

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ :

**ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΟΩΣΗ –
ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ :

ΝΟΤΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΠΑΠΑΣΤΑΜΟΥΛΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ

2016

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ –
ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΝΟΤΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΑΜ:4464

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ:

Ο καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία αναφέρεται η εξέλιξη των κυψελών καυσίμων στην ηλεκτροπρόωση και η μετατροπείς ισχύος του συστήματος.

Βασική αρχή λειτουργίας των κυψέλων καυσίμου είναι η μετατροπή της χημικής ενέργειας που περιλαμβάνεται σε καύσιμα (υδρογόνο, φυσικό αέριο, μεθανόλη, βενζίνη, κ.λπ...) άμεσα σε ηλεκτρική ισχύ. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγουμε τις ενδιάμεσες απώλειες που έχουν οι άλλοι τρόποι παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Επίσης, σημαντική λεπτομέρεια είναι και το ότι η αποδοτικότητα των κυψελών καυσίμου δεν περιορίζεται από τα όρια του Carnot που υποχρεωτικά ακολουθούν οι μηχανές καύσης. Οι εκπομπές των κυψέλων καυσίμου δεν συμπεριλαμβάνουν τα συνηθισμένα προϊόντα καύσης (SO_x, CO, άλλα μόρια, και διάφοροι άκαυτοι ή μερικώς καμένοι υδρογονάνθρακες).

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφονται οι κυψέλες καυσίμου. Γίνεται μια εισαγωγή στην ιστορική αναδρομή τους, εξηγείται η δομή τους και οι αρχές λειτουργίας τους. Στη συνέχεια δίνονται συνοπτικά οι τρόποι παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς του υδρογόνου. Γίνεται μια προσπάθεια για μια περιγραφή των κύριων κατηγοριών κυψελών καυσίμου και των ιδιοτήτων κάθε μιας από αυτές. Αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Το κεφάλαιο αυτό κλείνει με τις εφαρμογές τους στα μέσα μεταφοράς σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τις εμπορικές τους εφαρμογές.

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται οι σύγχρονες εξελίξεις στην τεχνολογία ηλεκτροπρόωσης πλοίων. Αναφέρονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της. Και τέλος, παρουσιάζεται η χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος στα συστήματα των κυψελών καυσίμου.

ABSTRACT

In this project is indicated the development of fuel cells in electric propulsion and system power converters.

Basic principle for the operation of fuel cells is the conversion of chemical energy contained in fuels (hydrogen, natural gas, methanol, gasoline, etc ...) directly to electrical power. In this way we avoid the intermediate losses appeared in other ways of producing electricity. Also important detail is that the efficiency of fuel cells is not restricted by the limits of Carnot that necessarily follow all the combustion engines. Emissions of fuel cells does not contain the usual combustion products (SO_x, CO, other molecules, and various unburnt or partially burnt hydrocarbons).

The first chapter describes the fuel cells. There is an introduction to the historical review, the structure and operation principles are explained. Then briefly are given methods of storage, production and transport of hydrogen. An attempt is made in order to describe the main types of fuel cells and the properties of them. Advantages and disadvantages of them are indicated. This chapter ends with their applications to means of transport to production units of electric energy and their commercial applications.

To the following chapters the current developments of technology in the ships' electric propulsion are presented. The main advantages and disadvantages are mentioned. And finally, the use of electronic power converters for fuel cell systems is presented.



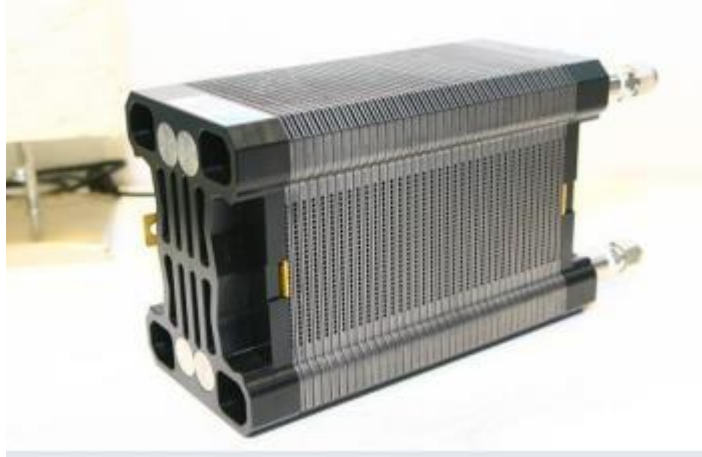
ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στα πλαίσια της αναζήτησης νέων μεθόδων παραγωγής ενέργειας υψηλής απόδοσης και φιλικής προς το περιβάλλον, ένα μεγάλο μέρος των ερευνητικών δραστηριοτήτων σε διεθνή κλίμακα έχει στραφεί στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου. Λόγω της φιλικότητάς τους προς το περιβάλλον οι κυψέλες καυσίμου μπορεί να εισαχθούν για χρήση και σε αστικές περιοχές, όπου παράλληλα με την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί και η εκλυόμενη θερμική ενέργεια για θέρμανση χώρων, αυξάνοντας συνολικά την αποτελεσματικότητά τους. Επιπλέον μπορούν να κάνουν χρήση έναν μεγάλο αριθμό υπαρχόντων καυσίμων όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, το προπάνιο, το μεθάνιο, τη μεθανόλη και το υδρογόνο και να παρέχουν ενέργεια σχεδόν σε οποιαδήποτε εφαρμογή, με βελτιωμένη απόδοση και αξιοπιστία. Σε αυτά τα πλαίσια γίνεται μία ανασκόπηση των σύγχρονων τάσεων σχεδίασης και κατασκευής των ηλεκτρικών κινητήρων και των κυκλωμάτων οδήγησής τους αλλά και του όλου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας των σύγχρονων ναυπηγήσεων υπό την προοπτική της υλοποίησης του πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου.

Τέλος η εργασία αυτή κλείνει με μια σύνοψη η οποία έχει ως στόχο την εξαγωγή κάποιων βασικών συμπερασμάτων όπου είναι ωφέλημα στον αναγνώστη για την καλύτερη κατανόηση του θέματος όπου πραγματεύεται η παρούσα πτυχιακή εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ



1.1 Επεξήγηση της έννοιας της Κυψέλης Καυσίμου

Με τον όρο κυψέλες καυσίμου ονομάζουμε τις ηλεκτροχημικές συσκευές, οι οποίες έχουν την δυνατότητα να συμβάλουν στην μετατροπή μιας ελεύθερης χημικής ενέργειας μιας οποιασδήποτε ενέργειας σε ηλεκτρική με άμεσο τρόπο. Η κύρια διάρθρωση όπου έχει μια κυψέλη καυσίμου είναι η εξής: Καταρχάς σαν βασικό συστατικό έχει έναν ηλεκτρολύτη συνήθως υγρό ή στερεό ο οποίος έρχεται σε επαφή με δυο πορώδη ηλεκτρόδια τα οποία με την σειρά τους είναι συνδεδεμένα με εξωτερικό ηλεκτρόδιο. Μέσα σε αυτά τα ηλεκτρόδια υπάρχει τροφοδότηση αερίων ούτως ώστε να μπορεί να επιτευχθεί αντίδραση οξείδωσης στο ηλεκτρόδιο το οποίο παρουσιάζει ανοδική τάση και αντίδραση αναγωγής στο ηλεκτρόδιο το οποίο παρουσιάζει καθοδική τάση. Οι δυο ηλεκτροχημικές αντιδράσεις όπου συντελούνται στα ηλεκτρόδια έχουν την δυνατότητα να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο με την σειρά του καταναλώνεται στο εσωτερικό κύκλωμα.

Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου μπορεί κάλλιστα να εμφανίσει κοινά στοιχεία με τον τρόπο λειτουργίας μιας κοινής κλασικής μπαταρίας. Όμως τα δυο κυκλώματα έχουν διαφορές σε ότι αφορά την σύσταση αλλά και την λειτουργία τους. Η μπαταρία έχει τον ρόλο αποθήκης ενέργειας και με την σειρά της παράγει ενέργεια έως ότου συντελεστεί η εξάντληση των αντιδρώντων όπου βρίσκονται μέσα στον βασικό κορμό της μπαταρίας. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αποφόρτιση.

Για να είναι δυνατή η λειτουργία της θα πρέπει να υπάρξει αντικατάσταση των αντιδρώντων μέσω της διαδικασίας της αποφόρτισης. Σε αντίθετη περίπτωση στις κυψέλες καυσίμου οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις δεν παύουν να χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρόδια για όσο διάστημα τροφοδοτηθούν με αέρια. Πέρα όμως από την δυνατότητα όπου υπάρχει για να παραχθεί ενέργεια τα οφέλη όπου προκύπτουν από τις κυψέλες καυσίμου τόσο σε περιβαλλοντικό επίπεδο όσο και σε λειτουργικό γίνονται φανερά στην συνέχεια. Υπάρχει η δυνατότητα από τις κυψέλες καυσίμου να συμπαράγουν πολλές χρήσιμες παροχές όπως π.χ ζεστό νερό με την ταυτόχρονη παράγωγη ενέργειας.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η πρώτη κυψέλη καυσίμου αναπτύχθηκε στην Μ. Βρετανία το 1839 από τον Sir William Grove. Ο Grove θεωρούσε ότι εφόσον μπορούσαν να γίνουν δυο διαφορετικά στοιχεία βοηθούμενα από την ηλεκτρική ενέργεια το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο με την βοήθεια μιας αντίστροφης διαδικασίας και εφόσον έχει προκληθεί αντίδραση του υδρογόνου και του οξυγόνου παράγοντας ηλεκτρισμό θα είναι εφικτή να πραγματοποιηθεί. Για να εφαρμοστεί η διαδικασία αυτή έβαλε δυο λωρίδες πλατίνας σε χωριστές σφραγισμένες φιάλες όπου η μια περιείχε υδρογόνο και η άλλη οξυγόνο. Έτσι όταν οι φιάλες αυτές ήταν βυθισμένες σε ένα ηλεκτρικό οξύ μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος ξεκίνησε να εισρέει ανάμεσα από τα δυο ηλεκτρόδια και άρχισε να παράγεται υγρό από τις φιάλες οξυγόνου. Για να μεγαλώσει η ποσότητα της ηλεκτρικής τάσης όπου παράγονταν, ο Grove προέβει στην σύνδεση των συσκευών στην σειρά έτσι ώστε να είναι σε θέση να φτιάξει τις μπαταρίες αερίου όπως της ονόμασε ο ίδιος. Ο ορός κυψέλη καυσίμου επινοήθηκε από τους χημικούς Ludwig Mond και Charles Langer το έτος 1889 στην προσπάθειά τους να κατασκευάσουν την πρώτη συσκευή με την χρησιμοποίηση ατμοσφαιρικού αέρα καθώς και βιομηχανικά αέρια του άνθρακα.

Στο διάστημα όπου μεσολάβησε επιστήμονες αλλά και μηχανικοί διαπίστωσαν ότι θα έπρεπε να ξεπεραστούν πολλοί σκόπελοι δυσκολιών για να διατεθεί στο εμπόριο αυτή η ευρεσιτεχνία. Μέχρι περίπου τα μέσα του 19^{ου} αιώνα η εφαρμογή του κινητήρα εσωτερικής καύσης αποτελούσε το κέντρο βάρους των επιστημόνων αλλά και η πολύ μεγάλη εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων είχε σαν αποτέλεσμα οι επιστήμονες να απομακρυνθούν από την εκμετάλλευση της ιδέας της κυψέλης καυσίμου.

Το επόμενο μεγάλο βήμα σε ότι αφορά την ιστορική εξέλιξη των κυψελών καυσίμου πραγματοποιήθηκε από τον μηχανικό Dr Thomas Francis Bacon στην Αγγλία και συγκεκριμένα στο πανεπιστήμιο του Cambridge. Το έτος 1932 έγινε επαναγορά της κυψέλης καυσίμου η οποία

είχε αναπτυχθεί από τους Mond και Langer καθώς τροποποίησαν την ιδέα του αρχικού σχεδίου. Οι νέες προσθήκες όπου έγιναν είχαν σαν επίκεντρο να συμπερίλαβαν την αντικατάσταση των ηλεκτροδίων πλατίνας με νικελίου γάζας τα οποία είχαν το μικρότερο δυνατό κόστος. Ακόμη αντικαταστάθηκαν οι ηλεκτρολύτες θεικού οξέως με αλκαλικό υδροξείδιο του καλίου. Η νέα ουσία όπου προστέθηκε διάβρωνε σε λιγότερο βαθμό τα ηλεκτρόδια. Η νέα συσκευή όπου τέθηκε σε εφαρμογή πήρε την ονομασία κυψέλη Bacon», ήταν κατ ουσία η πρώτη κυψέλη καυσίμου κατασκευασμένη από αλκαλικό υλικό.

Μετά την πάροδο 27 ετών ο Bacon θα αρχίσει να κατασκευάζει μια κυψέλη καυσίμου η οποία θα είναι πλήρως λειτουργική και θα διατίθεται στο εμπόριο. Το 1959 ο ίδιος σε ένα συνέδριο θα εμφανίσει μια κυψέλη καυσίμου η οποία είναι δυνατόν να παράγει 6kW ηλεκτρική ισχύ.

Ακόμη στα τέλη του 1959 ο Harry Karl Ihrig άρχισε να κατασκευάζει το πρώτο όχημα όπου για την κίνηση του χρησιμοποιούνταν κυψέλες καυσίμου. Το όχημα αυτό είχε ιπποδύναμη 20hp (15kW) (L. Arker, 1948).



Σχήμα 1.1 Ο Bacon με την κυψέλη καυσίμου των 6KW

Στα μέσα της δεκαετίας του 1950 καθώς και στις αρχές του 1960 υπάρχει μια πολύ έντονη κινητικότητα σε ότι αφορά την κυψέλη καυσίμου. Οι επιστήμονες της NASA ήθελαν να βρουν έναν τρόπο με τον οποίο θα τροφοδοτούνταν οι διαστημικές πτήσεις όπου επρόκειτο να πραγματοποιηθούν. Οι μπαταρίες οι οποίες χρησίμευαν στην τροφοδοσία είχαν ήδη απορριφθεί εξαιτίας του μεγάλου τους όγκου. Εκείνη την εποχή το κόστος της ηλιακής ενέργειας ήταν ιδιαίτερα δαπανηρό και η χρήση της πυρηνικής ενέργειας αποτελούσε επικίνδυνο παράγοντα. Έτσι η NASA έπειτα από πολλές έρευνες κατέληξε ότι η μοναδική συμφέρουσα λύση όπου την εξυπηρετούσε ήταν η χρησιμοποίηση των κυψελών καυσίμου. Ο τρόπος αυτός στον οποίο κατέληξε αποτελούσε έναν εναλλακτικό τρόπο παράγωγης ηλεκτρικής ενέργειας.

Ξεκινά να χρηματοδοτεί έρευνες οι οποίες είχαν σαν στόχο να βελτιώσουν την παράγωγη αλλά και την λειτουργία των κυψέλων καυσίμου. Οι έρευνες αυτές τελικά τελεσφορούν όταν κατασκευάζεται η πρώτη κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell-PEMFC). Το αποτέλεσμα αυτών των ερευνών ήταν τα προγράμματα διαστημικού ενδιαφέροντος να εφαρμόσουν την χρήση κυψέλων καυσίμου. Την δεκαετία του 1970 η τεχνολογία των κυψέλων καυσίμου αρχίζει σταδιακά να αναπτύσσεται για συστήματα επίγεια.

Ο αποκλεισμός από τις αραβικές πηγές πετρελαίου το 1973 και το 1979 έδωσε την ευκαιρία να αναπτυχθεί περαιτέρω ο τομέας της έρευνας σε ότι αφορά την λειτουργία των κυψέλων καυσίμου καθώς οι εταιρίες τόσο στην Ευρώπη όσο και στις ΗΠΑ έψαχναν εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έτσι ώστε να μην εξαρτώνται τόσο πολύ από τις εισαγωγές πετρελαίου.

Διάφορες κυβερνητικές οργανώσεις σε συνεργασία με εταιρίες χρηματοδότησαν την διαδικασία με την οποία οι κυψέλες καυσίμου θα ήταν εμπορικά διαθέσιμες.

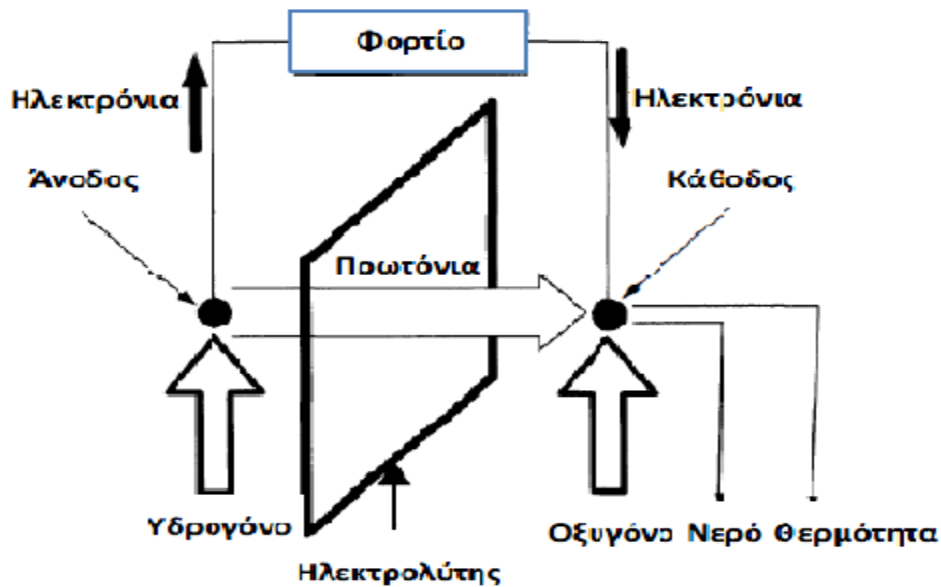
Σε όλη την δεκαετία του 1970 και του 1980 οι έρευνες όπου διεξήχθησαν είχαν σαν άμεσο στόχο να αναπτύξουν υλικά τα οποία θα ήταν σε θέση να δώσουν την μέγιστη απόδοση ενέργειας μειώνοντας δραστικά το κόστος λειτουργίας των κυψέλων καυσίμων.

Στην διάρκεια των τελευταίων ετών έχουν γίνει σοβαρές προσπάθειες έτσι ώστε οι κυψέλες καυσίμου να χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.

1.3 Βασικές Αρχές Λειτουργίας Κυψέλης Υδρογόνου

Η βασική αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου ουσιαστικά είναι το αντίθετο της ηλεκτρόλυσης. Με την ηλεκτρόλυση το νερό διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο όταν μέσα από αυτό διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα. Αντίθετα, στις κυψέλες καυσίμου το υδρογόνο αντιδρά και ενώνεται με το οξυγόνο σχηματίζοντας νερό, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα.

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου αποτελούν συστοιχίες κελιών εκ των οποίων το καθένα παράγει ηλεκτρισμό μετατρέποντας τη χημική ενέργεια της αντίδρασης του υδρογόνου με το οξυγόνο απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Γενικά, η κύρια δομή ενός κελιού καυσίμου αποτελείται από δύο πορώδη ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο, τα οποία διαχωρίζονται από ένα στρώμα ηλεκτρολύτη που τοποθετείται ενδιάμεσα σε αυτά. Στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων διασπείρεται καταλύτης που σκοπό έχει να επιταχύνει την αντίδραση οξείδωσης. Η γενική αρχή λειτουργίας ενός κελιού καυσίμου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

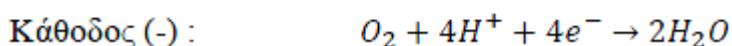


Σχήμα 1.2 Η βασική αρχή λειτουργίας ενός κελιού καυσίμου με ροή πρωτονίων διαμέσου του ηλεκτρολύτη.

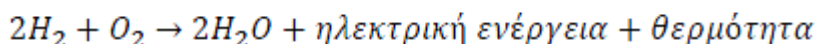
Στο παραπάνω κελί, η άνοδος τροφοδοτείται συνεχώς με καύσιμο υδρογόνο ενώ η κάθοδος με αέρα, το οξυγόνο του οποίου αποτελεί το οξειδωτικό μέσο που θα αντιδράσει με το καύσιμο υδρογόνο στην κάθοδο του κελιού για να σχηματίσει νερό. Αναλυτικότερα, τα μόρια υδρογόνου εισερχόμενα στην άνοδο διασπώνται με τη βοήθεια του καταλύτη που είναι διεσπαρμένος στην επιφάνειά της σε ηλεκτρόνια και θετικά ιόντα (πρωτόνια). Τα ιόντα του υδρογόνου οδεύουν στην κάθοδο διαμέσου του ηλεκτρολύτη ενώ τα ηλεκτρόνια, αδυνατώντας να διέλθουν μέσα από αυτόν, οδεύουν προς την κάθοδο διαμέσου ενός εξωτερικού κυκλώματος (φορτίου) με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος. Στην κάθοδο τα ιόντα συνδέονται με τα ηλεκτρόνια και τα μόρια οξυγόνου που εισέρχονται με το ρεύμα του τροφοδοτούμενου αέρα, επίσης με τη βοήθεια καταλύτη για να επιταχυνθεί η αντίδραση και σχηματίζουν νερό παράγοντας ταυτόχρονα και μια ποσότητα θερμότητας. Έτσι, ουσιαστικά η ολική αντίδραση που λαμβάνει χώρα μέσα σε ένα κελί καυσίμου περιγράφεται από δύο επιμέρους αντιδράσεις, μία αντίδραση οξείδωσης και μία αναγωγής.

Η αντίδραση οξείδωσης που συμβαίνει στην άνοδο του κελιού αντιστοιχεί στη διάσπαση των μορίων υδρογόνου σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια, ενώ κατά την αντίδραση αναγωγής που λαμβάνει χώρα στην κάθοδο τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια υδρογόνου συνδέονται με τα μόρια του οξυγόνου για το σχηματισμό νερού.

Οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στην άνοδο και την κάθοδο του κελιού καυσίμου όξινου ηλεκτρολύτη είναι αντίστοιχα οι ακόλουθες:

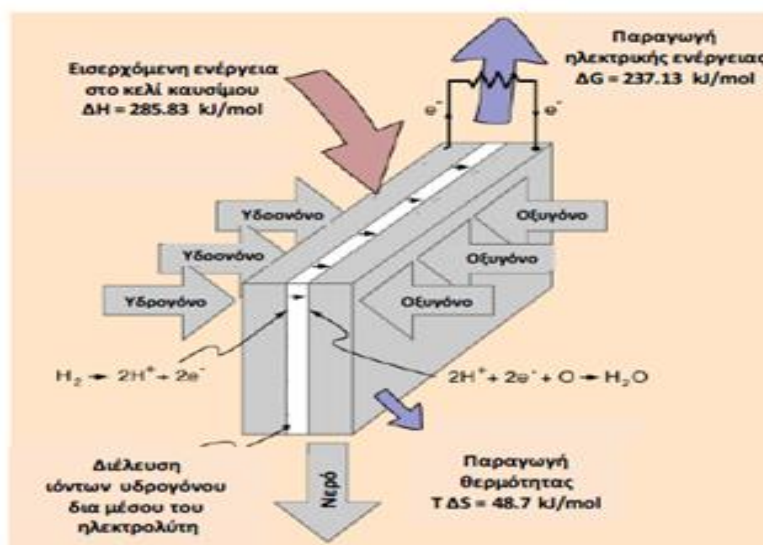


Απαραίτητη προϋπόθεση για τη διατήρηση των αντιδράσεων είναι η διαρκής ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο διαμέσου ενός κλειστού κυκλώματος καθώς και η συνεχής διέλευση των κατιόντων υδρογόνου μέσω του ηλεκτρολύτη. Η συνολική χημική αντίδραση που συμβαίνει μέσα στην κυψέλη καυσίμου είναι η ακόλουθη:



Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3 το τελικό προϊόν της όλης διεργασίας είναι νερό. Επίσης στο κελί του κύματος αυτού η συνολική ενέργεια που εισέρχεται στο κελί καυσίμου είναι 285.83 kJ/mol, ενώ παράγεται θερμότητα ίση με 48.7 kJ/mol και ηλεκτρική ενέργεια ίση με 237.13 kJ/mol.

Ανάλογα με το είδος και τις χημικές ιδιότητες του ηλεκτρολύτη, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της κυψέλης και η εσωτερική θερμοκρασία λειτουργίας της διαφέρουν. Επίσης, σε διαφορετικές κυψέλες καυσίμου η πόλωση των ιόντων και η κατεύθυνση μεταφοράς τους μπορεί να διαφέρει, καθορίζοντας αντίστοιχα την περιοχή παραγωγής νερού και απομάκρυνσής του. Αν τα ιόντα που παράγονται είναι θετικά, όπως στην περίπτωση που ο ηλεκτρολύτης είναι όξινος τότε το νερό παράγεται στην κάθοδο ενώ αντίθετα αν τα ιόντα είναι αρνητικά, όπως στις κυψέλες καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη, στερεών οξειδίων και στις κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων, τότε το νερό σχηματίζεται στην άνοδο, χωρίς ωστόσο αυτό να αναιρεί το γεγονός ότι το ηλεκτρικό ρεύμα θα παραχθεί ως αποτέλεσμα της ροής των ηλεκτρονίων μέσα από το εξωτερικό κύκλωμα.



Σχ.1.3 Εισερχόμενα και εξερχόμενα ρεύματα υλικών και ενέργειας σε μια κυψέλη καυσίμου (PEM)

1.4 Τα Είδη των Κυψελών Καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν ως ακολούθως:

α) **Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)**, όπου χρησιμοποιείται KOH ως ηλεκτρολύτης σε συγκέντρωση 85 wt% όταν η κυψέλη λειτουργεί σε θερμοκρασία 250 °C και σε συγκέντρωση 35 – 50 wt% για θερμοκρασίες μικρότερες των 120 °C.

Τέτοιου είδους κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιήθηκαν στο διαστημικό πρόγραμμα Apollo.

β) **Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)**, όπου χρησιμοποιείται πολυμερές περφλουροσουλφιδικό οξύ ως ηλεκτρολύτης. Ο καταλύτης αποτελείται από πλατίνα που εναποτίθεται σε στρώμα άνθρακα. Εάν η τροφοδοσία με υδρογόνο περιέχει μέρη μονοξειδίου του άνθρακα, τότε χρησιμοποιούνται κράματα Pt –Ru ως καταλύτες. Η θερμοκρασία λειτουργίας αυτών των κυψελών κυμαίνεται μεταξύ 60 και 80 °C. Τα PEMFC είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικά για εφαρμογές στην αυτοκίνηση, αλλά και σε σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας για κατανεμημένη παραγωγή.

γ) **Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως (PAFC)**, όπου χρησιμοποιείται φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτης. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται μεταξύ 150 και 220 °C. Τα PAFC έχουν εισέλθει στην παγκόσμια αγορά σε σταθμούς βάσης με ισχύ της τάξεως των 200 kW.

δ) **Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)**, στις οποίες ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από ανθρακικά αλκάλια μέσα σε μία κεραμική μήτρα από LiAlO₂. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας βρίσκονται μεταξύ 600 και 700 °C. Σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες δεν απαιτούνται ευγενή μέταλλα ως καταλύτες. Αυτού του τύπου κυψέλες καυσίμου έχουν εφαρμοστεί σε πειραματικούς σταθμούς βάσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

ε) **Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)**, στις οποίες χρησιμοποιείται ένα μη πορώδες στερεό οξείδιο ως ηλεκτρολύτης. Αυτές οι κυψέλες λειτουργούν στους 800 με 1000 °C, στις οποίες έχουμε αγωγή ιόντων οξυγόνου. Τα SOFC, όμοια με τα MCFC, χρησιμοποιούνται σε πειραματικούς σταθμούς βάσης παραγωγής αλλά και σε φορητές μονάδες ως βοηθητική πηγή σε οχήματα.

Πολλές φορές οι κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC) αποτελούν ξεχωριστή κατηγορία, αλλά με βάση τα ανωτέρω κριτήρια (το είδος του ηλεκτρολύτη) εμπεριέχονται στις κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, όπου αντί ως καύσιμο χρησιμοποιούν μεθανόλη αντί για υδρογόνο.

1.5 Τροφοδοσία Κυψέλων Καυσίμου

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε λόγος για την επιστήμη και την τεχνολογία που σχετίζονται με τις κυψέλες καυσίμων άλλα και την λειτουργία αυτών. Πέρα όμως από την απόδοση που έχουν οι κυψέλες καυσίμων και τους παράγοντες οι οποίοι οδηγούν σε μια καλύτερη λειτουργία ένα σοβαρό και μεγάλο ζήτημα άλλα και παράλληλα ένα μεγάλο στοίχημα που αφορά την μετάβαση παραγωγής ενέργειας με χρήση μηχανών εσωτερικής καύσης στην παραγωγή ενέργειας με κυψέλες καυσίμου είναι η συνεχόμενη εύκολη και συνάμα φθηνή τροφοδοσία των κυψέλων καυσίμου με τα καύσιμα όπου απαιτούνται για την λειτουργία της. Με την ονομασία τροφοδοσία εννοείται το σύστημα το οποίο είναι ολοκληρωμένο και σχετίζεται με την μεταφορά αποθήκευση και διανομή των καυσίμων εκείνων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κυψέλες καυσίμων με μια διαδικασία εύκολη γρήγορη και αποτελεσματική και πρωτίστως οικονομική. Το καύσιμο εκείνο το οποίο επιλέγεται για τις περισσότερες κυψέλες καυσίμου είναι το υδρογόνο το οποίο όμως δεν μπορεί να διατεθεί σε μορφή στοιχείου. Έτσι σε ότι αφορά την χρήση του σε κυψέλες καυσίμου είναι απαραίτητο να παραχθεί από άλλες πηγές και στην συνέχεια να παραχθεί στο μέρος όπου βρίσκεται η να μεταφερθεί στο μέρος όπου πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν κινητές μορφές ενέργειας η μορφή του υδρογόνου θα πρέπει να παράγεται σε κεντρικό σημείο και κατόπιν να μεταφέρεται στο σύστημα διανομής φθάνοντας στους κεντρικούς χρήστες. Σε περίπτωση όμως όπου η μορφή ενέργειας είναι σταθερή αρκεί να έχει συνδεθεί η εγκατάσταση με ένα δίκτυο διανομής καυσίμου το οποίο είναι επίγειο.

1.5.1 Μέθοδοι Παραγωγής Υδρογόνου

Τα μέσα παραγωγής υδρογόνου στην πιο απλή τους μορφή είναι χημικές μέθοδοι οι οποίες έχουν σχέση με την διαμόρφωση των υγρών καυσίμων στον τομέα της χημικής βιομηχανίας όπως πχ αμμωνία η αιθανόλη. Οι ουσίες αυτές βρίσκονται συνήθως σε καταλυτικούς αντιδραστήρες. Η διαδικασία όπου μπορεί να υποσχεθεί πολλά αποτελέσματα στην παράγωγη καυσίμων είναι η αναμόρφωση βιομάζας η οποία χρησιμοποιείται στην παραγωγή βιοκαυσίμων και σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να αποτελεί την πιο καλή λύση σε ότι αφορά την ηλεκτροχημική παραγωγή υδρογόνου από ηλεκτρόλυση του νερού.

Το τελευταίο διάστημα έχει αρχίσει να εμφανίζεται η παραγωγή υδρογόνου με μεθόδους οι οποίες είναι καθαρά βιολογικές. Η μέθοδος όπου αναφέραμε χρησιμοποιεί πρακτικές βιολογικές , όπως

βακτηρίων ή φωτοσυνθετικών οργανισμών, για την αποδόμηση υδρογονανθράκων, συνήθως ευρισκόμενων σε απόβλητα, για την παραγωγή υδρογόνου.

1.5.2 Μεταφορά και Αποθήκευση Υδρογόνου

Σε περιπτώσεις συστημάτων τα οποία είναι μικρής ισχύος και η λειτουργία τους διακόπτεται όπως οχήματα ή φορητές συσκευές είναι αναγκαίο να αποθηκεύεται το καύσιμο και να χρησιμοποιείται σύμφωνα με τις ανάγκες όπου υπάρχουν κάθε φορά. Ακόμη θα πρέπει το υδρογόνο να αποθηκεύεται σε περίπτωση όπου η παράγωγή υδρογόνου είναι συνέπεια μετατροπής οποιασδήποτε κατηγορίας ενέργειας σε χημική.

Η βενζίνη και το πετρέλαιο ντίζελ που χρησιμοποιούνται σήμερα για την κίνηση των οχημάτων με μηχανή εσωτερικής καύσης είναι καύσιμα με μεγάλη πυκνότητα ενέργειας (ενέργεια ανά όγκο) στην φυσική τους κατάσταση, σε θερμοκρασίες και πιέσεις κοντά σε αυτές στις οποίες λειτουργεί ο άνθρωπος. Το υδρογόνο, παρ' ότι έχει περίπου τριπλάσια ειδική ενέργεια (ενέργεια ανά βάρος) έχει εξαιρετικά χαμηλή πυκνότητα οδηγώντας έτσι σε πολύ χαμηλές τιμές πυκνότητας ενέργειας.

Ακόμα και αν ψυχθεί στους 22K (-251C) και συμπιεστεί η πυκνότητα που παραμένει σχετικά χαμηλή, περίπου 71 kg/m³, στην οποία περίπτωση όμως εγείρονται ζητήματα ασφαλείας και αποδοτικότητας σχετικά με την μεταφορά και αποθήκευση. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ένα τυπικό δοχείο καυσίμου (ρεζερβουάρ) αυτοκινήτου, της τάξης των 50-60 λίτρων, το οποίο παρέχει αυτονομία πάνω από 500 χιλιόμετρα, χρησιμοποιώντας ως καύσιμο βενζίνη. Το ίδιο ρεζερβουάρ με χρήση υδρογόνου σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία δωματίου θα παρείχε αυτονομία μικρότερη από 100 μέτρα.

Μία πιθανή λύση στο πρόβλημα είναι η χρήση δοχείων συμπιεσμένου υδρογόνου, με τρόπο παρόμοιο με τον οποίο αποθηκεύεται και διανέμεται σήμερα το υδρογόνο για πλήθος βιομηχανικών, ερευνητικών και εκπαιδευτικών εφαρμογών. Το κοινότερο δοχείο είναι κράμα χάλυβα το οποίο είναι ικανό να αποθηκεύσει υδρογόνο μέχρι τα 200 bar ενώ η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών έχει οδηγήσει στην κατασκευή δοχείων με εσωτερική επένδυση πλέγματος ινών άνθρακα. Τα δοχεία αυτά φέρουν εσωτερικά μήτρα ρητινών ενισχυμένα με ίνες άνθρακα, για την ενίσχυση του σώματος του μεταλλικού δοχείου, και ο σχεδιασμός τους είναι τέτοιος που σε περίπτωση αστοχίας, λόγω ελαστικότητας, το δοχείο σχίζεται αντί να εκραγεί.

Η υψηλή πίεση στα δοχεία προβάλλει μεγάλες απαιτήσεις σχετικά με την ασφάλεια των δοχείων αυτών. Το υδρογόνο είναι πολύ μικρό και ευκίνητο μόριο οπότε μπορεί και διαχέεται σε υλικά που είναι αδιαπέραστα σε άλλα αέρια. Η διάχυση υδρογόνου στο σώμα των μετάλλων από τα οποία

μπορεί να αποτελείται το δοχείο αποθήκευσης είναι δυνατόν να επηρεάσει σημαντικά τις μηχανικές του ιδιότητες

Ένα συχνό φαινόμενο είναι η δημιουργία φυσαλίδων από συσσώρευση υδρογόνου στο μέταλλο ή η αντίδραση του υδρογόνου με τον άνθρακα (στην περίπτωση των χαλύβων) με αποτέλεσμα την δημιουργία κενών που λειτουργούν σαν συγκεντρωτές τάσης με αποτέλεσμα τη μηχανική αστοχία. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ψαθυροποίηση υδρογόνου και οι κύριοι τρόποι αντιμετώπισης του είναι η χρήση σύνθετων υλικών ή χάλυβα με υψηλή περιεκτικότητα σε χρώμιο που εμποδίζουν την διάχυση και αντίδραση του υδρογόνου.

Ένας τρόπος για να αυξηθεί η αποδοτικότητα της αποθήκευσης σε δοχεία είναι η αποθήκευση του υδρογόνου σε κρυογενική μορφή, σαν υγροποιημένο αέριο σε θερμοκρασία 22 K(-251C), Τα δοχεία που χρησιμοποιούνται σε αυτή την περίπτωση είναι τύπου Dewar, πολλαπλά ενισχυμένα, για αντίσταση και στις μηχανικές τάσεις αλλά και στην μεταφορά θερμότητας προς το αποθηκευμένο υδρογόνο. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα αυτής της προσέγγισης αποθήκευσης είναι η πολύ υψηλή ενέργεια που απαιτείται για την υγροποίηση του υδρογόνου.

Τα υδρίδια μετάλλων και αλκαλίων προσφέρουν μία πιθανή λύση στο πρόβλημα της αποθήκευσης του υδρογόνου. Σε αυτή την περίπτωση το υδρογόνο αποτελεί μέρος μίας ένωσης, η οποία φέρεται σε στερεή ή υγρή μήτρα. Υπό ελεγχόμενες συνθήκες, με χημική αντίδραση ή παροχή θερμότητας στο σύστημα, το υδρίδιο αντιδρά απελευθερώνοντας υδρογόνο, το οποίο είναι έτοιμο να καταναλωθεί στο σύστημα. Τα υδρίδια αυτά μπορεί να είναι μεταλλικά υδρίδια, με πιο γνωστό παράδειγμα το υδρίδιο νικελίου-μετάλλου (NiMH) ή υδρίδια αλκαλίων όπως το NaBH_4 . Η χρήση υδριδίων προσφέρει μια από τις πιο ευνοϊκές λύσεις στο πρόβλημα της αποθήκευσης υδρογόνου από την άποψη της ογκομετρικής αποτελεσματικότητας, καθώς απαιτείται συγκριτικά χαμηλότερος όγκος υδριδίου-μήτρας για την αποθήκευση 1 kg υδρογόνου συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Επίσης η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά πιο ασφαλής, συγκριτικά με το υγρό ή συμπιεσμένο υδρογόνο.

Ανάλογα με το υδρίδιο που χρησιμοποιείται, μέταλλου ή αλκαλίου, η αντίδραση μπορεί να είναι εξώθερμη, οπότε το σύστημα πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να προσφέρεται ή να απάγεται θερμότητα.

Η πιο σύγχρονη και πολλά υποσχόμενη μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου είναι η αποθήκευση σε νανοδομημένες μορφές του άνθρακα, όπως νανοσωλήνες, νανοκόρνοι, φουλλερένια κλπ. Η μέθοδος αυτή εκμεταλλεύεται την πολύ υψηλή ειδική επιφάνεια των υλικών αυτών στην οποία ροφάτε το υδρογόνο, με τον στόχο που έχει τεθεί από το U.S. Department of Energy να αντιστοιχεί σε 6.5% κατά βάρος περιεκτικότητα σε υδρογόνο, ή αλλιώς 63kg/m³. Η περιεκτικότητα αυτή σε υδρογόνο αφορά θερμοκρασία δωματίου και ατμοσφαιρική πίεση, έτσι ώστε αυτή η μέθοδος να μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ευκολία σε κινητές πηγές ενέργειας (οχήματα). Από τους πιθανούς

τρόπους αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου που αναπτύχθηκαν παραπάνω, είναι ξεκάθαρο ότι δεν υπάρχει κάποιος που να υπερέχει σημαντικά έναντι των υπολοίπων. Η πιθανή χρήση καθ' ενός από αυτούς τους τρόπους μεταφοράς και αποθήκευσης εξαρτάται από τις ανάγκες και τις δυνατότητες του εκάστοτε συστήματος, αλλά και από τις οικονομικές παραμέτρους που καθορίζουν το σύστημα. Mg_2NiH_4 $LaNi_5H_8$ H_2 (liquid) H_2 (200 bar) (G. Ehrlich, 1961)

1.6 Βαθμός Απόδοσης και Παραγωγή Ενέργειας σε μια Κυψέλη Καυσίμου

Στην άνοδο, το υδρογόνο αντιδρά, ελευθερώνοντας ενέργεια. Παρόλο που ελευθερώνεται ενέργεια δεν σημαίνει ότι η αντίδραση συνεχίζεται με αμείωτο ρυθμό. Η ενέργεια ενεργοποίησης πρέπει να δίνεται για να ξεπεραστεί <<ο ενεργειακός λόφος>> (Larminie et al). Αν η πιθανότητα ενός μορίου να έχει αρκετή ενέργεια είναι χαμηλή τότε η αντίδρασή θα εξελιχθεί με πολύ αργό ρυθμό. Οι τρεις κύριοι τρόποι να αντιμετωπίσουμε τους αργούς ρυθμούς αντίδρασης είναι :

- Η χρήση καταλύτη
- Η αύξηση της θερμοκρασίας
- Η αύξηση της περιοχής των ηλεκτροδίων

Η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας (θερμικής και ηλεκτρικής) μιας κυψέλης καυσίμου ισούται με την διαφορά της ελεύθερης ενέργειας του Gibbs μεταξύ των αντιδρώντων και προϊόντων ρευμάτων. Η ενέργεια του Gibbs ορίζεται ως η ενέργεια που είναι διαθέσιμη για την παραγωγή έργου αγνοώντας την συμβολή σε αυτό μεταβολών της πίεσεως και του όγκου μεταξύ των αντιδρώντων και προϊόντων ρευμάτων. Επίσης η ενέργεια του Gibbs ισούται με την ενθαλπία αν αφαιρεθεί η ενέργεια που συνδέεται με την μεταβολή της εντροπίας:

$$\Delta g = H - TS$$

Σε μια κυψέλη καυσίμου το έργο, είναι η κίνηση των ηλεκτρονίων μέσω του εξωτερικού κυκλώματος της κατανάλωσης. Κατά την παραγωγή ισχύος από τις κυψέλες, ηλεκτρόνια οδεύουν μέσω εξωτερικού κυκλώματος προς την κατανάλωση, ιόντα ρέουν στον ηλεκτρολύτη και αντιδρώντες ύλες τροφοδοτούνται στα ηλεκτρόδια. Όπως σε κάθε διεργασία, έτσι και στις κυψέλες καυσίμου, αντιστάσεις που συνδέονται τόσο με φαινόμενα μεταφοράς μέσα στην κυψέλη όσο και με διαφόρων μορφών ηλεκτρικών αντιστάσεων έχουν ως αποτέλεσμα το παραγόμενο δυναμικό να είναι χαμηλότερο από το θεωρητικά δυνατό. Επιπλέον ένα μέρος της χημικής ενέργειας των αντιδρώντων μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω του μη αντιστρεπτού των μεταβολών. Η ισχύς που

παράγεται από κάθε κυψέλη είναι το γινόμενο της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων και του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος και δίνεται από την σχέση :

$$P = V * I$$

όπου V Volts, I Ampere και P Watt. Η ένταση I εκφράζεται και ανοιγμένη στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου δηλαδή mA/cm². Μια τυπική κυψέλη παράγει τάση της τάξεως του 0.7V, τιμή που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και κυρίως από το σημείο λειτουργίας και τον σχεδιασμό της κυψέλης. Στη συνέχεια στο Σχήμα 1.4 δίνεται η καμπύλη τάσεως-ρεύματος μιας κυψέλης καυσίμου. Η καμπύλη αυτή είναι ουσιαστικά η χαρακτηριστική αυτής της τεχνολογίας αντιπροσωπεύοντας την απόδοση των σύνθετων φαινομένων και των παραγόντων που τα επηρεάζουν εντός της κυψέλης.

$$F \text{ απωλειών} = E_{th} - D$$



Σχημα.1.4 Καμπύλη τάσεως-ρεύματος κυψέλης καυσίμου.

1.7 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των Κυψελών Καυσίμου

1.7.1 Πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες διατάξεις παραγωγής ενέργειας όπως είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης και οι μπαταρίες. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης παράγουν μηχανική ενέργεια μέσω της μετατροπής της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε θερμική. Η μετατροπή αυτή γίνεται συνδυάζοντας το καύσιμο με το οξυγόνο σε υψηλή θερμοκρασία (καύση καυσίμου). Ύστερα η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική.

Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται με αρκετές απώλειες λόγω του περιορισμού που επιβάλλει ο κύκλος Carnot. Οι μπαταρίες είναι και αυτές διατάξεις ηλεκτροχημικής μετατροπής ενέργειας.

Η κύρια διαφορά τους με τις κυψέλες καυσίμου εντοπίζεται στο γεγονός ότι η μπαταρία περιέχει τα αντιδρώντα στο εσωτερικό της και συνεπώς, όταν εκφορτίζεται, πρέπει να αντικατασταθεί ή να φορτιστεί εκ νέου.

Πλεονεκτήματα έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσης

Τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης είναι τα παρακάτω :

1. Αποτελούν πιο καθαρή πηγή ενέργειας. Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν μόνο ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα και νερό. Το υδρογόνο όμως δεν βρίσκεται από μόνο του στη φύση, οπότε πρέπει να παραχθεί. Η παραγωγή υδρογόνου γίνεται βασικά με τρεις τρόπους : με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, με τη βοήθεια ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η φωτοβολταϊκή, η αιολική, η υδραυλική, η γεωθερμική και η βιομάζα, και τέλος με ηλεκτρόλυση. Επικρατέστερη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου αυτή τη στιγμή είναι η αναμόρφωση του φυσικού αερίου. Ακόμα πάντως και σε αυτή τη περίπτωση, που το υδρογόνο παράγεται από ορυκτό καύσιμο, η ρύπανση που προκαλείται είναι αρκετά μικρότερη σε σύγκριση με τις μηχανές που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα, καθώς κατά τη λειτουργία δεν παράγονται οξείδια του αζώτου (NOx), οξείδια του θείου (SOx) και εκπομπές σωματιδίων.

2. Έχουν μεγαλύτερη απόδοση. Οι κυψέλες καυσίμου δε λειτουργούν σε θερμοδυναμικό κύκλο, επομένως δεν έχουν το αντίστοιχο αυστηρό όριο για την απόδοση, αλλά ισχύει για αυτές το όριο απόδοσης της χημικής αντίδρασης, το οποίο όμως είναι υψηλότερο. Ακόμα, τα μηχανικά μέρη που χρειάζονται, για παράδειγμα οι αντλίες, έχουν πολύ λιγότερες απώλειες από τα κινούμενα μέρη μιας μηχανής. Τέλος για εφαρμογές συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, η απόδοση κάποιων κυψελών καυσίμου φθάνει το 85% - 90%.

3. Είναι πολύ πιο αθόρυβες, καθώς τα κινούμενα μηχανικά μέρη είναι ελάχιστα.

4. Είναι πιο αξιόπιστες, για τον ίδιο λόγο.

5. Η συντήρησή τους είναι ευκολότερη.

6. Λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

7. Ανταποκρίνονται πιο γρήγορα στις μεταβολές του φορτίου.

8. Ευνοούν τη κατανομημένη παραγωγή ενέργειας.

Πλεονεκτήματα έναντι των μπαταριών

Τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου σε σχέση με τις μπαταρίες είναι τα παρακάτω :

1. Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ενέργεια όσο τροφοδοτούνται με υδρογόνο και οξυγόνο. Αντίθετα οι μπαταρίες χρειάζονται φόρτιση.
2. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου είναι ελαφρύτερα από αντίστοιχα συστήματα με μπαταρίες.
3. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου είναι πιο αξιόπιστες, χρειάζονται λιγότερο τακτικά συντήρηση και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

1.7.2 Μειονεκτήματα των Κυψελών Καυσίμου

Τα μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου είναι τα παρακάτω :

1. Το κόστος των κυψελών καυσίμου είναι ακόμα πολύ μεγάλο.
2. Η παραγωγή, η μεταφορά, η διανομή και η αποθήκευση του υδρογόνου παρουσιάζουν πολλές δυσκολίες. Ακόμα, η δημιουργία των κατάλληλων υποδομών για το δίκτυο μεταφοράς και διανομής του υδρογόνου απαιτεί τεράστια κεφάλαια.
3. Το αέριο υδρογόνο έχει πολύ μεγάλο όγκο και αποθηκεύεται δύσκολα. Ακόμα και το υγρό υδρογόνο έχει πολύ μεγαλύτερο όγκο (κατά 5 φορές περίπου) από ποσότητα πετρελαίου που αποδίδει την ίδια ποσότητα ενέργειας.
4. Συνυπολογίζοντας όλο τον εξοπλισμό που χρειάζονται για τη λειτουργία τους, τα συστήματα κυψελών καυσίμου είναι βαρύτερα και πιο ογκώδη από μηχανές εσωτερικής καύσης, που είναι ικανές να παράγουν αντίστοιχη ποσότητα ενέργειας.

1.8 Εφαρμογές Κυψελών Καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου λόγω των χαρακτηριστικών λειτουργίας και της κατασκευαστικής τους δομής έχουν τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα μεγάλο εύρος, από μερικά mW έως αρκετές εκατοντάδες kW. Έχουν ήδη κατασκευαστεί αυτοκίνητα, λεωφορεία, και ποδήλατα που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου. Είναι επίσης ιδανικά για μονάδες καταναλωμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε κτίρια προσφέροντας ευελιξία στην τροφοδοσία ισχύος, ειδικά όταν συνδυάζονται και με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Χρησιμοποιούνται για εφεδρικά

συστήματα τροφοδοσίας μεγάλης ή μικρής κλίμακας (UPS) και μπορούν να αντικαταστήσουν τις μπαταρίες σε φορητές συσκευές.

Οι εφαρμογές σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας αγοράς (32%), ενώ ακολουθούν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με 20%.

1.8.1 Εφαρμογές στα Μέσα Μεταφοράς

Οι κατασκευαστικές εταιρίες των κυψελών καυσίμου επικεντρώνουν το ενδιαφέρον τους για εφαρμογές των τεχνολογιών που αναπτύσσουν στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα λόγω του προβλεπόμενου μεγέθους της αγοράς. Τα καινοτόμα αυτοκίνητα αποτελούν ένα μεγάλο κίνητρο για την ανάπτυξη τεχνολογιών κυψελών καυσίμου, αφού τα συμβατικά συμβάλουν σημαντικά στην μόλυνση της ατμόσφαιρας.

Σχεδόν όλες οι αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν κατασκευάσει πρότυπα οχήματα κυψελών καυσίμου και έχουν ανακοινώσει τη μαζική παραγωγή τους στο άμεσο μέλλον. Αρκετά από αυτά χρησιμοποιούν μόνο κυψέλες υδρογόνου ως πηγή τροφοδοσίας, ενώ κάποια άλλα χρησιμοποιούν και μπαταρίες ως εναλλακτική πηγή τροφοδοσίας. Το καύσιμο είναι είτε καθαρό υδρογόνο σε υγρή ή αέρια μορφή, είτε από αναμόρφωση. Φωτογραφίες μερικών αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου της TOYOTA που προορίζεται για τη γραμμή παραγωγής του 2015.

Η δυσκολία παραγωγής και η έλλειψη υποδομών για τη διάθεση του υδρογόνου αποτελεί, προς το παρόν, ένα εμπόδιο για την ευρεία χρήση αυτοκινήτων με κυψέλες καυσίμου. Πολλά πρότυπα

οχήματα έχουν εγκατεστημένο έναν αναμορφωτή καυσίμου και έτσι μπορούν να τροφοδοτούνται απευθείας με υδρογονάνθρακες.

Βέβαια, η εγκατάσταση αναμορφωτών αυξάνει το κόστος, την πολυπλοκότητα της κατασκευής του αυτοκινήτου και επιπλέον έχουμε έκλυση επιβλαβών καυσαερίων στην ατμόσφαιρα, λιγότερα βεβαίως από αυτά των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Οι αποδόσεις των κυψελών καυσίμου και των μηχανών εσωτερικής καύσης δεν πρέπει να συγκρίνονται μόνο στα σημεία μέγιστης ισχύος τους.

a) σύστημα κυψελών καυσίμου που λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία και πίεση.

b) σύστημα κυψελών καυσίμου που λειτουργεί σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση.

c) σύστημα κυψελών καυσίμου με αναμορφωτή καυσίμου.

d) μηχανή εσωτερικής καύσης με ανάφλεξη μέσω συμπίεση (diesel).

e) μηχανή εσωτερικής καύσης με ανάφλεξη μέσω σπινθήρα (βενζινοκινητήρας).

Αν και οι μηχανές εσωτερικής καύσης παρουσιάζουν μέγιστη απόδοση κοντά στη μέγιστη ισχύ τους, ένα σύστημα κυψελών καυσίμου παρουσιάζει μέγιστη ισχύ σε μερική φόρτιση.

Η απόδοση ενός οχήματος που διαθέτει κυψέλες καυσίμου και τροφοδοτείται με υδρογόνο για ένα τυπικό τρόπο οδήγησης παίρνει τιμές πάνω από 40%.

Η απόδοση των οχημάτων που διαθέτουν και αναμορφωτή καυσίμου μειώνεται σε σύγκριση με αυτή των οχημάτων που τροφοδοτούνται με καθαρό υδρογόνο, αλλά εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερη αυτής των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Πέραν των μικρών επιβατικών αυτοκινήτων, τα συστήματα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται και σε επαγγελματικά οχήματα καθώς και σε αστικά λεωφορεία. Όσον αφορά τα αστικά λεωφορεία, οι απαιτήσεις είναι αρκετά διαφορετικές σε σχέση με τα μικρά αυτοκίνητα. Απαιτούν περισσότερη ισχύ, τυπικά από 250 kW και άνω, και ο τρόπος χρήσης τους διαφέρει αφού απαιτούν συχνές εκκινήσεις και στάσεις. Τα αστικά λεωφορεία έχουν κεντρικούς σταθμούς τροφοδότησης καυσίμου και αυτό διευκολύνει τη δημιουργία σταθμών παραγωγής υδρογόνου. Μπορούν εύκολα να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες υδρογόνου, συνήθως πάνω από 20 kg σε φιάλες των 250 ή και 300 bar στην οροφή του λεωφορείου. Επειδή το υδρογόνο είναι πιο ελαφρύ από τον αέρα, η τοποθέτηση στην οροφή αποτελεί μια αρκετά ασφαλή λύση. Υπό την αιγίδα του ευρωπαϊκού προγράμματος «Clean Urban Transport for Europe» (CUTE), αρκετές μεγάλες ευρωπαϊκές πόλεις όπως το Άμστερνταμ, η Βαρκελώνη, το Αμβούργο, το Λονδίνο, η Μαδρίτη, η Στοκχόλμη, η Στουτγάρδη και άλλες, χρησιμοποιούν υδρογονοκίνητα λεωφορεία.

1.8.2 Εφαρμογές για Οικιστική και Προσωπική Χρήση

Οι κυψέλες καύσιμου ατομικής και οικιστικής χρήσης θα ξεσηκώσουν την ανεξάρτητη ηλεκτρική παραγωγή. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους φορητούς υπολογιστές, στα κινητά τηλέφωνα και στα φορητά cd player αντικαθιστώντας πλήρως τις μπαταρίες ξηρού τύπου. Επιπλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν μια καθαρή και ήσυχη πηγή είτε αρχικής είτε εφεδρικής ηλεκτρικής δύναμης στα αστικά, προαστιακά καθώς και εξοχικά σπίτια.

1.8.3 Εφαρμογές σε Μονάδες Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Πολλά συστήματα κυψελών καυσίμου έχουν κατασκευαστεί για στατικές εφαρμογές. Ο βασικός σχεδιασμός τέτοιων συστημάτων δεν διαφέρει και πολύ από εκείνων που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα. Παρόλα αυτά, σε αυτές τις εφαρμογές υπάρχουν κάποια κρίσιμα ζητήματα όπως είναι η επιλογή του καυσίμου, οι κλιματολογικές συνθήκες και η απομάκρυνση της εκλυόμενης θερμότητας.

Επιπρόσθετα, οι απαιτήσεις σε βάρος και όγκο δεν είναι τόσο κρίσιμες όπως στις φορητές εφαρμογές. Τα επιτρεπτά επίπεδα θορύβου είναι χαμηλότερα για τις εφαρμογές στην, ειδικά στην περίπτωση που είναι εγκατεστημένες σε εσωτερικούς χώρους. Οι χρόνοι εκκίνησης στα ηλεκτρικά οχήματα που διαθέτουν κυψέλες καυσίμου είναι τις τάξεις των μερικών δευτερολέπτων, ενώ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός για την εκκίνηση παρά μόνο αν χρησιμοποιούνται ως εφεδρικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι κύριες εφαρμογές των κυψελών καυσίμου σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- α) Πηγή παροχής ηλεκτρικής ενέργειας αντικαθιστώντας το δίκτυο σε απομακρυσμένες περιοχές.
- β) Πηγή διασυνδεδεμένη παράλληλα με το δίκτυο, λειτουργώντας είτε ως σταθμός βάσης είτε καλύπτοντας τις αιχμές ζήτησης.
- γ) Συνδυασμός με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια σε περιόδους που οι άλλες πηγές δεν καλύπτουν τη ζήτηση.
- δ) Εφεδρικά συστήματα τροφοδοσίας όταν το δίκτυο αδυνατεί να παρέχει ενέργεια λόγω βλάβης.

1.8.4 Εμπορικές Εφαρμογές Κυψελών Καυσίμου

Οι ολοένα αυξανόμενες ανάγκες για παραγωγή ενέργειας παγκοσμίως, αλλά και η σημαντική μόλυνση του περιβάλλοντος που έχει παρουσιαστεί τα τελευταία χρόνια λόγω των αυξημένων εκπομπών CO₂, οδήγησαν στην αναζήτηση και ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, φιλικών προς το περιβάλλον. Οι κυψέλες καυσίμου έχουν βρεθεί στο κέντρο του επιστημονικού ενδιαφέροντος καθώς αποτελούν μια ελπιδοφόρα τεχνολογία γιατί:

- Η λειτουργία τους δεν είναι ρυπογόνα, καθώς το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι κυρίως το H₂
- Η απόδοσή τους είναι μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικών μηχανών εσωτερικής καύσης
- Αποτελούνται από μεμονωμένα και ανεξάρτητα τμήματα, και επομένως η συντήρησή τους είναι ευκολότερη
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συμπαραγωγή ενέργειας και θερμότητας.

Σύμφωνα με τα πιο αισιόδοξα σχέδια, στη δεκαετία του 2050, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (βιομάζα, αιολική ενέργεια, γεωθερμία, ηλιακή ενέργεια, κυψέλες καυσίμου) θα έχουν κυρίαρχο ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν οι συνθήκες στο μέλλον φανούν ευνοϊκές, όλες οι ενεργειακές απαιτήσεις για μεταφορές θα καλύπτονται από υδρογόνο, με τη χρήση κυψελών καυσίμου τύπου PEM. Επίσης υπολογίζεται πως μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας για οικιακή χρήση αλλά και ταυτόχρονη συμπαραγωγή θερμότητας θα γίνονται με τη βοήθεια κυψελών τύπου SOFC.

Η εισαγωγή των κυψελών καυσίμου στην αγορά προϋποθέτει τη μείωση του κόστους κατασκευής τους το οποίο δεν θα πρέπει να ξεπερνά:

- _ 50 €/ kW για ιδιωτικής χρήσης αυτοκίνητα
- _ 200-300€ / kW για λεωφορεία
- _ 400-600 €/ kW για φορητές εφαρμογές
- _ 400-600 €/ kW για συμπαραγωγή ενέργεια και θερμότητας

Το σημερινό κόστος μιας κυψέλης τύπου PEM είναι αρκετά υψηλό(3000-5000€/ kW), και οφείλεται κυρίως στο υψηλό κόστος της πλατίνας(για φόρτιση του ηλεκτροδίου ίση με 0,3 mg Pt / cm² υπολογίζεται ίσο με 400-800 €/ kW) και της πολυμερικής μεμβράνης Nafion(40- 200€/ kW. αποθήκευσης υδρογόνου.

Το πρώτο λεωφορείο του οποίου η λειτουργία βασιζόταν σε μία κυψέλη PEM και χρησιμοποιούσε σαν καύσιμο H₂ κατασκευάστηκε το 1993 από την Ballard Power System.

Από τότε και μέχρι σήμερα πολλές γνωστές αυτοκινητοβιομηχανίες (όπως η Honda, Toyota, η Nissan, η Ford, η Daimler-Benz, η Mazda, η Chrysler) ασχολούνται με την ενσωμάτωση της τεχνολογίας των PEM στην κατασκευή οχημάτων.

Η εισαγωγή των κυψελών καυσίμου στην αγορά προϋποθέτει τη μείωση του κόστους κατασκευής

τους το οποίο δεν θα πρέπει να ξεπερνά:

- _ 50 €/ kW για ιδιωτικής χρήσης αυτοκίνητα
- _ 200-300€ / kW για λεωφορεία
- _ 400-600 €/ kW για φορητές εφαρμογές
- _ 400-600 €/ kW για συμπαραγωγή ενέργεια και θερμότητας

Το σημερινό κόσμος μιας κυψέλης τύπου PEM είναι αρκετά υψηλό(3000-5000€/ kW), και οφείλεται κυρίως στο υψηλό κόστος της πλατίνας(για φόρτιση του ηλεκτροδίου ίση με 0,3 mg Pt / cm² υπολογίζεται ίσο με 400-800 €/ kW) και της πολυμερικής μεμβράνης Nafion(40- 200€/ (kW A.V.)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ

2.1 Ορισμός

Ως ηλεκτροπρόωση ορίζεται το είδος εκείνο της πρόωσης στο οποίο οι άξονες του πλοίου κινούνται απ' ευθείας (ή και σπανιότερα μέσω μειωτήρων) από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες μηχανές όπως ντίζελ, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους. Φυσικά οι κινητήρες ντίζελ, αεριοστρόβιλοι και ατμοστρόβιλοι εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπρόωσης, αλλά αντί να κινούν απ' ευθείας το αξονικό σύστημα με την έλικα κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες, που με τη σειρά τους τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως, τους οποίους μπορούμε να τους συναντήσουμε και σαν (κινητήριες μηχανές). Η προωστήρια εγκατάσταση συμπληρώνεται από κάποιο σύστημα ελέγχου για τον χειρισμό της, δηλαδή την κράτηση εκκίνηση, την αυξομείωση στροφών και την αλλαγή φοράς περιστροφής των ηλεκτρικών κινητήρων. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή συστήματος ηλεκτροπρόωσης για ένα πλοίο, προσφέρει περισσότερη ελευθερία στη σχεδίαση και στην επιλογή των υποσυστημάτων και της διάταξης όλης της προωστήριας και ηλεκτρικής εγκατάστασης. Σε κάθε περίπτωση αξίζει να σημειωθεί, ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι η μόνη λύση για τη βοηθητική πρόωση (δηλ. το σύστημα των πλευρικών προωστήριων μηχανισμών που επαυξάνουν την ελικτική ικανότητα των σκαφών ιδίως εντός των λιμένων) με αξιοποίηση κυρίως επαγωγικών κινητήρων μεγάλης ισχύος (0.5 - 2.5 MW). Τέλος δεδομένης της ραγδαίας αναπτυσσόμενης έρευνας επί των ηλεκτροπροωστήριων συστημάτων, είναι αναγκαίο να διευκρινισθούν οι παρακάτω βασικοί όροι που χρησιμοποιούνται συχνά σαν ορολογίες.

2.2 Σχετική Ορολογία

α. Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Full Electric Propulsion - F.E.P.) :

Η εγκατάσταση προώσεως κατά την οποία το πλοίο κινείται αποκλειστικώς από ηλεκτρικούς κινητήρες. Τα ζεύγη κινητηρίων μηχανών-γεννητριών που τροφοδοτούν τους κινητήρες προώσεως,

υπάρχουν αποκλειστικώς για το σκοπό αυτό (δεν τροφοδοτούν άλλα φορτία). Η ηλεκτρική ισχύς για όλους τους άλλους καταναλωτές του πλοίου παράγεται από άλλες γεννήτριες.

β. Ολοκληρωμένη Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Integrated Full Electric Propulsion - I.F.E.P.) :

Η εγκατάσταση ηλεκτροπρόωσης στην οποία τα ίδια ζεύγη κινητηρίων μηχανών - γεννητριών, τροφοδοτούν τόσο τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως, όσο και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου.

γ. Πλήρως Εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship -A.E.S.) :

Το πλοίο που διαθέτει ολοκληρωμένη πλήρη ηλεκτροπρόωση και που επιπλέον σε ευρεία έκταση επιτελεί τις λειτουργίες του μέσω ηλεκτρικών μηχανημάτων και συστημάτων.

δ. Ηλεκτρικό δίκτυο προώσεως (Propulsion Network) :

Το τμήμα εκείνο (ανεξάρτητο ή 'ενσωματωμένο') του ηλεκτρικού δικτύου πλοίου που τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία που σχετίζονται με την πρόωση.

ε. Ηλεκτρικό δίκτυο χρήσεως (Ship Service System) :

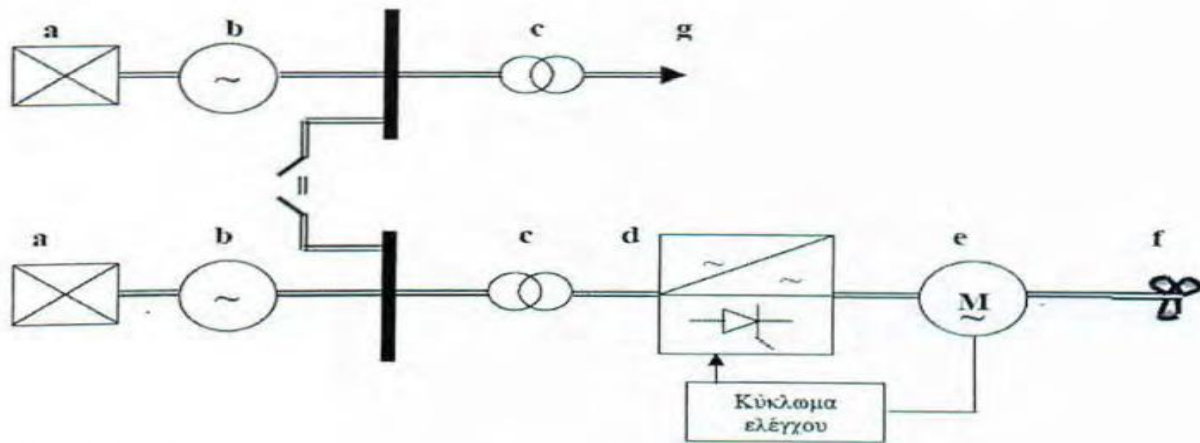
Το υπόλοιπο, πλην δικτύου προώσεως, ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου.

2.3 Εναλλακτικές Διαμορφώσεις Ηλεκτρικών Δικτύων Πλοίων

2.3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Το γενικευμένο ηλεκτρολογικό διάγραμμα ενός ηλεκτρικού δικτύου πλοίου με ηλεκτρική πρόωση απεικονίζεται στο Σχήμα 2. Το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να είναι ενιαίο καλύπτοντας όλες τις ηλεκτρικές ενεργειακές ανάγκες ή μπορεί να αποτελείται από δύο επιμέρους υπό- συστήματα, αυτό της ηλεκτροπρόωσης κι εκείνο των λοιπών ηλεκτρικών φορτίων.

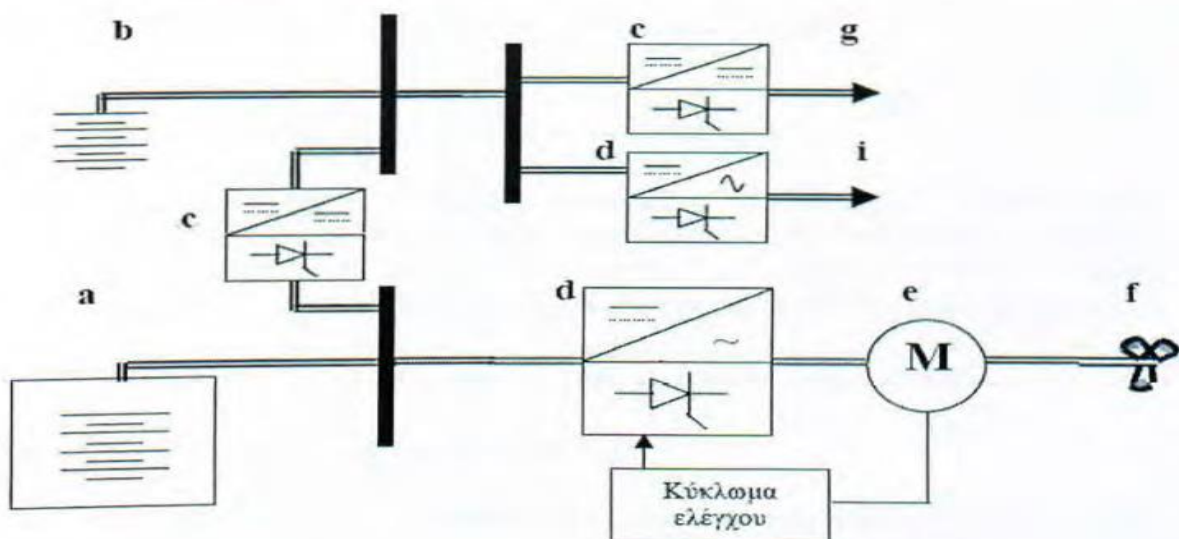
Σε πλοία με συμβατική πρόωση, ειδική υποπερίπτωση αποτελούν τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνουν και γεννήτριες άξονα-shaft generators- (εξαρτημένες δηλαδή γεννήτριες που στρέφονται από την κύρια νηξέλο-μηχανή πρόωσης του πλοίου). Οι γεννήτριες αυτές μπορεί να συνδέονται με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο με σύνδεσμο ΣΡ (DC link) ή να τροφοδοτούν αυτόνομα μόνο μεγάλα φορτία όπως οι κινητήρες βοηθητικής πρόωσης (thrusters). Ενίοτε, σε έκτακτες περιπτώσεις (π.χ. μεγάλης έκτασης ζημία στην κύρια μηχανή) μπορούν να λειτουργήσουν και αντίστροφα, δηλ. ως ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης (τροφοδοτούμενες από τις άλλες ηλεκτρογεννήτριες) περιορισμένης ισχύος και να οδηγήσουν το σκάφος σε ασφαλή προορισμό.



a.Κινητήρια μηχανή (ντιζελοκινητήρας ή αεριοστρόβιλος). **b.**Σύγχρονη γεννήτρια. **c.**Μετασχηματιστής ισχύος. **d.**Μετατροπέας συχνότητας. **e.**Προωστήριος κινητήρας. **f.**Έλικα. **g.**Λοιπά φορτία (αντλίες, συμπιεστές, φωτισμός, εργάτες κλπ).

Σχήμα 2. Γενικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου

Σημαντικά διαφορετικό είναι το ηλεκτρικό σύστημα της νέας γενιάς υποβρυχίων στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από **κυψέλες καυσίμου** (fuel cells) (και αποθηκεύεται συστοιχίες συσσωρευτών ΣΡ) για να τροφοδοτήσει καταναλώσεις ΣΡ αλλά και ΕΡ μέσω μετατροπέων ΣΡ/ΕΡ. Ηλεκτρογεννήτριες ΕΡ που κινούνται με κινητήρες ντιζελ υφίστανται μεν, αλλά δεν αποτελούν την κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση όμως, οι κινητήρες πρόωσης είναι ΕΡ.



a.Κυψέλη καυσίμου (fuel cell). **b.**Συστοιχία μπαταριών. **c.**Μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ. **d.**Μετατροπέας ΣΡ/ΕΡ. **e.**Προωστήριος κινητήρας. **f.** Έλικα. **g.**Φορτία ΣΡ. **i.** Φορτία ΕΡ

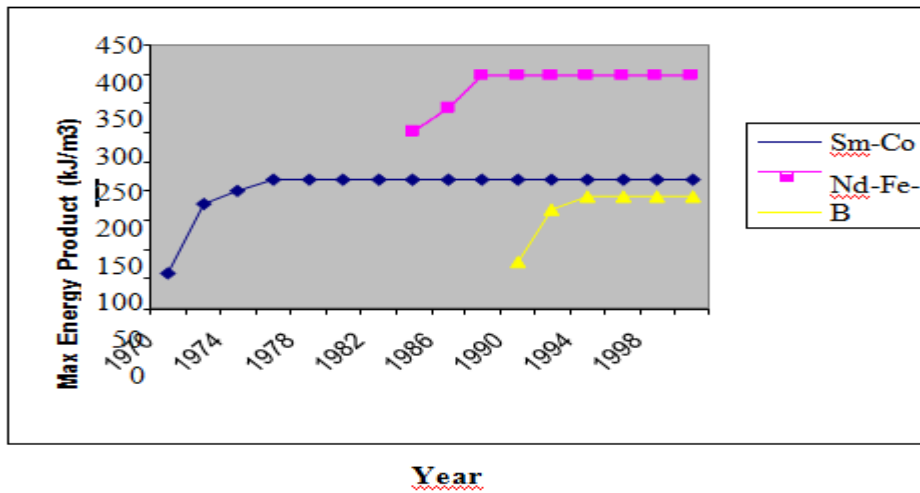
Σχήμα 3. Γενικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου με κυψέλες καυσίμου.

2.4 Ηλεκτρικοί Κινητήρες Πρόωσης

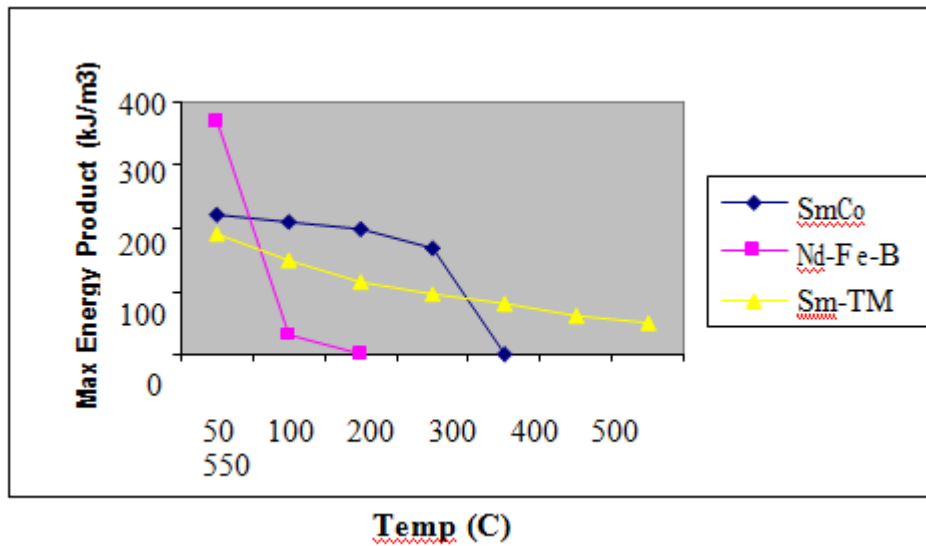
Η πλειονότητα των κινητήρων είναι σύγχρονοι, οι οποίοι έχουν βαθμό απόδοσης 96 - 98%, υψηλότερο κατά 3 - 4% από τον βαθμό απόδοσης κινητήρων επαγωγής. Η ονομαστική τάση λειτουργίας στις εγκαταστάσεις μέσης και μεγάλης ισχύος είναι 3,3 - 6,6 kV. Στους σύγχρονους κινητήρες έρχεται να προστεθεί μία νέα κατηγορία αυτή των σύγχρονων κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες των οποίων η απόδοση σύμφωνα με τους κατασκευαστές τους υπερβαίνει το 98%!!

Σε αυτές τις σύγχρονες μηχανές, το τυλίγμα διεγέρσεως του δρομέα (που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα) έχει αντικατασταθεί από μόνιμους μαγνήτες. Το αποτέλεσμα είναι το ίδιο καθώς και στις δύο περιπτώσεις παράγεται ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σταθερής τιμής που στρέφεται στο χώρο με την ταχύτητα του δρομέα.

Το προφανές πλεονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ότι δεν έχουν ανάγκη παροχής σε ΣΡ, ενώ με τον τρόπο αυτό αυξάνεται και η συνολική απόδοση καθώς μεταξύ των άλλων μειώνονται και οι συνολικές απώλειες Joule στα τυλίγματα. Η ιδέα της χρήσης μόνιμων μαγνητών είναι παλιά αλλά η τεχνολογική πρόοδος τα τελευταία χρόνια είναι που κατέστησε δυνατή την κατασκευή κραμάτων “μονίμων μαγνητών” (κράματα σαμαρίου-κοβαλτίου, Sm-Co και νεοβιδίου-σιδήρου-βορείου, NdFeB) που έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή τη μαγνήτιση τους για αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, όπως είναι αυτές που αναπτύσσονται στο εσωτερικό μίας στρεφόμενης μηχανής, βλ. και Σχ. 4-5. Οι κινητήρες αυτοί με κατάλληλη επιλογή τυλίγματος στάτη και πόλων δρομέα μπορούν να παράγουν ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο συναγωνίζονταν έτσι μία συμβατική σύγχρονη μηχανή στα χαμηλά επίπεδα απότομων αιχμών ροπής (torque ripples) και μηχανικών δονήσεων (vibrations). Τα τελευταία χρόνια ερευνάται η χρησιμοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων με υπεραγώγιμα υλικά ως κινητήρες πρόωσης, κυρίως στην Αμερική. Οι κινητήρες αυτοί, λόγω του ότι το υπεραγώγιμο υλικό παρουσιάζει μηδενική ηλεκτρική αντίσταση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, έχουν πολύ μεγάλη ισχύ ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες. Θεωρούνται έτσι ιδανικοί για την πρόωση πολεμικών πλοίων όπου ο χώρος είναι περιορισμένος σε συνδυασμό με τις αυξημένες ανάγκες ισχύος. Η εταιρεία American Superconductor Inc. χρηματοδοτείται από το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό για να κατασκευάσει έναν κινητήρα πρόωσης ονομαστικής ισχύος 25MW.



Σχήμα 4. Εξέλιξη τεχνολογίας μονίμων μαγνητών τα τελευταία 30 χρόνια,



Σχήμα 5. Επιδόσεις μονίμων μαγνητών ως προς τη θερμοκρασία μαγνήτισης,

2.5 Τεχνικές Ελέγχου Κινητήρων Πρόωσης Ε.Ρ.

Ο έλεγχος της ταχύτητας και της ροπής ενός κινητήρα ΕΡ είναι αρκετά πιο σύνθετος από την περίπτωση των κινητήρων ΣΡ, όπου η ροπή, M , προκύπτει ως μία ποσότητα ανάλογη του γινομένου του ρεύματος τυλίγματος διεγέρσεως (πεδίου), I_F και του ρεύματος τυλίγματος τυμπάνου, I_A :

$$M=k.I_f.I_A$$

όπου k σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

Στη συνέχεια ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή όλων των μεθόδων ελέγχου κινητήρων EP με έμφαση σε αυτές που εφαρμόζονται σε κινητήρες ηλεκτροπρόωσης.

1.Βαθμωτός έλεγχος ανοικτού ή κλειστού βρόχου V/F (scalar control): -μη εφαρμόσιμος στην περίπτωση της πρόωσης : απλά ως αναφορά δίνεται η επιθυμητή μηχανική ταχύτητα χωρίς να λαμβάνεται μέτρηση της πραγματικής ταχύτητας. Η τάση μεταβάλλεται αναλογικά προς την επιθυμητή ταχύτητα σε μία προσπάθεια να μην μεταβάλλεται η ροπή. Σε μία παραλλαγή αυτής της μεθόδου, λαμβάνεται μέτρηση της πραγματικής ταχύτητας που συγκρινόμενη με την επιθυμητή ταχύτητα παράγει ένα σήμα σφάλματος. Το σήμα αυτό οδηγείται σε έναν ελεγκτή PI και παράγεται κατάλληλο σήμα εναύσεως των διακοπών ισχύων. Το ίδιο σήμα ρυθμίζει και την τάση σε μία προσπάθεια να μην μεταβάλλεται η ροπή στον άξονα

2.Έλεγχος με SPWM και CSI (μαζί με συγκριτές υστερήσεως): η στιγμιαία τιμή του ρεύματος εισόδου ελέγχεται συνεχώς ώστε να κυμαίνεται μεταξύ δύο οριακών τιμών κατωφλίου. Σε κάθε προσπάθεια του ρεύματος να υπερβεί τα όρια αυτά, παράγεται σήμα από τον ελεγκτή PWM που δίνει εντολή στους διακόπτες να άγουν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αναιρεθεί η εν λόγω προδιάθεση του ρεύματος.

3.Διανυσματικός έλεγχος (vector control): όπως προαναφέρθηκε, ο έλεγχος γίνεται όπως στη μηχανή SP ξένης διεγέρσεως, όπου η ροπή, M , προκύπτει ως μία ποσότητα ανάλογη του γινομένου του ρεύματος τυλίγματος διεγέρσεως (πεδίου), I_f και του ρεύματος τυλίγματος τυμπάνου, I_A :

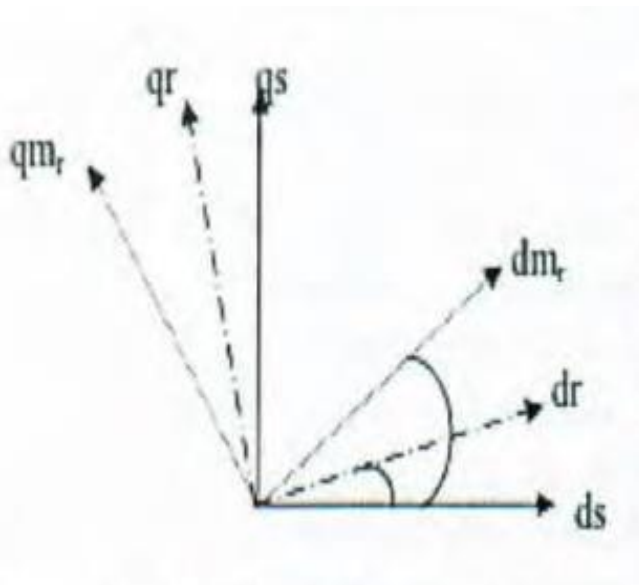
$$M=k.I_f.I_A$$

Στην μηχανή SP όμως τα δύο ηλεκτρομαγνητικά πεδία είναι σταθερά στο χώρο και σε 90° μεταξύ τους. Αντιθέτως, στις μηχανές EP, τα πεδία αφενός στρέφονται και αφετέρου η μεταξύ τους γωνία μεταβάλλεται με τις μεταβολές στις φορτίσεις. Είναι όμως μαθηματικά δυνατόν, να αποσυζευχθούν τα ρεύματα στάτη και δρομέα σε ένα πλαίσιο αναφοράς που στρέφεται είτε με την ταχύτητα του δρομέα είτε με οποιαδήποτε άλλη ταχύτητα κατά τρόπον ώστε να θεωρηθούν ακίνητα. Κάθε ρεύμα φάσεως αναλύεται σε δύο επιμέρους διανυσματικές συνιστώσες, τη συνιστώσα ευθέως άξονα (direct axis, d) και τη συνιστώσα εγκαρσίου άξονα (quadrature axis, q). Οι συνιστώσες αυτές είναι κάθετες μεταξύ τους και διατηρούνται ακίνητες ως προς το στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Σημειώνεται ότι ενώ αυτός ο μαθηματικός μετασχηματισμός αποσύζευξης ήταν γνωστός εδώ και 50 χρόνια τουλάχιστον, η υλοποίησή του, όμως με ηλεκτρονικά κυκλώματα σε πραγματικό χρόνο περιστροφής των κινητήρων κατέστη δυνατή μόλις τα τελευταία 15 χρόνια.

Η μεθοδολογία του μετασχηματισμού αποσύζευξης διαφέρει με τον τύπο της μηχανής (σύγχρονη ή ασύγχρονη) όπως εξηγείται και στη συνέχεια. Γενικά έχουν αναπτυχθεί διάφορες παραλλαγές, ανάλογα με την εκλογή του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς από τις οποίες η πλέον διαδεδομένη είναι η μέθοδος ελέγχου με προσανατολισμό στο διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής του δρομέα ή *έλεγχος πεδίου (field control)*, που αναλύεται στη συνέχεια.

Έλεγχος πεδίου (field control)

Ως πλαίσιο αναφοράς εκλέγεται αυτό που στρέφεται με το διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής του δρομέα, βλ. Σχήμα 6.



(d_s, q_s) : πλαίσιο αναφοράς στάτη (ακίνητο)

(d_r, q_r) : πλαίσιο αναφοράς δρομέα (στρεφόμενο με την ταχύτητα του δρομέα)

(d_{m_r}, q_{m_r}) : πλαίσιο αναφοράς μαγνητικής ροής δρομέα (στρεφόμενο με την ταχύτητα της μαγνητικής ροής του δρομέα).

Στην περίπτωση σύγχρονης μηχανής, τα πλαίσια (d_r, q_r) και (d_{m_r}, q_{m_r}) συμπίπτουν.

Σχήμα 6. Πλαίσια αναφοράς για διανυσματικό έλεγχο κινητήρων EP.

Ο διανυσματικός έλεγχος πεδίου του κινητήρα διακρίνεται περαιτέρω σε άμεσο και έμμεσο έλεγχο. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία του άμεσου ελέγχου η μαγνητική ροή προσδιορίζεται είτε με απευθείας μέτρηση της, είτε με χρήση μαθηματικού μοντέλου μαγνητικής ροής. Αντιθέτως, κατά τον έμμεσο έλεγχο, η μαγνητική ροή υπολογίζεται έμμεσα από μετρήσεις άλλων μεγεθών καθώς μετρώνται τα ρεύματα στο τύλιγμα του στάτη και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

Η ροπή του κινητήρα επαγωγής προκύπτει να είναι το γινόμενο δύο συνιστωσών του ρεύματος του στάτη, όπως αυτό αναλύεται στο πλαίσιο αναφοράς $(\mathbf{d}\mathbf{m}_r, \mathbf{q}\mathbf{m}_r)$ που στρέφεται με το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του δρομέα:

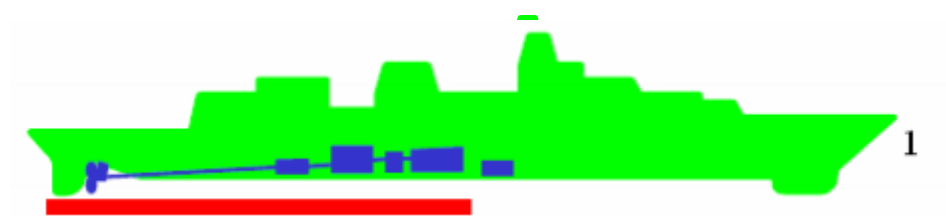
$$\mathbf{M} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{i}_s, \mathbf{d}\mathbf{m}_r \cdot \mathbf{i}_s, \mathbf{q}\mathbf{m}_r$$

Σημειώνεται ότι η μέτρηση του διανύσματος μαγνητικής ροής (κατά μέτρο και γωνία) και δη στον στρεφόμενο δρομέα είναι εξαιρετικά δύσκολο να γίνει (υπεισέρχεται μεγάλο ποσοστό θορύβου, ενώ πρέπει να παρακολουθούνται συνεχώς οι μεταβολές των τιμών R και L των τυλιγμάτων διότι με την περιστροφή μεταβάλλονται λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών). Ως μειονέκτημα της μεθόδου σημειώνεται ο μεγάλος αριθμός αισθητήρων, μετατροπέων και μετρητικών που πέραν της πολυπλοκότητας που εισάγουν, αυξάνουν το κόστος αλλά και τον χρόνο απόκρισης των διατάξεων ελέγχου. Επιπλέον, με τη μέθοδο του διανυσματικού ελέγχου η ροπή ελέγχεται μόνον με έμμεσο τρόπο χωρίς να αποφεύγονται και κραδασμοί (torque ripples).

Απευθείας έλεγχος ροπής (direct torque control DTC): πρόκειται για ουσιαστική εξέλιξη της μεθόδου του διανυσματικού ελέγχου πεδίου (vector field control). Έτσι, και σε αυτήν την περίπτωση οι τάσεις και τα ρεύματα του στάτη μετρώνται και μετασχηματίζονται σε στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς, όμως μετράται ή καλύτερα υπολογίζεται η μαγνητική ροή στον στάτη καθώς επίσης και η τιμή της ροπής στον άξονα του κινητήρα. Από τη σύγκριση των μεγεθών μαγνητικής ροής και ροπής με τις επιθυμητές τους τιμές παράγονται τα σήματα ελέγχου των μετατροπέων (για έναυση και σβέση των διακοπών). Η διαδικασία σύγκρισης στηρίζεται σε μη γραμμικές συναρτήσεις και έχει το πλεονέκτημα ότι αξιοποιεί τη διακριτή στον χρόνο συμπεριφορά των διακοπών ισχύος αυξάνοντας τελικά τη συνολική απόδοση. Η τεχνική αυτή έχει ήδη αρχίσει να εφαρμόζεται σε πλοία με ηλεκτρική πρόωση και πιο συγκεκριμένα με αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα σε συνδυασμό με σύγχρονο κινητήρα μονίμων μαγνητών (Azipod, εταιρεία ABB) και κυκλομετατροπείς. Η μέθοδος πλεονεκτεί έναντι του διανυσματικού ελέγχου, καθώς ελέγχει απευθείας τη ροπή εξόδου του κινητήρα, έχει πολύ μικρότερες απαιτήσεις σε μετρήσεις και υπολογισμούς μεγεθών (π.χ. δεν είναι απαραίτητη η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής) ενώ η παραγόμενη ροπή είναι πλέον εφικτό να μην εμπεριέχει μεγάλες αιχμές (torque ripples).

2.6 Συνεργασία Έλικα – Κινητήρα Πρόωσης

Στα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης συγκαταλέγεται και η ουσιαστική μείωση του αξονικού συστήματος των πλοίων, βλ. Σχ. 7.



1. Συμβατική προωση με αξονικό σύστημα.



2. IFEP- Σύστημα προωσης



3. IFEP- Pod Σύστημα Προωσης (με αζμουθιακό προωστήρα)

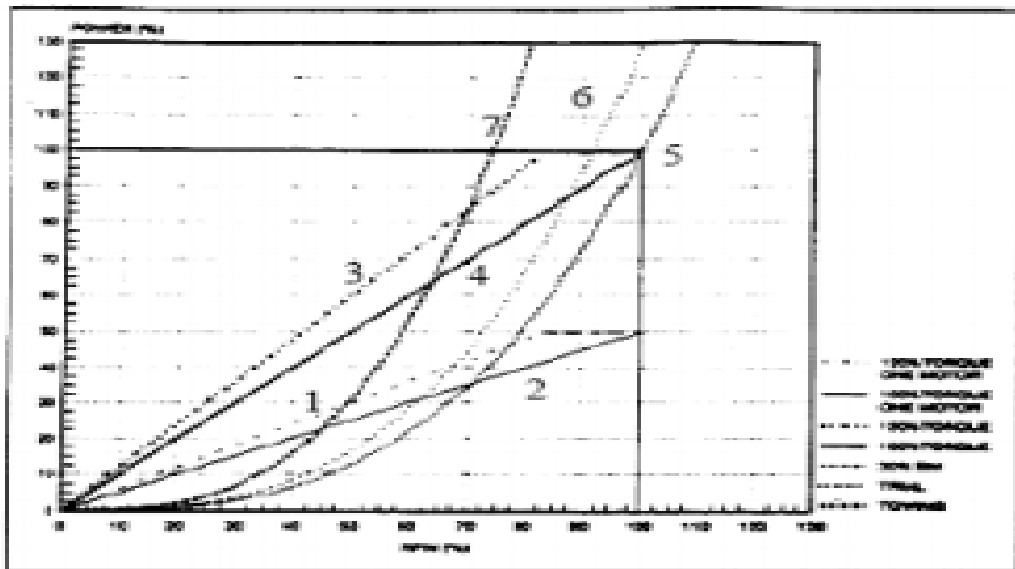
Σχήμα 7. Συγκριτική παρουσίαση αξονικών συστημάτων πλοίων

Τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης έχουν το πλεονέκτημα συνεχούς μεταβολής των στροφών σχεδόν σε όλο το διάστημα 0-100%. Επιπλέον, το 100% της ροπής μπορεί συνήθως να χρησιμοποιηθεί σε όλο το πεδίο λειτουργίας. Για λόγους ασφαλείας, η έλικα κινείται από δύο (ή και περισσότερους) ηλεκτροκινητήρες ίσης ισχύος. Όσον αφορά την έλικα ως μηχανικό φορτίο, ακολουθεί τον λεγόμενο «νόμο της έλικας» δηλ. η μηχανική ροπή ανάλογη του τετραγώνου της μηχανικής ταχύτητας όπως περίπου και οι φυγοκεντρικές αντλίες και οι ανεμιστήρες, αλλά μπορεί η χαρακτηριστική αυτή να είναι σταθερή (έλικα σταθερού βήματος) ή να μεταβάλλεται με αλλαγή της κλίσης των πτερυγίων της (έλικα μεταβλητού βήματος).

2.6.1 Έλικά Σταθερού Βήματος

Καθώς η υπερτάχυνση δέν είναι δυνατή, η έλικά σχεδιάζεται έτσι ώστε να απορροφά τη μέγιστη συνεχή ισχύ (σημείο MCR) σε κατάσταση δοκιμών, δηλ. πλήρες φορτίο, καθαρή γάστρα και ήρεμο καιρό. Προκειμένου να είναι δυνατή η λειτουργία με πλήρη ισχύ σε δυσμενείς συνθήκες, το σύστημα πρόωσης συνήθως υπολογίζεται για τιμή κατά 10 - 20% μεγαλύτερη της ονομαστικής, χωρίς αύξηση της ισχύος πέρα από τη μέγιστη συνεχή (MCR). Αυτό σημαίνει υπερδιαστασιολόγηση έλικας αξονικού συστήματος - μειωτήρα - κινητήρα - μετατροπέα κατά 10 - 20% .

Το Σχήμα 8 απεικονίζει τις καμπύλες απαιτούμενης ισχύος σε διάφορες καταστάσεις, καθώς και τα όρια του πεδίου λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες συνδεδεμένους στην ίδια έλικά.



- 1 Λειτουργία ενός ηλεκτρικού κινητήρα σε ροπή 120%
- 2 Λειτουργία ενός ηλεκτρικού κινητήρα σε ροπή 100%
- 3 Λειτουργία δύο ηλεκτρικών κινητήρων σε ροπή 120%
- 4 Λειτουργία δύο ηλεκτρικών κινητήρων σε ροπή 100%
- 5 Λειτουργία 30% SM
- 6 Δοκιμή στη θάλασσα
- 7 Δοκιμή ρυμούλκησης

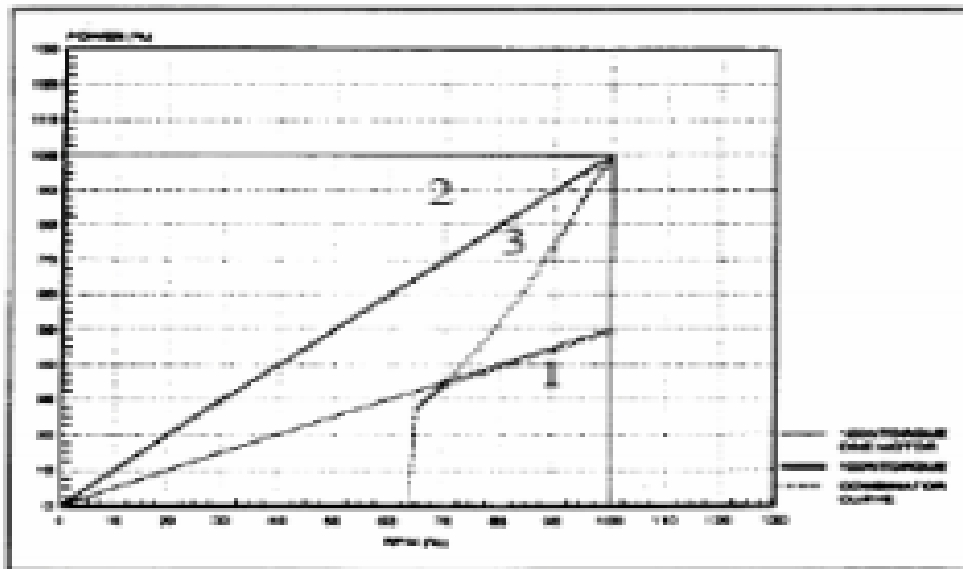
Σχήμα 8. Πεδίο λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες πρόωσης και έλικά σταθερού βήματος.

(power-rpm)

2.6.2 Έλικά Ρυθμιζόμενου Βήματος

Το σύστημα είναι συχνά (ή θα έπρεπε να είναι) εφοδιασμένο με διάταξη αυτόματης επιλογής του συνδυασμού βήματος - στροφών έλικας στο διάστημα 65 - 100% των στροφών, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη λειτουργία και η καλύτερη δυνατή απόκριση κατά τους χειρισμούς. Όταν η έλικα είναι ρυθμιζόμενου βήματος δεν απαιτείται περιθώριο ροπής, διότι η μέγιστη ισχύς μπορεί σχεδόν πάντοτε να απορροφηθεί με ρύθμιση του βήματος.

Το Σχήμα 9 απεικονίζει την καμπύλη της έλικας που προκύπτει με διάταξη αυτόματης επιλογής του συνδυασμού βήματος - στροφών, καθώς και τα όρια του πεδίου λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες συνδεδεμένους στην ίδια έλικα.



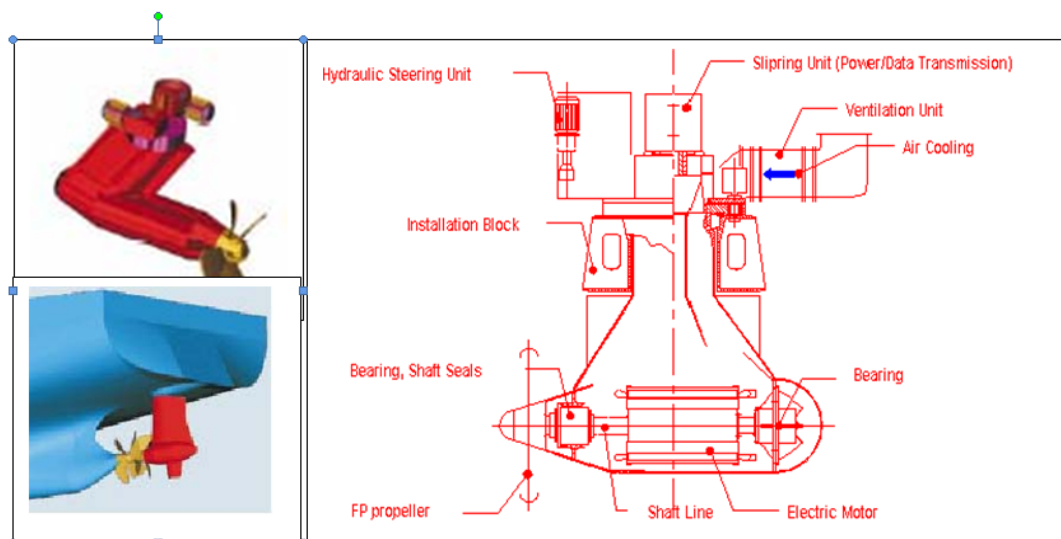
- 1 Λειτουργία ενός ηλεκτρικού κινητήρα σε ροπή 100%
- 2 Λειτουργία δύο ηλεκτρικών κινητήρων σε ροπή 100%
- 3 Συνδυασμένη λειτουργία

Σχήμα 9. Πεδίο λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες πρόωσης και έλικα ρυθμιζόμενου βήματος.
(power - rpm)

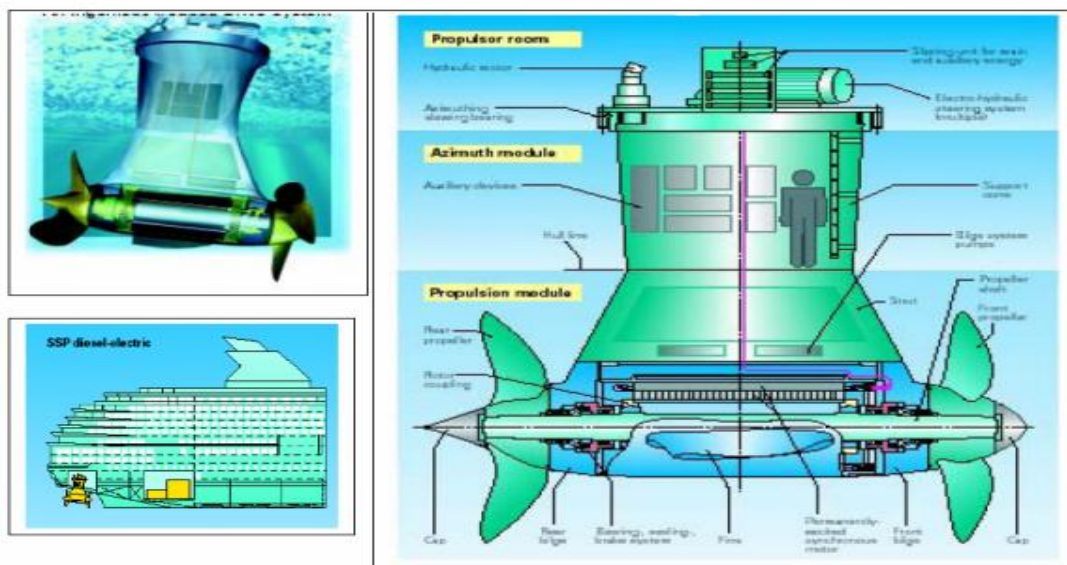
2.6.3 Το Αζιμουθιακό Προωστήριο Σύστημα (POD)

Την τελευταία δεκαετία και παράλληλα με την εισαγωγή της ηλεκτρικής πρόωσης εμφανίστηκε μία εναλλακτική λύση για το προωστήριο σύστημα που έχει πολλαπλά πλεονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα ηλεκτρικού κινητήρα και έλικας είναι μία ενιαία μονάδα, εμβαπτισμένη στο νερό στο πρυμναίο μέρος του πλοίου, όπως στις εξωλέμβιες, Σχ. 10 και Σχ.11.

Το σύστημα μπορεί να φέρει μία ή δύο έλικες και έχει τη δυνατότητα να στρέφεται σχεδόν κατά 360⁰ κατά την αζιμουθιακή διεύθυνση (από όπου προέρχεται και το όνομά του), δηλ. στο οριζόντιο επίπεδο, αυξάνοντας σε μεγάλο βαθμό τις δυνατότητες ελιγμών του πλοίου, ενώ αφενός πρακτικά εκμηδενίζεται το αξονικό σύστημα και αφετέρου δεν υφίσταται μηχανισμός πηδαλίου.



Σχήμα 10. Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα με μια έλικα



Σχήμα 11. Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα με δύο έλικες (σύστημα SSP, εταιρίες Siemens-Schottel)

2.7 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Ηλεκτροπρόωσης

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης, στα οποία οφείλεται και η διάδοσή της στις εφαρμογές που προαναφέρθηκαν, είναι τα ακόλουθα:

1. Συνεχής μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της έλικας και της ταχύτητας του πλοίου σε όλο το πεδίο 0-100 %.
2. Γρήγορη απόκριση κατά τη διάρκεια χειρισμών και δυναμικής τοποθέτησης του σκάφους.
3. Χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών.
4. Οικονομία καυσίμου, καθώς είναι δυνατή η επιλογή των μηχανών που θα λειτουργούν έτσι, ώστε η κάθε μία να λειτουργεί κοντά στο βέλτιστο σημείο.
5. Ελευθερία στην τοποθέτηση των επιμέρους μηχανημάτων του ενεργειακού συστήματος, που προσφέρει ευελιξία στον σχεδιασμό του σκάφους και εξοικονόμηση ωφέλιμου χώρου.
6. Πλήρης εκμετάλλευση της στρεπτικής ροπής σε όλο το πεδίο λειτουργίας.
7. Ευκολία αυτοματισμού.
8. Αυξημένη αξιοπιστία (πολλά συστήματα συνδεδεμένα παράλληλα) και, επομένως, αυξημένη ασφάλεια.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι τα ακόλουθα:

1. Υψηλό κόστος επένδυσης
2. Υψηλότερες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, σε σύγκριση με το μηχανικό σύστημα. Π.χ. σε συμβατικό σύστημα κινητήρα Diesel – έλικα ρυθμιζόμενου βήματος οι απώλειες του συστήματος μετάδοσης είναι περίπου 4% - 2% στην έλικα και 2% στον μειωτήρα, όταν η έλικα λειτουργεί στον βέλτιστο συνδυασμό ταχύτητας/βήματος. Σε εγκατάσταση νηζελο-ηλεκτρικής πρόωσης, το σύστημα μετάδοσης προκαλεί απώλειες 7% - 8% - 3% στις γεννήτριες 2% στους μετασχηματιστές και μετατροπείς συχνότητας και 2% - 3% στους προωστήριους ηλεκτροκινητήρες. Επομένως, ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι υψηλότερος στο σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης μόνον όταν κάθε μηχανή λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής και επί μεγάλα χρονικά διαστήματα στη βέλτιστη περιοχή.

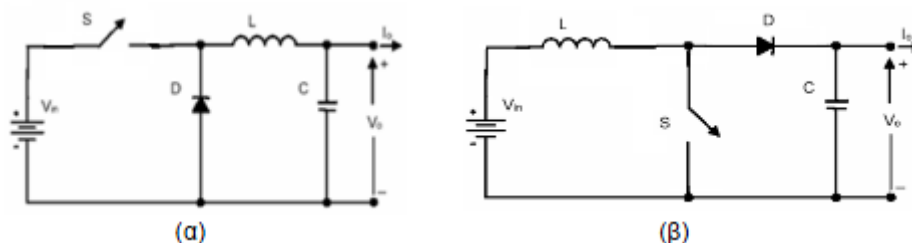
2.8 Συμπεράσματα Πλεονεκτημάτων – Μειονεκτημάτων

Η ηλεκτροπρόωση αποτελεί μια αρκετά δελεαστική επιλογή για τα πλοία που συνεχώς κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια μεταξύ των άλλων λόγω και τις γενικά εντατικής εξέλιξης όλων των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων και κύριος στον τομέα των διατάξεων ελέγχου των ηλεκτρονικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος. Η έρευνα κατά την τρέχουσα περίοδο επικεντρώνεται στη μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης αλλά και στην αύξηση των επιδόσεων του συνολικού συνδυασμού των διατάξεων που αξιοποιούνται από συστήματα ηλεκτροπρόωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

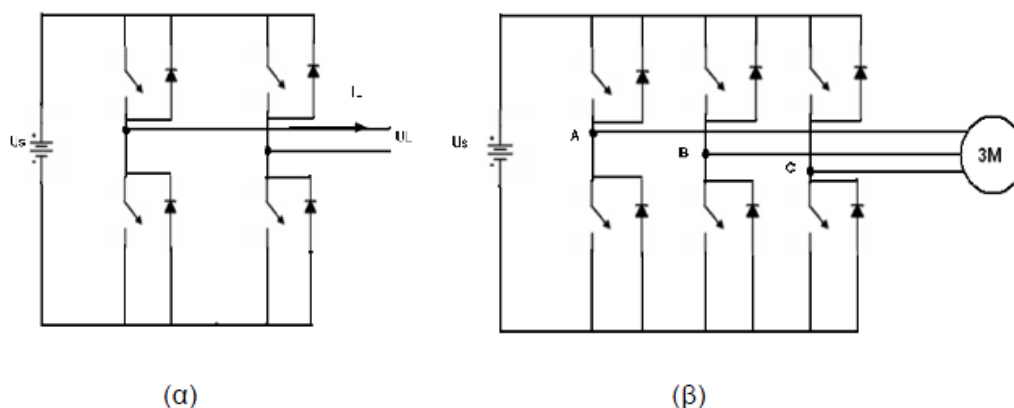
ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Ένα ηλεκτρικό υποσύστημα είναι απαραίτητο για να μεταφέρει και να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια συστοιχία κυψελών καυσίμου στους καταναλωτές. Το συγκεκριμένο υποσύστημα αποτελείται από **ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, που μετατρέπουν τη συνεχή τάση που παράγεται από την συστοιχία, είτε σε συνεχή τάση άλλου επιπέδου είτε σε εναλλασσόμενη τάση οποιασδήποτε συχνότητας ανάλογα με τις απαιτήσεις των φορτίων.** Γίνεται αντιληπτό ότι, τα χαρακτηριστικά και το είδος των μετατροπέων που συνδέονται στην έξοδο των κυψελών καυσίμου εξαρτώνται άμεσα από τις προδιαγραφές του φορτίου, οι οποίες πέραν του επιπέδου και της μορφής της τάσης, περιλαμβάνουν την ποιότητα ισχύος, το αρμονικό περιεχόμενο καθώς και την αντοχή σε μεταβατικά φαινόμενα. **Το ηλεκτρικό δυναμικό μιας κυψέλης μεταβάλλεται έντονα με τις μεταβολές του ρεύματος φορτίου και εξαρτάται από τη θερμοκρασία της κυψέλης καθώς και την παροχή καυσίμου και οξυγόνου.** Η διακύμανση της ηλεκτρικής τάσης στην περιοχή λειτουργίας της κυψέλης είναι της τάξης του 30 έως 40 % επί της ονομαστικής της τιμής. Ελάχιστα είδη φορτίων μπορούν να έχουν ανοχή σε τέτοιες μεγάλες διακυμάνσεις. Επομένως κρίνεται επιβεβλημένη η ύπαρξη μιας βαθμίδας για τη ρύθμιση και σταθεροποίηση της παραγόμενης τάσεως από τη συστοιχία κυψελών καυσίμου. Ανάλογα με τις εφαρμογές, μπορεί να απαιτείται υποβιβασμός ή και ανύψωση της τάσεως εξόδου. Κάποιοι τυπικοί ηλεκτρονικοί μετατροπείς παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



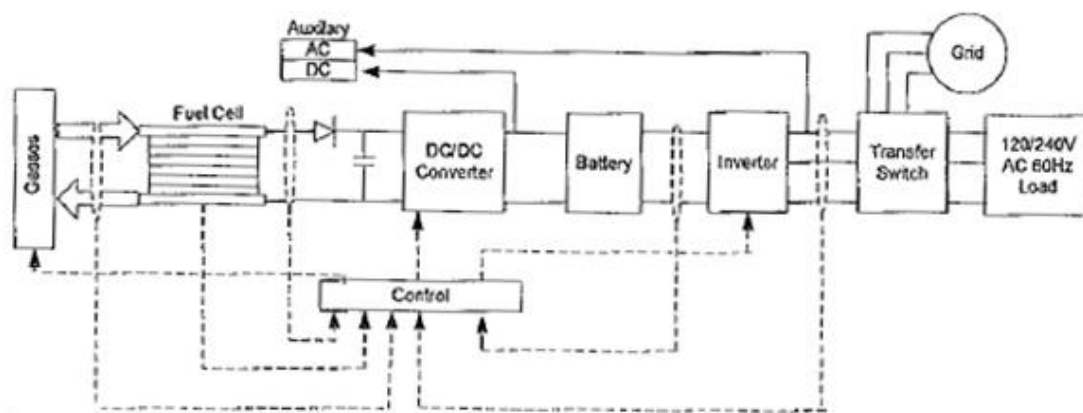
Σχήμα 11: Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση με: (α) υποβιβασμό τάσης, (β) ανύψωση τάσης.

Οι κυψέλες καυσίμου, όπως έχει ήδη αναφερθεί, παράγουν συνεχή τάση, αλλά τα περισσότερα φορτία απαιτούν τροφοδοσία εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μετά από τον μετατροπέα συνεχής τάσης συνδέεται ένας αντιστροφέας, ο οποίος μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη κατάλληλης ενεργούς τιμής και συχνότητας με χρήση κατάλληλων μεθόδων ελέγχου. Η εναλλασσόμενη τάση που δημιουργείται μπορεί να είναι μονοφασική ή τριφασική. Η τοπολογία τέτοιων μετατροπέων παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 12: Ηλεκτρονικοί μετατροπέες συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη:
(α) μονοφασικός αντιστροφέας, (β) τριφασικός αντιστροφέας

Η μονάδα ελέγχου είναι απαραίτητη σε τέτοιου είδους συστήματα όχι μόνο για τον έλεγχο των παραμέτρων που αφορούν τις κυψέλες καυσίμου, όπως είναι η παροχή καυσίμου και οξυγόνου, η θερμοκρασία, η υγρασία κ.τ.λ., αλλά και ηλεκτρολογικών παραμέτρων, όπως είναι η τάση, το ρεύμα και η ισχύς εξόδου των μετατροπέων.



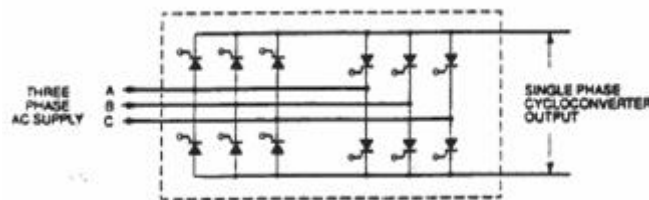
Σχήμα 13: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος σύνδεσης των κυψελών καυσίμου με το δίκτυο και με τοπικά φορτία[1]

3.1 Κυκλομετατροπείς (cycloconverters)

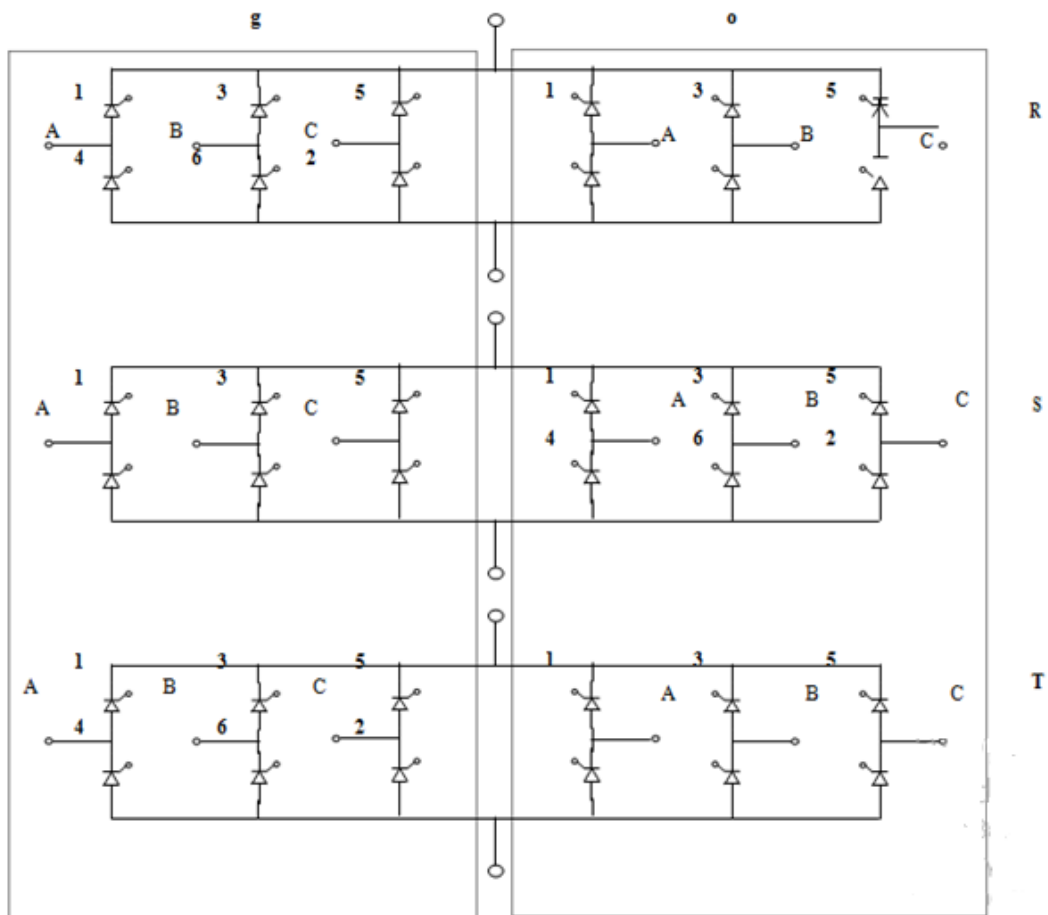
Με τις διατάξεις αυτές επιτυγχάνεται απευθείας μετατροπή από μία μορφή ΕΡ συγκριμένου πλάτους και συχνότητας σε άλλη μορφή ΕΡ διαφορετικού πλάτους και συχνότητας. Στην περίπτωση των προωστήριων συστημάτων πλοίων, λαμβάνει χώρα υποβιβασμός συχνότητας (από 50/60 Hz σε 2-3 Hz).

Η απλή περίπτωση ενός τριφασικού κυκλομετατροπέα 6 παλμών (6-παλμικός) αποτελείται από 36 ελεγχόμενους διακόπτες ισχύος, 12 για κάθε φάση, βλ. Σχ. 14-15. Σε κάθε φάση αντιστοιχούν δύο γέφυρες διακοπών (g και o) με 6 διακόπτες η κάθε μία, βλ. Σχ. 15. Η μία γέφυρα είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία της κυματομορφής κατά τη θετική ημιπερίοδο και η άλλη κατά την αρνητική. Στις γέφυρες εισέρχονται όλες οι φάσεις εισόδου. Αντιπαράλληλα προς τους διακόπτες ισχύος, εν γένει, συνδέονται και δίοδοι ισχύος για να κυκλοφορούν αντίστροφης φοράς ρεύματα προστατεύοντας τους ελεγχόμενους διακόπτες (στο Σχήμα 15 έχουν παραλειφθεί για λόγους απλότητας).

Η τεχνική ελέγχου αγωγής των διακοπών ισχύος μπορεί να ποικίλλει και σε αυτήν την περίπτωση, ωστόσο έχει επικρατήσει μία αντίστοιχη μέθοδος της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών των αντιστροφέων SPWM. Στην περίπτωση αυτή, το επιθυμητό σήμα σε μία φάση εξόδου συγκρίνεται με τις τάσεις όλων των φάσεων εισόδου και στα σημεία που εξισώνονται (σημεία τομής των κυματομορφών), παράγονται σήματα αλλαγής κατάστασης των αντίστοιχων διακοπών ισχύος (Bose B.K.,1997).



Σχήμα 14. Μονοφασικό κύκλωμα (δομικό στοιχείο) κυκλομετατροπέα



Σχημα 15. Τυπικός τριφασικός κυκλομετατροπέας 6 παλμών.

Με A, B, C συμβολίζονται οι τρεις φάσεις εισόδου ενώ με R, S, T οι τρεις φάσεις εξόδου. Οι φάσεις εξόδου μπορεί να συνδεθούν στο φορτίο σε συνδεσμολογία Y ή Δ.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα σε συνδυασμό με εναλλακτικές ενεργειακές πηγές φαίνεται πως στο άμεσο μέλλον θα απασχολήσουν και την κατηγορία των ναυτικών συστημάτων πρόωσης. Κλειδί στην εφαρμογή αυτών των συστημάτων αποτελούν οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος, με σκοπό την διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν την πιο καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και μπορούν να μετατρέψουν τα καύσιμα σε ηλεκτρική ενέργεια με υψηλό βαθμό απόδοσης. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης που εμφανίζουν στις χαμηλές θερμοκρασίες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Woodyard D. (1994), "D-E moves to Mainstream," *Marine Propulsion*, October
- Thomson B. (1994), "Diesel-Electric Options for Tanker Propulsion," *The Motor Ship*, April.
- Sallabank P. H., Whitehead A. J. (1996), "The practical application of modern simulation tools throughout the design and trials of a diesel electric propulsion system", *Trans ImarE*, Vol. 107, Part 2, pp.101-117
- Prousalidis J. M., Hatziargyriou N. D., Papadias B. C. (2001), "On studying ship electric propulsion motor driving schemes", Proceedings of 5th International Conference on *Power System Transients*, pp. 87-92, Rio de Janeiro, Brazil, 23-26 June.
- Parker D., Bolton M., (1998)"The Electric Warship", Proceedings of *International Conference on the Naval Technology for the 21st Century*, Hellenic Naval Academy, pp. 43-48, Piraeus (Greece), 29-30 June 1998
- Μανιάς Σ (1988), "Ηλεκτρονικά Ισχύος", Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα
- Ν.ΛΥΜΠΕΡΟΠΟΥΛΟΣ, Ε.ΒΑΡΚΑΡΑΚΗ, Ε.ΖΟΥΛΙΑΣ, Μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια, Ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς στην Ελλάδα - Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές, ΤΕΕ, Αθήνα, 12-13 Ιανουαρίου 2006.
- Larminie J., Dicks A, Fuel Cell Systems Explained, Wiley, 2000.
- Cheng K.W.E., Sutanto D, Ho Y.L, Law K.K, Exploring the Power Conditioning Systems for Fuel Cell, Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, IEEE 2001.
- Li X. Thermodynamic evaluation of fuel cell performance and comparison with heat engines. In: Proceedings CSME Forum SCGM 1998, vol I, May 19-22, 1998.

- US Department of Energy. Fuel cell handbook. Office of fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, Morgantown, West Virginia 26507-0880 ,October 2000.
- Appleby A. Fuel cells systems. In: Blomen L, Mugerwa M, editor. Characteristics of fuel cell systems. New York: Plenum Press, 1993.
- Handbook of Fuel Cells. Seventh Edition. US Department of Energy , National Technology Library Morgantown, West Virginia, 2004.
- Fuel Cells, IEEE spectrum, June 2001
- Energy Nexus Group, Technology Characterization: Fuel Cells, April 2002.
- H. Ertl, J. W. Kolar and F.C. Zack, “A Novel Multicell DC-AC Converter for Applications in Renewable Energy Systems”, IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol 49, No.5, October 2002, pp. 1048-1057.
- ABB Marine (2000), “Azimuthing Electric Propulsion Drive”

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Πρόλογος.....	5
Κεφάλαιο 1. ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	6
Κεφάλαιο 2. ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΩΣΗ.....	25
Κεφάλαιο 3. ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	39
Συμπεράσματα.....	43
Βιβλιογραφία.....	44