



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ &
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΜΕΣΑ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Κ. Παπίρης

Επιβλέπων : Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου,
Καθηγητής Η.Μ.Μ.Υ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ &
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΜΕΣΑ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Κ. Παπίρης

Επιβλέπων : Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου,
Καθηγητής Η.Μ.Μ.Υ. Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30 Ιουνίου 2025 .

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Ιωάννης Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Χρήστος Χριστοδούλου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ &
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

.....

Αθανάσιος Κ. Παπίρης

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

Copyright © Αθανάσιος, Κ. Παπίρης, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται με τη μελέτη, ανάλυση και προσομοίωση της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου υδρογόνου (Fuel Cells), με έμφαση στις κυψέλες τύπου PEMFC, και την εφαρμογή τους σε συστήματα ηλεκτροκίνησης μικρής κλίμακας. Στα πρώτα κεφάλαια παρουσιάζεται αναλυτικά η αρχή λειτουργίας, η κατηγοριοποίηση και τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου, καθώς και η χρήση τους ως πηγή ενέργειας σε συνδυασμό με ηλεκτροκινητήρες και μπαταρίες. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον ρόλο του υδρογόνου ως καύσιμο, στα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις που σχετίζονται με την αξιοποίησή του, και στη διαστασιολόγηση των βασικών υποσυστημάτων που απαιτούνται για ένα πλήρες ενεργειακό σύστημα. Στη συνέχεια, αναλύεται θεωρητικά και προσομοιώνεται ένα υβριδικό ενεργειακό σύστημα, το οποίο αποτελείται από κυψέλη καυσίμου PEM, μπαταρία και ηλεκτροκινητήρα. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του MATLAB/Simulink και περιλαμβάνει τον έλεγχο φόρτισης της μπαταρίας, την παρακολούθηση της κατανάλωσης υδρογόνου, καθώς και την απόκριση του συστήματος σε δυναμικές συνθήκες λειτουργίας. Τέλος, προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις με σκοπό την πειραματική υλοποίηση του συστήματος σε εργαστηριακό περιβάλλον και την ενσωμάτωση τεχνικών βελτιστοποίησης και ανάκτησης ενέργειας.

Λέξεις-κλειδιά: Κυψέλες Καυσίμου, PEMFC, Ηλεκτροκίνηση, Υβριδικά Ενεργειακά Συστήματα, Simulink.

Abstract

The present work focuses on the study, analysis, and simulation of hydrogen fuel cell technology, with an emphasis on Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC), and their application in small-scale electric mobility systems. The initial chapters provide a detailed overview of the operating principles, classification, and technical characteristics of various types of fuel cells, along with their integration with electric motors and batteries as part of hybrid energy systems. Particular attention is given to hydrogen as an energy carrier, highlighting its advantages and limitations, as well as the sizing and selection of the key components required for an operational system. A theoretical model of hybrid energy architecture is developed and simulated, consisting of a PEM fuel cell, a battery, and a DC motor. The simulation, implemented in MATLAB/Simulink, investigates hydrogen consumption over time, battery state-of-charge behavior, and system response under dynamically changing load conditions. Finally, the study proposes future work involving experimental validation in a laboratory environment, as well as further enhancements such as battery charge optimization and regenerative energy strategies.

Keywords: Fuel Cells, PEMFC, Electromobility, Hybrid Energy Systems, Simulink.

Ευχαριστίες

Αφιερώνω αυτή τη διπλωματική εργασία στους ανθρώπους που με στήριξαν σε όλη τη διάρκεια της πορείας μου. Πρώτα απ' όλα, στους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Αριστέα, για την απεριόριστη αγάπη, την υποστήριξη και τις θυσίες τους. Στα αδέρφια μου, Ανθή, Στάθη και Ερμιόνη, και στη πολυαγαπημένη γιαγιά μου, Ανθή που ήταν πάντα δίπλα μου με αγάπη και ενθάρρυνση. Στους φίλους και συναδέλφους μου, Γιώργο, Ηλία, Κατερίνα, Βασίλη και πολλούς άλλους, που με τη φιλία και την παρέα τους έκαναν αυτή τη διαδρομή πιο όμορφη. Στην κοπέλα μου, για την αγάπη, την κατανόηση και τη συνεχή στήριξή της σε κάθε δυσκολία. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Διδάκτορα Μιχάλη Κώτσια, που στάθηκε δίπλα μου με καθοδήγηση και υποστήριξη κατά τη συγγραφή αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και στον Καθηγητή Ευάγγελο Χριστοφόρου, που πίστεψε σε εμένα.

Αυτή η διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη σε όλους εκείνους τους αφοσιωμένους φοιτητές και φοιτήτριες που, με ακούραστο πείσμα και επιμονή, αντιμετωπίζουν τις αμέτρητες δυσκολίες της ακαδημαϊκής τους πορείας και συνεχίζουν με θάρρος να κυνηγούν τα όνειρά τους

Πίνακας Περιεχομένων

1. Γενικά.....	14
2. Σκοπός και δομή της εργασίας:.....	15
Εισαγωγή	17
3.1. Σύντομη Ιστορική αναδρομή.....	17
3.2. Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου.....	18
3.3. Ταξινόμηση κυψελών καυσίμου:	20
3.4. Βασικά Μέρη μιας Κυψέλης Καυσίμου	24
3.5. Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)	27
3.5.1. Πλεονεκτήματα PEMFC	29
3.5.2. Μειονεκτήματα PEMFC	30
3.6. Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)	30
3.7. Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)	33
3.7.1. Πλεονεκτήματα AFC.....	34
3.7.2. Μειονεκτήματα AFC	34
3.8. Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)	35
3.8.1. Πλεονεκτήματα PAFC	36
3.8.2. Μειονεκτήματα PAFC	36
3.9. Κυψέλη καυσίμου τηγμάτων ανθρακικών αλάτων (MCFC)	37
3.9.1. Πλεονεκτήματα MCFC	38
3.9.2. Μειονεκτήματα MCFC	39
3.10. Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC).....	40
3.10.1. Πλεονεκτήματα SOFC	41
3.10.2. Μειονεκτήματα SOFC	41
4. Είδη κινητήρων ηλεκτροκίνησης	45
4.1. Ασύγχρονος κινήτηρας (Induction Motor).....	45
4.2. Κινήτηρας Μεταγόμενης Μαγνητικής Απροθυμίας (Switched Reluctance Motor)	46

4.3. Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor)	47
4.4. Κινητήρας Μονίμων Μαγνητών Χωρίς Ψήκτρες (Brushless DC)	48
4.5. Κινητήρας Μονίμων Μαγνητών με ψήκτρες (Brushed DC Motor)	50
5. Είδη μπαταριών και υπερπυκνωτές στην ηλεκτροκίνηση	52
5.1. Μπαταρία Ιόντων Λιθίου (Lithium-Ion)	53
5.2. Μπαταρία Υδριδίου Νικελίου-Μετάλλου (Nickel-Metal Hydride – Ni/MH)	55
5.3. Συμπερασματικά η χρήση των μπαταριών στην ηλεκτροκίνηση	56
5.4. Υπερπυκνωτές	57
5.5. Πυκνωτής Ηλεκτρικής Διπλής Στρώσης (EDLC)	57
5.6. Ψευδοπυκνωτής (Pseudocapacitor)	58
5.7. Υβριδικός Πυκνωτής (Hybrid capacitor)	58
6. Εξοπλισμός και ηλεκτροκίνηση FCEV	60
6.1. Υλικά και Εξαρτήματα για ηλεκτροκίνηση FCEV	60
6.2. Ιδιότητες και Καταλληλότητα του Υδρογόνου ως Καύσιμο Κυψελών Καυσίμου	64
6.3. Το Υδρογόνο ως Καύσιμο	65
6.4. Τρόπος Απόκρισης Κινητήρων σε σύνδεση με fuel cell.....	67
6.5. Διαστασιολόγηση εξοπλισμού	68
7. Μοντελοποίηση συστήματος FCEV σε MATLAB/Simulink	70
7.1. Περιγραφή του Συστήματος	70
7.2. Σχεδιασμός Μοντέλου Simulink	74
7.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης	76
7.4. Συμπεράσματα	78
8. Ανακεφαλαίωση	79
Βιβλιογραφία	81

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΜΕΣΑ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ

1. Γενικά

Η κλιματική κρίση μπορεί να γίνει κατανοητή ως το φαινόμενο της υπερβολικής πλανητικής υπερθέρμανσης, το οποίο συχνά παρομοιάζεται με την υπερθέρμανση ενός νοικοκυριού. Η κύρια αιτία αυτής της αύξησης της θερμοκρασίας είναι η συσσώρευση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα, το οποίο απελευθερώνεται πρωτίστως μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων (όπως βενζίνη, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) για την παραγωγή ενέργειας και τις μεταφορές. Αυτό μπορεί να περιγραφεί μεταφορικά σαν να διατηρούμε μια φωτιά συνεχώς αναμμένη μέσα στο «σπίτι μας». Κατά συνέπεια, η υιοθέτηση τεχνολογιών καθαρής ενέργειας που δεν εκπέμπουν επιβλαβείς ρύπους καθίσταται επιτακτική.

Η συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα περιλαμβάνει μια διαδικασία πολλαπλών σταδίων: αρχικά, το καύσιμο υφίσταται καύση για την παραγωγή θερμικής ενέργειας, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού υψηλής πίεσης. Αυτός ο ατμός κινεί έναν στρόβιλο, μετατρέποντας τη θερμική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια, η οποία εν συνεχεία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας γεννήτριας.

Ως απάντηση στην επείγουσα ανάγκη για καθαρές τεχνολογίες, η μετάβαση σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας, ιδιαίτερα στον τομέα των μεταφορών, έχει τοποθετήσει την ηλεκτροκίνηση στην πρώτη γραμμή. Τα σημερινά ηλεκτρικά οχήματα συνήθως ακολουθούν δύο κύριες τεχνολογικές προσεγγίσεις: τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (που χρησιμοποιούν μπαταρίες ιόντων λιθίου για την αποθήκευση ενέργειας) και τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου. Τα τελευταία, μια διαρκώς εξελισσόμενη τεχνολογία, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας χημικής αντίδρασης. Συγκεκριμένα, αξιοποιούν το υδρογόνο ως φορέα ενέργειας. Όταν το υδρογόνο παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης που τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στους μοριακούς δεσμούς του θεωρείται καθαρή. Οι κυψέλες καυσίμου ουσιαστικά αντιστρέφουν τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια από υδρογόνο ενώ εκπέμπουν μόνο νερό ως παραπροϊόν, προσφέροντας έτσι μια λύση μηδενικών εκπομπών για την κινητικότητα..

2. Σκοπός και δομή της εργασίας:

Οι κυψέλες καυσίμου αντιπροσωπεύουν μία καινοτόμο προσέγγιση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι διατάξεις αυτές μετατρέπουν απευθείας τη χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε καύσιμα, όπως το υδρογόνο ή άλλες ενώσεις πλούσιες σε υδρογόνο, σε ηλεκτρική ενέργεια, παράγοντας ταυτόχρονα θερμότητα. Αυτή η ενεργειακή μετατροπή επιτυγχάνεται μέσω της ηλεκτροχημικής οξείδωσης του καυσίμου.

Σε αντίθεση με τους συμβατικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης, οι κυψέλες καυσίμου διακρίνονται λόγω της διαδικασίας απευθείας ενεργειακής μετατροπής, λειτουργώντας μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης χωρίς τη μεσολάβηση καύσης, παραγωγής ατμού ή περιστρεφόμενων μηχανικών εξαρτημάτων. Η δομή τους αποτελείται από δύο κύρια ηλεκτρόδια, την άνοδο (όπου λαμβάνει χώρα η οξείδωση του καυσίμου, τυπικά το αρνητικό ηλεκτρόδιο) και την κάθοδο (όπου πραγματοποιείται η αναγωγή του οξειδωτικού μέσου, τυπικά το θετικό ηλεκτρόδιο), τα οποία διαχωρίζονται από μία ειδική μεμβράνη που λειτουργεί ως ηλεκτρολύτης. Στην άνοδο, το καύσιμο (π.χ., υδρογόνο) διασπάται σε πρωτόνια (H^+) και ηλεκτρόνια (e^-). Τα ηλεκτρόνια κατευθύνονται μέσω εξωτερικού κυκλώματος, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ τα πρωτόνια διέρχονται μέσω της μεμβράνης προς την κάθοδο. Εκεί, επανασυνδυάζονται με το οξειδωτικό μέσο (τυπικά οξυγόνο από τον αέρα) και τα επιστρέφοντα ηλεκτρόνια για να παράγουν νερό (H_2O) και θερμότητα ως παραπροϊόντα.

Η θεμελιώδης διάκριση από τη συμβατική θερμική ηλεκτροπαραγωγή έγκειται σε αυτήν την απευθείας ηλεκτροχημική μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική, παρακάμπτοντας ενδιάμεσα στάδια που περιλαμβάνουν μετασχηματισμούς θερμικής και μηχανικής ενέργειας. Ως αποτέλεσμα, οι κυψέλες καυσίμου παρέχουν δυνητικά σημαντικά υψηλότερη ενεργειακή απόδοση και κατά πολύ καθαρότερη λειτουργία, δεδομένου ότι το κύριο παραπροϊόν τους είναι το νερό αντί για ρύπους καύσης. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τις κυψέλες καυσίμου μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για την παραγωγή καθαρής ενέργειας μελλοντικά.

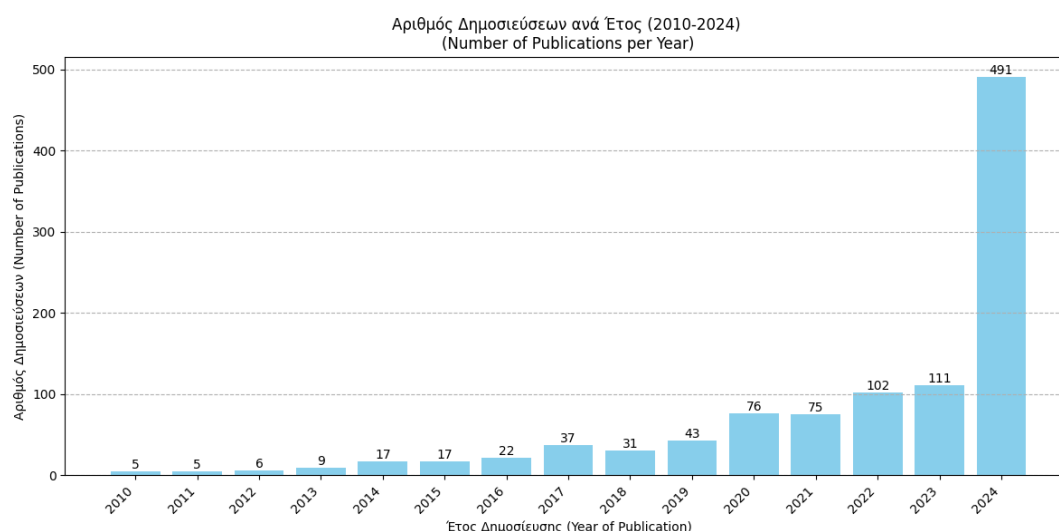
Μία ιδιαίτερα σημαντική και ταχέως αναπτυσσόμενη εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής εντοπίζεται στα συστήματα ηλεκτροκίνησης. Ειδικότερα, η χρήση Κυψελών Καυσίμου με Μεμβράνη Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFCs) αποτελεί αντικείμενο εντατικής μελέτης ως κύρια πηγή ισχύος για ηλεκτρικά οχήματα. Τα συστήματα αυτά συχνά συνδυάζονται με διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας, όπως συσσωρευτές (μπαταρίες) ή/και υπερπυκνωτές. Αυτά τα βοηθητικά στοιχεία λειτουργούν ως ενδιάμεσοι αποθηκευτές ενέργειας (energy buffers),

επιτρέποντας στο σύστημα να ανταποκρίνεται ταχέως σε αιφνίδιες απαιτήσεις ισχύος (π.χ., επιτάχυνση), να ανακτά ενέργεια κατά την πέδηση και να βελτιστοποιεί τη λειτουργία της ίδιας της κυψέλης καυσίμου, η οποία αποδίδει με τη μέγιστη απόδοση υπό συνθήκες σταθερού φορτίου.

Ο απώτερος στόχος τέτοιων υβριδικών συστημάτων ηλεκτροκίνησης είναι η παροχή λύσεων μετακίνησης που συνδυάζουν περιβαλλοντικά οφέλη (μηδενικές εκπομπές επί του οχήματος) με υψηλή ενεργειακή απόδοση και αυξημένη λειτουργική ευελιξία. Αυτό περιλαμβάνει πλεονεκτήματα όπως εκτεταμένη αυτονομία κίνησης και ταχύτερους χρόνους

ανεφοδιασμού σε σύγκριση με τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας. Η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται στην κατανόηση και βελτιστοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ της κυψέλης καυσίμου και του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (συσσωρευτής ή υπερπυκνωτής) για την επίτευξη βέλτιστης συνολικής απόδοσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε δύο κύρια μέρη. Το θεωρητικό μέρος παρέχει μία ανάλυση των κυψελών καυσίμου, των συσσωρευτών και των υπερπυκνωτών, καθώς και της συμπεριφοράς τους εντός του πλαισίου της ηλεκτροκίνησης. Στο προσομοιωτικό μέρος θα διεξαχθούν προσομοιώσεις που αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον MATLAB/SIMULINK για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος και την επικύρωση της ακρίβειας του θεωρητικού μοντέλου υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.



Δημοσιεύσεις με αναφορά σε *fuel cell electrification* (πηγή: Scopus)

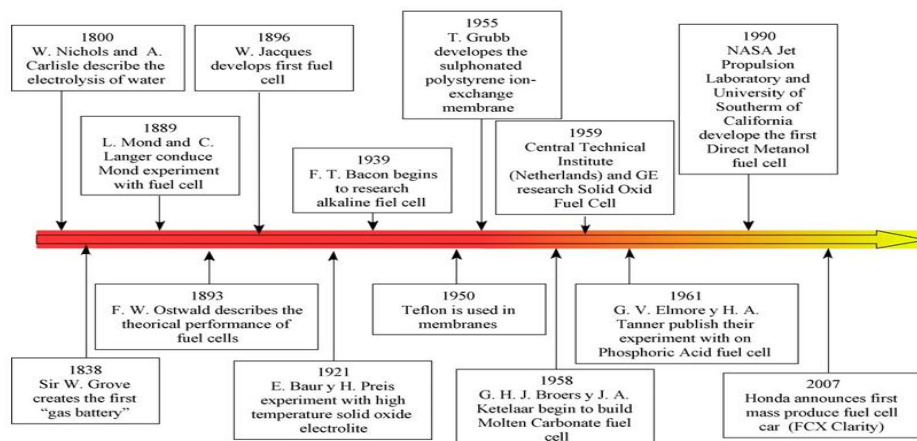
Εισαγωγή

3.1. Σύντομη Ιστορική αναδρομή

Η ιστορική εξέλιξη των κυψελών καυσίμου ξεκινάει με τις πρωτοποριακές ανακαλύψεις των Sir William Nicholson και Anthony Carlisle αναφορικά με την ηλεκτρόλυση του ύδατος (1800), οι οποίες έθεσαν τη θεμελιώδη βάση για μελλοντικές προόδους στον εν λόγω τομέα. Παρά τον αρχικό σκεπτικισμό, ο Sir William Robert Grove αναγνωρίζεται ευρέως ως ο «πατέρας» της πρώτης κυψέλης καυσίμου (1838), αναφερόμενης επίσης ως «αεριοσυστοιχία» (“gas battery”), αμφισβητώντας την προηγουμένως υποτιθέμενη συμβολή του Christian Friedrich Schönbein. Δύο από τα σημαντικότερα ορόσημα στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου περιλαμβάνουν τα θεωρητικά θεμέλια που τέθηκαν από τον Friedrich Wilhelm Ostwald (1893) και την πρακτική υλοποίηση από τον Francis Thomas Bacon (1939), αμφότερα εκ των οποίων προετοίμασαν το έδαφος για την πραγμάτωση λειτουργικών συστημάτων κυψελών καυσίμου.

Επιπροσθέτως, η NASA διαδραμάτισε καταλυτικό ρόλο στην προώθηση και εφαρμογή της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου, ιδίως μέσω της χρήσης τους στις διαστημικές αποστολές Gemini και Apollo κατά τη δεκαετία του 1990. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι κυψέλες καυσίμου ταξινομούνται βάσει του τύπου του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν, ένας παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους και τα πεδία εφαρμογής τους.

Στο ακόλουθο σχήμα παρατίθεται μία περιεκτική επισκόπηση των σημαντικότερων συνεισφορών στην εξέλιξη των κυψελών καυσίμου κατά τους τελευταίους δύο αιώνες. ([Σχήμα 1](#)).

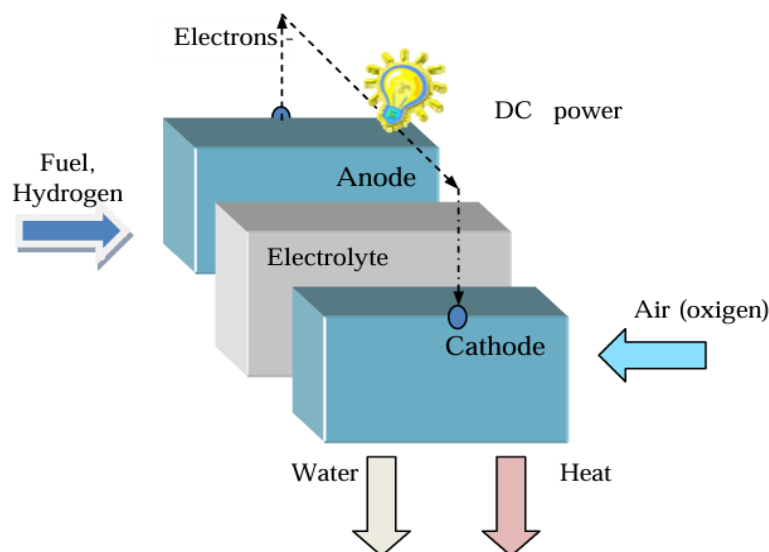


Σχήμα 3.1: Ιστορική Ανασκόπηση Κυψελών Καυσίμου. [1]

3.2. Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι διατάξεις ενεργειακής μετατροπής οι οποίες, σε αντίθεση με τους συμβατικούς θερμικούς κινητήρες, μετατρέπουν τη χημική ενέργεια των καυσίμων απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα καίριο συστατικό μιας κυψέλης καυσίμου είναι ο ηλεκτρολύτης, ο οποίος τοποθετείται μεταξύ δύο πορωδών ηλεκτροδίων. Ένα κοινό χαρακτηριστικό που διαθέτουν όλοι οι τύποι κυψελών καυσίμου είναι η χρήση υδρογόνου και οξυγόνου για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, νερού και θερμότητας.

Ανάλογα με τον τύπο του χρησιμοποιούμενου ηλεκτρολύτη, οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες. Σε μία τυπική διάταξη κυψέλης καυσίμου, το καύσιμο σε αέρια φάση παρέχεται συνεχώς στην άνοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο), ενώ ένα οξειδωτικό μέσο, όπως το ατμοσφαιρικό οξυγόνο, εισάγεται ταυτόχρονα στον θάλαμο της καθόδου (θετικό ηλεκτρόδιο). Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων, με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.



Σχήμα 3.2: Η έννοια των Κυψελών Καυσίμου [2]

Μία κυψέλη καυσίμου είναι μία διάταξη ενεργειακής μετατροπής η οποία, θεωρητικά, δύναται να παράγει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια εφόσον τόσο το καύσιμο όσο και το οξειδωτικό μέσο τροφοδοτούνται στα ηλεκτρόδιά της.

Στην πράξη, η διάρκεια λειτουργικής ζωής των κυψελών καυσίμου περιορίζεται από παράγοντες όπως η υποβάθμιση των υλικών, με κυριότερη τη διάβρωση, και η δυσλειτουργία των εσωτερικών εξαρτημάτων.

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου εμπορικά διαθέσιμες, καθεμία εκ των οποίων χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένα γνωρίσματα, συμπεριλαμβανομένων του εύρους θερμοκρασιών λειτουργίας, των τύπων καυσίμων που δύνανται να αξιοποιήσουν, της φύσης του χρησιμοποιούμενου καταλύτη και της αντίστοιχης απόδοσης ενεργειακής μετατροπής.

Η θεωρητική απόδοση των κυψελών καυσίμου υπολογίζεται από τη σχέση :

$$n = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

όπου ΔG : είναι η ελεύθερη ενέργεια Gibbs της αντίδρασης, και

ΔH : είναι η μεταβολή της ενθαλπίας

Όταν το παραγόμενο νερό είναι σε υγρή μορφή: $\Delta G=247,13\text{kJ/mol}$ και $\Delta H=241,82\text{ kJ/mol}$

Αυτό οδηγεί σε μια μέγιστη θεωρητική απόδοση:

$$n = 83\% \text{ (υγρό)}$$

$$n = 94,5\% \text{ (αέριο)}$$

Ωστόσο, στην πράξη, η απόδοση είναι χαμηλότερη εξαιτίας της εσωτερικής αντίστασης των κυψελών καυσίμου.

Έτσι ο βαθμός απόδοσης είναι : $n_{el} = \frac{V_{cell}}{\Delta H/2F}$

Όπου V_{cell} : είναι η τάση κυψέλης καυσίμου (V)

F: είναι η σταθερά Faraday (Cb/mol)

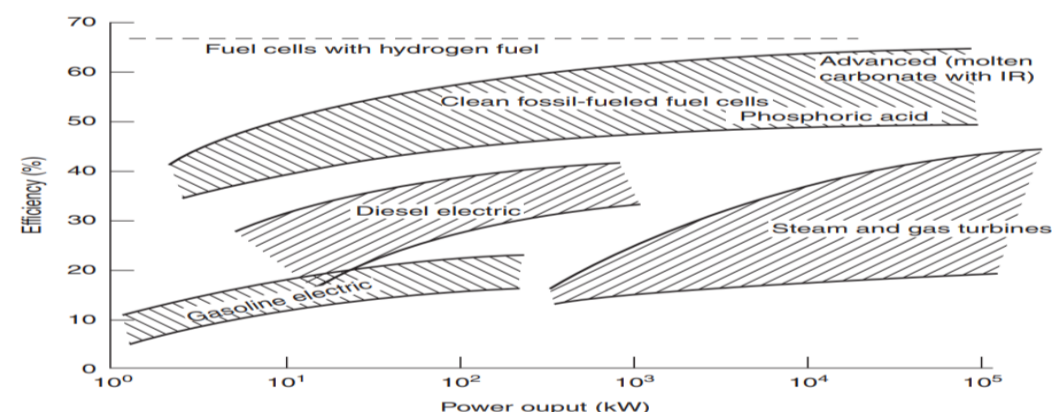
Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας που συγκρίνει διάφορους τύπους παραγωγής ενέργειας και των κυψελών καυσίμου, σε σχέση με την ισχύ εξόδου .

	Ηλεκτρικός (%)	Συμπαγωγή (%)	Συνολικός (%)
Κυψέλη καυσίμου	40-60	20-30	60-80
Μηχανή Diesel	30-40	0	30-40
Αεριοστρόβιλος	25-35	0	25-35
Μηχανή αερίου	25-35	0	25-35

Πίνακας 3.3: Σύγκριση βαθμών απόδοσης μονάδων ηλεκτρικής ισχύος

Συμπαγωγή: Η απορριπτόμενη θερμότητα που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιείται συνήθως για συνδυασμένη παραγωγή ενέργειας, όπως ατμός, κλιματισμός, ζεστός αέρας και θέρμανση. Η συνολική απόδοση ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να φτάσει το 80%. Η απορριπτόμενη θερμότητα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί

ως εσωτερικός αναμορφωτής για να μετατρέψει το αέριο καυσίμου σε απαραίτητα συστατικά.



Σχήμα 3.3: Βαθμός απόδοσης διαφόρων πηγών ενέργειας [2]

3.3. Ταξινόμηση κυψελών καυσίμου:

Από την αρχική επινόηση της κυψέλης καυσίμου, ο τομέας της ηλεκτροχημικής μετατροπής ενέργειας έχει γνωρίσει αξιοσημείωτη εξέλιξη, με αποτέλεσμα την εμφάνιση πληθώρας νέων τεχνολογικών διατάξεων. Αυτές οι προσεγγίσεις αξιοποιούν ποικίλες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας ένα διευρυμένο φάσμα καυσίμων. Παρότι το υδρογόνο παραμένει το πλέον διαδεδομένο καύσιμο, η έρευνα έχει επεκταθεί και σε εναλλακτικές καύσιμες ύλες, όπως οι υδρογονάνθρακες, ιδιαίτερα για συστήματα κυψελών που έχουν σχεδιαστεί για λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες. Παράλληλα, σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί στην ανάπτυξη διαφορετικών τύπων ηλεκτρολυτών, οι οποίοι διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη μεταφορά ιόντων, μια θεμελιώδη διεργασία για τη λειτουργία της κυψέλης. Επιπλέον, η θερμοκρασία λειτουργίας αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα που διαμορφώνει τα χαρακτηριστικά και την απόδοση των κυψελών, με εκτεταμένη μελέτη να έχει αφιερωθεί τόσο σε τεχνολογίες υψηλών όσο και χαμηλών θερμοκρασιών.

Κατά συνέπεια, η ταξινόμηση των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου βασίζεται σε αυτούς ακριβώς τους διακριτούς παράγοντες που καθορίζουν τη λειτουργία και τη σχεδιάσή τους: το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιείται, τον τύπο του ηλεκτρολύτη που επιτρέπει τη μεταφορά ιόντων, και το εύρος της θερμοκρασίας στην οποία λειτουργεί η κυψέλη.

Επομένως, οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τα παρακάτω κριτήρια.

Τύποι Κυψελών Καυσίμου:

Οι κυψέλες καυσίμου διακρίνονται ανάλογα με το τύπο του ηλεκτρολύτη που διαθέτουν, και είναι οι ακόλουθες:

- Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)
- Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)
- Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)
- Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)
- Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)
- Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)

Υπάρχει και ένας άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης των κυψελών καυσίμων, όπως φαίνεται και παρακάτω μπορούν να ταξινομηθούν βάση της θερμοκρασίας λειτουργίας τους, συγκεκριμένα:

- Χαμηλής θερμοκρασίας:
 - Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)
 - Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)
 - Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)
- Μεσαίας θερμοκρασίας:
 - Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)
- Υψηλής θερμοκρασίας:
 - Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)
 - Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)

Οι κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες απαιτούν τη χρήση υδρογόνου υψηλής καθαρότητας ως καύσιμο. Η παρουσία προσμίξεων όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) ή ενώσεις του θείου (S) στο καύσιμο είναι επιζήμια, καθώς οδηγούν σε δηλητηρίαση της ανόδου και μειωμένη απόδοση της κυψέλης.

Αντίθετα, οι κυψέλες καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών, όπως οι κυψέλες στερεών οξειδίων (SOFC) και οι κυψέλες τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευελιξία ως προς τα καύσιμα που μπορούν να δεχτούν. Αυτό οφείλεται σε δύο κύριους λόγους: οι χημικές αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια είναι πιο έντονες σε υψηλές θερμοκρασίες και ταυτόχρονα η αυξημένη θερμοκρασία μειώνει την εξάρτηση από ισχυρούς ηλεκτροκαταλύτες. Επιπλέον,

οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας επιτρέπουν την εσωτερική αναμόρφωση του καυσίμου μέσα στην κυψέλη, καθιστώντας δυνατή την απευθείας τροφοδοσία με καύσιμα που περιέχουν υδρογονάνθρακες.

Η θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί μια κυψέλη MCFC εξαρτάται από το σημείο τήξης του ηλεκτρολύτη της (τηγμένο ανθρακικό άλας). Αντίστοιχα, η θερμοκρασία λειτουργίας μιας κυψέλης SOFC καθορίζεται από την επαρκή ιοντική αγωγιμότητα που επιτυγχάνει ο στερεός ηλεκτρολύτης της σε υψηλές θερμοκρασίες.

Όσον αφορά τους φορείς φορτίου, στις κυψέλες που λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (όπως οι PEMFC ή AFC), τα κινούμενα ιόντα είναι συνήθως πρωτόνια (H^+) ή ιόντα υδροξυλίου (OH^-). Αντίθετα, στις κυψέλες υψηλής θερμοκρασίας, όπως οι MCFC και SOFC, οι φορείς φορτίου είναι ιόντα ανθρακικού άλατος (CO_3^{2-}) και ιόντα οξειδίου (O^{2-}) αντίστοιχα.

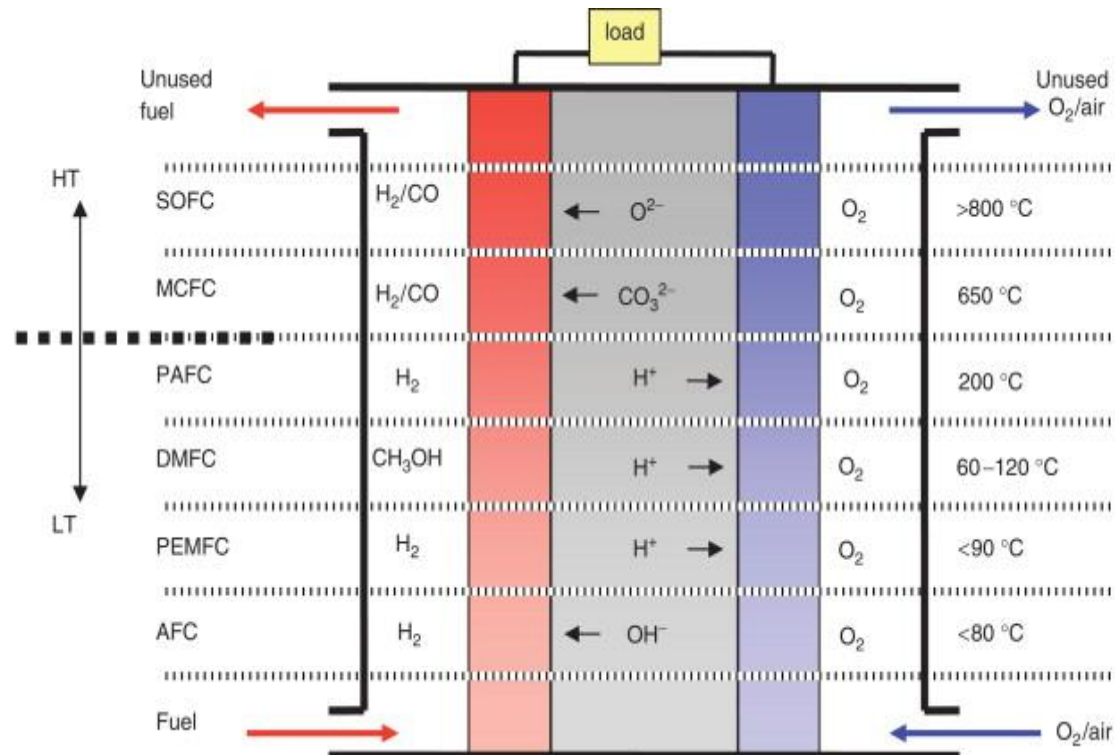
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αντιδρώντα για διαφόρους τύπους κυψελών καυσίμου:

ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΑΝΟΔΟΥ	ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΟ ΙΟΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΚΑΘΟΔΟΥ
AFC	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	OH^-	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
PEMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	H^+	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
DMFC	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$	H^+	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
PAFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	H^+	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$	CO_3^{2-}	$O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow 2CO_3^{2-}$
SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$	O^{2-}	$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$

Σημείωση: Μια διαφορά μεταξύ των κυψελών AFC και MCFC αφορά τη διαχείριση των παραπροϊόντων. Στις AFC, το νερό δημιουργείται στην άνοδο αλλά καταναλώνεται στην κάθοδο. Αντίθετα, στις MCFC, το CO_2 που παράγεται στην άνοδο χρειάζεται να επανακυκλοφορήσει προς την κάθοδο, διότι αποτελεί αναγκαίο συστατικό για την αντίδρασή της

Συνοπτικός πίνακας των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται σε κάθε τύπο κυψέλης καυσίμου [2]

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα καύσιμα (άνοδος/κάθοδος) και τα ιόντα που διακινούνται στον ηλεκτρολύτη για διαφορετικές κυψέλες καυσίμου.



Πίνακας 3.4: συνοπτικός για τα καύσιμα (άνοδος/κάθοδος) και τα ιόντα που διακινούνται στον ηλεκτρολύτη για διαφορετικές κυψέλες καυσίμου [2]

3.4. Βασικά Μέρη μιας Κυψέλης Καυσίμου

Όπως έχουμε προαναφέρει ως κυψέλη καυσίμου ορίζεται μια διάταξη που επιτυγχάνει την απευθείας ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας ενός καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια, παράγοντας συνεχή ηλεκτρική τάση. Η γενική διεργασία μπορεί να παρασταθεί ως:

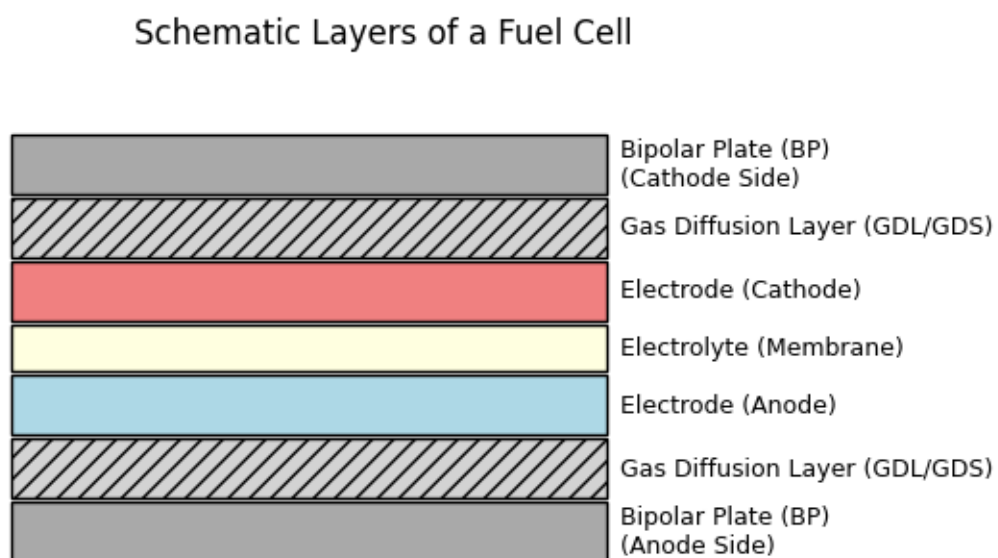
Καύσιμο + Οξειδωτικό + καταλύτης $\rightarrow$ Ηλεκτρική Ενέργεια + Νερό + Θερμότητα.

Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η παράκαμψη ενδιάμεσων ενεργειακών μετατροπών (όπως οι θερμικές/μηχανικές σε συμβατικούς κινητήρες) και η απουσία κινούμενων μηχανικών μερών.

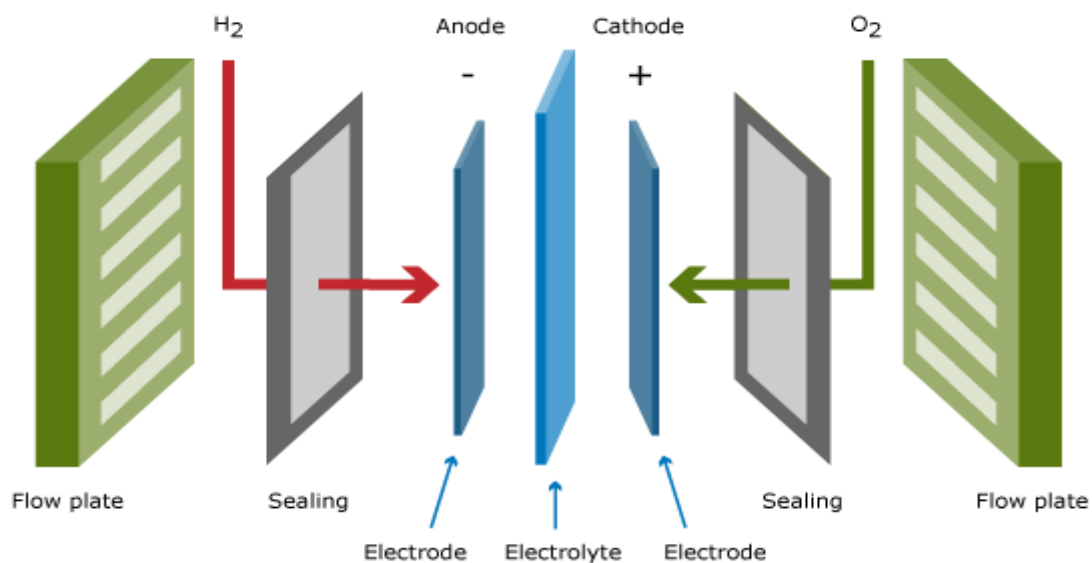
Η θεμελιώδης δομή μιας κυψέλης καυσίμου περιλαμβάνει:

- Τον ηλεκτρολύτη (π.χ., μια πολυμερής μεμβράνη), που επιτρέπει τη διέλευση ιόντων.
- Ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο (την άνοδο), όπου τροφοδοτείται το καύσιμο.
- Ένα θετικό ηλεκτρόδιο (την κάθοδο), όπου τροφοδοτείται το οξειδωτικό μέσο (π.χ., οξυγόνο).
- Το στρώμα διαχείρισης αερίων (Gas Diffusion Layer).
- Τις διπολικές πλάκες (Bipolar Plates).

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή της κυψέλης αναλυτικά:



Σχήμα 3.5: Δομή Κυψέλης Καυσίμου -1-



Σχήμα 3.6: Δομή Κυψέλης Καυσίμου -2- [4]

Δομικά Στοιχεία Κυψέλης Καυσίμου:

Παρακάτω παρουσιάζονται τα κύρια δομικά στοιχεία που αποτελείται μια κυψέλη καυσίμου.

Ηλεκτρολύτης:

Ο ηλεκτρολύτης (electrolyte), ο οποίος στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μια πολυμερής μεμβράνη, αποτελεί το κεντρικό στρώμα της κυψέλης καυσίμου. Ο ρόλος του είναι κρίσιμος, καθώς επιτρέπει τη διόδο ιόντων (όπως πρωτόνια H^+) από την άνοδο προς την κάθοδο, ενώ ταυτόχρονα λειτουργεί ως μονωτής απέναντι στα ηλεκτρόνια. Με αυτόν τον τρόπο αποτρέπει το βραχυκύκλωμα και εξασφαλίζει την απαιτούμενη ιοντική αγωγιμότητα χωρίς ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Παράλληλα, ο ηλεκτρολύτης διαχωρίζει φυσικά το καύσιμο από το οξειδωτικό.

Άνοδος (Anode):

Η άνοδος αποτελεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο της κυψέλης και είναι το σημείο εισόδου του καυσίμου, συνήθως υδρογόνου. Στην επιφάνειά της υπάρχει καταλύτης (συνήθως λευκόχρυσος), ο οποίος διευκολύνει την αντίδραση οξείδωσης του υδρογόνου. Κατά τη διαδικασία αυτή, το υδρογόνο διασπάται σε πρωτόνια (H^+) και ηλεκτρόνια (e^-). Τα πρωτόνια διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη με

κατεύθυνση προς την κάθοδο, ενώ τα ηλεκτρόνια οδηγούνται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα.

Κάθοδος (Cathode):

Η κάθοδος είναι το θετικό ηλεκτρόδιο της κυψέλης και αποτελεί το σημείο εισαγωγής του οξειδωτικού μέσου, όπως το οξυγόνο ή ο αέρας. Επίσης περιέχει καταλύτη, ο οποίος επιτρέπει την αντίδραση αναγωγής του οξυγόνου. Κατά τη διαδικασία αυτή, τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από το εξωτερικό κύκλωμα και τα πρωτόνια που έχουν μετακινηθεί μέσω του ηλεκτρολύτη συνδυάζονται με το οξυγόνο, σχηματίζοντας νερό ως τελικό προϊόν. Αυτή η διαδικασία ολοκληρώνει το ηλεκτροχημικό κύκλωμα της κυψέλης.

Στρώμα Διάχυσης Αερίων (Gas Diffusion Layer - GDL):

Το στρώμα διάχυσης αερίων είναι ένα πορώδες, αγωγίμο υλικό που τοποθετείται ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο (και συγκεκριμένα στο στρώμα του καταλύτη) και στη διπολική πλάκα. Ο ρόλος του είναι να διευκολύνει την ομοιόμορφη κατανομή των αερίων αντιδρώντων στο ενεργό σημείο της αντίδρασης, να επιτρέπει την απομάκρυνση των παραγόμενων προϊόντων (όπως νερό), να εξασφαλίζει ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταξύ των στρωμάτων και να παρέχει μηχανική υποστήριξη στη μεμβράνη και στα στρώματα καταλύτη.

Διπολικές Πλάκες (Bipolar Plates - BPP):

Οι διπολικές πλάκες βρίσκονται στις εξωτερικές πλευρές κάθε κυψέλης και διαχωρίζουν διαδοχικά στοιχεία της συστοιχίας (stack). Περιέχουν ειδικά κανάλια ροής (flow fields) που εξασφαλίζουν την ομοιόμορφη κατανομή των αντιδρώντων αερίων σε όλη την ενεργή επιφάνεια της κυψέλης. Επιπλέον, συλλέγουν και μεταφέρουν το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, απομακρύνουν την παραγόμενη θερμότητα και υγρασία, και προσφέρουν δομική ακεραιότητα στο σύνολο της συστοιχίας κυψελών.

Η συνεργασία των παραπάνω δομικών στοιχείων διασφαλίζει την αποτελεσματική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, καθιστώντας δυνατή την άμεση μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε ηλεκτρική, με υψηλή απόδοση και ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις ("Fuel Cell Systems Explained", J. Larminie, A. Dicks 2003).

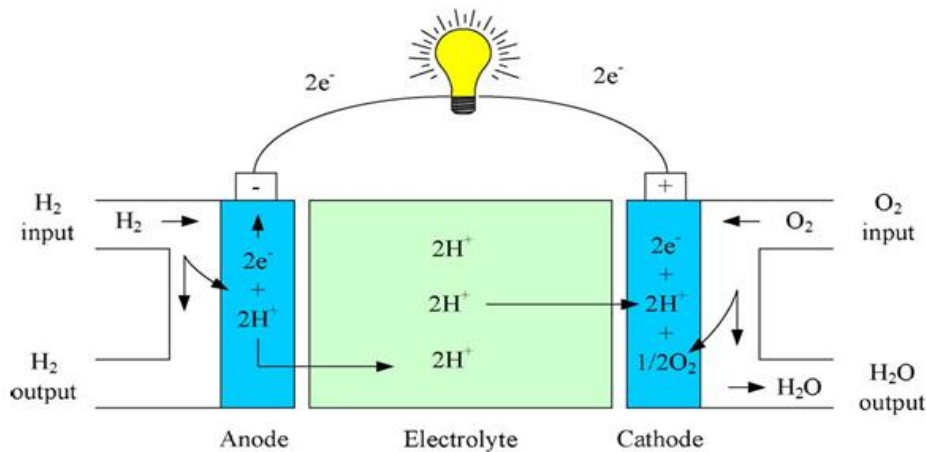
3.5. Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)

Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cells – PEMFC) αποτελούν ιδιαίτερα αποδοτικές και φιλικές προς το περιβάλλον συσκευές μετατροπής ενέργειας, οι οποίες αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο ενεργειακό μείγμα του μέλλοντος. Η λειτουργία τους βασίζεται στη χημική αντίδραση μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου, η οποία είναι αντίστροφη της αντίδρασης ηλεκτρόλυσης του νερού. Το κύριο πλεονέκτημα των PEMFC είναι η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους, η οποία κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 60°C και 90°C, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για φορητές και μεταφορικές εφαρμογές. Για την επίτευξη υψηλής ενεργειακής απόδοσης, απαιτείται σε πολλές περιπτώσεις η τροφοδοσία των αντιδρώντων αερίων υπό αυξημένες πιέσεις.

Η αρχή λειτουργίας της PEMFC περιλαμβάνει την τροφοδοσία αέριου υδρογόνου (H_2) στην άνοδο, όπου το καύσιμο διαχέεται μέσω του στρώματος διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layer - GDL) και φτάνει στο στρώμα του καταλύτη της ανόδου. Εκεί, το υδρογόνο υφίσταται οξείδωση, διασπώμενο σε πρωτόνια (H^+) και ηλεκτρόνια (e^-). Τα πρωτόνια μετακινούνται διαμέσου της μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) προς την κάθοδο, ενώ τα ηλεκτρόνια οδηγούνται μέσω εξωτερικού κυκλώματος, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα.

Στην κάθοδο, παρέχεται αέριο οξυγόνο (O_2), το οποίο διαχέεται προς το καθοδικό στρώμα καταλύτη. Εκεί, τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και τα πρωτόνια από τη μεμβράνη συνδυάζονται με το οξυγόνο, οδηγώντας στην αναγωγή του οξυγόνου και στον σχηματισμό νερού (H_2O) ως τελικό προϊόν της αντίδρασης.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας μιας κυψέλης PEMFC.



Σχήμα 3.7: PEMFC Χαρακτηριστικά Λειτουργίας [4]

Οι επιμέρους χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και την κάθοδο της κυψέλης καυσίμου PEMFC διατυπώνονται ως εξής:

Περιγραφή	Χημική Εξίσωση
Άνοδος (-)	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
Κάθοδος (+)	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
Συνολική Αντίδραση	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} \quad Q_1 + Q_2$

Σχήμα 3.8: Χημικές Αντιδράσεις PEMFC [2]

Όπου Q_1 είναι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, και Q_2 είναι οι απώλειες θερμότητας.

Το βασικό λειτουργικό στοιχείο μιας κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων είναι η ιοντικά αγωγίμη μεμβράνη, η οποία επιτρέπει τη διέλευση πρωτονίων (H^+), ενώ ταυτόχρονα εμποδίζει τη ροή ηλεκτρονίων, διασφαλίζοντας έτσι τον απαραίτητο διαχωρισμό φορτίων. Η μεμβράνη αυτή είναι τοποθετημένη μεταξύ της ανόδου και της καθόδου, επιτρέποντας τη συνέχιση της ηλεκτροχημικής διεργασίας χωρίς την ύπαρξη βραχυκυκλώματος.

Τα υλικά κατασκευής της μεμβράνης αυτής προέρχονται κατά κύριο λόγο από φθοριοπολυμερή, όπως το Teflon (PTFE), ενώ έχουν επίσης μελετηθεί πολυμερή χαμηλότερου κόστους, όπως η πολυστυρόλη, για εφαρμογές περιορισμένων απαιτήσεων. Η πλέον διαδεδομένη επιλογή αποτελεί το Nafion, ένα σουλφονωμένο πολυμερές με σκελετό από PTFE, το οποίο παρουσιάζει υψηλή ιοντική αγωγιμότητα και χημική αντοχή.

Το Nafion παρασκευάζεται μέσω της εισαγωγής σουλφονικών ομάδων ($-SO_3H$) στη δομή του PTFE, οι οποίες λειτουργούν ως ενεργά σημεία για τη μεταφορά πρωτονίων. Το πάχος της μεμβράνης κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 50 και 175 μm , με κάθε διακύμανση να συνοδεύεται από συγκεκριμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά: οι λεπτότερες μεμβράνες προσφέρουν αυξημένη αγωγιμότητα και καλύτερη ηλεκτρική απόδοση, αλλά συνεπάγονται προβλήματα στη διαχείριση της υγρασίας και μικρότερη μηχανική σταθερότητα. Αντίθετα, οι παχύτερες μεμβράνες εξασφαλίζουν σταθερότερη λειτουργία και μεγαλύτερη αντοχή, εις βάρος όμως της συνολικής αγωγιμότητας του συστήματος και άρα μικρότερη απόδοση.

3.5.1. Πλεονεκτήματα PEMFC

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cells – PEMFC) συγκεντρώνει πληθώρα πλεονεκτημάτων, τα οποία την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές που απαιτούν καθαρές και αποδοτικές μορφές ενεργειακής μετατροπής. Ένα από τα βασικά της χαρακτηριστικά είναι η χρήση στερεάς πολυμερικής μεμβράνης ως ηλεκτρολύτη, γεγονός που επιλύει προβλήματα διάβρωσης, διαρροής και πολυπλοκότητας διαχείρισης, τα οποία συνδέονται με την παρουσία υγρών ηλεκτρολυτών σε άλλους τύπους κυψελών. Η συγκεκριμένη επιλογή υλικού συμβάλλει στη διαμόρφωση πιο συμπαγών, αξιόπιστων και μακροχρόνια σταθερών διατάξεων.

Επιπροσθέτως, η λειτουργία των PEMFC σε μέτριες θερμοκρασίες, τυπικά εντός του εύρους 60–90°C, καθιστά δυνατή την ταχεία εκκίνηση και την αποτελεσματική απόκριση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες φορτίου. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν την τεχνολογία εξαιρετικά κατάλληλη για κινητές και μεταφορικές εφαρμογές, όπως είναι τα ηλεκτρικά οχήματα και τα υβριδικά συστήματα.

Τέλος, ερευνητικά δεδομένα υποδεικνύουν ότι οι κυψέλες PEM μπορούν να επιτύχουν υψηλή αξιοπιστία και παρατεταμένη διάρκεια ζωής, εφόσον λειτουργούν υπό βέλτιστες συνθήκες. Παράγοντες όπως η σταθερή θερμοκρασία, η σωστή υγρασιακή διαχείριση και η χρήση ανθεκτικών υλικών καθίστανται κρίσιμοι για τη μακροχρόνια βιωσιμότητα της τεχνολογίας.

3.5.2. Μειονεκτήματα PEMFC

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), η ευρεία εμπορική τους αξιοποίηση εξακολουθεί να περιορίζεται από ορισμένους τεχνολογικούς και οικονομικούς περιορισμούς. Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις αφορά το υψηλό κόστος κατασκευής, το οποίο αποδίδεται κυρίως στην απαίτηση χρήσης ευγενών μετάλλων, όπως η πλατίνα (Pt), ως καταλυτικό υλικό στα ηλεκτρόδια. Η πλατίνα, αν και ιδιαίτερα αποτελεσματική για την επιτάχυνση των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, είναι ακριβή και σχετικά σπάνια, με αποτέλεσμα να επιβαρύνει σημαντικά το συνολικό κόστος της κυψέλης. Στο πλαίσιο αυτό, η επιστημονική έρευνα επικεντρώνεται στην ανάπτυξη τεχνολογιών μείωσης της καταλυτικής φόρτισης (platinum loading) ή ακόμα και στην υποκατάσταση της πλατίνας με φθηνότερους και αφθονότερους καταλύτες, χωρίς σημαντική απώλεια απόδοσης.

Επιπλέον, οι PEM κυψέλες παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία σε προσμίξεις που ενδέχεται να υπάρχουν στο καύσιμο, υδρογόνο. Ιδιαίτερο πρόβλημα αποτελεί η παρουσία μονοξειδίου του άνθρακα (CO), το οποίο, ακόμη και σε συγκεντρώσεις της τάξης των μερών ανά εκατομμύριο (ppm), μπορεί να προσροφηθεί (adsorb) ισχυρά στην επιφάνεια του καταλύτη, οδηγώντας σε δηλητηρίαση του καταλύτη (catalyst poisoning) και συνεπώς, σε δραστηκή μείωση της ηλεκτροχημικής του δραστηκότητας.

Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού, απαιτείται η χρήση υδρογόνου εξααιρετικά υψηλής καθαρότητας, ή εναλλακτικά η ενσωμάτωση συστημάτων απομάκρυνσης CO, όπως μονάδες μετατροπής CO μέσω αντίδρασης με υδρατμούς (CO shift converters) και καταλυτικά φίλτρα καθαρισμού. Ωστόσο, τέτοιες προσθήκες οδηγούν σε αύξηση της πολυπλοκότητας του συστήματος, ενώ συνεπάγονται επιπρόσθετο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, γεγονός που δυσχεραίνει περαιτέρω την οικονομική βιωσιμότητα της τεχνολογίας. [6]

3.6. Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)

Οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cells – DMFC) αποτελούν μια σχετικά νεότερη τεχνολογική προσέγγιση στον τομέα των κυψελών καυσίμου και μπορούν να θεωρηθούν ως παραλλαγή των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), δεδομένου ότι χρησιμοποιούν παρόμοιο τύπο πολυμερικής μεμβράνης ως ηλεκτρολύτη. Η θεμελιώδης διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι, αντί για αέριο υδρογόνο,

χρησιμοποιείται ως καύσιμο υγρή μεθανόλη (CH_3OH), η οποία τροφοδοτείται απευθείας στην άνοδο του συστήματος.

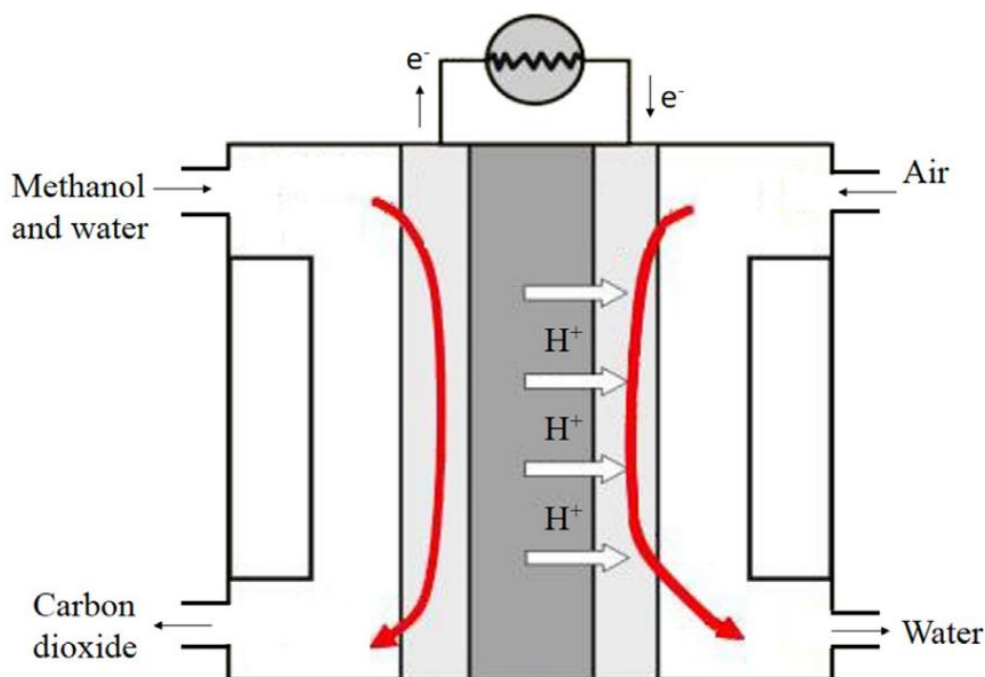
Στην περίπτωση των DMFC, ο καταλύτης της ανόδου είναι ειδικά διαμορφωμένος ώστε να διευκολύνει την άμεση ηλεκτροχημική οξείδωση της μεθανόλης, εξάγοντας τα απαραίτητα πρωτόνια και ηλεκτρόνια για τη λειτουργία της κυψέλης, χωρίς να απαιτείται ενδιάμεσο στάδιο αναμόρφωσης (reforming) του καυσίμου. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει τη σημαντική απλοποίηση της συνολικής διάταξης, καθώς εξαλείφεται η ανάγκη για εξωτερική μονάδα μετατροπής καυσίμου, γεγονός που δύναται να μειώσει το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Η θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελών καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC) κυμαίνεται συνήθως στο εύρος 60°C έως 120°C , τιμές παρόμοιες με εκείνες που παρατηρούνται στις PEM κυψέλες. Το χαρακτηριστικό αυτό επιτρέπει την αξιοποίησή τους σε φορητές εφαρμογές και συστήματα που εξυπηρετούν μικρής κλίμακας ενεργειακές απαιτήσεις, όπου η απλότητα, η αξιοπιστία και η ταχεία απόκριση αποτελούν βασικά κριτήρια σχεδιασμού.

Παρότι η τεχνολογία των DMFC βρίσκεται ακόμη σε σχετικά πρώιμο στάδιο εμπορικής ωρίμανσης, σε σύγκριση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, παρουσιάζει ιδιαίτερα ελπιδοφόρες προοπτικές. Η δυνατότητα άμεσης τροφοδοσίας με υγρή μεθανόλη απλοποιεί σημαντικά τη διαχείριση καυσίμου, ενώ παράλληλα προσφέρει πλεονεκτήματα ως προς την αποθήκευση και τη μεταφορά, σε σύγκριση με το υδρογόνο, το οποίο απαιτεί υψηλή πίεση ή χαμηλές θερμοκρασίες για να διατηρηθεί σε κατάλληλη μορφή.

Επιπροσθέτως, πολλές από τις λειτουργικές και τεχνολογικές ιδιότητες των DMFC είναι κοινές με τις PEM κυψέλες, ενισχύοντας τη συνάφεια των δύο τεχνολογιών τόσο ως προς τη σχεδίαση των επιμέρους υποσυστημάτων, όσο και ως προς τις απαιτήσεις λειτουργίας και την προοπτική ενσωμάτωσης σε παρόμοιες εφαρμογές.

Παρακάτω παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης DMFC.



Σχήμα 3.9: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας DMFC [6]

Οι επιμέρους χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και την κάθοδο της κυψέλης καυσίμου DMFC διατυπώνονται ως εξής:

Περιγραφή	Χημική Εξίσωση
Άνοδος (-)	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$
Κάθοδος (+)	$\frac{3}{2}O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$
Συνολική Αντίδραση	$CH_3OH + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$

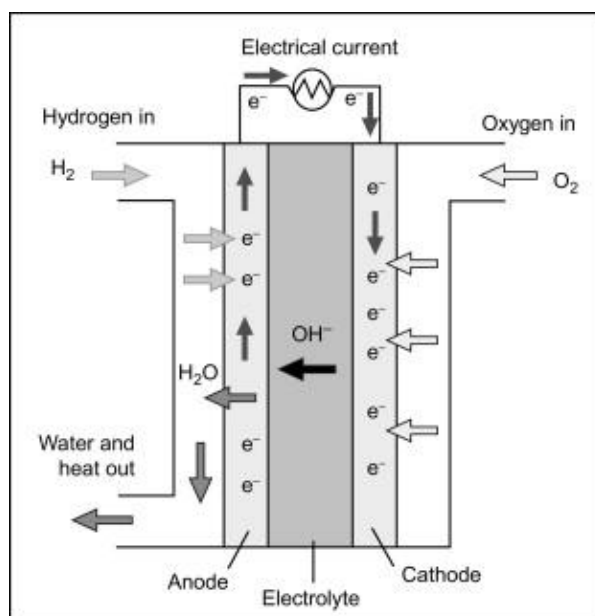
Πίνακας 3.10: Χημικές Αντιδράσεις DMFC

Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC) σε μεγάλο βαθμό συμπίπτουν με εκείνα των κυψελών PEMFC, τα οποία έχουν ήδη παρουσιαστεί. Η ομοιότητα αυτή οφείλεται κυρίως στη σχεδιαστική και λειτουργική συγγένεια των δύο τεχνολογιών.

3.7. Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)

Στις αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (Alkaline Fuel Cells – AFC), ο χρησιμοποιούμενος ηλεκτρολύτης αποτελείται από υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH), το οποίο συνήθως εμποτίζεται σε μία πορώδη μήτρα (matrix) για λόγους μηχανικής σταθερότητας και ομοιογενούς κατανομής. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση επιτρέπει την πρόσβαση των αντιδρώντων αερίων (όπως του υδρογόνου) στο αντίστοιχο ηλεκτρόδιο, ενώ ο ηλεκτρολύτης αναλαμβάνει τη μεταφορά ιόντων υδροξυλίου (OH^-) από την κάθοδο προς την άνοδο. Παράλληλα, λειτουργεί ως ηλεκτρικός μονωτής, παρεμποδίζοντας τη διόδο των ηλεκτρονίων διαμέσου του ηλεκτρολύτη και εξασφαλίζοντας έτσι τον απαραίτητο ηλεκτροχημικό διαχωρισμό.

Η αρχή λειτουργίας μιας αλκαλικής κυψέλης καυσίμου (AFC) παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 3.11: Αρχή λειτουργίας AFC [6]

Οι επιμέρους χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και την κάθοδο της κυψέλης καυσίμου AFC διατυπώνονται ως εξής:

Περιγραφή	Χημική Εξίσωση
Άνοδος (-)	$\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
Κάθοδος (+)	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$
Συνολική Αντίδραση	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Πίνακας 3.12: Χημικές Αντιδράσεις AFC

3.7.1. Πλεονεκτήματα AFC

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC) παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της ταχείας εξέλιξης της αντίδρασης αναγωγής του οξυγόνου στην κάθοδο, η οποία πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ευκολία σε αλκαλικό περιβάλλον σε σύγκριση με το όξινο. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες πυκνότητες ισχύος, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει τη χρήση οικονομικότερων καταλυτών, σε σχέση με τις PEM κυψέλες, χωρίς σημαντική απώλεια στην απόδοση.

Επιπλέον, η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας των AFC (60–90°C) αποτελεί ένα ακόμη πλεονέκτημα, καθώς επιτρέπει ταχεία εκκίνηση και καθιστά τη συγκεκριμένη τεχνολογία κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη ενεργοποίηση και λειτουργική ευελιξία.

3.7.2. Μειονεκτήματα AFC

Ένα από τα σημαντικότερα λειτουργικά μειονεκτήματα των αλκαλικών κυψελών καυσίμου (AFC) είναι η υψηλή ευαισθησία του αλκαλικού ηλεκτρολύτη, όπως το υδροξείδιο του καλίου (KOH), στην παρουσία διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Ακόμη και σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, όπως αυτές που περιέχονται στον ατμοσφαιρικό αέρα, το CO₂ αντιδρά με τον ηλεκτρολύτη οδηγώντας στον σχηματισμό ανθρακικών αλάτων (π.χ. K₂CO₃). Τα άλατα αυτά τείνουν να συσσωρεύονται εντός των πορωδών δομών των ηλεκτροδίων, προκαλώντας μείωση της ιοντικής αγωγιμότητας του ηλεκτρολύτη και τελικά επιβράδυνση της απόδοσης της κυψέλης.

Αυτός ο περιορισμός απαιτεί είτε την τροφοδοσία της κυψέλης με καθαρό οξυγόνο, είτε την ενσωμάτωση πολύπλοκων συστημάτων απομάκρυνσης του CO₂ από τον εισερχόμενο αέρα, γεγονός που αυξάνει τη συνολική πολυπλοκότητα και το κόστος του συστήματος. Επιπλέον, η χρήση υγρού και καυστικού ηλεκτρολύτη μπορεί να συνοδεύεται από κινδύνους διάβρωσης των επιμέρους εξαρτημάτων της κυψέλης και δημιουργεί προκλήσεις στη διαχείριση και συντήρηση του συστήματος.

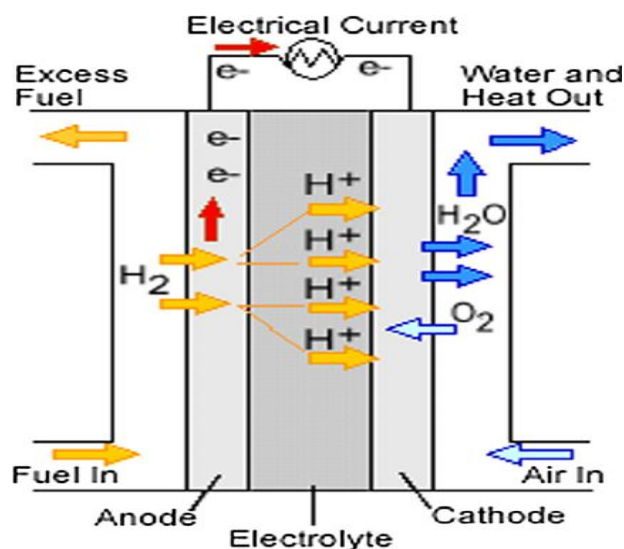
3.8. Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cells – PAFC) χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη υγρό φωσφορικό οξύ (H_3PO_4), το οποίο συγκρατείται σταθερά σε μία μήτρα από πορώδες τεφλόν (Teflon-based matrix), προκειμένου να διασφαλιστεί η μηχανική σταθερότητα και η ομοιογενής κατανομή του κατά τη διάρκεια λειτουργίας.

Η θερμοκρασία λειτουργίας των PAFC είναι σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με τις PEM κυψέλες, κυμαινόμενη συνήθως μεταξύ 175°C και 210°C . Η ανάγκη για λειτουργία σε αυτό το εύρος θερμοκρασιών απορρέει από το γεγονός ότι το παραγόμενο νερό ως υποπροϊόν της αντίδρασης θα διαλυόταν στον ηλεκτρολύτη εάν η θερμοκρασία ήταν χαμηλότερη. Η λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες επιτρέπει την απομάκρυνση του νερού υπό μορφή ατμού, γεγονός που συμβάλλει στη σταθερότητα και τη συνεχή λειτουργία του συστήματος.

Ωστόσο, είναι απαραίτητο να διατηρείται η θερμοκρασία κάτω από το όριο των 210°C , καθώς σε υψηλότερες τιμές το φωσφορικό οξύ αρχίζει να αποσυντίθεται, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά τη χημική σταθερότητα και την απόδοση της κυψέλης.

Η αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 3.12: Αρχή λειτουργίας PAFC [6]

Περιγραφή	Αντίδραση
Άνοδος (-)	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
Κάθοδος (+)	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
Συνολική Αντίδραση	$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Πίνακας 3.13: Χημικές αντιδράσεις PAFC

3.8.1. Πλεονεκτήματα PAFC

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cells – PAFC) αποτελούν μία από τις πιο ώριμες και δοκιμασμένες τεχνολογίες στον τομέα των κυψελών καυσίμου, με εκτεταμένη εμπειρία λειτουργίας, κυρίως σε σταθερές εφαρμογές όπως η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Η λειτουργία τους σε μεσαίο θερμοκρασιακό εύρος (περίπου 170°C έως 210°C) προσδίδει σημαντικά λειτουργικά πλεονεκτήματα, μεταξύ των οποίων και η αυξημένη ανοχή σε προσμίξεις CO στο καύσιμο υδρογόνο. Σε αντίθεση με τις PEMFC, οι PAFC μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά ακόμη και με χαμηλές συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα, χωρίς να παρατηρείται σημαντική δηλητηρίαση του καταλύτη.

Η υψηλή θερμοκρασία της απορριπτόμενης θερμότητας καθιστά τις PAFC ιδιαίτερα κατάλληλες για εφαρμογές συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (ΣΗΘ), στις οποίες αξιοποιείται όχι μόνο η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αλλά και το θερμικό φορτίο. Η διπλή αξιοποίηση της ενέργειας οδηγεί σε ιδιαίτερα αυξημένο βαθμό συνολικής απόδοσης, ο οποίος μπορεί να φτάσει έως και 80–85%, ανάλογα με τη διαμόρφωση και τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.

3.8.2. Μειονεκτήματα PAFC

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) συνοδεύονται και από ορισμένα σημαντικά τεχνολογικά μειονεκτήματα. Ένα από τα βασικά τους περιοριστικά χαρακτηριστικά είναι η χρήση υγρού και διαβρωτικού φωσφορικού οξέος ως ηλεκτρολύτη, το οποίο απαιτεί προσεκτική επιλογή υλικών κατασκευής και μπορεί να προκαλέσει προβλήματα διάβρωσης, επηρεάζοντας αρνητικά τη διαχείριση του συστήματος και τη μακροχρόνια αξιοπιστία του.

Επιπλέον, αν και η αυξημένη θερμοκρασία λειτουργίας αποτελεί πλεονέκτημα για εφαρμογές συμπαγωγής, επιβάλλει χρονική καθυστέρηση κατά την εκκίνηση, καθώς απαιτείται χρονικό διάστημα προθέρμανσης μέχρι να επιτευχθούν οι επιθυμητές θερμοκρασίες λειτουργίας.

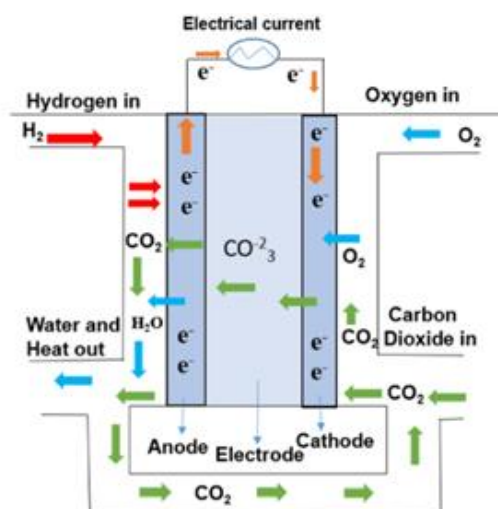
Όπως και οι PEMFC, οι PAFC βασίζονται στη χρήση καταλυτών λευκόχρυσου (Pt), γεγονός που συνεπάγεται υψηλό κόστος υλικών και επηρεάζει τη συνολική οικονομικότητα της τεχνολογίας. Επιπροσθέτως, παρουσιάζουν χαμηλότερες πυκνότητες ισχύος και μεγαλύτερο όγκο και βάρος συγκριτικά με τις PEM κυψέλες, καθιστώντας τις λιγότερο κατάλληλες για φορητές ή κινητές εφαρμογές, όπως η ηλεκτροκίνηση

3.9. Κυψέλη καυσίμου τηγμάτων ανθρακικών αλάτων (MCFC)

Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cells – MCFC) διακρίνονται για τη χρήση ενός μείγματος ανθρακικών αλάτων ως ηλεκτρολύτη. Η ακριβής σύσταση του μείγματος μπορεί να ποικίλλει, ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις περιλαμβάνει ανθρακικό λίθιο (Li_2CO_3) και ανθρακικό κάλιο (K_2CO_3). Σε θερμοκρασίες λειτουργίας της τάξης των 600°C έως 700°C , τα ανθρακικά άλατα βρίσκονται σε τηγμένη (υγροποιημένη) κατάσταση, προσδίδοντας στο σύστημα υψηλή ιοντική αγωγιμότητα, απαραίτητη για τη λειτουργία της κυψέλης.

Ο τηγμένος ηλεκτρολύτης συγκρατείται εντός των πόρων μιας κεραμικής μήτρας (matrix), η οποία παρέχει τη μηχανική σταθερότητα και υποστηρίζει τη διατήρηση της δομής του ηλεκτρολύτη υπό τις συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση καθιστά τις MCFC κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής ισχύος, ιδιαίτερα σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου οι θερμικές απώλειες μπορούν να αξιοποιηθούν μέσω συνδυασμένων κύκλων.

Η αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου τηγμάτων ανθρακικών αλάτων (MCFC) παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 3.13: Αρχή λειτουργίας MCFC [6]

Περιγραφή	Αντίδραση
Άνοδος (-)	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$
Κάθοδος (+)	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$
Συνολική Αντίδραση	$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

Πίνακας 3.14: Χημικές αντιδράσεις MCFC

3.9.1. Πλεονεκτήματα MCFC

Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cells – MCFC) λειτουργούν σε υψηλό θερμοκρασιακό εύρος, το οποίο συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 600°C και 1000°C. Η αυξημένη θερμοκρασία λειτουργίας προσδίδει στις MCFC σημαντική ευελιξία ως προς το είδος του χρησιμοποιούμενου καυσίμου. Εκτός από καθαρό υδρογόνο, οι κυψέλες αυτές μπορούν να καταναλώσουν μονοξείδιο του άνθρακα (CO) ή να υποστηρίξουν εσωτερική αναμόρφωση υδρογονανθράκων, όπως το φυσικό αέριο, μειώνοντας την ανάγκη για ξεχωριστή μονάδα αναμόρφωσης (external reformer). Το χαρακτηριστικό αυτό απλοποιεί τη συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος και ενισχύει την αποδοτικότητά του.

Επιπλέον, η υψηλή θερμοκρασία επιτρέπει τη χρήση μη ευγενών μετάλλων, όπως το νικέλιο, για την καταλυτική επιτάχυνση των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Η δυνατότητα αυτή οδηγεί σε μείωση του κόστους σε σύγκριση με τεχνολογίες που βασίζονται σε καταλύτες ευγενών μετάλλων (π.χ. πλατίνα).

Η θερμότητα που απορρίπτεται από το σύστημα είναι υψηλής θερμοκρασίας και συνεπώς ιδανική για εφαρμογές συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ). Η ενσωμάτωση των MCFC σε τέτοιες εφαρμογές μπορεί να οδηγήσει σε συνολικές αποδόσεις που υπερβαίνουν το 80%, καθιστώντας τις εξαιρετικά αποτελεσματικές για σταθερές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, όπως μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος αρκετών MW.

3.9.2. Μειονεκτήματα MCFC

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC), η ιδιαίτερα υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους συνιστά και το βασικό τους τεχνολογικό μειονέκτημα. Η λειτουργία σε θερμοκρασίες της τάξης των 600–1000°C συνεπάγεται μεγάλους χρόνους εκκίνησης, καθιστώντας τις MCFC ακατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν ταχεία απόκριση ή συχνές εναλλαγές εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας.

Επιπλέον, οι συνθήκες λειτουργίας επιβάλλουν τη χρήση υλικών υψηλής ανθεκτικότητας, τόσο στη διάβρωση που προκαλείται από τον τηγμένο ηλεκτρολύτη, όσο και στις μηχανικές καταπονήσεις που αναπτύσσονται σε αυτές τις θερμοκρασίες. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν αρνητικά τη διάρκεια ζωής των υλικών και, κατ' επέκταση, τη συνολική αξιοπιστία της κυψέλης.

Η διαχείριση του ηλεκτρολύτη, ο οποίος βρίσκεται σε τηγμένη και διαβρωτική κατάσταση, αποτελεί επιπρόσθετη τεχνική πρόκληση που απαιτεί εξειδικευμένο σχεδιασμό και ενισχύει την πολυπλοκότητα του συστήματος. Τέλος, η τεχνολογία των MCFC παρουσιάζει εγγενή περιορισμό σε σταθερές, μεγάλης κλίμακας εφαρμογές, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους σε συγκεκριμένα πεδία και καθιστά τη φορητότητα πρακτικά ανέφικτη.

3.10. Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells – SOFC) ανήκουν στην κατηγορία των υψηλής θερμοκρασίας κυψελών καυσίμου, καθώς η λειτουργία τους πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 600°C και 1000°C. Ως ηλεκτρολύτη αξιοποιούν ένα πυκνό, στερεό κεραμικό υλικό, τη διοξείδιο του ζirkονίου (ZrO_2), το οποίο σταθεροποιείται συνήθως με οξείδιο του υττρίου (YSZ – Yttria-Stabilized Zirconia). Το υλικό αυτό παρουσιάζει υψηλή ιοντική αγωγιμότητα για αρνητικά φορτισμένα ιόντα οξειδίου (O^{2-}), όταν βρεθεί υπό συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας, καθιστώντας το κατάλληλο για τη μεταφορά ιόντων από την κάθοδο προς την άνοδο.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό των SOFC είναι η ευελιξία ως προς τη χρήση καυσίμου, καθώς έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν είτε με υδρογόνο (H_2) είτε με μονοξείδιο του άνθρακα (CO), και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να αξιοποιήσουν υδρογονάνθρακες, όπως το φυσικό αέριο, μέσω εσωτερικής αναμόρφωσης. Η δυνατότητα αυτή προσφέρει λειτουργική ευελιξία και περιορίζει την ανάγκη για εξωτερικές μονάδες προεπεξεργασίας καυσίμου.

Η αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) παρουσιάζεται παρακάτω:

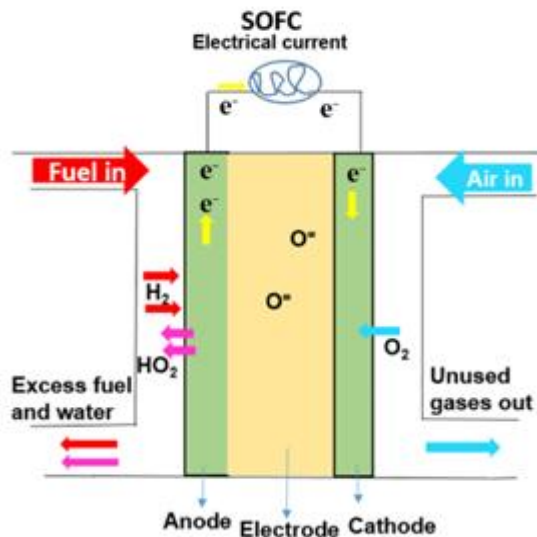


Fig. 4. Schematic diagram of a SOFC.

Σχήμα 3.15: Αρχή λειτουργίας SOFC [6]

Ρόλος	Αντίδραση
Άνοδος (-)	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
Κάθοδος (+)	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$
Συνολική	$\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Πίνακας 3.16: Χημικές Αντιδράσεις SOFC

3.10.1. Πλεονεκτήματα SOFC

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells – SOFC) παρουσιάζουν πολλά κοινά πλεονεκτήματα με τις κυψέλες τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC), κυρίως λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας τους, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 500°C και 1000°C. Η θερμική αυτή συμπεριφορά επιτρέπει σημαντική ευελιξία ως προς το καύσιμο, καθώς οι SOFC μπορούν να λειτουργήσουν με υδρογόνο (H_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και υδρογονάνθρακες (όπως μεθάνιο ή φυσικό αέριο), αξιοποιώντας μηχανισμούς εσωτερικής αναμόρφωσης του καυσίμου εντός της ίδιας της κυψέλης.

Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι ότι, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, δεν απαιτείται η χρήση καταλυτών ευγενών μετάλλων (όπως η πλατίνα), γεγονός που συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του συνολικού κόστους. Παράλληλα, η χρήση στερεού κεραμικού ηλεκτρολύτη εξαλείφει τα προβλήματα που σχετίζονται με τη διαχείριση υγρών ηλεκτρολυτών, ενώ διευκολύνει τη στεγανοποίηση και τη μηχανική σταθερότητα της κυψέλης.

Η θερμότητα υψηλής ποιότητας που αποβάλλεται κατά τη λειτουργία μπορεί να αξιοποιηθεί αποδοτικά σε συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ), οδηγώντας σε πολύ υψηλές συνολικές αποδόσεις. Επιπλέον, οι SOFC επιτυγχάνουν υψηλή ηλεκτρική απόδοση ακόμη και μερικώς φορτισμένες, και θεωρούνται ιδανικές για μεσαίας έως μεγάλης κλίμακας σταθερές ενεργειακές εφαρμογές, όπως βιομηχανικές εγκαταστάσεις και σταθμοί παραγωγής ισχύος.

3.10.2. Μειονεκτήματα SOFC

Οι προκλήσεις που συνδέονται με τις κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) σχετίζονται κυρίως με την υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία, αν και προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, εισάγει και ορισμένους κρίσιμους περιορισμούς. Ένας από αυτούς είναι η ανάγκη για μεγάλο χρόνο προθέρμανσης, γεγονός που καθιστά τις SOFC ακατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν ταχεία εκκίνηση ή συχνή διακοπή και επανεκκίνηση.

Η θερμική καταπόνηση που υφίστανται τα επιμέρους υλικά σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες απαιτεί τη χρήση δομικών και λειτουργικών υλικών με παρόμοιους συντελεστές θερμικής διαστολής, ώστε να αποφεύγονται ρωγμές και αστοχίες στις διεπιφάνειες. Παράλληλα, τα υλικά αυτά πρέπει να παρουσιάζουν χημική και μηχανική αντοχή στις θερμοκρασίες λειτουργίας, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση του κόστους και της τεχνολογικής πολυπλοκότητας του συστήματος.

Η μακροχρόνια σταθερότητα των υλικών και η ανθεκτικότητα σε θερμικούς κύκλους (επαναλαμβανόμενες εκκινήσεις/παύσεις) αποτελούν σήμερα σημαντικά ερευνητικά ζητήματα, καθώς επηρεάζουν άμεσα τη διάρκεια ζωής και το κόστος συντήρησης των SOFC.

Όπως και οι MCFC, οι κυψέλες SOFC είναι κατάλληλες κυρίως για σταθερές εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η συνεχής και μακροχρόνια λειτουργία αντισταθμίζει τις προαναφερθείσες τεχνικές προκλήσεις.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συνοπτικός πίνακας με τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των Κυψελών Καυσίμου. ([πίνακας](#))

	AFC (Αλκαλική)	PEMFC (Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων)	DMFC (Άμεσης Μεθανόλης)	PAFC (Φωσφορικού Οξέος)	MCFC (Τηγμένου Ανθρακικού Άλατος)	SOFC (Στερεού Οξειδίου)
Βαθμός Απόδοσης[3]	50-70%	40-50%	25-40%	40-45%	50-60%	50-60%
Καύσιμο	H ₂ . Απαραίτητη η απομάκρυνση του CO ₂ , από τα αέρια της ανόδου και της καθόδου.	H ₂ . Αν αυτό προέρχεται από αναμόρφωση, η περιεκτικότητα σε CO να είναι <10ppm	Διάλυμα νερού/μεθανόλης	H ₂ . Και από αναμόρφωση	H ₂ , CO, φυσικό αέριο	H ₂ , CO, φυσικό αέριο
Θερμ. λειτουργίας (°C)	< 100	60-120	60-120	160-210	600-800	800-1000 (Δυνατότητα χαμηλής θερμοκρασίας 500-600)
Θερμότητα από Συμπαράγωγή	Καθόλου	Χαμηλής ποιότητας	Καθόλου	Αποδεκτή για πολλές εφαρμογές	Υψηλή	Υψηλή
Καταλύτης		Λευκόχρυσος (Pt)		Λευκόχρυσος (Pt)	Νικέλιο	Υπεροξειδία
Κατάσταση ηλεκτρολύτη	Υγρός	Στερεός	Στερεός	Ακίνητοποιημένο υγρό	Ακίνητοποιημένο υγρό	Στερεός
Ηλεκτρολύτης	KOH	Υπερφθοροσουλφονικό οξύ (μεμβράνη Nafion)	Υπερφθοροσουλφονικό οξύ (μεμβράνη Nafion)	H ₃ PO ₄ ακίνητοποιημένο σε μήτρα SiC	Εύτηκτο μείγμα Li ₂ CO ₃ -K ₂ CO ₃ ακίνητοποιημένο σε γ-LiAlO ₂	YSZ (ζirkονία σταθεροποιημένη με ύτριο)

Ανταλλάξιμο φορτίο	OH^-	H^+	H^+	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}
Αντίδραση Ανόδου	$\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
Αντίδραση Καθόδου	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\frac{3}{2}\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$
Υλικά Ηλεκτροδίων	Άνοδος: Ni Κάθοδος: Ag	Άνοδος: Pt, PtRu Κάθοδος: Pt	Άνοδος: Pt, PtRu Κάθοδος: Pt	Άνοδος: Pt, PtRu Κάθοδος: Pt	Άνοδος: Ni-Cr Κάθοδος: NiO(Li)	Άνοδος: Ni-YSZ Κάθοδος: Μαγγανίτης λανθανίου στροντίου (LSM)
Εφαρμογές	Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, Μεταφορές, Διάστημα, Στρατιωτικές εφαρμογές			Συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού για αποκεντρωμένα σταθερά συστήματα ισχύος	Συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού για σταθερά αποκεντρωμένα συστήματα και για μεταφορές (τρένα, πλοία...)	
Ισχύς	5-150 kW	5-250 kW	< 5 kW	50 kW - 11 MW	100 kW - 2 MW	100-250 kW
Πυκνότητα ισχύος (W/cm^2)	0.2 - 0.3	0.35 - 0.6	0.04 - 0.23	0.2 - 0.25	0.1 - 0.2	0.24 - 0.3
Διάρκεια Ζωής (ώρες)	Μη διαθέσιμο	2.000-3.000 ώρες	1.000 ώρες	> 50.000 ώρες	7.000-8.000 ώρες	1.000 ώρες

Πίνακας 3.17: Χαρακτηριστικά των Κυψελών Καυσίμου [2,6]

4. Είδη κινητήρων ηλεκτροκίνησης

Η μονάδα ηλεκτρικής πρόωσης (electric drive unit), με κύριο στοιχείο τον ηλεκτροκινητήρα, αποτελεί το κρίσιμο ενεργό υποσύστημα του συστήματος μετάδοσης ισχύος (powertrain) σε ένα ηλεκτρικό όχημα. Ο βασικός ρόλος του ηλεκτροκινητήρα είναι η ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας: λαμβάνει ηλεκτρική ισχύ από τον συσσωρευτή υψηλής τάσης, η οποία έχει προηγουμένως υποστεί διαμόρφωση και έλεγχο από τον μετατροπέα ισχύος (inverter), και την μετατρέπει σε μηχανική ροπή στον άξονα εξόδου. Η ροπή αυτή μεταφέρεται στη συνέχεια στο σύστημα μετάδοσης και τελικά στους κινητήριους τροχούς του οχήματος.

Αν και διατίθεται ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών ηλεκτροκινητήρων με ποικίλα χαρακτηριστικά και επιδόσεις, στην πράξη έχουν επικρατήσει συγκεκριμένες τεχνολογίες που εμφανίζουν υψηλή ενεργειακή απόδοση, αξιοπιστία και βιομηχανική ωριμότητα. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι ηλεκτροκινητήρων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά που τους καθιστούν κατάλληλους για χρήση σε σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα.

4.1. Ασύγχρονος κινήτηρας (Induction Motor)

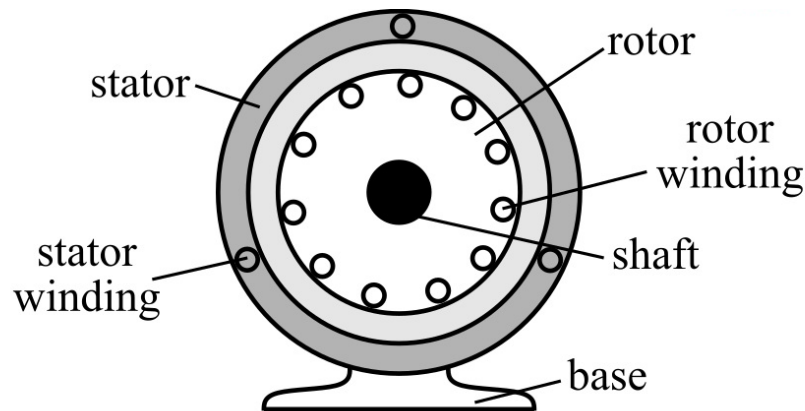
Ο επαγωγικός κινητήρας (ή ασύγχρονος κινητήρας) αποτελεί έναν από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ηλεκτροκινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) και χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, κυρίως λόγω της απλότητας κατασκευής, της μηχανικής αντοχής και του σχετικά χαμηλού κόστους.

Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Συγκεκριμένα, ο στάτορας (το σταθερό τμήμα του κινητήρα) δημιουργεί ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο επάγει ηλεκτρικά ρεύματα στον ρότορα (το περιστρεφόμενο τμήμα), χωρίς να απαιτείται άμεση ηλεκτρική σύνδεση με αυτόν. Τα επαγόμενα ρεύματα στον ρότορα αλληλεπιδρούν με το μαγνητικό πεδίο του στάτορα, παράγοντας ηλεκτρομαγνητική ροπή που περιστρέφει τον ρότορα.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ρότορα στους επαγωγικούς κινητήρες:

- τύπος "κλωβού σκίουρου" (squirrel-cage), ο οποίος είναι πιο διαδεδομένος λόγω της απλότητας και της αντοχής του, και
- ο τυλιχτός ρότορας (wound rotor), ο οποίος επιτρέπει ορισμένες ρυθμίσεις της χαρακτηριστικής του καμπύλης, αλλά χρησιμοποιείται σπανιότερα λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας.

Παρακάτω παρουσιάζεται η απλοποιημένη μορφή ενός Ασύγχρονου Κινητήρα.



Σχήμα 4.1: Απλοποιημένη μορφή ενός Ασύγχρονου κινητήρα

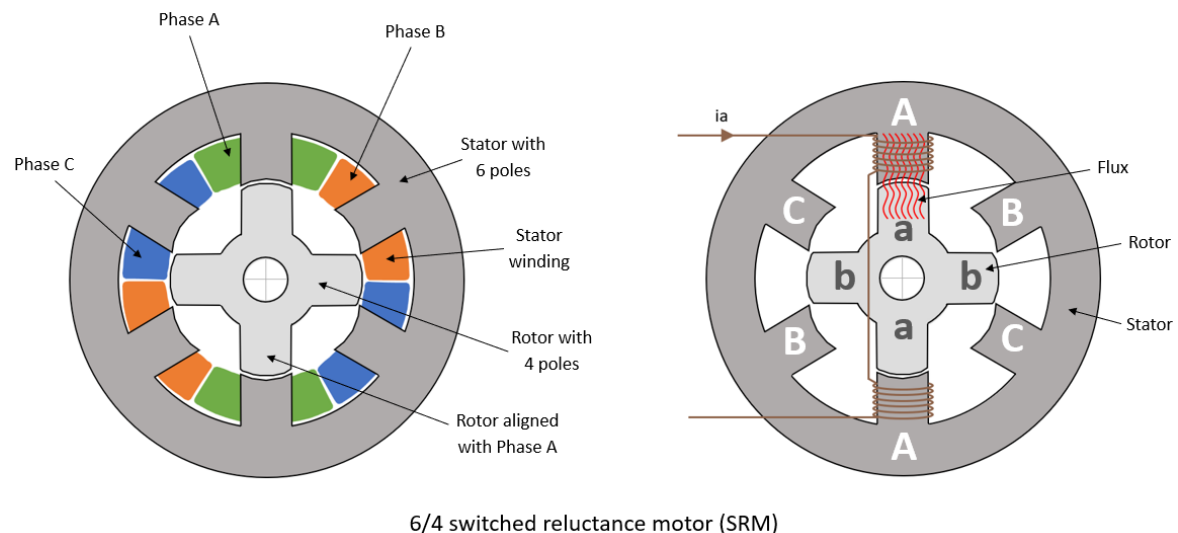
4.2. Κινητήρας Μεταγόμενης Μαγνητικής Απροθυμίας (Switched Reluctance Motor)

Ο κινητήρας μεταγόμενης μαγνητικής απροθυμίας (Switched Reluctance Motor – SRM) παράγει μηχανική κίνηση μέσω της εκμετάλλευσης της δύναμης μαγνητικής απροθυμίας. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην τάση ενός μαγνητικού κυκλώματος να ελαχιστοποιεί την μαγνητική του αντίσταση (reluctance). Πρακτικά, ο κινητήρας έλκει τον ρότορα, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από μαλακό μαγνητικό υλικό και δεν περιλαμβάνει τυλίγματα ή μαγνήτες, προς την κατεύθυνση των διαδοχικά ενεργοποιούμενων τυλιγμάτων του στάτορα, στα οποία εφαρμόζεται εξωτερική ηλεκτρική ισχύς.

Ο SRM χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά απλή μηχανική κατασκευή του ρότορα, γεγονός που τον καθιστά ανθεκτικό, οικονομικό και θερμικά αποδοτικό. Ωστόσο, η λειτουργία του απαιτεί σύνθετη ηλεκτρονική διάταξη μεταγωγής, προκειμένου να επιτευχθεί ο κατάλληλος συγχρονισμός της ενεργοποίησης των τυλιγμάτων του στάτορα. Η διαδικασία αυτή είναι κρίσιμη, καθώς επηρεάζει την παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή και συνδέεται άμεσα με το φαινόμενο του κυματισμού ροπής (torque ripple), το οποίο αποτελεί βασική πρόκληση στη λειτουργία των SRM.

Η μείωση του κυματισμού ροπής αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας και σχεδιαστικής βελτιστοποίησης, κυρίως μέσω προηγμένων αλγορίθμων ελέγχου και τεχνικών διαμόρφωσης παλμών, με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης και της ομαλότητας λειτουργίας του κινητήρα.

Παρακάτω παρουσιάζεται η απλοποιημένη μορφή ενός SRM.



Σχήμα 4.2: Απλοποιημένη τομή ενός SRM

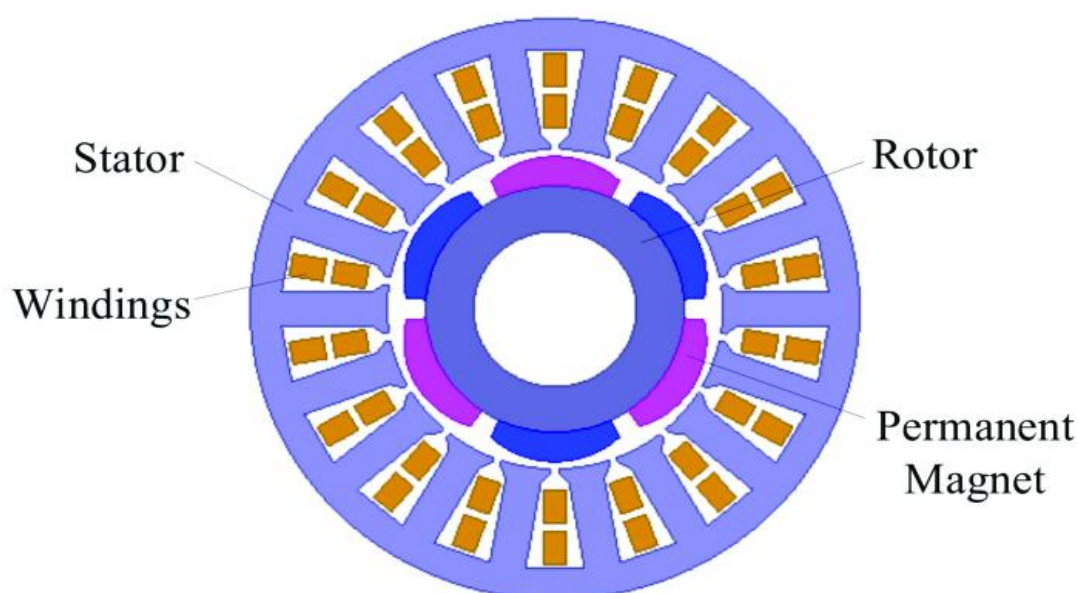
4.3. Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor)

Ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (PMSM), γνωστός και ως PMBLAC (Permanent Magnet Brushless AC motor), διαφοροποιείται από τον BLDC κυρίως λόγω της λειτουργίας με ημιτονοειδείς κυματομορφές ρεύματος και αντί-ΗΕΔ, προσφέροντας συγκρίσιμα πλεονεκτήματα, όπως υψηλή απόδοση, πυκνότητα ισχύος και ομαλή ροπή.

Ωστόσο, κοινό μειονέκτημα των κινητήρων μόνιμων μαγνητών παραμένει το υψηλό κόστος των μαγνητικών υλικών, καθώς και η περιορισμένη περιοχή σταθερής ισχύος (field weakening), η οποία ωστόσο μπορεί να διευρυνθεί μέσω προηγμένων στρατηγικών ελέγχου — κρίσιμο για εφαρμογές όπως τα ηλεκτρικά οχήματα.

Μια ενδιαφέρουσα υβριδική προσέγγιση είναι ο κινητήρας σύγχρονος με κλωβό και μόνιμους μαγνήτες (LSPMSM - Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor), που επιτρέπει ασύγχρονη εκκίνηση και σύγχρονη λειτουργία, χωρίς απώλειες χαλκού στον δρομέα. Συνδυάζει αυξημένη απόδοση και υψηλό συντελεστή ισχύος, ωστόσο η δυναμική του συμπεριφορά κατά την εκκίνηση και τον συγχρονισμό εξακολουθεί να αποτελεί πεδίο ενεργούς ερευνητικής δραστηριότητας, ειδικά για απαιτητικές εφαρμογές όπως τα EVs.

Παρακάτω παρουσιάζεται η απλοποιημένη μορφή ενός Σύγχρονου Κινητήρα Μόνιμου Μαγνήτη.



Σχήμα 4.3: Απλοποιημένη τομή ενός PMSM

4.4. Κινητήρας Μονίμων Μαγνητών Χωρίς Ψήκτρες (Brushless DC)

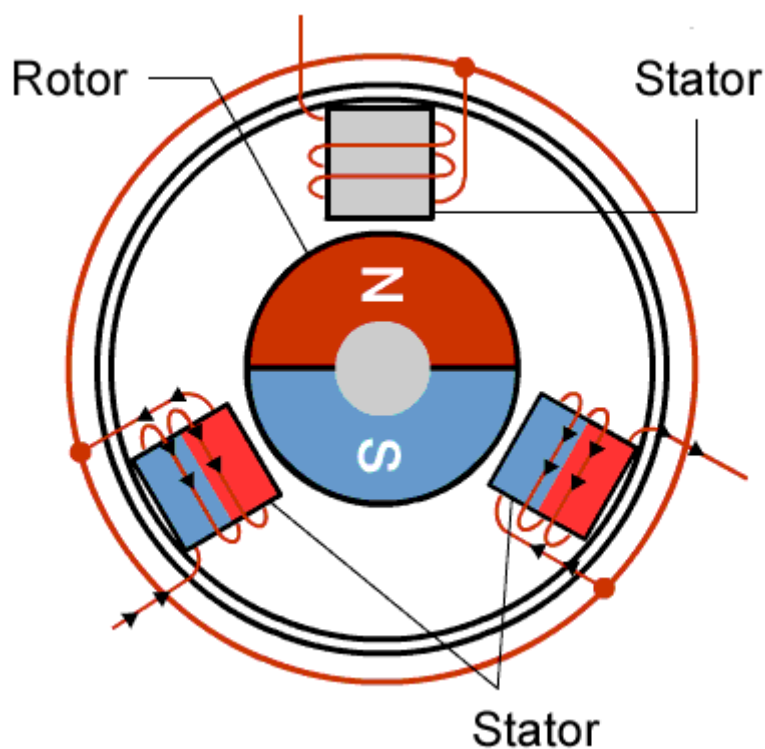
Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (Brushless DC – BLDC) αποτελούν προϊόν της τεχνολογικής προόδου στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος και της ανάπτυξης μονίμων μαγνητών υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Η βασική αρχιτεκτονική τους περιλαμβάνει έναν δρομέα (ρότορα) με μόνιμους μαγνήτες και έναν στάτη με τυλίγματα, σε αντιστροφή ρόλων σε σχέση με τους παραδοσιακούς κινητήρες DC με ψήκτρες.

Η λειτουργία των BLDC βασίζεται στην αρχή της ηλεκτρονικής μεταγωγής (electronic commutation). Αντί για μηχανική μεταγωγή μέσω συλλέκτη και

ψηκτρών, χρησιμοποιείται αντιστροφέας ισχύος (inverter), ο οποίος τροφοδοτεί διαδοχικά τα τυλίγματα του στάτη σύμφωνα με την θέση του δρομέα. Η πληροφορία για τη θέση του δρομέα παρέχεται μέσω αισθητήρων θέσης (όπως Hall sensors), επιτρέποντας τον ακριβή χρονισμό της μεταγωγής.

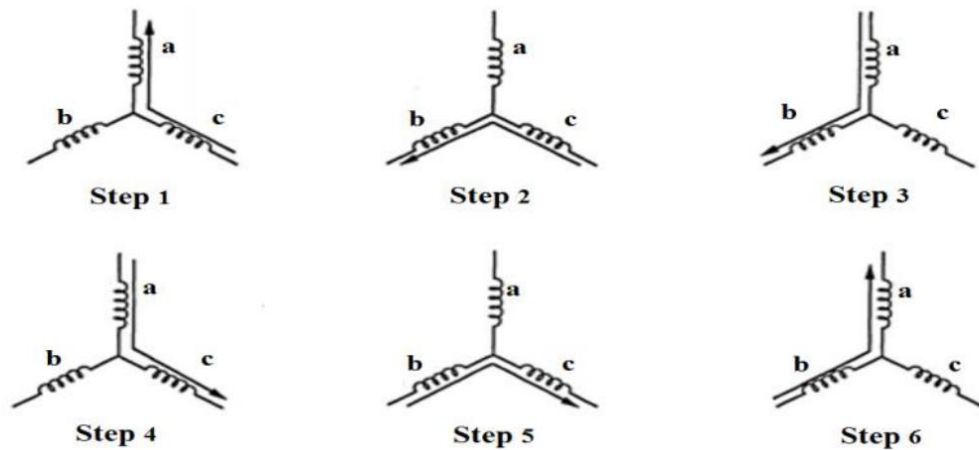
Η διαμόρφωση της τάσης/ρεύματος στον στάτη γίνεται συνήθως με τραπεζοειδείς κυματομορφές, χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τους BLDC από τους σύγχρονους κινητήρες μόνιμων μαγνητών (PMSM), οι οποίοι λειτουργούν με ημιτονοειδή διαμόρφωση. Η ηλεκτρονική μεταγωγή εξασφαλίζει ομαλή και συνεχόμενη περιστροφή, αυξημένη αποδοτικότητα και μειωμένη συντήρηση, δεδομένης της απουσίας μηχανικής τριβής των ψηκτρών.

Παρακάτω παρουσιάζεται η απλοποιημένη μορφή ενός Κινητήρα Μόνιμων Μαγνητών Χωρίς Ψήκτρες.



Σχήμα 4.4: Απλοποιημένη τομή ενός BLDC

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η αλληλουχία ενεργοποίησης φάσεων (six-step commutation) σε τριφασικό κινητήρα BLDC. Σε κάθε βήμα ενεργοποιούνται δύο φάσεις (μία θετικά, μία αρνητικά), ενώ η τρίτη παραμένει ανοιχτή, δημιουργώντας το απαραίτητο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο για τη συνεχή περιστροφή του δρομέα.



Σχήμα 4.5: Αλληλουχία ενεργοποίησης τριφασικού κινητήρα BLDC [17]

Οι κινητήρες BLDC παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, κυρίως λόγω της απουσίας ψηκτρών, που συνεπάγεται υψηλή αξιοπιστία, μικρή ανάγκη συντήρησης, μεγάλη διάρκεια ζωής και δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές ταχύτητες. Ο υψηλός βαθμός απόδοσης οφείλεται στην εξάλειψη των απωλειών στον δρομέα, ενώ η χαμηλή αδράνεια εξασφαλίζει γρήγορη δυναμική απόκριση. Επιπλέον, η υψηλή πυκνότητα ισχύος και ροπής καθιστά τους BLDC κατάλληλους για συμπαγείς και απαιτητικές εφαρμογές, όπως η ηλεκτροκίνηση.

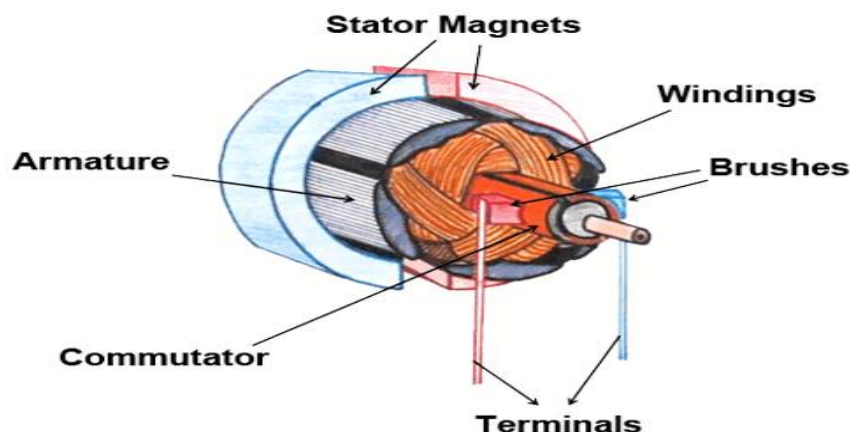
4.5. Κινητήρας Μονίμων Μαγνητών με ψήκτρες (Brushed DC Motor)

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) με ψήκτρες, και ειδικότερα ο DC κινητήρας σειράς (series wound DC motor), είχαν ιστορικά ευρεία χρήση στην ηλεκτροκίνηση, κυρίως λόγω της υψηλής ροπής εκκίνησης και της απλότητας στον έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής μέσω ρύθμισης τάσης και ρεύματος αντίστοιχα.

Ωστόσο, η παρουσία μηχανικού συστήματος μεταγωγής (συλλέκτη και ψηκτρών) συνεπάγεται υψηλές απαιτήσεις συντήρησης, περιορισμένη διάρκεια ζωής, χαμηλότερη απόδοση λόγω τριβών και σπινθηρισμών, και περιορισμούς στη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας. Επιπλέον, οι απώλειες χαλκού σε στάτη και δρομέα οδηγούν σε χαμηλή συνολική απόδοση και μειωμένη πυκνότητα ισχύος.

Για τους παραπάνω λόγους, οι κινητήρες DC με ψήκτρες έχουν σε μεγάλο βαθμό αντικατασταθεί από τεχνολογίες AC χωρίς ψήκτρες στις περισσότερες εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων, αν και παραμένουν σε χρήση σε ορισμένα συστήματα χαμηλού κόστους ή περιορισμένων απαιτήσεων.

Παρακάτω παρουσιάζεται η απλοποιημένη μορφή ενός Κινητήρα Μόνιμων Μαγνητών με ψήκτρες.



Σχήμα 4.6: Απλοποιημένη τομή ενός DC Brushed Motor

Συμπερασματικά:

Με τη παρούσα ανάλυση είδαμε ότι δεν υπάρχει ένας "ιδανικός" τύπος ηλεκτροκινητήρα για όλες τις εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, καθώς η καταλληλότητα εξαρτάται από τις εκάστοτε απαιτήσεις σε επίπεδο απόδοσης, κόστους, δυναμικής συμπεριφοράς και πολυπλοκότητας ελέγχου.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες προσέφεραν ιστορικά απλότητα και υψηλή ροπή εκκίνησης, ωστόσο οι αυξημένες ανάγκες συντήρησης και η χαμηλότερη απόδοση έχουν περιορίσει σημαντικά τη χρήση τους.

Οι BLDC κινητήρες παραμένουν μια αποτελεσματική και οικονομική λύση για πλήθος εφαρμογών, ιδιαίτερα όπου απαιτείται απλός έλεγχος και καλή ενεργειακή απόδοση, ενώ οι PMSM κινητήρες προσφέρουν ομαλότερη ροπή, υψηλότερη απόδοση και καλύτερη δυναμική απόκριση, κάτι που τους καθιστά κατάλληλους για σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα.

Παράλληλα, τεχνολογίες όπως οι SRM και LSPMSM αποτελούν υποσχόμενες εναλλακτικές, με πλεονεκτήματα όπως απλότητα κατασκευής, χαμηλό κόστος

και αυξημένη αντοχή, αλλά απαιτούν περαιτέρω ανάπτυξη κυρίως ως προς τον έλεγχο και τη συμπεριφορά σε μεταβατικές καταστάσεις.

Συνολικά, η επιλογή κινητήρα πρέπει να βασίζεται σε τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, με τη σωστή ισορροπία μεταξύ απόδοσης, αξιοπιστίας, κόστους και απαιτήσεων εφαρμογής να αποτελεί το κλειδί για τον βέλτιστο σχεδιασμό ενός συστήματος ηλεκτροκίνησης.

Παρακάτω βλέπουμε τη σύγκριση απόδοσης των κυριότερων ηλεκτρικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων:

Performance	DC motors	Induction motors	PMBL DC motors	PMBL AC Motors	SR Motors
Power density	L	M	H	H	M
Reliability	M	V.H	H	H	V.H
Efficiency	L	M	H	H	M
Cost	M	L	H	H	M
Size	M	M	S	S	La
Controllability	V.H	V.H	H	H	M
Speed range	M	M	L	L	H
Maximum torque	M	M	H	H	H
Torque ripple	L	L	M	L	H
Acoustic noise	M	L	L	L	H
Technology maturity	V.H	V.H	H	H	H

Where: L = Low, M= Medium, H = High, V.H = Very high, S = Small, and La = Large

Πίνακας 4.7: Πίνακας σύγκρισης απόδοσης Brushed DC motor, Induction motor, BLDC motor, PMBL AC motor, SR motor

5. Είδη μπαταριών και υπερπυκνωτές στην ηλεκτροκίνηση

Ένας συσσωρευτής (μπαταρία), και ειδικότερα σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης (EV), αποτελείται από πολλαπλά ηλεκτροχημικά στοιχεία (cells). Κάθε στοιχείο περιλαμβάνει ένα θετικό ηλεκτρόδιο (κάθοδο), ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδο) και έναν διαχωριστή (separator), ο οποίος αποτρέπει την άμεση επαφή των ηλεκτροδίων, επιτρέποντας όμως τη διέλευση ιόντων μέσω του ηλεκτρολύτη.

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μεταξύ των υλικών των ηλεκτροδίων, προκαλώντας ροή ηλεκτρονίων μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, που στη συνέχεια μπορεί να τροφοδοτήσει τον ηλεκτροκινητήρα ή άλλα υποσυστήματα του οχήματος.

Για χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα, είναι απαραίτητο οι μπαταρίες να είναι επαναφορτιζόμενες, κάτι που προϋποθέτει υψηλό βαθμό αντιστρεψιμότητας των αντιδράσεων κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση. Αυτή η ιδιότητα πρέπει να διατηρείται αξιόπιστα για μεγάλο αριθμό κύκλων, ώστε να εξασφαλίζεται μεγάλη διάρκεια ζωής (cycle life) και σταθερή απόδοση σε βάθος χρόνου.

Αν και υπάρχουν διάφοροι τύποι συσσωρευτών στην αγορά, για τις ανάγκες της ηλεκτροκίνησης οι πιο διαδεδομένοι είναι οι εξής:

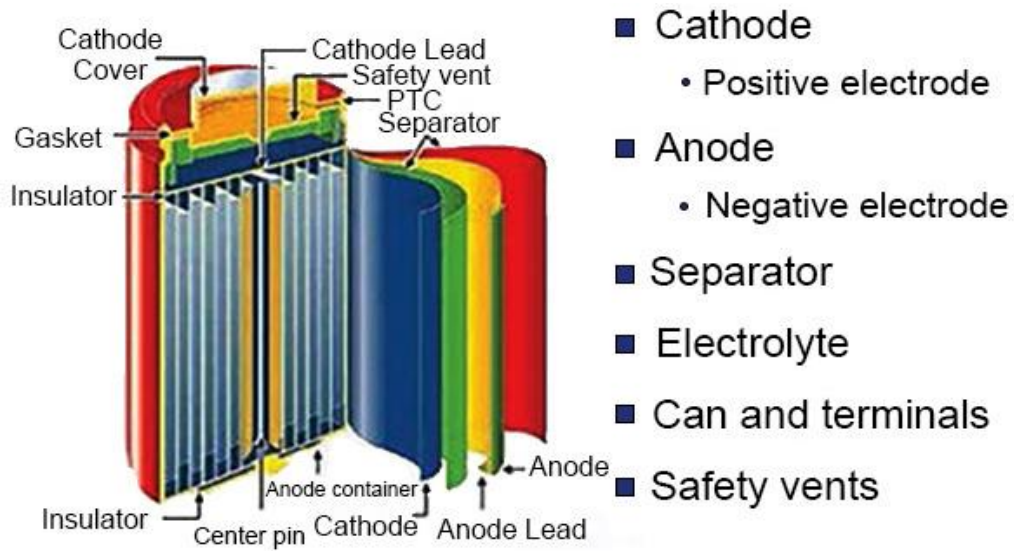
5.1. Μπαταρία Ιόντων Λιθίου (Lithium-Ion)

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion) είναι εμπορικά διαθέσιμες από το 1991 και επικράτησαν γρήγορα, κυρίως λόγω της υψηλής ειδικής ενέργειας που προσφέρουν ($>100 \text{ Wh/kg}$) και της εξαιρετικής κυκλικής ζωής (>1000 κύκλοι), παρά το αρχικά υψηλό κόστος τους.

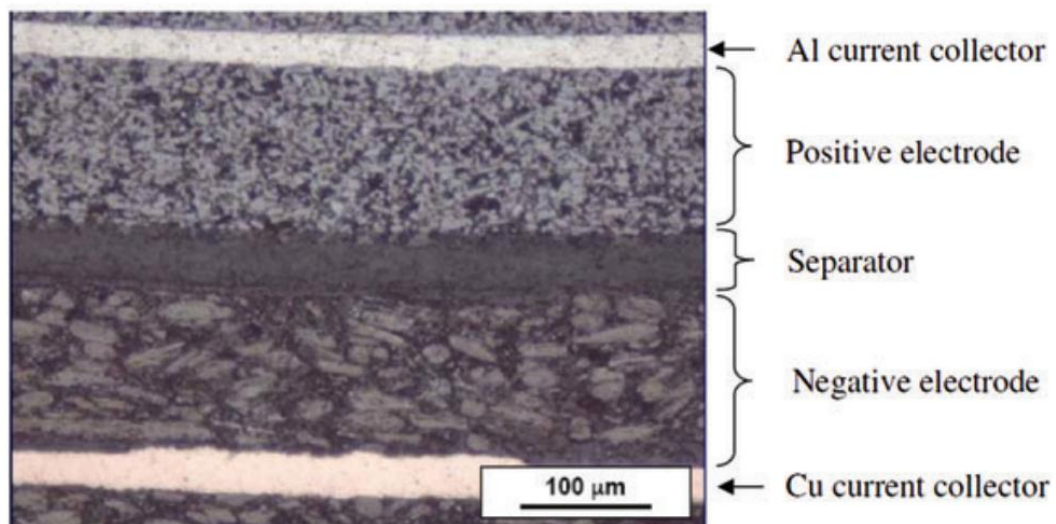
Η τυπική τους δομή περιλαμβάνει άνοδο από άνθρακα (ο οποίος λειτουργεί ως υλικό παρεμβολής για τα ιόντα λιθίου), κάθοδο από οξείδιο μετάλλου – συνήθως οξείδιο κοβαλτίου – και οργανικό ηλεκτρολύτη με άλας λιθίου, όλα τοποθετημένα εντός μιας ερμητικά σφραγισμένης κυψέλης. Συχνά, τα ηλεκτρόδια είναι διαμορφωμένα σε σπειροειδή διάταξη, ώστε να αυξάνεται η επιφάνεια επαφής.

Αυτή η σχεδίαση με λεπτά ηλεκτρόδια μεγάλης επιφάνειας είναι απαραίτητη για τη λειτουργία σε χαμηλές πυκνότητες ρεύματος, προκειμένου να αντισταθμιστεί η χαμηλή ιοντική αγωγιμότητα των οργανικών ηλεκτρολυτών, καθώς και η σχετικά αργή διάχυση των ιόντων λιθίου στη στερεά φάση των υλικών των ηλεκτροδίων.

Παρακάτω παρουσιάζεται η Δομή μιας Li-ion μπαταρίας.



Σχήμα 5.1: Δομή κυψέλης Ιόντων Λιθίου



Σχήμα 5.2: Τομή στοιχείου Ιόντων Λιθίου με τα κύρια συστατικά.

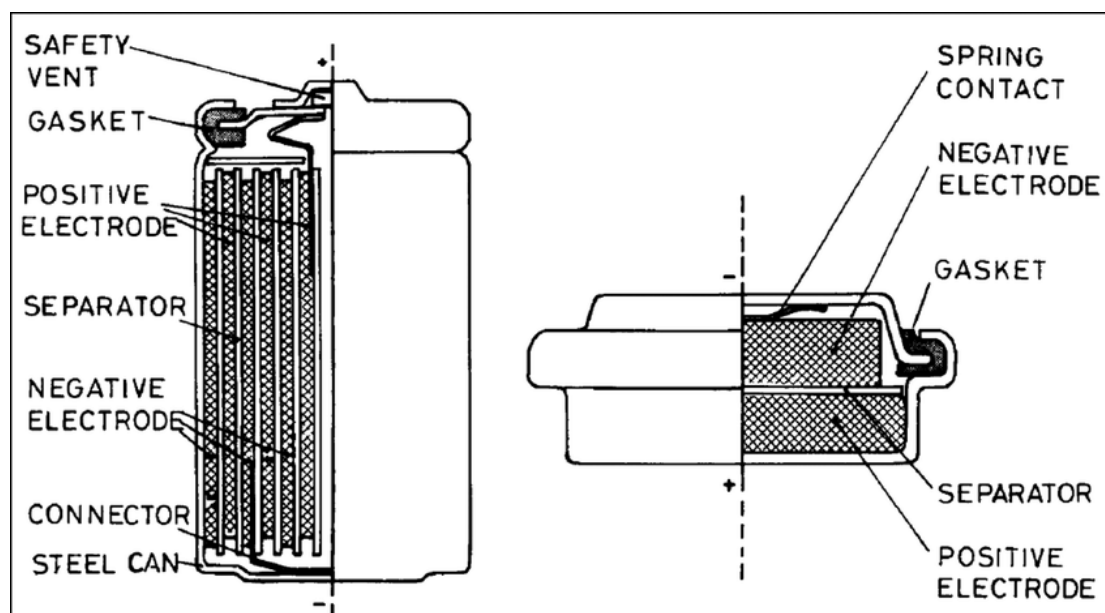
5.2. Μπαταρία Υδριδίου Νικελίου-Μετάλλου (Nickel-Metal Hydride – Ni/MH)

Οι μπαταρίες Υδριδίου Νικελίου-Μετάλλου (NiMH) αποτέλεσαν για πολλά χρόνια κυρίαρχη τεχνολογία στα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEVs). Βασίζονται σε κάθοδο υδροξειδίου του νικελίου και άνοδο από κράμα μετάλλου-υδριδίου (π.χ. LaNi_5), με σχετικά σταθερό δυναμικό εκφόρτισης.

Χρησιμοποιούν συμπυκνωμένο υδατικό ηλεκτρολύτη KOH , του οποίου η υψηλή ιοντική αγωγιμότητα επιτρέπει την εφαρμογή παχύτερων διαχωριστών ($\sim 220 \mu\text{m}$) συγκριτικά με τις μπαταρίες Li-ion , χωρίς σημαντικές απώλειες ισχύος.

Οι NiMH προσφέρουν πρακτική ειδική ενέργεια περίπου $60\text{--}120 \text{ Wh/kg}$ και κύκλο ζωής μεταξύ 500 και 2000+ κύκλων. Αν και θεωρούνται ανθεκτικές και ασφαλείς λόγω της χρήσης υδατικού ηλεκτρολύτη, η χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και μικρότερη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με τις σύγχρονες Li-ion έχει περιορίσει τη χρήση τους κυρίως σε εφαρμογές υβριδικών οχημάτων.

Παρακάτω παρουσιάζεται η δομή μιας μπαταρίας Ni/MH.



Σχήμα 5.3: Δομή κυψέλης Ni/MH

Τύπος Μπαταρίας	Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/L)	Κύκλοι Φόρτισης
Ιόντων Λιθίου (Li-ion)	~100 - >260	~250 - >700	~1000 - 5000+
Υδριδίου Νικελίου-Μετάλλου (Ni/MH)	~60 - 120	~140 - 300	~500 - 2000+

S. no	Specifications	Li-ion	NiMH
1	Energy	160	90
2	Voltage	3.6 V	1.2 V
3	Size and capacities	Customized and 2000–6000 mAh	3XAA and 2000 mAh
4	Self-discharge rate per month	2–8%	30–50%
5	Price range (depends on battery type)	30 to 500\$	20–150\$
6	Maintenance	No	Low

Πίνακας 5.4: Σύγκριση Li-ion και NI/MH μπαταριών

5.3. Συμπερασματικά η χρήση των μπαταριών στην ηλεκτροκίνηση

Η μελέτη των βασικών τύπων συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροκίνηση ανέδειξε τις διαφορετικές τεχνολογικές επιλογές ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion) κυριαρχούν στα σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα λόγω της υψηλής ειδικής ενέργειας, της μεγάλης κυκλικής ζωής και της βελτιστοποιημένης κατασκευής που υποστηρίζει αποδοτική λειτουργία σε χαμηλές πυκνότητες ρεύματος. Αντίθετα, οι μπαταρίες Υδριδίου Νικελίου-Μετάλλου (NiMH), αν και παλαιότερη τεχνολογία, συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται κυρίως σε υβριδικά οχήματα, χάρη στην αξιοπιστία, την ασφάλεια και τη χρήση υδατικού ηλεκτρολύτη, παρά τη χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και συγκριτικά μικρότερη διάρκεια ζωής σε σχέση με τις Li-ion. Και οι δύο τεχνολογίες διαθέτουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και περιορισμούς, γεγονός που υποδεικνύει ότι η επιλογή του κατάλληλου τύπου εξαρτάται από τις τεχνικές απαιτήσεις και τις προτεραιότητες του συστήματος πρόωσης.

5.4. Υπερπυκνωτές

Ο υπερπυκνωτής αποτελεί αντικείμενο εντατικής έρευνας και θεωρείται μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας. Η αυξημένη προσοχή που συγκεντρώνει οφείλεται στα σημαντικά πλεονεκτήματά του, όπως η υψηλή πυκνότητα ισχύος και η εξαιρετική δυνατότητα ανακύκλωσης.

Επιπλέον, προσφέρει χαμηλή εσωτερική αντίσταση, αξιόπιστη λειτουργία σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και υψηλή απόδοση, παρά το γεγονός ότι η ενεργειακή του πυκνότητα παραμένει συγκριτικά χαμηλή. Χάρη σε αυτά τα χαρακτηριστικά, ο υπερπυκνωτής θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλος για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη απορρόφηση ή παροχή ισχύος, είτε αυτόνομα είτε σε συνδυασμό με άλλες πηγές ενέργειας υψηλής αποθηκευτικής ικανότητας.

Ακολουθεί συνοπτική παρουσίαση των βασικών τύπων υπερπυκνωτών.

5.5. Πυκνωτής Ηλεκτρικής Διπλής Στρώσης (EDLC)

Οι πυκνωτές ηλεκτρικής διπλής στοιβάδας (Electric Double-Layer Capacitors – EDLCs) αποτελούνται από δύο πορώδη ηλεκτρόδια άνθρακα, ηλεκτρολύτη και διαχωριστή, και βασίζονται σε έναν μη Φαρανταϊκό μηχανισμό αποθήκευσης ενέργειας. Η αποθήκευση πραγματοποιείται μέσω ηλεκτροστατικής συσσώρευσης φορτίου στο ηλεκτροχημικό διπλό στρώμα που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια ηλεκτροδίου-ηλεκτρολύτη, χωρίς μεταφορά φορτίου μεταξύ των δύο φάσεων.

Η υψηλή χωρητικότητα των EDLCs οφείλεται στη μεγάλη ενεργό επιφάνεια των ηλεκτροδίων άνθρακα και στη νανομετρική απόσταση διαχωρισμού φορτίων μέσα στο διπλό στρώμα. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός προσδίδει στους πυκνωτές αυτού του τύπου χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα, όπως ταχύτατους ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης (πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος), καθώς και εξαιρετικά μεγάλη κυκλική ζωή, που φτάνει εκατομμύρια κύκλους. Αυτό οφείλεται στην απουσία χημικών αντιδράσεων, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη φθορά σε συσσωρευτές.

5.6. Ψευδοπυκνωτής (Pseudocapacitor)

Οι ψευδοπυκνωτές (pseudocapacitors) αποτελούν τύπο υπερπυκνωτή που χρησιμοποιεί ηλεκτρόδια από οξείδια μετάλλων ή αγωγιμα πολυμερή, υλικά τα οποία εμφανίζουν υψηλή ηλεκτροχημική ψευδοχωρητικότητα. Σε αντίθεση με τους EDLCs, ο μηχανισμός αποθήκευσης ενέργειας είναι Φαρανταϊκός, καθώς βασίζεται σε ταχείες και αντιστρεπτές αντιδράσεις οξειδοαναγωγής (redox) που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και περιλαμβάνουν μεταφορά φορτίου μεταξύ ηλεκτροδίου και ηλεκτρολύτη.

Κατά την εφαρμογή ηλεκτρικού δυναμικού, ενεργοποιούνται οι αντιδράσεις αυτές, οδηγώντας στη ροή Φαρανταϊκού ρεύματος μέσω του στοιχείου. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός επιτρέπει στους ψευδοπυκνωτές να παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερη ειδική χωρητικότητα και μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τους πυκνωτές ηλεκτρικής διπλής στοιβάδας (EDLCs).

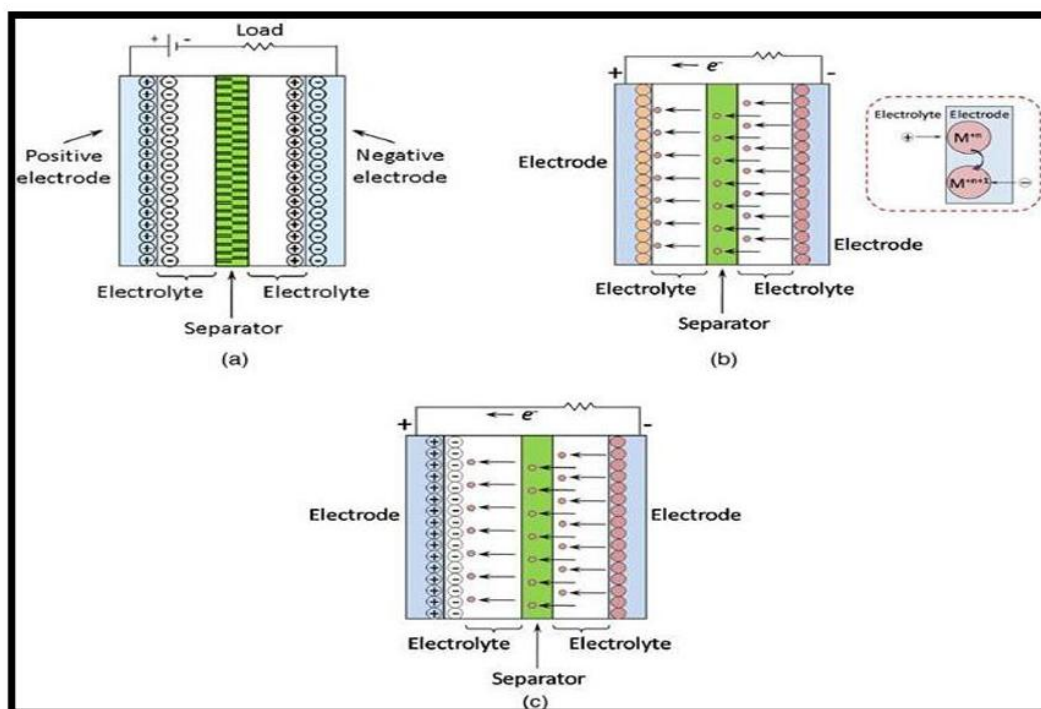
5.7. Υβριδικός Πυκνωτής (Hybrid capacitor)

Οι υβριδικοί υπερπυκνωτές (hybrid supercapacitors) αποτελούν κατηγορία υπερπυκνωτών που βασίζεται στη χρήση ασύμμετρων ηλεκτροδίων: το ένα λειτουργεί με ηλεκτροστατικό μηχανισμό αποθήκευσης (όπως στους EDLCs), ενώ το άλλο βασίζεται σε Φαρανταϊκές ηλεκτροχημικές διεργασίες (ψευδοπυκνωτικές ή τύπου μπαταρίας).

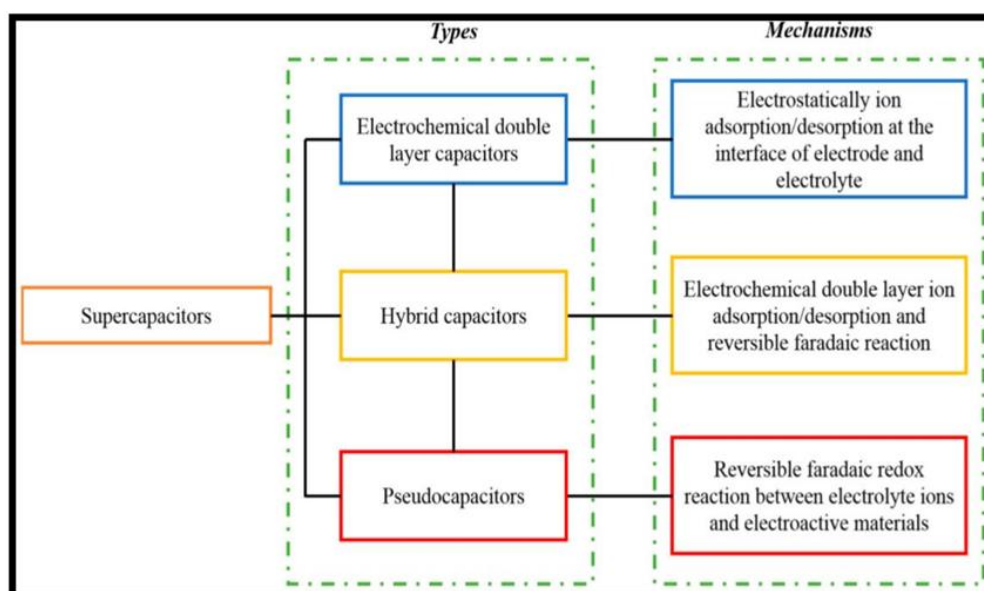
Αυτός ο συνδυασμός των δύο μηχανισμών αποθήκευσης φορτίου στοχεύει στην επίτευξη βελτιωμένης συνολικής απόδοσης, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ EDLCs και ψευδοπυκνωτών ή μπαταριών. Οι υβριδικοί υπερπυκνωτές προσφέρουν αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση με τους EDLCs, διατηρώντας υψηλή πυκνότητα ισχύος και ικανοποιητική κυκλική ζωή.

Παρόλο που στο παρελθόν δεν είχαν μελετηθεί εκτενώς, το αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον και η ευελιξία στον σχεδιασμό τους τούς καθιστούν μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογική λύση για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα λειτουργίας των Υπερπυκνωτών που αναφέραμε προηγουμένως:



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα του μηχανισμού αποθήκευσης ενέργειας για τύπους Υπερπυκνωτών (SCs): (a) Πυκνωτές Ηλεκτρικής Διπλής Στρώσης (EDLCs), (b) Ψευδοπυκνωτές, (c) Υβριδικοί πυκνωτές



Σχήμα 5.7: Είδη Υπερπυκνωτών

Οι υπερπυκνωτές αποτελούν μία αναδυόμενη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, με πλεονεκτήματα που τους καθιστούν κατάλληλους για εφαρμογές

άμεσης παροχής ή απορρόφησης ισχύος. Οι πυκνωτές ηλεκτρικής διπλής στοιβάδας (EDLCs) προσφέρουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, εξαιρετικά γρήγορους ρυθμούς φόρτισης/εκφόρτισης και μεγάλη κυκλική ζωή, λόγω της απουσίας χημικών αντιδράσεων. Από την άλλη πλευρά, οι ψευδοπυκνωτές βασίζονται σε Φαρανταϊκές διεργασίες, επιτυγχάνοντας υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και μεγαλύτερη ειδική χωρητικότητα, εις βάρος όμως της κυκλικής ζωής.

Οι υβριδικοί υπερπυκνωτές επιχειρούν να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα και των δύο αυτών τεχνολογιών, αξιοποιώντας ασύμμετρα ηλεκτρόδια ώστε να επιτευχθεί βελτιστοποιημένος συνδυασμός ισχύος, ενέργειας και διάρκειας ζωής. Η ευελιξία στον σχεδιασμό και το αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον τους καθιστούν μια πολλά υποσχόμενη λύση στο πεδίο της ταχείας αποθήκευσης ενέργειας, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μπαταρίες ή άλλες πηγές υψηλής ενεργειακής πυκνότητας

6. Εξοπλισμός και ηλεκτροκίνηση FCEV

6.1. Υλικά και Εξαρτήματα για ηλεκτροκίνηση FCEV

Η αρχιτεκτονική ενός οχήματος κυψέλης καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicle – FCEV) περιλαμβάνει ένα σύνολο εξειδικευμένων υποσυστημάτων, καθένα από τα οποία επιτελεί κρίσιμες λειτουργίες για την ενεργειακή του απόδοση, την ασφάλεια και τη λειτουργική του ευελιξία. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά τα βασικά εξαρτήματα και η λειτουργία τους:

1. Σύστημα Κυψέλης Καυσίμου (Fuel Cell System)
 - Συστοιχία PEMFC (Fuel Cell Stack): Κύρια πηγή ενέργειας του οχήματος. Μετατρέπει απευθείας τη χημική ενέργεια του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος (DC).
 - Δεξαμενή Υδρογόνου (Hydrogen Tank): Αποθηκεύει το καύσιμο (H_2) υπό πίεση για τροφοδοσία της κυψέλης.
 - Σύστημα Παροχής Αέρα (Air Supply): Παρέχει οξυγόνο (από τον ατμοσφαιρικό αέρα) στην κάθοδο της κυψέλης.
 - Διαχείριση Υδρογόνου (Hydrogen Management): Ρυθμίζει τη ροή και πίεση του H_2 (π.χ., μέσω βαλβίδων και ρυθμιστών).

- Σύστημα Ύγρανσης & Ψύξης (προαιρετικό): Εξασφαλίζει βέλτιστες συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας για τη σωστή λειτουργία της κυψέλης.
2. Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage System – ESS)
- Μπαταρία (Battery Pack): Παρέχει πρόσθετη ενέργεια, καλύπτει αιχμές ισχύος, υποστηρίζει την εκκίνηση και αποθηκεύει ενέργεια από ανάκτηση.
 - Μονάδα Υπερπυκνωτών (Ultracapacitors): Συμπληρωματικό στοιχείο με υψηλή πυκνότητα ισχύος και πολύ ταχύτερη απόκριση από τη μπαταρία.
3. Ηλεκτρονικά Ισχύος (Power Electronics)
- Μονοκατευθυντικός DC/DC (UDC) για PEMFC: Σταθεροποιεί την τάση εξόδου της κυψέλης και συνδέει τη στοίβα με το δίκτυο DC.
 - Αμφίδρομος DC/DC (BDC) για ESS: Διαχειρίζεται τη φόρτιση και εκφόρτιση της μπαταρίας ή/και του υπερπυκνωτή.
 - Μετατροπέας Οδήγησης Κινητήρα (Inverter): Παρέχει κατάλληλη μορφή ισχύος στον ηλεκτροκινητήρα, ελέγχει ροπή και ταχύτητα.
3. Σύστημα Πρόωσης (Propulsion System)
- Ηλεκτροκινητήρας (Electric Motor): Μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Οι τύποι που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν PMSM, BLDC, SRM και επαγωγικούς κινητήρες.
4. Σύστημα Ελέγχου & Διαχείρισης
- Μονάδα Ελέγχου Οχήματος (VCU / ECU): Εκτελεί τη στρατηγική διαχείρισης ενέργειας (EMS) και συντονίζει όλα τα υποσυστήματα.
 - Αισθητήρες: Παρέχουν δεδομένα (τάσεις, θερμοκρασίες, ροές, SoC μπαταρίας, θέσεις κινητήρα κ.ά.) για την επίβλεψη και ρύθμιση του συστήματος.
 - Δίαυλοι Επικοινωνίας (CAN): Εξασφαλίζουν την επικοινωνία μεταξύ των επιμέρους μονάδων.
 - Σύνδεσμοι (Connectors): Εγγυώνται την ασφαλή διασύνδεση των υποσυστημάτων.

5. Δομικά & Βοηθητικά Στοιχεία

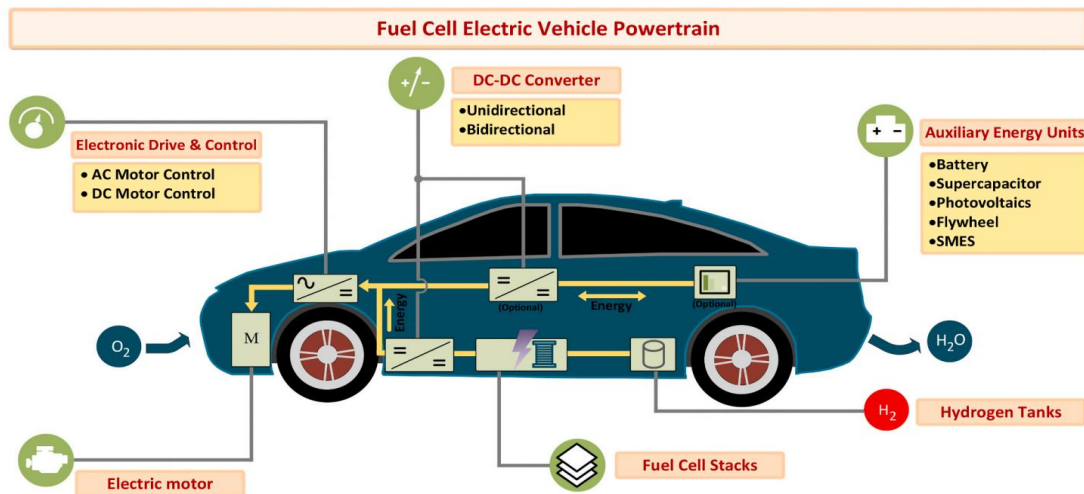
- Πλαίσια και Στερεώσεις: Υλικά και περιβλήματα για την τοποθέτηση και μηχανική σταθερότητα του εξοπλισμού.

6. Στοιχεία Ασφαλείας

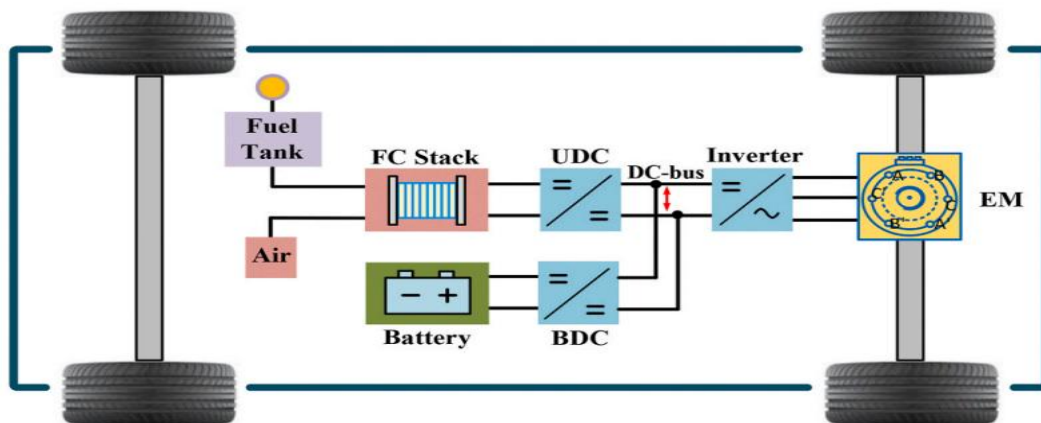
- Ασφάλειες, Διακόπτες & Ρελέ: Προστατεύουν από υπέρταση και βραχυκυκλώματα.
- Κουμπί Άμεσης Διακοπής: Επείγουσα αποσύνδεση του κυκλώματος.
- Ανιχνευτής Διαρροής Υδρογόνου: Εντοπίζει διαρροές H_2 για την αποφυγή κινδύνων.
- Συστήματα Γείωσης και Μόνωσης: Εξασφαλίζουν προστασία από ηλεκτροπληξία σε συστήματα υψηλής τάσης.

Συμπερασματικά βλέπουμε πως η λειτουργία ενός FCEV βασίζεται στη συνεργασία της PEMFC με το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρία), ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις ισχύος σε δυναμικές συνθήκες. Η δεξαμενή υδρογόνου, το σύστημα παροχής αέρα και η μονάδα διαχείρισης H_2 εξασφαλίζουν τη σταθερή τροφοδοσία της κυψέλης. Οι μετατροπείς DC/DC ρυθμίζουν τη ροή ενέργειας μεταξύ των υποσυστημάτων, ενώ οι αισθητήρες επιτρέπουν την εποπτεία και τον έλεγχο της λειτουργίας. Η σωστή διαστασιολόγηση και διασύνδεση όλων των επιμέρους μονάδων είναι κρίσιμη για την αποδοτική λειτουργία του οχήματος.

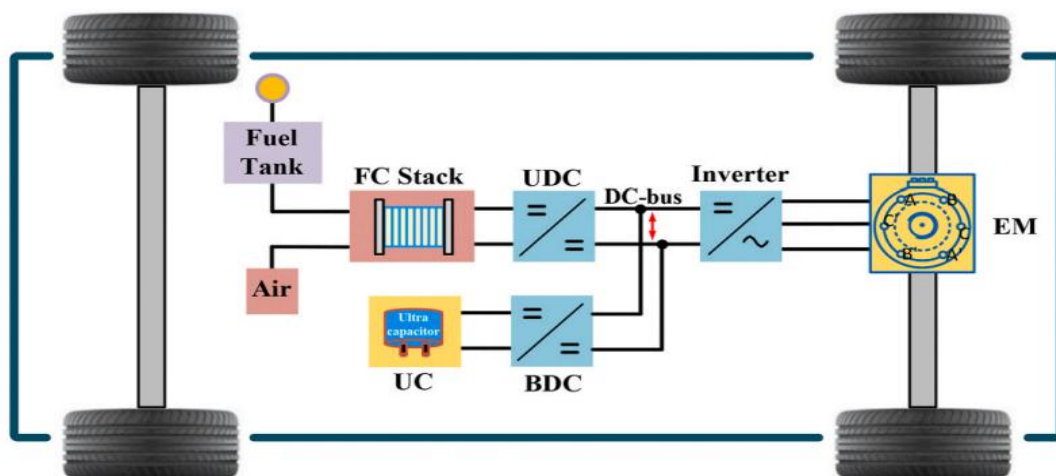
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται ενδεικτικές αρχιτεκτονικές διατάξεις συστήματος πρόωσης ηλεκτρικού οχήματος κυψέλης καυσίμου (FCEV). Απεικονίζονται οι βασικές ενεργειακές ροές και οι κύριες μονάδες του συστήματος, όπως η στοίβα κυψελών καυσίμου (FC Stack), οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρία, υπερπυκνωτής), οι μετατροπείς ισχύος (DC/DC, inverter) και ο ηλεκτροκινητήρας (EM).



Σχήμα 6.1: Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος κυψελών καυσίμου [20]



Σχήμα 6.2: Υβριδικό σύστημα μετάδοσης ισχύος κυψέλης καυσίμου – μπαταρίας [20]



Σχήμα 6.3: Υβριδικό σύστημα μετάδοσης ισχύος κυψέλης καυσίμου – υπερπυκνωτή [20]

6.2. Ιδιότητες και Καταλληλότητα του Υδρογόνου ως Καύσιμο Κυψελών Καυσίμου

Το υδρογόνο αποτελεί μια ιδιαίτερα αξιόλογη επιλογή καυσίμου για εφαρμογές σε κυψέλες καυσίμου, ιδίως στον τομέα της ηλεκτροκίνησης, καθώς συνδυάζει υψηλή ενεργειακή απόδοση με περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα. Το βασικό προϊόν της ηλεκτροχημικής αντίδρασης είναι το νερό, γεγονός που καθιστά τη χρήση του υδρογόνου μηδενικών εκπομπών ρύπων στο σημείο χρήσης, σε αντίθεση με καύσιμα όπως η μεθανόλη ή το φυσικό αέριο, τα οποία απαιτούν περίπλοκες διαδικασίες επεξεργασίας και συνοδεύονται από εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).

Παρόλο που η αποθήκευση και μεταφορά του υδρογόνου ενέχει τεχνικές προκλήσεις και η παραγωγή του βασίζεται ακόμη κατά κύριο λόγο σε ορυκτά καύσιμα, η συνεχής τεχνολογική πρόοδος επιτρέπει την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλεκτρόλυση, για τη βιώσιμη παραγωγή του. Επιπλέον, οι κυψέλες καυσίμου δεν διαθέτουν κινούμενα μηχανικά μέρη, γεγονός που εξασφαλίζει αθόρυβη λειτουργία και μειωμένες ανάγκες συντήρησης.

Συνολικά, τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν το υδρογόνο μια ιδιαίτερα υποσχόμενη ενεργειακή λύση για τη βιώσιμη κινητικότητα και την καθαρή ενέργεια του μέλλοντος.

Fuel Type	Energy/Mass Unit (J/kg)	Energy/Volume Unit (J/m ³)	Energy Reserve Factor	Carbon Emission Specific (kgC/kg Fuel)
Liquid hydrogen	141.90	10.10	1.00	0.00
Hydrogen gas	141.90	0.013	1.00	0.00
Fuel oil	45.50	38.65	0.78	0.84
Gasoline	47.40	34.85	0.76	0.86
Jet fuel	46.50	35.30	0.75	-
GPL	48.80	24.40	0.62	-
GNL	50.00	23.00	0.61	-
Methanol	22.30	18.10	0.23	0.50
Ethanol	29.90	23.60	0.37	0.50
Biodiesel	37.00	33.00	-	0.50
Natural gases	50.00	0.04	0.75	0.46
Coal	30.00	-	-	0.50

Πίνακας 6.4: Σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών του υδρογόνου με άλλα καύσιμα

Επιπλέον, οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν ευέλικτες ενεργειακές διατάξεις, ικανές να λειτουργούν με διάφορα υγρά και αέρια καύσιμα, όπως

υδρογονάνθρακες, αλκοόλες (π.χ. μεθανόλη, αιθανόλη), φυσικό αέριο, καθώς και καθαρό υδρογόνο. Παρά τη δυνατότητα πολυκαυσιμικής λειτουργίας, στην πλειονότητα των εμπορικών εφαρμογών, χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο καθαρό υδρογόνο ως καύσιμο.

Όταν το υδρογόνο συνδυάζεται με ατμοσφαιρικό αέρα ή καθαρό οξυγόνο ως οξειδωτικό μέσο, η ηλεκτροχημική αντίδραση αποδίδει μόνο νερό και θερμότητα ως παραπροϊόντα, χωρίς εκπομπές ρύπων, καθιστώντας τη λειτουργία των κυψελών καυσίμου εξαιρετικά καθαρή στο σημείο χρήσης.

6.3. Το Υδρογόνο ως Καύσιμο

Το υδρογόνο αποτελεί το πιο άφθονο στοιχείο στο σύμπαν, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 90% του συνόλου των ατόμων. Ωστόσο, στη Γη σπανίως απαντάται στην ελεύθερη, στοιχειακή του μορφή. Συνήθως βρίσκεται δεσμευμένο σε χημικές ενώσεις, με χαρακτηριστικά παραδείγματα το νερό (H_2O) και τους υδρογονάνθρακες, όπως το μεθάνιο (CH_4).

Ως καύσιμο, το υδρογόνο διακρίνεται για την υψηλότερη μαζική ενεργειακή πυκνότητα (γνωστή και ως ειδική ενέργεια) μεταξύ όλων των γνωστών καυσίμων, με τιμή που προσεγγίζει τα 140 MJ/kg. Αντιθέτως, η πολύ χαμηλή φυσική του πυκνότητα περιορίζει σημαντικά την ογκομετρική του ενεργειακή πυκνότητα, γεγονός που συνιστά πρόκληση για την αποθήκευση και μεταφορά του σε περιορισμένους χώρους.

Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά το υδρογόνο ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές όπου η μείωση του βάρους είναι καθοριστική, όπως για παράδειγμα στον αεροδιαστημικό τομέα ή σε φορητά ενεργειακά συστήματα.

Name	Formula	p Bar	ρ kg/m ³	h_H MJ/kg	h_L MJ/kg	ρh_L GJ/m ³	$\sqrt{h_L}$ km/s	F TW/m ²
Hydrogen	$H_2(g)$	50	4.06	141.80	120.97	0.49	11.00	5.41
Methane	$CH_4(g)$	50	35.85	55.50	50.01	1.79	7.07	12.68
Ammonia	$NH_3(l)$	10	681.90	22.50	18.65	12.71	4.32	54.90
Propane	$C_3H_8(l)$	10	507.70	50.35	46.36	23.54	6.81	160.24
Methanol	$CH_3OH(l)$	1	791.80	22.66	19.92	15.77	4.46	70.40
Octane	$C_8H_{18}(l)$	1	688.00	47.89	44.43	30.57	6.67	203.73

Πίνακας 6.5: Σύγκριση βασικών χαρακτηριστικών του υδρογόνου με άλλα καύσιμα

Παραγωγή του υδρογόνου

Είναι σημαντικό να καταλάβουμε ότι το υδρογόνο δεν αποτελεί πρωτογενή πηγή ενέργειας, αλλά δευτερογενή ενεργειακό φορέα. Η παραγωγή του απαιτεί την εισροή ενέργειας από εξωτερική πηγή προκειμένου να διασπαστούν οι χημικές ενώσεις στις οποίες βρίσκεται εγκλωβισμένο. Κατά συνέπεια, μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του υδρογόνου οφείλει να λαμβάνει υπόψη ολόκληρο τον ενεργειακό κύκλο ζωής του, από το στάδιο της παραγωγής μέχρι την τελική του χρήση.

Οι πιο κοινές εμπορικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου είναι με:

- i) Αναμόρφωση υδρογονανθράκων με ατμό
- ii) Μερική οξείδωση και αεριοποίηση
- iii) Ηλεκτρόλυση νερού

Αναμόρφωση υδρογονανθράκων με ατμό: Πρόκειται για μία ενδόθερμη χημική διεργασία, κατά την οποία ένας υδρογονάνθρακας (π.χ. φυσικό αέριο) αντιδρά με υδρατμούς σε υψηλές θερμοκρασίες (700–1100°C) και παρουσία καταλύτη, με στόχο τη διάσπαση των μορίων και την παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και υδρογόνου (H₂). Η παραγόμενη ποσότητα υδρογόνου μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω με την εφαρμογή της αντίδρασης μετατόπισης αερίου-νερού (Water-Gas Shift Reaction), κατά την οποία το CO μετατρέπεται σε CO₂ και επιπλέον H₂. Αν και η μέθοδος είναι τεχνολογικά ώριμη και οικονομικά αποδοτική, εντούτοις παράγει εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, γεγονός που περιορίζει τη βιωσιμότητά της σε περιβαλλοντικούς όρους, εκτός εάν συνδυαστεί με τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS). Βασικότερη μορφή είναι η ατμοαναμόρφωση του μεθανίου (Steam Methane Reforming - SMR), αποτελεί την πλέον διαδεδομένη βιομηχανική μέθοδο παραγωγής υδρογόνου παγκοσμίως.

Μερική οξείδωση και αεριοποίηση: Είναι θερμοχημικές διεργασίες παραγωγής υδρογόνου από ανθρακούχες πρώτες ύλες, όπως φυσικό αέριο, πετρέλαιο, άνθρακας ή βιομάζα. Στη μερική οξείδωση, το καύσιμο αντιδρά με περιορισμένη ποσότητα οξυγόνου, οδηγώντας σε εξώθερμη παραγωγή συνθετικού αερίου (syngas) πλούσιου σε υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Αντίστοιχα, η αεριοποίηση γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες (800–1200°C) παρουσία μικρής ποσότητας οξυγόνου ή ατμού, με στόχο τη μετατροπή στερεών ή υγρών καυσίμων σε H₂ και CO. Το παραγόμενο CO μπορεί να μετατραπεί περαιτέρω σε H₂ μέσω της αντίδρασης μετατόπισης αερίου-νερού (water-gas shift).

Ηλεκτρόλυση νερού: Σε αυτή τη μέθοδο, το περιβαλλοντικό όφελος εξαρτάται άμεσα από την πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται. Εάν η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ορυκτά καύσιμα, οι εκπομπές ρύπων παραμένουν υψηλές. Αντίθετα, εάν αξιοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), όπως η ηλιακή ή η αιολική, τότε το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με σχεδόν μηδενικές εκπομπές άνθρακα ("πράσινο" υδρογόνο). Αποτελεί μία ώριμη και σχετικά καθαρή τεχνολογία παραγωγής υδρογόνου, κατά την οποία το μόριο του νερού (H_2O) διασπάται στα βασικά του στοιχεία, υδρογόνο (H_2) και οξυγόνο (O_2), μέσω της διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος. Η απόδοση της διεργασίας κυμαίνεται μεταξύ 60% και 80%, ανάλογα με την τεχνολογία και τις συνθήκες λειτουργίας. Η περιβαλλοντική αποδοτικότητα της ηλεκτρόλυσης εξαρτάται άμεσα από την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας όταν αυτή προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, η παραγωγή υδρογόνου είναι πρακτικά μηδενικών εκπομπών, καθιστώντας τη μέθοδο αυτή στρατηγικής σημασίας.

Επομένως, το υδρογόνο αποτελεί πολλά υποσχόμενη μορφή καυσίμου με μικρή έως και καθόλου περιβαλλοντική επίπτωση στο περιβάλλον. Κατάλληλη για οχήματα καθώς το βάρος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητά του. Το μόνο που χρήζει ανάπτυξης, αν και έχουν γίνει τεράστια βήματα με τη πάροδο των ετών, είναι η εύρεση νέων μεθόδων αποθήκευσης του για τη μείωση του χώρου που καταλαμβάνει καθώς και η αποδοτική παραγωγή του με «πράσινα» μέσα.

6.4. Τρόπος Απόκρισης Κινητήρων σε σύνδεση με fuel cell

Η δυναμική συμπεριφορά και η απόκριση των ηλεκτροκινητήρων σε συστήματα πρόωσης οχημάτων κυψελών καυσίμου (FCEV) εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση με την κυψέλη καυσίμου τύπου PEMFC και ένα βοηθητικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (ESS).

Μετά από εκτενής έρευνα προκύπτουν τα εξής παρακάτω:

- a) Οι κυψέλες καυσίμου PEMFC εμφανίζουν περιορισμένη δυναμική απόκριση σε απότομες μεταβολές φορτίου, όπως σε επιτάχυνση ή ανάβαση. Αυτό οφείλεται κυρίως σε φαινόμενα μεταφοράς μάζας (διαχείριση αντιδρώντων και νερού) και σε ηλεκτροχημικές

καθυστερήσεις, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μεταβατικών φαινομένων όπως υπέρβαση ρεύματος και υποβιβασμό τάσης.

- b) Για την άμεση παροχή ισχύος που απαιτεί ο ηλεκτροκινητήρας, είναι απαραίτητη η υβριδοποίηση του συστήματος με ένα ESS, όπως μπαταρία ή/και υπερπυκνωτή. Το ESS, μέσω κατάλληλου μετατροπέα, γεφυρώνει τη διαφορά χρόνου απόκρισης, εξασφαλίζοντας ομαλή τροφοδοσία.
- c) Στο υβριδικό σύστημα, το ESS καλύπτει τις αιχμές ισχύος κατά τα μεταβατικά φαινόμενα, ενώ η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί υπό πιο σταθερές συνθήκες, καλύπτοντας τη μέση ισχύ. Η διαχείριση ισχύος μεταξύ των πηγών πραγματοποιείται μέσω του συστήματος διαχείρισης ενέργειας (EMS).

Συμπερασματικά

Η δυναμική απόκριση του ηλεκτροκινητήρα σε ένα υβριδικό FCEV είναι άμεση και αποδοτική, όχι λόγω της κυψέλης καυσίμου, αλλά χάρη στη δυναμική συνεισφορά του ESS. Η συνολική απόδοση του συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σωστή διαστασιολόγηση και τον έλεγχο τόσο του ESS όσο και του EMS.

6.5. Διαστασιολόγηση εξοπλισμού

Θα χρησιμοποιήσουμε ένα κινητήρα DC 12V – 30W

Επομένως το ρεύμα που απαιτείται από το κινητήρα είναι :

$$I = \frac{P}{V} = \frac{30W}{12V} = 2,5 \text{ Ampere}$$

Για να λειτουργεί ο κινητήρας για 2 ώρες, απαιτούμενη χωρητικότητα της μπαταρίας είναι:

$$C_{\text{μπαταρίας}} = \frac{(I_{\text{ισχύς}}(W) * X_{\text{ρόνος}}(h))}{T_{\text{άση}}(V)} = \frac{30W * 2h}{12V} = 5Ah$$

Η κυψέλη καυσίμου πρέπει να έχει τη δυνατότητα να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ, βάση και της απόδοσης της, επομένως η απαιτούμενη ισχύς εισόδου είναι

$$P_{\text{εισόδου}} = \frac{P_{\text{εξόδου}}}{\text{Απόδοση}} = \frac{30W}{0,5} = 60W$$

*κατά μέσο όρο η κυμαίνεται από 40-50%, χωρίς συμπαράγωγή.

Ένα μοναδικό στοιχείο κυψέλης αποδίδει περίπου 0,7V. Επομένως για να φτάσουμε στην επιθυμητή τάση θα χρειαστούμε μια συστοιχία κυψελών ≈ 18 στοιχείων, για να καλύψουμε τις ανάγκες μας. Η τάση θα φτάσει στα 12,6V

Υπολογισμός κατανάλωσης υδρογόνου

$$E_{\text{total}} = 60W * 2h = 120Wh \text{ ή}$$

$$E_{\text{total}} = 60W * 7200s = 432000J$$

Όπως έχουμε δει προηγουμένως, η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του υδρογόνου (LHV) είναι 120MJ/kg

Άρα

$$M_{\text{υδρογόνου}} = \frac{E_{\text{total}}}{\eta * LHV} = \frac{432.000J}{0,5 * 120.000.000J/kg} = 0.00072kg \text{ ή } 7,2g$$

Επομένως απαιτούνται 7,2g υδρογόνου για να λειτουργεί ο κινητήρας για 2 ώρες.

Υπολογισμός υπολειμμάτων νερού από τη λειτουργία της κυψέλης:

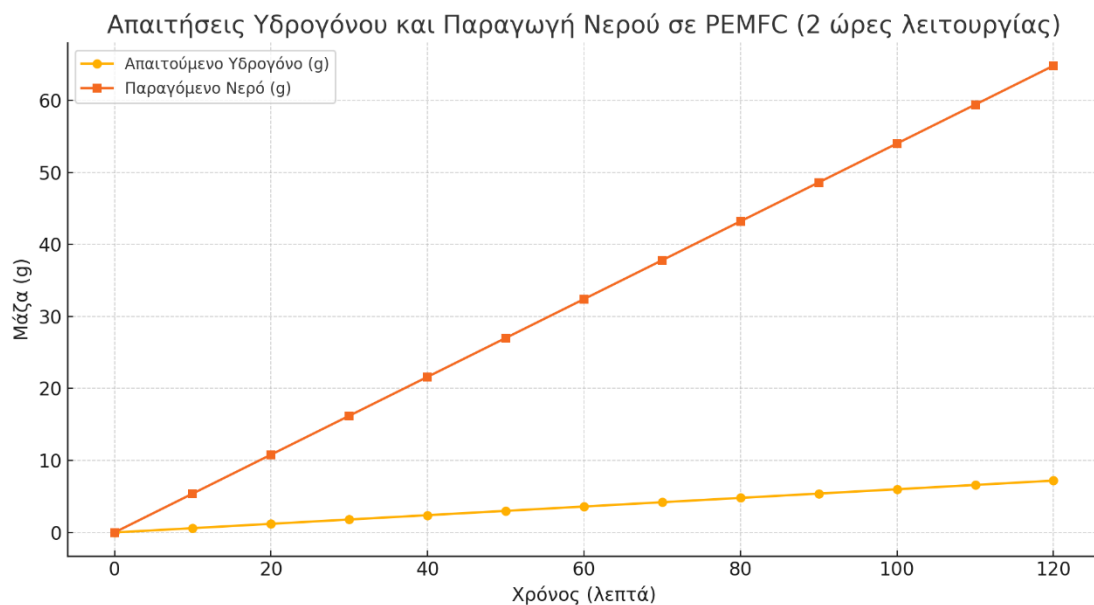
Ισχύει ότι η συνολική αντίδραση PEMFC: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$, και

Μοριακή μάζα Υδρογόνου = 2g/mol

Μοριακή μάζα Νερού = 18g/mol

$$M_{\text{νερού}} = \frac{M_{\text{υδρογόνου}} * H_2O \text{ g/mol}}{H_2 \text{ g/mol}} = \frac{7.2g * 18 \text{ g/mol}}{2 \text{ g/mol}} = 64.8g$$

Επομένως θα παραχθούν 64,8g H_2O .



Πίνακας 6.6: Διάγραμμα θεωρητικής απαίτησης υδρογόνου και παραγωγής νερού ενός PEMFC

7. Μοντελοποίηση συστήματος FCEV σε MATLAB/Simulink

Σε αυτό το κεφάλαιο θα προχωρήσουμε στην προσομοίωση του προτεινόμενου συστήματος ηλεκτροκίνησης που βασίζεται σε κυψέλη καυσίμου υδρογόνου. Στόχος είναι η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος υπό ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας, μέσω ενός μοντέλου που υλοποιείται στο περιβάλλον MATLAB/Simulink. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη μελέτη της συνεργασίας μεταξύ της κυψέλης καυσίμου, της βοηθητικής μπαταρίας και του ηλεκτροκινητήρα, καθώς και την παρακολούθηση κρίσιμων παραμέτρων όπως η ισχύς, η κατανάλωση ενέργειας και η απόδοση.

7.1. Περιγραφή του Συστήματος

Το προτεινόμενο σύστημα αποτελεί μια μικρής κλίμακας υβριδική διάταξη ηλεκτροκίνησης, στην οποία αξιοποιείται κυψέλη καυσίμου υδρογόνου τύπου PEM (Proton Exchange Membrane) σε συνδυασμό με μπαταρία λιθίου, για την παροχή ενέργειας σε έναν ηλεκτροκινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC). Η σχεδίαση ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις ενός ελαφρού ηλεκτρικού οχήματος, όπως ένα

ηλεκτρικό πατίνι (e-scooter), και στοχεύει στην ενεργειακά αποδοτική και σταθερή λειτουργία του συστήματος, με διάρκεια λειτουργίας έως 2 ώρες.

Η διάταξη περιλαμβάνει τα εξής βασικά υποσυστήματα:

i. Κυψέλη Καυσίμου Υδρογόνου (PEM Fuel Cell Stack)

Η κυψέλη καυσίμου αποτελεί την κύρια πηγή ενέργειας του συστήματος. Χρησιμοποιείται τεχνολογία PEM, η οποία προσφέρει γρήγορη απόκριση, καλή ενεργειακή πυκνότητα και λειτουργία σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Ονομαστική ισχύς: 60 W

Ονομαστική τάση εξόδου: 12.6 V

Μέγιστο ρεύμα λειτουργίας: έως 4.8 A

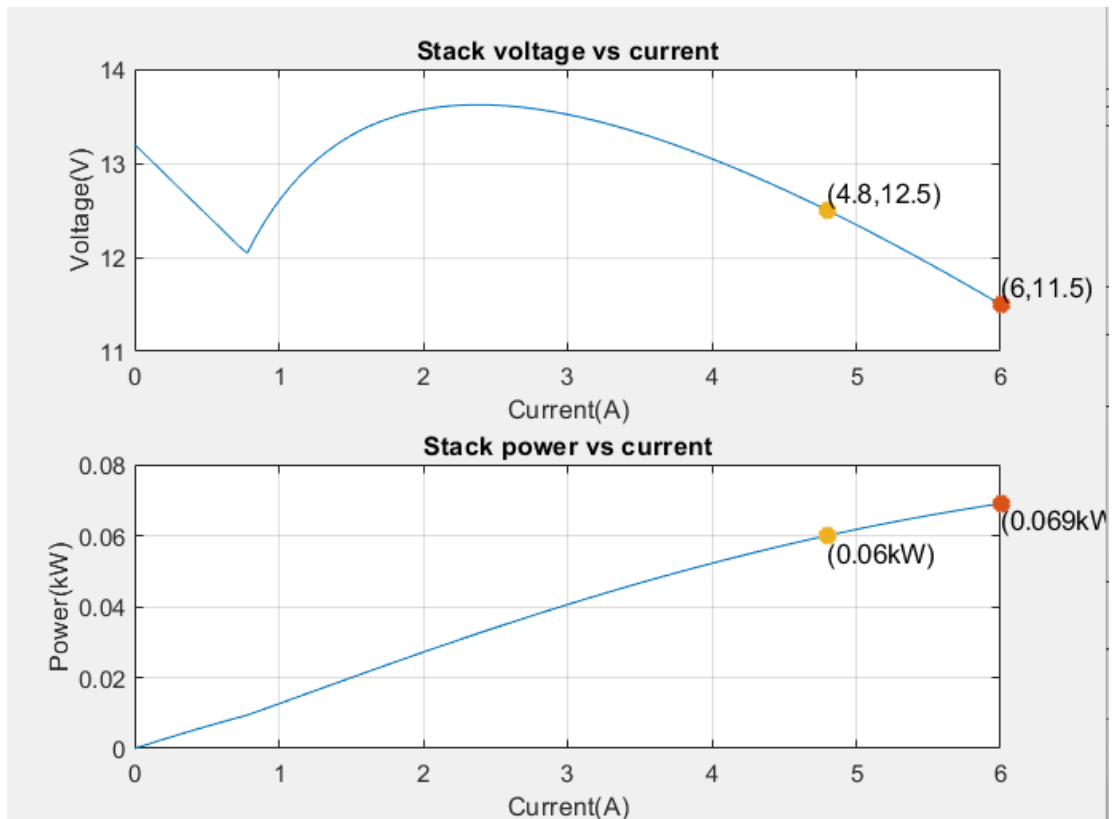
Η κυψέλη μετατρέπει τη χημική ενέργεια του υδρογόνου σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης, χωρίς την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα. Ως παραπροϊόν προκύπτει καθαρό νερό και θερμότητα. Για τη λειτουργία της απαιτείται παροχή καθαρού υδρογόνου η οποία στο προσομοιωτικό μοντέλο είναι περιορισμένη στα 7.2g H₂.

Παρακάτω φαίνονται τα χαρακτηριστικά της κυψέλης στο Simulink καθώς και η καμπύλη Τάσης (V) σε σχέση με το Ρεύμα (I) της και η καμπύλη Ισχύς (kW) σε σχέση με το Ρεύμα (I).

```
Fuel cell nominal parameters:
Stack Power:
-Nominal = 60 W
-Maximal = 69 W
Fuel Cell Resistance = 1.4949 ohms
Nerst voltage of one cell [En] = 1.1631 V
Nominal Utilization:
-Hydrogen (H2)= 94.74 %
-Oxidant (O2)= 7.001 %
Nominal Consumption:
-Fuel = 0.7021 slpm
-Air = 1.672 slpm
Exchange current [i0] = 0.7776 A
Exchange coefficient [alpha] = -0.087236

Fuel cell signal variation parameters:
Fuel composition [x_H2] = 100 %
Oxidant composition [y_O2] = 21 %
Fuel flow rate [FuelFr] at nominal Hydrogen utilization:
-Nominal = 0.9311 lpm
-Maximum = 1.164 lpm
Air flow rate [AirFr] at nominal Oxidant utilization:
-Nominal = 30 lpm
-Maximum = 37.5 lpm
System Temperature [T] = 343 Kelvin
Fuel supply pressure [Pfuel] = 1 atm
Air supply pressure [PAir] = 1 atm
```

Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά PEM fuel cell στο περιβάλλον Simulink



Πίνακας 7.2: Χαρακτηριστικές καμπύλες PEMFC Voltage-Current (a) , Power-Current (b) στο περιβάλλον Simulink.

ii. Κατανάλωση Υδρογόνου

Με βάση προσομοίωση πλήρους φορτίου διάρκειας 2 ωρών, η συνολική κατανάλωση υδρογόνου προσδιορίστηκε στα 7.2 g H₂. Αυτό αντιστοιχεί σε:

- 3.6 g/h (ή 0.06 g/min)
- λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα του υδρογόνου υπό STP (0.08988 g/L)

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας της κυψέλης υπολογίζεται σε:

$$\frac{60W * 2h}{7.2g} = 16.67 Wh/g$$

τιμή η οποία είναι αντιπροσωπευτική της απόδοσης PEM κυψελών καυσίμου για φορητές εφαρμογές.

iii. Ηλεκτροκινητήρας DC (DC Motor)

Το φορτίο του συστήματος προσομοιώνεται με έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος, κατάλληλο για την κίνηση ενός ελαφρού ηλεκτρικού οχήματος. Τα χαρακτηριστικά του είναι:

- **Ονομαστική ισχύς:** 30 W
- **Τάση λειτουργίας:** 12 V
- **Μηχανικό φορτίο:** μεταβλητό 0.005-0.01Nm

iv. Μετατροπείς DC/DC (Boost Converter)

Για τη σταθεροποίηση της τάσης και τη διανομή της ενέργειας στο σύστημα χρησιμοποιείται μετατροπείς συνεχούς ρεύματος:

- **DC-DC Boost Converter:** διαμορφώνει την τάση της κυψέλης προς τον κοινό DC Bus.

v. Σύστημα Μπαταρίας (Battery System)

- Μπαταρία Ιόντων Λιθίου (12V, 5Ah) ως buffer ενέργειας.
- Αποθήκευση ενέργειας κατά τη διάρκεια περίσσειας ισχύος από την PEMFC.

vi. Μονάδες Μέτρησης (Measurement Units)

- Μέτρηση τάσης, ρεύματος, ισχύος και αποδοτικότητας σε πραγματικό χρόνο.
- Παρακολούθηση κατανάλωσης καυσίμου.

Αρχές Λειτουργίας

Η PEMFC λειτουργεί με βάση την ηλεκτροχημική αντίδραση υδρογόνου και οξυγόνου. Το υδρογόνο παρέχεται στην άνοδο, ενώ το οξυγόνο στην κάθοδο. Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα είναι ανάλογο με την ποσότητα υδρογόνου που καταναλώνεται.

7.2. Σχεδιασμός Μοντέλου Simulink

Η προσομοίωση υλοποιήθηκε στο MATLAB R2024b με χρήση:

- Simscape για ισχύ και σύνδεση PEMFC/μπαταρίας/φορτίου
- Simulink για τον έλεγχο SoC και καταγραφή μεταβλητών

Η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει τα εξής βασικά blocks:

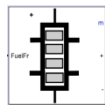
- Fuel cell Stack: Προσομοίωση της λειτουργίας της κυψέλης.
- Battery System: Μπαταρία ως buffer ενέργειας.
- DC machine (DC Motor): Φορτίο συνεχούς ρεύματος.
- Measurement Units: Καταγραφή και παρακολούθηση των μεγεθών.

Στόχοι Προσομοίωσης

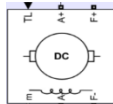
1. Υπολογισμός της κατανάλωσης υδρογόνου σε σχέση με το χρόνο.
2. Μελέτη της αποδοτικότητας της PEMFC.
3. Ανάλυση της απόκρισης του συστήματος σε διαφορετικές συνθήκες φορτίου.
4. Παρακολούθηση της παραγωγής νερού.

Τα βασικότερα blocks που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη προσομοίωση Matlab/Simulink παρουσιάζονται παρακάτω:

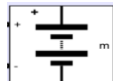
a. Fuel Cell Block



b. DC Motor Block



c. Battery Block

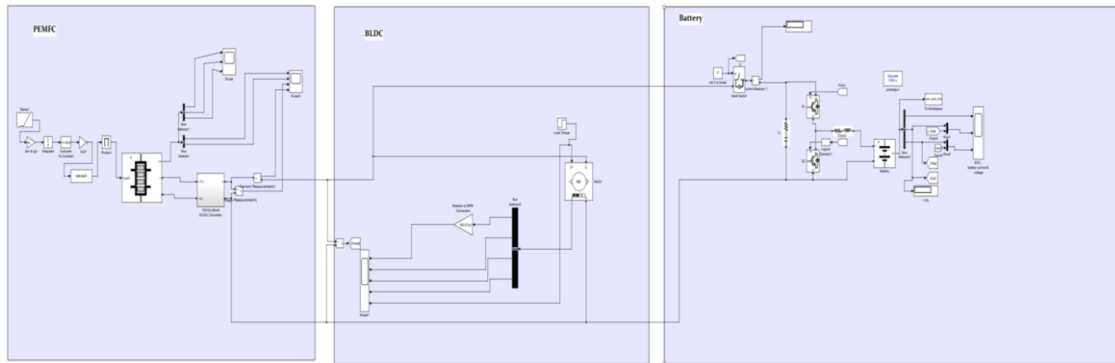


d. Scope Block



→ παρατήρηση των αποτελεσμάτων

Συνολικά το μοντέλο Simulink φαίνεται παρακάτω:

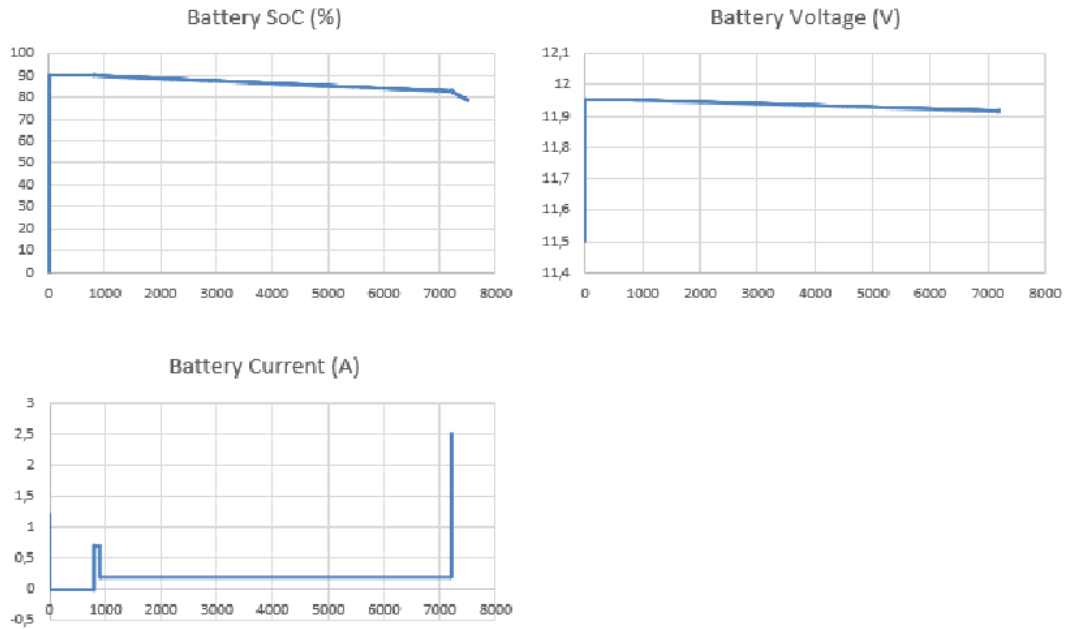


Σχήμα 7.3: Μοντέλο Simulink PEMFC Hybrid system with battery and dc motor

Είναι χωρισμένο σε τρία υποσυστήματα: PEMFC subsystem(στα αριστερά), PMDC subsystem (στη μέση) και Battery Subsystem (στα δεξιά).

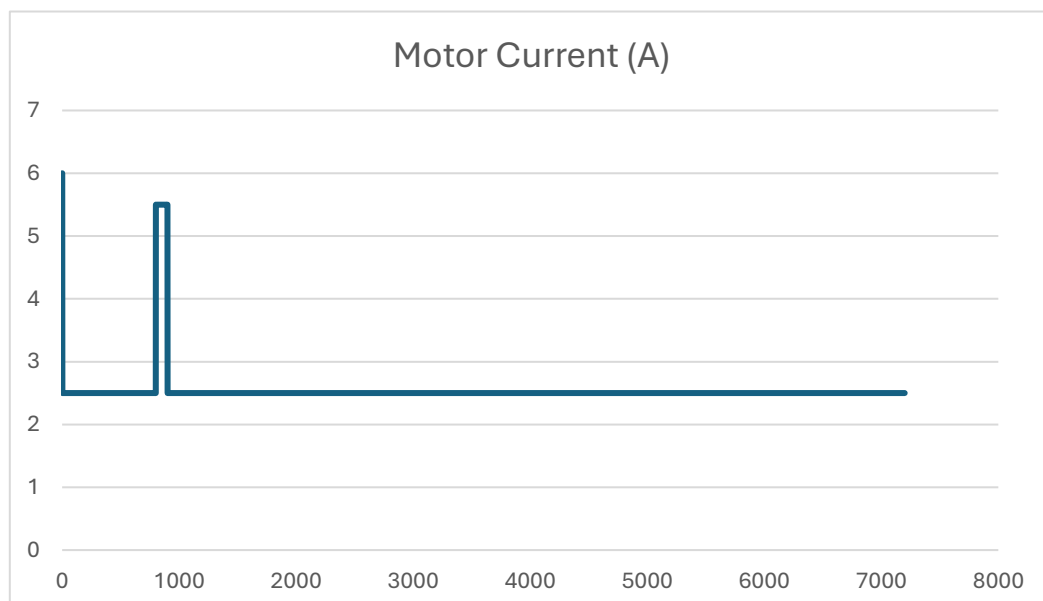
7.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης

- Μπαταρία: Παρακάτω παρατίθενται το διάγραμμα χρήσης της μπαταρίας για το διάστημα 2 ωρών.



Διάγραμμα 7.4: Διάγραμμα μετρήσεων μπαταρίας κατά τη προσομοίωση

Κινητήρας: Η κατανάλωση ρεύματος του κινητήρα ορίζει την απαίτηση που καλείται να καλύψει. Λόγω δυναμικών απαιτήσεων κατά την προσομοίωση, το ρεύμα μεταβάλλεται στον χρόνο, όπως φαίνεται στο σχετικό διάγραμμα.



Κατά την εκκίνηση, το ρεύμα φτάνει στιγμιαία τα 6 A, γεγονός που δείχνει ότι αφορά ρεύμα εκκίνησης, όπου η μηδενική αρχική ταχύτητα προκαλεί μέγιστη αντίσταση στον κινητήρα.

Μετά την εκκίνηση, το ρεύμα σταθεροποιείται προσωρινά στα 2.7 A, δείχνοντας λειτουργία υπό κανονικό φορτίο. Στη συνέχεια εμφανίζεται μεταβατική αύξηση στα 5.5 A λόγω στιγμιαίας αύξησης φορτίου από απότομη απαίτηση ισχύος (πχ: μια απότομη επιτάχυνση ή κίνηση σε ανηφόρα). Στη φάση ονομαστικής λειτουργίας, το ρεύμα διατηρείται σταθερά περίπου στα 2.5 A για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα.

Τέλος, παρατηρείται σταδιακή μείωση του ρεύματος γεγονός που δείχνει μετάβαση το τερματισμό λειτουργίας. Η συνολική καμπύλη παρουσιάζει χρονικά μεταβαλλόμενη απαίτηση ισχύος, προσομοιώνοντας σενάρια ημιαστικής κίνησης.

ο Κυψέλη Καυσίμου:

Η κυψέλη φαίνεται να επαρκεί για στις απαιτήσεις του συστήματος. Παρουσιάζει σταθερή Τάση στην έξοδο όπως αναμέναμε καθώς και σχετικά σταθερό ρεύμα.

Επομένως, για την εύρεση της αποδοτικότητας της κυψέλης καυσίμου PEM έχουμε:

$$\eta_{\text{PEMFC}} = \frac{P_{\text{electrical}}}{\dot{n}_{\text{H}_2} \cdot \Delta H}$$

Όπου:

- $P_{\text{electrical}}$: Η ηλεκτρική ισχύς που παράγει η PEMFC $\rightarrow 60 \text{ W}$
- $\dot{n}_{\text{H}_2}$: Ροή υδρογόνου σε mol/s
- ΔH : Ενθαλπία καύσης του υδρογόνου = 286,000 J/mol

$$\dot{n}_{\text{H}_2} = \frac{7.2 \text{ g}}{2.016 \text{ g/mol}} \approx 3.571 \text{ mol}$$

$$\dot{n}_{\text{H}_2} = \frac{3.571 \text{ mol}}{7200 \text{ s}} = 0.0004959 \text{ mol/s}$$

$$P_{\text{thermal}} = \dot{n}_{\text{H}_2} \cdot \Delta H = 0.000496 \cdot 286000 \approx 141.86 \text{ W}$$

Άρα ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta_{\text{PEMFC}} = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{thermal}}} = \frac{60}{141.86} \approx 0.423 = 42.3\%$$

Που είναι αποδεκτός και λογικός με τα θεωρητικά δεδομένα που έχουμε δει.

7.4. Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη προσομοίωση είχε στόχο την ανάλυση της συμπεριφοράς ενός υβριδικού συστήματος ηλεκτροκίνησης που συνδυάζει κυψέλη καυσίμου τύπου PEM με μπαταρία 12 V. Εξετάστηκαν η κατανάλωση υδρογόνου σε βάθος χρόνου, η παραγωγή νερού, η ενεργειακή απόδοση της κυψέλης και η απόκριση του συστήματος σε δυναμικές απαιτήσεις φορτίου.

Από την προσομοίωση, προέκυψε ότι το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει σταθερή τροφοδοσία 30 W στον κινητήρα για διάρκεια περίπου δύο ωρών, με συνολική κατανάλωση 7.2 g υδρογόνου, τιμή που συμφωνεί με τις αρχικές θεωρητικές εκτιμήσεις. Η τάση εξόδου της κυψέλης κυμάνθηκε εντός αναμενόμενων ορίων, παρουσιάζοντας πτώση από 13.5 V σε 11.5 V, ενώ η ισχύς κορυφώθηκε στα 69 W σε στιγμές αυξημένου ρεύματος. Η κατανάλωση υδρογόνου ακολούθησε την πορεία του ρεύματος λειτουργίας, παρουσιάζοντας ήπιες διακυμάνσεις, και επιβεβαίωσε τη σωστή παραμετροποίηση του μοντέλου.

Η μπαταρία ξεκίνησε με κατάσταση φόρτισης (SoC) στο 90% και παρείχε υποστήριξη στις φάσεις με αυξημένες απαιτήσεις ισχύος μέσω του DC-DC μετατροπέα. Η ύπαρξή της αποδείχθηκε ουσιαστική για τη σταθεροποίηση του συστήματος, καθώς επέτρεψε στη Fuel Cell να λειτουργεί κοντά στην ιδανική περιοχή απόδοσής της. Ο ρόλος της ως ενεργειακός buffer αναδείχθηκε σημαντικός.

Επιπλέον, από τη στοιχειομετρική ανάλυση της αντίδρασης προέκυψε ότι η παραγωγή νερού έφτασε τα 64.3 g για την κατανάλωση 7.2 g H₂, ποσότητα συμβατή με τις συνθήκες λειτουργίας της κυψέλης. Η σταδιακή εξάντληση τόσο του καυσίμου όσο και της αποθηκευμένης ενέργειας στη μπαταρία οδήγησε στον ρεαλιστικό τερματισμό της λειτουργίας, ενισχύοντας την αξιοπιστία του μοντέλου.

Συνολικά, η προσομοίωση συνέβαλε στην κατανόηση των ροών ενέργειας και της συνεργασίας μεταξύ των υποσυστημάτων. Αν και τα αποτελέσματα κρίνονται θετικά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ενδέχεται να υπάρχουν μικρές αποκλίσεις λόγω απλοποιήσεων ή σφαλμάτων στη μοντελοποίηση και στην παραμετροποίηση. Για τον λόγο αυτό, τα συμπεράσματα θα πρέπει να επιβεβαιωθούν και με πειραματική υλοποίηση σε μελλοντικό στάδιο.

Τέλος, το μοντέλο αυτό μπορεί να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω μελέτη, ενσωματώνοντας στρατηγικές βελτιστοποίησης της φόρτισης (SoC management), καθώς και τεχνικές ανάκτησης ενέργειας, ώστε να προσεγγίσει ακόμα πιο ρεαλιστικά την εφαρμογή σε πραγματικά συστήματα ηλεκτροκίνησης.

8. Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου (Fuel Cells) και πώς μπορεί να αξιοποιηθεί για την ηλεκτροκίνηση μικρής κλίμακας. Συγκεκριμένα, επικεντρωθήκαμε στις κυψέλες τύπου PEM (Proton Exchange Membrane Fuel Cells) και στο πώς μπορούν να συνδυαστούν με μια μπαταρία για την παροχή ενέργειας σε έναν ηλεκτροκινητήρα.

Αρχικά παρουσιάστηκαν βασικές θεωρητικές πληροφορίες, όπως η αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου, η κατηγοριοποίησή τους, καθώς και τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην PEMFC, καθώς θεωρείται κατάλληλη για φορητές και αυτόνομες εφαρμογές. Παρουσιάστηκαν επίσης διαφορετικοί τύποι κινητήρων και μπαταριών που συναντώνται σε τέτοια συστήματα, όπως και η σημασία του υδρογόνου ως καθαρό ενεργειακό φορέα.

Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε και προσομοιώθηκε ένα υβριδικό σύστημα στο MATLAB/Simulink, αποτελούμενο από κυψέλη PEM, μπαταρία 12 V 5Ah, μετατροπέα DC-DC και κινητήρα 30 W. Το σύστημα διαστασιολογήθηκε ώστε να μπορεί να λειτουργεί συνεχώς για περίπου δύο ώρες, με εκτιμώμενη κατανάλωση 7.2 g υδρογόνου.

Μέσα από την προσομοίωση μελετήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος σε συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου, καθώς και η παραγωγή νερού. Η διαχείριση της ενέργειας μεταξύ Fuel Cell και μπαταρίας έγινε παθητικά μέσω σύνδεσης σε

κοινό DC-DC μετατροπέα. Η μπαταρία ενεργοποιήθηκε όταν υπήρχαν αυξημένες απαιτήσεις ισχύος, βοηθώντας στη σταθερή λειτουργία του κινητήρα.

Αξιολογήθηκαν επίσης γραφήματα που απεικονίζουν την κατανάλωση υδρογόνου (με βάση το μεταβαλλόμενο ρεύμα), την τάση και το ρεύμα της κυψέλης καυσίμου και την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Η προσομοίωση ολοκληρώθηκε ρεαλιστικά με την εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων, επιβεβαιώνοντας την καλή λειτουργία του μοντέλου.

Από τη μελέτη προκύπτει ότι η χρήση PEMFC σε συνδυασμό με μπαταρία μπορεί να καλύψει επιτυχώς εφαρμογές μικρής ηλεκτροκίνησης, ενώ η ύπαρξη ενεργειακού buffer κρίνεται απαραίτητη. Για το επόμενο βήμα, προτείνεται η κατασκευή ενός πειραματικού πρωτοτύπου σε εργαστηριακές συνθήκες, με στόχο την επιβεβαίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Παράλληλα, η πειραματική εργαστηριακή μελέτη θα επιτρέψει τη δοκιμή πιο σύνθετων στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας, όπως η ανάκτηση ενέργειας κατά την επιβράδυνση και η βελτιστοποίηση της φόρτισης της μπαταρίας.

Συνολικά, η εργασία αυτή προσφέρει μια πρακτική βάση για τη μελέτη και τον σχεδιασμό υβριδικών ενεργειακών συστημάτων βασισμένων σε κυψέλες καυσίμου και αναδεικνύει τις δυνατότητές τους σε μελλοντικές εφαρμογές ηλεκτροκίνησης.

Βιβλιογραφία

- [1] P. E. Saranya, "Historical perspective of electrochemical energy storage devices", Smart Supercapacitors, 2023
- [2] Xianguo Li, "Chapter One - Thermodynamic Performance of Fuel Cells and Comparison with Heat Engines", Elsevier, 2007.
- [3] K. Sopian, W. Ramli Wan Daud, "Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells", Renewable Energy 31, 2006.
- [4] T. Maiyalagan, Sivakumar Pasupathi, "Components for PEM Fuel cells: An Overview", Materials Science Forum Vol. 657, 2010.
- [5] W. Mabhulusa, K. E. Sekhosana, X. Fuku, "The impact and performance of carbon-supported platinum group metal electrocatalysts for fuel cells", International Journal of Electrochemical Science 19, 2024.
- [6] M. Inci, M. Buyuk, M. H. Demir, G. Ilbey, "A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects", Renewable and Sustainable Energy Reviews 137, 2021.
- [7] Leonardo Giorgi, Fabio Leccese, "Fuel Cells: Technologies and Applications", The Open Fuel Cells Journal, 2013.
- [8] Tang, Y., Yuan, W., Pan, M., & Wan, Z., "Experimental investigation on the dynamic performance of a hybrid PEM fuel cell/battery system for lightweight electric vehicle application", Applied Energy, 2011.
- [9] Xun, Q., Lundberg, S., & Liu, Y., "Design and experimental verification of a fuel cell/supercapacitor passive configuration for a light vehicle", Journal of Energy Storage, 2021.
- [10] Sharma, P., Kumar, V., "Current technology of supercapacitors: A review", Journal of Electronic Materials, 2020.
- [11] Halper, M.S., Ellenbogen, J.C., "Supercapacitors: A brief overview", The MITRE Corporation, 2006.
- [12] A. Jaber, "Comparison of electric motors used in electric vehicle propulsion system", Indonesian Journal of Electrical Engineer and Computer Science, 2022.
- [13] X. Duan, X. Zhang, Y. Tang, "Cogging Torque Reduction in PMSM in Wide Temperature Range by Response Surface Methodology", Symmetry, 2021.
- [14] E.J. Cairns, P. Albertus, "Batteries for Electric and Hybrid-Electric Vehicles", Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, 2010.

- [15] Vijayakumar Arun, R. Kannan, S. Ramesh, M. Vijayakumar, P. S. Raghavendran, M. Siva Ramkumar, P. Anbarasu, Venkatesa Prabhu Sundramurthy, "Review on Li-Ion Battery vs Nickel Metal Hydride Battery in EV", *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022.
- [16] W. Tan, M. Zhou, X. Wei, B. Zhang, "Overview of porous media/metal foam application in fuel cells and solar power systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96, 2018.
- [17] Naef A. A. Qasem, Gubran A. Q. Abdulrahman, "A Recent Comprehensive Review of Fuel Cells: History, Types, and Applications", *International Journal of Energy Research*, 2024.
- [18] Meital Goor, Svetlana Menkin, Emanuel Peled, "High Power Direct Methanol Fuel Cell for Mobility and Portable Applications", *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019.
- [19] Lixin Fan, Zhengkai Tu, Siew Hwa Chan, "Recent Development of Hydrogen and Fuel Cell Technologies: A Review", *Energy Reports* 7, 2021.
- [20] Linda Barelli, Gianni Bidini, Andrea Ottaviano, "Optimization of a PEMFC/battery pack power system for a bus application", *Applied Energy* 97, 2012.
- [21] Qian Xun, Yujing Liu, Elna Holmberg, "A Comparative Study of Fuel Cell Electric Vehicles Hybridization with Battery or Supercapacitor", *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2018.