



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάλυση Λειτουργίας Κυψέλων Καυσίμου και Μοντελοποίηση για Στατικές Εφαρμογές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

MARCOS FELLIPE DE SOUZA RIBEIRO

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριο 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάλυση Λειτουργίας Κυψέλων Καυσίμου και Μοντελοποίηση για Στατικές Εφαρμογές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

MARCOS FELLIPE DE SOUZA RIBEIRO

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Οκτωβρίου 2013.

.....
Ν.ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ.ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ
Επίκ. Καθηγητλης ΕΜΠ

.....
Π. ΓΕΩΡΓΙΑΚΗΣ
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριο 2013

.....
MARCOS FELLIPE DE SOUZA RIBEIRO

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
ΕΜΠ

Copyright © Marcos Fellipe De Souza Ribeiro 2013

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

Μια σημαντική εφαρμογή των συστημάτων κυψελών καυσίμου είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για στατικές εφαρμογές με αποκεντρωμένο τρόπο. Σε αυτές τις εφαρμογές είναι επίσης δυνατόν να χρησιμοποιήσει κάποια από την απορριπτόμενη θερμότητα από το σύστημα κυψελών καυσίμου για συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού.

Στην πάrouσα διπλωματική, πρώτα παρουσιάζουμε μία επισκόπηση στην σημερινή κατάσταση στον κλάδο της ενέργειας που όσο και περισσότερο ψάχνει νέες τεχνολογίες για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας με ένα οικονομικό και αποδοτικό τρόπο δείχνοντας την κυψέλη καυσίμου ως μία εναλλακτική πηγή ενέργειας.

Εν συνέχεια, εκθέτει μία σύντομη ιστορική αναδρομή ξεκινώντας από τον μοντέλο του Willian Groove από το 1839 μέχρι τις πρόσφατες εφαρμογές. Παρουσιάζουμε την αρχή λειτουργίας μίας απλής κυψέλης καυσίμου, τα κατασκευαστικά στοιχεία, τα μέρη συστήματος και εφαρμογές της κυψέλης καυσίμου.

Ακολούθως, αναφέρουμε συγκεκριμένα όλους τους τύπους κυψέλων καυσίμου όπως και η αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC), κυψέλη καυσίμου πολυμερών ηλεκτρολυτών (PEMFC), κυψέλη καυσίμου άμεση μεθανόλης (DMFC), κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC), καθώς και κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC).

Στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζουμε την χρήση κυψέλης καυσίμου για στατικές εφαρμογές, πιο συγκεκριμένα την χρήση για καταναεμημένη παραγωγή και για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Στο κεφάλαιο 5, δίνονται μαθηματικό μοντέλο για μία κυψέλη καυσίμου το οποίο χρησιμοποιήσαμε για να προσωμοιώνουμε την λειτουργία και να αναλύουμε την συμπεριφορά για στατικές εφαρμογές. Επίσης, παρουσιάζεται ένα μπλοκ διάγραμμα στην πλαταφόρμα SIMULINK/MATLAB.

Λεξεις Κλειδια

Κυψέλη Καυσίμου, Στατικές Εφαρμογές, Καταναεμημένη Παραγωγή, Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας, Μοντελοποίηση Κυψέλης Καυσίμου

Abstract

An important application of fuel cell systems is to produce electricity for stationary applications in a decentralized manner. In these applications it is also possible to use some of the waste heat from the fuel cell system for cogeneration of heat and power.

In this thesis, first we present an overview of the current situation in the energy sector which is looking more and more for new technologies to produce electricity with an economical and efficient manner showing the fuel cell as an alternative energy source.

Follow, we show an brief history starting from the model Willian Groove from 1839 until recent applications. Also, we demonstrate the principle of a single fuel cell components system and applications of the fuel cell.

Subsequently, specifically we mention all types of fuel cells as the alkaline fuel cell (AFC), polymer electrolyte fuel cells (PEMFC), direct methanol fuel cell (DMFC), fuel cell molten carbonate (MCFC), phosphoric acid fuel cell (PAFC) and solid oxide fuel cells (SOFC).

In chapter 4, we present the use of fuel cell for stationary applications, more specifically the use for distributed generation and combined heat and power.

In chapter 5, are given mathematical model for a fuel cell which was used to simulate the operation and analyze the behavior for static applications. Also shows a block diagram in the Plataforma SIMULINK / MATLAB.

Key Words

Fuel cell, Stationary Applications, Distributed Generation, Combined Heat and Power, Modeling Fuel Cell

Ευχαριστίες

Πρώτα θέλω να ευχαριστήσω τον Θεό για όλες τις ευκαιρίες που μου έδωσε στην φοιτητική μου ζωή και θα μου δώσει σε όλη την ζωή μου.

Ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου, τους γονείς μου Maria de Jesus και Antônio Ribeiro, τον θείο μου Joel Souza, οι οποίοι πάντα με υποστήριζαν καθ'όλην την διάρκεια των σπουδών μου στην Ελλάδα, μην αφήνοντας να παρατήσω τα ονειρά μου.

Ακόμα, θέλω να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, Παναγιώτου Κωνσταντίνα, Πρεκατέ Αικατερίνη, Παπανδρέου Μάριος, Αγγελή Σωτήρης, Κυριακίδης Χρυσοβαλάντης, Γέρου Μιχάλης, Σκουρουμούνη Παναγίωτα, Σκουρουμούνης Χριστόδουλος, Χαραλάμπου Σοφία, Παπαδημητρίου Γεώργιο, Λάμπρης Κωνσταντίνος, οι οποίοι όσες φορές είχα δυσκολίες με την ελληνική γλώσσα πάντα ήταν πρόθυμοι να με βοηθήσουν.

Ευχαριστώ τον Καθηγητή Νικολάο Χατζηαργυρίου και την Δρ. Εριέττα Ζουντουρίδου που με πρόσφεραν το παρόν θέμα της διπλωματικής και το οποίο με ενέπνευσε να αγαπήσω περισσότερο τον κλάδο της ενέργειας.

Επίσης, θέλω να εκφράζω τις θερμές ευχαριστίες προς όλες τις κυρίες της ομάδας προσευχής της Εκκλησίας Σύναξη του Θεού, που ποτέ δεν με ξεχνούσαν στις προσευχές τους.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Ποιμ. Eduardo Souto και στην οικογένειά του, που όσες φορές χρειαζόταν ήταν δίπλα μου να με ενθαρρύνουν και να με υποστηρίζουν στις πιο δύσκολες στιγμές.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την αρραβωνιαστικιά μου Israela Souto, η οποία ποτέ δεν σταμάτησε να ονειρεύεται μαζί μου. Χωρίς την υποστήριξη της ξέρω ότι δεν θα μπορούσα να ολοκληρώσω αυτήν την φάση της ζωής μου.

Περιεχόμενο

1. Εισαγωγή	11
1.1 - Ενεργειακό Πρόβλημα και οι Κυψέλες Καυσίμου.....	12
1.2 - Το Υδρογόνου ως Καυσίμου	13
1.3 - Οικονομία του Υδρογόνου	15
2. Γενικά περί της Κυψέλης Καυσίμου	17
2.1 - Ιστορική Αναδρομή	18
2.2 - Αρχές Λειτουργίας.....	20
2.3 - Κατασκευαστικά Στοιχεία	22
2.3.1 - Ηλεκτρολύτης	22
2.3.2 - Ηλεκτρόδια/καταλύτης	23
2.3.3 - Στρώμα Διάχυσης Αερίων (GDL)	25
2.3.4 - Διπολικές Πλάκες.....	25
2.4 - Σύστημα Κυψέλης Καυσίμου.....	27
2.4.1 - Συστοιχία Κυψέλης Καυσίμου	27
2.4.2 - Μονάδα Διανομής Ενέργειας	29
2.4.3 - Μονάδα Επεξεργασία Καυσίμου	29
2.4.4 - Μονάδα Ελέγχου.....	29
2.5 - Εφαρμογές	30
2.5.1 - Μέσα Μεταφοράς.....	30
2.5.2 - Στατική Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	31
2.5.3 - Ηλεκτρονικά Φορητά	32
2.6 - Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	33
3. Τύποι Κυψέλης Καυσίμου	35
3.1 - Αλκαλική Κυψέλη Καυσίμου (AFC)	37
3.1.1 - Βασικές Αρχές Λειτουργίας	37
3.1.2 - Αποδοτικότητα(επίδραση πίεσης/θερμοκρασίας).....	39
3.2 - Κυψέλη Καυσίμου Πολυμερών Ηλεκτρολυτών (PEMFC).....	41
3.2.1 - Βασικές Αρχές Λειτουργίας	42

3.2.2 - Αποδοτικότητα(επίδραση πίεσης/θερμοκρασίας)	43
3.3 - Κυψέλη Καυσίμου Άμεση Μεθανόλης (DMFC)	45
3.3.1 - Βασικές Αρχές Λειτουργίας	46
3.3.2 - Αποδοτικότητα(επίδραση πίεσης/θερμοκρασίας)	47
3.4 - Κυψέλη Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC)	47
3.4.1 - Βασικές Αρχές Λειτουργίας	48
3.4.2 - Αποδοτικότητα(επίδραση πίεσης/θερμοκρασίας)	50
3.5 - Κυψέλη Καυσίμου Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (MCFC)	52
3.5.1 - Βασικές Αρχές Λειτουργίας	53
3.5.2 - Αποδοτικότητα(επίδραση πίεσης/θερμοκρασίας)	54
3.6 - Κυψέλη Καυσίμου Στερεών Οξειδίων (SOFC)	56
3.6.1 - Βασικές Αρχές Λειτουργίας	58
3.6.2 - Αποδοτικότητα(επίδραση πίεσης/θερμοκρασίας)	59
4. Χρήση Κυψέλων Καυσίμου για Στατικές Εφαρμογές	61
4.1 -Γενικά	62
4.2 - Τεχνολογία Κατανεμημένης Παραγωγής και Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (Distributed Generation and Combined Heat & Power).....	62
4.3 - Χρήση Κυψέλων Καυσίμου για Κατανεμημένη Παραγωγή.....	64
4.3.1 -Χρήση των Κυψελών Καυσίμου Πολυμερών Ηλεκτρολυτών (PEMFC).....	65
4.3.2 - Χρήση των Κυψελών Καυσίμου Τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC).....	66
4.3.3 - Χρήση των Κυψελών Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC)	67
4.3.4 - Χρήση των Κυψελών Καυσίμου Στερεών Οξειδίων (SOFC)	68
4.4 -Χρήση Κυψέλων Καυσίμων για Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας.....	69
4.4.1 - Ψύκτες Απορρόφησης σε Ένα Σύστημα Κυψέλης Καυσίμου για ΣΗΘ.....	70
4.4.2 - Ψύκτες Απορρόφησης σε Σχέση με τους Ηλεκτρικούς Ψυκτές	74
4.5 - Χρήση Ηλεκτρονικών Μετατροπών Ισχύος στα Συστήματα Κυψελών Καυσίμου ...	75
5. Μοντελοποίηση Κυψέλων Καυσίμου και Προσομοιώσεις για Στατικές Εφαρμογές	78
5.1 - Μαθηματικό Μοντέλο Μίας Κυψέλης Καυσίμου.....	79

5.2 - Μοντελοποίηση Κυψέλη Καυσίμου τύπου PAFC στην πλαταφόρμα SIMULINK/MATLAB	85
5.2.1 - Προσομοίωση Σύστημα PAFC	92
5.3 - Μοντελοποίηση Κυψέλη Καυσίμου τύπου SOFC στην πλαταφόρμα SIMULINK/MATLAB	96
5.3.1 - Προσομοίωση Σύστημα SOFC των 200kW	100
 Βιβλιογραφία	 104

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

1.1 – Ενεργειακό Πρόβλημα και οι Κυψέλες Καυσίμου

Οι μεγαλύτερες ανησυχίες της ανθρωπότητας που βρίσκονται καθημερινά σε ειδήσεις και εφημερίδες σήμερα σχετίζονται με την ενεργειακή κρίση, η οποία έχει γίνει ένα σοβαρό πρόβλημα σε όλον κόσμο. Μία από αυτές τις ανησυχίες, είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, διότι αν δεν μειωθούν οι εκπομπές τοξικών αερίων απότομα, υπάρχει μία μεγάλη πιθανότητα ο κόσμος να γίνει ακατοίκητος στα επόμενα χρόνια.

Ένας άλλος παράγοντας που σχετίζεται με την ενεργειακή κρίση, είναι η έλλειψη των ορυκτών καυσίμων σε πολλά μέρη του κόσμου, που έχει αποτέλεσμα την αύξηση των τιμών αυτών των καυσίμων. Οι ερευνητές πιστεύουν ότι τα αποθέματα πετρελαίου στον κόσμο θα είναι λιγιστά σε 30 ή 40 χρόνια. Συνεπώς, οι ίδιες εταιρείες παραγωγής πετρελαίου επενδύουν ήδη σε άλλες πηγές ενέργειας, ή προετοιμάζονται για μια νέα εποχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Μια πιθανή τεχνολογική λύση στο ενεργειακό πρόβλημα είναι οι κυψέλες καυσίμου, οι οποίες έχουν ήδη εφαρμοστεί σε διάφορους βιομηχανικούς και ενεργειακούς τομείς (ηλεκτρονικά, φορητούς υπολογιστές, αυτοκίνητα, σταθμός παραγωγής ενέργειας).

Η εφαρμογή της κυψέλης καυσίμου δεν έχει φτάσει ακόμη στα όρια της. Η σημαντική χρησιμότητα είτε στον ενεργειακό είτε στον ηλεκτρονικό τομέα σήμερα, προκαλεί τις μεγάλες εταιρίες να επενδύσουν σε αυτήν την τεχνολογία όσο περισσότερο διότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε χρειάζεται ηλεκτρική ενέργεια.

Ένας τομέας στον οποίο έχει γίνει αρκετή έρευνα πάνω στις κυψέλες καυσίμου είναι η βιομηχανία οχημάτων, μέχρι αυτή τη στιγμή όλες οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν κατασκευάσει μοντέλα ηλεκτρικών ή και υβριδικών. Στον ενεργειακό τομέα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή ενέργειας για οικίες και βιομηχανίες ως βοηθητικές πηγές ενέργειας, αντί για τις γεννήτριες που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Η κυψέλη καυσίμου έχει στοιχεία και χαρακτηριστικά παρόμοια με ένα τυπικό συσσωρευτή, όμως υπάρχουν μεγάλες διαφορές. Η μπαταρία είναι μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας. Η μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια προσδιορίζεται από την ποσότητα του χημικού αντιδραστηρίου που είναι αποθηκευμένο εντός της μπαταρίας. Η μπαταρία θα σταματήσει να παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν τα χημικά αντιδραστήρια καταναλωθούν πλήρως (εκκένωση). Η κυψέλη καυσίμου, από την άλλη πλευρά, είναι μια συσκευή μετατροπής ενέργειας που έχει τη δυνατότητα να παράγει ηλεκτρική ενέργεια για όσο τα ηλεκτρόδια τροφοδοτούνται με καύσιμο και οξειδωτικό.

1.2 - Το Υδρογόνο ως Καύσιμο

Το υδρογόνο που παράγεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι σύμφωνα με τους περιβαλλοντολόγους το ιδανικό καύσιμο αφού δεν υπάρχει περιβαλλοντικό κόστος στην παραγωγή και χρήση του υδρογόνου, όταν χρησιμοποιείται αιολική ή ηλιακή ενέργεια. Η μόνη έκλυση ρύπων υπάρχει κατά την κατασκευή, μεταφορά και εγκατάσταση των τεχνολογιών μετατροπής της αιολικής (ανεμογεννήτριες) ή ηλιακής (Φ/Β) ενέργειας και ίσως της ενέργειας για την μεταφορά του υδρογόνου. Επίσης το υδρογόνο δεν βλάπτει το περιβάλλον ούτε επηρεάζει το στρώμα του όζοντος, ενώ τα προϊόντα της καύσης του, δεν περιέχουν σωματίδια (αιθάλη) ή CO₂.

Η παραγωγή, μεταφορά και χρήση ενέργειας ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Έχουν γίνει προσπάθειες στο παρελθόν να αποτιμηθεί η αξία αυτής της ρύπανσης, κυρίως με κόστη που πληρώνονται έμμεσα, όπως έξοδα νοσηλείας, ασφάλισης. Το κόστος του CO₂ στην κλιματική μεταβολή εκτιμάται σε 25 δις \$ το έτος και το περιβαλλοντικό κόστος από την άντληση, μεταφορά και διαρροή πετρελαίου σε 9 δις \$ ανά έτος. Άμεσα κόστη νοσοκομειακής περίθαλψης στις ΗΠΑ, άμεσα σχετιζόμενης με τη ρύπανση του περιβάλλοντος, ανέρχεται σε 20 έως 50 δις \$ ανά έτος. Συμπερασματικά, το εξωτερικό κόστος της ενέργειας πρέπει παγκόσμια να ανέρχεται σε εκατοντάδες δις \$ ανά έτος, πράγμα το οποίο αποκτά και πολιτική σημασία.

Η παραγωγή και χρήση υδρογόνου από ΑΠΕ θα οδηγούσε σε σημαντική μείωση αυτού του κόστους. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για αναπτυσσόμενες

οικονομίες, όπως αυτή της Βραζιλίας ή της Ινδίας, όπου εάν κάποια στιγμή φτάσουν το βιοτικό επίπεδο και την κατά κεφαλήν παραγωγή CO₂ των προηγμένων κρατών, τότε όποια οφέλη από τα μέτρα μείωσης του CO₂ (Κιότο) θα ανατραπούν πλήρως.

Πρακτικά, οι μοναδικοί ενεργειακοί φορείς που μπορούν συνεργαζόμενοι να ικανοποιήσουν όλες τις ανάγκες των καταναλωτών ενέργειας, χωρίς η χρήση τους να εμπλέκει καύση άνθρακα, είναι ο ηλεκτρισμός και το υδρογόνο. Όσον αφορά τους τομείς στους οποίους θα κυριαρχήσει καθένας από αυτούς τους ενεργειακούς φορείς, αναμένεται ότι ο ηλεκτρισμός θα διατηρήσει τα πεδία στα οποία ήδη εφαρμόζεται, δηλαδή φωτισμό, πληροφορική και τηλεπικοινωνίες, ενώ το υδρογόνο θα χρησιμοποιηθεί σε τομείς εφαρμογών των υγρών καυσίμων (μεταφορές, θέρμανση κτλ). Σε πολλές περιπτώσεις όμως, η επιλογή του καταλληλότερου ενεργειακού φορέα θα γίνεται με βάση ειδικές συνθήκες που επικρατούν στην κάθε περιοχή (π.χ ύπαρξη ή όχι δικτύου ηλεκτροδότησης, κόστος συντήρησης του κ.α.).

Παραγωγή Υδρογόνου

Το υδρογόνο αποτελεί το 90% του σύμπαντος και είναι το ελαφρύτερο αέριο στη φύση. Στη γη, βρίσκεται κυρίως σε ενώσεις όπως το νερό, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και αλλού. Για να παραχθεί υδρογόνο απαιτείται ενέργεια, άρα το υδρογόνο δεν είναι πηγή ενέργειας (μιας και δεν υπάρχει ελεύθερο στη φύση), αλλά είναι φορέας ενέργειας.

Η παραγωγή υδρογόνου απαιτεί πρώτες ύλες τροφοδοσίας (feedstock) (όπως υδρογονάνθρακες και νερό) και ενέργεια. Το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή υδρογόνου είναι πάντοτε μεγαλύτερο από το ποσό της ενέργειας που προκύπτει από την χρήση του. Σήμερα το υδρογόνο κυρίως παράγεται ορυκτά καύσιμα (κυρίως φυσικό αέριο και δευτερευόντως από diesel και λιθάνθρακα). Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του υδρογόνου συμπεριλαμβάνουν:

- I. την αναμόρφωση του φυσικού αερίου με ατμό
- II. μερική οξείδωση υδρογονανθράκων
- III. αεριοποίηση λιθανθράκων
- IV. αεριοποίηση βιομάζας
- V. ηλεκτρόλυση του νερού

Παρόλα αυτά, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αυτές οι τεχνολογίες δεν είναι προς την κατεύθυνση της απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και δεν μειώνουν τις εκπομπές CO₂. Η μόνη μέθοδος η οποία παράγει υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα χωρίς την συμπαραγωγή CO₂ είναι η απευθείας θερμική (και καταλυτική) διάσπαση των υδρογονανθράκων. Η μέθοδος αυτή βρίσκεται σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης με πενιχρά αποτελέσματα μέχρι στιγμής μόνο σε εργαστηριακό επίπεδο

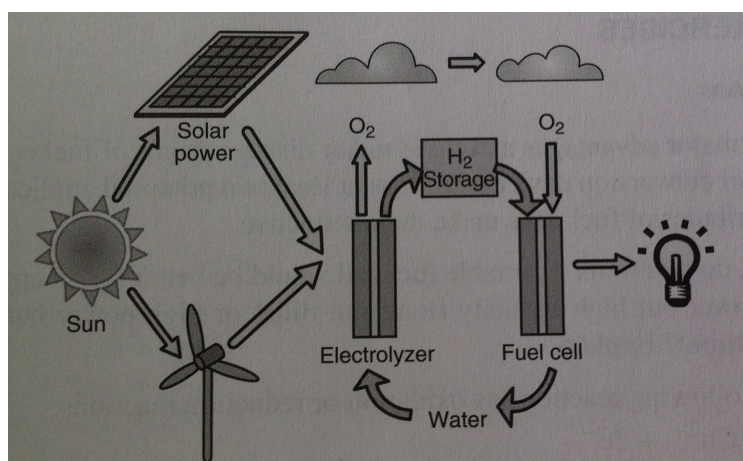
1.3 – Οικονομία του υδρογόνου [1]

Οι κυψέλες καυσίμου, αν χρησιμοποιηθούν σωστά, είναι πολύ φιλικά προς το περιβάλλον. Βεβαίως, αυτό μπορεί να είναι το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους σε σχέση με άλλες τεχνολογίες μετατροπής ενέργειας. Ωστόσο, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κυψελών καυσίμου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πλαίσιο της χρήσης τους. Αν δεν αναπτυχθούν σοφά, οι κυψέλες καυσίμου δεν μπορούν να είναι καλύτερη από τον τρέχον σύστημα μετατροπής ενέργειας (ορυκτά).

Στο σχήμα 1-1 δειχνεί ένα μέλλον που όλα έχουν σχέση με κυψέλες καυσίμου, αυτό το μέλλον λέγεται «Οικονομία του υδρογόνου» όπου οι κυψελές καυσίμου συζεύγνυνται με ηλεκτρολύτες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για να εξασφαλίζουν ένα τέλειο σύστημα παραγωγής/κατανάλωσης ενέργειας χωρίς καμία ρύπανση του περιβάλλοντος. Σε ένα τέτοιο σύστημα, οι κυψέλες καυσίμου έχουν πολύ μεγάλο ρόλο. Όταν ο ήλιος είναι λάμπει ή ο άνεμος φυσάει, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την ηλιακή και αιολική ενέργεια θα χρησιμοποιηθεί για να φορτίσει τις πόλεις άμεσα, ενώ παράγεται επιπλέον υδρογόνο. Αν ο άνεμος σταματήσει ή γίνει μία κοπή ρεύματος, οι κυψέλες καυσίμου θα μπορούσαν να παράγουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για μία ζήτηση φορτίου μετατρέποντας το αποθηκευμένο υδρογόνο σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε ένα τέτοιο σύστημα, τα ορυκτά καύσιμα είναι τελείως άχρηστα.

Σήμερα, δεν μπορούμε να ορίσουμε το πότε «η οικονομία του υδρογόνου» θα γίνει μία πραγματικότητα. Διάφορες μελέτες έχουν εξετάσει τα τεχνικά και οικονομικά εμπόδια που στέκονται στο δρόμο της οικονομίας του υδρογόνου, πολλές από αυτές όμως, διαφέρουν σε λεπτομέρειες.

Είναι σαφές ότι η μετάβαση προς μια οικονομία του υδρογόνου θα είναι δύσκολο δαπανηρά και χρονοβόρα. Δεν μπορούμε να υπολογίζουμε αν θα συμβεί σύντομα διότι όλος ο κόσμος ακόμη χρησιμοποιεί τα ορυκτά καύσιμα ως η πιο σημαντική πηγή για την παραγωγή ενέργειας. Όμως, πρέπει να συνειδητοποιήσουμε ότι οι κυψέλες καυσίμου θα μπορούσαν να φέρνουν αυξημένη αποτελεσματικότητα, μεγαλύτερη ευελιξία, μειωμένες εκπομπές CO₂, καθώς και άλλα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 1-1: Οικονομία του υδρογόνου

Ο Στόχος για τα επόμενα χρόνια και την επίτευξη της εδραίωσης της οικονομίας του υδρογόνου είναι η αποκλειστική παραγωγή του H₂ μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Κεφάλαιο 2
*Γενικά περί της κυψέλης
καυσίμου*

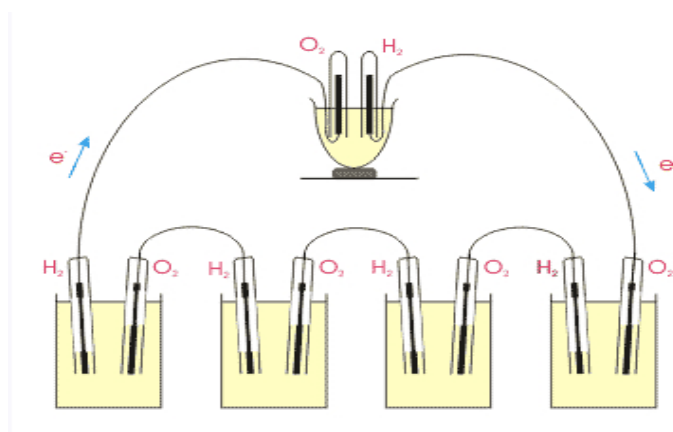
Κεφάλαιο 2 - Γενικά περί της κυψέλης καυσίμου

2.1 - Ιστορική αναδρομή

Παρόλο που βλέπουμε την τεχνολογία της κυψέλης καυσίμου συνεχώς στις σύγχρονες τεχνολογίες, η αρχή λειτουργίας της ανακαλύφθηκε πριν από 150 χρόνια. Στην πραγματικότητα, η ιστορία των κυψελών καυσίμου ξεκίνησε το 1839 μέσω ενός βρετανού δικηγόρου/επιστήμονα Robert William Grove (1811-1896).

Με απλά πειράματα, Robert Grove διαπίστωσε ότι η ηλεκτρόλυση του νερού σε αραιό θειικό οξύ ήταν αναστρέψιμη, δηλαδή, χρησιμοποιώντας δύο ηλεκτρόδια πλατίνας ημιβυθισμένο σε ένα υδατικό όξινο διάλυμα, και το υπόλοιπο απομονωμένο χωριστά σε δύο δεξαμενές που περιέχουν οξυγόνο και υδρογόνο, Grove μπόρεσε να παρατηρήσει ότι το σύστημα παράγει ηλεκτρική ενέργεια [2].

Επιπλέον, διαπιστώσε ο Grove ότι με συνδυασμό εν σειρά πολλών κυττάρων θα μπορούσε να παράγει αρκετό ηλεκτρικό ρεύμα για να κάνει την ηλεκτρόλυση του νερού.



Σχήμα 2-1 : Δομή κυψέλης καυσίμου του Grove

Ως συμπέρασμα, Grove όρισε την συσκευή αυτή σαν μία μπαταρία αερίου που μετά ορίστηκε ως η πρώτη κυψέλη καυσίμου.

Το 1889, χημικός Ludwig Mond (1839-1909) και τον βοηθό του Langer που περιέγραψαν τις εμπειρίες τους με μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου / οξυγόνου που παράγει μια πυκνότητα ρεύματος από 6A ανά τετραγωνικό πόδι του ηλεκτροδίου σε 0,73 V.

Σε αυτή την περιγραφή, Mond και Langer, βρήκαν αρκετά προβλήματα όταν χρησιμοποιούσαν υγρά ηλεκτρολύτες, αναφέροντας ότι είχαν περισσότερες επιτυχίες όταν χρησιμοποιούσαν ηλεκτρολύτη σε ημιστερεά. Ένα παράδειγμα του ηλεκτρολύτη αυτού είναι ένα πήλινο πιάτο εμποτισμένο με αραιό θειικό οξύ.

Το 1893, Friedrich Wilhelm Ostwald (1853-1932), ένας από τους ιδρυτές επιστημονικής έννοιας Φυσική και Χημεία, ανέπτυξε την μεγαλύτερο κομμάτι της θεωρίας της αρχής λειτουργίας των κυψελών καυσίμου. Ostwald, από την πρωτοποριακή εργασία σχετίσε τις φυσικές ιδιότητες με χημικές αντιδράσεις, λύνοντας το γρίφο που παρουσίασε ο Grove. Τα ευρήματά του στο πλαίσιο της επιστημής της κυψέλης καυσίμου βοήθησε ως βάση για μελλοντικά πειράματα.

Μετά το 1920, το ηλεκτρόδιο διάχυσης αερίου αναγνωρίστηκε ως το κλειδί για την επιτυχή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε χαμηλές θερμοκρασίες. Schmid ήταν πρωτοπόρος στην ανάπτυξη του πρώτου σωληνωτού ηλεκτροδίου με υδρογόνου και πορώδη άνθρακα εμποτισμένο σε πλατίνα. Από τη στιγμή αυτή, οι πραγματικές κυψέλες καυσίμου άρχισαν να κατασκευάζονται από ένα συνδυασμό αυτού του τύπου ηλεκτροδίου με ένα παρόμοιο σωληνωτού, όμως με αέρα (οξειδωση).

Στο Ηνωμένο Βασίλειο, ο Francis Bacon Thomas (1904-1992) διερεύνησε το σύστημα των αλκαλικών κυψελών καυσίμου με μεταλλικά ηλεκτρόδια (AFC). Ως συμπέρασμα των πειραμάτων του, ο χώρος που διατίθεται για την αντίδραση έγινε πολύ υψηλότερο. Το σύστημα αυτό λειτουργούσε ως πρότυπο για τις κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούντουσαν στο διαστημικό πρόγραμμα Gemini και Apollo (NASA), τα οποία βοήθησαν τον άνθρωπο να φτάσει στο φεγγάρι το 1968. Σε σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας, οι κυψέλες καυσίμου διαθέτησαν την καλύτερη πυκνότητα ρευματος (kWh / kg), με ειδική ισχύ αποδεκτή (kW / kg).

Στη δεκαετία του 1970 υπήρχε ένα πολύ μεγάλο ενδιαφέρον για την έρευνα των κυψελών καυσίμου. Το αλκαλικό σύστημα, που έφτασε σε ένα μέγιστο επίπεδο ανάπτυξης κατά τη διάρκεια των προγραμμάτων διαστημικών, αντικαταστάθηκε από το σύστημα οξέος-φωσφορικού (PAFC), η οποία ήταν πιο κατάλληλο για συστήματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι προσπάθειες για την ανάπτυξη συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ήταν περισσότερο εμφανής στην Ιαπωνία, μετά από μια πτώση του ενδιαφέροντος στις ΗΠΑ.

Ωστόσο, οι δεκαετίες του 80 και 90, λόγω της καλύτερης απόδοσης του και τη δυνατότητα συμπαραγωγής θερμότητας (υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας), τα συστήματα ανάπτυξης σε οι κυψέλες τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC) επιταχύνθηκε. Δυστυχώς, ο χαμηλός χρόνος ζωής οδήγησε σε άλυτα προβλήματα για αυτούς τους τύπους των κυψελών καυσίμου.

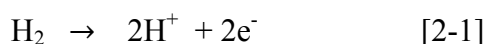
Επίσης το 90, το σύστημα των κυψελών καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) επανεμφανίστηκε στους επιστημονικούς χώρους. Το σύστημα αυτό υπάρχει από το 1960, αλλά δεν είχε αναμενόμενα αποτελέσματα και δεν εφαρμόστηκε στα διαστημικά προγράμματα.

2.2 – Αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου

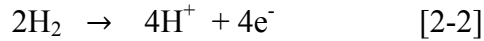
Παρόλο που υπάρχουν αρκετοί τύποι κυψελών καυσίμου, όμως όλες έχουν περίπου την ίδια αρχή λειτουργίας. Έτσι λοιπόν θα δειχτεί η βασική αρχή της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) η οποία χρησιμοποιείται και αναπτύσσεται περισσότερο σε μελέτες σε όλον τον κόσμο.

Μία κυψέλη καυσίμου αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια (άναδο και κάθοδο), και από έναν ηλεκτρολύτη στην μέση. Το στρώμα της άνοδου και της κάθοδου αποτελείται από το στρώμα διάχυσης των αερίων, το οποίο είναι υπεύθυνο για την ομοιόμορφη κατανομή των αερίων στην επιφάνεια του καταλύτη. Ο καταλύτης ένα στρώμα από πλατίνα ή παλλάδιο το οποίο εναποτίθεται πάνω στις δύο πλευρές του ηλεκτρολύτη.

Λοιπόν, όταν το συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο εισέρχεται στην άνοδου (αρνητικός ακροδέκτης) της κυψέλης καυσίμου, περνά διαμέσου της πλάκας ροής αερίων και φτάνει τον καταλύτη, ο οποίος διαχωρίζει το μόριο του υδρογόνου (H_2) σε θετικά ιόντα (H^+), τα οποία ονομάζονται επίσης πρωτόνια, και ηλεκτρόνια (e^-). Δηλαδή, έχουμε:



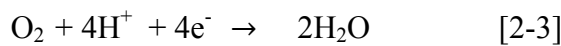
Όμως, για κάθε μόριο του οξυγόνου (O_2) χρειάζεται πα δύο μόρια H_2 για να σχηματίσουμε το μόριο του νερού (H_2O). Οπότε η αντίδραση του υδρογόνου θα παρουσιαστεί διπλάσια:



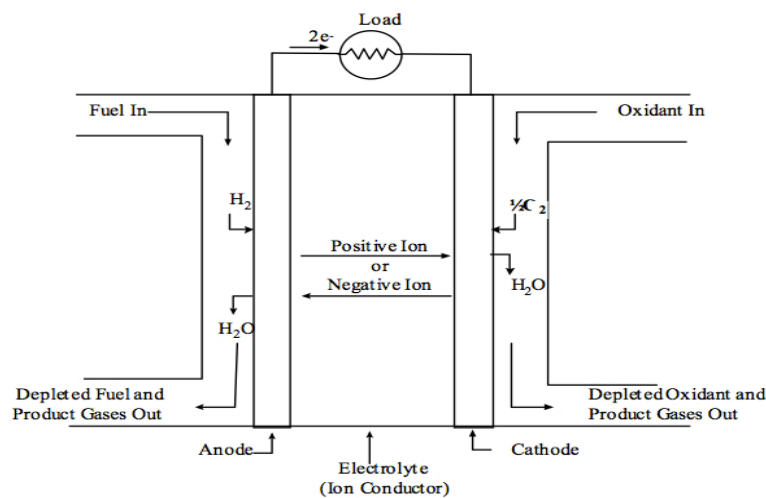
Έτσι, τα ηλεκτρόνια (e^-) οδηγούνται από το ηλεκτρόδιο, περνώντας από το εξωτερικό κύκλωμα και σχηματίζει ένα ηλεκτρικό ρεύμα προς τον αρνητικό ακροδέκτη (άνοδος) με την κάθοδο (θετικό). Αυτό είναι το ρεύμα που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην κατάλληλη εφαρμογή.

Ενώ, τα μόρια του υδρογόνου (H_2) που δεν είναι σπασμένα από καταλύτες θα επανατροφοδοτηθούν στον και μέρη να διασπαστούν σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια (H^+ και e^-).

Σε αντίθετη πλευρά της κυψέλης καυσίμου (κάθοδος) είναι το αέριο οξυγόνο που αντλείται μέρη να φτάσει στον καταλύτη στον οποίο βρίσκεται ο ηλεκτρολύτης. Στη συνέχεια, το μόριο του οξυγόνου (O_2) συνδυάζεται με τα πρωτόνια υδρογόνου (H^+), που έχουν διασχίσει στη μεμβράνη (ηλεκτρολύτης), και με τα ηλεκτρόνια που φτάνουν στο θετικό (κάθοδος). Σχηματίζοντας έτσι το νερό, σύμφωνα με η ακόλουθη εξίσωση:



Στο σχήμα 2-2, δείχνουμε λεπτομερώς την βασική λειτουργία μίας κυψέλης καυσίμου.



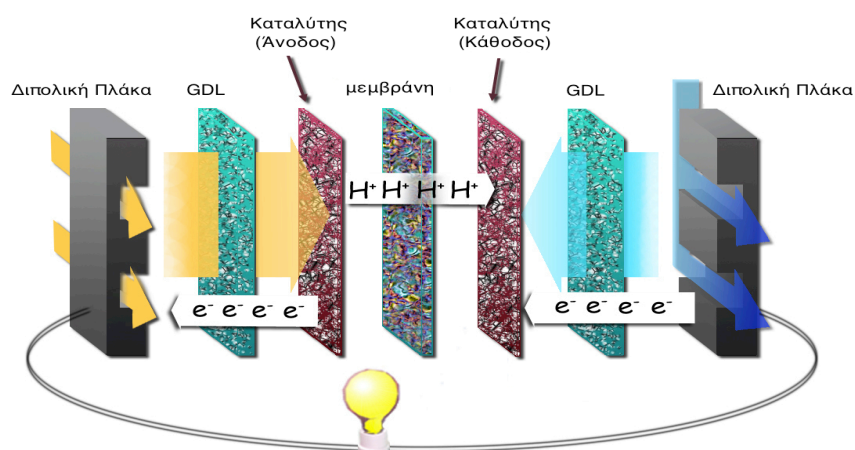
Σχήμα 2-2: Αρχή Λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

2.3- Κατασκευαστικά στοιχεία κυψέλης καυσίμου

Τα κυριότερα μέρη της δομής μιας κυψέλης καυσίμου είναι τα εξής:

- ηλεκτρολύτης
- καταλύτης/ηλεκτρόδια
- στρώμα διάχυσης αερίων (Gass Diffusion Layer - G.D.L.)
- διπολικές πλάκες

Κάθε άκρο της κυψέλης καυσίμου έχει ένα ηλεκτρόδιο (άνοδος και κάθοδος), ο ηλεκτρολύτης επικαλύπτεται από τον καταλύτη. Οι καταλύτες μπορούν να είναι είτε πλατίνα είτε νικέλιο [3].



Σχήμα 2-2: Δομή Κυψέλης Καυσίμου

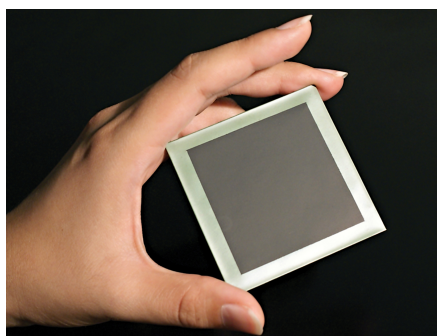
2.3.1 – Ηλεκτρολύτης

Είναι ένας μη μεταλλικός αγωγός του ηλεκτρισμού, μέσα στον οποίο γίνεται μεταφορά ρεύματος από την κίνηση ιόντων. Πρόκειται στην ουσία για μια πολυμερή μεμβράνη, της οποίας βασικός ρόλος είναι να επιτρέπει τη διέλευση ιόντων μέσα από το εσωτερικό της. Για το λόγο αυτό πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή ιοντική αγωγιμότητα. Ταυτόχρονα, εμποδίζει τη διέλευση ηλεκτρονίων περιορίζοντας τις απώλειες της κυψέλης. Σε περίπτωση που επιτραπεί η διέλευση ηλεκτρονίων μέσα από τον ηλεκτρολύτη η ομαλή λειτουργία της κυψέλης διακόπτεται λόγω φαινομένων βραχυκύκλωσης. Τέλος, παρ'ότι λεπτή, η μεμβράνη αποτελεί σχετικά δυνατή και

σταθερή ουσία, λειτουργώντας αποτελεσματικά σαν απομονωτής αερίων. Έτσι, επιτυγχάνει το διαχωρισμό με φυσικό τρόπο του καυσίμου από το οξειδωτικό μέσο, αποτρέποντας ενδεχόμενη απευθείας αντίδρασή τους.

Η μεμβράνη του ηλεκτρολύτη είναι και το στοιχείο που προσδιορίζει της συνθήκες λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου. Η θερμοκρασία λειτουργίας σχετίζεται άμεσα με τη φύση του ηλεκτρολύτη, καθώς σε υψηλές τιμές της υπάρχει ενδεχόμενο αλλοίωσης της δομής του, ανάλογα με το είδος που χρησιμοποιείται. Για το λόγο αυτό, αναγκαζόμαστε σε μερικές περιπτώσεις κυψελών να χρησιμοποιήσουμε ακριβούς ηλεκτρολύτες για την επαρκή κατάλυση των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό τους, αυξάνοντας έτσι και το κόστος λειτουργίας.

Το πάχος της μεμβράνης μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τον τύπο της. Το είδος του ηλεκτρολύτη είναι και αυτό που καθορίζει και τον τύπο μιας κυψέλης καυσίμου.



Εικόνα 2-1: Μεμβράνη Κυψέλης Καυσίμου SOFC (Στερεού Οξειδίου)

2.3.2 - Ηλεκτρόδια/Καταλύτης

Είναι το μέρος της κυψέλης όπου γίνεται η μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Τα ηλεκτρόδια είναι δύο, η άνοδος και η κάθοδος.

- *Άνοδος*: Το ηλεκτρόδιο της ανόδου αποτελεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο της διάταξης. Ερχόμενο σε επαφή με το υδρογόνο προκαλεί το διαχωρισμό του σε κατιόντα και ηλεκτρόνια, τα οποία και οδηγεί στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, προκαλώντας τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος.

- *Κάθοδος*: Το ηλεκτρόδιο της καθόδου αποτελεί το θετικό ηλεκτρόδιο της διάταξης. Σε αυτό πραγματοποιείται η αντίδραση των ηλεκτρονίων που προέρχονται από το εξωτερικό κύκλωμα με το οξυγόνο και τα κατιόντα υδρογόνου που κινούνται μέσω της μεμβράνης από την άνοδο προς την κάθοδο για την παραγωγή νερού.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε την ανάγκη τα ηλεκτρόδια να είναι διαπερατά από τα αέρια μόρια, τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια, ώστε να πραγματοποιηθούν οι παραπάνω αντιδράσεις και να δημιουργηθεί το ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του εξωτερικού κυκλώματος.

Η ταχύτητα των παραπάνω αντιδράσεων είναι αποφασιστικής σημασίας για τη λειτουργία και την απόδοση της κυψέλης καυσίμου και σχετίζεται με την ενεργό επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Έτσι, πορώδη ηλεκτρόδια αυξάνουν την ενεργό επιφάνειά τους και κατ' επέκταση την ταχύτητα με την οποία λαμβάνουν χώρα οι παραπάνω αντιδράσεις.

Πέραν της αύξησης της επιφάνειας των ηλεκτροδίων, άλλες μέθοδοι για την αύξηση του ρυθμού των αντιδράσεων είναι η αύξηση της θερμοκρασίας και η προσθήκη καταλυτικών επενδύσεων επί των ηλεκτροδίων. Οι τελευταίες μειώνουν την απαιτούμενη ενέργεια ενεργοποίησης, επιτρέποντας στις αντιδράσεις να πραγματοποιηθούν ταχύτερα ή σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Ο καταλύτης προστίθεται στη διάταξη σαν μια λεπτή στρώση, η οποία εναποτίθεται στην πλευρά των ηλεκτροδίων που βλέπει προς την πλευρά του ηλεκτρολύτη. Είναι σκληρός και πορώδης ώστε η μέγιστη επιφάνεια του να μπορεί να εκτεθεί στο υδρογόνο και το οξυγόνο, τα οποία διασκορπίζονται προς αυτόν ομοιόμορφα χάρη σε κανάλια χαραγμένα επί των ηλεκτροδίων. Ο καταλύτης που λειτουργεί καλύτερα σε άνοδο και κάθοδο είναι η πλατίνα (Pt), μέταλλο πολύ ακριβό, καθώς έχει την ιδιότητα να διασπά τόσο το υδρογόνο όσο και το οξυγόνο. Ακόμη χρησιμοποιείται και ρουθίνιο (Ru). Ο καταλύτης δεν καταναλώνεται, καθώς μετά την εκάστοτε αντίδραση μπορεί να ανακτηθεί από το αντιδρούν μίγμα χημικά αμετάβλητος.

2.3.3 - Στρώμα Διάχυσης Αερίων (Gass Diffusion Layer - G.D.L.)

Το στρώμα διάχυσης αερίων, για την ακρίβεια τα στρώματα διάχυσης αερίων, κατασκευάζονται από υλικά με βάση τον άνθρακα, τα οποία μπορούν να άγουν τα ηλεκτρόνια που εξέρχονται από την άνοδο και εισέρχονται στην κάθοδο. Μπορούν να αποτελούν μέρος του ηλεκτροδίου ή να είναι ξεχωριστό στρώμα. Τοποθετούνται δίπλα στην άνοδο και την κάθοδο. Η πορώδης φύση των υλικών τους εξασφαλίζει αποτελεσματική διάχυση κάθε αντιδρώντος αερίου στον καταλύτη, με κατεύθυνση της κίνησής του από μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης, δηλαδή την εξωτερική μεριά του στρώματος, προς μια περιοχή χαμηλής συγκέντρωσης, δηλαδή την εσωτερική μεριά του στρώματος που βρίσκεται δίπλα στο στρώμα του καταλύτη και όπου το αέριο καταναλώνεται κατά την αντίδραση.

Σκοπός του στρώματος διάχυσης αερίων είναι η μεγιστοποίηση του ρεύματος που μπορεί να παραχθεί από τη διάταξη ηλεκτρολύτη- ηλεκτροδίων. Ακόμη, δημιουργεί ηλεκτρική σύνδεση ανάμεσα σε καταλύτη και διπολικές πλάκες. Η πορώδης φύση του επιτρέπει στο αέριο να διασκορπιστεί ώστε όταν εισέλθει σε αυτό να είναι σε επαφή με ολόκληρη την επιφάνεια μεμβράνης-καταλύτη. Ακόμη, τα στρώματα διάχυσης βοηθούν στην αντιμετώπιση του παραγόμενου νερού κατά τη λειτουργία της κυψέλης, εξασφαλίζοντας την ποσότητα νερού που θα κρατήσει τη μεμβράνη σε κατάλληλες συνθήκες υγρασίας, αποτρέποντας παράλληλα «πλημμύρα» της κυψέλης από υπερβολική ποσότητα νερού.

2.3.4 – Διπολικές Πλάκες

Οι διπολικές πλάκες τοποθετούνται στην εξωτερική επιφάνεια κάθε στρώματος διάχυσης αερίων. Εξυπηρετούν σαν πεδίο ροής αερίων προς την κυψέλη αλλά και σαν συλλέκτης ρεύματος.

Σε μια απλή κυψέλη οι διπολικές πλάκες είναι το τελευταίο κατασκευαστικό μέρος της διάταξης. Κατασκευάζονται από ελαφρύ, σκληρό, αδιαπέραστο από αέρια και καλό αγωγό του ηλεκτρισμού υλικό. Γραφίτης ή μέταλλα χρησιμοποιούνται συχνά για την κατασκευή διπολικών πλακών, ενώ στις

μέρες μας αναπτύσσονται συνθετότερα υλικά.

Ο πρώτος ρόλος που εξυπηρετεί κάθε πλάκα είναι η παροχή πεδίου ροής αερίων. Κανάλια χαράσσονται στην πλαϊνή επιφάνεια κάθε πλάκας δίπλα στο στρώμα διάχυσης αερίων. Τα κανάλια μεταφέρουν το αντιδρών αέριο από το σημείο εισόδου του στην κυψέλη καυσίμου ως το σημείο απ' όπου θα εξέλθει. Το σχήμα των καναλιών καθώς και το πλάτος και το βάθος τους έχει μεγάλο αντίκτυπο στο κατά πόσο ομοιόμορφα τα αντιδρώντα αέρια θα εξαπλωθούν κατά μήκος της ενεργού περιοχής της διάταξης ηλεκτρολύτη-ηλεκτροδίων.

Συνήθως, η διπολική πλάκα της ανόδου έχει κατακόρυφα κανάλια για την παροχή υδρογόνου και η διπολική πλάκα της καθόδου παράλληλα κανάλια, απ' όπου εισέρχεται το οξυγόνο. Ακόμη, επηρεάζουν την παροχή νερού στη μεμβράνη καθώς και την αφαίρεση νερού από την κάθοδο.

Κάθε πλάκα λειτουργεί ακόμη και ως συλλέκτης ρεύματος. Ηλεκτρόνια που παράγονται κατά την οξείδωση του υδρογόνου πρέπει να οδηγηθούν κατά μήκος της ανόδου, μέσω του στρώματος διάχυσης και της πλάκας πριν εξέλθουν από την κυψέλη. Παράλληλα, πρέπει να «ταξιδέψουν» μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος και να εισέλθουν στην κυψέλη από το ηλεκτρόδιο της πλάκας καθόδου.

Οι διπολικές πλάκες χρησιμεύουν ακόμη στην εν σειρά σύνδεση πολλών κυψελών καυσίμου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας συστοιχίας κυψελών. Σε μια συστοιχία κυψελών, υδρογόνο εισέρχεται στα κανάλια της διπολικής πλάκας ανόδου κάθε κυψέλης και οξυγόνο στα κανάλια της διπολικής πλάκας καθόδου κάθε κυψέλης. Οι πλάκες συνδέουν ολόκληρη την επιφάνεια της καθόδου μιας κυψέλης με ολόκληρη την επιφάνεια της ανόδου της επόμενης. Τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται κατά την οξείδωση του υδρογόνου σε κάθε μία από τις επί μέρους κυψέλες δεν κινούνται προς την κάθοδο της, καθώς δεν υπάρχει εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα που να τις συνδέει. Αντιθέτως, κινούνται προς την ηλεκτρικά αγωγίμη διπολική πλάκα της προηγούμενης κυψέλης της συστοιχίας. Εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα επιτρέπει τη ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο της πρώτης κυψέλης της συστοιχίας προς την κάθοδο της τελευταίας.

Η ιδανική διπολική πλάκα πρέπει να είναι λεπτή για τον περιορισμό της ηλεκτρικής αντίστασης και του μεγέθους της κυψέλης. Ωστόσο, το γεγονός αυτό περιορίζει τη ροή των αερίων στα κανάλια και καθιστά δυσκολότερη την εισαγωγή τους στην κυψέλη.



Εικόνα 2-2: Διπολικές Πλάκες

Τέλος, οι διπολικές πλάκες διαθέτουν επιπλέον κανάλια για την εισαγωγή ψυκτικού υγρού. Το ψυκτικό αυτό υγρό χρησιμεύει στην απομάκρυνση θερμότητας από την περιοχή επαφής των διπολικών πλακών δύο κυψελών καυσίμου οι οποίες συνδέονται ώστε να σχηματίσουν μια συστοιχία.

2.4 – Σύστημα κυψέλης καυσίμου

Ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου ορίζεται κυρίως από 4 βασικές μονάδες:

- Συστοιχία Κυψέλης καυσίμου
- Μονάδα διανομής Ενέργειας
- Μονάδα Επεξεργασίας Καυσίμου
- Μονάδα Ελέγχου

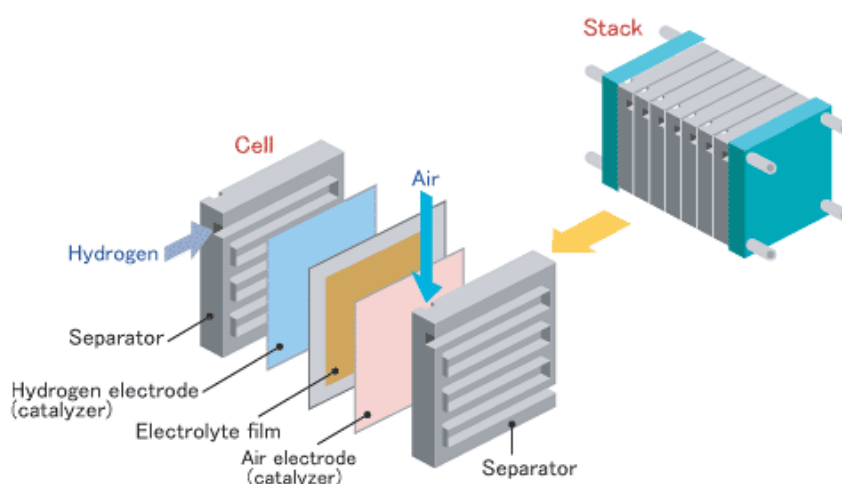
Αυτές τις 4 μονάδες έχουν την ευθύνη για την σωστή λειτουργία ενός συστήματος κυψέλης καυσίμου.

2.4.1 - Συστοιχία κυψέλης καυσίμου

Μια ιδανική κυψέλη καυσίμου είναι ικανή να παρέχει μια τάση περίπου 1,16V ανοικτού κυκλώματος (χωρίς διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος), όμως στην πράξη επειδή είναι αδύνατον να επιτευχθεί μια 100% απόδοση, φτάνει μία τάση περίπου 0,9V ανά μονάδα κυψελών καυσίμου. Δεδομένου ότι η τάση που παρέχεται από ένα μία μονάδα κυψέλης καυσίμου είναι πολύ χαμηλή για να

χρησιμοποιηθεί αυτήν την τάση σε διάφορες εφαρμογές, όπως σε ένα ηλεκτρικό κινητήρα ενός αυτοκινήτου, που απαιτούν τάσεις άνω των 200V, μπορούμε να συνδέσουμε εν σειρά πολλές κυψέλες ώστε να παράγουμε μία υψηλότερη τάση. Οι συνδέσεις πολλών κυψελών καυσίμου αποτελούν μία συστοιχία κυψέλης καυσίμου.

Για τη σύνδεση αρκετές μονάδες κυψελών καυσίμου, δεν αρκεί να τεθούν μία δίπλα στην άλλη, τότε η ανόδος και κάθοδος από διαφορετικές κυψέλες θα έπρεπε να ήταν επίσης μία δίπλα στην άλλη. Για να απογύγουμε αυτό, χρησιμοποιούμε διπολικές πλάκες, όπως ανέφεραμε προηγουμένως.



Σχήμα 2-3: Δεξιά δείχνει μία συστοιχία κυψέλης καυσίμου, αριστερά την δομή μία μονάδας κυψέλης καυσίμου

Μια συστοιχία κυψελών καυσίμου μπορεί να διαμορφωθεί με πολλές ομάδες κυψελών σε σειρά και παράλληλες συνδέσεις για την καλύτερη προσαρμογή της τάσης, ρεύματος, και της ισχύος. Ο αριθμός των ατομικών κυψελών που περιέχονται μέσα σε μία συστοιχία, συνήθως είναι μεγαλύτερη από 50 ανάλογα με το σχεδιασμό της συστοιχίας.

2.4.2 – Μονάδα διανομής ενέργειας

Ο διανομέας λαμβάνει ηλεκτρική ενέργεια από την μονάδα ισχύος και μεταδίδει σε εφαρμογή, για παράδειγμα, σε ένα ηλεκτρικό κινητήρα. Επιπλέον, μεταδίνει ενέργεια σε όλα τα στοιχεία του ίδιου του συστήματος κυψελών καυσίμου όπως οι ανεμιστήρες, συμπιεστές και όλων των περιφερειακών λαμβάνουν ηλεκτρική ενέργεια απευθείας από τον διανομέα. Σε μια αυτοκινητοβιομηχανές εφαρμογές, ο διανομέας έχει επίσης τη σημαντική λειτουργία της διαχείρισης της ενέργειας διαβιβάζονται στους υπερ-πυκνωτές, αυξάνοντας τις επιδόσεις του οχήματος.

2.4.3 – Μονάδα επεξεργασίας καυσίμου

Υπάρχουν δύο τρόπους για το καύσιμο να φτάσει στην μονάδα κυψελών καυσίμου: ο πρώτος και πιο εύκολος τρόπος είναι να κάνουμε την ένεση μέσα από ένα συμπιεστή το υδρογόνο αερίων και οξυγόνου στη μονάδα.

Ο δεύτερος τρόπος είναι να εισαγουμε φυσικά καύσιμα. Για αυτό χρειαζόμαστε ένα επεξεργαστή για την εξαγωγή υδρογόνου και ένα καθαριστή που θα αφαιρέσει τις προσμείξεις από το υδρογόνο ώστε να φτάσει στον συμπιεστή καθαρό υδρογόνο.

2.4.4 – Μονάδα ελεγχού

Η μονάδα ελέγχου έχει την εύθυνη να παρακολουθήσει όλο το σύστημα κυψελών καυσίμου. Αυτή η μονάδα διαχειρίζεται τις πληροφορίες από όλα τα στοιχεία του συστήματος για τη σωστή λήψη εντολών, όπως η παροχή ενέργειας για την καλή λειτουργία της μονάδας.



Εικόνα 2-3: Σύστημα Κυψέλης Καυσίμου του Ballard Systems

2.5 – Εφαρμογές

Σταδιακά, οι κυψέλες καυσίμου κερδίζουν χώρο σε παγκοσμιακό σενάριο. Διάφορες εφαρμογές είναι πολύ γνωστές και είναι ήδη στο εμπόριο της νέας τεχνολογίας, ενώ κάποιες άλλες είναι σε δοκιμαστική φάση.

Ανάμεσα στις κυριότερες εφαρμογές με τη χρήση των κυψελών καυσίμου, επισημάνουμε την μέσα μεταφοράς, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και φορητές εφαρμογές

2.5.1 – Μέσα Μεταφοράς

Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιούνται ευρέως στον τομέα της μεταφοράς, είτε δια ξηράς, θαλάσσης ή αέρος, σε εφαρμογές όπως τα αυτοκίνητα, τις μοτοσυκλέτες, τα μέσα μαζικής μεταφοράς, πλοία, φορτηγά, αεροπλάνα και τρένα.

Όσον αφορά τα μέσα μαζικής μεταφοράς, κυκλοφορούν ήδη εδώ και μερικά χρόνια υδρογονοκίνητα και λεωφορεία σε πολλές πόλεις στις ΗΠΑ, στην Ιαπωνία, Κίνα, Αυστραλία, Ισλανδία, Γερμανία, Ισπανία, Πορτογαλία και σε πολλές άλλες χώρες. Τα οχήματα που χρησιμοποιούν τις κυψέλες καυσίμου παίρνουν ένα υβριδικό συνδυασμό για να παράγει ηλεκτρικής ενέργειας με υψηλότερη αποδοτικότητα και αυτονομία. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούν την μπαταρία λιθίου που υποστηρίζουν την κυψέλη καυσίμου [4].

Με συνεργασία με κρατικούς φορείς, βιομηχανίες και άλλα εργοστάσια σε όλο τον κόσμο, πολλές εταιρείες σήμερα αναπτύσσουν οχήματα που κινούνται με κυψέλες καυσίμου. Το 1999, η Honda ήταν η πρώτη εταιρεία να αποκτήσει ένα πιστοποιητικό για την καθημερινή χρήση οχήματος που τροφοδοτείται από κυψέλες καυσίμου, μετά που παρουσίασε ένα όχημα τελείως καθαρό προς το περιβάλλον.

Σχεδόν όλες οι αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν κατασκευάσει πρότυπα οχήματα κυψελών καυσίμου και έχουν ανακοινώσει τη μαζική παραγωγή τους στο άμεσο μέλλον. Αρκετά από αυτά χρησιμοποιούν μόνο κυψέλες υδρογόνου ως πηγή τροφοδοσίας, ενώ κάποια άλλα χρησιμοποιούν και μπαταρίες ως εναλλακτική πηγή

τροφοδοσίας. Το καύσιμο είναι είτε καθαρό υδρογόνο σε υγρή ή αέρια μορφή, είτε από αναμόρφωση.

2.5.2 – Στατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Πολλά συστήματα κυψελών καυσίμου έχουν κατασκευαστεί για στατικές εφαρμογές. Ο βασικός σχεδιασμός τέτοιων συστημάτων δεν διαφέρει και πολύ από εκείνων που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα.

Παρόλα αυτά, σε αυτές τις εφαρμογές υπάρχουν κάποια κρίσιμα ζητήματα όπως είναι η επιλογή του καυσίμου, οι κλιματολογικές συνθήκες και η απομάκρυνση της εκλυόμενης θερμότητας. Επιπρόσθετα, οι απαιτήσεις σε βάρος και όγκο δεν είναι τόσο κρίσιμες όπως στις φορητές εφαρμογές.

Τα επιτρεπτά επίπεδα θορύβου είναι χαμηλότερα για τις εφαρμογές στην, ειδικά στην περίπτωση που είναι εγκατεστημένες σε εσωτερικούς χώρους. Οι χρόνοι εκκίνησης στα ηλεκτρικά οχήματα που διαθέτουν κυψέλες καυσίμου είναι τις τάξεις των μερικών δευτερολέπτων, ενώ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός για την εκκίνηση παρά μόνο αν χρησιμοποιούνται ως εφεδρικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [5].

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

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



Εικόνα 2-4: Σταθμός παραγωγής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου στην Νότια Κορέα

2.5.3 – Ηλεκτρονικά Φορητά

Εφαρμογές των κυψελών καυσίμου σε φορητούς μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε ηλεκτρονική συσκευή που χρησιμοποιεί μπαταρία, όπως τα laptop, mp3 players, κινητά τηλέφωνα. Μπορούν ακόμη να παράγουν ενέργεια εξ αποστάσεως. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται περισσότερο σε τέτοιες εφαρμογές είναι η μεθανόλη, μια αλκοόλη με υψηλή περιεκτικότητα ενέργειας, η οποία τροφοδοτεί την κυψέλη καυσίμου μεθανόλης DMFC (direct methanol fuel cell).

Σε αυτές εφαρμογές γίνονται χρησιμοποιώντας ένα φορητό υβριδικό σύστημα το οποίο συνδυάζει με κυψελές καυσίμου που τροφοδοτούνται με μεθανόλη, φτάνοντας σε ισχύους των 3kW. Για παράδειγμα, η αυτονομία ενός κινητού που χρησιμοποιεί την τεχνολογία αυτή φτάνει πλέον 14 ώρες συνεχούς χρήσης, με μόνο δέκα χιλιοστόλιτρο (10 ml) μεθανόλης. [6]



Εικόνα 2-5: Laptop με κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC)

Αρκετές εταιρείες ηλεκτρονικών αναπτύσσουν φορητούς υπολογιστές με κυψέλες καυσίμου για να αυξηθεί η αυτονομία των συσκευών αυτών. Η Samsung Electro-Mechanics, προσπαθεί να κατασκευάσει ένα φορητό υπολογιστή που θα έχει μια μπαταρία με διάρκεια έως ένα μήνα. Στην περίπτωση αυτή, το μέγεθος της κυψέλης καυσίμου εξακολουθεί να είναι υψηλή, αλλά υπάρχουν ήδη συσκευές με μια αυτονομία μπαταρίας έως 15 ώρες.

2.6 - Πλεονέκτημα και Μειονέκτημα Κυψέλης Καυσίμου

Τα πλεονεκτήματα των κυψέλων Καυσίμου είναι τα εξής:

- Μια κυψέλη καυσίμου μπορεί να μετατρέψει περισσότερο από 90% της ενέργειας που περιέχεται σε ένα καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα (δεν υπάρχει εξάρτηση από τον Carnot κύκλου). Το 1996, οι κυψελές καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) έδειξε μία απόδοση μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας από 42%, με υψηλή θερμική ισχύς.
- Κεντρική παραγωγή ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου μπορεί να εφαρμοστεί κατά μήκος των σημείων παροχής επιτρέποντας τη μείωση του κόστους των μεταφορών και των ενεργειακών απωλειών στα δίκτυα διανομής
- Η ικανότητα να συν-παραγωγή θερμότητας, δηλαδή, εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, παράγει επίσης ζεστό υδρατμούς.
- Η αντικατάσταση των συμβατικών σταθμών παραγωγής ενέργεια που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από ορυκτά καύσιμα για κυψέλες καυσίμου θα βελτιώσει την ποιότητα του αέρα και την μείωση της κατανάλωσης νερού.
- Οι εκπομπές από σταθμούς με κυψέλες καυσίμου είναι δέκα φορές λιγότερο από περιβαλλοντικές προαπαιτήσεις. Περαιτέρω, οι κυψέλες καυσίμου παράγουν πολύ λίγη ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα.

- Η φύση της λειτουργίας επιτρέπει την εξάλειψη από τις πολλές πηγές θορύβου που συνδέονται με τα συμβατικά συστήματα για την παραγωγή ενέργειας με τη βοήθεια του ατμού.
- Ευελιξία στο σχεδιασμό, συμπεριλαμβανομένης της διαμόρφωσης, με αποτέλεσμα οικονομικά και στρατηγικά οφέλη για τις μονάδες των κυψελών καυσίμου και για τους καταναλωτές.
- Οι κυψέλες καυσίμου μπορεί να σχεδιαστεί για να λειτουργεί από το φυσικό αέριο, βενζίνη ή άλλα καύσιμα εύκολο να αποκτήσετε και τη μεταφορά (διαθέσιμα σε χαμηλό κόστος). Μια χημική ουσία που αναμόρφωσης παράγει εμπλουτισμένο σε υδρογόνο επιτρέπει τη χρήση των διαφόρων αέρια ή υγρά καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο.
- Δεδομένου ότι το θέμα της πρόσφατης τεχνολογίας ενδιαφέροντος, οι κυψέλες καυσίμου έχουν υψηλό δυναμικό ανάπτυξης. Αντίθετα, η ανταγωνιστική τεχνολογία κυψελών καυσίμου συμπεριλαμβανομένων των αεριοστροβίλων και των κινητήρων εσωτερικής καύσης, έχουν φτάσει σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης.

Τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- Η αναγκαιότητα χρήσης ευγενών μετάλλων όπως, για παράδειγμα, λευκόχρυσος είναι μια σπάνια και ακριβά μέταλλα στον πλανήτη μας.
- Το σημερινό υψηλό κόστος σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας.
- Η υψηλή υδρογόνο καθαρότητας ρεύματος πρέπει να λαμβάνεται ώστε να μην μολύνουν τον καταλύτη.
- Τα προβλήματα και οι δαπάνες που σχετίζονται με τη μεταφορά και τη διανομή των νέων καυσίμων, όπως, για παράδειγμα, υδρογόνο.
- Τα οικονομικά συμφέροντα που συνδέονται με τις βιομηχανίες των ορυκτών καυσίμων και τις βιομηχανικές χώρες.

Κεφάλαιο 3
Τύποι Κυψελών Καυσίμου

3.1 - Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)

Η αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC) ήταν μία από τις πρώτες σύγχρονες κυψέλες καυσίμου που αναπτύχθηκαν, στις αρχές του 1960. Τέτοιου τύπου κυψέλης καυσίμου εφαρμόστηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύ για το σκάφο του διαστημικού προγράμματος Apollo. Οι κυψέλες καυσίμου τύπου AFC παρουσιάζουν καλές και επιθυμητές ιδιότητες σε σύγκριση με άλλες κυψέλες καυσίμου, όπως οι εξαιρετικές επιδόσεις σε υδρογόνο (H₂) και οξυγόνο (O₂).

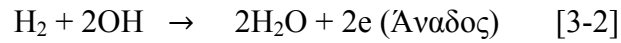
Η κυψέλη καυσίμου (AFC), η οποία αναπτύχθηκε για την εφαρμογή σε διαστημικά προγράμματα, βασίστηκε σε μεγάλο βαθμό στις εργασίες του Francis Thomas Bacon στη δεκαετία του 30. Από το 1952, ολοκληρώθηκε η κατασκευή μίας αλκαλικής κυψέλης καυσίμου με H₂ και O₂ με απόδοση της 5 kW. Η κυψέλη καυσίμου που αναπτύχθηκε από Bacon λειτουργούν σε 200 έως 240 °C και η πίεση διατηρήθηκε στα 40 έως 55 atm για την πρόληψη του ηλεκτρολύτη από βρασμού. Σε αυτές τις υψηλές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, η απόδοση της κυψέλης του Bacon ήταν αρκετά καλή (0,78 V σε 800 mA/cm²) [7].

3.1.1 – Βασικές Αρχές Λειτουργίας

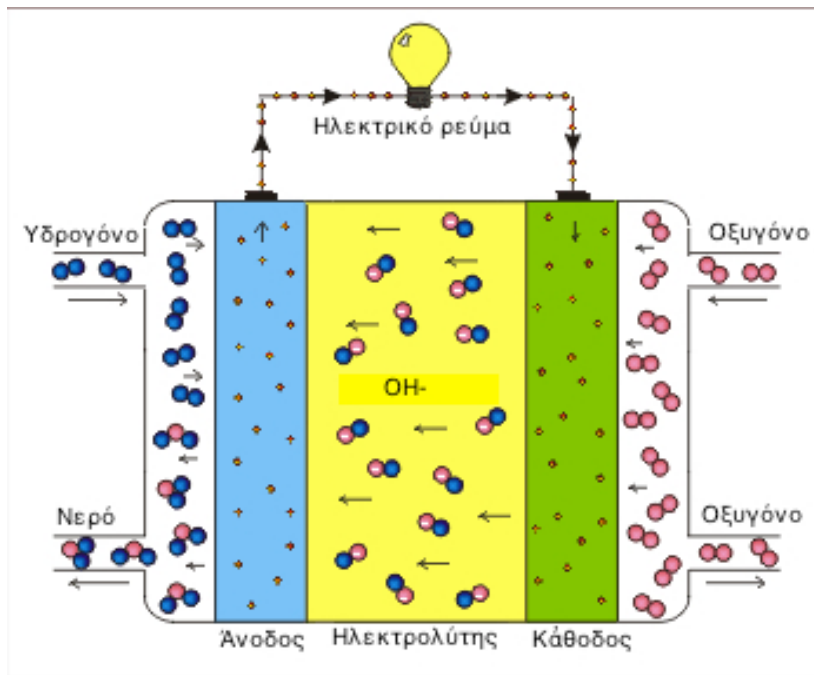
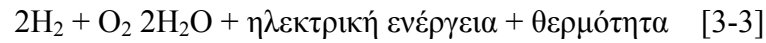
Η άνοδος αποτελείται από ένα διπλής-πορώδες ηλεκτρόδιο Ni (δύο δομή στρώματος με πορώδη Ni(νικέλιο) των 16 χιλιοστών μέγιστη διάμετρο πόρου στην πλευρά του ηλεκτρολύτη και 30 mm διάμετρο πόρου στην πλευρά αερίου), και η κάθοδος αποτελείται από μια πορώδη δομή του λιθιωμένου NiO.

Στην κατηγορία αυτή χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης το υδροξείδιο του καλίου(KOH). Στην περίπτωση αυτή η συνολική χημική αντίδραση της κυψέλης είναι ακριβώς ίδια με την αντίδραση που πραγματοποιείται στην PEM κυψέλη με διαφορά ότι πραγματοποιούνται διαφορετικές επιμέρους αντιδράσεις για το κάθε ηλεκτρόδιο. Στην αλκαλική κυψέλη, τα ιόντα υδροξυλίου OH⁻ είναι κινούμενα και ελεύθερα. Στην άνοδο αντιδρούν με το υδρογόνο, ελευθερώντας ενέργεια και ηλεκτρόνια παράγοντας παράλληλα νερό. Η αντίδραση είναι [8]:





Ιόντα υδροξυλίου είναι τα αγώγιμα είδων στον ηλεκτρολύτη και η καθαρή αντίδραση κυττάρων είναι:



Σχήμα 3-2: Αλκαλική Κυψέλη Καυσίμου

Σε πολλά σχέδια κυψέλων, ο ηλεκτρολύτης κυκλοφορεί (κινητό ηλεκτρολύτη), έτσι ώστε η θερμότητα μπορεί να αφαιρεθεί και το νερό αποβάλλεται με εξάτμιση. Από KOH έχει την υψηλότερη αγωγιμότητα μεταξύ των αλκαλικών υδροξειδίων άρα την προτιμούμε για ηλεκτρολύτη. Ένα ποσοστό του νερού που σχηματίζεται στην άνοδο μεταναστεύει σε όλη την ηλεκτρολύτη και εξέρχεται στην κάθοδο.

3.1.2 - Αποδοτικότητα [9]

Η απόδοση της αλκαλικής κυψέλης καυσίμου (AFC) από το 1960 έχει υποστεί πολλές αλλαγές. Η πρώτες AFC λειτουργούσε σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις για να πληρούν τις απαιτήσεις για διαστημικές εφαρμογές. Πιο πρόσφατα, μια σημαντική εστίαση της τεχνολογίας είναι για επίγειες εφαρμογές όπου έχει χαμηλό κόστος και λειτουργούν σε σχεδόν θερμοκρασία και πίεση του αέρα, όπου ως οξειδωτικό είναι πολύ επιθυμητό. Αυτή η μετατόπιση στις παραμέτρους λειτουργίας κυψελών καυσίμου έχει ως αποτέλεσμα μία χαμηλότερη απόδοση από την προηγούμενη (AFC).

Επίδραση της πίεσης

Η αύξηση της τάσης ανοικτού κυκλώματος σε μία κυψέλη καυσίμου θα είναι κάπως μικρή λόγω της μεγάλης διαλυτότητας αερίου η οποία κάνει τα ρευματά να χάσει την αποδοτικότητα του.

Έχοντας την θερμοκρασία λειτουργίας (T), την μεταβολή τάσεως (VP), ως συνάρτηση της πίεσης (P) μπορεί να εκφραστεί χρησιμοποιώντας με αρκετά ακρίβεια την εξίσωση:

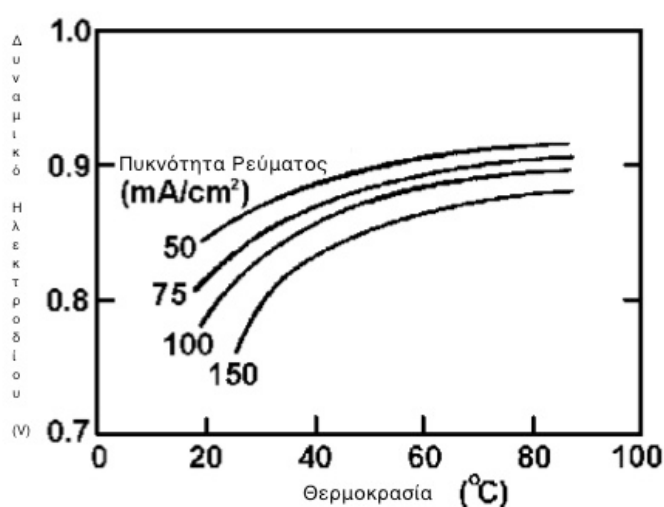
$$VP (mV) = 0.15 T (^{\circ}K) \log (P2/P1) \quad [3-4]$$

Προκειμένου να επιτευχθεί ταχύτερη κινητική, χρησιμοποιούνται υψηλές λειτουργικές θερμοκρασίες πάνω από 100 ° C συνοδευόμενη από υψηλότερες πιέσεις.

Οι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα του διαστημόπλοιου της NASA έχει λειτουργήσει για πάνω από 5.000 ώρες στους 200 °C σε 50 atm επίτευξη HHV αποδόσεις άνω του 60%. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μία αύξηση της πίεσης πέρα από περίπου 5 atm παράγει βελτιώσεις οι οποίες συνήθως αντισταθμίζονται από μια σημαντική αύξηση του βάρους που απαιτείται για να διατηρηθεί η υψηλότερη πίεση λειτουργίας. Για τις διαστημικές εφαρμογές, το βάρος είναι κρίσιμη.

Επίδραση της θερμοκρασίας

Στο Σχήμα 3-3 δείχνει ότι το αναστρέψιμο δυναμικό μίας κυψέλης για κυψέλης καυσίμου καταναλώνει H₂ και O₂ μειώνεται κατά 0,27 mV / °C υπό τυποποιημένες συνθήκες, όπου το προϊόν της αντίδρασης είναι οι υδρατμοί. Ωστόσο, μια αύξηση της θερμοκρασίας βελτιώνει την απόδοση κυψελών, επειδή μειώνονται η πόλωση ενεργοποίησης, μαζική μεταφορά πόλωσης, και ωμικές απώλειες.



Σχήμα 3-3: Επίδραση της θερμοκρασίας στην O₂, (αέρας)

Σύμφωνα με πρόσφατα πειράματα με κυψέλες τύπου (AFC) με συντελεστή θερμοκρασίας στους 50-70°C περίπου 3 mV / °C σε 50 mA/cm² και με υψηλή πόλωση είχαν παρατηρήσει υψηλότερους συντελεστές θερμοκρασίας υπό φόρτιση.

Αργότερα οι μετρήσεις του *McBreen*, με H₂/αέρος μεμονωμένα κύτταρα με 50% KOH, έδειξε ότι ο συντελεστής θερμοκρασίας πάνω από 60°C ήταν σημαντικά χαμηλός από εκείνο που λαμβάνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Επίσης, οι μετρήσεις του *McBreen* προτείνουν την παρά κάτω εξισώσεις για την εύρεση της μεταβολής τάσεως (VT) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας (T) στα 100mA/cm² :

$$VT (mV) = 4.0 (T_2 - T_1) \quad \text{για } T = 63^\circ\text{C} \quad [3-5]$$

και

$$VT (mV) = 0.7 (T_2 - T_1) \quad \text{για } T > 63^\circ\text{C} \quad [3-6]$$

Παρατηρούμε ότι έχουμε εύλογη απόδοση με κυψέλες (AFC) όταν λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες (θερμοκρασία περιβάλλοντος έως 70oC). Αυτό συμβαίνει επειδή η αγωγιμότητα του KOH διαλυμάτων είναι σχετικά υψηλές σε χαμηλές θερμοκρασίες. Για παράδειγμα, μία αλκαλική κυψέλη καυσίμου σχεδιασμένα για να λειτουργούν σε 70oC θα μειώσει μόνο το μισό του επιπέδου της ισχύος όταν η θερμοκρασία λειτουργίας του μειώνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

3.2 - Κυψελή καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC)

Οι Κυψελές καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC) παρέχουν υψηλής πυκνότητα ισχύος, η οποία προσφέρει χαμηλό βάρος, κόστος και όγκο. Το αδρανοποιημένο ηλεκτρολύτη της μεμβράνης απλοποιεί τη σφράγιση κατά τη διαδικασία παραγωγής, μειώνει την διάβρωση και επίσης προβλέπει για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των κυψέλων και της στοίβα. οι (PEMFC) λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, επιτρέποντας την ταχύτερη εκκίνηση και άμεση ανταπόκριση στις αλλαγές της ζήτησης για ενέργεια.

Οι (PEMFC) θεωρείται ως το σύστημα της επιλογής για τα οχήματα, εφαρμογές ισχύος, αλλά είναι επίσης αναπτύσσεται σε μικρότερης κλίμακας για σταθμούς ισχύος.

Η χρήση των οργανικών πολυμερών ανταλλαγής μεμβράνης σε κυψέλες καυσίμου σχεδιάστηκε αρχικά από τον *William T. Grubbs* το 1959. Η επιθυμητή λειτουργία της μεμβράνης ιόντος ήταν να παράσχει ένα ιόν αγωγίμο φραγής αερίου όποτε χρησιμοποιήκαν ισχυρά οξέ για να παρέχουν μια επαφή μεταξύ των παρακείμενων μεμβράνων και καταλυτικών επιφανειών. Κατά την περαιτέρω ανάπτυξη, αναγνωρίστηκε ότι το κύτταρο λειτούργησε καλά χωρίς την προσθήκη οξέος.

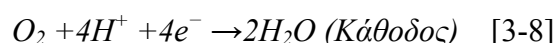
Ως αποτέλεσμα, η παρούσα (PEMFC) δε χρησιμοποιούνται ηλεκτρολύτη εκτός από το ίδιο το ένυδρο μεμβράνης. Η βασική κυψέλη αποτελείται από ένα πρωτόνιο αγωγίμη μεμβράνη, όπως ένα υπερφθοριωμένο πολυμερές σουλφονικού οξέος, τοποθετημένη μεταξύ δύο εμποτισμένα πορώδη ηλεκτρόδια πλατίνας. Το πίσω μέρος των ηλεκτροδίων γίνεται υδρόφοβη με επίστρωση με μία κατάλληλη ένωση,

όπως Τεφλόν και επίσης η αδιάβροχη επίστρωση παρέχει μία διαδρομή για τη διάχυση αερίου στο στρώμα του καταλύτη.

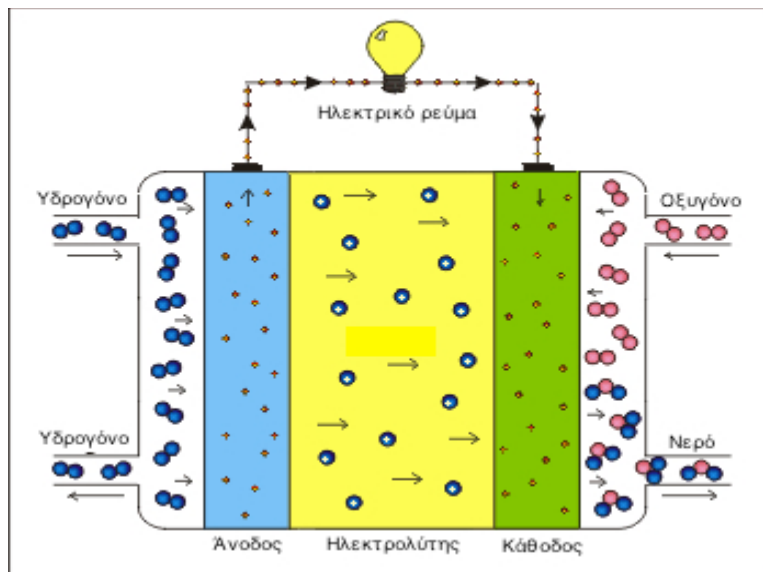
Ένα πλεονέκτημα της (PEMFC) είναι ότι δεν έχουν κανένα διαβρωτικό κίνδυνο ρευστό και καμία ευαισθησία στον προσανατολισμό. Αυτό αποτελεί χρήση της (PEMFC) σε κατάλληλη για εφαρμογή ισχύος οχημάτων. Σε αυτές τις εφαρμογές το καύσιμο, πιθανώς να είναι την μεθανόλη. Αν και η αποθήκευση του υδρογόνου επί του σκάφους υπό μορφή πεπιεσμένου αερίου και τη μερική οξείδωση της βενζίνης εξετάζεται.

3.2.1 – Βασικές Αρχές Λειτουργίας

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις του (PEMFC) είναι: Το υδρογόνο στην άνοδο παρέχει ένα πρωτόνιο, ελευθερώνοντας ένα ηλεκτρόνιο από τη διαδικασία που πρέπει να περάσει μέσα από ένα εξωτερικό κύκλωμα για την επίτευξη της κάθοδο. Το πρωτόνιο, το οποίο παραμένει στερεό διάλυμα με ένα ορισμένο αριθμό μορίων νερού διαχέεται μέσω της μεμβράνης προς την κάθοδο να αντιδράσει με το οξυγόνο και την επιστροφή των ηλεκτρονίων και στην συνέχεια το νερό παράγεται στην κάθοδο. Δίνονται οι αντιδράσεις παρακάτω:



Λόγω της εγγενούς φύσης των χρησιμοποιούμενων υλικών, είναι δυνατή η λειτουργία χαμηλής θερμοκρασίας των περίπου 80οψ. Η κυψέλη είναι επίσης σε θέση να διατηρήσουν τη λειτουργία σε πολύ υψηλές πυκνότητες ρεύματος. Αυτές οι ιδιότητες οδηγούν σε μια γρήγορη ικανότητα εκκίνησης και την ικανότητα να κάνει μία συμπαγή και ελαφρύ κυψέλη.



Σχήμα 3-4: Κυψέλη καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC)

Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας της (PEMFC) αποτελεί και στις δύο πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας είναι συμφέρουσα, επειδή η κυψέλη μπορεί να ξεκινήσει από τις συνθήκες περιβάλλοντος γρήγορα, ειδικά όταν είναι διαθέσιμο καθαρό καύσιμο υδρογόνου. Το μειονέκτημα είναι ότι στους καταλύτες πλατίνας που απαιτούνται για την προώθηση της ηλεκτροχημικής αντίδρασης δηλαδή το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) συνδέεται ισχυρά με θέσεις πλατίνας σε θερμοκρασίες κάτω από 150oC, η οποία μειώνει τους διαθέσιμους χώρους για το υδρογόνο χημειορόφηση και ηλεκτρο-οξείδωση.

Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας σημαίνει επίσης ότι ελάχιστη ή και καμία θερμότητα είναι διαθέσιμη από την κυψέλη καυσίμου για οποιαδήποτε ενδόθερμη αναμόρφωσης.

3.2.2 - Αποδοτικότητα

Τόσο η θερμοκρασία και η πίεση έχουν σημαντική επίδραση στην απόδοση των κυττάρων. Η σημερινές κυψέλες λειτουργούν σε 80oC, ονομαστική πίεση 0,285 MPa (30 psig), και ένα φάσμα 0,10 έως 1,0 MPa (10 έως 100 psig). Χρησιμοποιώντας κατάλληλα συλλέκτες ρεύματος και της δομής στήριξης, οι

κυψελές καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC) θα πρέπει να είναι ικανές να λειτουργούν σε πιέσεις από 500 - 3000 psi.

Επίδραση της πίεσης

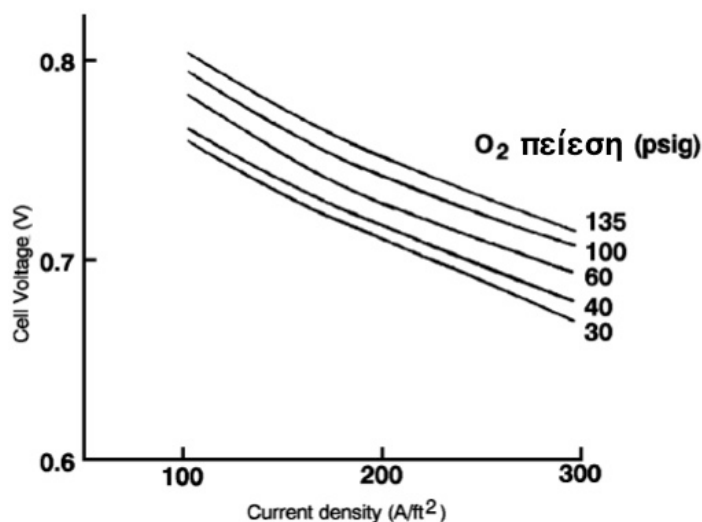
Η πίεση λειτουργίας έχει σημαντική επίδραση στην απόδοση PEFC. Μια αύξηση στην πίεση οξυγόνου 30 με 135 psig (3 -10,2 ατμόσφαιρες) παράγει μια αύξηση της τάξης του 42 mV στην τάση κυττάρων στα 215 mA/cm².

Σύμφωνα με την εξίσωση Nernst, η αύξηση στην αναστρέψιμη δυναμικό της καθόδου που αναμένεται για την αύξηση στην πίεση οξυγόνου είναι περίπου 12 mV, η οποία είναι σημαντικά μικρότερη από τη μετρούμενη τιμή. Όταν η θερμοκρασία της κυψέλης αυξάνεται σε 104oC, η τάσης της κυψέλης μεταβάλλεται από 0.054 V για την ίδια μεταβολή στην πίεση του οξυγόνου.

Μία ακόμη επίδραση της πίεσης παρατηρήθηκε σε μια (PEMFC) σε 50oC και 500 mA/cm² που εδείχνε μία τάση κέρδος 83 mV για την αύξηση της πίεσης από 1 έως 5 ατμόσφαιρες και την ίδια (PEMFC) όμως τώρα σε 80oC και 431 mA/cm² έδειξε μία τάση κέρδος 22 mV για μια μικρή αύξηση της πίεσης 2,4 έως 3,4 ατμόσφαιρες.

Αυτά τα αποτελέσματα μας δείχνουν ότι η αύξηση της πίεσης του οξυγόνου έχει ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση στην πόλωση στην κάθοδο, δηλαδή, οι βελτιώσεις στην απόδοση λόγω της αυξημένης πίεσης πρέπει να σταθμίζεται σε σχέση με την ενέργεια που απαιτείται ώστε να συμπυκνώνουν τα αντιδρώντα αέρια.

Η επίδραση της πίεσης του οξυγόνου για την απόδοση μιας PEMFC σε 93oC δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3-5: Επίδραση της πίεσης στην O₂, (αέρας)

Επίδραση της θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία λειτουργίας επίσης επηρεάζει την απόδοση των κυψέλων. Μία αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την εσωτερική αντίσταση της κυψέλης, κυρίως μειώνει την ωμική αντίσταση του ηλεκτρολύτη. Επιπλέον, οι περιορισμοί μεταφοράς μάζας μειώνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες μειώνει την χημειορρόφηση του CO₂, επειδή αυτή η αντίδραση είναι εξώθερμη. Η βελτίωση της απόδοσης κυτάρων μέσω αύξησης της θερμοκρασίας, όμως, περιορίζεται από την υψηλή πίεση ατμού του νερού στην μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων. Αυτό οφείλεται στην ευαισθησία της μεμβράνης σε αφυδάτωση και την επακόλουθη απώλεια της ιοντικής αγωγιμότητας.

3.3 - Κυψέλη Καυσίμου Άμεση Μεθανόλης (DMFC)

Η μεγάλη δυνητική αγορά για εφαρμογές σε οχήματα κυψελών καυσίμου έχει προκαλέσει έντονο ενδιαφέρον για να αναπτύχθει μία κυψέλη καυσίμου που να μπορεί να εκτελείται απευθείας σε μεθανόλη.

Η Λειτουργία σε υγρό καύσιμο βοηθάει στην ταχεία εισαγωγή της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου σε εμπορικές αγορές, διότι θα απλοποιήσει σε μεγάλο βαθμό το εποχούμενο σύστημα καθώς και θα μειώσει την υποδομή που απαιτείται για την παροχή καυσίμων για τα επιβατικά αυτοκίνητα και των εμπορικών στόλων.

Η κυψέλη καυσίμου άμεση μεθανόλης (DMFC) είναι σχετικά πρόσφατη τεχνολογία στη ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου. Επινοήθηκε και αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1990 από τους ερευνητές σε διάφορα ιδρύματα στις Ηνωμένες Πολιτείες, όπως και η NASA και η Jet Propulsion Laboratory. Είναι παρόμοιο με τις (PEMFC) διότι χρησιμοποιεί μία πολυμερής μεμβράνης ως ηλεκτρολύτη. Ωστόσο, η πλατίνα ρουθηνίου του καταλύτη στην ανόδο της (DMFC) είναι σε θέση να αντλήσει το υδρογόνο από υγρή μεθανόλη, εξαλείφοντας την ανάγκη για έναν αναμορφωτή καυσίμου. Συνεπώς καθαρή μεθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο.

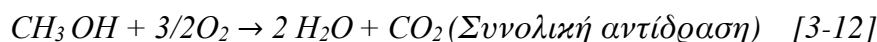
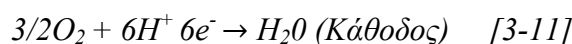
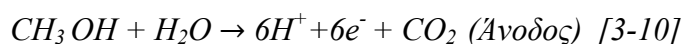
Η μεθανόλη προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα ως καύσιμο. Είναι φθηνή, αλλά έχει μια σχετικά υψηλή πυκνότητα ενέργειας και μπορούν εύκολα να μεταφέρονται και να αποθηκεύονται. Μπορεί να τροφοδοτείται στη μονάδα κυψελών καυσίμου από ένα δοχείο υγρού το οποίο μπορεί να διατηρείται συμπληρωμένο, ή σε κασέτες που μπορεί να αλλάχτούν γρήγορα όταν εξαντληθούν.

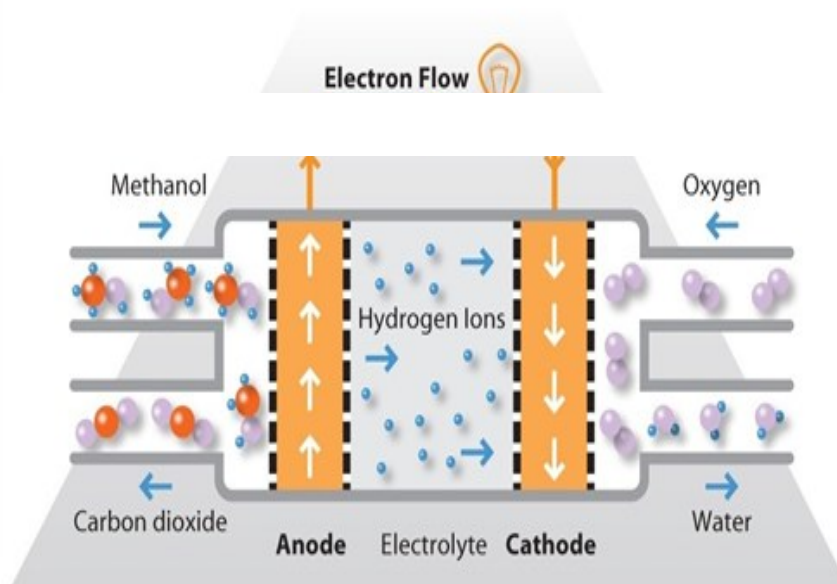
Οι τρέχουσες (DMFC) περιορίζονται στη δύναμη που μπορεί να παράγει, αλλά εξακολουθεί να μπορεί να αποθηκεύσει ένα υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο σε ένα μικρό χώρο. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να παράγει μια μικρή ποσότητα ενέργειας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό είναι ακατάλληλο για την τροφοδοσία μεγάλων οχημάτων, αλλά ιδανικό για μικρότερα οχήματα, όπως τα περνοφόρα ανυψωτικά μηχανήματα και τα καταναλωτικά αγαθά, όπως κινητά τηλέφωνα, ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές και φορητούς υπολογιστές.

3.3.1 – Βασικές Αρχές Λειτουργίας

Οι (DMFC) λειτουργούν σε θερμοκρασία που κυμαίνεται από 60 °C έως 130 °C και έχουν την τάση να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές με μέτριες απαιτήσεις ισχύος για αυτό το λόγο βασίζεται στην οξείδωση της μεθανόλης σε ένα στρώμα καταλύτη προς σχηματισμό διοξειδίου του άνθρακα. Νερού καταναλώνεται στην άνοδο και παράγεται στην κάθοδο. Τα πρωτόνια (H⁺) μεταφέρονται σε όλη την μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων - συχνά κατασκευασμένα από Nafion - στην κάθοδο όπου αντιδρούν με το οξυγόνο για να παράγει νερό. Τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος από την άνοδο στην κάθοδο, παρέχοντας τροφοδοσία στις συνδεδεμένες συσκευές.

Δίνονται οι αντιδράσεις παρακάτω:





Σχήμα 2-6: Κυψέλη καυσίμου άμεση μεθανόλης (DMFC)

Ο Μεθανόλης και το νερό προσροφώνται σε έναν καταλύτη συνήθως κατασκευασμένος από πλατίνα και το ρουθίνιο σωματίδια. Κατά την διαδικασία χάνει πρωτόνια μέχρι να σχηματίζεται το διοξείδιο του άνθρακα. Όπως το νερό καταναλώνεται στην άνοδο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθαρή μεθανόλη χωρίς την παροχή του νερού είτε μέσω παθητικής μεταφοράς όπως διάχυση πλάτη ή ενεργής μεταφοράς, όπως άντληση. Η ανάγκη για νερό περιορίζει την ενεργειακή πυκνότητα του καυσίμου.

3.4 - Κυψελή Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC)

Οι πειραματιστές έχουν χρησιμοποιήσει οξέα ως ηλεκτρολύτες από την εποχή της πρώτης μπαταρίας αερίου του William Grove το 1842, που χρησιμοποιήθηκε θειικό οξύ. Όμως το φωσφορικό οξύ είναι ένας κακός ηλεκτρικός αγωγός και δεν ήταν τόσο ελκυστική όποτε οι (PAFC) αναπτύχθηκε πιο σιγά από τους άλλους τύπους κυψελών καυσίμου.

Το 1961, GV Elmore και HA Tanner αποκάλυψε νέας επαγγελίας σε ηλεκτρολύτες φωσφορικού οξέος στην εργασία τους "Ενδιάμεση θερμοκρασία κυψελών καυσίμου" (Intermediate Temperature Fuel Cells) που περιγράφουν τα πειράματά τους χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτρολύτη που ήταν 35% φωσφορικό οξύ και 65% σε σκόνη διοξειδίου του πυριτίου που επικολλήθηκε σε μια φλάντζα από Teflon. Με αποτέλεσμα το φωσφορικό οξύ δεν μειώνεται ηλεκτροχημικά υπό συνθήκες λειτουργίας των κυψελών και επίσης, οι (PAFC) τους έτρεξε στον αέρα,

περισσότερο από το καθαρό οξυγόνο. Ένα κύτταρο οξέος λειτούργησε για έξι μήνες σε μια πυκνότητα ρεύματος 90 [mA/cm²] και 0,25 V χωρίς εμφανή φθορά.

Το φωσφορικό οξύ κυψελών καυσίμου (PAFC) ήταν η πρώτη τεχνολογία κυψελών καυσίμου που μπήκε στον εμπορικό. Υπάρχουν πάνω από 75 MW των διαδηλωτών, σε όλο τον κόσμο, που ή έχουν δοκιμαστεί, ή είναι υπό δοκιμή, ή πρόκειται να κατασκευαστεί.

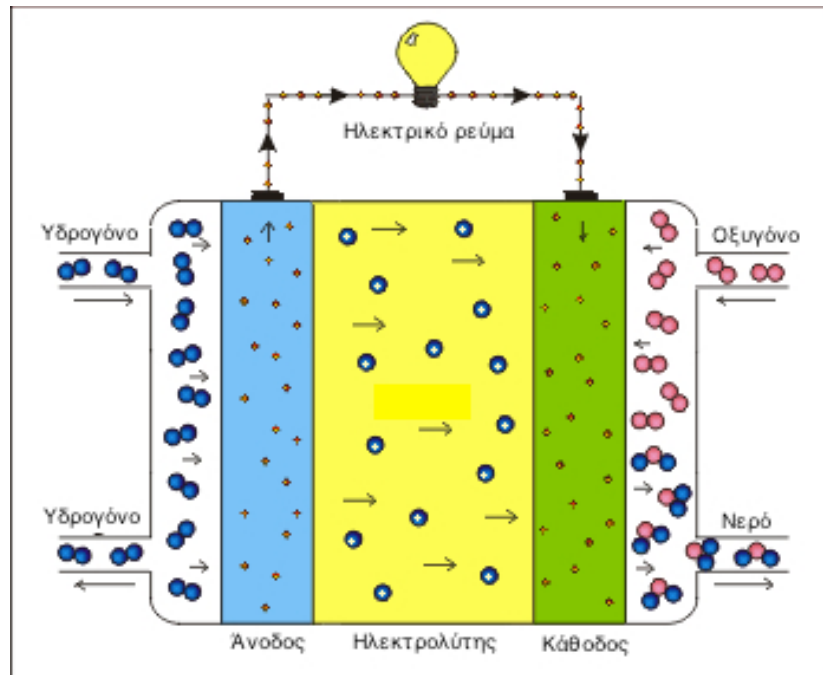
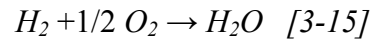
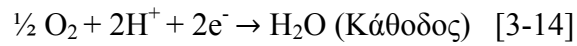
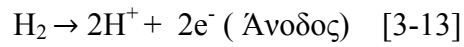
Αυτό το είδος κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιείται περισσότερο σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας με φάσμα εξόδου στα 100 έως 400 kW, δίνοντας ηλεκτρική ενέργεια σε πολλές εμπορικές εγκαταστάσεις σε όλο τον κόσμο. Επίσης, χρησιμοποιείται σε εφαρμογή στα μεγάλα οχήματα, όπως τα λεωφορεία. Οι περισσότερες μονάδες κυψελών καυσίμου που πωλήθηκαν πριν από το 2001 με (PAFC) τεχνολογία. Τα περισσότερα από τις εγκαταστάσεις είναι στο εύρος 50 έως 200 kW ισχύος, αλλά και μεγάλες εγκαταστάσεις του 1 MW και 5 MW έχουν κατασκευαστεί.

Το μεγαλύτερο εργοστάσιο που λειτουργεί μέχρι σήμερα επιτευχθεί 11 MW του δικτύου ποιότητας εναλλασσόμενου ρεύματος. Απαιτούνται σημαντικές προσπάθειες στις ΗΠΑ, κυρίως για τη βελτίωση των PAFCs για σταθερή διασπορά σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και επιτόπου σταθμούς συμπαραγωγής.

3.4.1 – Βασικές Αρχές Λειτουργίας

Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) λειτουργούν σε θερμοκρασίες γύρω στους 150 έως 200 °C (περίπου 300 έως 400 βαθμούς F). Όπως υποδηλώνει το όνομα, οι PAFC χρησιμοποιούν φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτη. Θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου μεταναστεύουν μέσω του ηλεκτρολύτη από την άνοδο προς την κάθοδο. Ηλεκτρόνια που παράγονται στην άνοδο πηγαίνουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια στην πορεία, και να επιστρέψει προς την κάθοδο. Υπάρχουν τα ηλεκτρόνια, ιόντα υδρογόνου και οξυγόνου του νερού μορφή, η οποία αποβάλλεται από το κύτταρο. Ένας καταλύτης πλατίνας στα ηλεκτρόδια επιταχύνει τις αντιδράσεις.

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις του (PAFC) είναι παρόμοιες με της (PEMFC), δίνονται παρακάτω:



Σχήμα 3-7: Κυψέλη Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC)

Η δημιουργία του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) γύρω από τα ηλεκτρόδια μπορεί, με κάποιο τρόπο, να "δηλητηριάζουν" μία κυψέλη καυσίμου. Ένα πλεονέκτημα της (PAFC) είναι ότι στους 200 βαθμούς $^{\circ}C$ ανέχονται μια CO συγκέντρωση περίπου 1,5%. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι συμπυκνωμένο ηλεκτρολύτη φωσφορικό οξύ μπορεί να λειτουργήσει πάνω από το σημείο βρασμού του νερού που είναι ένας περιορισμός που απαιτεί νερό για την αγωγιμότητα. Το οξύ απαιτεί αλλά συστατικά στην κυψέλη που να αντισταθούν στη διάβρωση.

3.4.2 - Αποδοτικότητα

Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως (PAFC) είναι αρκετά ανθεκτικό σε δηλητηρίαση από μονοξειδίο του άνθρακα, αλλά τείνουν να έχουν χαμηλότερη απόδοση από άλλους τύπους κυψελών καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, οι κυψέλες αυτές λειτουργούν σε μετρίως υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 180 ° C και η συνολική απόδοση μπορεί να είναι πάνω από το 80%, αν χρησιμοποιηθεί για συμπαραγωγή.

Επίδραση της πίεσης

Η βελτίωση στην απόδοση των (PAFC) σε υψηλότερη πίεση και σε υψηλή πυκνότητα ρεύματος μπορεί να αποδοθεί σε χαμηλότερη πόλωση διαχύσεως στην κάθοδο και την αύξηση του δυναμικού κυψελών. Επιπλέον, μειώνει την πόλωση συμπίεσης ενεργοποίησης στην κάθοδο λόγω της αυξημένης οξυγόνου και μερικών πειέσεων νερού. Εάν η μερική πίεση του νερού αφήνεται να αυξηθεί, θα έχουμε ως αποτέλεσμα μια χαμηλή συγκέντρωση οξέος. Αυτό θα αυξήσει την ιοντική αγωγιμότητα και να επιφέρει μια υψηλότερη πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής.

Η θεωρητική η μεταβολή τάσεως (VP) ως συνάρτηση της πειέσης είναι εκφρασμένη παρακάτω:

$$\Delta V_P (mV) = \frac{3 \cdot (2,3RT)}{2F} \log \frac{P_2}{P_1} \quad [3-16]$$

όπου $\frac{3 \cdot (2,3RT)}{2F} = 138\text{mV}$ στους 190°C .

Επίδραση της θερμοκρασίας

Ωστόσο, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα 3.2.2, η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ευεργετική επίδραση στην απόδοση των κυψελών, επειδή η

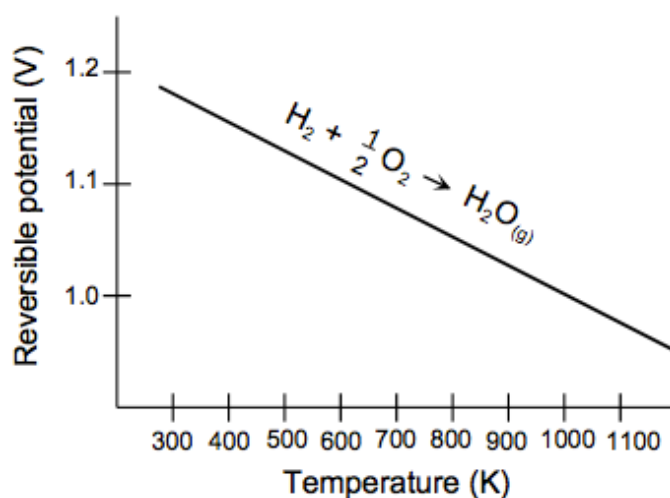
πόλωση ενεργοποίησης, ημαζική μεταφορά πόλωσης, και οι ωμικές απώλειες μειώνονται.

Η κινητική για τη μείωση του οξυγόνου σε Pt βελτιώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία κυψέλης. Σε μια μεσαίας κατηγορίας λειτουργίας φορτίου κατά (~ 250 mA/cm²), η μεταβολή τάσης (VP) με αυξανόμενη θερμοκρασία καθαρού υδρογόνου και αέρα είναι η παρακάτω σχέση:

$$VT (mV) = 1.15 (T2 - T1) (^{\circ}C) \quad [3-17]$$

Η εξίσωση ισχύει για ένα εύρος θερμοκρασίας $180^{\circ}C \leq T \leq 250^{\circ}C$. Όπως προκύπτει από την εξίσωση αυτή, κάθε αύξηση του βαθμού της θερμοκρασίας της κυψέλης θα πρέπει να αυξήσει την απόδοση κατά 1,15 mV.

Στο παρακάτω σχήμα δείχνει το αναστρέψιμο δυναμικό στοιχείου για PAFC καθώς καταναλώνουν H₂ και O₂ η θερμοκρασία αυξάνεται από 0,27 mV/^oC κάτω από πρότυπες συνθήκες (το προϊόν είναι ατμός νερού).



Σχήμα 3-8: H₂/O₂ κυψελών καυσίμου Ιδανικό δυναμικό ως συνάρτηση της θερμοκρασίας

3.5- Κυψέλη Καυσίμου Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (MCFC)

Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) απαιτούν τόσο υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας ότι οι περισσότερες εφαρμογές για αυτό το είδος των κυττάρων είναι περιορισμένη σε μεγάλες, σταθερές μονάδες παραγωγής ενέργειας. Ωστόσο, οι καταναλωτές μπορούν να επωφεληθούν από αυτό το είδος των κυψέλων, ακόμη και αν ποτέ δεν το βλέπουν στα σπίτια τους. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας ανοίγει τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν τη θερμότητα των αποβλήτων για να παράγει ατμό για θέρμανση χώρου, βιομηχανική επεξεργασία, ή σε αμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πολλές σύγχρονες μονάδες παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνδέονται με φυσικό αερίου με συστήματα συμπαραγωγής.

Στις αρχές του 1990, *Ishikawajima Heavy Industries* στην Ιαπωνία λειτούργησε με επιτυχία 1.000 watt με (MCFC) παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια για 10.000 συνεχόμενες ώρες. Τώρα τουλάχιστον δέκα ιαπωνικές εταιρείες εργάζονται πάνω σε (MCFC). Η MC Εταιρεία Ηλεκτρισμού του Ιλινόις εγκαταστήσει 250 kW (MCFC) μονάδα στο *Miramar Marine Corps Air Station* στο Σαν Ντιέγκο το 1997. Η κυψέλη καυσίμου δουλεύει και παράγει περίπου 160 MWh και την παραγωγή ατμού για χρήση στη βάση της εγκατάστασης. Την άνοιξη του 1999, η εταιρεία εγκατέστησε μια νέα στοίβα 75 kW και άρχισε ένα πρόγραμμα δοκιμών που προορίζεται για τη σταδιακή κλιμάκωση της εγκατάστασης. Πρόσφατα, προτίθεται να δοκιμάσει ένα πρωτότυπο 300 kW εμπορική μονάδα.

Αυτές οι μονάδες παραγωγής ενέργεια μπορεί να μας προσφέρουν την τοποθέτηση των σταθμών πιο κοντά στους καταναλωτές, μια έννοια που ονομάζεται κατανεμημένη παραγωγή, και επίσης μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα μετάδοσης-ιδίως όταν οι μονάδες είναι καθαρά και ήσυχα. Δεδομένου ότι η ηλεκτρική βιομηχανία είναι απελευθερωμένη και επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας γίνονται πιο απρόθυμοι να επενδύσουν σε νέες γραμμές μεταφοράς. Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) φαίνεται όλο και πιο ελκυστική επιλογή.

Ένα μειονεκτήματα που συνδέονται με MCFC μονάδες προκύπτουν από τη χρήση ενός υγρού ηλεκτρολύτη αντί για ένα στερεό και η απαίτηση για την ένεση του διοξειδίου του άνθρακα στην κάθοδο, όπως τα ανθρακικά ιόντα

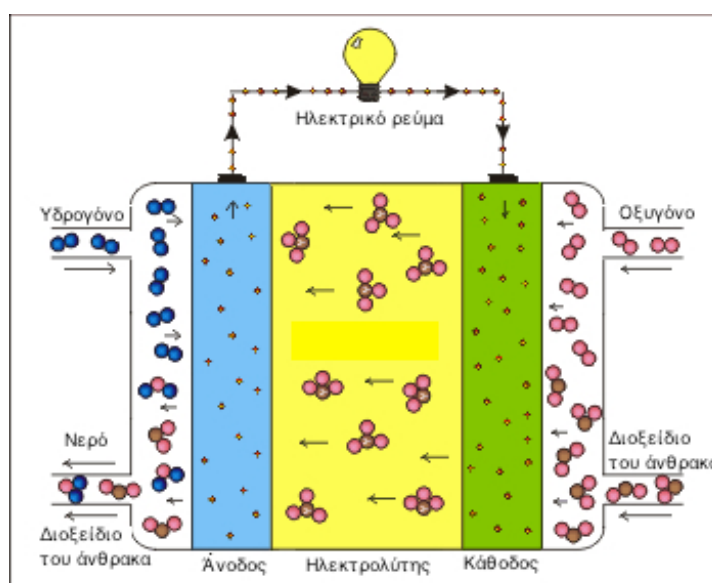
καταναλώνονται σε αντιδράσεις που συμβαίνουν στην άνοδο. Υπήρξαν επίσης κάποια θέματα με υψηλή διάβρωση θερμοκρασίας και η διαβρωτική φύση του ηλεκτρολύτη, αλλά αυτά μπορούν τώρα να ελέγχεται για να επιτευχθεί μια πρακτική χρονική ζωή.

3.5.1 – Βασικές Αρχές Λειτουργίας

Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) χρησιμοποιούν ένα τηγμένο ανθρακικό άλας εναιωρήθηκε σε μία πορώδη κεραμική μήτρα ως ηλεκτρολύτη. Άλατα που χρησιμοποιούνται συνήθως περιλαμβάνουν ανθρακικό λίθιο, ανθρακικό κάλιο και ανθρακικό νάτριο.

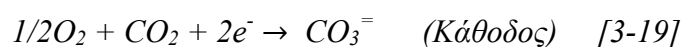
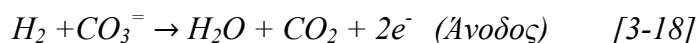
Θερμαίνεται στους 650 βαθμούς $^{\circ}\text{C}$ (περίπου 1200 βαθμούς F), τα άλατα τήκονται και να διεξάγει ανθρακικά ιόντα (CO_3) από την κάθοδο προς την άνοδο. Στην άνοδο, το υδρογόνο αντιδρά με τα ιόντα να παράγουν το νερό, το διοξείδιο του άνθρακα, και τα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια πηγαίνουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια στην πορεία, και να επιστρέψει προς την κάθοδο. Εκεί, το οξυγόνο από τον αέρα και το διοξείδιο του άνθρακος ανακυκλώνεται από την άνοδο αντιδρούν με τα ηλεκτρόνια προς σχηματισμό CO_3 ιόντα που τροφοδοτεί τον ηλεκτρολύτη και τη μεταφορά ρεύματος μέσω της κυψέλης καυσίμου.

Στο σχήμα παρακάτω δείχνει όλη την διαδικασία παραγωγής:

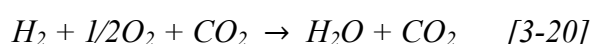


Σχήμα 3-9: Κυψέλη Καυσίμου Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (MCFC)

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν σε (MCFC) είναι:



και η συνολική αντίδραση κυψέλης είναι:



3.5.2 - Αποδοτικότητα

Όπως το αναφέραμε προηγουμένως, οι (MCFC) χρησιμοποιούνται σε μεγάλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι περισσότεροι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής κυψελών καυσίμου της τάξεως MW χρησιμοποιούν τις (MCFC) για παράδειγμα, οι μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ) σε συνδυασμό ψύξης και ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι κυψέλες καυσίμου τύπου (MCFC) μπορούν να εργαστούν σε ποσοστό μέχρι και 60% απόδοση για τα καύσιμα μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας, και στη συνολική βελτίωση της αποτελεσματικότητας μπορεί να είναι πάνω από το 80% στους σταθμούς ΣΗΘ όπου η θερμότητα της διαδικασίας χρησιμοποιείται επίσης.

Επίδραση της πίεσης

Αυξάνοντας την πίεση λειτουργίας μίας MCFC αποτελεί σε ενισχυμένη τάσεις κυψελών, λόγω της αύξησης της μερικής πίεσης των αντιδρώντων, της αύξησης στις διαλυτότητες αερίου, και της αύξησης των ποσοστών μεταφοράς μάζας.

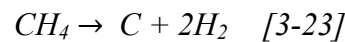
Αντίθετες τα οφέλη της αυξημένης πίεσης είναι οι συνέπειες της πίεσης για ανεπιθύμητες παρενέργειες, όπως η εναπόθεση άνθρακα (Boudouard αντίδραση):



και το σχηματισμό μεθανίου:



Επιπλέον, η αποσύνθεση του CH₄ του άνθρακα και H₂ είναι δυνατή:



αλλά αυτή η αντίδραση καταστέλλεται σε υψηλότερη πίεση.

Η εξάρτηση του δυναμικού της κυψέλης στην πίεση είναι πιο προφανές όταν εξετάζουμε από την εξίσωση *Nernst*. Για μια αλλαγή στην πίεση από P₁ έως P₂, η μεταβολή στον δυναμικού (VP) δίνεται:

$$V_p = \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{1,a}}{P_{2,a}} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{2,c}^{3/2}}{P_{2,c}^{3/2}} \quad [3-24]$$

όπου οι δείκτες "α" και "c" αναφέρονται στην άνοδο και την κάθοδο, αντιστοίχως. Σε μια (MCFC) με την άνοδο και καθόδου στην ίδια πίεση (δηλ., P₁ = P_{1,a} = P_{1,c}, P₂ = P_{2,c} = P_{2,c}) έχουμε:

$$V_p = \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_1}{P_2} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_2^{3/2}}{P_2^{3/2}} = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad [3-25]$$

και στους 650⁰C θα έχουμε:

$$\Delta V_p (mV) = 20 \ln \frac{P_2}{P_1} = (46 \log \frac{P_2}{P_1}) \quad [3-26]$$

Έτσι, παρατηρούμε μια δεκαπλάσια αύξηση στην πίεση της κυψέλης που αντιστοιχεί σε μία αύξηση 46 mV στην στον δυναμικό (στους 650 ° C).

Επίδραση της θερμοκρασίας

Πρώτον, η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας βελτιώνει δραματικά κινητική της αντίδρασης και συνεπώς δεν είναι απαραίτητο για την ενίσχυση αυτών με ένα καταλύτη ευγενούς μετάλλου. Η υψηλότερη θερμοκρασία καθιστά επίσης το κύτταρο λιγότερο επιρρεπείς σε δηλητηρίαση μονοξειδίου του άνθρακα από ό, τι τα συστήματα χαμηλότερη θερμοκρασία. Ως αποτέλεσμα, MCFC συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν σε μια ποικιλία διαφορετικών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του άνθρακα προερχόμενο καύσιμο αέριο, το μεθάνιο ή φυσικό αέριο, εξαλείφοντας την ανάγκη για εξωτερική μεταρρυθμιστές.

3.6 - Κυψελή Καυσίμου Στερεών Οξειδίων (SOFC)

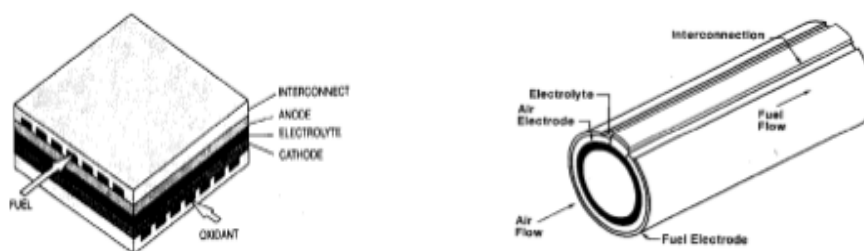
Όπως και οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), η κυψελή καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) απαιτεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, και η πιο συχνή εφαρμογή τους είναι σε μεγάλες στατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής. Οι υψηλές θερμοκρασίες ανοίγουν τη δυνατότητα για «συμπαράγωγή» που χρησιμοποιεί τη θερμότητα των αποβλήτων για την παραγωγή ατμού για τη θέρμανση χώρων, βιομηχανικής μεταποίησης ή σε ατμοστρόβιλο για να κάνουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια.

Οι (SOFC) όπως και τα περισσότερα άλλα είδη, παράγουν λίγη μόλυνση στην ατμόσφαιρα. Αν και απαιτούν μετατροπείς ισχύους για συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο ρεύμα, μπορούν να κατασκευάζονται σε σχετικά μικρό, αρθρωτές μονάδες. Το συμπαγές μέγεθος και την καθαριότητα των (SOFC) καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική για τις αστικές ρυθμίσεις όπως στην πόλη του Τοκίου, όπου 25 μονάδες kW είναι ήδη εγκατεστημένες.

Ο ηλεκτρολύτης των (SOFC) περιέχει ένα στερεό κεραμικό, όπως οξείδιο του ζirkονίου σταθεροποιημένο με οξείδιο του υτρίου, αντί για ένα υγρό. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους μας δίνει η δυνατότητα τα καύσιμα να μπορούν να αναμορφωθούν στο εσωτερικό της κυψέλης καυσίμου εξαλείφοντας την ανάγκη για εξωτερική αναμόρφωση και επιτρέποντας οι μονάδες να χρησιμοποιούνται από μια ποικιλία από καύσιμα υδρογονανθράκων. Επίσης, είναι

σχετικά ανθεκτικά σε μικρές ποσότητες θείου στο καύσιμο, σε σύγκριση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, και μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί με φωταερίου.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές γεωμετρίες των κυψελών (SOFC): η *επίπεδη*, *ίδιο-επίπεδη* και *μικρο-σωληνοειδής*. Στην *επίπεδη*, τα εξαρτήματα συναρμολογούνται σε επίπεδες στοίβες όπου ο αέρας και το υδρογόνο να μπορέσουν να ρέουν μέσω διαύλων που είναι ενσωματωμένα στην ανόδου και κάθοδο. Στο *μικρο-σωληνοειδής*, ο αέρας τροφοδοτείται στο εσωτερικό του από μια εκτεταμένη στερεό σωλήνα οξειδίου (το οποίο είναι σφραγισμένο στο ένα άκρο), ενώ το καύσιμο ρέει γύρω από το εξωτερικό του σωλήνα. Ο ίδιος ο σωλήνας σχηματίζει την κάθοδο και τα συστατικά των κυψελών είναι κατασκευασμένη σε στρώσεις γύρω από το σωλήνα.



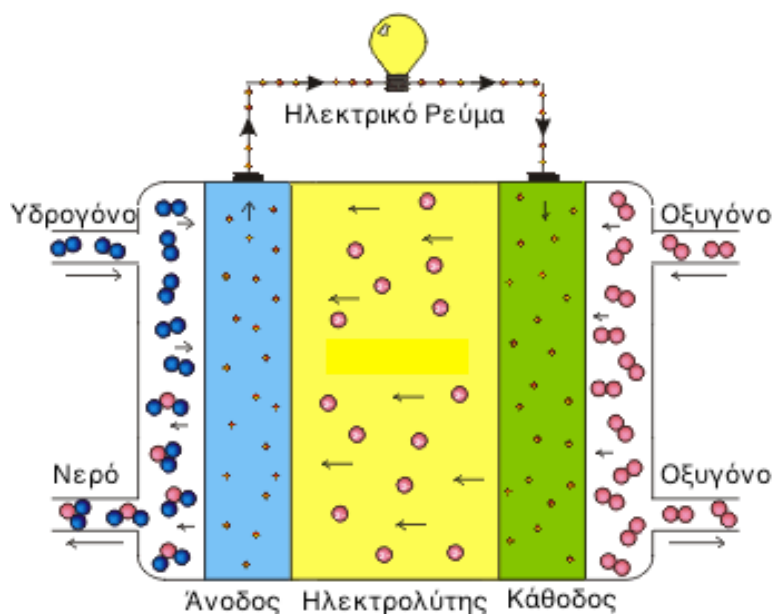
Εικόνα 3-1: Γεωμετρικές διατάξεις κυψέλης (SOFC), επίπεδη και σωληνοειδής αντιστοίχα

Ένα πλεονέκτημα των (SOFC) είναι ότι η κινητική της αντίδραση είναι βελτιωμένη δίνοντας την δυνατότητα της αφαίρισης μεταλλικού καταλύτη. Υπάρχουν, ωστόσο, ορισμένα μειονεκτήματα (SOFC): αυτές τις κυψέλες χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να ξεκινήσουν και να φθάσει σε θερμοκρασία λειτουργίας, πρέπει να είναι κατασκευασμένα με ισχυρή υλικό, ανθεκτικό στη θερμότητα, και θα πρέπει να θωρακίζεται για να αποφευχθεί η απώλεια θερμότητας.

3.6.1 – Βασικές Αρχές Λειτουργίας

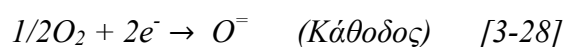
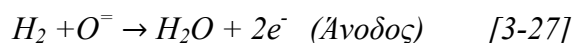
Μια κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίου (SOFC) χρησιμοποιεί ένα σκληρό κεραμικό ηλεκτρολύτη αντί για ένα υγρό και λειτουργεί σε θερμοκρασίες πάνω από 1000⁰C (περίπου 1800 βαθμών F). Ένα μίγμα από οξείδιο του ζirkονίου και οξείδιο του ασβεστίου σχηματίζουν ένα κρυσταλλικό πλέγμα, ακόμα και άλλοι συνδυασμοί οξειδίων έχουν επίσης μπορούν χρησιμοποιηθούν ως ηλεκτρολύτες. Ο στερεός ηλεκτρολύτης είναι επικαλυμμένη και στις δύο πλευρές με εξειδικευμένες πορώδη υλικά ηλεκτροδίων.

Σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίας λειτουργίας, τα ιόντα οξυγόνου (με αρνητικό φορτίο) μεταναστεύουν μέσω του κρυσταλλικού πλέγματος. Όταν ένα αέριο καύσιμο που περιέχει υδρογόνο διέρχεται πάνω από την άνοδο, μια ροή αρνητικά φορτισμένα ιόντα οξυγόνου κινείται κατά μήκος του ηλεκτρολύτη για την οξείδωση του καυσίμου. Το οξυγόνο παρέχεται, συνήθως από τον αέρα, στην κάθοδο. Τα ηλεκτρόνια που παράγονται στην άνοδο πηγαίνουν μέσα από ένα εξωτερικό φορτίο στην κάθοδο, συμπληρώνοντας το κύκλωμα και την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος.

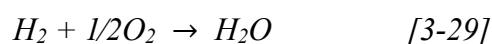


Σχήμα 3-10: Η κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν σε (SOFC) είναι:



και η συνολική αντίδραση κυψέλης είναι:



3.6.2 - Αποδοτικότητα

Η θερμοδυναμική αποδοτικότητα των (SOFC) σε τάση ανοικτού κυκλώματος είναι χαμηλότερη από των (MCFC) και (PAFC) , οι οποίες χρησιμοποιούν H₂ και O₂ σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Εντούτοις, όπως αναφέρεται προηγουμένως, η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας του (SOFC) είναι ευεργετική στη μείωση πόλωση.

Επίδραση της πίεσης

Οι (SOFC), όπως και οι (PAFC) και οι (MCFC), παρουσιάζουν βελτιωμένη απόδοση με την αύξηση της πίεσης των κυψέλων. Η ακόλουθη εξίσωση προσεγγίζει την επίδραση της πίεσης στην απόδοση κυψέλης στους 1000 ° C (1832 °F):

$$\Delta V_P (mV) = 59 \log \frac{P_2}{P_1} \quad [3-30]$$

όπου τα P₁ και P₂ είναι διαφορετικές πιέσεις κυψέλων. Η παραπάνω συσχέτιση βασίστηκε στην υπόθεση ότι οι υπερδυναμικά κατά κύριο λόγο επηρεάζονται από πιέσεις αερίου και ότι αυτά υπερδυναμικά μειώνεται με την αυξημένη πίεση.

Επίδραση της θερμοκρασίας

Η απότομη μείωση στην τάση στοιχείου ως συνάρτηση της πυκνότητας ρεύματος σε 800⁰C (1472⁰F) είναι μια εκδήλωση της υψηλής ωμικής πόλωσης του στερεού ηλεκτρολύτη στη θερμοκρασία αυτή. Η ωμική πόλωση μειώνεται καθώς η θερμοκρασία λειτουργίας αυξάνεται σε 1050⁰ C, και αντίστοιχα, η πυκνότητα ρεύματος σε μια δεδομένη τάση αυξάνει.

Το κέρδος τάσης (V_T) σχετικά με τη θερμοκρασία είναι μια ισχυρή συνάρτηση της θερμοκρασίας και της πυκνότητας ρεύματος, όπως φέεται παρα κάτω:

$$V_T(\text{mV}) = 1.3(T_2 - T_1)^0 \text{C} \quad [3-31]$$

Η εξίσωση αυτή αναφέρει την λειτουργία στους 1000 ° C, 160 mA / cm, και μία σύνθεση καυσίμου από 67% των H₂, 22% των CO και 11% H₂O.

Κεφάλαιο 4
Χρήση Κυψέλων Καυσίμου για
Στατικές Εφαρμογές

Κεφάλαιο 4 - Χρήση Κυψέλων Καυσίμου για Στατικές Εφαρμογές

4.1 - Γενικά

Όπως έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο 2, υπάρχουν πολλές εφαρμογές κυψέλων καυσίμου που κατηγοριοποιούνται σε τρεις μεγάλους τομείς: φορητή ηλεκτροπαραγωγή, στατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και μέσα μεταφοράς. Θα περιλαμβάνει επίσης μια κατηγορία για τα καύσιμα και τις υποδομές, που αφορούν την παραγωγή, τη διανομή, την αποθήκευση και τη διανομή των καυσίμων για τις κυψέλες καυσίμου, καθώς αυτό είναι ζωτικής σημασίας για την υλοποίηση τεχνολογία κυψέλων καυσίμου.

Σε αυτό το κεφάλαιο, όμως θα παρουσιάζουμε πιο αναλυτικά την χρήση κυψέλων καυσίμου για στατικές εφαρμογές (στατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας). Μία τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί στα τελευταία χρόνια λόγω της δύναμης του εμπορίου για αυτό το κλάδο και την μεγάλη ζήτηση για μία κοινούργια λύση για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Πρώτα ας ορίσουμε τον όρο «Στατικές Κυψέλες Καυσίμου» στα αγγλικά *stationary fuel cells* ως μονάδες κυψέλων καυσίμου που παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια και μερικές φορές τη θερμότητα, αλλά δεν έχουν σχεδιαστεί για να μετακινηθούν. Υπάρχουν δύο κυρίες στατικές εφαρμογές κυψέλων καυσίμου που είναι η συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (*combined heat and power*) και η κατανεμημένη παραγωγή (*distributed generation*).

4.2 - Τεχνολογία Κατανεμημένης Παραγωγής και Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (Distributed Generation and Combined Heat & Power)

Ένα σύστημα κατανεμημένης παραγωγής (DG) περιγράφει τις μικρές και επί τόπου συστήματα που παράγουν όλο ή μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που μια εγκατάσταση πρέπει να λειτουργήσει, αντικαθιστώντας από τη ηλεκτρικής ενέργειας

που αγοράζεται από το δίκτυο. Το (DG) συστήματα περιλαμβάνουν κυψελών καυσίμου, κινητήρες, στρόβιλους/μικροστρόβιλοι, και άλλες τεχνολογίες.

Όταν μιλάμε για κατανεμημένη παραγωγή (DG) αναφέρουμε γενικά σε μικρές γεννήτριες, ξεκινώντας από μερικά kW έως 10 MW, είτε συνδέονται με το δίκτυο ή να χρησιμοποιηθεί ως αυτόνομο σε μια απομονωμένη περιοχή. Κανονικά μικρές (DG) , στην κλίμακα 5-250 kW εξυπηρετούν πολυκατοικίες μέχρι σε μεγάλα κτίρια.

Οι (DG) τεχνολογίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ανανεώσιμες και μη ανανεώσιμες τεχνολογίες. Οι ανανεώσιμες ενεργειακές τεχνολογίες είναι γενικά βιώσιμη και να προκαλούν ελάχιστη και σε πολλές περιπτώσεις καμία περιβαλλοντική ζημία και περιλαμβάνουν: ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια, ηλιακή θερμική ενέργεια, αιολική, γεωθερμική ενέργεια, βιομάζα, το βιοαέριο και τις κύψελες καυσίμου υδρογόνου. Οι Μη ανανεώσιμες ενεργειακές τεχνολογίες αναφέρεται σε αυτές που χρησιμοποιούν κάποιο είδος ορυκτών καυσίμων, όπως βενζίνη, ντίζελ, πετρέλαιο, προπάνιο, το μεθάνιο, το φυσικό αέριο ή τον άνθρακα ως πηγή ενέργειας τους.

Επίσης δεν μπορούμε να θεωρήσουμε τα (DG) που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα όπως τον (κινητήρα εσωτερικής καύσης, αεριοστρόβιλο καύσης, το αστρόβιλο αερίου, μικρο-στρόβιλο και τις κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν κάποιο είδος ορυκτών καυσίμων «φυσικό αέριο» για την παραγωγή υδρογόνου) βιώσιμες πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επειδή η πηγή ενέργειας τους δεν ανανεώνεται.

Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου μπορεί να ανήκει σε οποιαδήποτε από τις παραπάνω κατηγορίες. Εάν το καύσιμο υδρογόνου που απαιτείται για να τροφοδοτήσει η κυψέλη καυσίμου παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, η μονάδα κυψελών καυσίμου θεωρείται ανανεώσιμη ενεργειακή τεχνολογία. Για παράδειγμα η αιολική και η ηλιακή ενέργεια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου για να τροφοδοτήσουν μια συστοιχία κυψελών καυσίμου. Αντιθέτως, εάν το υδρογόνο παράγεται από ορυκτά καύσιμα (π.χ., το φυσικό αέριο ή μεθάνιο), η κυψέλη καυσίμου θεωρείται μη ανανεώσιμη ενεργειακή τεχνολογία.

Το σύστημα κατανεμημένης παραγωγής κυψελών καυσίμου (DG) μας μπορεί να μας προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα όπως: 1) Παροχή ισχύος στο σημείο χρήσης. Αντίθετα από τα συμβατικά συστήματα που η κεντρική παραγωγή περιλαμβάνει την παραγωγή ενέργειας σε μια μακρινή θέση και χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρικό

μετάδοσης και υποδομές για να παραδώσει την εξουσία στον τελικό χρήστη. ι) Βελτιώνει την ενεργειακή ασφάλεια με τη μείωση ή ακόμη και την εξάλειψη της εξάρτησης από το ηλεκτρικό δίκτυο. ιι) Βελτιώνει την ποιότητα της ισχύος και την αξιοπιστία με την αποφυγή εγγενών αιχμών στην μεταφορά και στην μετάδοση, Λόγω των μεγάλων αποστάσεων πρέπει να διαβιβάζονται και σε πολλούς προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας και των χρηστών προσθέτοντας ή αφαιρώντας ενέργεια από το δίκτυο σε διαφορετικές τοποθεσίες και τις ώρες της ημέρας.

Μέσω προσεκτικού σχεδιασμού με επιλεγμένα ορυκτά καύσιμα με γνώμονα (DG) μπορεί να κατασκευαστεί για να οξειδώνουν μερικά από τα ορυκτά καύσιμα (με το συνδυασμό του οξυγόνου) για την παραγωγή θερμότητας. Τέτοιες καταστάσεις λειτουργίας, είτε στην ηλεκτρομηχανική ή ηλεκτροχημικές (κυψέλες καυσίμου), τα ονομάζουμε ως συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP) λειτουργία.

Τα συστήματα συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (CHP) είναι ένα υποσύνολο του (DG). Επίσης, είναι μια αποτελεσματική, καθαρή και αξιόπιστη προσέγγιση για την παραγωγή ενέργειας και θερμικής ενέργειας από μια μόνο πηγή καυσίμου. Το (CHP) παράγει ταυτόχρονα ηλεκτρική και θερμική ενέργεια σε πολύ υψηλές αποδόσεις και χαμηλότερο κόστος από ό,τι τα συμβατικά συστήματα.

Με την εγκατάσταση ενός συστήματος συμπαραγωγής για την κάλυψη των θερμικών και ηλεκτρικών φορτίων βάσης των εγκαταστάσεων, (CHP) μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη λειτουργική αποτελεσματικότητα του μηχανισμού και να μειώσει το κόστος της ενέργειας. Την ίδια στιγμή, (CHP) μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τα οποία συμβάλλουν στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή.

4.3 - Χρήση Κυψέλων Καυσίμου για Κατανεμημένη Παραγωγή

Από τα έξι είδη κυψέλων καυσίμου μόνο μερικές χρησιμοποιούμε για την κατάλληλη εφαρμογή της κατανεμημένης παραγωγής, που είναι η κυψελή καυσίμου πολυμερών ηλεκτρολυτών (PEMFC), κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), κυψελή καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) και η κυψελή καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) [15].

4.3.1 - Χρήση των Κυψελών Καυσίμου Πολυμερών Ηλεκτρολυτών (PEMFC)

Οι (PEMFC) μπορούν να λειτουργήσουν σε υδρογόνο πλούσιο σε μίγμα καυσίμου που παράγεται από ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας, το φυσικό αέριο, βενζίνη και φυσικό αέριο. Στην πράξη, (PEMFC) απαιτούν πολύ καθαρό υδρογόνο για την πρόληψη της δηλητηρίασης των καταλυτών πλατίνας από τις ακαθαρσίες, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (ppm επίπεδα) και θειούχες ενώσεις (ppb επίπεδα). Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται υπερ-καθαρό (> 99,999%) υδρογόνο για PEMFC συστημάτων.

Οι ερευνητές αξιολογούν πρόσφατα την παραγωγή, την μεταφορά, ακαι την αποθήκευση υδρογόνου που μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του μελλοντος για καταναμημένη παραγωγή βασισμένη στα PEMFC συστήματα.

Αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα των επιλογών παραγωγής του υδρογόνου για καταναμημένα συστήματα, τα (PEMFC) συστήματα θα απαιτήσουν ένα εκτεταμένο δίκτυο διανομής υδρογόνου μεταξύ και εντος των πόλεις και κωμοπόλεις, καθώς και κατά μήκος των αυτοκινητοδρόμων. Υπάρχουν, βέβαια και άλλες επιλογές για την μεταφορά του υδρογόνου, μπορούμε να το μεταφέρουμε σε συμπιεσμένη μορφή αερίου μέσω ρυμουλκούμενα σωλήνων ή αγωγών, και σε υγρή μορφή ή χημικά υδριδίου μέσω φορτηγά, φορτηγίδες, ή σιδηροδρομικώς.Εναλλακτικά, η παραγωγή θδρογόνου μπορεί να συμβεί σε μικρότερη κλίμακα κοντά ή στο σημείο της χρήσης ώστε να αποφύγουμε τη αποθήκευση και τη μεταφορά από μια κεντρική μονάδα.

Αν και η αεριοποίηση του άνθρακα είναι προβλεπόμενη να είναι χαμηλό κόστος παραγωγής δεν είναι οικονομικά για το μετρό των απαιτήσεων του υδρογόνου που είναι μικρότερη από περίπου 100 τόνων ημερησίως (αρκετή για να δημιουργήσει 69 MW), και αυτό οφείλεται στην κακή επεκτασιμότητα της παραγωγής και της μεγάλης κλίμακας της παροχής υδρογόνου. Ως εκ τούτου, η αεριοποίηση του άνθρακα και άλλες επιλογέ δεν αναμένεται να τροφοδοτήσουν ένα σύστημα PEMFC για καταναμημένη παραγωγή μέχρι να αναπτύσσεται.[10]

Αντιθέτως, η καταναμημένη παραγωγή μέσω της επιτόπου μεταρρύθμιση υδρογόνου θα είναι το πιο ελκυστική κι βραχυπρόθεσμη επιλογή για στατικές PEMFC συστήματα.

4.3.2 - Χρήση των Κυψελών Καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)

Οι MCFCs είναι υψηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν στους 600 ° C έως 700 ° C (1100 °F έως 1300 °F), χρησιμοποιούν ένα τηγμένου ανθρακικού άλατος-ηλεκτρολύτη που διατηρείται σε μία κεραμική μήτρα. Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3, Οι κυψέλες τύπου (MCFC) ανακυκλώνουν το διοξείδιο του άνθρακα από το ρεύμα των καυσαερίων για τη διατήρηση του ηλεκτρολύτη. Σε αντίθεση με χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου (όπως PEM κυψέλες καυσίμου) Οι MCFC μπορεί να μεταρρυθμίσει (δηλαδή, μετατροπή σε υδρογόνο) καύσιμα όπως το φυσικό αέριο μέσα στη στοίβα κυψελών καυσίμου, μειώνοντας το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Λόγω της υψηλής ανεκτικότητά τους για το μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα, οι προγραμματιστές είναι αισιόδοξοι ότι οι MCFC θα είναι σε θέση να μεταρρυθμίσει εσωτερικά ακόμα και αεριοποίησης άνθρακα υποθέτοντας ότι το θείο, τα σωματίδια και άλλες ακαθαρσίες μπορούν να αντιμετωπιστούν.

Υπάρχει ένα σημαντικό ενδιαφέρον πάνω στην αωάπτυξη των MCFC στις ΗΠΑ, στην Ιταλία, και σε πολλές άλλες χώρες όπως στην Ιαπωνία οι οποίες έχουν τον στόχο τη δημιουργία μία καταναμημένης παραγωγής μεγέθων των 250 kW και ακόμα κι σε MW.

Στις ΗΠΑ και σε πολλά μέρη του κόσμου υπάρχουν περισσότερα από 50 περιοχές που ήδη παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας κυψέλες καυσίμου πάνω από με 124 GWh σε παγκόσμιο επίπεδο[11].

Τυπικές αποδόσεις των MCFC είναι από 40% έως 50% (υψηλή τιμή θέρμανσης), που αντιστοιχεί σε περίπου 45% έως 55% με βάση την κατώτερη θερμογόνο. Οι (MCFC) απορρίπτουν θερμότητα σε μία συγκεκριμένη υψηλή θερμοκρασία, καθιστώντας εφικτό να προσθέσετε ένα πάτου κύκλου (τυπικά βάζουμε ένα αεριοστρόβιλο) ενισχύοντας ηλεκτρικές αποδόσεις στην παραγωγή από 60% έως 70%, που αντιστοιχεί σε περίπου 65% έως 75% επί τη βάσει κατώτερη θερμογόνο. Η απόδοση διαφέρουν ανάλογα με τον κατασκευαστή και την ικανότητα.

Επομένως, οι (MCFC) μπορούν να εξοικονομήσει περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με τη χρήση του δικτύου. Ξερόντας, επίσης, ότι οι κυψέλες MCFC σε

υψηλές θερμοκρασίες απορρίπτει θερμότητα μπορούμε να εκμεταλλευτούμε αυτό για χρήση συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP) συστήματα.

Παρά το υψηλό κόστος των MCFC σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες κατανεμημένης παραγωγής (GB), έχουμε πολύ καλά αποτελέσματα στα τελευταία χρόνια με την χρήση των MCFC, όπως και η υψηλή ηλεκτρική απόδοση και εξαιρετικά χαμηλές εκπομπές ρύπων. Όμως, σήμερα η καταλληλότερη χρήση των MCFC είναι για τις μεγάλες εγκαταστάσεις και βιομηχανικές εφαρμογές κατανεμημένης παραγωγής.

4.3.3 - Χρήση των Κυψελών Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC)

Οι (PAFC) χρησιμοποιεί φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτη, που περιέχεται μέσα σε μια κεραμική μήτρα, όπως το καρβίδιο του πυριτίου. Οι κυψέλες τύπου PAFC μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες από 220°C (430 °F) και, κατά συνέπεια, είναι λιγότερο ευαίσθητες σε δηλητηρίαση μονοξειδίου του άνθρακα σε σύγκριση με τις (PEMFC).

Λόγω της ευαισθησίας σε δηλητηρίαση μονοξειδίου του άνθρακα η επεξεργασία καυσίμων απλοποιείται. Για παράδειγμα, η μετατροπή των καυσίμων υδρογονανθράκων όπως το φυσικό αέριο σε υδρογόνο. Αν και ακόμη το θείο πρέπει να αφαιρεθεί από το καύσιμο. Το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας είναι αρκετά χαμηλή ώστε να επιτραπεί την χρήση των υψηλών τιμών θερμοκρασίας υλικών για τη κατασκευή της μονάδας παραγωγής. Αντίθετα, οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες, ένας βασικός παράγοντας που εμπόδισε την ανάπτυξή τους [12].

Η τεχνολογία των κυψελών (PAFC) διαθέτει το πιο εκτεταμένο ιστορικό για επιχειρησιακή εμπειρία από οποιαδήποτε από τις κυψέλες καυσίμου τεχνολογίας με εγκατεστημένα περισσότερα από 300 μονάδες κατανεμημένες παραγωγής (κυρίως 100 kW έως 200 kW) παγκοσμίως. Μεμονωμένες μονάδες έχουν λειτουργήσει πάνω από 65.000 ώρες, και η εγκατεστημένη βάση (PAFC) έχουν καταγραφεί περισσότερα από 7 εκατομμύρια ώρες λειτουργίας με μέση διαθεσιμότητα ξεπερνώντας το 95%.

Το ενδιαφέρον για αυτή την τεχνολογία έχει μειωθεί το 2004 για τους εξής λόγους:

- Οι κυψέλες PAFC κοστίζουν περισσότερο από τις εναλλακτικές τεχνολογίες κυψελών καυσίμου που αναπτύσσονται
- Περιορισμένες δυνατότητες για την αύξηση της αποτελεσματικότητας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδα που απαιτούνται για την ευρεία χρήση σε εφαρμογές (GB)
- Οι ανησυχίες σχετικά με την αξιοπιστία και την ζωή ως επακόλουθο με το υγρό ηλεκτρολύτη.

Πρόσφατα, όμως, στα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον για τις PAFC ξαναγύρισε στους επιστημονικούς χώρους λόγο ότι: Μερικές ανταγωνιστικές τεχνολογίες κυψελών καυσίμου δεν έχουν ακόμη αποδειχθεί το κόστος και την απόδοση για την ευρεία χρήση σε εφαρμογές καταναλωτικής παραγωγής και για την αυξημένη εξειδικευμένη ενδιαφέρον της αγοράς σε κυψέλες καυσίμου στο εύρος από 100 έως 1000 kW για τη (GB) εφαρμογές.

Οι αποδόσεις των (PAFC) κυμαίνεται από 32% έως 36% . Πρόσφατες Μελέτες δείχνουν ότι η ηλεκτρική παραγωγή απόδοση σε αυτό το εύρος μπορεί να προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας όταν χρησιμοποιούνται στον συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Ολοκληρώντας οι (PAFC) είναι κατάλληλες για καταναλωτικές εφαρμογές και συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας μεγέθων τουλάχιστον 100 kW , επίσης είναι κατάλληλο για μεσαίου και μεγάλου μεγέθους όπως εμπορικά κτίρια.

4.3.4 - Χρήση των Κυψελών Καυσίμου Στερεών Οξειδίων (SOFC).

Για τις περισσότερες κυψέλες τύπου (SOFC), το υδρογονάνθρακο πρέπει να υποβληθούν σε επεξεργασία, δηλαδή, μετατρέπεται σε υδρογόνο, πριν τροφοδοτηθεί στο σύστημα κυψελών καυσίμου. Η επεξεργασίας καυσίμων για κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη (SOFC) είναι απλούστερη από ό,τι για τις κυψέλες χαμηλής θερμοκρασίας, όπως οι κυψελίδες καυσίμου τύπου PEM, γιατί οι (SOFC) δεν έχουν δηλητηριαστεί από τα ίχνη της CO. Αυτό επιτρέπει την απλοποίηση του σχεδιασμού της επεξεργασίας καυσίμου. Επιπλέον, οι ερευνητές αξιοποιώντας το συνδυασμό της υψηλής θερμοκρασίας και της διαθεσιμότητας του νερού στην άνοδο (και τα δύο μοναδικά χαρακτηριστικά των (SOFC) να σχεδιάσει ηλεκτρόδια που συμβάλλουν για

να τροφοδοτήσουν την επεξεργασία επιτρέποντας κάποια ή το σύνολο της επεξεργασίας καυσίμων να λάβει χώρα στη στοίβα. Όπως και με άλλες κυψέλες καυσίμου, οι άνοδοι SOFC δηλητηριάζονται από θείο.

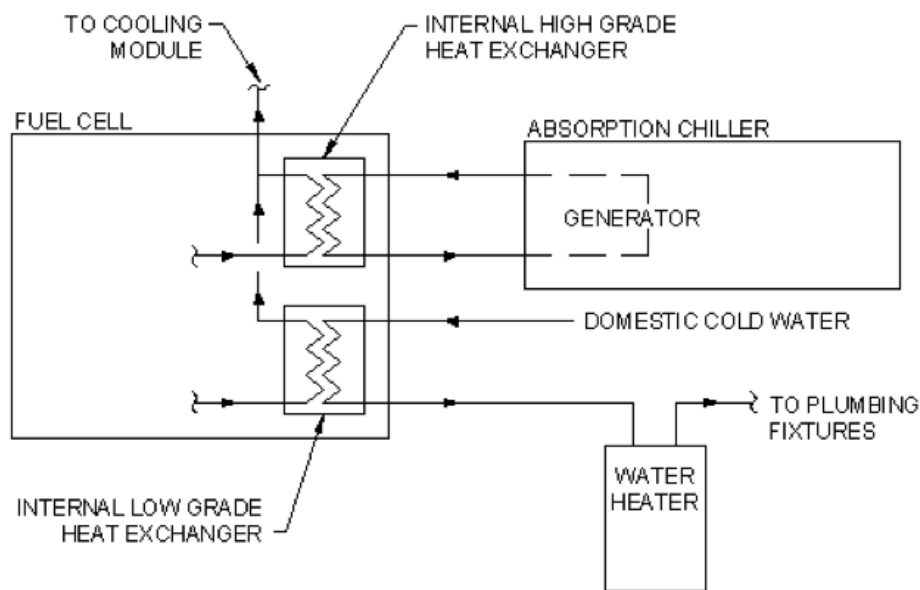
Εάν η συνέχιση των αναπτυξιακών πειραμάτων πετύχει, θα έχουμε ως αποτέλεσμα η υψηλή απόδοση, χαμηλές εκπομπές καυσαερίων, αθόρυβη λειτουργία και επίσης θα έχουμε την δυνατότητα από την υψηλή θερμοκρασία να αποβάλλει θερμότητα να χρησιμοποιούμε για κατανεμημένη παραγωγή και για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Ειδικά, η υψηλή απόδοση των (SOFC) θα χαμηλώσει το κόστος για τις στατικές εφαρμογές. [13]

4.4 - Χρήση Κυψέλων Καυσίμων για Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας

Τα υποπροϊόντα της ηλεκτροχημικής αντίδρασης μίας κυψέλης καυσίμου είναι θερμότητα και νερό. Το παραγόμενο νερό είναι ελάχιστη και ανέρχεται σε ατμούς νερού που είναι παρούσα στην απορριπτόμενη θερμότητα. Η συνολική αξία του συστήματος κυψελών καυσίμου αυξάνεται σημαντικά εάν η απορριπτόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται. Ένα σύστημα συμπαραγωγής (ΣΗΘ) αυξάνει την αποδοτικότητα της κυψέλης καυσίμου μειώνοντας παράλληλα την ισχύ που απαιτείται για τον εξοπλισμό κλιματισμού. Η αποδοτικότητα παροχής ρεύματος μίας κυψέλης καυσίμου κυμένεται από 35% έως 50%. Όταν χρησιμοποιείται σε μια εφαρμογή συμπαραγωγής (ΣΗΘ), η απόδοση μπορεί να φτάσει μέχρι και 90% .

Τα συστήματα κυψελών καυσίμου κατασκευάζονται με χαμηλής ποιότητας και υψηλής ποιότητας ανταλλαγής θερμότητας για την ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας. Λόγω του υψηλού βαθμού απόρριψη θερμότητας από υψηλές θερμοκρασίες κυψελών καυσίμου, όπως η (PAFC), (MCFC) και (SOFC). Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ζεστό νερό και ατμό που παράγουν εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας όπως ψύκτες απορρόφησης για την παραγωγή κρύου νερού.

Η χαμηλή ποιότητα απορριπτόμενης θερμότητας μπορεί να εφαρμοστεί σε συμπληρωματική θέρμανση του νερού οικιακής χρήσης για την εξυπηρέτηση των υδραυλικών εγκαταστάσεων. Παρα κάτω σχήμα 4-1, δείχνουμε ένα σύστημα κυψελών καυσίμου με υψηλής και χαμηλής ποιότητας εναλλάκτες θερμότητας.



Σχήμα 4-1: Διάγραμμα Εφαρμογών Απορριπτόμενη θερμότητα

Από τους εναλλάκτες θερμότητας, η περίσσεια θερμότητας παραδίδεται σε ψυκτική μονάδα του συστήματος κυψελών καυσίμου, όπου η θερμότητα απορρίπτεται. Για παράδειγμα, *PureCell Model UTC Power400* έχει ένα συνοδευτικό ψυκτική που απορρίπτει αχρησιμοποίητη θερμότητα.

Πίνακας 4-1: Κυψέλες Καυσίμου Χαμηλή και υψηλή ανάκτηση θερμότητα [14]

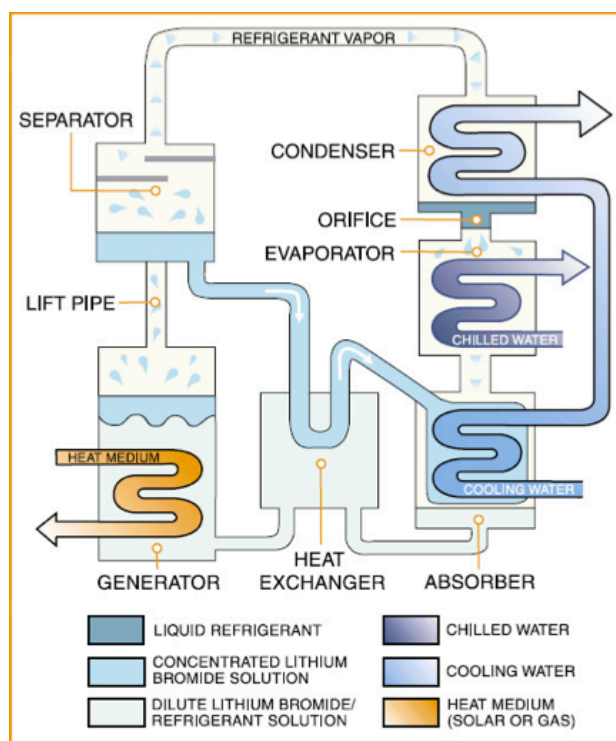
Κυψέλη Καυσίμου	Τύπος	Παραγόμενη Ισχύς (kW)	Ανάκτημένη θερμότητα			
			Χαμηλός Βαθμός		Υψηλός Βαθμός	
			Θερμοκρασία (°F)	Διαθέσιμη θερμότητα (Btuh)	Θερμοκρασία (°F)	Διαθέσιμη θερμότητα (Btuh)
Pure Cell400	PAFC	400	140	1,708,00	250	785,000
DFC300	MCFC	300	120	808,000	250	480,000

4.4.1 - Ψύκτες Απορρόφησης σε Ένα Σύστημα Κυψέλης Καυσίμου για ΣΗΘ

Σε αντίθεση με τον κύκλο συμπίεσης ατμού που χρησιμοποιείται από ηλεκτροκίνητους ψύκτες, η ενέργεια από τη αποβαλλόμενη θερμότητα οδηγεί έναν κύκλο ψύξης με απορρόφηση εντός του ψύκτη απορρόφησης. Η θερμική ενέργεια

μεταφέρεται από την πηγή θερμότητας στο νεροχύτη θερμότητας μέσω ενός απορροφητικού υγρού και ενός ψυκτιού. Ένα κοινό ψυκτικό απορροφητικό συνδυασμός που χρησιμοποιείται για τους ψύκτες απορρόφησης είναι το νερό βρωμιούχου λιθίου. Ο ψύκτης ψύχεται με την απορρόφηση και απελευθέρωση υδρατμού μέσα και έξω από το διάλυμα βρωμιούχου λιθίου.

Η διαδικασία ψύξης ενός ψύκτη απορρόφησης δείχνεται στο σχήμα 4-2. Η θερμότητα παρέχεται πρώτα στη γεννήτρια, το υδρατμών που παράγεται στη γεννήτρια οδηγείται μακριά στο συμπυκνωτή. Το ψυχόμενο υδρατμούς διέρχεται μέσω μιας βαλβίδας εκτόνωσης, η οποία μειώνει την πίεση του. Από εκεί, ο ατμός τροφοδοτείται σε έναν εξατμιστήρα. Η πραγματική ψύξη λαμβάνει χώρα στον εξατμιστή, όπου θερμότητα περιβάλλοντος προστίθεται από την επιστροφή κρύου νερού. Το θερμαινόμενο, χαμηλή πίεση ατμού στη συνέχεια ταξιδεύει στον απορροφητή, όπου συνδυάζεται με βρωμιούχο λίθιο και γίνεται ένα υγρό χαμηλής πίεσεως. Αυτό το διάλυμα κατόπιν αντλείται σε υψηλή πίεση και στη γεννήτρια να επαναλάβει τη διαδικασία.



Σχήμα 4-2: Επίδραση στην διαδικασία ψύξης ενός ψύκτη απορρόφησης

Οι ψύκτες απορρόφησης είναι ταξινομημένοι από τον αριθμό των γεννητριών που έχουν. Υπάρχουν μονόκλινοι, δίκλινοι και τρίκλινοι ψύκτες απορρόφησης ισχύος. Ωστόσο, τρίκλινοι ψύκτες απορρόφησης ισχύος είναι ακόμα υπό εξέλιξη. Η επιλογή μιας διαμόρφωσης ψύκτη απορρόφησης προσδιορίζεται από τη θερμοκρασία απορριπτόμενη θερμότητα. Η θερμοκρασία θερμότητα των αποβλήτων θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλή για να δημιουργήσει ατμό ψυκτικού στον κύκλο ψύξης απορρόφησης.

Η απορριπτόμενη θερμότητα υπό τη μορφή ατμού ή ζεστού νερού μπορεί να παρέχεται σε ένα ψύκτη απορρόφησης. Μία μόνο-επίδραση ψύκτη απορρόφησης απαιτεί υψηλή θερμοκρασία ζεστού νερού κοντά ή πάνω από το σημείο βρασμού (υπό πίεση). Περίπου 17.000 Btuh της υψηλής θερμοκρασίας ζεστού νερού ή ατμού χαμηλής πίεσης εξυπηρετούν ένα μόνο-ψύκτη απορρόφησης ισχύος είναι σε θέση να παράγει ένα τόνο, ή 12.000 Btuh, της ψύξης. Η διπλή-επίδραση ψυκτών απορρόφησης απαιτούν 10.000 Btuh του ατμού προκειμένου να παράγει ένα τόνο ψύξης.

Οι κυψέλες καυσίμου που παράγουν απορριπτόμενη θερμότητα μπορεί να παράγει ζεστό νερό ή ατμό να χρησιμοποιηθεί είτε με μονό ή διπλό επίδραση ψυκτών απορρόφησης περιλαμβάνονται και οι τύποι των (SOFC) και (MCFC).

Εάν θέλουμε μία υψηλή θερμοκρασία θερμικής ανάκτησης μπορούμε να επιλέξουμε το μοντέλο κυψέλης καυσίμου φωσφορικού οξέος, ένα πολύ γνωστό μοντέλο είναι το Purecell Μοντέλο UTC Power400 που μπορεί να παράγει 250°F ζεστό νερό για να χρησιμοποιηθεί με μόνο-ψύκτη απορρόφησης μόνη-επίδραση. Οι (PEMFC) δεν παράγουν απορριπτόμενη θερμότητα με υψηλές θερμοκρασίες για να εξυπηρετήσει ένα ψύκτη απορρόφησης.

Το ποσό της απορριπτόμενης θερμότητας που παράγεται από μία κυψέλη καυσίμου ενδέχεται να μην επαρκεί για ενός ψύκτη απορρόφησης για την κάλυψη των αναγκών ψύξης ενός χώρου. Καμία από τις κυψέλες καυσίμου που παρατίθενται στον πίνακα 4-1 είναι σε θέση να παρέχει αρκετή απορριπτόμενη θερμότητα, προκειμένου να δροσίσει ένα χώρο. Ο πίνακας 4-2 δίνει λεπτομέρειες για το πώς αυτό το συμπέρασμα έγινε.

Πίνακας 4-2 : Απορριπτόμενη θερμότητα που απαιτείται από τις κυψέλες καυσίμου για να παρέχει ψύξη [14]

Κυψέλη Καυσίμου	Τύπος	Παραγόμενη Ισχύς (kW)	Παραγόμενη θερμότητα από ηλεκτρικές συσκευές (Btuh)	Απορριπτόμενη θερμότητα με Ψύκτης απορρόφησης μονο-Επίδραση (Btuh)	Διαθέσιμη Ανάκτημένη Θερμότητας (Btuh)
					Μεγάλος Βαθμός
Pure Cell400	PAFC	400	1,364,800	1,933,467	785,000
DFC300	MCFC	300	1,023,600	1,450,100	480,000

Θεωρώντας την κύψη μοντέλο PureCell 400, ξέρουμε ότι το σύνολο της ενέργειας που παρέχεται σε ένα κτίριο μετατρέπεται σε θερμότητα και εκτοξεύεται στον περιβάλλοντα χώρο. Αυτή η κυψέλη καυσίμου στην καλύτερη απόδοση θα παρέχει 400 kW ισχύος σε ηλεκτρικές συσκευές. Αυτό είναι ίσο με ένα ψυκτικό φορτίο των 1.364.800 Btuh (1 W ανά 3.412 Btuh). Αυτό το ψυκτικό φορτίο βασίζεται εντελώς εκτός του κέρδους θερμότητας από ηλεκτρικές συσκευές. Το πραγματικό φορτίο ψύξης του κέντρου δεδομένων θα είναι μεγαλύτερη από την τιμή αυτή, διότι θα πρέπει να περιλαμβάνει την αύξηση της θερμότητας από τους ανθρώπους και τα εξωτερικά φορτία του κτιρίου. Εάν μία μόνο-επίδρασης ψύκτη απορρόφησης θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν με το PureCell 400, σε σύνολο 1.933.467 Btuh των απορριπτόμενων θερμότητων θα είναι απαραίτητο να ικανοποιήσει το ηλεκτρικό φορτίο ψυκτικού εξοπλισμού.

Η τιμή αυτή υπολογίστηκε υποθέτοντας 17.000 Btuh της απορριπτόμενης θερμότητας θα είναι αναγκαία για την παροχή 12.000 Btuh της ψύξης. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της PureCell 400, αυτή η κυψέλη καυσίμου είναι μόνο σε θέση να παράγει 785.000 Btuh των απορριπτόμενων θερμότητων. Οι τιμές στον Πίνακα 4-2 υπολογίστηκαν με τον ίδιο τρόπο για την DFC300. Καμία από τις κυψέλες καυσίμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-2 είναι σε θέση να παρέχει αρκετή θερμότητα των αποβλήτων για να εξυπηρετήσει μια ενιαίαεπίδρασης ψύκτη απορρόφησης. Ως εκ τούτου, μια μορφή συμπληρωματικής ψύξης είναι απαραίτητη. [16]

Υπάρχουν λίγες επιλογές για επιλογή για την παροχή συμπληρωματικής ψύξης. Η πρώτη επιλογή είναι να εγκαταστήσει τους ηλεκτρικούς ψύκτες. Οι ψύκτες

θα τροφοδοτείται από τις κυψέλες καυσίμου και συνδέεται με παροχή ισχύος έκτακτης ανάγκης. Η άλλη επιλογή θα ήταν να εγκαταστήσετε λέβητες για να αντισταθμίσει την έλλειψη της θερμότητας που απαιτείται για την τροφοδοσία των ψυκτών απορρόφησης.

Αν λέβητες που χρησιμοποιούνται για την παροχή συμπληρωματικής θερμότητας στους ψυκτές απορρόφησης, που ανάβουν-σβήνουν καθώς το ψυκτικό φορτίο μεταβάλλεται. Όταν πληρούνται οι παράμετροι λειτουργίας, οι έλεγχοι λειτουργίας του λέβητα θα κλείσει τη ροή καυσίμου. Υπάρχει ένα χρονικό διάστημα που απαιτείται για τον κύκλο των λεβήτων, η οποία ακολουθούν από κάποια βήματα: το ψήσιμο διάστημα, μια εκκαθάριση μετά, μια περίοδο αδράνειας, προ εκκαθάριση, και στη συνέχεια επιστρέφουν στο ψήσιμο. Ο κύκλος καθαρισμού είναι απαραίτητη πριν από κάθε έντος-κύκλο, διότι εξασφαλίζει ότι δεν υπάρχει συσσώρευση των εκρηκτικών αερίων στο πλαίσιο φωτιά του λέβητα. Δεν είναι μόνο μια χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της εκκίνησης εκεί, αλλά λέβητες είναι λιγότερο αποτελεσματική κατά την έναρξη της επί του κύκλου.

Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας ενός συστήματος συμπαραγωγής, η κυψέλη καυσίμου θα παρέχει πάντα απορριπτόμενη θερμότητα στους ψυκτές απορρόφησης, καθώς πρέπει συνεχώς να λειτουργεί με σκοπό την παροχή ρεύματος στην εγκατάσταση. Ωστόσο, εάν οι κυψέλες καυσίμου τερματίζουν για λόγους συντήρησης ή βλάβης, η απορριπτόμενη θερμότητα δεν θα είναι διαθέσιμη σε ψυκτές απορρόφησης ισχύος. Εάν οι ηλεκτρικοί ψυκτές χρησιμοποιούνται για την ψύξη συμπληρωματική, τότε λέβητες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή θερμότητας σε ψυκτών απορρόφησης κατά τη διάρκεια μιας διακοπής κυψελών καυσίμου. Αυτή είναι μια βιώσιμη επιλογή, διότι οι λέβητες θα πρέπει να λειτουργεί συνεχώς, αποφεύγοντας σχετικά τα μειονεκτήματα.

4.4.2 - Ψυκτές Απορρόφησης σε Σχέση με τους Ηλεκτρικούς Ψυκτές

Υπάρχουν ορισμένες διαφορές μεταξύ των ηλεκτρικών και ψυκτών απορρόφησης ότι τα δεδομένα κέντρο ιδιοκτητές θα πρέπει να γνωρίζουν εάν εγκαταστήσετε αυτό το είδος του συστήματος συμπαραγωγής κυψελών καυσίμου. Εκτός από τις διαφορές στους κύκλους συμπίεσης τους, την άντληση, ψύξη μέγεθος

πύργου, και το κόστος του συνολικού συστήματος πραγματοποιείται ανάλογα με τον τύπο του ψυκτικού συγκροτήματος.

Οι ηλεκτρικοί ψύκτες χρησιμοποιούν μηχανοκινητές συμπιεστές που απαιτούν ένα σημαντικό ποσό ενέργειας. Στην πραγματικότητα, ηλεκτρικοί ψύκτες συνήθως καταναλώνουν το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας σε ένα χώρο και αντιπροσωπεύουν σημαντικές μερίδες των ετήσιων προϋπολογισμών της ενέργειας.

Οι ψύκτες απορρόφησης χρησιμοποιούν λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια, περίπου 0,02 kW ανά τόνο, σε σύγκριση με 0,47 kW έως 0,88 kW ανά τόνο για ένα ηλεκτρικό ψύκτη, ανάλογα με τον τύπο του συμπιεστή. Ωστόσο, σε σύγκριση με το ηλεκτρικό ψύκτη, οι ψυκτές απορρόφησης έχουν υψηλότερο αρχικό κόστος και δεν είναι τόσο ευρέως διαθέσιμα.

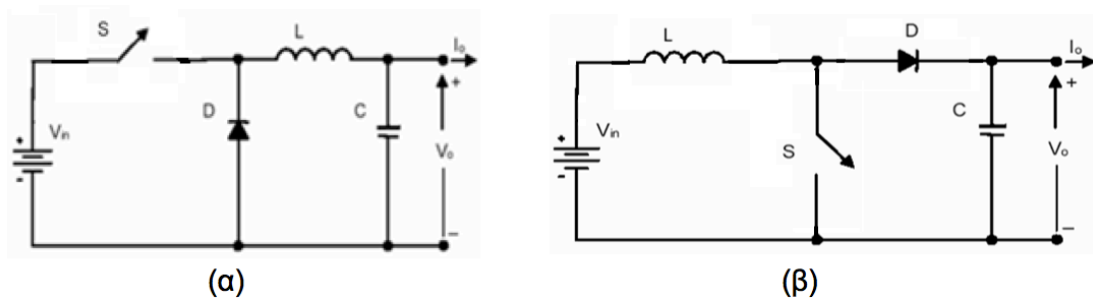
Μεταξύ των μονού και διπλού επίδρασης ψύκτες, το πρώτο κόστος είναι συνήθως το υψηλότερο με τον τύπο διπλού-επίδραση. Ωστόσο, διπλού-επίδραση ψύκτες είναι πιο ενεργειακά αποδοτικοί από τον τύπο μόνο-επίδρασης, με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους της ενέργειας.

Οι ψύκτες απορρόφησης είναι επίσης πλεονεκτική κατά το ότι είναι εξαιρετικά αξιόπιστη και να έχουν πιο αθόρυβη λειτουργία σε σύγκριση με ηλεκτρικό ψύκτες. Έχουν επίσης λιγότερη συντήρηση λόγω λιγότερα κινούμενα μέρη.

4.5 - Χρήση ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος στα συστήματα κυψελών καυσίμου

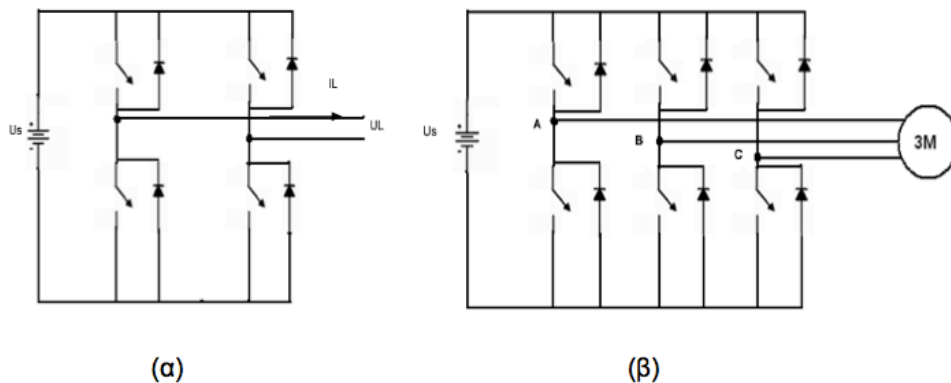
Ένα ηλεκτρικό υποσύστημα είναι απαραίτητο για να μεταφέρει και να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια συστοιχία κυψελών καυσίμου στους καταναλωτές. Το συγκεκριμένο υποσύστημα αποτελείται από ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, που μετατρέπουν τη συνεχή τάση που παράγεται από την συστοιχία, είτε σε συνεχή τάση άλλου επιπέδου είτε σε εναλλασσόμενη τάση οποιασδήποτε συχνότητας ανάλογα με τις απαιτήσεις των φορτίων. Γίνεται αντιληπτό ότι, τα χαρακτηριστικά και το είδος των μετατροπών που συνδέονται στην έξοδο των κυψελών καυσίμου εξαρτώνται άμεσα από τις προδιαγραφές του φορτίου, οι οποίες πέραν του επιπέδου και της μορφής της τάσης, περιλαμβάνουν την ποιότητα ισχύος, το αρμονικό περιεχόμενο καθώς και την αντοχή σε μεταβατικά φαινόμενα[17].

Το ηλεκτρικό δυναμικό μιας κυψέλης μεταβάλλεται έντονα με τις μεταβολές του ρεύματος φορτίου και εξαρτάται από τη θερμοκρασία της κυψέλης καθώς και την παροχή καυσίμου και οξυγόνου. Η διακύμανση της ηλεκτρικής τάσης στην περιοχή λειτουργίας της κυψέλης είναι της τάξης του 30 έως 40 % επί της ονομαστικής της τιμής. Ελάχιστα είδη φορτίων μπορούν να έχουν ανοχή σε τέτοιες μεγάλες διακυμάνσεις. Επομένως κρίνεται επιβεβλημένη η ύπαρξη μιας βαθμίδας για τη ρύθμιση και σταθεροποίηση της παραγόμενης τάσεως από τη συστοιχία κυψελών καυσίμου [18]. Ανάλογα με τις εφαρμογές, μπορεί να απαιτείται υποβιβασμός ή και ανύψωση της τάσεως εξόδου. Κάποιοι τυπικοί ηλεκτρονικοί μετατροπείς παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



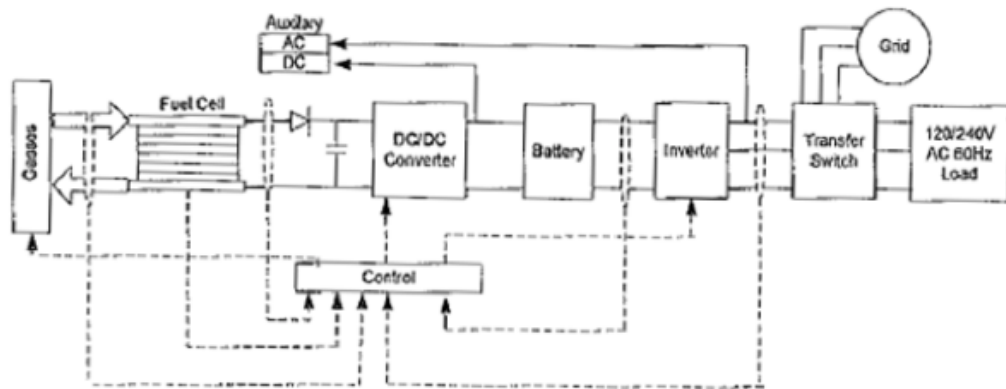
Σχήμα 4-3: Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση με: (α) υποβιβασμό τάσης, (β) ανύψωση τάσης. [19]

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



Σχήμα 4-4: Ηλεκτρονικοί μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη: (α) μονοφασικός αντιστροφέας, (β) τριφασικός αντιστροφέας

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



Σχήμα 5: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος σύνδεσης των κυψελών καυσίμου με το δίκτυο και με τοπικά φορτία[19]

Κεφάλαιο 5
Μοντελοποίηση Κυψέλων
Καυσίμου και Προσομοιώσεις για
Στατικές Εφαρμογές

Κεφάλαιο 5 - Μοντελοποίηση Κυψέλων Καυσίμου και Προσομοιώσεις για Στατικές Εφαρμογές

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε σχέδια και μοντελοποιήσεις κυψέλων καυσίμου όπως και ένα μαθηματικό μοντέλο κυψέλης και προσομοιώσεις για στατικές εφαρμογές τις οποίες είδαμε προηγουμένως στο κεφάλαιο 4.

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον MATLAB/SIMULINK για να μελετήσουμε τις συμπεριφορές του καθενός συστήματος.

5.1 - Μαθηματικό Μοντέλο μίας Κυψέλης Καυσίμου

Η μαθηματική μοντελοποίηση μίας κυψέλης καυσίμου είναι μια πολύπλοκη διαδικασία και χρειάζεται ακόμη περισσότερη διερεύνηση. Τα μεμονωμένα συστατικά του συστήματος αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε μια σύνθετη μορφή, όπου η ηλεκτρική, χημική, και θερμοδυναμικές διεργασίες είναι μη γραμμικές στη φύση. Οι διαδικασίες αυτές επιτυγχάνεται σε υψηλή απόδοση, διότι η κυψέλη καυσίμου δεν έχει κινούμενα μέρη [22].

Κατ' αρχάς, ας υποθέσουμε το μοντέλο ως ακολούθως:

- Τα αέρια είναι ιδανικά
- Η κυψέλη καυσίμου τροφοδοτείται με υδρογόνο και αέρα
- Η πτώση πίεσης κατά μήκος των διαύλων ηλεκτροδίου είναι αμελητέα
- Ο λόγος των πιέσεων μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού των διαύλων ηλεκτροδίου είναι αρκετά μεγάλη για να αναλάβει στραγγαλισμένη ροή
- Η θερμοκρασία κυψελών καυσίμου είναι σταθερή
- Η εξίσωση Nerst ισχύει
- Έχουμε ωμική απώλεια, απώλεια ενεργοποίησης και απώλεια μεταφοράς μάζας

Η ανάπτυξη του μοντέλου ξεκινά με την εξίσωση για στραγγαλισμένη ροή:

$$\frac{\dot{m}_{fc}}{P_u} = K \sqrt[2]{M} \quad [5-1]$$

όπου

\dot{m}_{fc} : ρυθμός ροής μάζας

P_u : ανάντη πίεση (εντός των διαύλων ηλεκτροδίου)

K : σταθερά της βαλβίδα

M : ρευστή μοριακή μάζα

$\dot{m}_{fc,H_2,reacted}$: ποσότητα του υδρογόνου που αντιδρά με τα ιόντα οξυγόνου

$\dot{m}_{fc,H_2,in}$: ποσότητα του υδρογόνου που εισέρχονται στην άνοδο

Ένας συντελεστή χρήσης (U_F) ορίζεται ως ο λόγος της ποσότητας του υδρογόνου που αντιδρά με το οξυγόνο προς την ποσότητα του υδρογόνου που εισέρχονται στην άνοδο.

$$U_F = \frac{\dot{m}_{fc,H_2,reacted}}{\dot{m}_{fc,H_2,in}} \quad [5-2]$$

Θεωρώντας ότι η μοριακή ροή οποιουδήποτε αερίου διαμέσου της βαλβίδας είναι ανάλογη με μερική πίεση του, προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{q_{H_2}}{P_{H_2}} = \frac{K_{an}}{\sqrt[2]{M_{H_2}}} = K_{H_2} \quad , \quad \frac{q_{H_2O}}{P_{H_2O}} = \frac{K_{an}}{\sqrt[2]{M_{H_2O}}} = K_{H_2O} \quad [5-3]$$

όπου

q_{H_2}, q_{H_2O} : μοριακός ρυθμός της ροής του υδρογόνου και νερού, αντιστοίχως

P_{H_2}, P_{H_2O} : μερική πίεση υδρογόνου και νερού, αντιστοίχως

K_{H_2}, K_{H_2O} : μοριακή σταθερά βαλβίδας του υδρογόνου και νερού, αντιστοίχως

K_{an} : σταθερά βαλβίδας στην ανόδο

Αντικαθιστώντας με τις εξισώσεις (5-1) και (5-2), η εξίσωση (5-3) έχουμε:

$$\frac{\dot{m}_{fc}}{P_{an}} = K_{an} [(1 - U_f) \sqrt{M_{H_2}} + U_f \sqrt{M_{H_2O}}] \quad [5-4]$$

όπου η P_{an} είναι η πίεση στο εσωτερικό της ανόδου του καναλιού. Το ιδανικό αέριο θα χρησιμοποιηθεί για να βρείτε τις μερικές πιέσεις των αερίων που ρέουν μέσω των ηλεκτροδίων. Αυτή η φόρμουλα θα πρέπει να εφαρμόζεται σε όλα τα αέρια. Μόνο η έκφραση για το υδρογόνο προέρχεται από την παρακάτω:

$$P_{H_2} V_{an} = \eta_{H_2} RT \quad [5-5]$$

όπου

T: θερμοκρασία

V_{an} : όγκος της ανόδου κανάλι

η_{H_2} : μόρια υδρογόνου στο κανάλι

R: ιδανική σταθερά των αερίων

Με την απομόνωση της πίεσης και κάνοντας την πρώτη παράγωγο προς του χρόνου, έχουμε:

$$\frac{dp_{H_2}}{dt} = \frac{RTq_{H_2}}{V_{an}} \quad [5-6]$$

Η ροή υδρογόνου μπορεί να υποδιαιρεθεί σε τρία που προκύπτει από την (5-6) η εξίσωση:

$$\frac{dp_{H_2}}{dt} = \frac{RTq_{H_2}}{V_{an}} [q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r] \quad [5-7]$$

όπου

$q_{H_2}^{in}$: μοριακή ταχύτητα ροής του υδρογόνου μέσα στο κανάλι

$q_{H_2}^{out}$: μοριακή ταχύτητα ροής του υδρογόνου έξω από το κανάλι

$q_{H_2}^r$: μοριακή ταχύτητα ροής του υδρογόνου που αντιδρά στο κανάλι

Σύμφωνα με την ηλεκτροχημικές σχέσεις, η ποσότητα του υδρογόνου που αντιδρά μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0 I}{2F} = 2K_r I \quad [5-8]$$

όπου

N_0 : αριθμός κυττάρων στη σειρά στοιβας

F : σταθερά του Faraday

I : στοιβας ρεύματος

K_r : σταθερά μοντελοποίηση

Αντικαθιστώντας με τις εξισώσεις (5-8) και (5-7) στην εξίσωση (5-6), εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό Laplace, και απομόνωντας την μερική πίεση, προέρχεται η ακόλουθη εξίσωση:

$$p_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} s} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I) \quad [5-9]$$

όπου

τ_{H_2} : πόλος συστήματος που σχετίζονται με τη ροή υδρογόνου.

Η τάση εξόδου στοιβας περιγράφεται από την εξίσωση Nernst [7]. Το όρος “-rI” είναι η ωμική απώλεια. Αυτή είναι η απώλεια που οφείλεται στην αντίσταση των ηλεκτροδίων και με την αντίσταση της ροής του O_2 ιόντων μέσω του ηλεκτρολύτη.

$$V = N_0 \left[E_0 + \frac{RT}{2F} \left(\ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \right) \right] - rI \quad [5-10]$$

όπου

V: τάση εξόδου κυψελών καυσίμου

E_0 : τάση του ανοικτού κυκλώματος(κυψέλης), με βάση την ελεύθερη ενέργεια Gibbs

R: ωμικές απώλειες της στοίβας

Η απώλεια ενεργοποίησης προκαλείται από την βραδύτητα των αντιδράσεων στις επιφάνειες ηλεκτροδίων. Ένα τμήμα της τάσεως χάνεται στην οδήγηση της χημικής αντίδρασης που κινεί τα ηλεκτρόνια στα ηλεκτρόδια. Ένας τρόπος για να λογοδοτήσει για τις απώλειες αυτές είναι να χρησιμοποιήσετε την εξίσωση Tafel. Η εξίσωση αυτή προήλθε από τη φυσική πειραματισμό σε διάφορες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Παρέχει μια σχέση μεταξύ της υπέρτασης στην επιφάνεια ενός ηλεκτροδίου και του φυσικού λογαρίθμου της πυκνότητας ρεύματος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της απώλειας τάσης ενεργοποίησης για την κυψέλη καυσίμου.

$$\Delta V_{ac} = -A \ln(i) \quad [5-11]$$

όπου

ΔV_{act} : απώλεια ενεργοποίησης

A: Η κλίση της γραμμής Tafel

i: πυκνότητα ρεύματος (ρεύμα / επιφάνεια του ηλεκτροδίου)

Απώλειες μεταφοράς μάζας είναι οφείλεται στη διαφορά στη συγκέντρωση του καυσίμου καθώς περνά μέσα από το ηλεκτρόδιο. Η συγκέντρωση είναι υψηλή όταν το καύσιμο και ο αέρας αρχίζει τα ηλεκτρόδια, αλλά που ταξιδεύουν μέσω, παίρνουν εξαντληθούν στην αντίδραση. Η συγκέντρωση αυτή επηρεάζει την μερική πίεση των αντιδραστηρίων και έχει μια επίδραση στην τάση εκείνο το τμήμα του ηλεκτροδίου μπορεί να παράγει. Δυστυχώς, αυτή η απώλεια δεν μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά με αρκετή ακρίβεια. Συνεπώς, τα πειραματικά αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απώλειας.

Παρακάτω εξίσωση (5-12) που έχει αναπτυχθεί σε πειραματική βάση και είναι αποδεκτή ως μια καλή προσέγγιση των ομαδικών απωλειών μεταφοράς.

$$\Delta V_{trans} = m \cdot e^{ni} \quad [5-12]$$

όπου

ΔV_{trans} : Τάση απώλειας που οφείλεται στην μεταφορά μάζας και απώλεια συγκέντρωσης

m, n : σταθερές που προέρχονται από πειράματα (ειδικά για SOFC)

Συνδυάζοντας το σύνολο των απωλειών στην εξίσωση (5-2), η συνολική τάση του FC μπορεί να ληφθεί. Σε μια πραγματική μονάδα παραγωγής ενέργειας κυψέλων καυσίμου, πολλαπλές κύψέλες μπορούν να συνδυάζονται σε σειρά για να παρέχει την απαραίτητη τάση και ρεύμα ζήτησης. Η συνολική τάση στοιβας είναι:

$$V = N_0 \left[E_0 + \frac{RT}{2F} \left(\ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \right) \right] - rI - A \ln(i) + m \cdot e^{ni} \quad [5-13]$$

Η συνολική ισχύς που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου είναι:

$$P_{FC} = N_0 VI \quad [5-14]$$

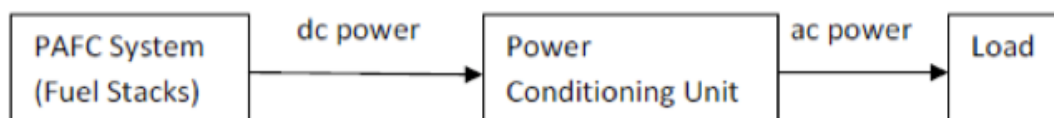
5.2 - Μοντελοποίηση Κυψέλη Καυσίμου τύπου PAFC στην πλαταφόρμα SIMULINK/MATLAB

Όπως γνωρίζουμε, οι κυψέλες καυσίμου τύπου PAFC έχει μια από τις πιο προηγμένες τεχνολογίες που είναι διαθέσιμες στο εμπόριο. Επίσης, ξέρουμε ότι είναι δυνατόν να βελτιωθεί η απόδοση μίας κυψέλης καυσίμου αλλάζοντας τις μεταβλητές λειτουργίας (π.χ. πίεση, θερμοκρασία, σύνθεση του αερίου, πυκνότητα ρεύματος κλπ.).

Είναι σημαντικό να επιλέξει ένα σημείο λειτουργίας (τάση κυττάρων και των σχετικών πυκνότητα ρεύματος) μιας κυψέλης καυσίμου μέχρι πληρούνται οι απαιτήσεις συστήματος.

Το μοντέλο PAFC ερευνά το κατάλληλο φορτίο ανάλογα με τη ζήτηση ρεύματος. Επίσης, δείχνει τις καμπύλες I-V και τις τιμές ac και dc για την τάση, ένταση και ισχύ. Το σύστημα αποτελείται από τρεις στοιβές PAFC και κάθε στοιβα περιέχει 376 μεμονωμένες κυψέλες. Η ισχύς εξόδου dc μετατρέπεται σε ac [20].

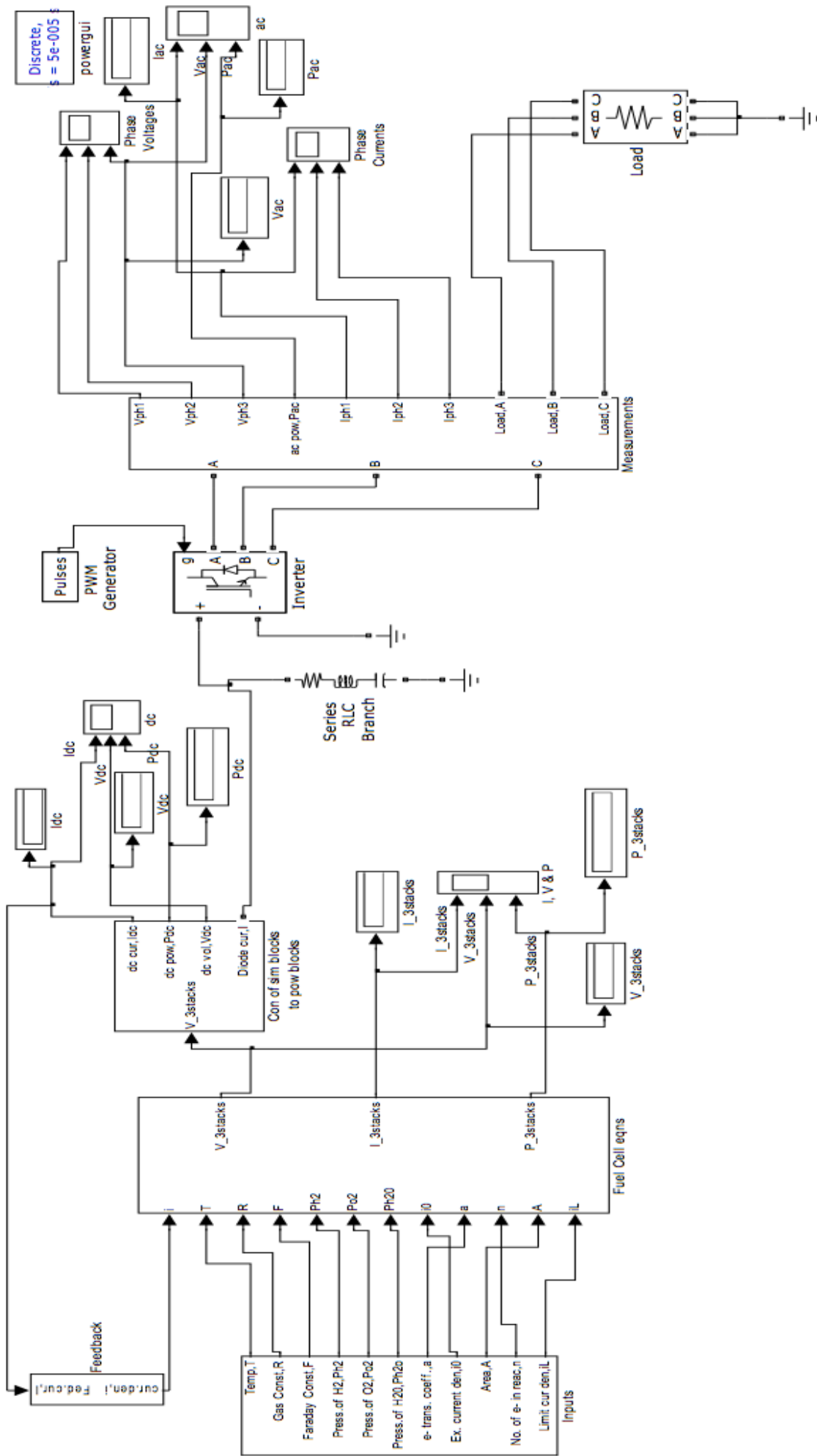
Στο Σχήμα 5-1 παρουσιάζουμε ένα προτεινόμενο μοντέλο.



Σχήμα 5-1: Προτεινόμενο μοντέλο ενός συστήματος κυψέλων καυσίμου τύπου PAFC

Το μαθηματικό μοντέλο για την PAFC παρουσιάσαμε στο προηγουμένως στην ενότητα 5.1. Όπως ήδη έχουμε δει το μαθηματικό μοντέλο μίας κυψέλης περιλαμβάνει το δυναμικό Nernst, την απώλεια ενεργοποίησης, την ωμική απώλεια και την απώλεια συγκέντρωσης ή απώλεια μεταφοράς.

Επίσης όλες οι μαθηματικές εκφράσεις για το σύστημα κυψελών καυσίμου και ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος μοντελοποιείται στο Matlab-Simulink περιβάλλον[21]. Το δυναμικό μοντέλο του PAFC δίνεται στο Σχήμα. 5-2.



Σχήμα 5-2: Δυναμικό Μοντέλο ΡΑFC

Η δυναμική μοντελοποίηση του συστήματος PAFC που δίνεται παραπάνω συμπεριλαμβανομένου του συστήματος ρύθμισης της ισχύος μπορούν να προσομοιωθούν. Τα μπλοκ 'Inputs', 'Feedback', 'Fuel Cell eqns', 'Con of sim blocks to row blocks' και 'Measurements' είναι μπλοκ του υποσυστήματος.

Το μπλοκ 'Fuel Cell eqns' περιέχει όλες τις εξισώσεις κυψελών καυσίμου που σχετίζονται με το μοντέλο. Το PAFC σύστημα περιέχει 3 στοίβες καυσίμου και κάθε στοίβα περιέχει 376 κυψέλες καυσίμου. Όλες οι εξισώσεις επιβλήθηκαν σε κάθε κυψέλη καυσίμου του PAFC συστήματος. Η τελική εξίσωση της PAFC συστήματος μπορεί να εκφραστεί ως την παρακάτω:

$$V_{Stack} = 3 \times V_{single_fuel_stack} \quad [5-15]$$

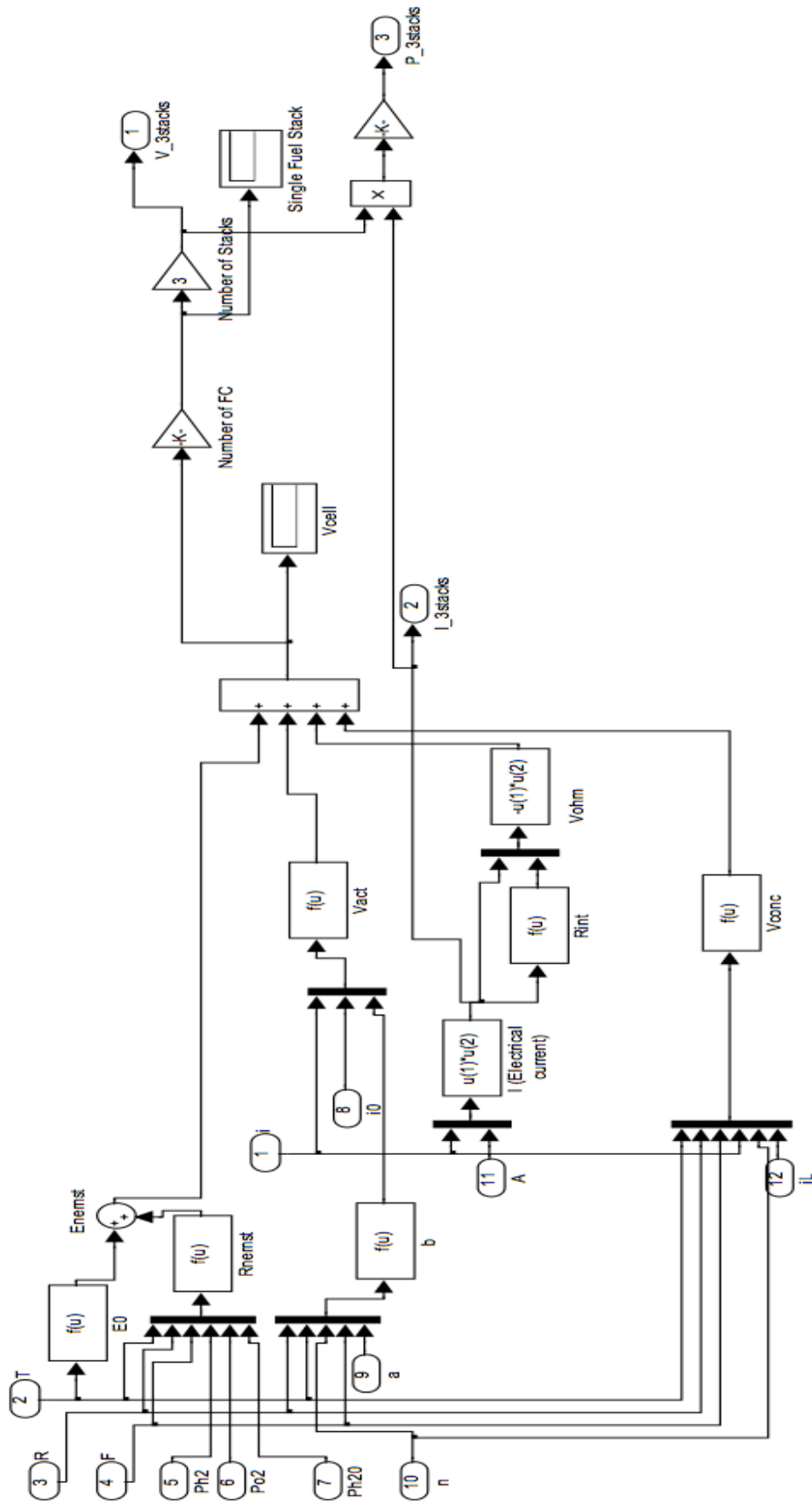
Στο σχήμα 5-3 δείχνει το μπλοκ 'Fuel Cell eqns'.

Η έξοδος V_{stack} συνδέεται με το μπλοκ 'Con of sim blocks to row blocks'. Στο σχήμα 5-4 παρουσιάζουμε το μπλοκ 'Con of sim blocks to row blocks' που διατηρεί τη σύνδεση μεταξύ των μπλοκ Simulink και των μπλοκ συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

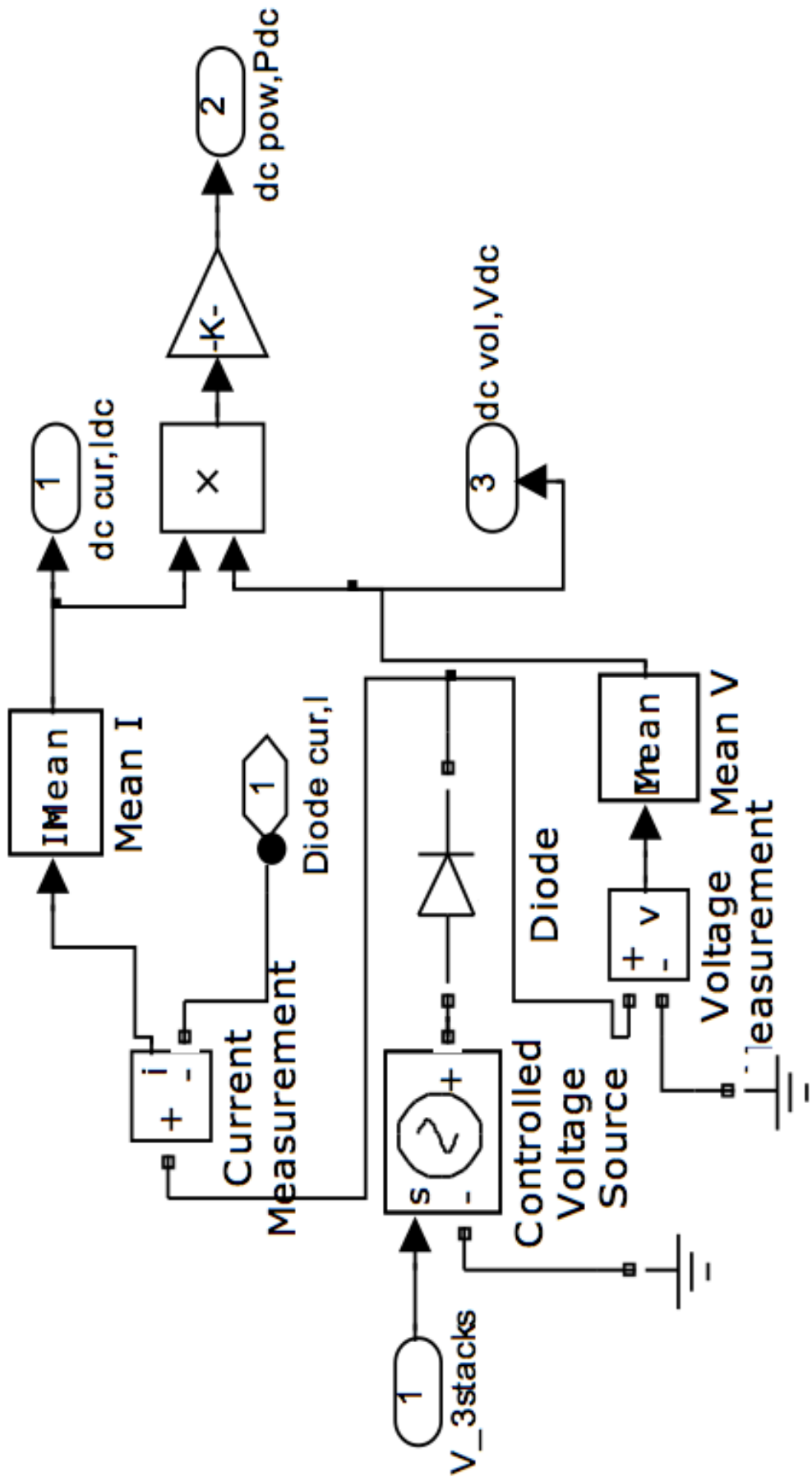
Μετατρέπει το σήμα Simulink σε κατάλληλο σήμα μέσω του μπλοκ της ελεγχόμενης τάσης. Υπάρχει μια δίοδος ανορθωτή μετά το μπλοκ της ελεγχόμενης τάσης, σε αυτό το μπλοκ συνδέεται με μπλοκ του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Το μπλοκ 'current measurement' και 'voltage measurement' μετράει το ρεύμα και την τάση, αντίστοιχα. Τα ενδιάμεσα μπλοκ συνδέονται με τον σκοπό να υπολογίζουν της μέση τιμή του ρεύματος και της τάσης. Η ισχύς dc υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη μέση τιμή του ρεύματος και της τάσης.

Η τιμή ισχύος μετατρέπεται σε κιλοβάτ (kW) μέσω ενός μπλοκ κέρδος. Έτσι, το μπλοκ του υποσυστήματος έχει τέσσερις εξόδους που είναι dc εξόδους για ρεύμα, τάση και η ισχύς και η δίοδος ρεύματος[20].

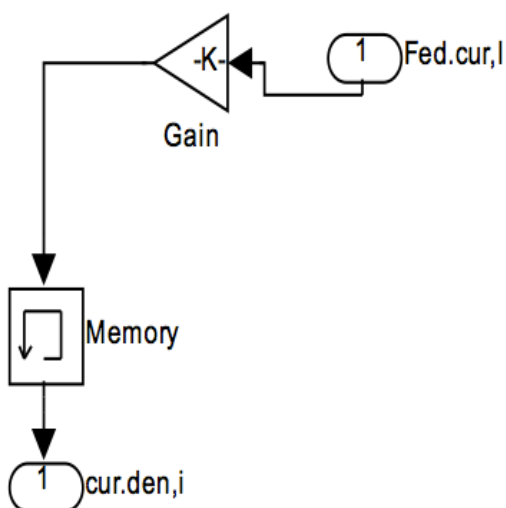


Σχήμα 5-3: Μπλοκ 'Fuel Cell eqns'



Σχήμα 5-4: Μπλοκ 'Con of sim blocks to pow blocks'

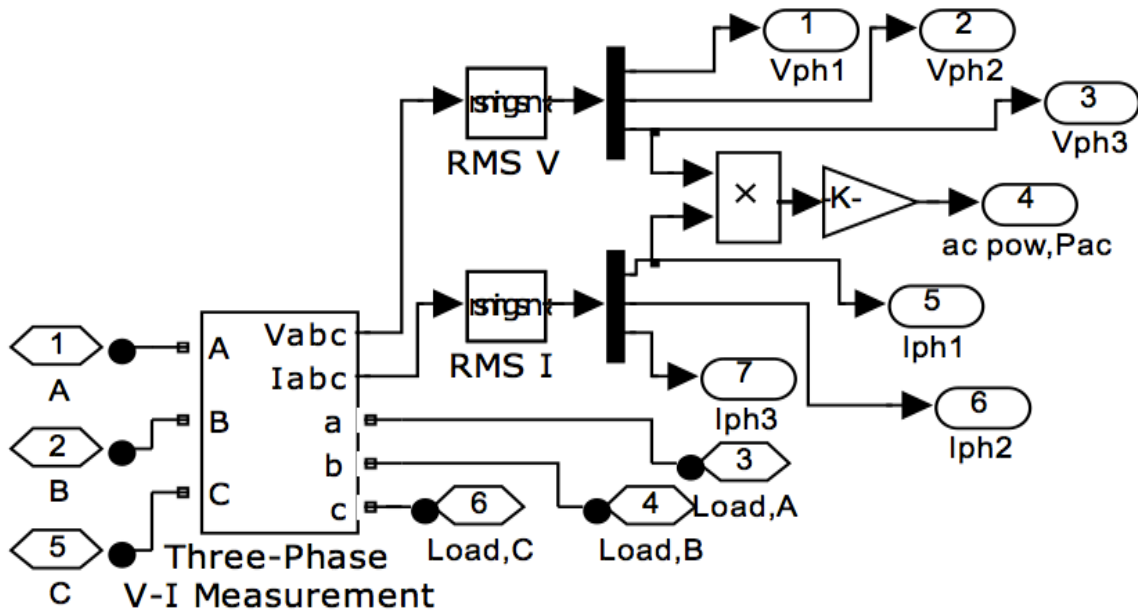
Μία αναφορά του συνεχές ρεύματος από το μπλοκ 'Con of sim blocks to row blocks' συνδέεται με τον μπλοκ 'Feedback'. Στο Σχήμα 5-5 δίνεται το μπλοκ 'Feedback' που εδώ το ρεύμα ανάφορας (I) μετατρέπεται σε πυκνότητα ρεύματος (i) μέσω ενός μπλοκ κέρδος για να παρέχει ως είσοδο του μοντέλου. Το μπλοκ της μνήμης χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της αρχικής κατάστασης, δηλαδή για να καθορίσετε ελάχιστη πυκνότητα ρεύματος για την παρατήρηση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 5-5: Μπλοκ 'Feedback'

Στο σχήμα 5-6 δίνεται το μπλοκ 'Measurements'. Οι είσοδοι του μπλοκ αυτού είναι οι έξοδοι του μετατροπέα, δηλαδή A, B & C βραχίονες γέφυρας. Σε αυτό το υποσύστημα, αυτοί οι τρεις βραχίονες γέφυρας συνδέεται με το τριφασικό μπλοκ 'V-I Measurements' (φάση προς φάση). Η V_{abc} και I_{abc} θύρα συνδέονται με τα μπλοκ rms για τον υπολογισμό της μέσης τετραγωνικής ρίζας (rms) τιμές της τάσης και του ρεύματος. Τότε η τάση rms και τα ρεύματα μετατρέπουν σε τρεις έτσι ώστε κάθε φάσης τάσης και κάθε ρεύμα φάσης για την εγκατάσταση τριών φάσεων μπορεί να παρατηρηθεί. V_{ph1} , V_{ph2} & V_{ph3} είναι οι τάσεις φάσης και I_{ph1} , I_{ph2} & I_{ph3} είναι τα ρεύματα φάσης. Μία τάση φάσης πολλαπλασιάζεται με το αντιστιχό ρεύμα φάσης για να έχουμε τη ισχύς φάσης. Αλλά αυτή η ισχύς φάσης

μετατρέπεται σε γραμμική δηλαδή σ κιλοβάτ (kW) της από ένα μπλοκ κέρδος. Οι θύρες a, b, και c του τριφασικού μπλοκ 'V-I Measurements' είναι οι έξοδοι του υποσυστήματος.

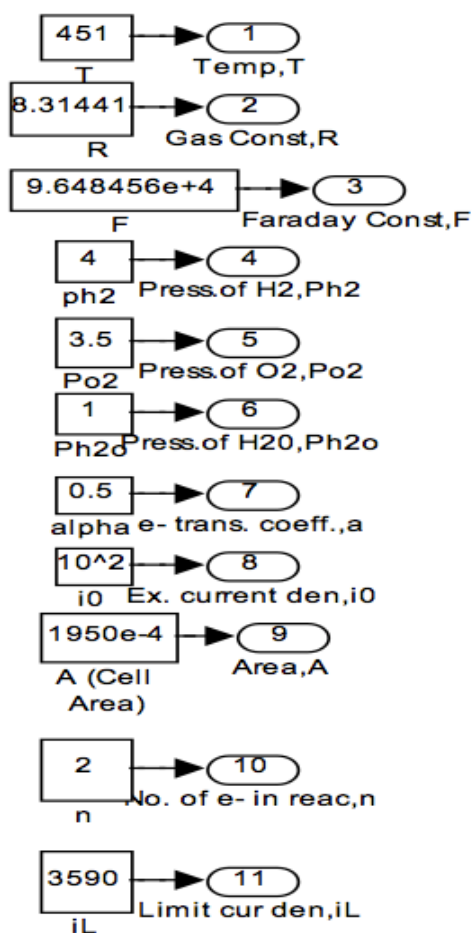


Σχήμα 5-6: Μπλοκ 'Measurements'

Στο σχήμα 5-2, οι έξοδοι του μπλοκ 'Measurements' συνδέεται με το τριφασικό στοιχείο RLC που ενεργεί ως φορτίο αντίστασης. Οι έξοδοι του φορτίου συνδέεται μαζί και γειωμένο. Τα μπλοκ I_{ac} , V_{ac} & P_{ac} δείχνουν το εναλλασσόμενο ρεύμα, τάση και η ισχύς, αντίστοιχα. Το μπλοκ score δείχνει τις φασικές τάσεις, ρεύματα φάσης και καμπύλες ισχύος ac σε γραμμή ως προς το χρόνο. Ένα μπλοκ "PowerGUI" χρησιμοποιείται στο Σχήμα 5-2 για να τρέξει το μοντέλο με απλό μπλοκ του συστήματος ισχύος.

5.2.1 - Προσομοίωση Σύστημα PAFC

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται τις εισόδους του μοντέλο που μόλις παρουσιάσαμε, πιο αναλυτικά στον πίνακα 5-1 [20].



Σχήμα 5-7: Μπλοκ 'Inputs'

Πίνακας 5-1: Παραμέτροι Εισόδων

T	451 K
R	8.31441 J mol ⁻¹ K ⁻¹
F	96484.56 C mol ⁻¹
p_{H2}	4 atm
p_{O2}	3.5 atm
p_{H2O}	1 atm
α	0.5
i_0	10 ² A m ⁻²
A	0.1950 m ²
n	2
i_L	3590 A m ⁻²

Το δυναμικό μοντέλο προσομοιώνεται για 1 δευτερόλεπτο για να παρατηρηθούν τα αποτελέσματα τα. Στον πίνακα 5-2 δείχνει τα αποτελέσματα για διάφορες τιμές του φορτίου.

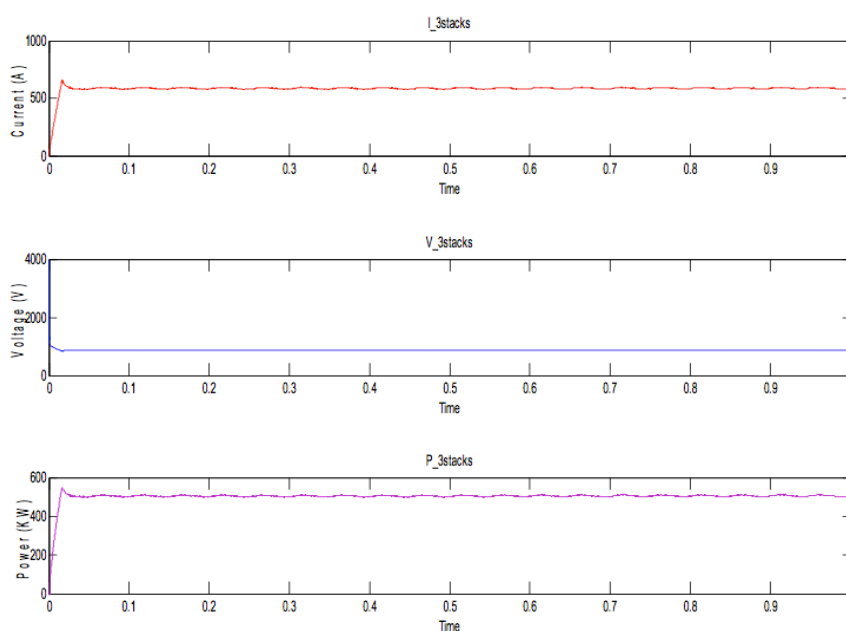
Πίνακας 5-2: Αποτελέσματα Για τον Δυναμικό Μοντέλο PAFC

(Ω)	$I_{3stacks}$ (A)	$V_{3stacks}$ (V)	$P_{3stacks}$ (KW)	I_{dc} (A)	V_{dc} (V)	P_{dc} (KW)	I_{ac} (A)	V_{ac} (V)	P_{ac} (KW)
2	587.3	861.4	505.9	586.9	872.1	511.8	276.2	647.3	309.7
	348.7	930.1	324.4	348.6	933.4	325.4	164	698.7	198.5
	166.2	998.4	165.9	165.8	1009	167.3	78.24	750.1	101.7

Ο παραπάνω πίνακας δείχνει ότι οι τιμές του ρεύματος στην στοιβα ($I_{3stacks}$) και το συνεχές ρεύματος (I_{dc}) είναι σχεδόν παρόμοια και οι τιμές του εναλλασσόμενου ρεύματος (I_{ac}) είναι μικρότερο από το μισό του $I_{3stacks}$ για κάθε τιμή του R. Οι τιμές των τάσεων στην στοιβα ($V_{3stacks}$) και την συνεχής τάση (V_{dc}) είναι επίσης παρόμοια, αλλά η εναλλασσόμενη τάση (V_{ac}) είναι μικρότερη από την $V_{3stacks}$.

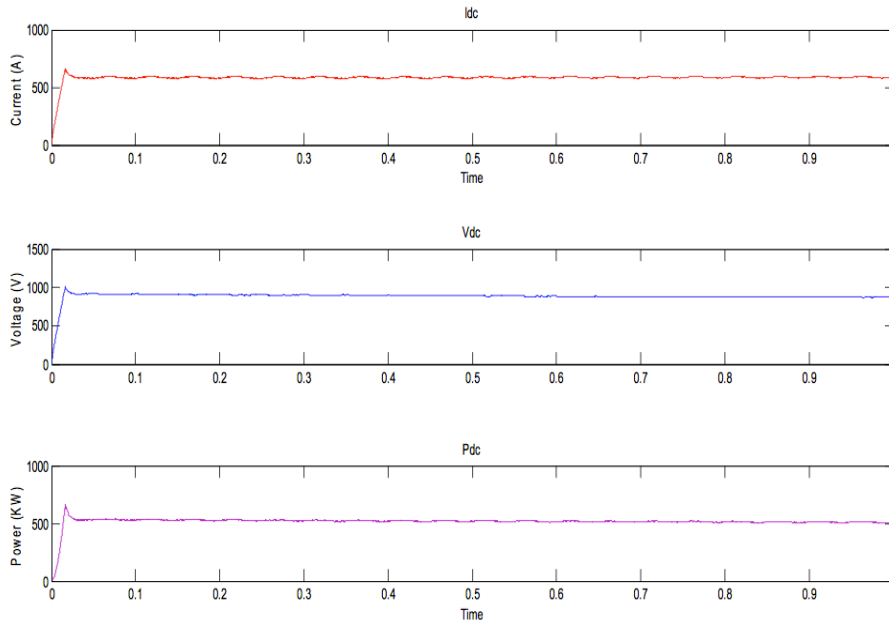
Το ίδιο χαρακτηριστικό παρατηρείται στην ισχύ. Η απώλεια ισχύος παρατηρείται μεταξύ του συνεχούς ρεύματος και εναλλασσόμενου ρεύματος, λόγω της απώλειας ισχύος του μετατροπέα και την απουσία του φίλτρου.

Στο σχήμα 5-8, η αρχικές μεταβάσεις των $I_{3stacks}$, $V_{3stacks}$ και $P_{3stacks}$ μπορούν να παρατηρηθούν μέσα από το πεδίο scope του μπλοκ I, V, και P του δυναμικού μοντέλου σε σχέση με το χρόνο.

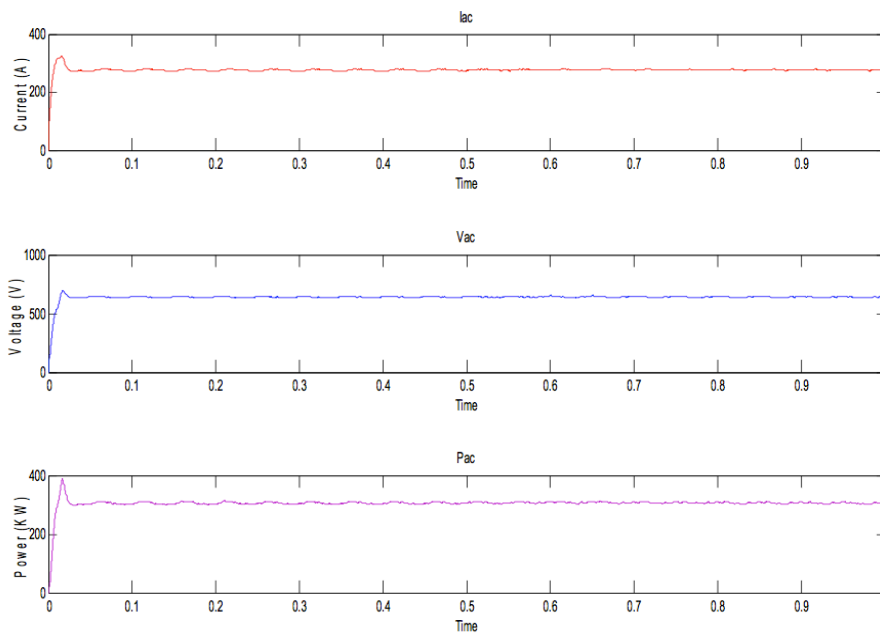


Σχήμα 5-8: Ρεύμα, τάση και ισχύς στοιβας ως συνάρτηση του χρόνου

Στο σχήμα 5-9 δείχνει τις αρχικές και μεταβατικές τιμές για την μόνιμη κατάσταση για τις ίδιες παραμέτρους σε σχέση με το χρόνο. Αυτά τα σχήματα κυμάτων μπορούν να παρατηρηθούν μέσα από το μπλοκ 'dc' score του μοντέλου. Σχήμα 5-10 δείχνει τις κυματομορφές για εναλλασσομένους παραμέτρους [20,21].



Σχήμα 5-9: Ρεύμα, τάση, και η ισχύς dc ως συνάρτηση του χρόνου



Σχήμα 5-10: Ρεύμα, τάση, και τιμές ισχύος ac

Συμπέρασμα και Παρατηρήσεις

Από το σχήμα 5-8 έως το σχήμα 5-10 έχουν έξοδο το φορτίο $R = 2,2 \Omega$. Οι ίδιες παρατηρήσεις βρέθηκαν για άλλα φορτία, αλλά σε διαφορετικό εύρος τιμών. Όλες οι καμπυλές ρεύματος αυξάνονται αρχικά και στη συνέχεια πηγαίνει σχεδόν στην μόνιμη κατάσταση.

Το ίδιο χαρακτηριστικό βρίσκεται στην ισχύ. Αλλά η τάση στοίβας δείχνει ότι μειώνεται στην αρχή και στη συνέχεια γίνεται σχεδόν γραμμική.

Οι τάσεις dc και ac δείχνουν επίσης παρόμοια χαρακτηριστικά, δηλαδή την αύξηση στην αρχή και στη συνέχεια γίνεται σχεδόν γραμμική.

5.3 - Μοντελοποίηση Κυψέλη Καυσίμου τύπου SOFC στην πλατφόρμα SIMULINK/MATLAB

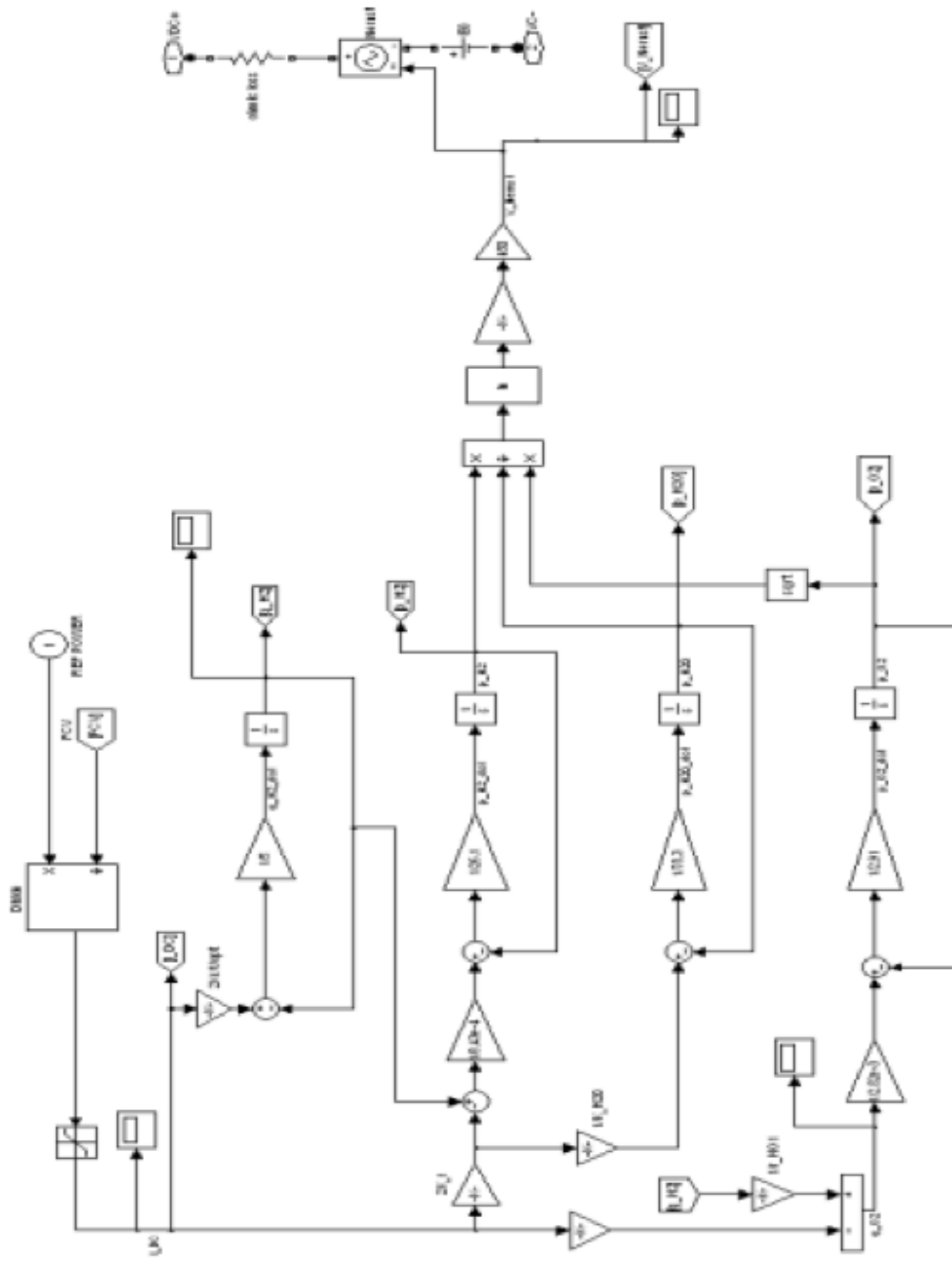
Το “Block διάγραμμα” στην πλατφόρμα Matlab - Simulink αναπτύχθηκε με βάση το σχέδιο της κυψελής καυσίμου. Το σύστημα κυψελών καυσίμου συνδέεται με το δίκτυο με τη χρήση του μετατροπέα ανύψωσης και υποβιβασμού της τάσης CUK (Σχήμα 5-13) και μέσω του τριφασικού μετατροπέα συστήματος. Η απόδοση του συστήματος αναλύεται με την παρουσία και των δύο μετατροπέων.

Το ακόλουθο σύστημα καυσίμου για στατικές εφαρμογές συνδεδεμένες στο δίκτυο (κατανεμημένη παραγωγή) αποτελείται από την κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου, μετατροπέα CUK (ανύψωσης και υποβιβασμού της τάσης), τριφασικός μετατροπέας συστήματος και το φορτίο.

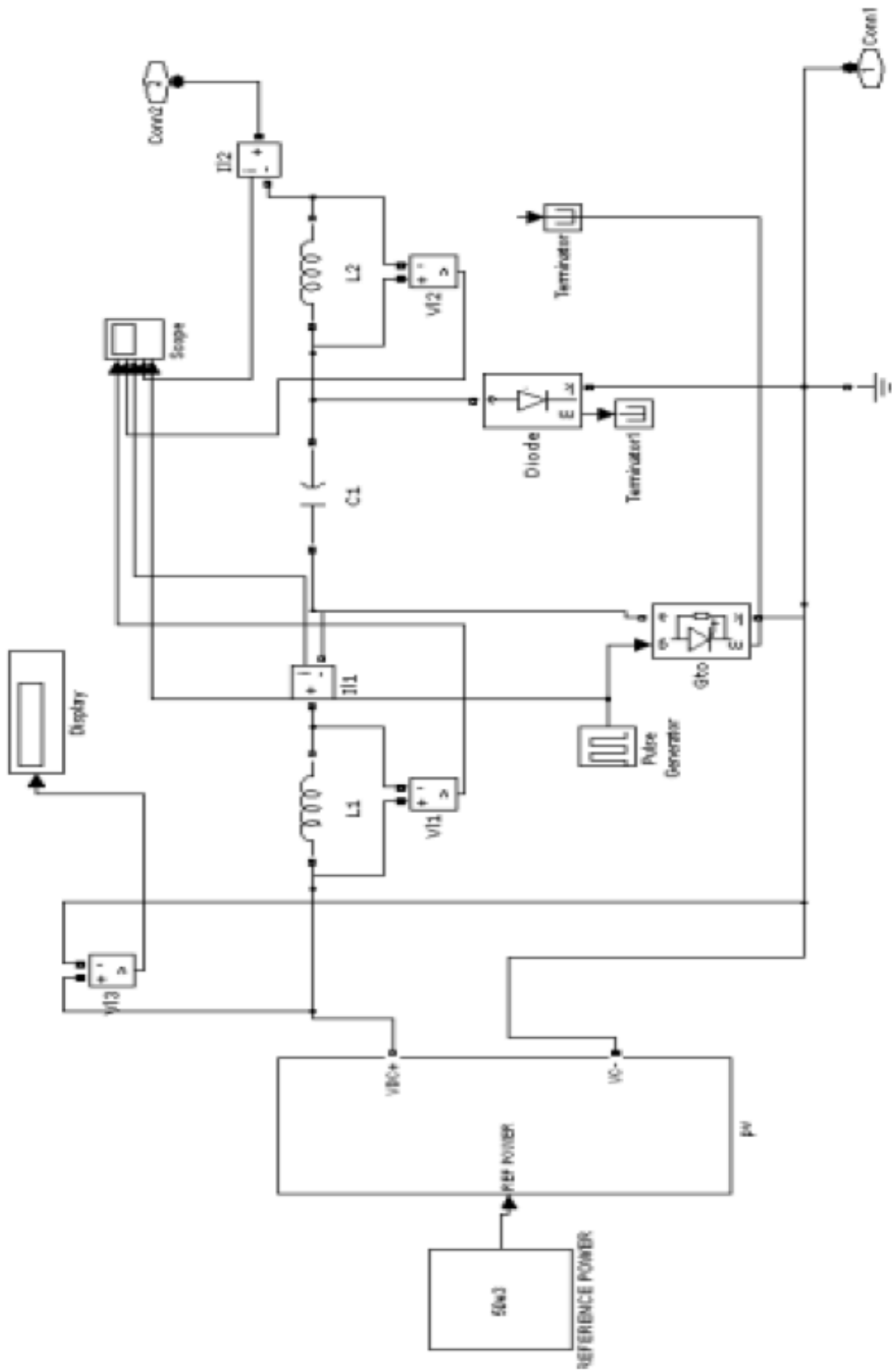
Ο τριφασικός μετατροπέας επιλέγεται, επειδή τα περισσότερα από τα φορτία είναι τριφασικά

Το συνολικό “block διάγραμμα” στο Simulink φαίνεται στο σχήμα 5-11 και ακολουθείται από τα σχέδια των επιμέρους block του SOFC με τους μετατροπέις.

Τα αποτελέσματα περιγράφονται στις επόμενες σελίδες.



Σχήμα 5-12: Σχήμα Κυψέλης Καυσίμου τύπου SOFC στο SIMULINK



Σχήμα 5-13: Σχήμα Κυψέλης Καυσίμου τύπου SOFC με τον μετατροπέα CUK στο SIMULINK

5.3.1 - Προσομοίωση Σύστημα SOFC των 200kW

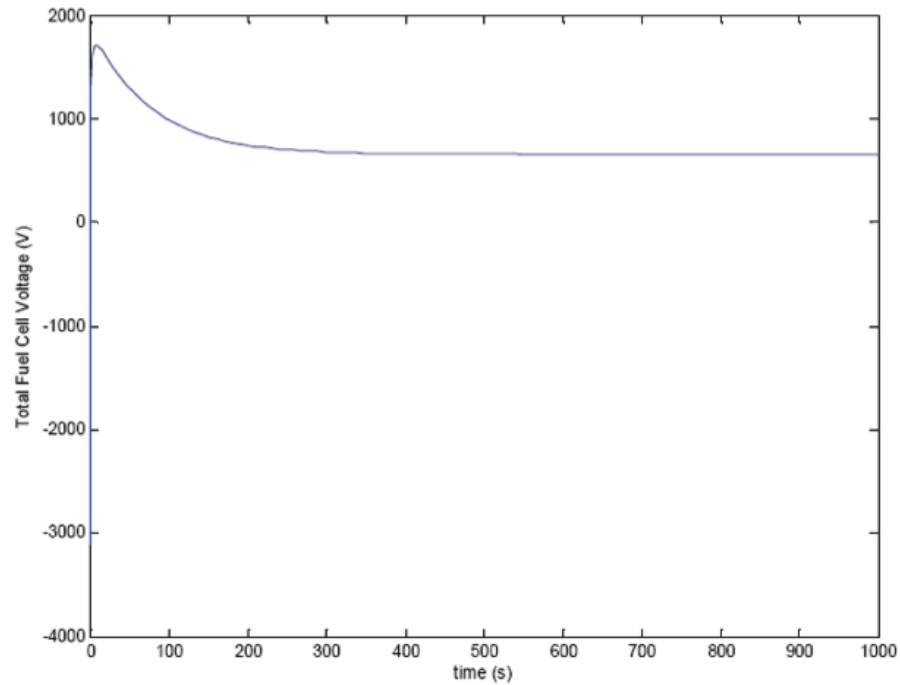
Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί μέσω ενός πειραματικό πρωτότυπο κατασκευάστηκε από μια ιταλική εταιρεία ερευνών [22,23]. το μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός συστήματος 200 kW SOFC. Το μοντέλο αυτό τρέχει χρησιμοποιώντας παραμέτρους που έδωσε η εταιρεία και συνοψίζονται στον πίνακα 5-3 [22].

Table 5-3: Παράμετροι προσομοίωσης 200kW

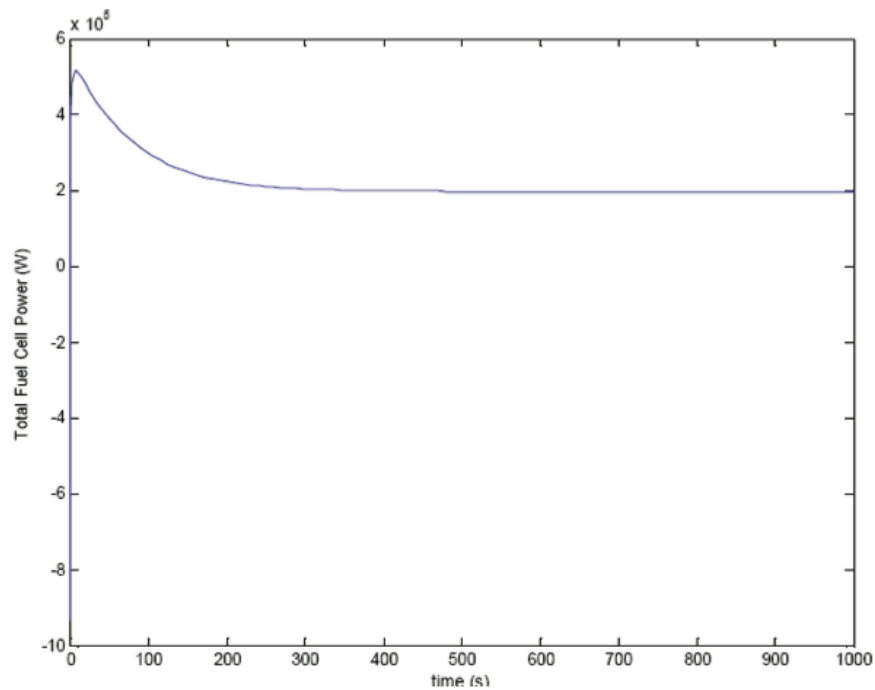
K_r	<i>9.95 e-4</i>
FC Temp	<i>1273.15 K</i>
Kmol/Kg air	<i>1/29</i>
Kmol/Kg H₂	<i>1/2</i>
No	<i>20</i>
K_{H₂}	<i>8.43e-4 kmol(atm s)</i>
K_{H₂O}	<i>281e-4 kmol(atm s)</i>
K_{O₂}	<i>2.52e-3 kmol(atm s)</i>
τ_{H₂}	<i>26.1 s</i>
τ_{H₂O}	<i>78.3 s</i>
τ_{O₂}	<i>2.91 s</i>
R	<i>0.126 ohm</i>

Τα Σχήματα 5-14 και 5-15 δείχνουν τις εξόδους τάσης και ισχύος του μοντέλου, αντίστοιχα. Οι αρχικές υπερτάσεις οφείλονται στην εκκίνηση του μοντέλου, οι αρχικές συνθήκες των λειτουργιών μεταφοράς είναι μηδέν. Μπορεί να φανεί ότι η κυψέλη καυσίμου παράγει περίπου 200 kW ισχύος με 300A ρεύμα

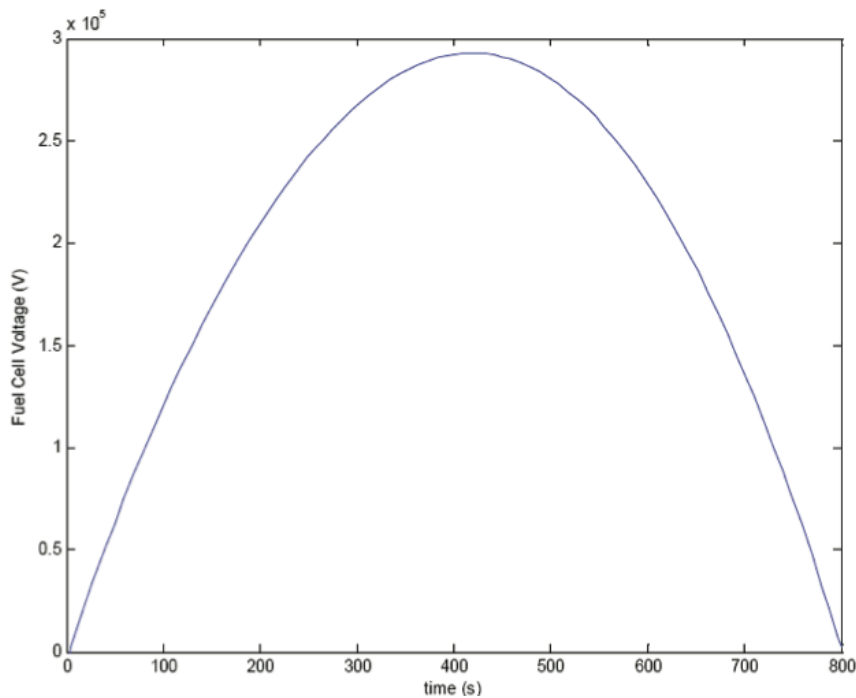
ζήτηση στην μόνιμη κατάσταση. Μοντελοποιούνται 20 κυψέλες καυσίμου συνδεδεμένες σε σειρά.



Σχήμα 5-14 : Συνολική Τάση Εξόδου



Σχήμα 5-15: Συνολική Ισχύς σε W



Σχήμα 5-16: Τάση Απόκρισης της Κυψέλης.

Συμπέρασμα και Παρατηρήσεις

Η δυναμική μοντελοποίηση των κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων έχει αναπτυχθεί για να αναλύσει τη συμπεριφορά του φορτίου του ως κατανεμημένη παραγωγή σε ένα δίκτυο συνδεδεμένο στο σύστημα ισχύος. Έχει παρατηρηθεί ότι η διακύμανση στις τάσεις εξόδου στο σύστημα ισχύος οφείλεται στις διακυμάνσεις φορτίου από κυψέλες πολύ στενά. Ένα αποτελεσματικό δυναμικό μοντέλο κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων έχει επίσης αναπτυχθεί που μπορεί να παρέχει ενεργό ισχύ, διατηρώντας την τάση του μετατροπέα, όπως είναι επιθυμητό.

Το συνδυασμένο σύστημα μειώνει το κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και το επίπεδο της ρύπανσης και την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.

Μια δεύτερη προσομοίωση με τη χρήση ενός γραμμικού ρεύματος εκκίνησης στα 10 A με κλίση 1. Το σχήμα 5-16 δείχνει την τάση απόκρισης της κυψέλης. Αρχικά, η τάση είναι χαμηλή μέχρι το ρεύμα φτάσει σε ένα σχετικό

υψηλό επίπεδο. Αυτό οφείλεται στις λειτουργίες μεταφοράς και τις μηδενικές αρχικές συνθήκες. Η τάση κορυφώνεται ακριβώς στα τελευταία 400s μετά αρχίζει να μειώνεται. Αυτό είναι χαρακτηριστικό μίας κυψέλης και έχει να κάνει με τις αναστρεψιμότητες όταν το ρεύμα φτάνει σε ένα ορισμένο επίπεδο.

Βιβλιογραφία

- [1] James Larminie , Andrew Dicks, "Fuel Cell Systems Explained, Second Edition".
- [2] <http://celulasdecombustivel.planetaclix.pt/historia.html>.
- [3] Joao Gaspar Bezerra Filho, Células a combustível a Hidrogênio - Estudo de Caso comparativo com um motor a combustão,2008
- [4] <http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells/applications/transport>
- [5] <http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells/applications/stationary>
- [6] <http://www.fuelcelltoday.com/about-fuel-cells/applications/fuel-and-infrastructure>
- [7]Fuel Cell HandBook, EG&G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation,2000.
- [8] J. O'M Bockris and A.J. Appleby, *Energy*, 11, 95, 1986.
- [9] S.S. Penner, ed., *Assessment of Research Needs for Advanced Fuel Cells*, DOE/ER/300.60- T1, US DOE, 1985.

- [10] PEM Fuel Cells For Distributed Generation, Stephen Lasher; Robert Zogg, P.E., Eric Carlson; Patrick Couch; Matthew Hooks,2006;

- [11] Using Molten-Carbonate Fuel Cells For Distributed Generation, Robert Zogg, P.E., Eric Carlson; Kurt Roth, Ph.D, 2007;

- [12] Using Phosphoric-Acid Fuel Cells For Distributed Generation, Suresh Sriramulu, Ph.D,2006;

- [13] Using Solid-Oxide Fuel Cells For Distributed Generation, Robert Zogg, P.E., Suresh Sriramulu, Ph.D., 2006;
- [14]Applying fuel cells to data centers for power and cogeneration,2009, AMY L CARLSON,2009.
- [15] Fuel Cell for Power Generation, US Fuel Cell Council,2009.
- [16] Utilização De Células A Combustível Tipo Pem Como Alternativa Na Geração Auxiliar Em Instalações Elétricas De Grande Porte, A. F. B. Júnior,2009.

- [17] Sistemas de conversão de energia - Células de combustível, ENERAREA, 2012.
- [18] Ηλεκτρονικά ισχύος, Στέφανος Ν. Μανιάς, 2012
- [19] Ηλεκτρονικά Ισχύος, Α.Σαφάκας, 2007.

[20] Dynamic Modeling a of Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) and Its Power Conditioning System, M. A. Tanni, Md Arifujjaman, and M. T. Iqbal. 2006

[21] Predicting the effects of process parameters on the performance of phosphoric acid fuel cells using a 3-D numerical approach, P. L. Zervas, M. K. Koukou, and N. C. Markatos March 2006

[22] Simulation Models of Fuel Cell Systems, Chiara Boccaletti, Gerardo Duni, Gianluca Fabbri, Ezio Santini, 2002.

[23] Modeling Design of Solid Oxide Fuel Cell Power System for Distributed Generation Applications, N. Prema Kumar, K. Nirmala Kumari, K.M.Rosalina,2012.