήματα κυψελών καυσίμου με καύσιμο ντίζελ για πλοία πολεμικού ναυτικού και άλλα σκάφη. Οι στόχοι ήταν να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου, ο θόρυβος, οι θερμικές υπογραφές, το κόστος συντήρησης και οι εκπομπές.

Επιπλέον, η διανομή των γεννητριών σε όλο το πλοίο θα πρέπει να ενισχύσει την επιβιωσιμότητα. Σχεδιασμοί για ένα MCFC 2,5 MW και ένα σύστημα PEMFC αναπτύχθηκαν και οι δοκιμαστικά συστήματα των 0,5 MW δοκιμάστηκαν. Η υψηλή πολυπλοκότητα, οι μεγάλοι χρόνοι εκκίνησης και οι τιμές επισημάνθηκαν ως τα πιο σημαντικά θέματα.

7.2.1.2. DESIRE

Το έργο αναμόρφωσης καυσίμου ντίζελ με κυψέλη καυσίμου (DESIRE) ξεκίνησε το 2001 και ανέπτυξε ένα τεχνολογικό δοκιμαστικό σύστημα 25 kW ενός αναμορφωτή καυσίμου ντίζελ για PEMFC, για να χρησιμοποιηθεί για ναυτική εφαρμογή. Ένα μικρό σύστημα κυψελών καυσίμου είχε συνδεθεί με επιτυχία στον αναμορφωτή καυσίμου. Παρουσιάστηκαν πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα, αλλά προβλήματα με την αφαίρεση του θείου, τις μεταβολές του φορτίου και την ανθεκτικότητα διαπιστώθηκαν.

7.2.1.3. FCSHIP

Στο project “Τεχνολογία Κυψελών Καυσίμου για τα Πλοία – FCSHIP”, μια μεγάλη κοινοπραξία Ευρωπαίων εταιρών, το έτος 2002, συνεργάστηκε για την παροχή ενός οδικού χάρτη για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη της εφαρμογής της θαλάσσιας κυψέλης καυσίμου. Εξετάστηκαν λειτουργικές απαιτήσεις και απαιτήσεις ασφαλείας, και αναπτύχθηκαν διάφορα σχέδια. Τέλος, ο αντίκτυπος του κύκλου ζωής ενός προσαρμοσμένου για ναυτιλιακή χρήση συστήματος MCFC αξιολογήθηκε και συγκρίθηκε με ένα συμβατικό σύνολο κινητήρων-γεννητριών ντίζελ.

7.2.1.4. FELLOWSHIP



Λίγο αργότερα, το έτος 2010, ένα σύστημα MCFC τροφοδοτούμενο με LNG 330 kW εγκαταστάθηκε επί του σκάφους εφοδιασμού ανοικτής θαλάσσης «Viking Lady» στο πρότζεκτ “Κυψέλες Καυσίμου για Πλοία Χαμηλών Εκπομπών – FellowSHIP”. Το σύστημα κυψελών καυσίμου λειτούργησε με επιτυχία για 18.500 ώρες, και κατέδειξε καθαρή ηλεκτρική απόδοση ~ 44,4%, χωρίς ανιχνεύσιμες εκπομπές NOX, SOX και PM.

7.2.1.5. FELICITAS (2005-2008)

Το πρότζεκτ FELICITAS που ξεκίνησε το 2005 και τελείωσε το 2008 εστίαζε στην ανάπτυξη τεχνολογιών κυψελών καυσίμου (FC) ικανών να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των βαρέως τύπου μεταφορών για οδικές, σιδηροδρομικές και θαλάσσιες εφαρμογές. Το FELICITAS επικεντρώνεται σε δύο τεχνολογίες FC που είναι οι πλέον κατάλληλες για εφαρμογές μεταφοράς βαρέων οχημάτων: Κυψέλες καυσίμου πολυμερών ηλεκτρολυτών (PEFC) και κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC). Το πρότζεκτ αυτό περιελάμβανε τέσσερα υποπρογράμματα, που το καθένα επικεντρώνεται σε ένα κύριο θέμα του συστήματος κυψελών καυσίμου και της ανάπτυξης της μονάδας κίνησης. Μεταξύ άλλων,

μελέτησε πολλαπλές συστοιχίες βαριάς ενέργειας, μεταξύ των οποίων μια βοηθητική μονάδα ισχύος SOFC για ένα μέγα γιοτ. Διάφορα ζητήματα μετατροπής της τεχνολογίας SOFC για ναυτιλιακή χρήση διερευνήθηκαν, καθώς και η υβριδοποίηση με σφόνδυλους. Επιπλέον εξετάστηκαν, η σύζευξη του συστήματος SOFC με αεριοστρόβιλο και αερισμό θέρμανσης και το σύστημα κλιματισμού εξετάστηκαν.

7.2.1.6. MC-WAP

Ένα έτερο Ευρωπαϊκό πρόγραμμα, ήταν το MC-WAP εν έτει 2005. Στόχος του ήταν η διερεύνηση χρήσης των κυψελών καυσίμου τετηγμένου ανθρακικού καυσίμου στη ναυτιλία με την ανάπτυξη και δοκιμή ενός συστήματος γεννητριών MCFC 0,5 MW βοηθητικής ισχύος σε μεγάλα σκάφη όπως Ro-Pax, Ro-Ro και κρουαζιερόπλοια. Τελικά έγιναν δοκιμές σε ένα υφιστάμενο ερευνητικό σύστημα MCFC και διάφορα σχέδια αναπτύχθηκαν.

7.2.1.7. ZEMSHIP



Το επιβατικό σκάφος FCS Alsterwasser χωρητικότητας 120 επιβατών εξοπλίστηκε με σύστημα PEMFC με υδρογόνο στο πρότζεκτ σκάφος μηδενικών εκπομπών (Zero Emissions Ship - ZEMSHIP), και λειτούργησε με επιτυχία στο Αμβούργο από το 2008. Με τα χρόνια που λειτουργεί το πλοίο, έχει αποδειχθεί ότι οι κυψέλες καυσίμου έχουν μακροπρόθεσμη καταλληλότητα για μια κατηγορία κινητήρων που απαιτούν 100 kW. Επί του παρόντος, έχει εγκατασταθεί μια νέα γενιά κυψελών καυσίμου για την περαιτέρω επέκταση της περιόδου χρήσης του πλοίου.

7.2.1.8. METHAPU (2006-2010)



Στο Ευρωπαϊκό πρότζεκτ METHAPU (Methanol Auxiliary Power Unit) από το 2006 έως το 2010, ένα δοκιμαστικό σύστημα SOFC 20 kW προσαρμόστηκε για ναυτιλιακή χρήση και δοκιμάστηκε επί του πλοίου μεταφοράς αυτοκινήτων "Undine". Πρόσθετοι στόχοι του έργου ήταν να διευκολυνθεί η εισαγωγή διεθνών κανονισμών για το MeOH ως ναυτιλιακό καύσιμο και να εκτιμηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τέτοιων εφαρμογών.

7.2.1.9. NEMO H2

Η Fuel Cell Boat BV ανέπτυξε το επιβατηγό πλοίο Nemo H2 χωρητικότητας 87 επιβατών, για κρουαζιέρες στο κανάλι του Άμστερνταμ από το έτος 2009 έως σήμερα. Χρησιμοποιεί σύστημα PEMFC με ισχύ 60-70 kW, υβριδισμένο με πακέτο μπαταριών οξέος μολύβδου 55 kW. Διαθέτει 6 δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου με πίεση 35 MPa για 24 κιλιά υδρογόνου. Το πλοίο έχει δυνατότητα πλεύσης 9 ωρών με ταχύτητα κρουαζιέρας 9 κόμβων. Ο σταθμός υδρογόνου τροφοδοτείται από την NoordzeeWind για την ηλεκτρόλυση



του νερού και έχει παραγωγική ικανότητα 60 m³ υδρογόνου ανά ώρα, η οποία θα επαρκούσε για δύο σκάφη αυτού του τύπου.

7.2.1.10. Το πρότζεκτ e4ships (2009-2016)

Το πρότζεκτ αυτό αποσκοπούσε κυριολεκτικά στο να ταράξει τα νερά, πρωτοπορώντας τη χρήση κυψελών καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα μεγαλύτερα πλοία. Στόχος του είναι να μειώσει τις εκπομπές όπως το διοξείδιο του θείου, το οξειδίο του αζώτου, το διοξείδιο του άνθρακα, το μονοξειδίο του άνθρακα και τα σωματίδια, συμβάλλοντας έτσι στην άμβλυνση της κλιματικής αλλαγής και στην προστασία του περιβάλλοντος. Το έργο e4ships ήταν το πρώτο που επέδειξε με επιτυχία νέες τεχνικές λύσεις για τη μείωση των εκπομπών πλοίων με τη χρήση κυψελών καυσίμου. Περιελάμβανε δύο υποπρογράμματα, το SCHIBZ και το PA-X-ELL. Μεταξύ άλλων, τα ευρήματα από αυτά τα δύο έργα επίδειξης έχουν τροφοδοτηθεί σε παγκόσμιους ισχύοντες κανόνες και πρότυπα για την αδειοδότηση και την εγκατάσταση κυψελών καυσίμου στα πλοία.



Το Γερμανικό πρότζεκτ SchIBZ, το οποίο χρηματοδοτείται από το εθνικό πρόγραμμα καινοτομίας για το υδρογόνο και τα κυψέλες καυσίμου (NIP), είχε ως στόχο την ανάπτυξη ενός συστήματος κυψελών καυσίμου 500 kW για ναυτιλιακή χρήση. Ο στόχος του έργου είναι να εγκαταστήσει και να αξιολογήσει ένα σύστημα SOFC με ενσωματωμένο αναμορφωτή ντίζελ 0,5 MW στο πλοίο 'MS Forester'. Οι πρακτικές δοκιμές περιελάμβαναν εν τέλει ένα σύστημα 100 kW που λειτουργούσε υπό πραγματικές συνθήκες ενώ μεταφέρθηκε σε πλοίο επί 12 μήνες για να τροφοδοτήσει το δίκτυο του πλοίου.

Το έργο Pa-X-ell, το οποίο ξεκίνησε από το ναυπηγείο Meyer Werft, συνεργάστηκε με τους εταίρους του για να δοκιμάσει τη χρήση κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας μεμβράνης πρωτονίων (HT-PEM) σε διάφορες εφαρμογές, με μακροπρόθεσμο στόχο την αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας σε επιβατηγά πλοία. Εστιάζει στην ενσωμάτωση και τις πτυχές ασφαλείας των συστημάτων HT-PEMFC που τροφοδοτούνται με MeOH. Διερευνήσεις περιλαμβάνουν την τοποθέτηση κυψελών καυσίμου σε διαφορετικές ζώνες φωτιάς, ασφαλής τροφοδοσία καυσίμων χαμηλών σημείων ανάφλεξης και τη θερμική και ηλεκτρική ενσωμάτωση των κυψελών καυσίμου.



Το Pa-X-ell δημιούργησε δύο συστήματα επίδειξης με την πάροδο του χρόνου για να αξιοποιήσει την εμπειρία του. Στην πρώτη του εξέδρα δοκιμής, η οποία τοποθετείται στην ξηρά, τοποθετήθηκε ένα σύστημα ψύξης απορρόφησης σε ένα κοντέινερ μήκους 20 ποδιών, προκειμένου να αποκτηθεί αρχική πρακτική εμπειρία με τις κυψέλες καυσίμου και να δοκιμαστεί η αλληλεπίδρασή τους

με το σύστημα ψύξης. Βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της Meyer Werft, και αυτή η μονάδα επίδειξης θα συνεχίσει να χρησιμοποιείται για μακροχρόνιες δοκιμές. Το δεύτερο σύστημα επίδειξης κυψελών καυσίμου το οποίο εγκαταστάθηκε στο RoPax MS Mariella που λειτουργεί μεταξύ Στοκχόλμης και Ελσίνκι, αφορούσε το σχεδιασμό και την εγκατάσταση προκατασκευασμένης μονάδας 60 kW για το κατάστρωμα του πλοίου. Μια δεξαμενή μεθανόλης τοποθετήθηκε επίσης επί του σκάφους και γεμίστηκε με φορτηγό-βυτίο επί ξηράς.

7.2.2. Σύγχρονα projects

7.2.2.1. WATER-GO-ROUND

Το "Water-Go-Round", ένα πλοίο τροφοδοτούμενο με κυψέλες καυσίμου, θα είναι το πρώτο σκάφος με κυψέλες καυσίμου που παράγεται στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το "Water-Go-Round", το οποίο ανεμένετο να φτάσει στα ύδατα του κόλπου του Σαν Φρανσίσκο το



φθινόπωρο του 2019, θα μπορεί να αποθηκεύσει αρκετό υδρογόνο για να πλέει μέχρι και δύο ημέρες μεταξύ του ανεφοδιασμού. Το καταμαράν αλουμινίου μήκους 70 ποδιών θα έχει μέγιστη ταχύτητα 22 κόμβων (περίπου 25 μίλια/ώρα) και θα έχει χώρο για 84 επιβάτες. Η Bay Ship & Yacht Co. of Alameda, California το κατασκεύασε, χρησιμοποιώντας διπλούς

ηλεκτροκινητήρες από την BAE Systems και ένα σύνολο κυψελών καυσίμου από το μέλος της FCHEA, την Hydrogenics. Θα ανεφοδιάζεται βυτία που μεταφέρουν υδρογόνο χωρίς να απαιτείται ειδική υποδομή στην αποβάθρα.

7.2.2.2. ENERGY OBSERVER

Από τότε που ξεκίνησε το ταξίδι του το 2017, το μέλος της FCHEA, η Toyota υπήρξε κύριος συνεργάτης του Energy Observer, ενός σκάφους τροφοδοτούμενο με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και υδρογόνο που παράγεται από θαλασσινό νερό. Το Energy Observer ολοκλήρωσε μια κρουαζιέρα σε όλο τον κόσμο, η πρώτη για το είδος του, ενός πλοίου με ενέργεια υδρογόνου. Το μέλος της FCHEA, Air Liquide είναι επίσης επίσημος υποστηρικτής και η FCHEA παρακολούθησε το ταξίδι του Energy Observer καθ' όλη τη διάρκεια του ταξιδιού του.



7.2.2.3. Η ΚΟΙΝΟΠΡΑΞΙΑ HYON AS

Πρόσφατα, η HYON AS, μια κοινοπραξία μεταξύ των μελών της FCHEA, Nel και Hexagon Composites και της PowerCell Sweden, έλαβε την πρώτη παγκόσμια έγκριση αρχής από την DNV GL για τις λύσεις κυψελών καυσίμου βασισμένες σε στοιβα, προσαρμοσμένες για ναυτική χρήση. Τα μοντέλα, βασιζόμενα σε στοιβα, μπορούν να εγκατασταθούν πάνω ή κάτω από το κατάστρωμα και περιλαμβάνουν συστήματα ισχύος κυψελών καυσίμου με ισχύ που κυμαίνεται από 100 kW έως αρκετά MW, επιτρέποντας

μεγάλης κλίμακας, διεθνείς ναυτιλιακές εφαρμογές, κρουαζιερόπλοια, σκάφη εργασίας και σκάφη ανοικτής θαλάσσης. Οι λύσεις της HYON/ PowerCell είναι επίσης σημαντικά μικρότερες και ελαφρύτερες από ναυτικές γεννήτριες ντίζελ ή βενζίνης ίσης ισχύος εξόδου.

Η Hyon AS, συνεργάζεται επίσης σε δύο έργα υδροηλεκτρικών κυψελών με υδρογόνο με στόχο την παραγωγή μηδενικών εκπομπών, το **Project ZEFF** και το **Project Seashuttle**.

Η κοινοπραξία θα χρησιμοποιήσει την PowerCell για τις κυψέλες καυσίμου, την Hexagon για τις δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου και τη Nel ως προμηθευτή μονάδων παραγωγής και τροφοδοσίας υδρογόνου στην ξηρά.

Και τα δύο έργα κέρδισαν τη στήριξη στο πλαίσιο της πρωτοβουλίας Pilot-E με ποσό μεγαλύτερο από € 100 εκατ. (US \$ 110 εκατ.), και είναι τα συνολικά έξι, τα δύο που αφορούν τον εμπορικό θαλάσσιο τομέα και διαθέτουν κυψέλες καυσίμου υδρογόνου. Στο πρότζεκτ **Pilot-E** συμμετέχουν το Συμβούλιο Έρευνας της Νορβηγίας, η Innovation Norway και η Επονα και στοχεύει στην επιτάχυνση της ανάπτυξης τεχνολογίας μηδενικών εκπομπών. Η Νορβηγία έχει ήδη θεσπίσει κανονισμούς που απαιτούν από τα πλοία που λειτουργούν στα φιόρντ τους να απαλλαγούν από εκπομπές έως το 2026.



7.2.2.4. Zero Emission Fast Ferry – ZEFF

Στο πρότζεκτ αυτό ηγέτης είναι η Selfa Arctic ενώ θα εργαστούν επιπλέον οι εταιρείες Hyon AS, Norled AS, Servogear και LMG Marin. Η Norled AS είναι ένας από τους μεγαλύτερους διαχειριστές φορτηγών και πλοίων της Νορβηγίας, ο δεύτερος μεγαλύτερος φορέας εκμετάλλευσης πορθμείων στη Νορβηγία και ο ηγέτης της εθνικής αγοράς σε ταχύπλοα ταχύπλοα σκάφη. Κατατάσσεται επίσης στην 4η θέση σε ταχύπλοα πορθμεία παγκοσμίως. Έχει επενδύσει σημαντικά σε νέους τύπους σκαφών και φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία και έχει αναπτύξει λύσεις που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από την εταιρεία.



Με το πρότζεκτ ZEFF σκοπεύει να εισαγάγει γρήγορα υδρογονοκίνητα επιγατηγά πλοία. Το ZEFF θα έχει 2 κινητήρες πρόωσης, ισχύος 1000kW έκαστος, κυψέλες καυσίμου ισχύος 2200kW και μπαταρία χωρητικότητας 50kWh. Θα έχει δυνατότητα μεταφοράς 275 επιβατών στη διαδρομή Trondheim-Kristiansund, με ταχύτητα 25-45 κόμβων και θα έχει τα πτερύγια που ανασηκώνουν το σκάφος από το νερό για να μειωθεί η αντίστασή του. Υπολογίζεται ότι το σκάφος θα είναι έτοιμο για αγορά το 2020 και εκτιμάται ότι θα απαιτεί 45% λιγότερη ισχύ.

7.2.2.5. SEASHUTTLE

Στο πρότζεκτ αυτό επικεφαλής είναι Samskip η οποία είναι πρωτοπόρος στην ανάπτυξη πλοίων κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Στόχος του πρότζεκτ είναι η ανάπτυξη δύο

παράκτιων πλοίων μηδενικών εκπομπών, με δυνατότητα μεταφοράς 200 εμπορευματοκιβωτίων, για διαδρομές μικρών αποστάσεων μεταξύ Όσλο, Πολωνίας και δυτικής ακτής της Σουηδίας. Τα πλοία θα είναι εντελώς ηλεκτρικά με αυτοματοποιημένο χειρισμό φορτίου και θα τροφοδοτούνται από κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, ενώ στόχος του όλου πρότζεκτ είναι παραγωγή μηδενικών εκπομπών για το 20% της παράκτιας διαδρομής.



Η ομάδα έργου Seashuttle περιλαμβάνει τον πάροχο τεχνολογίας Kongsberg, τις εξειδικευμένες εταιρείες για το υδρογόνο Hyon και Massterly, την αυτόνομη κοινοπραξία για λύσεις αυτόνομου σκάφους, μεταξύ Kongsberg Maritime και Wilhelmsen.

Με την ενσωμάτωση ενός υψηλού βαθμού αυτόνομης τεχνολογίας, τα πλοία Seashuttle θα είναι εφοδιασμένα με ηλεκτρική μετάδοση κίνησης με πετρέλαιο ή φυσικό αέριο, μπαταρίες και κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, ώστε να μεγιστοποιηθεί η λειτουργική ευελιξία, προσφέροντας ίσως έως και 40 διαφορετικούς τρόπους προώθησης. Το μέγεθος κάθε συστήματος προώθησης δεν έχει ακόμη καθοριστεί, αλλά διεξάγονται δοκιμές στο εργαστήριο της Kongsberg Maritime, που προσομοιώνει τις γεννήτριες, τις γεννήτριες ντίζελ και τις προπέλες σε συνδυασμό με μια φυσική κυψέλη καυσίμου και μπαταρίες.

7.2.2.6. FLAGSHIPS

Το πρότζεκτ αυτό είναι στο πλαίσιο ενός σχεδίου που υποστηρίζεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και υλοποιείται μία κοινοπραξία εννέα ευρωπαϊκών εταιρειών, μεταξύ των οποίων και η ABB, που εργάζονται για την ανάπτυξη δύο πλοίων με μηδενικές εκπομπές με κυψέλες καυσίμου με καύσιμο υδρογόνο.

Το ένα πλοίο θα λειτουργεί στον ποταμό RHONE από τη Γαλλική Compagnie Fluvial de Transport (CFT) και ένα δημόσιο επιβατηγό για λειτουργία από τη Νορβηγική Norled AS. Και τα δύο θα χρησιμοποιούν υδρογόνο που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Άλλοι στην κοινοπραξία είναι η Νορβηγική εταιρεία σχεδιασμού LMG Marin, η εταιρεία τεχνολογίας κυψελών καυσίμων της Δανίας Ballard Europe, η Γαλλική εταιρεία παρακολούθησης και διαχείρισης ενέργειας πλοίων PersEE, το Φινλανδικό ερευνητικό κέντρο VTT και η Νορβηγική βιομηχανική ομάδα NCE Maritime CleanTech.

7.2.3. Πλοία τροφοδοτούμενα με κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) από τη Samsung Heavy Industries

Η Νοτιοκορεάτικη ναυπηγοεπισκευαστική εταιρεία SAMSUNG HEAVY INDUSTRIES (SHI) και η Αμερικανική εταιρεία Bloom Energy, ανακοίνωσαν πρόσφατα, μια συνεργασία για το σχεδιασμό και ανάπτυξη πλοίων τροφοδοτούμενα με την τεχνολογία κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου της εταιρείας Bloom Energy.

Η εταιρεία SHI στοχεύει στο να είναι η πρώτος κατασκευαστής πλοίων που θα κατασκευάσει ένα μεγάλο φορτηγό πλοίο που θα επιχειρεί σε ωκεανό τροφοδοτούμενο από κυψέλες καυσίμου που θα λειτουργούν με φυσικό αέριο.

Οι δύο εταιρείες έχουν κάνει ήδη το πρώτο βήμα προς την εμπορευματοποίηση της ναυτιλιακής χρήσης των κυψελών καυσίμου για πρόωση και βοηθητική ισχύ, με την SHI να λαμβάνει έγκριση αρχής από το DNV GL για να προχωρήσει με τον σχεδιασμό για ένα δεξαμενόπλοιο διαστάσεων aframax.

Η εκτίμηση των δύο εταιρειών είναι ότι αντικαθιστώντας την παραγωγή ενέργειας βασισμένη στο πετρέλαιο σε μεγάλα φορτηγά πλοία, που απαιτεί έως 100MW ισχύος ανά πλοίο, θα μπορούσε να μειώσει τις ετήσιες εκπομπές του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία κατά 45%.

7.2.4. Το σύστημα **ONBOARD MICROGRID** της **ABB**

Νωρίτερα φέτος, η ABB ξεκίνησε το Onboard Microgrid, ένα συμπαγές σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το DC για μικρότερα σκάφη που χρησιμοποιούν μπαταρίες, καύσιμα ή συνδυασμό των δύο. Σχεδιασμένο για χρήση σε ρυμουλκά, επιβατηγά και σκάφη εργασίας, το Onboard Microgrid βασίζεται στις ίδιες αρχές με το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της ABB Onboard DC Grid για μεγαλύτερα σκάφη, όπως OSV ή πλοία υποστήριξης κατασκευών.

Το σύστημα επιτρέπει βελτιωμένη απόδοση και κατανομή φορτίου μεταξύ μπαταριών, κυψελών καυσίμου, βιοντίζελ ή προωστικών συστημάτων που λειτουργούν με βιοαέριο. Μπορεί να έχουμε μια σύνδεση DC και να συνδεθούν όλοι οι παράγωγοι ενέργειας στο σκάφος. Ανοίγει τις δυνατότητες για μπαταρία, καύσιμο, ντίζελ ή συνδυασμένα.

7.2.5 Οι μπαταρίες **Ιόντων Λιθίου (Li-ion)**

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και οι μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Li-ion), θέλοντας να αντικαταστήσουν τις κλασσικές μπαταρίες (μολύβδου οξέος, νικελίου καδμίου, νατρίου θείου, υδριδίου μετάλλου νικελίου).

Οι τεχνολογίες των κυψελών καυσίμου και των μπαταριών Li-ion έχουν ερευνηθεί και αναπτυχθεί αμφότερες πρόσφατα και σχεδόν παράλληλα σε μικρότερες εφαρμογές όπως τα ηλεκτρικά ποδήλατα και αυτοκίνητα και συχνά τίθενται σε σύγκριση μεταξύ τους.

Στον κάτωθι πίνακα φαίνεται μία σύγκριση των δύο αυτών τεχνολογιών.

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ	Αμφότερες τεχνολογίες θεωρούνται ως εξαιρετικά καθαρές . Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τα στάδια κατασκευής, και τις διαδικασίες φόρτισης των μπαταριών και παραγωγής του υδρογόνου αντίστοιχα έχει αποδειχθεί ότι επιβαρύνουν το περιβάλλον. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι έρευνες που έχουν γίνει για ηλεκτρικό αυτοκίνητο λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, δείχνουν παραγωγή CO ₂ , 120g/Km για τις μπαταρίες και 124g/Km για τις κυψέλες καυσίμου. Σημαντική μείωση της τιμής για τις κυψέλες καυσίμου με υδρογόνο παραγόμενο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	Οι κυψέλες καυσίμου είναι ενεργειακά πιο πυκνές από τις μπαταρίες Li-ion.

ΚΟΣΤΟΣ	Οι μπαταρίες είναι πιο φθηνή επιλογή με τις κυψέλες καυσίμου να έχουν αυξημένο κόστος συμπεριλαμβανομένης της τιμής του υδρογόνου.
ΑΥΤΟΝΟΜΙΑ - ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	Οι κυψέλες καυσίμου στον τομέα αυτόν υπερτερούν καθώς όσο τροφοδοτούνται με καύσιμα συνεχίζουν και παράγουν ενέργεια χωρίς να διακόπτεται η λειτουργία τους. Αντιθέτως οι μπαταρίες εκφορτίζονται και απαιτούν φόρτιση σε κατάλληλο σταθμό , διαδικασία που απαιτεί χρόνο, ενώ έχουν περιορισμένο αριθμό επαναφορτίσεων.
ΠΕΡΙΠΛΟΚΟΤΗΤΑ	Οι μπαταρίες αποτελούν πιο εύκολη επιλογή όσον αφορά τον χειρισμό ενώ οι κυψέλες καυσίμου θεωρούνται περίπλοκες.
ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ	Οι μπαταρίες είναι σχεδόν ακίνδυνες ενώ οι κυψέλες καυσίμου θεωρούνται ότι ενέχουν κινδύνους κυρίως λόγω του τρόπου αποθήκευσης του υδρογόνου με συμπίεση.
ΠΡΟΟΔΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ	Οι μπαταρίες είναι πλήρως ανεπτυγμένες σε μικρές εφαρμογές όπως ηλεκτρικά αυτοκίνητα από πολλές εταιρείες. Πιο λίγες εταιρείες έχουν αναπτύξει αντίστοιχα συστήματα κυψελών καυσίμου, με αρκετές να θεωρούν την τεχνολογία αυτή ως ενδεχόμενη μελλοντική και άλλες ως εντελώς ακατάλληλη για τέτοιες εφαρμογές. Απτην άλλη μεριά , σε πιο μεγάλης ισχύος εφαρμογές όπως στη ναυτιλία , οι μπαταρίες Li-ion βρίσκονται σε αρχικό στάδιο εφαρμογής ενώ οι κυψέλες καυσίμου έχουν αναπτυχθεί αρκετά χρόνια πριν. Αμφότερες τεχνολογίες έχουν δυναμική για εξέλιξη.

Σε σύγκριση με τις κλασσικές μπαταρίες οι μπαταρίες Li-ion έχουν **μικρότερο βάρος, υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα , μικρότερο χρόνο φόρτισης και μεγαλύτερο χρόνο ζωής**. Για το λόγο αυτό μεγάλο ενδιαφέρον για αυτές έχει δείξει τελευταία χρόνια και η ναυτιλία.

Και εδώ πρωτοπόροι στην εφαρμογή των μπαταριών Li-ion, είναι οι ένοπλες δυνάμεις με τη Γερμανία (TKMS) και την Ιαπωνία να έχουν ήδη αναπτύξει σχέδια και δοκιμάσει τέτοιου είδους μπαταρίες σε υποβρύχια, δείχνοντας ότι το μέλλον στις μπαταρίες υποβρυχίων είναι αυτές των Ιόντων Λιθίου.

Εκτίμαται από ειδικούς ότι όλα τα σύγχρονα εμπορικά πλοία θα έχουν σύντομα κάποια μορφή αποθήκευσης ενέργειας. Κάθε χρόνο υπάρχουν όλο και περισσότερα υβριδικά ή πλήρως ηλεκτρικά πλοία που πλέουν σε ύδατα σε όλο τον κόσμο. Αυτά τα σκάφη ποικίλουν σε τύπο, από επιβατηγά που μεταφέρουν χιλιάδες ανθρώπους καθημερινά, σε πλοία ανοιχτής θαλάσσης εφοδιασμού πλοίων ακόμη και σε κρουαζιερόπλοια. Αυτά τα σκάφη βασίζονται όλο και περισσότερο στην αποθήκευση ενέργειας Ιόντων Λιθίου ως κύρια ή βοηθητική πηγή ενέργειας, με μοντέρνα σχέδια που περιέχουν εκατοντάδες επιμέρους μονάδες (μπαταρίες). Η τεχνολογία έχει αποδειχθεί αξιόπιστη και ισχυρή, η έλλειψη ωστόσο ιστορικού απόδοσης πλήρως ηλεκτρικού πλοίου με μπαταρίες Li-ion, αφήνει για το μέλλον περιθώρια έρευνας.

Θα πρέπει να αναφερθεί, ότι οι μπαταρίες Li-ion δεν αποτελούν τεχνολογία χωρίς κίνδυνο. Το λίθιο προκαλεί πυρκαγιά όταν εκτίθεται στο νερό, μια επισφαλής κατάσταση ιδίως για ένα υποβρύχιο, και γενικότερα για ένα πλοίο , ενώ οι πυρκαγιές λιθίου είναι πολύ θερμές φτάνοντας έως και 2000 °C.

Ένα άλλο αρνητικό των μπαταριών Li-ion είναι η έκλυση θερμότητας όταν τα κύτταρα ιόντων λιθίου υποβάλλονται σε μηχανική καταπόνηση, υφίστανται εσωτερικές κατασκευαστικές ανωμαλίες ή λειτουργούν πάνω ή κάτω από τη σωστή τάση ή εσωτερική θερμοκρασία. Σε αυτές τις καταστάσεις, θερμότητα μπορεί να δημιουργηθεί εντός των κυττάρων ιόντων λιθίου η οποία μπορεί να αυξηθεί σε σημείο στο οποίο τήκονται οι διαχωριστές μέσα στα κύτταρα. Αυτό προκαλεί μια αντίδραση μεταξύ του υλικού καθόδου και του ηλεκτρολύτη και μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας μέχρις ότου η κυψέλη εκλύει τοξικά και εύφλεκτα αέρια. Εάν προκύψει ανάφλεξη, αυτά τα αέρια μπορούν να δημιουργήσουν μια απρόβλεπτη πυρκαγιά, η οποία μπορεί να είναι πολύ δύσκολο να σβήσει. Σε αρκετά μεγάλες συγκεντρώσεις σε ένα μη αεριζόμενο χώρο, αυτά τα αέρια είναι ικανά να προκαλέσουν πολύ μεγάλες εκρήξεις.

Χαρακτηριστικό πρόσφατο παράδειγμα, στις 11 Οκτωβρίου 2019, μία έκρηξη στο Νορβηγικό σκάφος Ytterøyningen ενώ ήταν ελλιμενισμένο στο στο Sydnnes της Νορβηγίας. Το σκάφος, το οποίο μετασκευάστηκε πρόσφατα με υβριδικό σύστημα κίνησης μπαταριών Ιόντων Λιθίου, αποτελεί μέρος του νέου στόλου σκαφών χαμηλών και μηδενικών εκπομπών, που αναπτύσσεται σε όλη τη Νορβηγία και σε άλλα μέρη του κόσμου. Το σκάφος βρισκόταν



στην αποβάθρα και είχε αποσυρθεί από τη λειτουργία το προηγούμενο βράδυ λόγω πυρκαγιάς στους συσσωρευτές πρόωσης Li-ion, δημιουργώντας έτσι την προαναφερόμενη έκλυση θερμότητας. Η αιτία της πυρκαγιάς δεν έχει ακόμα ανακοινωθεί επίσημα, αλλά η δευτερογενής έκρηξη προκάλεσε σημαντικές δομικές

ζημιές στο πλοίο, που πιθανότατα ήταν αποτέλεσμα συσσώρευσης εκρηκτικών αερίων κάτω από το κατάστρωμα. Ευτυχώς, κανένα από τα 15 άτομα που εισήχθησαν στο νοσοκομείο δεν τραυματίστηκε σοβαρά.

Εν κατακλείδι, υπάρχει πολύ μικρή εμπειρία σε ένα πλήρως ηλεκτρικό πλοίο με πηγή ενέργειας τις μπαταρίες Li-ion καθώς έχουν αναπτυχθεί λίγα επιβατηγά περιορισμένων διαδρομών. Ως εκ τούτου, ο υβριδισμός με άλλα συστήματα αποθήκευσης ή παραγωγής ενέργειας είναι η μόνη λύση που μπορεί να εφαρμοστεί σε εφαρμογές υψηλής απαίτησης πυκνότητας ισχύος/ενέργειας όπως αυτές της ναυτιλίας.

Αυτός είναι και ένας λόγος για τον οποίο εκτός από τη γενικευμένη σύγκριση των μπαταριών Li-ion με τις κυψέλες καυσίμου που παρουσιάστηκε αρχικά, δεν είναι ακόμα εφικτή περαιτέρω σύγκριση αυτών για εφαρμογές ναυτιλίας. Εξάλλου, όπως είδαμε ανωτέρω, και σε πλοία που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου είναι απαραίτητος ο υβριδισμός αυτών με μπαταρίες. Η σύγκριση ωστόσο ναυτιλιακών εφαρμογών με αμιγώς τις δύο τεχνολογίες είναι ένα θέμα που θα αποτελέσει σίγουρα αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ - ΑΝΤΙ ΕΠΙΛΟΓΟΥ

Με την αυξανόμενη πίεση στη ναυτιλία για τη μείωση των επιβλαβών εκπομπών, οι τεχνολογίες κυψελών καυσίμου και υδρογόνου είναι έτοιμες να εισέλθουν στα ύδατα αυτά

και να αναπτυχθούν περαιτέρω, καθώς ήδη δρομολογούνται έργα που χρησιμοποιούν τεχνολογία υδρογόνου για επιβατικά πλοία και ταχύπλοα σκάφη μεγάλης ισχύος.

Η χρήση εδώ και δύο δεκαετίες περίπου συστημάτων κυψελών καυσίμου ως κύρια ή δευτερεύουσα πηγή ενέργειας στα υποβρύχια είναι απτή απόδειξη ότι ένα τέτοιο σύστημα σε συνδυασμό με μπαταρίες αποθήκευσης ενέργειας, είναι εφικτό και αξιόπιστο.

Στη σύγχρονη εποχή, κρουαζιερόπλοια με σταθερές διαδρομές, σκάφη εργασίας και πλοία ανοικτής θαλάσσης είναι επίσης παραδείγματα τομέων πλοίων όπου το υδρογόνο είναι καλά εναρμονισμένο. Το μέλλον των θαλάσσιων ναυτιλιακών και μεταφορικών βιομηχανιών μπορεί να είναι πράσινο και βιώσιμο, με τεχνολογίες κυψελών καυσίμου και υδρογόνου.

Εν κατακλείδι, χαρακτηριστικές είναι οι δηλώσεις των διευθύνοντων συμβούλων των εταιρειών HYON AS και ABB στο Ναυτιλιακό Υβριδικό και Ηλεκτρικό Συνέδριο της Riviera στο Bergen της Νορβηγίας τον Σεπτέμβριο του 2019:

Tomas Tronstad (Hyon AS):

"Η επιχειρηματική υπόθεση των κυψελών καυσίμου υδρογόνου αρχίζει να κερδίζει δυναμική".

"Εντός πέντε ετών, τα πλοία που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου με υδρογόνο και μπαταρίες θα αποτελέσουν σημαντικό τμήμα του παράκτιου στόλου".

Jorulf Nergard (ABB):

"Η ώθηση για την πρόωση υβριδικής μπαταρίας και κυψελών καυσίμου είναι η μείωση των GHG".

ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

L. van Biert, M. Godjevac, K. Visser, P.V. Aravind	“ <i>A review of fuel cell systems for maritime applications</i> ” Journal of Power Sources, Vol. 327, pp. 354-364 (2016)
Naohiro Saito	“ <i>The economic analysis of commercial ships with hydrogen fuel cell through case studies</i> ” (2018) World Maritime University Dissertations
Olaf Deutschmann	“ <i>Catalytic reforming of logistic fuels at high-temperatures</i> ” (2012) Karlsruher Institut
Hui Chen, Zehui Zhang, Cong Guan	“ <i>Optimization of Hybrid Energy Storage System for Fuel Cell Ship Propulsion System</i> ” Wuhan University of Technology
Sepideh Afarzadeh, Ingrid Schjøberg, Klaas Visser, Lindert van Biert, Rafael d’Amore-Domenech, Antonio Villalba-Herreros, Teresa J. Leo	“ <i>Fuel cell solutions for maritime applications: possibilities and challenges</i> ” NTNU, TU Delft, Universidad Politécnica de Madrid
Tomas Tronstad, Hanne Høgmoen Åstrand, Gerd Petra Haugom, Lars Langfeldt	“ <i>Study on the use of fuel cells in shipping</i> ” (2017) EMSA European Maritime Safety Agency
James Larminie, Andrew Dicks	“ <i>Fuel Cell Systems Explained</i> ” (2003)
Jingang Han, J. F. Charpentier, Tianhao Tang	“ <i>State of the Art of Fuel Cells for Ship Applications</i> ” (2012) French Naval Academy Research Institute , France Department of Electrical Engineering, Shanghai Maritime University
Jonathan Wing	“ <i>Fuel Cells and Submarines</i> ” (2013)
Σπυρίδων Βουτετάκης, Ευθύμιος Κικκινίδης, Γεώργιος Μαρνέλλος, Λεωνίδας Ντζιαχρήστος, Ιωάννης Παναπακίδης,	“ <i>Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του "καυσίμου του μέλλοντος" - H₂</i> ” (2010) Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας – Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας Μόνιμη Επιτροπή Ενέργειας
Bureau Veritas France, Marine Division	“ <i>Guidelines for Fuel Cell Systems Onboard Commercial Ships</i> ” (2009)

<p>Muhammad Umair Mutarraf Yacine Terriche, Kamran Ali Khan Niazi , Juan C. Vasquez Josep M. Guerrero</p>	<p>“Energy Storage Systems for Shipboard Microgrids—A Review” (2018) Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark</p>
<p>Fuel Cell Energy & Hydrogen Association (FCEHA)</p>	<p>http://www.fchea.org/transportation http://www.fchea.org/in-transition/2018/10/23/shipping-propulsion http://www.fchea.org/regulations-codes-standards/ http://www.fchea.org/fuelcells</p>
<p>U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE)</p>	<p>https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-delivery</p>
<p>http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/hydrogen-fuel-cells-becoming-viable-in-maritime-sector-56714 https://www.rivieramm.com http://www.samsungshi.com/Eng/pr/news_view.aspx?Seq=1127&mac=3b071cb26f3a5cbd0b63a5ac0857622e https://www.h2-view.com/story/bloom-energy-parts-with-samsung-heavy-industries/ https://www.dnvgl.com/maritime/alternative-fuels-and-technologies-in-shipping/fuels-technology.html http://www.fuelcellstandards.com https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment_en https://cordis.europa.eu/project/id/516270/reporting https://cordis.europa.eu/project/id/31414 http://hyer.eu/best-practices/zemships/ https://www.e4ships.de/english/about/previous-project/ https://maritimecleantech.no/2019/01/15/zeff-towards-zero-emission-fast-ferries/ https://maritimecleantech.no/2018/12/14/new-hydrogen-projects-to-accelerate-the-technology-shift/ http://www.linde-gas.gr/en/images/8360_MSDS_Greek_Hydrogen_tcm465-128540.pdf https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/public.1535009488.28615cde70250d0e81b68ba466bd77d7f5c68c73.sinavy-pem-fuel-cells.pdf https://engineered.thyssenkrupp.com/en/the-submarine-revolution-lithium-ion-battery-system-for-more-performance/ https://www.ship-technology.com/features/lithium-ion-batteries-new-safety-issue-ships/ https://gcaptain.com/safety-concerns-for-hybrid-electric-ships/ https://www.theweek.co.uk/electric-cars/101196/hydrogen-fuel-cell-vs-battery-electric-cars-which-are-better</p>	