



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

«Ανάλυση Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου και Μοντελοποίηση τους με τη Χρήση του Λογισμικού Simulink.»

Διπλωματική Εργασία

Μπομπολάκη Ευτυχία

Επιβλέπων καθηγητής

Κανέλλος Φώτιος

Χανιά 2015

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην δυναμική προσομοίωση της συμπεριφοράς των κυψελών καυσίμων (fuel cells) με την ανάπτυξη μοντέλων καθώς και στην καταγραφή και ανάλυση της λειτουργίας και της χρήσης των τύπων αυτών σε σύγχρονες εφαρμογές ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι αρχές που διέπουν τη δομή, τη λειτουργία και τα υποστηρικτικά μέσα των κυψελών καυσίμου. Ακολούθως παρατίθενται τα πλεονεκτήματα της χρήσης τους ως ηλεκτροχημικές διατάξεις παραγωγής καθαρής ενέργειας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται και ερμηνεύεται το μοντέλο προσομοίωσης κυψέλης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) όπως αναπτύχθηκε στο λογισμικό Simulink του περιβάλλοντος Matlab.

Στο τρίτο κεφάλαιο συνάγονται συμπεράσματα σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σχετικά με την απόκριση του συστήματος της κυψέλης στη μεταβατική κατάσταση και αλλά και σε μεταβολές του διασυνδεδεμένου φορτίου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται η ικανότητα χρήσης του μοντέλου στα πλαίσια εφαρμογής για την προσομοίωση λειτουργίας ηλεκτρικού οχήματος με τη χρήση κυψελών καυσίμου.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
1. Ανάλυση Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου	5
Εισαγωγή Κεφαλαίου.....	5
1.1 Αρχές Λειτουργίας	6
1.1.1 Γενική Δομή Κυψελών Καυσίμου.....	6
1.1.2 Βασικές Αρχές Λειτουργίας Κυψέλης Υδρογόνου	7
1.2 Τύποι κυψελών Καυσίμου	11
1.2.1 Διάκριση Τύπων Κυψελών Καυσίμου.....	11
1.2.2 Είδη Κυψελών Καυσίμου.....	14
1.3 Γενικά Χαρακτηριστικά και Συστήματα Λειτουργίας	22
1.3.1 Περιφερειακό Σύστημα Κυψέλης Καυσίμου.....	22
1.3.2 Απόδοση Κυψελών Καυσίμου.....	25
1.3.3 Απώλειες Τάσης.....	27
1.3.4 Ισοδύναμο Κύκλωμα Κυψέλης Καυσίμου	35
1.3.5 Συστοιχία Κυψελών Καυσίμου.....	36
1.3.6 Μετατροπέας Συνεχούς Τάσης (Σύστημα Ηλεκτρονικών Ισχύος)	39
1.3.7 Πλεονεκτήματα Κυψελών Καυσίμου.....	43
2. Μοντελοποίηση Κυψέλης Υδρογόνου σε Περιβάλλον Matlab.....	49
Εισαγωγή Κεφαλαίου.....	49
2.1 Μοντέλο Περιγραφής της Τάσης Εξόδου Κυψέλης Υδρογόνου	50
2.2 Μοντελοποίηση Μεταβατικής Συμπεριφοράς της Τάσης Εξόδου.....	63
2.3 Μοντέλο Προσομοίωσης Λειτουργίας Κυψέλης Υδρογόνου υπό Μεταβαλλόμενο Φορτίο.....	66
2.4 Μοντελοποίηση DC/DC Μετατροπέα Τάσης.....	68
3. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Συστήματος Κυψέλης Καυσίμου – Συνεχούς Μετατροπέα Ανύψωσης	74
Εισαγωγή Κεφαλαίου.....	74
3.1 Αποτελέσματα Μοντέλου Τάσης Εξόδου Κυψέλης Μembrάνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC).....	75
3.2 Αποτελέσματα Μεταβατικής Συμπεριφοράς Τάσης Εξόδου Κυψέλης PEMFC	82
3.3 Αποτελέσματα Μοντέλου Προσομοίωσης υπό Μεταβαλλόμενο Φορτίο.....	84
3.4 Αποτελέσματα Μοντέλου DC/DC Μετατροπέα Τάσης.....	87

3.5 Γενικά Συμπεράσματα.....	94
4. Προσομοίωση Συστήματος Κυψέλης Καυσίμου PEMFC – Ηλεκτρικού Οχήματος	95
Εισαγωγή Κεφαλαίου.....	95
4.1 Παρουσίαση Μοντέλου Ηλεκτρικού Οχήματος.....	96
4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Συστήματος Κυψέλης PEMFC - Ηλεκτρικού Οχήματος.....	101
4.3 Συμπεράσματα Προσομοίωσης Συστήματος Κυψέλης PEMFC - Ηλεκτρικού Οχήματος.....	107
Βιβλιογραφία	108

1. Ανάλυση Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου

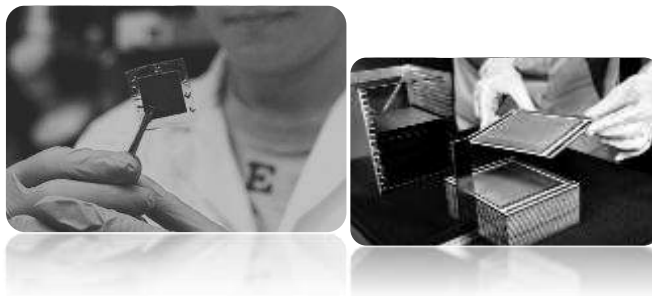
Εισαγωγή Κεφαλαίου

Οι κυψέλες καυσίμου (fuel cells) αποτελούν μια σημαντική διέξοδο στην τεχνολογία που αφορά την παραγωγή ενέργειας, ώστε οι προσπάθειες απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα να συμβάλλουν με επιτυχία στην προστασία του περιβάλλοντος.

Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου στηρίζεται σε βασικές ηλεκτροχημικές αρχές που ακολουθούν διαδικασία αντίθετη της ηλεκτρόλυσης. Χαρακτηρίζεται από απευθείας μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου τροφοδοσίας σε ηλεκτρική ενέργεια με απουσία καύσης, θορύβου και δονήσεων, επιτυγχάνοντας βαθμό απόδοσης υψηλότερο από οποιοδήποτε άλλο συμβατικό θερμομηχανικό σύστημα. Η ενεργειακή αυτή μετατροπή πραγματοποιείται με μεγάλη αξιοπιστία και σημαντικά χαμηλές εκπομπές ρύπων που οφείλονται στην εξαιρετικά καθαρή επεξεργασία του καυσίμου εξωτερικής τροφοδοσίας.

Η παραγωγή ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με συνεχή τρόπο, εφόσον οι αναγκαίες ποσότητες καυσίμου παρέχονται αδιάλειπτα. Οι κυψέλες αποτελούν ουσιαστικά ηλεκτροχημικές διατάξεις που απελευθερώνουν θερμότητα ως υποπροϊόν της διαδικασίας μετατροπής της χημικής ενέργειας, η οποία μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί προς συμπαραγωγή ενέργειας.

Είναι σαφές ότι οι κυψέλες καυσίμου απαριθμούν πλεονεκτήματα έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσης επειδή δεν εκπέμπουν αέριους ρύπους και μετατρέπουν σε πολύ μεγαλύτερο ποσοστό τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρισμό. Σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας η χρήση τους ως συσκευές παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, από σταθμούς παραγωγής ενέργειας και οχήματα, μέχρι φορητές συσκευές ισχύος και κινητά τηλέφωνα διευρύνεται σταδιακά, με πολλά περιθώρια επέκτασης σε άλλες ηλεκτρικές, θερμικές εφαρμογές και δίκτυα.



1.1 Αρχές Λειτουργίας

Η διαδικασία με την οποία λειτουργούν οι κυψέλες καυσίμου βασίζεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της ηλεκτροχημικής οξείδωσης ενός καυσίμου. Η διαδικασία εξελίσσεται φυσικά και οφείλεται στο γεγονός ότι φορτισμένα σωματίδια κατευθύνονται προς περιοχές χαμηλότερης ηλεκτροχημικής ενέργειας, προκειμένου να σχηματίσουν πιο σταθερές ενώσεις.

Από την ηλεκτροχημική ένωση του καυσίμου με κάποιο οξειδωτικό μέσο που λαμβάνει χώρα στην κυψέλη, παράγεται ηλεκτρική ενέργεια με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας και σχηματισμό νερού. Το βασικό καύσιμο των κυψελών καυσίμου είναι το **υδρογόνο**, ωστόσο ορισμένοι τύποι μπορούν να λειτουργήσουν και με μονοξείδιο του άνθρακα ή υδρογονάνθρακες. Εκτός του καυσίμου, απαραίτητο είναι και ένα οξειδωτικό μέσο, το οποίο συνήθως είναι το **οξυγόνο**. Σε ορισμένους τύπους κυψελών παρέχεται ξεχωριστά ενώ σε άλλους προσλαμβάνεται ελεύθερα από την ατμόσφαιρα. Το καύσιμο και το οξειδωτικό μέσο αποθηκεύονται είτε σε δεξαμενές υψηλής πίεσης, οι οποίες επιτρέπουν την εύκολη αντικατάστασή τους, είτε σε περιοχές συσσώρευσης, οι οποίες επαναφορτίζονται ή αντικαθίστανται όταν διοχετεύσουν το σύνολο των αντιδρώντων στην κυψέλη.

1.1.1 Γενική Δομή Κυψελών Καυσίμου

Οι κυψέλες είναι λεπτές πλακοειδής διατάξεις που οφείλουν το σχήμα τους στην αναλογία της περιοχής αντίδρασης και του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται σε αυτήν, όταν τα αντιδρώντα συναντούν το ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη.

Η δομή μιας κυψέλης καυσίμου είναι απλή και διαρθρώνεται σε τρία λειτουργικά μέρη. Αποτελείται από δυο ηλεκτρόδια, ένα καθόδου και ένα ανόδου αντίστοιχα. Κάθε ηλεκτρόδιο πλαισιώνονται εξωτερικά από μια πλάκα που δρομολογεί τα αέρια ώστε εκείνα να εισέλθουν στην κυψέλη. Η πλάκα αυτή κατασκευάζεται από γραφίτη και ονομάζεται πλάκα ροής των αερίων. Διαθέτει, τέλος, έναν ηλεκτρολύτη που παρεμβάλλεται ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια.

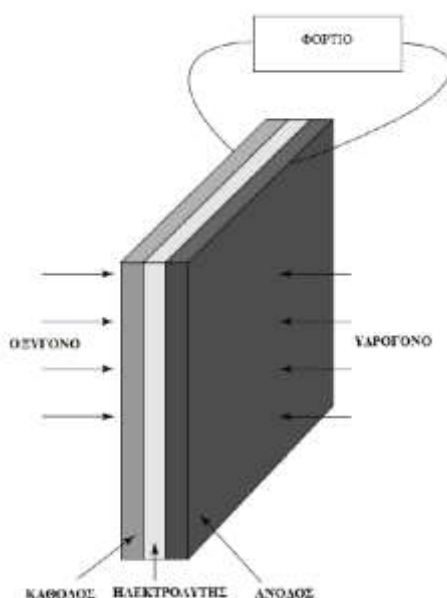
Τα **ηλεκτρόδια** της κυψέλης αποτελούν πολύπλοκες νανοδομές που περιέχουν καταλύτη, πόρους και ηλεκτρικά αγωγικά υλικά. Τα ηλεκτρόδια συμμετέχουν στη διαδικασία χωρίς να υποβάλλονται σε αλλαγές ως προς τη χημική τους σύσταση. Διαθέτουν ένα στρώμα διάχυσης για τα αέρια (gas diffusion layer), το οποίο σχηματίζει ένα λεπτό προστατευτικό στρώμα στην επιφάνεια του καταλύτη. Αποτελείται από υδροφοβικό χαρτί γραφίτη ώστε τα αέρια να μεταφέρονται εύκολα και να διατηρείται η ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Τα ηλεκτρόδια και ο καταλύτης κατασκευάζονται έτσι ώστε τα άτομα του υδρογόνου και του οξυγόνου να διαχέονται ομογενώς στην επιφάνεια του καταλύτη μέσω του στρώματος, με στόχο τη διεύρυνση της επιφάνειας επαφής των αερίων αυτών και του καταλύτη. Στην επιφάνεια αυτή πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις της κυψέλης μόλις τα αέρια διαπεράσουν την πορώδη περιοχή των ηλεκτροδίων. Τα στρώματα του καταλύτη που υπάρχουν στα ηλεκτρόδια χρησιμεύουν στην αύξηση της ταχύτητας διάσπασης του υδρογόνου και κυρίως της ταχύτητας σχηματισμού του νερού, στην άνοδο και στην κάθοδο αντίστοιχα, με στόχο να επιταχύνεται η συνολική διαδικασία.

Η χρήση ενός αποτελεσματικού καταλύτη οδηγεί σε αύξηση του παραγόμενου ρεύματος χωρίς την ανάλογη συσσώρευση φορτίου στη διεπαφή ηλεκτρολύτη και ηλεκτροδίου, μειώνει δηλαδή το φράγμα δυναμικού που πρέπει να υπερνικηθεί προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι αντιδράσεις.

Οι **ηλεκτρολύτες** κατασκευάζονται όσο λεπτότεροι γίνεται ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απόσταση επί της οποίας γίνεται η ιοντική απαγωγή, προκειμένου να περιορίζονται οι απώλειες αντίστασης που επιδρούν αρνητικά στην απόδοση της κυψέλης. Διαθέτουν μεγάλη θερμική και μηχανική αντοχή σε περίπτωση απότομης μεταβολής της πίεσης μέσα στην κυψέλη. Το τυπικό πάχος ενός ηλεκτρολύτη, που συνήθως έχει τη μορφή λεπτής μεμβράνης, κυμαίνεται από 50 έως 175 μm . Για την κατασκευή του χρησιμοποιούνται μεταλλικά στοιχεία όπως ο λευκόχρυσος (Pt) και το παλλάδιο (Pd).

Εικ.1.1 Αναπαράσταση δομής απλής κυψέλης (fuel cell).



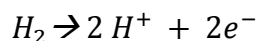
1.1.2 Βασικές Αρχές Λειτουργίας Κυψέλης Υδρογόνου

Στη βασική της μορφή, η διάταξη λειτουργεί ως εξής: υδρογόνο και οξυγόνο αντιδρούν με την παρουσία ηλεκτρολύτη και παράγουν νερό, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσεται ένα ηλεκτροχημικό δυναμικό που προκαλεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα (φορτίο).

Αναλυτικά, το υδρογόνο (καύσιμο) τροφοδοτείται στην άνοδο της κυψέλης, η οποία αποτελεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο και το οξυγόνο (οξειδωτικό μέσο) στην κάθοδο, δηλαδή στο θετικό ηλεκτρόδιο της διάταξης. Οι τιμές του ρεύματος στις οποίες λειτουργεί η κυψέλη καθορίζουν την απαιτούμενη ποσότητα των αντιδρώντων, η οποία για να λειτουργεί σωστά πρέπει να τροφοδοτείται απρόσκοπτα με καύσιμο και οξειδωτικό μέσο. Γενικά, οι απαιτήσεις αυξάνονται για υψηλές τιμές του ρεύματος λειτουργίας της κυψέλης.

Όλες οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μια κυψέλη αποτελούνται από δυο επιμέρους ημιαντιδράσεις. Πρόκειται για την αντίδραση της οξείδωσης του υδρογόνου στην άνοδο και την αναγωγή του οξυγόνου στην κάθοδο. Η ισοδύναμη χημική αντίδραση που συνοψίζει τη διαδικασία δεν είναι άλλη από την απλή αντίδραση με την οποία σχηματίζεται το νερό.

Ημιαντίδραση Οξείδωσης:

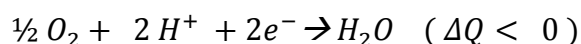


Κατα την οξείδωση του υδρογόνου παράγονται κατιόντα υδρογόνου και απελευθερώνονται ηλεκτρόνια. Τα κατιόντα μεταφέρονται στην κάθοδο μέσω της ιοντικά αγωγίμης μεμβράνης, που παίζει το ρόλο του ηλεκτρολύτη.

Η ροή των κατιόντων στην κάθοδο είναι πιο σύνθετη σε σχέση με τη μεταφορά των ηλεκτρονίων. Η παρουσία ηλεκτρολύτη διευκολύνει σημαντικά τη ροή εξαιτίας της μάζας και του μεγέθους που διαθέτουν τα κατιόντα, σε σύγκριση με τα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερώθηκαν μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος που συνδέει την άνοδο με την κάθοδο προς την κάθοδο, παράγοντας ηλεκτρισμό καθώς η μεμβράνη αποτρέπει τη διέλευση των ηλεκτρονίων από το εσωτερικό της.

Ο ρόλος της μεμβράνης είναι εξαιρετικά σημαντικός καθώς η μετάβαση των ηλεκτρονίων από το ένα άκρο στο άλλο θα δημιουργούσε προβλήματα βραχυκύκλωσης και ως εκ τούτου το ηλεκτρικό στοιχείο δε θα μπορούσε να λειτουργήσει ομαλά. Η μεμβράνη επίσης αποτελεί επιφάνεια διαχωρισμού του υδρογόνου και του οξυγόνου ώστε εκείνα να μην αντιδρούν πρόωρα μέσα στην κυψέλη.

Ημιαντίδραση Αναγωγής:



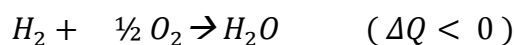
Η αντίδραση των κατιόντων υδρογόνου με το παρεχόμενο οξυγόνο οδηγεί στο σχηματισμό νερού με παράλληλη απελευθέρωση θερμότητας. Στο σχηματισμό συμμετέχουν και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που διοχετεύτηκαν από το εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα στην κάθοδο.

Η ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η ημιαντίδραση αναγωγής είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή της οξείδωσης και επομένως θέτει περιορισμούς στην ισχύ εξόδου της κυψέλης που επηρεάζει σε μεγάλο ποσοστό την απόδοσή της. Ένας τρόπος βελτίωσης της ταχύτητας αυτής, πέρα από την ήδη υπάρχουσα επένδυση καταλύτη στο ηλεκτρόδιο, είναι η αύξηση της θερμοκρασίας μέσα στην κυψέλη.

Το νερό που παράγεται, απομακρύνεται από την επιφάνεια της μεμβράνης και οδηγείται στην έξοδο της κυψέλης. Σε αυτό συμβάλλει το στρώμα διάχυσης αερίων (gas diffusion layer) που διαθέτει το ηλεκτρόδιο, το οποίο αποτρέπει τη συγκράτηση υπερβολικής ποσότητας νερού που παρεμποδίζει τη διαδικασία σχηματισμού νέων

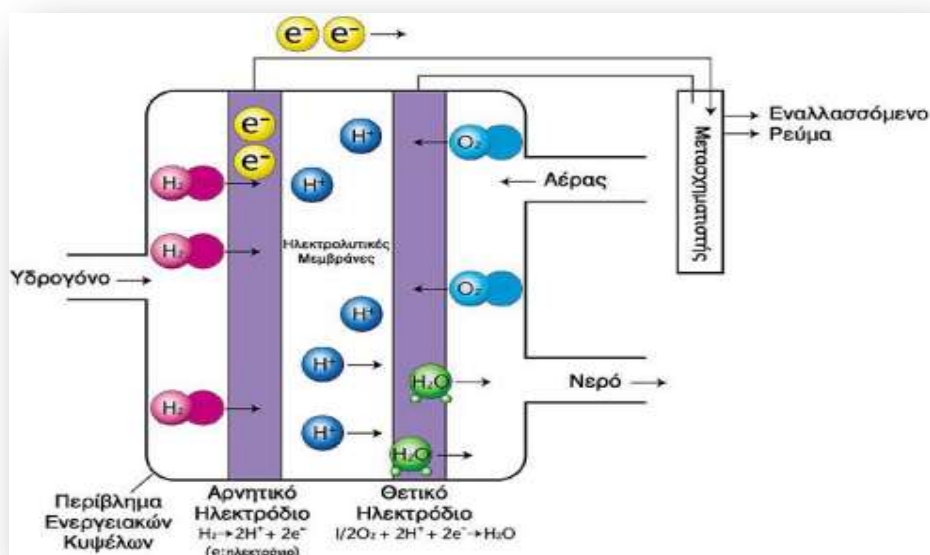
μορίων νερού. Παράλληλα διατηρεί τις κατάλληλες συνθήκες υγρασίας που χρειάζεται ο ηλεκτρολύτης για να λειτουργήσει σωστά.

Συνολική αντίδραση:



Η διεργασία που συντελείται εντός της κυψέλης οδηγεί στην παραγωγή καθαρών προϊόντων με ηλεκτροχημικό τρόπο, γεγονός που τη διαφοροποιεί σημαντικά από τη διαδικασία της καύσης. Για την ακρίβεια, οι κυψέλες παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλά ποσοστά σε επίπεδο αέριων ρύπων, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την περίπτωση του υδρογόνου, για την οποία οι ρύποι είναι μηδενικοί.

Εικ.1.2 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας απλής κυψέλης καυσίμου (fuel cell).



Δομικό στοιχείο κυψέλης	Περιγραφή	Συνήθεις Τύποι
Μεμβράνη Ανταλλαγής Ιόντων (ηλεκτρολύτης)	Επιτρέπει την μεταφορά των ιόντων από την άνοδο στην κάθοδο της κυψέλης.	Υπερφθοριωμένη μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων (Nafion112, 115, 117)



Επένδυση Καταλύτη	Διευκολύνει τον ιονισμό και την οξείδωση των κατιόντων του καυσίμου ενώ τα ηλεκτρόνια ρέουν προς το φορτίο.	Λευκόχρυσος (Pt) Ανθρακικοί Καταλύτες (Carbon catalysts) 
Στρώμα Διάχυσης Αερίων	Βοηθά στη διάχυση καυσίμου και οξειδωτικού μέσου διαμέσου της πορώδους περιοχής των ηλεκτροδίων και άγει τα ηλεκτρόνια.	Χαρτί από γραφίτη και ίνες άνθρακα 
Πλάκες Ροής Αερίων	Κατευθύνουν το καύσιμο και το οξειδωτικό μέσο στο στρώμα διάχυσης των αερίων.	Πλάκες από γραφίτη και ανοξείδωτο χάλυβα 
Στεγανωτικά Παρεμβύσματα (Φλάντζες)	Αποτρέπουν τη διαρροή καυσίμου και βοηθούν στην ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης.	Τεφλόν, πυριτίου (Si) 
Τελικές Πλάκες	Συγκρατούν και σταθεροποιούν είτε την κυψέλη είτε ένα σύνολο από συνδεδεμένες κυψέλες.	Ανοξείδωτος χάλυβας, γραφίτης, πολυαιθυλένη, PVC 

Πιν.1.1 Δομικά μέρη και λειτουργία απλής κυψέλης καυσίμου (fuel cell).

1.2 Τύποι κυψελών Καυσίμου

Βασικός σκοπός της ανάπτυξης διαφόρων ειδών κυψελών καυσίμου είναι η κάλυψη δομικών και λειτουργικών αναγκών που παρουσιάζονται στην πράξη, όπως η μικρή διαθεσιμότητα του καυσίμου υδρογόνου και η χαμηλή τιμή στην ένταση του ρεύματος και στην ισχύ που παράγεται από την κυψέλη.

Παρόλο που η λειτουργία ορισμένων κυψελών στηρίζεται σε διαφορετικές χημικές αντιδράσεις, η βασική ηλεκτροχημική αντίδραση του σχηματισμού του νερού αποτελεί κοινό σημείο αναφοράς για όλους τους τύπους. Κύριοι παράγοντες διάκρισης των τύπων αυτών είναι η **θερμοκρασία λειτουργίας** της κυψέλης και το **είδος του ηλεκτρολύτη** που χρησιμοποιείται.

Κάθε τύπος αναπτύσσεται κατάλληλα ώστε να καλύπτει εύρος εφαρμογών που αποσκοπούν στην συνεχή εξέλιξη των τεχνολογικών μέσων και διαρκώς διευρύνεται, όπως υπαγορεύεται από τις ανάγκες της σύγχρονης αγοράς ενέργειας.

1.2.1 Διάκριση Τύπων Κυψελών Καυσίμου

Ουσιαστικά η επιλογή του ηλεκτρολύτη υπαγορεύει το καύσιμο αλλά και το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης. Η θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί μια κυψέλη, η πίεση όπως και η παροχή καυσίμου και οξειδωτικού μέσου ρυθμίζουν το ηλεκτρικό δυναμικό, το οποίο μεταβάλλεται έντονα ανάλογα με την ένταση του ρεύματος που παράγεται από την κυψέλη και άρα επηρεάζει αισθητά την απόδοση της.

Όταν οι κυψέλες λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, η μεταφορά μάζας εντός της κυψέλης βελτιώνεται καθώς η κίνηση των κατιόντων του υδρογόνου μέσω του ηλεκτρολύτη αυξάνεται, παρόλο που η κίνηση των ηλεκτρονίων περιορίζεται. Για να βελτιωθεί η ποιότητα της χημικής αντίδρασης πρέπει τα δυο αυτά αποτελέσματα να συνδυαστούν κατάλληλα.

Οι σύγχρονες κυψέλες καυσίμου διακρίνονται με γνώμονα τη θερμοκρασία σε κυψέλες χαμηλής, μεσαίας και υψηλής θερμοκρασίας όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

Θερμοκρασία	Εύρος Λειτουργίας	Τύπος Κυψέλης	Ισχύς
<i>Χαμηλή</i>	50°C έως 100°C	<ul style="list-style-type: none"> Αλκαλική (AFC) Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC) Άμεσης Μεθανόλης (DMFC) 	1-100 kW
<i>Μεσαία</i>	150 °C έως 220 °C	Φωσφορικού Οξέως (PAFC)	10kW – 1MW
<i>Υψηλή</i>	550 °C έως 600 °C	<ul style="list-style-type: none"> Στερεών Οξειδίων (SOFC) Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (MCFC) 	1kW – 10 MW
	550 °C έως 650 °C		
	750°C έως 1000°C		

Πιν.1.2 Θερμοκρασίες Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου.

Με βάση τον ηλεκτρολύτη, η διάκριση των κυψελών καυσίμου δηλώνει το είδος της χημικής αντίδρασης που πραγματοποιείται εντός της κυψέλης. Προσδιορίζει ένα πλήθος παραγόντων όπως το είδος του καταλύτη που χρησιμοποιείται, τα καύσιμα, τη θερμοκρασία λειτουργίας και άλλα. Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά παρουσιάζονται αναλυτικά στους ακόλουθους πίνακες.

Ηλεκτρολύτης	Αντίδραση Ανόδου	Αντίδραση Καθόδου	Συνολική Αντίδραση	Τύπος κυψέλης
<i>Στερεά πολυμερής μεμβράνη</i>	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Μεμβράνη Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC)
<i>Στερεά πολυμερής μεμβράνη</i>	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{e}^- + \text{CO}_2$	$3/2\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{CH}_3\text{OH} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	Άμεσης Μεθανόλης (DMFC)
<i>Πορώδης μήτρα υδατικού αλκαλικού διαλύματος</i>	$2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Αλκαλική (AFC)
<i>Υγρό φωσφορικό οξύ (H₃PO₄-)</i>	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Φωσφορικού Οξέως (PAFC)
<i>Στερεό οξείδιο ή αγωγικό κεραμικό υλικό</i>	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$1/2 \text{O}^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Στερεών Οξειδίων (SOFC)

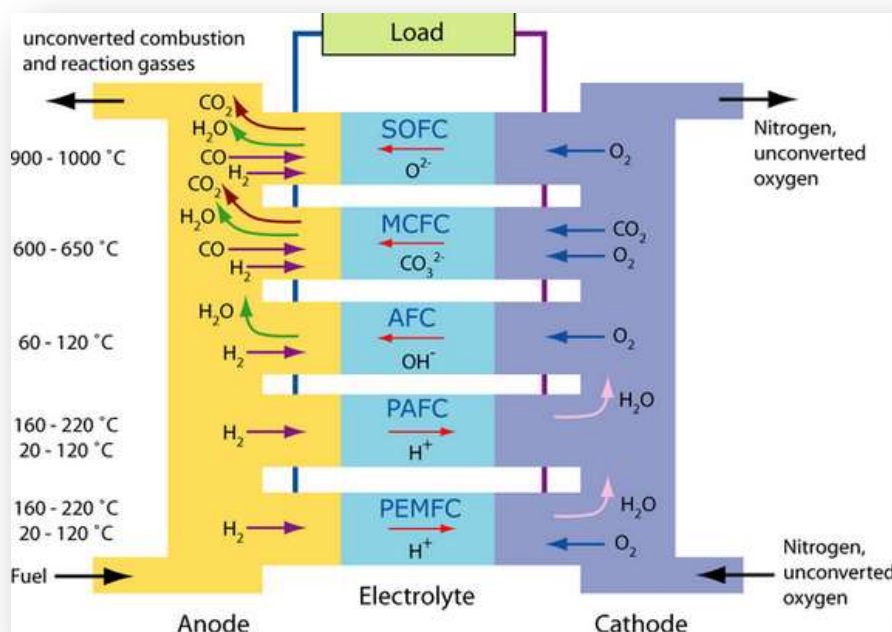
Κεμαρική μήτρα (BASE) από τηγμένο μίγμα ανθρακικού άλατος	$\text{H}_2 + \text{CO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2$ $\text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3$	Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (MCFC)
---	--	--

Πιν.1.3 Διάκριση κυψελών καυσίμου με βάση τον ηλεκτρολύτη.

Τύπος κυψέλης	Καύσιμο	Καταλυτική Επένδυση
Μεμβράνη Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC)	H ₂	Λευκόχρυσος (Pt)- Άνθρακας (C)
Άμεσης Μεθανόλης (DMFC)	CH ₄	Λευκόχρυσος (Pt)- Ρουθίνιο (Ru)
Αλκαλική (AFC)	H ₂	Λευκόχρυσος (Pt)
Φωσφορικού Οξέως (PAFC)	H ₂	Λευκόχρυσος (Pt)
Στερεών Οξειδίων (SOFC)	H ₂ CO, CH ₄	Κεραμική, μεταλλικού μίσγματος
Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (MCFC)	H ₂ , CO	Νικέλιο (Ni), Οξείδια του Νικελίου (NiO, NiAlO)

Πιν.1.4 Δομικές διαφορές τύπων κυψελών καυσίμου.

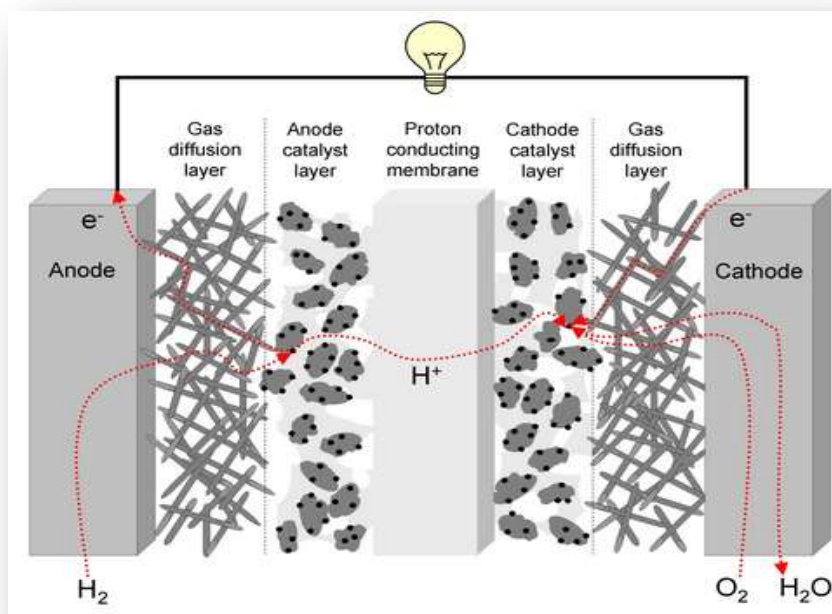
Εικ.1.3 Συγκεντρωτική απεικόνιση λειτουργίας δημοφιλέστερων τύπων κυψελών καυσίμου.



1.2.2 Είδη Κυψελών Καυσίμου

Κυψέλες Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC)

Εικ.1.4 Κυψέλη PEMFC.



Σε γενικές γραμμές, οι PEMFC έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, μικρό χρόνο έναρξης λειτουργίας και υψηλή ηλεκτρική απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 40-50%. Ο μικρός χρόνος εκκίνησης που οφείλεται στη χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους (συνήθως από 60 έως 80°C), τις καθιστά ιδιαίτερα πρακτικές σε εφαρμογές μεταφορών, σε στατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας αλλά και στη χρήση τους ως εφεδρικές γεννήτριες.

Αντίδραση Ανόδου	Αντίδραση Καθόδου	Συνολική Αντίδραση
$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Αντιδράσεις PEMFC.

Η μεμβράνη από πολυμερές στερεό που διαθέτουν οι PEMFC ως ηλεκτρολύτη, άγει επιτυχώς τα κατιόντα του υδρογόνου, εμποδίζει τα ηλεκτρόνια να τη διασχίσουν και διαχωρίζει αποτελεσματικά το καύσιμο από την οξειδωτική ουσία. Ασφαλέστερο καύσιμο για αυτό τον τύπο κυψελών είναι το υδρογόνο. Το εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας είναι αρκετά χαμηλό εξαιτίας των περιορισμών που εισάγει η χρήση του πολυμερούς ηλεκτρολύτη.

Τα μόρια υδρογόνου διασπώνται σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια στην άνοδο της κυψέλης, με τη βοήθεια καταλύτη από λευκόχρυσο (Pt) ώστε έπειτα να οδεύουν προς

την κάθοδο. Η χρήση καταλύτη από λευκόχρυσο είναι απαραίτητη ώστε να επιταχυνθεί η αντίδραση σχηματισμού του νερού, η οποία είναι αρκετά αργή λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργίας της κυψέλης, οι οποίες καθιστούν δύσκολη την απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας. Κάτι τέτοιο δε διευκολύνει τη χρήση της θερμότητας προς συμπαραγωγή ή την παραγωγή ατμού σε κάποιο υβριδικό σύστημα.

Σημαντικό ζήτημα για υψηλή απόδοση αποτελεί η διαχείριση του νερού. Το παραγόμενο νερό χρησιμοποιείται για την απαραίτητη ενυδάτωση της πολυμερούς μεμβράνης ενώ ταυτόχρονα πρέπει να ελέγχεται η ποσότητα που παραμένει στην κυψέλη ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική κατακράτηση. Ο εν λόγω ηλεκτρολύτης είναι υψηλού κόστους και μηχανικά σταθερός, γεγονός που αποτρέπει την εμφάνιση προβλημάτων σε σχέση με τα χρησιμοποιούμενα υλικά ακόμα και υπό συνθήκες διάβρωσης.

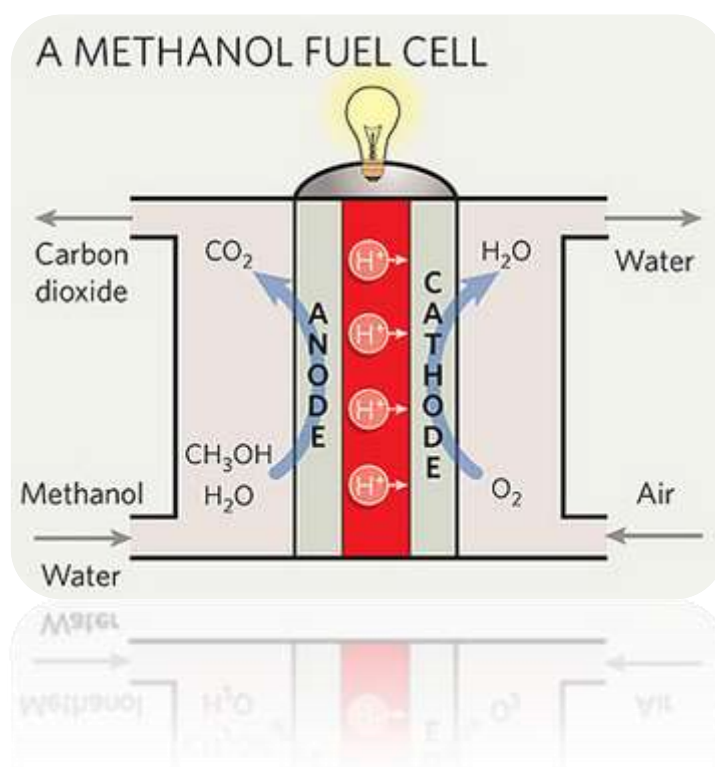
Οι PEMFC είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στη δηλητηρίαση από αέριους ρύπους οι οποίοι καταστρέφουν την άνοδο, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το θείο (S) και η αμμωνία (NH₃) που περιέχονται στο τροφοδοτούμενο υδρογόνο. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η χρήση υδρογόνου υψηλής καθαρότητας ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία της κυψέλης για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Πέρα από τη χρήση τους σε στατικές, εφεδρικές εφαρμογές και εφαρμογές μεταφορών, οι PEMFC κρίνονται κατάλληλες για τροφοδοσία συστημάτων χαμηλής ισχύος αλλά και για κινητές εφαρμογές όπως οι φορητές ηλεκτρονικές συσκευές.

Κυψέλες Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cell - DMFC)

Οι DMFC αποτελούν υποκατηγορία των PEMFC, με τη διαφορά ότι το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι η μεθανόλη (CH₃OH). Ανεξάρτητα από περιβαλλοντικές συνθήκες, η μεθανόλη έχει σταθερή δομή και καλή πυκνότητα ενέργειας, γεγονός που καθιστά τη μεταφορά της εύκολη. Το εύρος των θερμοκρασιών λειτουργίας της είναι 50 -120°C.

Εικ.1.5 Κυψέλη DMFC [13].



Αντίδραση Ανόδου	Αντίδραση Καθόδου	Συνολική Αντίδραση
$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 6\text{e}^- + \text{CO}_2$	$3/2\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{CH}_3\text{OH} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

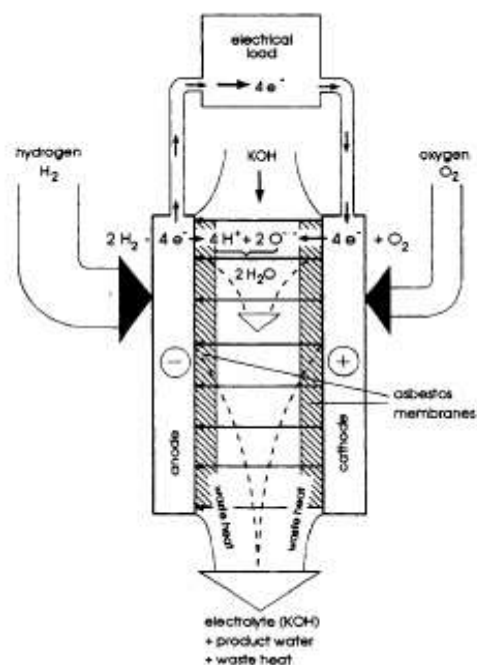
Αντιδράσεις DMFC.

Επειδή η απόδοση των DMFC είναι αρκετά χαμηλή σε σχέση με άλλες κατηγορίες κυψελών (κοντά στο 20%), χρησιμοποιούνται κυρίως εκεί όπου η πυκνότητα ενέργειας και ισχύος θεωρείται σημαντικότερη της απόδοσης, όπως ισχύει στην περίπτωση των φορητών εφαρμογών. Συγκεκριμένα, η ικανότητα των DMFC να παράγουν μικρή ποσότητα ισχύος για μεγάλα χρονικά διαστήματα, χωρίς τοξικότητα, θόρυβο και σημαντικές θερμικές απώλειες τις καθιστούν κατάλληλες για μη στατικές συσκευές και εφαρμογές.

Αλκαλικές Κυψέλες Καυσίμου (Alkaline Fuel Cell - AFC)

Κύριο χαρακτηριστικό των AFC είναι ο ηλεκτρολύτης από αλκαλικό διάλυμα, όπως το υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) ή το υδροξείδιο του καλίου (KOH). Οι θερμοκρασίες λειτουργίας των κυψελών αυτών δεν ξεπερνούν τους 100°C ενώ οι πιέσεις μπορεί να είναι αρκετά υψηλές όπως και η απόδοσή τους (60%).

Εικ 1.6Κυψέλη AFC.



Στα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά ως ηλεκτροκαταλύτες όπως το νικέλιο (Ni), ο άργυρος (Ag), διάφορα οξείδια των μετάλλων ή ευγενή μέταλλα. Βασικό πλεονέκτημα των τύπων αυτών είναι οι εναλλακτικές που παρουσιάζουν στη

χρήση των καταλυτών, οι οποίοι είναι χαμηλού κόστους και διευκολύνουν αρκετά τη διεξαγωγή των χημικών αντιδράσεων.

Στις εφαρμογές τους συγκαταλέγεται η χρήση σε διάφορες διαστημικές αποστολές όπως η ανάπτυξη και κατασκευή διαστημικών οχημάτων.

Αντίδραση Ανόδου	Αντίδραση Καθόδου	Συνολική Αντίδραση
$2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

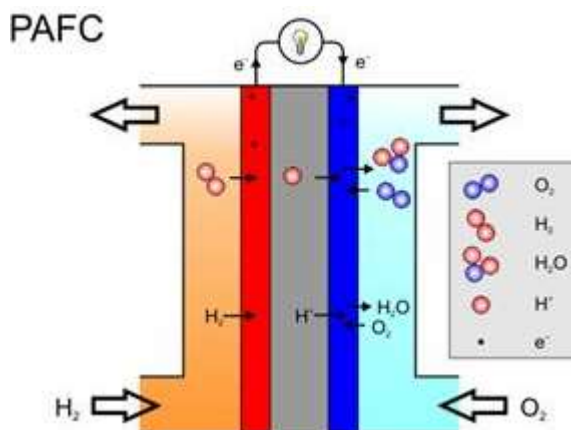
Αντιδράσεις AFC.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι AFC το οποίο καθιστά τη χρήση τους περιορισμένη σε σχέση με άλλα είδη κυψελών, είναι ότι η παροχή αέρα και καυσίμου δεν πρέπει να περικλείει ποσότητες CO_2 διότι αυτό αντιδρά με το αλκαλικό διάλυμα του ηλεκτρολύτη οδηγώντας στη διάβρωση του ενώ παράλληλα μειώνεται η απόδοση της κυψέλης, καθιστώντας τη χρήση καθαρού υδρογόνου απαραίτητη.

Κυψέλες Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC)

Οι PAFC λειτουργούν με αρκετά καλή απόδοση (40%) και διαθέτουν ως ηλεκτρολύτη υγρό φωσφορικό οξύ (H_3PO_4) ενώ ως καταλύτης χρησιμοποιείται λευκόχρυσος (Pt) ή κράματα του, το κόστος των οποίων θεωρείται υψηλό.

Εικ.1.7 Κυψέλη PAFC [13].



Οι ρυθμοί διεξαγωγής των αντιδράσεων διατηρούνται σε ικανοποιητικά επίπεδα χάρη στη χρήση καταλύτη και στη σχετικά υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας (150-220°C), η οποία δεν αποκλείει τη χρήση διαφόρων υλικών στο υπόλοιπο σύστημα που περιβάλλει την κυψέλη. Στο εσωτερικό της κυψέλης είναι απαραίτητη η χρήση υλικών καλής ποιότητας λόγω διαβρώσεων που προκαλεί το φωσφορικό οξύ.

Αντίδραση Ανόδου	Αντίδραση Καθόδου	Συνολική Αντίδραση
$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Αντιδράσεις PAFC.

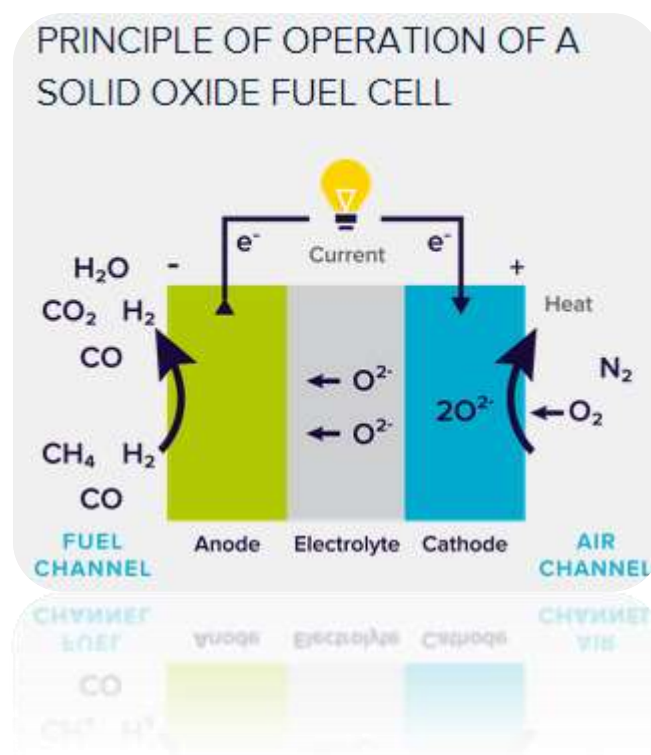
Η τεχνολογία των PAFC ήταν η πρώτη που αξιοποιήθηκε εκτενώς εμπορικά και συνεχίζει να χρησιμοποιείται ευρύτατα. Παρουσιάζει σημαντικές εφαρμογές σε συστήματα συνδυασμένου θερμικού κύκλου ισχύος 200kW (CHP Systems) καθώς μπορεί να αξιοποιηθεί για συμπαραγωγή σε κτιριακές εγκαταστάσεις με υψηλό βαθμό απόδοσης αλλά και αυτόνομα προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Πλεονεκτήματα που παρουσιάζει συγκριτικά με τα άλλα είδη κυψελών είναι η αξιοπιστία και η ανοχή στο CO_2 που μπορεί να υπάρχει στο καύσιμο και το οξειδωτικό μέσο. Από την άλλη, η ανάγκη για αύξηση της πυκνότητας ισχύος, της απόδοσης του ηλεκτρολύτη και της μείωσης του συνολικού κόστους περιορίζει τη χρήση της.

Κυψέλες Καυσίμου Στερεών Οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC)

Οι SOFC λειτουργούν σε περιοχή υψηλών θερμοκρασιών (550 – 1000°C) με υψηλή απόδοση (50 -60%) που οφείλεται στην υψηλής ταχύτητας κινητική των ηλεκτροδίων, υψηλές πυκνότητες ρεύματος και αργό χρόνο εκκίνησης που οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, οι οποίες περιορίζουν το χρόνο ζωής της κυψέλης.

Εικ.1.8 Κυψέλη SOFC.



Για την κατασκευή φθηνότερων και αποδοτικότερων κυψελών αναπτύχθηκαν λεπτότεροι ηλεκτρολύτες που επιτρέπουν τη λειτουργία και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (650-850°C).

Αντίδραση Ανόδου	Αντίδραση Καθόδου	Συνολική Αντίδραση
$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$1/2 \text{O}^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

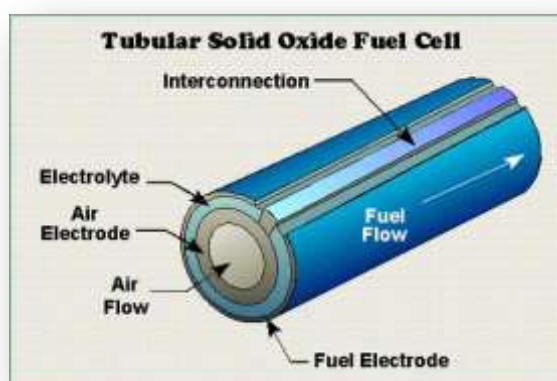
Αντιδράσεις SOFC.

Τα κεραμικά υλικά από τα οποία κατασκευάζονται οι SOFC είναι δύσκολο να κατεργασθούν και είναι ακριβά στην επεξεργασία ενώ επίσης απαιτείται η χρήση επιπλέον εξοπλισμού συγκριτικά με άλλους τύπους κυψελών όπως προθερμαντές αέρα και καυσίμου που επιτρέπουν την εσωτερική αναμόρφωση του καυσίμου.

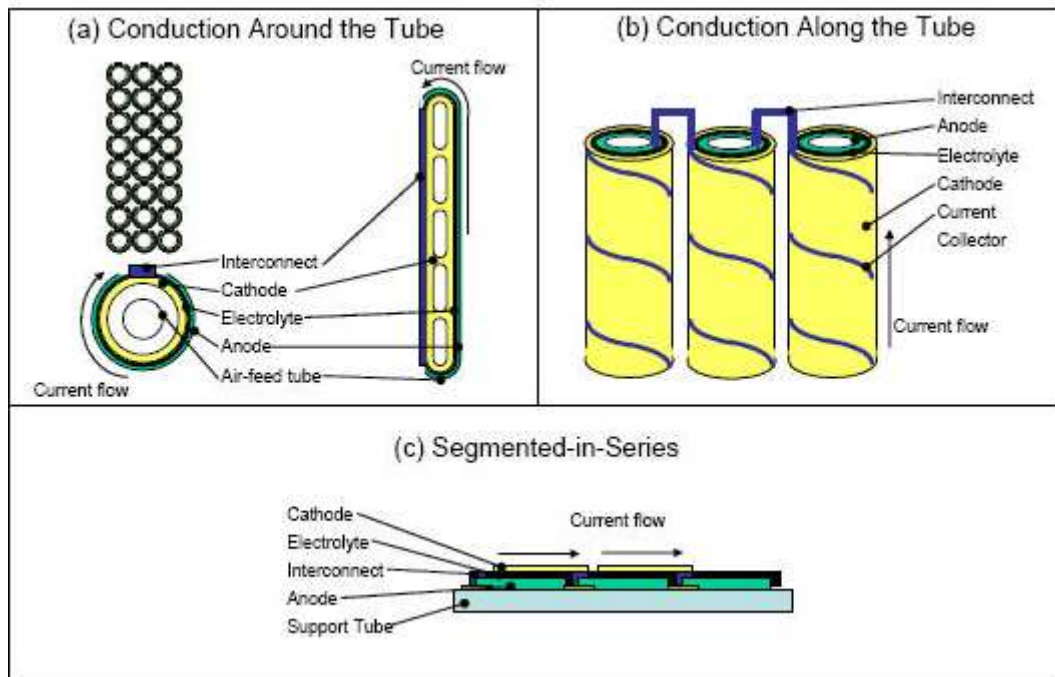
Οι SOFC χρησιμοποιούνται για παραγωγή ενέργειας από σταθερές μονάδες και από βοηθητικές πηγές ενέργειας για οχήματα ενώ ταυτόχρονα αποτελούν το πρώτο είδος κυψελών που χρησιμοποιήθηκε ποτέ. Με κατάλληλες υποδομές, η θερμότητα που εκλύουν μπορεί να αξιοποιηθεί προς συμπαραγωγή ενέργειας και για το λόγο αυτό κρίνονται κατάλληλες για όλα τα μεγέθη των συστημάτων συνδυασμένου θερμικού κύκλου ισχύος (CHP Systems).

Σημαντικό πλεονέκτημα των SOFC αποτελεί η χρήση στερεού ηλεκτρολύτη καθώς απλοποιείται η σχεδίαση του συστήματος, στο οποίο μπορούν να αποδοθούν κυλινδρικά σχήματα, ενώ τα προβλήματα διάβρωσης και διαχείρισης που σχετίζονται με υγρούς ηλεκτρολύτες εξαλείφονται. Παρ'όλα αυτά η αντίσταση που παρουσιάζει ο ηλεκτρολύτης θεωρείται σχετικά υψηλή.

Εικ.1.9 Αναπαράσταση σωληνοειδούς κυψέλης SOFC.



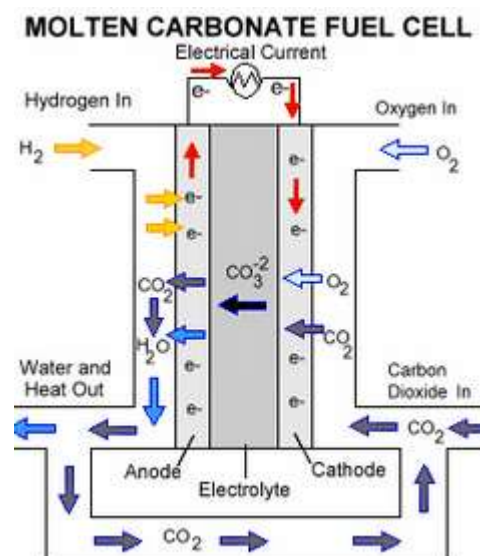
Εικ.1.10 Αναπαράσταση λειτουργίας μεμονωμένης σωληνοειδούς κυψέλης SOFC και συστοιχίας κυψελών SOFC.



Κυψέλες Καυσίμου Τήγματος Ανθρακικών Αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC)

Οι MCFC έχουν μεγάλο μέγεθος, παρουσιάζουν ευελιξία ως προς το χρησιμοποιούμενο καύσιμο, υψηλή απόδοση (50 – 60%), λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 600°C και χρησιμοποιούνται σε μεγάλης κλίμακας στατικές και συνεχείς εφαρμογές παραγωγής ενέργειας.

Εικ.1.11 Αναπαράσταση λειτουργίας κυψέλης MCFC.



Αποτελούν καλή λύση προς συμπαραγωγή ενέργειας σε συστήματα μέσης και μεγάλης ισχύος δεδομένου ότι η ποσότητα της θερμότητας που εκλύουν μπορεί να εκμεταλλευθεί κατάλληλα.

Οι MCFC χρησιμοποιούν τήγματα ανθρακικών αλάτων από ανθρακικά μέταλλα ως ηλεκτρολύτη και καταλύτη χαμηλού κόστους από νικέλιο (Ni) ενώ επιδεικνύουν χαμηλή αντοχή σε θειούχες ενώσεις. Για την κατασκευή της κυψέλης απαιτούνται ανθεκτικά υλικά ώστε ο ηλεκτρολύτης να μην προκαλεί διαβρώσεις και να μη παρουσιάζονται προβλήματα μηχανικής σταθερότητας που περιορίζουν τη διάρκεια ζωής της κυψέλης.

Ο χρόνος εκκίνησης είναι μεγάλος εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας που αναπτύσσονται. Η χρήση της παραγόμενης θερμότητας σε κάποιο άλλο θερμοδυναμικό κύκλο μπορεί να αυξήσει τα ποσοστά απόδοσης της κυψέλης.

Εικ.1.12 Χρήση MCFC σε στατικές εφαρμογές.



Αντίδραση Ανόδου	Αντίδραση Καθόδου	Συνολική Αντίδραση
$\text{H}_2 + \text{CO}_3 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3$	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

Αντιδράσεις MCFC.

Εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας των MCFC είναι δυνατή η χρήση διάφορων υδρογονανθράκων και του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) ως καύσιμα, η επεξεργασία των οποίων μπορεί να πραγματοποιηθεί στο εσωτερικό της κυψέλης ως εσωτερική αναμόρφωση του καυσίμου (internal reforming).

1.3 Γενικά Χαρακτηριστικά και Συστήματα Λειτουργίας

Οι κυψέλες καυσίμου, ως ηλεκτροχημικές διατάξεις παραγωγής ενέργειας διέπονται από θερμοδυναμικούς κανόνες και συγκεκριμένους μηχανισμούς που καθορίζουν τη λειτουργική τους συμπεριφορά, στα πλαίσια ενός ευρύτερου συστήματος στο οποίο εντάσσονται και αφορά τόσο την παραγωγή και όσο και την αποθήκευση και διανομή της διαθέσιμης ενέργειας.

Ο ρόλος τους ως εναλλακτικές πηγές ηλεκτρισμού αξιολογείται βάσει της απόδοσης και της χρήσης τους με την υποστήριξη αναγκαίων συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψιν τα πλεονεκτήματά τους έναντι λοιπών θερμικών συστημάτων όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης.

Εικ.1.13 Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας 5kW με χρήση κυψελών υδρογόνου ως βοηθητική μονάδα ισχύος και ενσωματωμένο επεξεργαστή καυσίμου.



1.3.1 Περιφερειακό Σύστημα Κυψέλης Καυσίμου

Όπως είναι φυσικό, η ύπαρξη εξωτερικών συσκευών που υποστηρίζουν τη λειτουργία των κυψελών κρίνεται αναγκαία για την ενεργειακή μετατροπή και την παραγωγή ωφέλιμου ηλεκτρικού έργου. Για τον λόγο αυτό μια κυψέλη είθισται να συνοδεύεται από τις εξής συσκευές:

Μονάδα Επεξεργασίας Καυσίμου (Reformer) και Δεξαμενές Αποθήκευσης: Για κυψέλες που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο που δεσμεύεται σε χημικές ενώσεις, όπως η μεθανόλη και το φυσικό αέριο, η επεξεργασία που χρειάζεται για την απόσπασή του πραγματοποιείται στη μονάδα αυτή με τη χρήση ειδικού καταλυτικού αντιδραστήρα. Το αέριο καύσιμο που αναμορφώθηκε και τελικά διοχετεύεται στην κυψέλη διαθέτει όσο το δυνατόν υψηλότερη περιεκτικότητα σε υδρογόνο ώστε η απόδοση του να προσεγγίζει τα επίπεδα του υδρογόνου. Παρόλο που η ενέργεια που εκλύεται είναι μικρότερη σε σχέση με τη χρήση καθαρού υδρογόνου επειδή οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται καταναλώνουν σημαντικά ενεργειακά ποσά, η

αποθήκευση των καυσίμων αυτών είναι ευκολότερη διότι η αποθήκευση του υδρογόνου είναι κατά πλειοψηφία τεχνικά δύσκολη και οικονομικά ασύμφορη. Φυσικά η επεξεργασία που πραγματοποιείται συνδέεται με την εκπομπή αερίων που ρυπαίνουν τον ατμοσφαιρικό αέρα και επιβαρύνει τη λειτουργία της εγκατάστασης με επιπλέον κόστος. Στο σύστημα αποθήκευσης συμπεριλαμβάνονται και μειωτήρες πίεσης για να εξασφαλίζεται η επιθυμητή τιμή στην πίεση του αέριου καυσίμου το οποίο συνήθως συμπίεζεται σε κυλίνδρους ή φυλάσσεται σε δεξαμενές υψηλής πίεσης.

Φίλτρο Παροχής Αέρα (Fuel Cell Air Filters) : Η ευαισθησία των κυψελών σε σωματίδια αιθάλης και σκόνης καθώς και άλλων σωματιδίων που εισέρχονται στο σύστημα μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα καθιστά υποχρεωτική την ύπαρξη φίλτρων ώστε αυξηθεί η διάρκεια ζωής και η αποδοτικότητα της διάταξης.

Συμπιεστής Αέρα (Air Compressor): Πολλές φορές ο αέρας που διοχετεύεται στο σύστημα είναι πεπιεσμένος καθώς ορισμένα είδη κυψελών απαιτούν μεγαλύτερη ποσότητα αέρα για να υποστηρίξουν τη χημική αντίδραση ανάμεσα στο οξυγόνο και το υδρογόνο αλλά και διότι η υψηλή πίεση βελτιώνει την επαφή των αντιδρώντων και του ηλεκτρολύτη. Ο συμπιεστής χρησιμοποιεί ένα τμήμα της παραγόμενης τάσης για να προσφέρει αέρα υψηλής πίεσης στο σύστημα. Η λειτουργία σε υψηλότερη πίεση βελτιώνει την ταχύτητα της αντίδρασης, κάτι που επηρεάζει θετικά την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και βελτιώνει συνολικά την απόδοση της κυψέλης. Ωστόσο η λειτουργία του συμπιεστή απαιτεί συνοδευτικό που απορροφά μεγάλη ποσότητα ισχύος ενώ οι μονώσεις της κυψέλης υφίστανται μεγαλύτερες καταπονήσεις όταν οι πιέσεις είναι υψηλές.

Σύστημα Διαχείρισης Θερμότητας: Επειδή η παροχή ψυκτικού υγρού κρίνεται δύσκολη εντός της κυψέλης στην πράξη η κυψέλη ψύχεται από τον αντιδρώντα αέρα που περνά πάνω από την κάθοδο ώστε να απάγεται θερμότητα προς το περιβάλλον. Για την διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας λειτουργίας και την θερμοαπαγωγή υπάρχει ανεξάρτητο σύστημα ψύξης όπως ο **ανταλλάκτης θερμότητας (Heat Exchanger)**. Συνήθως οι ανταλλάκτες χρησιμοποιούνται σε κυψέλες που λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η θερμότητα που πλεονάζει μπορεί να αξιοποιηθεί σε πληθώρα εφαρμογών, από θέρμανση χώρων και νερού χρήσης ή υλικών στα πλαίσια οικιακών αναγκών ή βιομηχανικής δραστηριότητας. Κυρίως διατίθεται για την προθέρμανση του καυσίμου της κυψέλης αλλά στη χρήση υβριδικών συστημάτων και μονάδων συμπαραγωγής ενέργειας και θερμότητας.

Σύστημα Διαχείρισης Νερού: Σε ορισμένα είδη κυψελών ο ηλεκτρολύτης λειτουργεί αποδοτικότερα υπό ορισμένες συνθήκες υγρασίας. Όταν τα επίπεδα της υγρασίας είναι χαμηλά, υπάρχει ο κίνδυνος ξήρανσης της μεμβράνης με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών και οπών που οδηγούν σε χημικά βραχυκυκλώματα, τοπικές αναμίξεις αερίων και θερμά σημεία με υπαρκτό τον κίνδυνο υπερθέρμανσης της κυψέλης και μείωσης του χρόνου ζωής της. Ένα μέρος του νερού που παράγεται και εξέρχεται από την κάθοδο επανεισέρχεται στην κυψέλη ώστε να υγραίνεται επαρκώς ο ηλεκτρολύτης. Το σύστημα πρέπει να διαθέτει φίλτρο απιονισμού για το νερό, προκειμένου να παραμένει μη αγωγίμο, να μη φέρει επομένως ιόντα ώστε να μην εμφανίζονται ανεπιθύμητα

Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος (Electronic Power Converters): Για τη μεταφορά και μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει ένα σύνολο κυψελών, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη ηλεκτρικού υποσυστήματος που αποτελείται από ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο η συνεχής τάση που παράγεται μετατρέπεται είτε σε εναλλασσόμενη οποιασδήποτε συχνότητας με τη χρήση ενός αντιστροφέα τάσης (DC-AC Converter), επειδή τα περισσότερα φορτία απαιτούν τροφοδοσία εναλλασσόμενου ρεύματος, είτε σε συνεχή τάση άλλου επιπέδου από μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC Converters) που παράλληλα την σταθεροποιούν. Γενικά, η διακύμανση της τάσης σε μια κυψέλη ανέρχεται στο 30 - 40% της ονομαστικής τιμής της για την περιοχή λειτουργίας. Επειδή η διακύμανση αυτή είναι υψηλή, η σταθεροποίηση της είναι απαραίτητη.

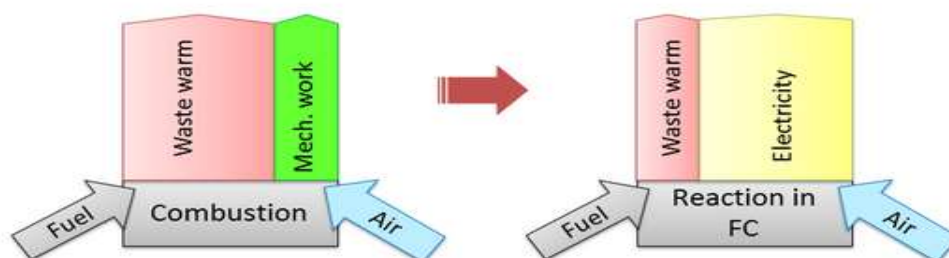
Αντλίες (Pumps): Παράλληλα με τους συμπιεστές, τους ρυθμιστές της πίεσης και τις βαλβίδες ελέγχου, η διατήρηση των απαιτούμενων συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας επιτυγχάνεται με την χρήση ηλεκτροδοτούμενων αντλιών οι οποίες χρησιμοποιούνται για την ομαλή μεταφορά των αντιδρώντων στο χώρο της κυψέλης αλλά και για τη διαχείριση του νερού.

1.3.2 Απόδοση Κυψελών Καυσίμου

Η αποδοτικότητα των κυψελών καυσίμου συνδέεται με τη ποιότητα της ηλεκτροχημικής αντίδρασης που λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό της κυψέλης, η οποία είναι σημαντικά καλύτερη της καύσης. Συγκεκριμένα, το ποσό της ενέργειας που μπορεί να απελευθερωθεί από την οξείδωση του υδρογόνου είναι το μεγαλύτερο που απελευθερώνεται από οποιοδήποτε άλλο καύσιμο ανά μάζα.

Η χημική ενέργεια που εκμεταλλεύονται οι μηχανές εσωτερικής καύσης όσο και οι στρόβιλοι είναι αδύνατο, ακόμα και υπό ιδανικές συνθήκες, να μην υποστεί απώλειες με τη μορφή θερμότητας και τριβών κατά τη μετατροπή της σε μηχανικό έργο.

Εικ.1.15 Συγκριτική απεικόνιση λειτουργίας ΜΕΚ και κυψελών καυσίμου.



Επειδή οι μηχανές εσωτερικές καύσης υπακούουν στο δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, ο βαθμός απόδοσης τους εξαρτάται από τη θερμοκρασία λειτουργίας της μηχανής, η οποία ταυτίζεται με τη θερμοκρασία του αερίου που εισέρχεται στο σύστημα. Η θερμοκρασία αυτή είναι επομένως αρκετά μικρότερη της θερμοκρασίας ανάφλεξης. Όσο υψηλότερη είναι, τόσο αποδοτικότερο είναι το σύστημα παρόλο που η συγκεκριμένη θερμοκρασία δε μπορεί να αυξηθεί αξιόλογα λόγω περιορισμών που αφορούν στην αντοχή των υλικών. Γενικά, η βέλτιστη θερμοδυναμική απόδοση μιας μηχανής περιγράφεται από τον κύκλο Carnot και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο :

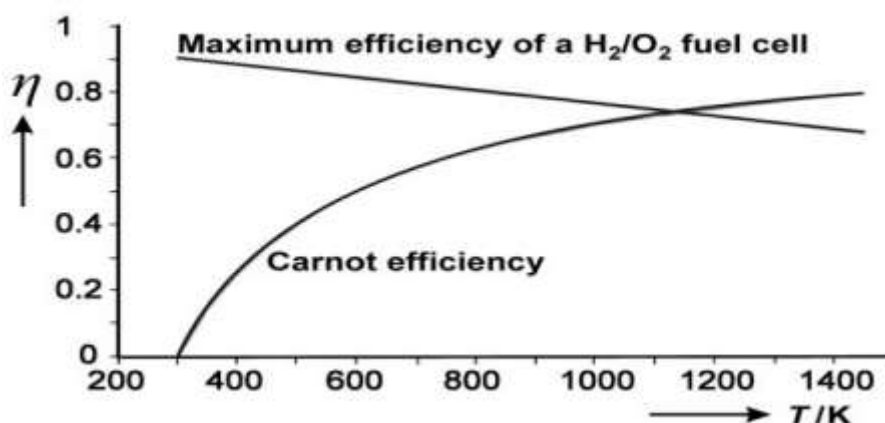
$$Efficiency_{max} = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (1.1)$$

T_H : Απόλυτη θερμοκρασία θερμού εισερχόμενου αερίου.

T_C : Απόλυτη θερμοκρασία ψυχρού εξερχόμενου αερίου.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η εξάρτηση του βαθμού απόδοσης από τη διαφορά της απόλυτης θερμοκρασίας του θερμού και του ψυχρού αερίου επιδρά περιοριστικά στην αύξηση του βαθμού απόδοσης, καθώς η θερμοκρασία του ψυχρού αερίου στην έξοδο του συστήματος (T_C) ταυτίζεται στην πράξη με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος με αποτέλεσμα το εύρος των δυο θερμοκρασιών να αυξάνεται μόνο με αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας της μηχανής.

Εικ.1.16 Θεωρητικός βαθμός απόδοσης κυψέλης καυσίμου σε πρότυπη πίεση και κύκλος Carnot.



Αντίθετα, οι κυψέλες ως σταθερές και αθόρυβες διατάξεις μετατρέπουν το σύνολο της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε ηλεκτρισμό, με τη διπλάσια σχεδόν απόδοση, χαμηλό κόστος λειτουργίας και απλή διαδικασία συντήρησης που οφείλεται στην απουσία κινητών μερών.

Ο υψηλός βαθμός απόδοσης που έχουν οφείλεται εν μέρει στο ότι δεν πραγματοποιούνται μετατροπές προκειμένου να παραχθεί η επιθυμητή μορφή ενέργειας και αδιαμφισβήτητα στην απουσία της καύσης, καθώς η απόδοση δε σχετίζεται με τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης και έτσι δεν περιορίζεται από θερμοκρασιακά όρια. Παρατηρείται ωστόσο ότι η απόδοση μιας κυψέλης τείνει να μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία λειτουργίας. Οι κυψέλες καυσίμου πλεονεκτούν ως προς την θερμοδυναμική αποδοτικότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά κάτι τέτοιο δεν ισχύει για υψηλότερες θερμοκρασίες.

Για να γίνει δυνατός ο υπολογισμός της ηλεκτρικής ενέργειας που θα παραχθεί από μια κυψέλη καυσίμου και να κριθεί η αποδοτικότητα της, είναι απαραίτητος ο ποσοτικός προσδιορισμός της χημικής ενέργειας που εκλύεται από την αντίδραση σχηματισμού του νερού, καθώς και του ποσοστού της ενέργειας αυτής που χρησιμοποιείται επωφελώς για την παραγωγή ηλεκτρικού έργου.

Αναλυτικά, ως θεωρητικός βαθμός απόδοσης της κυψέλης ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ωφέλιμης παραγόμενης ενέργειας που μπορεί να προσφερθεί από την κυψέλη στο περιβάλλον (ενέργεια Gibbs) προς τη μεταβολή της ενθαλπίας σχηματισμού, της ολικής δηλαδή ενέργειας με τη μορφή θερμότητας και ηλεκτρικού έργου που παράγεται υπό συνθήκες σταθερής πίεσης.

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (1.2)$$

Από θερμοδυναμική σκοπιά, η μεταβολή της ενθαλπίας σχηματισμού (ΔH) που πρέπει να προσδιοριστεί, διαφέρει εάν το προϊόν σχηματισμού (H_2O) βρίσκεται σε υγρή είτε σε αέρια φάση. Στην πρώτη περίπτωση ονομάζεται υψηλότερη θερμογόνος δύναμη (higher heating value - HHV) ενώ στη δεύτερη, κατώτερη θερμογόνος δύναμη (lower

heating value - LHV). Η θερμογόνος δύναμη αντιπροσωπεύει τη θερμική ενέργεια που θα παραγόταν από την πλήρη καύση 1 mol H_2 με $\frac{1}{2} \text{ mol O}_2$. Αναφορικά με την HHV του H_2 , η μέγιστη δυνατή θεωρητική απόδοση μιας κυψέλης που λειτουργεί στους 25°C υπό συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης (1 bar) είναι :

$$\eta = \frac{\Delta G_f^0}{\Delta H^0} = 83\% \quad (1.3)$$

Η μέγιστη θεωρητική απόδοση κυμαίνεται ανάλογα με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν διότι οι τιμές των $\Delta G, \Delta H$ διαφέρουν για κάθε περίπτωση. Συνάγεται επίσης ότι ακόμα και υπό ιδανικές συνθήκες λειτουργίας της κυψέλης, μέρος της ενέργειας που βρίσκεται αποθηκευμένη στο καύσιμο δεν μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ωφέλιμου έργου.

Η πραγματική απόδοση μιας κυψέλης ορίζεται ηλεκτροχημικά ως ο λόγος της τάσης εξόδου, προς το θεωρητικό δυναμικό που θα παραγόταν βάσει της θερμογόνου δύναμης του υδρογόνου, τη θεωρητικά δηλαδή μέγιστη ενέργεια που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική.

$$\eta_e = \frac{V_{cell} I}{\Delta H} = \frac{V_{cell} I}{\left(\frac{V_{ideal} I}{0.83}\right)} = 0.83 \frac{V_{cell}}{V_{ideal}} \quad (1.4)$$

Μία κυψέλη καυσίμου μπορεί να λειτουργήσει σε διαφορετικές πυκνότητες ρεύματος, με την τάση της να προσδιορίζει την απόδοση της κυψέλης. Συγκεκριμένα, η μείωση της τιμής του ρεύματος αυξάνει την τάση στην κυψέλη, η οποία βελτιώνει την απόδοση της. Δεδομένου ότι η πυκνότητα του ρεύματος μειώνεται, η ενεργός περιοχή των ηλεκτροδίων της κυψέλης, που αναλογεί στον ρυθμό με τον οποίο προχωρά η αντίδραση, πρέπει να αυξηθεί για να ληφθεί η απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας από αυτήν.

Προκύπτει επομένως ότι η λειτουργία των κυψελών καυσίμου είναι αποδοτικότερη σε χαμηλά φορτία, σε πλήρη αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης που αποδίδουν καλύτερα για μέγιστο φορτίο. Κλείνοντας, η ενέργεια που αποτιμάται σε ηλεκτρισμό μπορεί να αποδώσει από μερικά μW έως αρκετά MW ανάλογα με το είδος της εφαρμογής που καθορίζει το σχεδιασμό του συστήματος.

1.3.3 Απώλειες Τάσης

Σε πραγματικές συνθήκες, η κυψέλη λειτουργεί για ορισμένο φορτίο με την τάση να εμφανίζει πτώση σε σχέση με τη θεωρητική της τιμή επειδή στην κυψέλη εμφανίζονται μη αντιστρεπτά φαινόμενα που προκαλούν ενεργειακές απώλειες.

Σε πρότυπες συνθήκες αναφοράς, με τα συμμετέχοντα συστατικά σε πρότυπη κατάσταση και για τη μεταφορά 2 ηλεκτρονίων ανά mol , η μέγιστη θεωρητικά τιμή της τάσης σε μια κυψέλη υδρογόνου είναι:

$$V_{ideal} = E_{rev}^o = \frac{W_{ηλεκ}}{Q} = -\frac{\Delta G_{f,rev}^o}{2F} = 1.229V \quad (1.5)$$

$W_{ηλεκ}$: μέγιστο παραγόμενο ηλεκτρικό έργο.

Q : ποσότητα μετακινούμενου φορτίου.

$\Delta G_{f,rev}^o$: μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs.

F : περιεχόμενο φορτίο ανάτοληλεκτρονίων (σταθερά Faraday).

Η τάση (E_{rev}^o) που παράγεται καλείται και αντιστρεπτό δυναμικό της κυψέλης ή δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος, υπό πρότυπη κατάσταση και πρότυπες συνθήκες αναφοράς. Το δυναμικό αυτό περιγράφεται και από το νόμο του Nernst, ο οποίος αφορά την τάση που αναπτύσσεται σε συστήματα με οξειδωτή και αναγωγέα από την επαφή ηλεκτροδίου και ηλεκτρολύτη, λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση της θερμοκρασίας και των μερικών πιέσεων των στοιχείων.

Με δεδομένο ότι στο εσωτερικό της κυψέλης λαμβάνει χώρα η γενική αντίδραση σχηματισμού του νερού, το ιδανικό δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος δίνεται από την εξίσωση Nernst:

$$E_{Nernst} = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right] \quad (1.6)$$

Προκειμένου όμως να υπολογιστεί η πραγματική τάση εξόδου της κυψέλης πρέπει να ληφθούν υπόψιν όλες οι απώλειες τάσης όπως παρατηρούνται στην κυψέλη. Συγκεκριμένα, οι απώλειες τάσης μιας κυψέλης διαιρούνται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Απώλειες Ενεργοποίησης (Activation Losses).
- Ωμικές Απώλειες (Ohmic Losses).
- Απώλειες Συγκέντρωσης (Concentration Losses).

Αναφορικά με την πτώση της τάσης που προκαλούν οι απώλειες αυτές, η τάση λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση ισορροπίας:

$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (1.7)$$

E_{Nernst} : αντιστρεπτό δυναμικό κυψέλης.

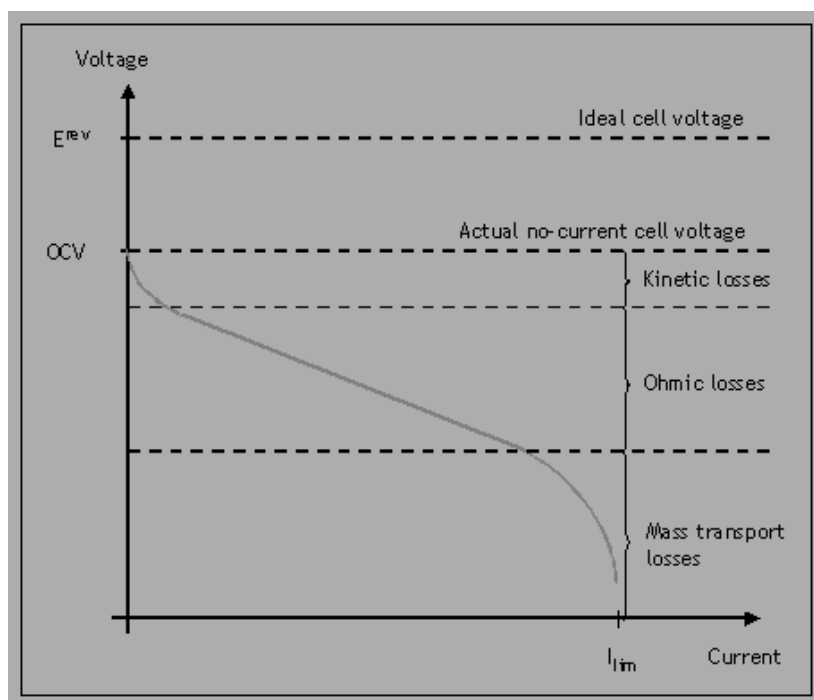
V_{act} : απώλειες ενεργοποίησης.

V_{ohm} : ωμικές απώλειες.

V_{con} : απώλειες συγκέντρωσης.

Σημαντικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας της κυψέλης αποτελεί το διάγραμμα της πραγματικής τάσης (V_{cell}) σε συνάρτηση το παραγώμενο ρεύμα (I) εντός της κυψέλης. Η καμπύλη που λαμβάνεται από το διάγραμμα ονομάζεται καμπύλη πόλωσης και απεικονίζει καθαρά τη μείωση της τάσης ανάλογα με την αύξηση του ρεύματος, παρουσιάζοντας την επίδραση των διάφορων μη αντιστρεπτών φαινομένων στην τάση εξόδου.

Εικ.1.17 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος – τάσης (VI diagram)



Παρατηρούμε ότι για μηδενικό ρεύμα, η τάση ανοιχτού κυκλώματος (Open Circuit Voltage – OCV) που επικρατεί είναι μικρότερη από την αντιστρεπτή τάση της κυψέλης (V_{ideal}) ενώ όσο αυξάνεται η τιμή του ρεύματος αναπτύσσονται απώλειες που αρχικά παρουσιάζουν απότομη πτώση στην τάση και σχετίζονται με την ενεργοποίηση για χαμηλές τιμές του ρεύματος, έπειτα με γραμμική πτώση στην τάση που οφείλεται στην ηλεκτρική αντίσταση για μεσαίες τιμές του ρεύματος και τέλος με απότομη πτώση στην τάση λόγω ανεπαρκούς συγκέντρωσης αντιδρώντων για μεγάλες τιμές του ρεύματος.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχει και ένα τέταρτο είδος απωλειών το οποίο χρήζει σημαντικότητας για πολύ μικρές τιμές στο ρεύμα. Οι απώλειες αυτές είναι αποτέλεσμα των εσωτερικών ρευμάτων ορισμένων ηλεκτρονίων που καταφέρνουν να διασχίσουν τον ηλεκτρολύτη αλλά και της κακής διάχυσης που αφήνει πλεόνασμα καυσίμου στον ηλεκτρολύτη. Πέραν της περιοχής στην οποία το ρεύμα παίρνει πολύ μικρές τιμές, οι απώλειες αυτές δεν είναι καθόλου σημαντικές και γ'αυτό αμελούνται.

Στη μόνιμη λειτουργία, οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν στη γραμμική περιοχή της χαρακτηριστικής καμπύλης με κατώτατο όριο τάσης κοντά στα 0.5 V, κάτω από τα οποία η κυψέλη αντιμετωπίζει προβλήματα λόγω έλλειψης καυσίμου και καταστρέφεται.

Η επίδραση και η λειτουργία των μη αντιστρεπτών αυτών φαινομένων αναλύονται παρακάτω:

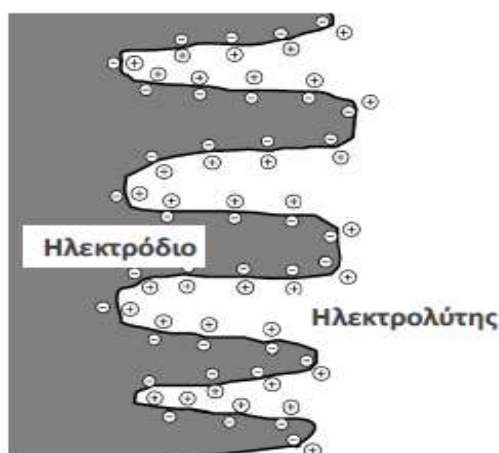
Απώλειες Ενεργοποίησης

Οι απώλειες ενεργοποίησης οφείλονται στην χαμηλή ταχύτητα διεξαγωγής των χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων και εξαρτώνται από το υλικό και τη δομή του ηλεκτροκαταλύτη, τις συγκεντρώσεις των αντιδρώντων και από την πυκνότητα του ρεύματος.

Οι απώλειες ενεργοποίησης παρατηρούνται εντονότερα στην κάθοδο επειδή η αντίδραση της αναγωγής του οξυγόνου είναι αρκετά αργή, εξαιτίας του ενεργειακού φράγματος που πρέπει να καλυφθεί ώστε να γίνει η έναρξη της χημικής αντίδρασης. Ανάμεσα στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων και του καταλύτη αναπτύσσεται υπέρταση ενεργοποίησης που οφείλεται στο φαινόμενο της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας και οδηγεί σε πτώση της τάσης, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 0.1 – 0.2V.

Το φαινόμενο της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας αναλύεται ως εξής: στη διεπαφή ηλεκτροδίου και ηλεκτρολύτη παρατηρείται συσσώρευση και μεταφορά φορτίου από τη μια επιφάνεια στην άλλη, που οφείλεται στις αντιδράσεις μεταξύ των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στα ηλεκτρόδια και των ιόντων που διασχίζουν τον ηλεκτρολύτη. Έτσι διαμορφώνονται στη διεπαφή δυο φορτισμένα στρώματα που συνθέτουν την ηλεκτρική διπλοστοιβάδα.

Εικ.1.18 Το φαινόμενο της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας στην επιφάνεια της καθόδου.



Η συσσώρευση αυτή του φορτίου προκαλεί ανάπτυξη ηλεκτρικής τάσης (υπέρταση ενεργοποίησης) που αποτελεί προϋπόθεση για τη διεξαγωγή των αντιδράσεων. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα των φορτίων στην επαφή ηλεκτροδίου και ηλεκτρολύτη τόσο ευκολότερα διεξάγονται οι αντιδράσεις αυξάνοντας την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Με την αύξηση του ρεύματος, αυξάνεται ακολούθως και η υπέρταση ενεργοποίησης.

Για μια κυψέλη στην οποία μεταφέρονται 2 ηλεκτρόνια ανά mol η εξίσωση που περιγράφει τις απώλειες ενεργοποίησης (V_{act}) δίνεται από την εξίσωση Tafel:

$$V_{act} = \frac{RT}{2aF} \ln \left(\frac{j}{j_o} \right) \quad (1.8)$$

a : συντελεστής μεταφοράς φορτίου ηλεκτροχημικής αντίδρασης.

R : παγκόσμια σταθερά των αερίων (8.314J/(KgK)).

T : θερμοκρασία ηλεκτροδίου.

F : σταθεράFaraday (96485 C/mol).

j : πυκνότητα ρεύματος (A/cm²).

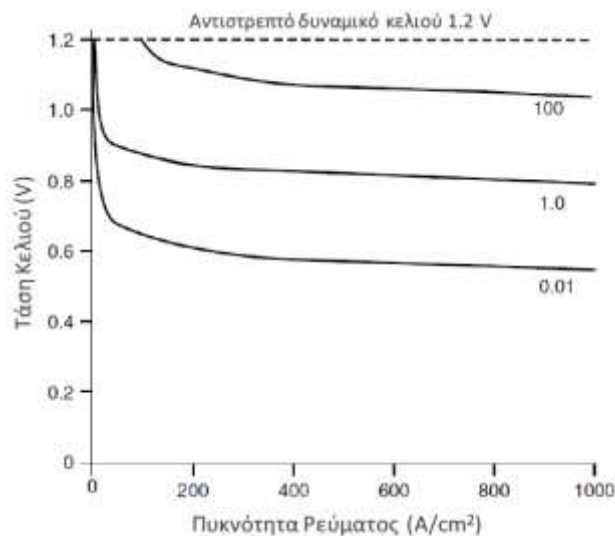
j_o : πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής (A/cm²).

Οι τιμές του συντελεστή α κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1.0 και εξαρτώνται από το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο το ηλεκτρόδιο.

Η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής (j_o) είναι η πυκνότητα ρεύματος που παρατηρείται όταν η αντίδραση που συμβαίνει στο ηλεκτρόδιο είναι σε ισορροπία, δηλαδή όταν οι ταχύτητες των αντιδράσεων της ανόδου και της καθόδου και κατά συνέπεια οι αντίστοιχες πυκνότητες ρεύματος, είναι ίσες χωρίς να είναι μηδενικές. Η τιμή της είναι μεγαλύτερη όσο ταχύτερη είναι η ηλεκτροχημική αντίδραση και εξαρτάται από παράγοντες όπως η σύνθεση του ηλεκτροδίου, η τραχύτητά του, η θερμοκρασία και η συγκέντρωση των οξειδωτικών και αναγωγικών συστατικών στο σύστημα.

Γενικά, η τιμή της πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής έχει πολύ σημαντική επίδραση στην απόδοση των ηλεκτροδίων και επιδιώκεται να είναι όσο υψηλότερη γίνεται, ώστε η πτώση της τάσης να είναι χαμηλότερη.

Εικ.1.19 Αναπαράσταση τάσης κυψέλης συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος για διάφορες τιμές του j_0 (0.01, 1.0 και 100 mA/cm²).



Τέλος, προκειμένου να περιοριστούν οι απώλειες ενεργοποίησης πρέπει να εφαρμοστούν τεχνικές αύξησης της πυκνότητας του ρεύματος ανταλλαγής (j_0), είτε με ανύψωση της θερμοκρασίας της κυψέλης, είτε με τη χρήση καταλυτών από κατάλληλα μέταλλα είτε με την αύξηση της επιφάνειας αντίδρασης και της συγκέντρωσης των αντιδρώντων.

Ωμικές Απώλειες

Η αντίσταση που αναπτύσσεται στη ροή των ιόντων και των ηλεκτρονίων που προβάλλεται από τα δομικά στοιχεία μιας κυψέλης, όπως τα ηλεκτρόδια, ο ηλεκτρολύτης, οι συλλέκτες ρεύματος, οι εσωτερικοί σύνδεσμοι και οι επαφές, δημιουργούν ηλεκτρικές απώλειες που ονομάζονται ωμικές. Οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες με την πυκνότητα του ρεύματος και εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, τα υλικά κατασκευής και το σχήμα της κυψέλης.

Γενικά οι προκαλούμενες απώλειες δίνονται από τον ακόλουθο τύπο:

$$V_{ohmic} = i \cdot R_{ohmic} = j \cdot A_{cell} \cdot R_{ohmic} = j A_{cell} \left(\frac{d r_M}{A_{cell}} \right) = j \cdot d \cdot r_M \quad (1.9)$$

r_M : ειδική αντίσταση της μεμβράνης στη ροή των ιόντων (ohm·cm)

d : πάχος πολυμερούς μεμβράνης (cm)

A_{cell} : ενεργή επιφάνεια κυψέλης καυσίμου (cm²)

j : πυκνότητα του ρεύματος (A/cm²)

Η ειδική αντίσταση του ηλεκτρολύτη είναι συνάρτηση του τύπου των χαρακτηριστικών της μεμβράνης, της περιεκτικότητας της σε νερό, της θερμοκρασίας και της πυκνότητας του ρεύματος. Η επίδραση των παραγόντων αυτών για μια μεμβράνη τύπου Nafion δίνεται από την ακόλουθη εμπειρική εξίσωση:

$$r_M = \frac{181.6 \left[1 + 0.03j + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 j^{2.5} \right]}{(\lambda - 0.634 - 3j) e^{4.18 \left[\frac{T-303}{T} \right]}} \quad (1.10)$$

λ : ποσοστό ενυδάτωσης της μεμβράνης.

Το ποσοστό ενυδάτωσης της μεμβράνης λαμβάνει τιμές από 14, όταν η σχετική υγρασία επικρατεί σε βαθμό 100 %, έως 23, όταν η μεμβράνη έχει πλημμυρίσει. Ο τύπος της ειδικής αντίστασης του ηλεκτρολύτη περιλαμβάνει εμπειρική διόρθωση στη θερμοκρασία της κυψέλης όταν εκείνη δε βρίσκεται στους 30°C αλλά και στην εξάρτηση της περιεκτικότητας σε νερό από την πυκνότητα του ρεύματος και τη θερμοκρασία.

Οι ωμικές απώλειες μπορούν να μειωθούν με τη χρήση λεπτότερου στρώματος ηλεκτρολύτη ή ηλεκτρολύτη υψηλότερης ιοντικής αγωγιμότητας όπως και με τη χρήση κατάλληλων υλικών για την καλή σχεδίαση της κυψέλης και των ηλεκτρικών επαφών.

Απώλειες Συγκέντρωσης

Όσο λειτουργεί μια κυψέλη, η συγκέντρωση των παρεχόμενων αερίων υφίσταται μια διαρκή μείωση εξαιτίας των αντιδράσεων που διεξάγονται, η οποία προκαλεί πτώση στην μερική πίεση των αερίων που συμμετέχουν, δημιουργώντας απώλειες τάσης. Η αδυναμία του συστήματος τροφοδοσίας να καλύψει άμεσα την παρατηρούμενη πτώση στη συγκέντρωση των αερίων προκαλεί αυτές τις απώλειες στη μεταφορά μάζας, οι οποίες παρατηρούνται συνηθέστερα για υψηλές τιμές στην πυκνότητα του ρεύματος.

Οι απώλειες που προκύπτουν κατά τη μεταφορά μάζας των αντιδρώντων συνδέονται με τη μη ομοιόμορφη διάχυση των αερίων που οδηγεί σε κακή επαφή με τον καταλύτη και τον ηλεκτρολύτη όταν η μεταφορά μάζας στο εσωτερικό της κυψέλης είναι περιορισμένη. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από την πυκνότητα του ρεύματος, τη συγκέντρωση των αντιδρώντων και τη δομή των ηλεκτροδίων.

Θεωρώντας μια μικρή μεταβολή στη μερική πίεση του υδρογόνου με τις μερικές πιέσεις του οξυγόνου και του νερού σταθερές, η πτώση της τάσης δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\Delta V = E_2 - E_1 \Rightarrow$$

$$\Delta V = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{\sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right] + \frac{RT}{2F} \ln [P_{H_2}] - E^o - \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{\sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right] - \frac{RT}{2F} \ln [P_{H_2}] \Leftrightarrow$$

$$\Delta V = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2 2}}{P_{H_2 1}} \right) \quad (1.11)$$

Η παραπάνω εξίσωση συνδέει τη μεταβολή στη μερική πίεση του τροφοδοτούμενου υδρογόνου με την πτώση της τάσης. Με την υπόθεση ότι η πυκνότητα του ρεύματος j είναι γραμμική συνάρτηση της μερικής πίεσης του υδρογόνου και ότι το εισερχόμενο υδρογόνο καταναλώνεται με το μέγιστο ρυθμό παροχής του στην κυψέλη, τότε η μερική πίεση του είναι μηδενική και το ρεύμα που λαμβάνεται έχει τη μέγιστη δυνατή τιμή j_{max} . Η γραμμική σχέση που συνδέει τα δυο μεγέθη είναι η ακόλουθη:

$$\frac{j - j_{max}}{j_{max} - 0} = \frac{P - 0}{0 - P_{oc}} \Rightarrow \frac{P}{P_{oc}} = 1 - \frac{j}{j_{max}}$$

Αν θεωρηθεί ότι η αρχική πίεση του υδρογόνου αντιστοιχεί στην τάση ανοιχτού κυκλώματος P_{oc} ενώ η τελική πίεση αντιστοιχεί στην πυκνότητα ρεύματος j τότε προκύπτει εμπειρικά ότι :

$$\Delta V = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P}{P_{oc}} \right) = \left| \frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{j}{j_{max}} \right) \right| = - \frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{j}{j_{max}} \right)$$

Γενικά, ο όρος $\frac{RT}{2F}$ είναι διαφορετικός για κάθε αέριο και στη γενική έκφραση των απωλειών συγκέντρωσης αντικαθίσταται από μια σταθερά B , η οποία εξαρτάται από το είδος και τις συνθήκες λειτουργίας μιας κυψέλης.

Έτσι, οι απώλειες συγκέντρωσης περιγράφονται από τον ακόλουθο τύπο:

$$V_{con} = - B \cdot \ln \left(1 - \frac{j}{j_{max}} \right) \quad (1.12)$$

Ο περιορισμός των ανωτέρω απωλειών και η βελτίωση της μεταφοράς μάζας εντός της κυψέλης επιτυγχάνεται με αύξηση στη συγκέντρωση των αντιδρώντων, όπως για παράδειγμα με τη χρήση καθαρού οξυγόνου αντί για αέρα, την αύξηση ρυθμού τροφοδοσίας ή της μερικής πίεσης των αντιδρώντων είτε με τη χρήση κατάλληλου πεδίου ροής των αερίων αλλά και την βελτιστοποίηση της δομής των ηλεκτροδίων.

Εσωτερικά Ρεύματα και Διάχυση Καυσίμου

Ένα μικρό ποσοστό ηλεκτρονίων και αερίου υδρογόνου επιτυγχάνει να εισέλθει στον ηλεκτρολύτη και να τον διασχίσει φτάνοντας στην κάθοδο. Τα ηλεκτρόνια αυτά δε διέρχονται από το εξωτερικό κύκλωμα και επομένως δε συμμετέχουν στο παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, όπως και τα μόρια του υδρογόνου που αντιδρούν απευθείας με το οξυγόνο.

Η επίδραση του φαινομένου αυτού αποτυπώνεται στο ολικό ρεύμα, το οποίο ισούται με το άθροισμα του ρεύματος που αξιοποιείται και του ρεύματος που χάνεται:

$$i = i_{ext} + i_{loss} \quad (1.13)$$

Λαμβάνοντας υπ'όψιν μόνο τις απώλειες ενεργοποίησης η τάση εξόδου σε χαμηλές πυκνότητες ρεύματος διαμορφώνεται ως εξής:

$$V_{cell} = E_o - \frac{RT}{aF} \ln \left(\frac{j_{ext} + j_{loss}}{j_o} \right) \quad (1.14)$$

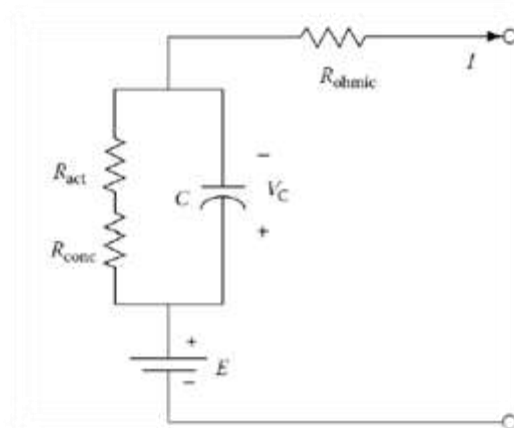
1.3.4 Ισοδύναμο Κύκλωμα Κυψέλης Καυσίμου

Σε μια κυψέλη, η διεπαφή ηλεκτρολύτη και ηλεκτροδίου συμπεριφέρεται ως ηλεκτρικός πυκνωτής καθώς στο σημείο αυτό συσσωρεύονται φορτίο και ενέργεια εξαιτίας του φαινομένου της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας. Κατά συνέπεια, σχηματίζονται δυο φορτισμένα στρώματα με αντίθετη πολικότητα στο όριο μεταξύ του πορώδους τμήματος του ηλεκτροδίου και της πολυμερούς μεμβράνης.

Η συσσώρευση αυτή του φορτίου συνδέεται με τη μείωση στη συγκέντρωση των αντιδρώντων. Ο πυκνωτής C εξομαλύνει τη μεταβολή της πτώσης στην τάση που προκαλούν οι μηχανισμοί απωλειών λόγω ενεργοποίησης και συγκέντρωσης. Για το λόγο αυτό, σε περίπτωση απότομης μεταβολής στην τιμή του ρεύματος, η υπέρταση ενεργοποίησης καθυστερεί να ακολουθήσει τη μεταβολή, αντίθετα με την ωμική πτώση της τάσης στην οποία η μεταβολή είναι άμεση.

Το ισοδύναμο κύκλωμα όπως διαμορφώνεται και φαίνεται παρακάτω, μοντελοποιεί τη δυναμική αυτή απόκριση της κυψέλης στις μεταβολές του ρεύματος λαμβάνοντας υπ'όψιν το φαινόμενο της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας, με την τάση Nernst να αποτελεί την πηγή της τάσης και τις απώλειες να αντιπροσωπεύονται από ηλεκτρικές αντιστάσεις.

Εικ.1.20 Ισοδύναμο κύκλωμα PEMFC.



Νόμος Ρευμάτων Kirchhoff:

$$i = \frac{V_c}{R_{act} + R_{conc}} + C \frac{dV_c}{dt}$$
$$\frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{C(R_{act} + R_{conc})} V_c - \frac{i}{C} = 0$$

Νόμος Τάσεων Kirchhoff:

$$V_{cell} = E - V_C - V_{ohm} \quad (1.15)$$

Πέρα από τον προσδιορισμό της δυναμικής απόκρισης της τάσης εξόδου που επιτρέπει τη μελέτη των μεταβατικών φαινομένων, το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση και τη μελέτη της συμπεριφοράς της κυψέλης ως πηγή τάσης κατά τη σύνδεση με ορισμένο ηλεκτρικό σύστημα.

1.3.5 Συστοιχία Κυψελών Καυσίμου

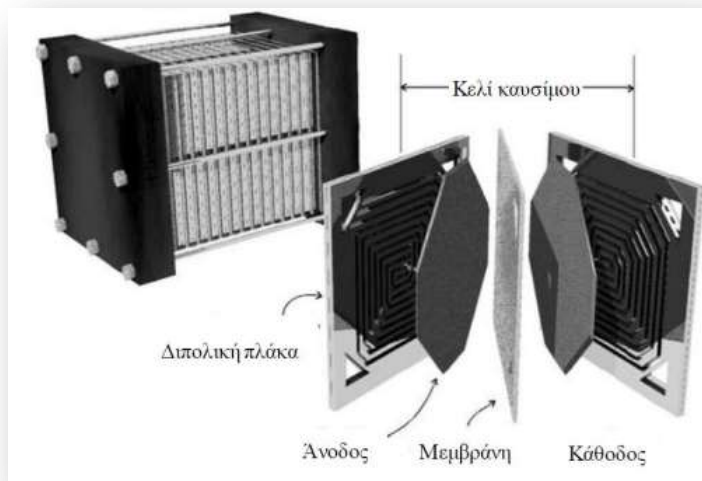
Με βάση όσα αναφέρθηκαν για τις απώλειες τάσης, η θεωρητική τιμή της συνεχούς τάσης που παράγεται από κυψέλες καυσίμου υδρογόνου κυμαίνεται στα κοντά στα 1.23 V. Ουσιαστικά το φάσμα της πυκνότητας ισχύος βρίσκεται περίπου στα 0.5-1V ανά κυψέλη και αλλάζει τόσο από το μέγεθος του φορτίου με το οποίο συνδέεται όσο και από τις λειτουργικές συνθήκες που διαθέτει η κυψέλη, όπως η θερμοκρασία, η πίεση και η συγκέντρωση των αντιδρώντων. Για την επίτευξη μεγαλύτερης και πρακτικά αξιοποιήσιμης τάσης προτείνεται σύνδεση πολλών ομοειδών κυψελών σε σειρά με τη χρήση διπολικών πλακών, ώστε να συμπληρωθεί μια συστοιχία (fuel cell stack).

Για να υπολογιστεί η τάση εξόδου μιας συστοιχίας (V_{out}) αρκεί να πολλαπλασιαστεί η τάση εξόδου (V_{cell}) επί το συνολικό αριθμό κυψελών (N) όπως φαίνεται παρακάτω :

$$V_{out} = N V_{cell} \quad (1.16)$$

Ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζεται η κυψέλη, η συστοιχία μπορεί να διαθέτει από μερικές έως εκατοντάδες κυψέλες. Η ποιότητα της σύνδεσης μεταξύ των κυψελών στη συστοιχία είναι σημαντική λόγω των ωμικών απωλειών που μπορεί να παρουσιαστούν. Για υψηλές τιμές ισχύος χρησιμοποιούνται περισσότερες από μια σε σειρά συνδεδεμένες συστοιχίες.

Εικ.1.21 Δομή συστοιχίας κυψελών καυσίμου (fuel cell stack)



Εικ.1.22 Συστοιχία κυψελών καυσίμου υβριδικού οχήματος της Toyota.[22]



Σε μια συστοιχία, οι κυψέλες διαχωρίζονται με την παρουσία διπολικών πλακών, οι οποίες πλαισιώνουν τα ηλεκτρόδια και ελέγχουν τη ροή τόσο των αερίων, όσο και των ηλεκτρονίων.

Εικ.1.23 Διπολική πλάκα από γραφίτη(Graphite Bipolar Plate).

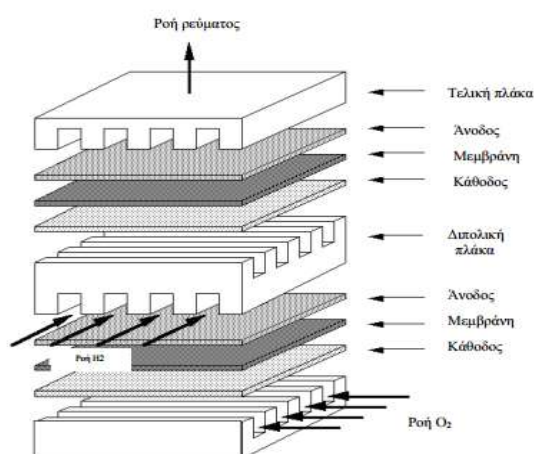


Οι διπολικές πλάκες διαθέτουν κανάλια μεταφοράς με στόχο είτε να διοχετεύσουν το καύσιμο και την οξειδωτική ουσία στο χώρο της κυψέλης, είτε να το απομακρύνουν από αυτή. Το σχήμα και οι διαστάσεις των καναλιών μεταφοράς επηρεάζουν τη διάχυση των αερίων, η οποία πρέπει να γίνεται ομοιόμορφα. Έχουν επίσης χαμηλή διαπερατότητα ώστε να αποφεύγονται τυχόν διαρροές που θα υποχρέωναν στο σχηματισμό νερού άνευ παραγωγής εκμεταλλεύσιμου ηλεκτρικού ρεύματος. Διαθέτουν επιπλέον κανάλια για την εισαγωγή ψυκτικού υγρού προκειμένου να ψύχονται οι επαφές μεταξύ γειτονικών πλακών. Εκτός από αντοχή στη διάβρωση και μηχανική σταθερότητα, παρουσιάζουν και υψηλή θερμική αγωγιμότητα.

Οι διπολικές πλάκες κατασκευάζονται από αγώγιμα υλικά όπως είναι ο γραφίτης και ορισμένα πολυμερή, καθώς συμμετέχουν ενεργά στην παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος. Για κυψέλες που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, οι πλάκες κατασκευάζονται από κεραμικά υλικά.

Η μεταφορά των ηλεκτρονίων που απελευθερώνονται κατά την οξείδωση του υδρογόνου γίνεται από τη διπολική πλάκα της ανόδου προς τη διπολική πλάκα της καθόδου μέσω της φυσικής επαφής των δυο πλακών, οι οποίες είναι μεταξύ τους εφαιπόμενες είτε ταυτίζονται. Με τον τρόπο αυτό, παράγεται νερό στην κυψέλη που είναι διατεταγμένη ώστε να προηγείται άμεσα εκείνης, στην οποία απελευθερώθηκαν τα ηλεκτρόνια λόγω της οξείδωσης. Μόνο η πρώτη στην σειρά κυψέλη απαιτεί χρήση εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος για να τροφοδοτεί με ηλεκτρόνια την κάθοδο της τελευταίας κυψέλης στην συστοιχία. Οι υπόλοιπες κυψέλες λειτουργούν χάρη στην καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα των διπολικών πλακών που έλκουν και φέρουν με τη σειρά τους, τα ηλεκτρόνια.

Εικ.1.24 Αναπαράσταση λειτουργίας Συστοιχίας Κυψελών.



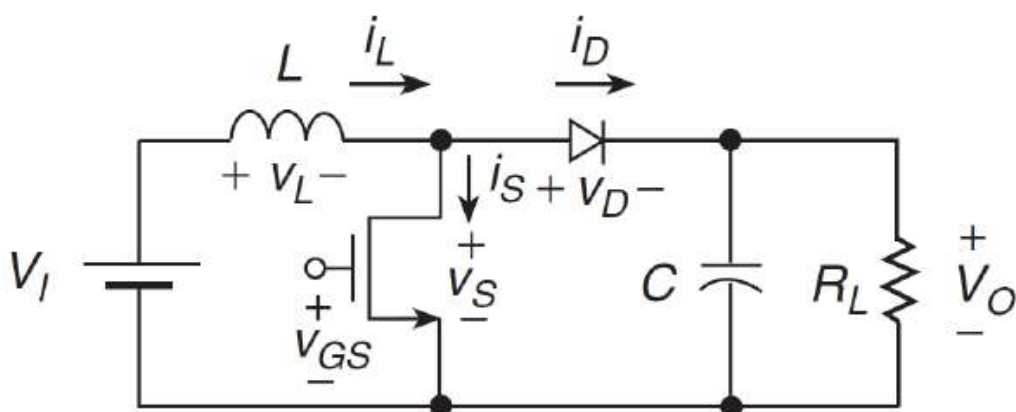
Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η τάση, το ρεύμα της συστοιχίας, η θερμοκρασία, η πίεση όπως και η παροχή καυσίμου και οξειδωτικού μέσου ανά λεπτό αποτελούν τις ουσιαστικές παραμέτρους που ρυθμίζουν τη λειτουργία της συστοιχίας και για το λόγο αυτό πρέπει να παρακολουθούνται άμεσα είτε να ελέγχονται από κάποιο λογισμικό.

1.3.6 Μετατροπέας Συνεχούς Τάσης (Σύστημα Ηλεκτρονικών Ισχύος)

Οι διατάξεις Ηλεκτρονικών Ισχύος είναι απαραίτητες για την αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν οι κυψέλες καυσίμου προκειμένου η ενέργεια να μετατρέπεται και μεταφέρεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το έργο αυτό στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου επιτελείται με τη χρήση DC/DC μετατροπέα ανύψωσης, ο οποίος παραλαμβάνει την τάση εξόδου μιας συστοιχίας κυψελών φροντίζοντας για την ανύψωση και σταθεροποίηση της σε ορισμένη τιμή αναφοράς.

Η μετατροπή της τάσης ενός DC/DC μετατροπέα ανύψωσης στηρίζεται στη χρήση διακοπτικών στοιχείων, όπως το IGBT τρανζίστορ, που ελέγχουν το χρόνο αγωγής τους ώστε να επιτυγχάνεται η σταθεροποίηση της τάσης εξόδου του συστήματος σε σταθερή τιμή. Το διακοπτικό στοιχείο κλείνει και ανοίγει επαναλαμβανόμενα με σχετική διάρκεια αγωγής D . Το κύκλωμα του μετατροπέα περιλαμβάνει ένα πηνίο L , μια δίοδο D και ένα πυκνωτή C πέραν του IGBT τρανζίστορ σχηματίζοντας την ακόλουθη διάταξη:

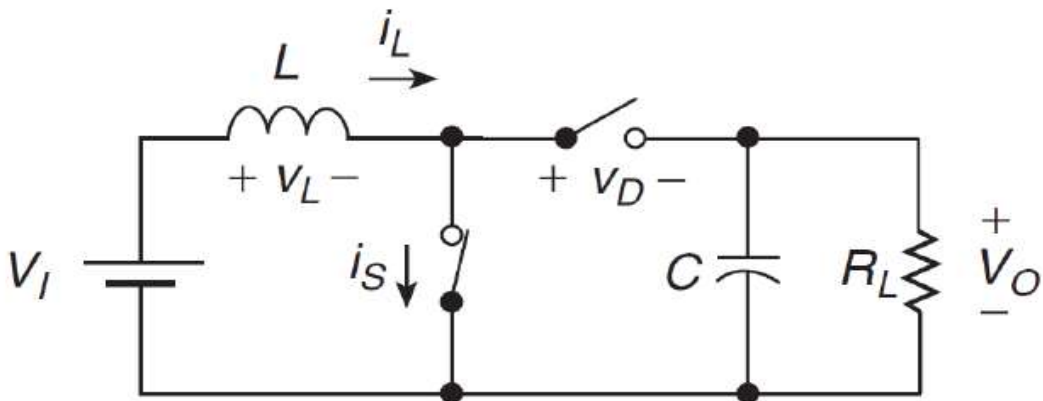
Εικ.1.25 Κύκλωμα Λειτουργίας Μετατροπέα ανύψωσης PWM.



Η σχετική διάρκεια αγωγής του IGBT τρανζίστορ δίνεται από τον τύπο $D = \frac{t_{on}}{T}$ όπου T η χρονική διάρκεια συμπλήρωσης ενός κύκλου λειτουργίας.

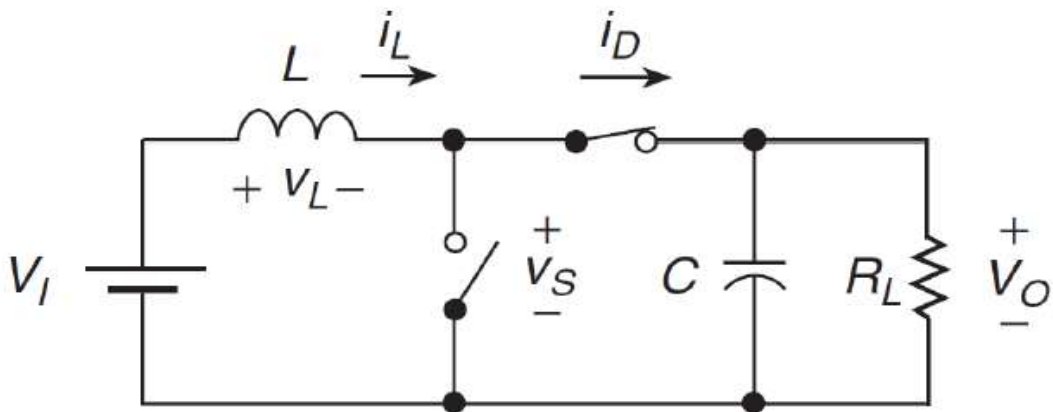
Κατά τη χρονική περίοδο $0 < t < DT$ ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής εφόσον δέχεται μια σειρά παλμών στην πύλη του με αποτέλεσμα η τάση στα άκρα του πηνίου να ισούται με την τάση της πηγής V_I και επομένως το ρεύμα του πηνίου L να αυξάνεται γραμμικά με κλίση $\frac{V_I}{L}$ ενώ αποθηκεύεται ενέργεια εντός του. Η δίοδος D είναι ανάστροφα πολωμένη και αποκόπτει το φορτίο από την τάση εισόδου καθώς η τάση στα άκρα της ισούται με $-V_O$. Ως άμεση συνέπεια ο πυκνωτής C εκφορτίζεται παρέχοντας ενέργεια στο φορτίο και η τάση εξόδου του συστήματος μειώνεται γραμμικά. Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται παρακάτω:

Εικ.1.26 Ισοδύναμο Κύκλωμα Αγωγής Διακόπτη S.



Τη χρονική στιγμή $t = DT$ ο παλμός που εφαρμόζεται στην πύλη του διακόπτη αφαιρείται και έτσι ο διακόπτης ανοίγει με αποτέλεσμα η δίοδος D να μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής, ο πυκνωτής C να περιέχεται σε κατάσταση φόρτισης και το πηνίο L να συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος, η τιμή του οποίου μειώνεται γραμμικά με κλίση $\frac{(V_I - V_O)}{L}$. Τη χρονική στιγμή $t = T$ ο διακόπτης κλείνει ξανά ξεκινώντας νέα περίοδο λειτουργίας.

Εικ.1.27 Ισοδύναμο Κύκλωμα Αγωγής Διόδου D.



Η περίπτωση που εξετάζεται αφορά τη λειτουργία με συνεχή αγωγή του πηνίου, θεωρώντας δηλαδή ότι το ρεύμα του πηνίου δε μηδενίζεται καθ'όλη τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας T .

Παρακάτω περιγράφεται με μαθηματικό τρόπο η λειτουργία του συνεχούς μετατροπέα ανύψωσης κατά τις δυο αυτές φάσεις λειτουργίας στο διάστημα T , θεωρώντας ότι α) στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας η μέση τιμή της τάσης του πηνίου είναι μηδενική και επομένως το ολοκλήρωμα της στο διάστημα αυτό ισούται με μηδέν και β) το κύκλωμα δεν παρουσιάζει απώλειες.

Ισχύουν επομένως οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$V_I t_{on} + (V_I - V_O) t_{off} = 0 \Rightarrow \frac{V_O}{V_I} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1 - D}$$

$$P_I = P_o = V_I I_I = V_o I_o \Rightarrow \frac{I_I}{I_o} = 1 - D$$

Φάση Λειτουργίας του διακόπτη ($0 < t < DT$)

Αρχικά ο διακόπτης είναι κλειστός και το πηνίο L αποθηκεύει ενέργεια, με την τάση και το ρεύμα στα άκρα του να δίνονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$v_L = V_I = L \frac{di_L}{dt} \quad (1.17)$$

$$i_L = \frac{V_I}{L} t + i_L(0) \text{ , όπου το } i_L(0) \text{ αρχικό ρεύμα του πηνίου.}$$

$$\Delta i_L = i_L(DT) - i_L(0) = \frac{V_I DT}{L} = \frac{V_o D(1-D)T}{L} \quad (1.18)$$

Ο πυκνωτής C εκφορτίζεται καταναλώνοντας ενέργεια εξαιτίας της αντίστασης του φορτίου:

$$i_C = I_o = C \frac{dv_C}{dt} \quad (1.19)$$

$$v_C = v_C(0) - \frac{I_o}{L} t = v_C(0) - \frac{V_o}{RL} t$$

$$\Delta v_C = v_C(DT) - v_C(0) = \frac{V_o DT}{RC} \quad (1.20)$$

Φάση Αποκοπής του διακόπτη ($DT < t < T$)

Στη φάση αυτή ο διακόπτης ανοίγει και η δίοδος μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής. Το πηνίο εκφορτίζεται παρέχοντας την ενέργεια του για την κάλυψη των αναγκών του φορτίου ενώ ο πυκνωτής δρα ως στοιχείο συσσώρευσης. Επομένως για το πηνίο L ισχύει:

$$v_L = V_I - V_o = L \frac{di_L}{dt} < 0 \quad (1.21)$$

$$i_L = i_D = \frac{V_I - V_o}{L} (t - DT) + i_L(DT)$$

$$\Delta i_L = i_L(DT) - i_L(T) = \frac{V_o D(1-D)T}{L} \quad (1.22)$$

Για τον πυκνωτή C ισχύει:

$$i_C = I_I - I_o = C \frac{dv_C}{dt} \quad (1.23)$$

$$v_C = v_C(DT) + \frac{I_I - I_o}{L} (t - DT) = v_C(DT) + \left(\frac{I_o}{C} - \frac{V_o}{RC}\right)(t - DT)$$

$$\Delta v_C = v_C(T) - v_C(DT) = \left(\frac{I_o}{C} - \frac{V_o}{RC}\right)(t - DT) = \frac{V_o DT}{RC} \quad (1.24)$$

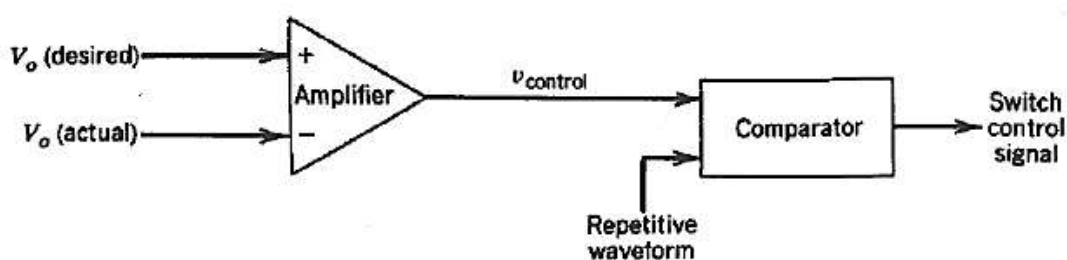
Σύστημα Ελέγχου Μετατροπέα

Σημαντική παράμετρος κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα συνεχούς τάσης αποτελεί ο έλεγχος της συνεχούς τάσης εξόδου η οποία πρέπει να διατηρείται σταθερή ανεξαρτήτως των μεταβολών που παρουσιάζονται στην είσοδο του μετατροπέα ή της αντίστασης του φορτίου. Η πιο συχνή μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μέσης τάσης εξόδου πραγματοποιείται με τη διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation – PWM).

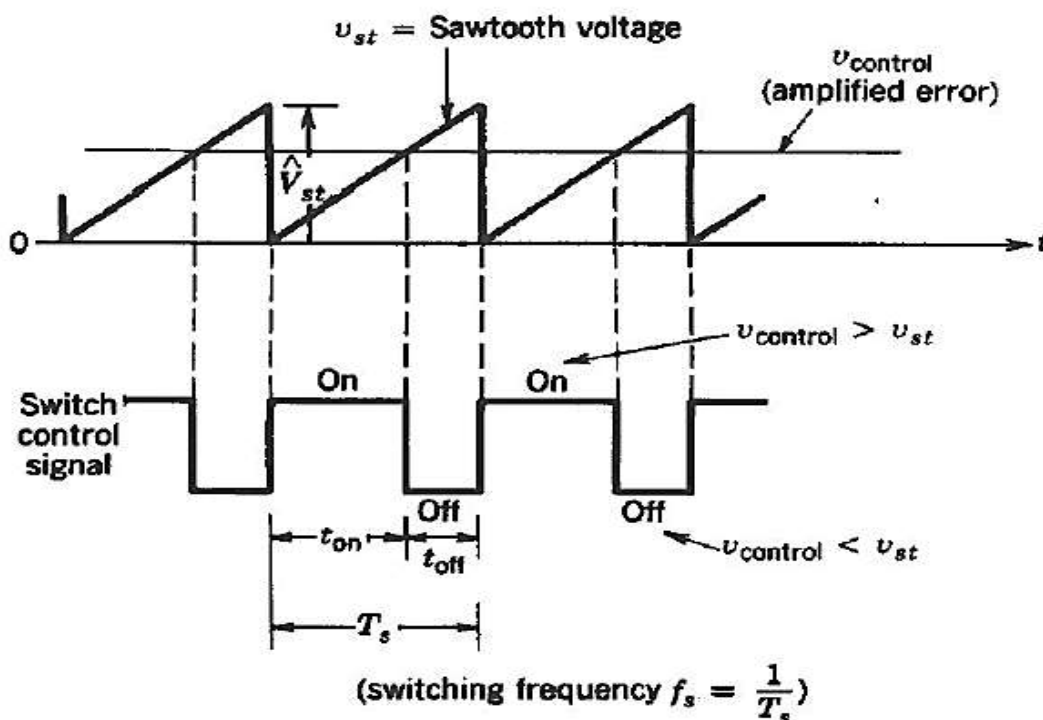
Το εύρος των παλμών έναυσης που εφαρμόζεται ως σήμα ελέγχου στην πύλη του διακοπτικού στοιχείου μεταβάλλεται και καθορίζει τη σχετική διάρκεια αγωγής του στοιχείου ώστε η τάση εξόδου να διατηρείται σταθερή σε ορισμένη τιμή. Το εν λόγω σήμα ελέγχου παράγεται από τη σύγκριση ενός επιπέδου τάσης με μια περιοδική σταθερού πλάτους και σταθερής συχνότητας κυματομορφή, η οποία καθορίζει τη συχνότητα μετάβασης του διακόπτη από τη μια κατάσταση στην άλλη.

Αρχικά, με τη χρήση κατάλληλου ελεγκτή πραγματοποιείται σύγκριση της μέσης τάσης με την επιθυμητή τάση αναφοράς. Όταν η μετρούμενη τάση είναι χαμηλότερη της τάσης αναφοράς τότε η σχετική διάρκεια αγωγής του διακόπτη αυξάνεται ενώ σε αντίθετη περίπτωση μειώνεται. Έπειτα, η σχετική διάρκεια αγωγής συγκρίνεται κάθε στιγμή με την κυματομορφή, αποστέλλοντας παλμό σταθερού μη μηδενικού πλάτους στην πύλη του διακόπτη όταν η τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής αντιστοιχεί σε τάση μικρότερη της επιθυμητής τιμής αναφοράς προκαλώντας την αγωγή του διακόπτη. Στην περίπτωση που η σχετική διάρκεια αγωγής αντιστοιχεί σε τάση μεγαλύτερη της επιθυμητής αποστέλλεται παλμός μηδενικού πλάτους στην πύλη του διακόπτη καθιστώντας τον ανοιχτό.

Εικ.1.28 Αναπαράσταση Ελέγχου με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM).



Εικ.1.29 Κυματομορφή και Σήμα Συγκριτή Ελέγχου με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM).



1.3.7 Πλεονεκτήματα Κυψελών Καυσίμου

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου αποτελεί εναλλακτικό μηχανισμό παραγωγής ενέργειας συμβάλλοντας στην αυτόνομη παραγωγή ηλεκτρισμού καλής ποιότητας με εκπομπή έως και μηδενικών ρύπων.

Οι κυψέλες καυσίμου επιδεικνύουν σημαντικό πλεονέκτημα και στο χώρο των εφαρμογών περιορισμένης ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι κινητές εφαρμογές όπως οι φορητές συσκευές, για τις οποίες απαιτείται συνεχής επαναφόρτιση ώστε να βρίσκονται σε λειτουργία.

Συγκεκριμένα, ως προς την παραγωγή ενέργειας οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν αποτελέσματα συγκρίσιμα με τις μπαταρίες πλεονεκτώντας σε όγκο και βάρος. Οι διαφορές τους από τις μπαταρίες έγκεινται σε ο,τι αφορά την αποθήκευση των αντιδρώντων ουσιών επειδή στις μπαταρίες τα μεταλλικά ηλεκτρόδια αποτελούν τα αντιδρώντα υλικά, τα οποία απαιτούν αντικατάσταση ή επαναφόρτιση μόλις καταναλωθούν. Οι κυψέλες παρουσιάζουν αναλυτικά τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Παρέχουν ενέργεια σε φορητές συσκευές για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, υποστηρίζοντας καλύτερα συσκευές που χρησιμοποιούνται μαζικά όπως οι φορητοί υπολογιστές και τα κινητά τηλέφωνα.

- Η παροχή μεγάλων ποσών ενέργειας σε βάθος χρόνου επιτρέπει την ανάπτυξη νέων πολυλειτουργικών συσκευών με ευρύτερο πεδίο χρήσης.

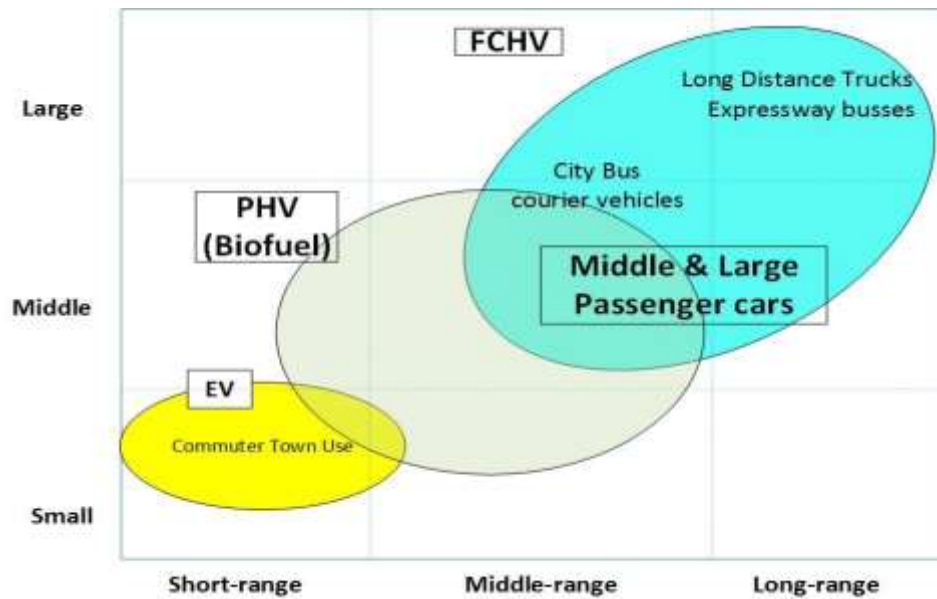
Στον χώρο των στατικών εφαρμογών, οι κυψέλες καυσίμου μπορούν όχι μόνο να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες κατοικιών και παραγωγικών μονάδων αλλά και να παράγουν αρκετή ενέργεια ώστε να επιστρέψουν ένα ποσοστό της προς πώληση στο δίκτυο αποδίδοντας κέρδος. Οι γεννήτριες των κυψελών καυσίμου είναι πολύ αξιόπιστες και μπορούν να υποστηρίξουν το σύστημα ηλεκτροδότησης όταν το ρεύμα διακόπτεται για μικρές περιόδους.

Αναφορικά με την αγορά μεταφορών, εξαιτίας των περιοριστικών μέτρων στη χρήση ορυκτών καυσίμων που επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα, οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μια πολύ καλή διέξοδο καθώς το πεδίο χρήσης τους είναι ευρύ και έχει την ικανότητα να υποστηρίξει μικρού μεγέθους οχήματα με μεγαλύτερη απόδοση από τα υπόλοιπα καύσιμα. Η χρήση τους ως συστήματα υποστήριξης υβριδικών οχημάτων βρίσκει πολλαπλές εφαρμογές στη σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία, η οποία διερευνά την ενσωμάτωση τους σε οχήματα μεγάλης εμβέλειας με την εκτίμηση ότι οι θα καταφέρουν να ανταποκριθούν περισσότερο στις σύγχρονες ενεργειακές απαιτήσεις χωρίς περεταίρω συμβιβασμούς.

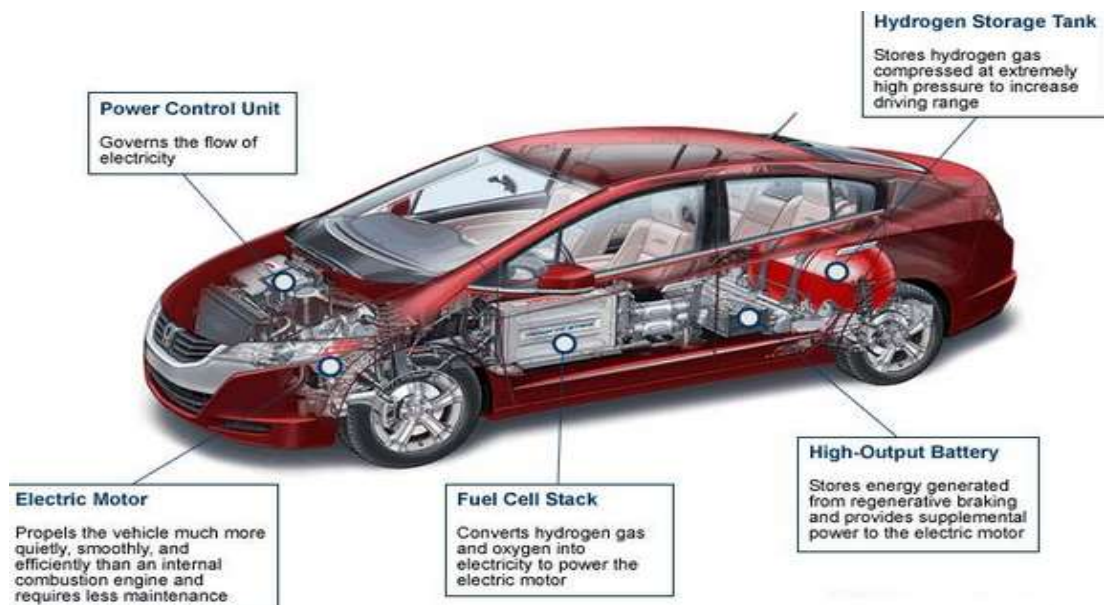
Εικ.1.30 Φορτιστές φορητών συσκευών με τη χρήση κυψελών καυσίμου χαμηλού κόστους.



Εικ.1.31 Πεδία εξέλιξης υβριδικών οχημάτων με τη χρήση κυψελών καυσίμου (FCHV) και σύγκριση με άλλους τύπους ηλεκτρικών (EV) και υβριδικών οχημάτων(PHV). [22]



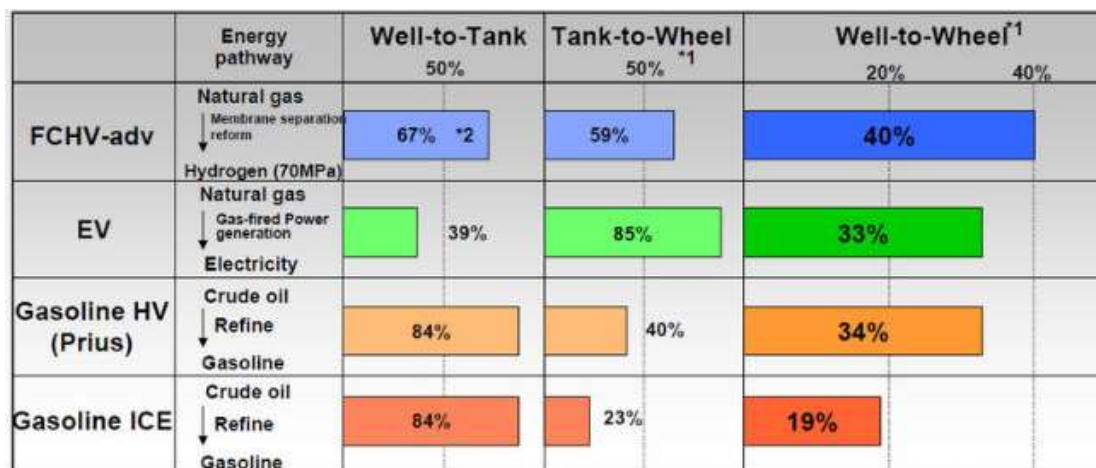
Εικ.1.32 Απεικόνιση λειτουργίας ηλεκτρικών οχημάτων με τη χρήση κυψελών καυσίμου. [22]



Όχημα	Κινητήρας	Δεξαμενή Καυσίμου	Εξάτμιση	Πραγματική Απόδοση
Ηλεκτροκίνητο	Ηλεκτρικός κινητήρας συνδεδεμένος με συστοιχίες κυψελών καυσίμου	Αέριο καύσιμο με βάση το υδρογόνο	H ₂ O	30-40%
Συμβατικό	Μηχανή εσωτερική καύσης	Υγρό καύσιμο παράγωγο του πετρελαίου	VOC, NO _x , CO και άλλα	15-25%

Πιν.1.5 Σύγκριση συμβατικού και ηλεκτροκίνητου οχήματος με τη χρήση κυψελών καυσίμου.

Εικ.1.8 Απόδοση επιμερών υποσυστημάτων ηλεκτρικών, συμβατικών και υβριδικών οχημάτων με τη χρήση κυψελών καυσίμου. [22]



*1 Tank-to-Wheel efficiency: measured in the Japanese 10-15 test cycle

Συνοψίζοντας, η χρήση των κυψελών καυσίμου σε σύγχρονες εφαρμογές παρουσιάζει συνοπτικά τα κάτωθι πλεονεκτήματα όπως αναπτύχθηκαν έως τώρα στο κεφάλαιο αυτό:

- Λειτουργία με υψηλή απόδοση (25 – 60%).
- Ποικιλία πηγών και μέσων παροχής καυσίμου.
- Σχεδίαση με υψηλή επεκτασιμότητα.
- Λειτουργία άνευ καύσης, παραγωγής ρύπων και θορύβου.
- Χαμηλό κόστος συντήρησης λόγω απουσίας κινητών μερών.
- Άμεση παραγωγή ενέργειας με αδιάλειπτη παροχή καυσίμου.
- Μηχανική αντοχή μονάδων χαμηλής θερμοκρασίας.
- Άμεση απόκριση στις αλλαγές του φορτίου εντός ολίγων δευτερολέπτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος των κυψελών καυσίμου συνδέεται άρρηκτα με τα υλικά που συμμετέχουν στη διαμόρφωση των διατάξεων που χρησιμοποιεί το σύστημα, τα οποία χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες ιδιότητες. Για το λόγο αυτό, η αναζήτηση λύσεων αντικατάστασης χαμηλού κόστους δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη.

Για την επίτευξη χαμηλότερου κόστους, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν λιγότερα ευγενή μέταλλα τα οποία συνθέτουν την καταλυτική επένδυση των ηλεκτροδίων. Παράγοντες όπως η ανάγκη αναμόρφωσης του καυσίμου και η μεταφορά και αποθήκευση του υδρογόνου σε άλλες περιπτώσεις αυξάνουν περαιτέρω το κόστος, το μέγεθος και την πολυπλοκότητα λειτουργίας της εκάστοτε εγκατάστασης.

Μέγεθος Παραγόμενης Ισχύος	Εφαρμογές
>1MW 100 kW – 1 MW	Τοπικοί σταθμοί παραγωγής ισχύος. Μεγάλα οχήματα μεταφοράς, πλοία, υποβρύχια λεωφορεία, μικροί σταθμοί παραγωγής ισχύος.
10 kW – 100kW	Οχήματα μεταφοράς, μικρά λεωφορεία, αυτοκίνητα, παραγωγή εφεδρικής ισχύος για μέσου μεγέθους σταθμούς επικοινωνίας.
1 kW – 10kW	Οχήματα μεταφοράς, αυτοκίνητα, μοτοσυκλέτες, φορητές συσκευές, κτηριακές εγκαταστάσεις, παραγωγή εφεδρικής ισχύος.
100W – 1kW	Ποδήλατα, σκούτερ, παραγωγή εφεδρικής ισχύος, UPS για χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις.
10W – 100W	Φορητές συσκευές, φωτισμός, φωτισμός σήμανσης.
<10W	Μικρές φορητές συσκευές, κινητά τηλέφωνα.

Πιν.1.6Πεδία εφαρμογών Κυψελών Καυσίμου με βάση την παραγόμενη ισχύ.

Τεχνολογία	Ισχύς			
<i>Μηχανές Εσωτερικής Καύσης</i>	5	KW	- 10	MW
<i>Μικρές Τουρμπίνες</i>	35	KW	- 1	MW
<i>Μικρά Υδροηλεκτρικά Εργοστάσια</i>	1	MW	- 100	MW
<i>Μπαταρίες</i>	500	KW	- 5	MW
<i>Ανεμογεννήτριες</i>	200	W	- 3	MW
<i>Φωτοβολταϊκά</i>	20	W	- 100	KW
<i>Βιομάζα</i>	100	KW	- 20	MW
<i>Γεωθερμία</i>	5	MW	- 100	MW
<i>Κυψέλες Καυσίμου PAMC</i>	200	KW	- 2	MW
<i>Κυψέλες Καυσίμου MCMC</i>	250	KW	- 2	MW
<i>Κυψέλες Καυσίμου PEMFC</i>	1	KW	- 250	KW
<i>Κυψέλες Καυσίμου SOMC</i>	250	KW	- 5	MW

Πιν.1.7 Σύγκριση πηγών ενέργειας με βάση την παραγόμενη ισχύ.

2.Μοντελοποίηση Κυψέλης Υδρογόνου σε Περιβάλλον Matlab

Εισαγωγή Κεφαλαίου

Η μοντελοποίηση συστημάτων είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει τη δημιουργία εννοιολογικών, γραφικών ή μαθηματικών περιγραφών μιας σειράς φαινομένων ή φυσικών διεργασιών που εξετάζονται πειραματικά. Σκοπός της μοντελοποίησης είναι η πρόβλεψη των αποτελεσμάτων μιας διαδικασίας υπό δεδομένες αρχικές συνθήκες. Ένα καλά σχεδιασμένο μοντέλο παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη μεταβλητότητα του συστήματος.

Ένα κατάλληλο περιβάλλον προγραμματισμού για το σχεδιασμό δυναμικών συστημάτων είναι το περιβάλλον Simulink του Matlab. Χρησιμοποιείται ευρέως για τον σχεδιασμό, την προσομοίωση και τον έλεγχο των χρονικά μεταβαλλόμενων συστημάτων. Το Simulink θέτει σε εφαρμογή ένα γενικό μοντέλο παραμέτρων για την αναπαράσταση και την αριθμητική επίλυση μιας σειράς μη γραμμικών εξισώσεων. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας των εξισώσεων αυτών, η αριθμητική επίλυση που προσφέρει το Matlab παρέχει ακριβείς πληροφορίες για τη δυναμική του συστήματος.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η απόκριση μιας κυψέλης υδρογόνου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων στην απότομη αλλαγή του φορτίου με την χρήση του Simulink. Η ικανότητα του συστήματος να παρακολουθεί τις μεταβολές του φορτίου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το ποσοστό της ανεξαρτησίας του από το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο.



2.1 Μοντέλο Περιγραφής της Τάσης Εξόδου Κυψέλης Υδρογόνου

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της λειτουργίας μιας κυψέλης υδρογόνου τύπου PEMFC όπως αναπτύχθηκε στο Simulink του Matlab.

Όπως έχει αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, η πραγματική τάση εξόδου κάθε κυψέλης υπολογίζεται ως η διαφορά της αντιστρεπτής τάσης ανοιχτού κυκλώματος και των πτώσεων της τάσης λόγω των αναπτυσσόμενων απωλειών.

$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con}$$

E_{Nernst} : αντιστρεπτό δυναμικό κυψέλης.

V_{act} : απώλειες ενεργοποίησης.

V_{ohm} : ωμικές απώλειες.

V_{con} : απώλειες συγκέντρωσης.

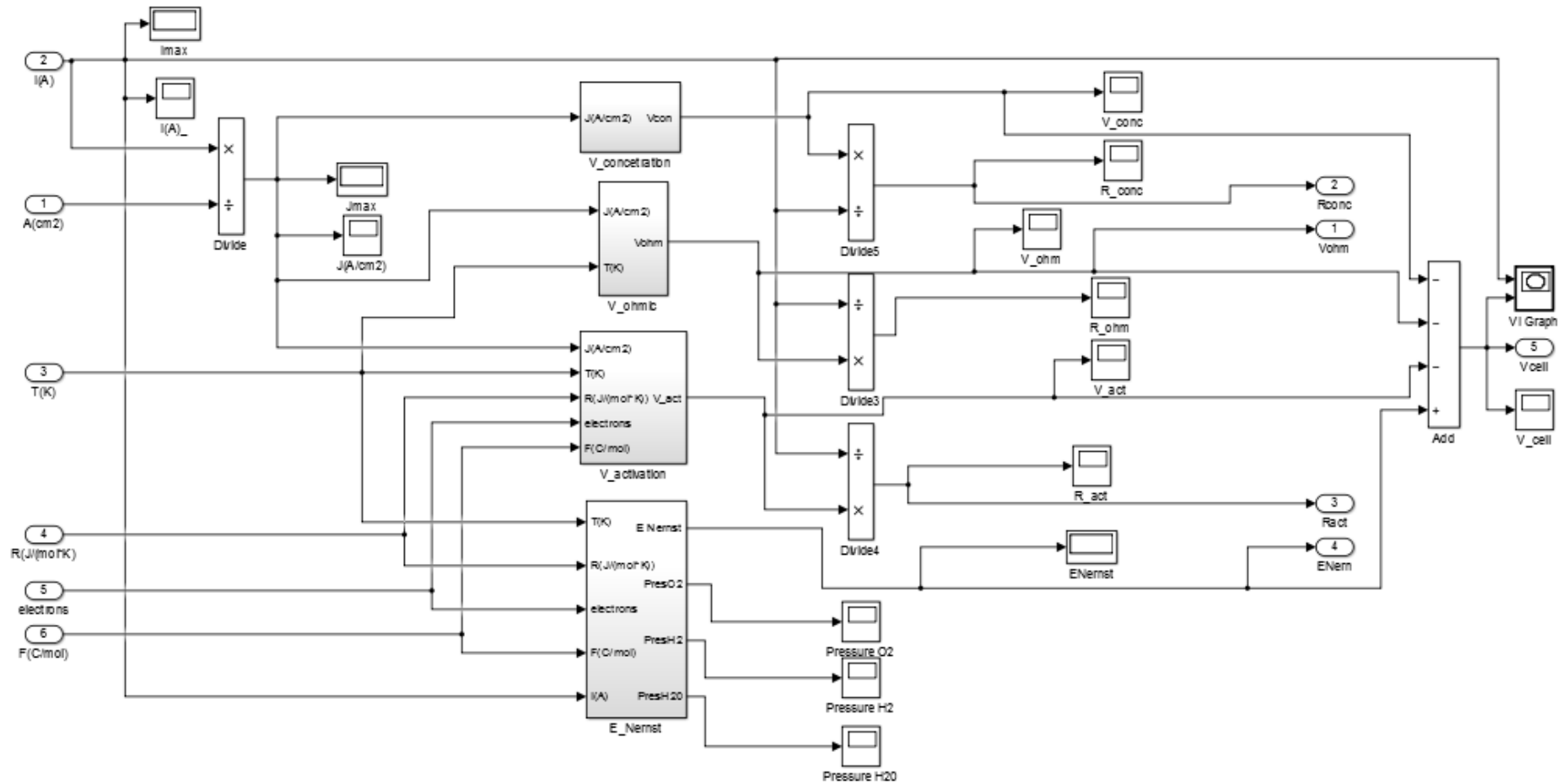
Οι τιμές των αναπτυσσόμενων απωλειών υπολογίζονται με την χρήση μαθηματικών μοντέλων συναρτήσει της πυκνότητας του ρεύματος που διαρρέει την κυψέλη. Η πυκνότητα του ρεύματος J είναι ο λόγος της έντασης του διερχόμενου ρεύματος προς την έκταση της επιφάνειας που είναι ηλεκτροχημικά ενεργή και μπορεί να παράγει ρεύμα (A/cm^2).

Ως είσοδοι του μοντέλου δίνονται το μεταβαλλόμενο DC ρεύμα της κυψέλης $I(A)$, η ηλεκτροχημικά ενεργή επιφάνεια της κυψέλης $A(cm^2)$, η θερμοκρασία $T(K)$, η παγκόσμια σταθερά των αερίων $R (J/mol \cdot K)$, η σταθερά του Faraday $F(C/mol)$ και ο αριθμός των μεταφερόμενων ανά mol ηλεκτρονίων. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο συνοψίζονται σε πίνακα που αναρτάται παρακάτω.

Ως κύρια έξοδος του μοντέλου προκύπτει η πραγματική τάση εξόδου της κυψέλης $V_{cell}(V)$ όπως υπολογίστηκε σε συνδυασμό με την επίλυση εξισώσεων από τα τέσσερα υποσυστήματα του μοντέλου. Ταυτόχρονα υπολογίζονται οι αντιστάσεις R_{act} , R_{ohm} και R_{conc} που αντιπροσωπεύουν τις απώλειες ενεργοποίησης, τις ωμικές απώλειες και τις απώλειες συγκέντρωσης, διαιρώντας την εκάστοτε αναπτυσσόμενη τάση με το διερχόμενο ρεύμα.

Ακολουθώς εμφανίζεται η αναπαράσταση του μοντέλου περιγραφής της τάσης εξόδου μιας κυψέλης PEMFC:

Εικ.2.1 Μοντέλο Τάσης Εξόδου Κυψέλης Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC).



2.1.1 Παράμετροι Μοντέλου Τάσης Εξόδου Κυψέλης Υδρογόνου

Παράμετροι		
Θερμοκρασία	T	343K
Αριθμός Κυψελών	N	40
Πάχος Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων	d	$180 \cdot 10^{-4}$ cm
Παγκόσμια Σταθερά Αερίων	R	8.314 J/molK
Σταθερά Faraday	F	96485 C/mol
Ενεργή Επιφάνεια Κυψέλης	A	250 cm^2
Πρότυπη Θερμοκρασία	T_{rev}	298.15K
Μεταβολή της Ενθαλπίας για $T_{rev} = 298.15\text{K}$	ΔH	-285806.5 J/mol
Μεταβολή της Εντροπίας για $T_{rev} = 298.15\text{K}$	ΔS	-163.2J/molK
Συντελεστής Μεταφοράς Φορτίου	a	0.45
Πυκνότητα Ρεύματος Ανταλλαγής	j_o	0.001 mA/cm^2
Εσωτερικές Απώλειες Ρεύματος	j_n	0.3 mA/cm^2
Σταθερά	λ	14
Σταθερά Απωλειών Συγκέντρωσης	B	0.038V
Μέγιστη Πυκνότητα Ρεύματος	j_{max}	0.8 A/cm^2
Σταθερά Βαλβίδας Υδρογόνου	k_{H_2}	$4.22 \cdot 10^{-4} \text{ Kmol /sec*atm}$
Σταθερά Βαλβίδας Οξυγόνου	k_{O_2}	$2.11 \cdot 10^{-5} \text{ Kmol /sec*atm}$
Σταθερά Βαλβίδας Νερού	k_{H_2O}	$7.716 \cdot 10^{-5} \text{ Kmol /sec*atm}$
Χρονική Σταθερά Υδρογόνου	τ_{H_2}	3.37sec
Χρονική Σταθερά Οξυγόνου	τ_{O_2}	6.74sec
Χρονική Σταθερά Νερού	τ_{H_2O}	18.418sec
Εισερχόμενη Ποσότητα Υδρογόνου	q_{H_2in}	$0.2591 \cdot 10^{-6} \text{ Kmol /sec}$
Εισερχόμενη Ποσότητα Οξυγόνου	q_{O_2in}	$0.12955 \cdot 10^{-6} \text{ Kmol /sec}$

2.1.2 Υποσύστημα Αντιστρεπτής Τάσης Κυψέλης E_{Nernst}

Το υποσύστημα αυτό υπολογίζει το πρότυπο αντιστρεπτό δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος (E^o) συναρτήσει της θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης καθώς και τις πιέσεις των αερίων (P_{H_2} , P_{O_2} , P_{H_2O}) που μετέχουν στην ηλεκτροχημική αντίδραση με στόχο τον υπολογισμό του αντιστρεπτού δυναμικού της κυψέλης (E_{Nernst}).

Εξίσωση Nernst:

$$E_{Nernst} = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right]$$

E^o : πρότυπο αντιστρεπτό δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος (V)

R : παγκόσμια σταθερά των αερίων (J/mol*K)

T : θερμοκρασία (K)

F : σταθερά Faraday (C/mol)

Οι πιέσεις των αντιδρώντων (P_{H_2} , P_{O_2}) και του προϊόντος (P_{H_2O}) εκτιμώνται αναλύοντας τις ηλεκτροχημικές εξισώσεις που περιγράφουν το κάθε αέριο. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται για κάθε αέριο ξεχωριστά η καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων, η παραγωγή της οποίας συσχετίζει την πίεση με τη συνολική μοριακή ροή του αερίου στο πεδίο του χρόνου:

$$p_g V = n_g RT \Rightarrow$$

$$\frac{d}{dt} p_g = \frac{RT}{V} q_g \Rightarrow$$

$$\frac{d}{dt} p_g = \frac{RT}{V} (q_g^{in} - q_g^{out} - q_g^r) \quad (2.1)$$

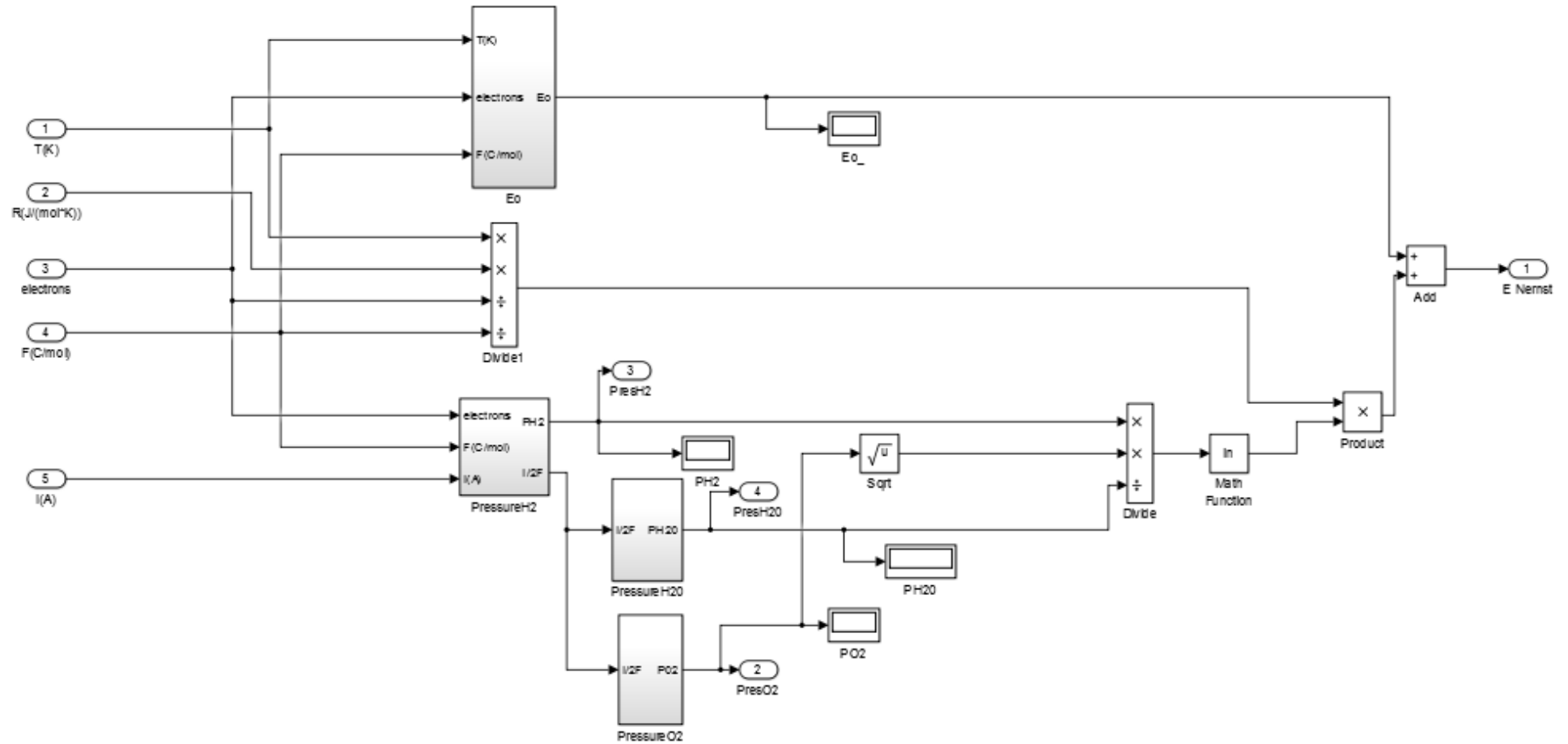
q_g^{in} : ροή εισόδου αερίου g (kmol/sec)

q_g^{out} : ροή εξόδου αερίου g (kmol/sec)

q_g^r : ροή αερίου g που αντιδρά στην κυψέλη (kmol/sec)

Αναλυτικά το Υποσύστημα Αντιστρεπτής Τάσης Ανοιχτού Κυκλώματος απεικονίζεται παρακάτω:

Εικ.2.2 Υποσύστημα Αντιστρεπτής Τάσης Ανοικτού Κυκλώματος E_{Nernst} .



Πρότυπο Αντιστρεπτό Δυναμικό Ανοιχτού Κυκλώματος (E^o)

Η τιμή του πρότυπου αντιστρεπτού δυναμικού ανοιχτού κυκλώματος υπολογίζεται με βάση την απόλυτη θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης $T(K)$ και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E^o = E_{rev}^o + \frac{\Delta S_{rev}^o}{2F} (T - T_{rev})$$

Όπου

$T_{rev} = 298.15\text{ K}$ η πρότυπη θερμοκρασία (25°C) και

$$E_{rev}^o = -\frac{\Delta G_{f,rev}^o}{2F} = -\frac{(\Delta H - T\Delta S)}{2F} \quad (2.2)$$

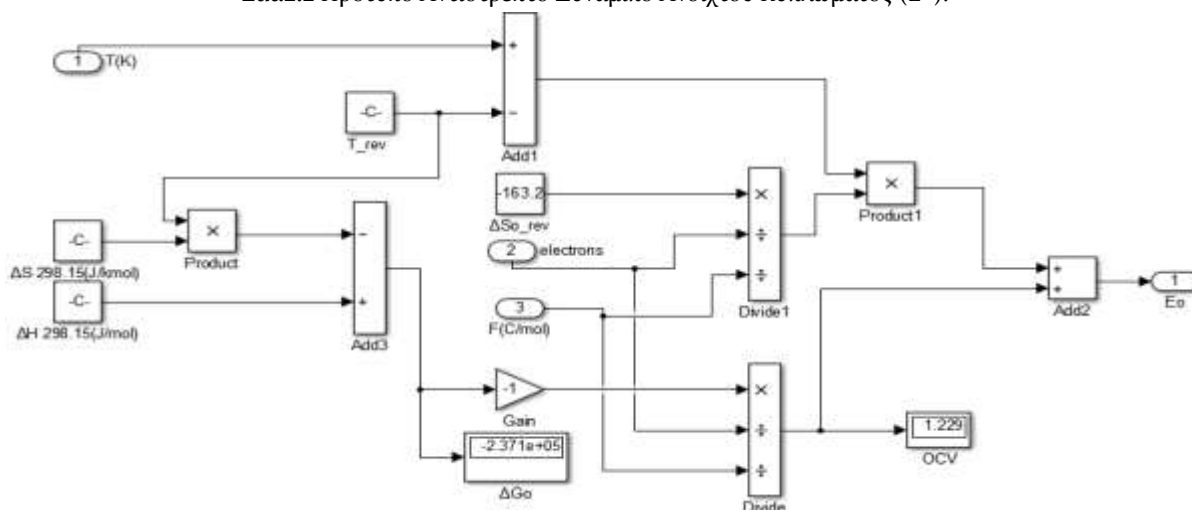
Οι τιμές των ΔH και ΔS λαμβάνονται από θερμοδυναμικούς πίνακες που αφορούν την αντίδραση σχηματισμού του νερού.

Εικ.2.3 Πίνακας Τιμών Ενθαλπίας και Εντροπίας Σχηματισμού του Νερού για διάφορες Θερμοκρασίες.

T (K)	ΔH (kJ/mol)	ΔS (J/K·mol)
298	-285.835	-163.319
308	-285.519	-162.277
318	-285.202	-161.265
328	-284.885	-160.282
338	-284.566	-159.325
348	-284.247	-158.394
358	-283.927	-157.487
368	-283.605	-156.601
373	-283.444	-156.166

Σύμφωνα με τις παραμέτρους του μοντέλου, για την απόλυτη θερμοκρασία των 298.15K η τιμή της $\Delta G_{f,rev}^o$ υπολογίζεται όπως φαίνεται στην αναπαράσταση του υποσυστήματος E^o :

Εικ.2.2 Πρότυπο Αντιστρεπτό Δυναμικό Ανοιχτού Κυκλώματος (E^o).



Υπολογισμός Πίεσης Υδρογόνου (P_{H_2})

Ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης του υδρογόνου είναι συνάρτηση της μοριακής ροής του:

$$\frac{d}{dt}p_{H_2} = \frac{RT}{V}(q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r)$$

Από το Νόμο του Faraday για μια κυψέλη PEMFC: $q_{H_2}^r = \frac{N_{cells}I}{nF} = \frac{I}{2F} \Rightarrow$

$$\frac{d}{dt}p_{H_2} = \frac{RT}{V}(q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - \frac{I}{2F}) \quad (2.3)$$

Ο όρος $q_{H_2}^{out}$ αντιπροσωπεύει τη ροή μέσω βαλβίδας και είναι ανάλογος της μερικής πίεσης που επικρατεί στο κανάλι μεταφοράς του υδρογόνου έξω από την κυψέλη:

$$\frac{q_{H_2}}{p_{H_2}} = \frac{k_a}{\sqrt{M_{H_2}}} = K_{H_2} \Rightarrow q_{H_2}^{out} = K_{H_2}p_{H_2} \text{ όπου } M_{H_2} (gr/mol) \text{ η μοριακή μάζα του } H_2 \text{ και } k_a \text{ η σταθερά της βαλβίδας.}$$

Επομένως η σχέση (2.3) αποκτά την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{d}{dt}p_{H_2} = \frac{RT}{V}(q_{H_2}^{in} - K_{H_2}p_{H_2} - \frac{I}{2F}) \Rightarrow$$

$$\frac{d}{dt}p_{H_2} + \frac{RT}{V}K_{H_2}p_{H_2} = \frac{RT}{V}(q_{H_2}^{in} - \frac{I}{2F}) \Rightarrow$$

$$\frac{V}{RT} \frac{d}{dt}p_{H_2} + K_{H_2}p_{H_2} = (q_{H_2}^{in} - \frac{I}{2F})$$

Μετασχηματίζοντας την εξίσωση κατά Laplace:

$$\frac{V}{RT}sp_{H_2}(s) + K_{H_2}p_{H_2}(s) = (q_{H_2}^{in} - \frac{I}{2F}) \Rightarrow$$

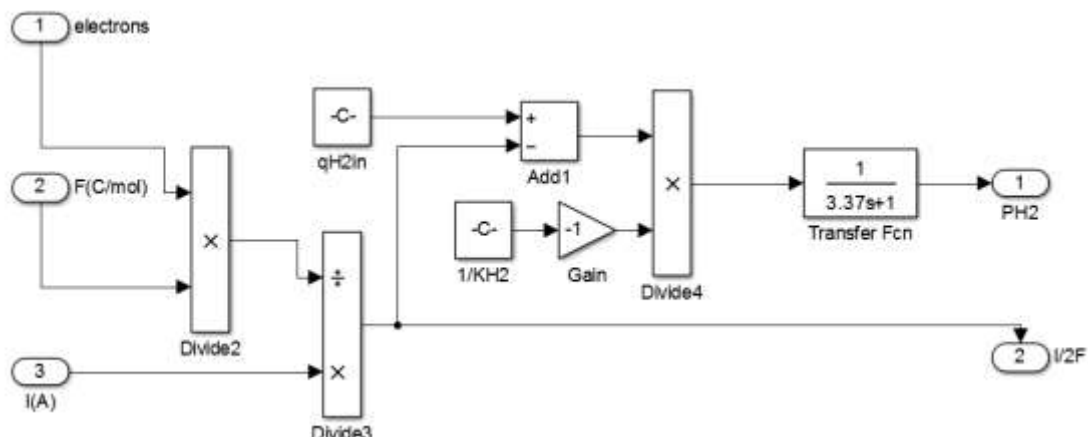
$$(\frac{V}{RT}s + K_{H_2})p_{H_2}(s) = (q_{H_2}^{in} - \frac{I}{2F}) \Rightarrow$$

$$p_{H_2}(s) = \frac{(q_{H_2}^{in} - \frac{I}{2F})}{(\frac{V}{RT}s + K_{H_2})} = \frac{(q_{H_2}^{in} - \frac{I}{2F})(1/K_{H_2})}{\frac{V}{K_{H_2}RT}s + 1} \quad \text{Θεωρούμε ότι ο λόγος}$$

$$\frac{V}{K_{H_2}RT} = \tau_{H_2} \text{ εκφράζει τη χρονική σταθερά του υδρογόνου σε sec} \Rightarrow$$

$$p_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{(\tau_{H_2}s + 1)} \left(q_{H_2}^{in} - \frac{I}{2F} \right) \quad (2.4)$$

Εικ.2.3 Block υπολογισμού πίεσης Υδρογόνου (P_{H_2})



Οι εξισώσεις που ρυθμίζουν την πίεση του οξυγόνου ακολουθούν την ίδια λογική με εκείνες της πίεσης του υδρογόνου. Ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης είναι συνάρτηση της μοριακής ροής:

$$\frac{d}{dt} p_{O_2} = \frac{RT}{V} (q_{O_2}^{in} - q_{O_2}^{out} - \frac{I}{2F}) \Rightarrow$$

$$\frac{V}{RT} \frac{d}{dt} p_{O_2} + K_{O_2} p_{O_2} = (q_{O_2}^{in} - \frac{I}{2F}) \Rightarrow$$

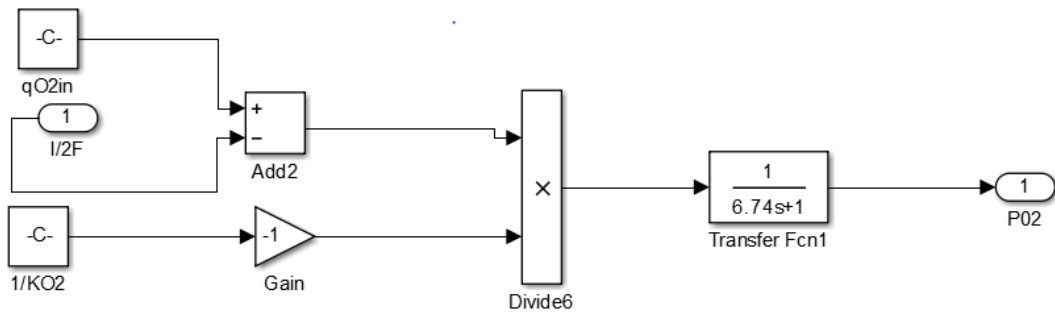
$$\left(\frac{V}{RT}s + K_{O_2}\right)p_{O_2}(s) = (q_{O_2}^{in} - \frac{I}{2F}) \Rightarrow$$

$$p_{O_2}(s) = \frac{(q_{O_2}^{in} - \frac{I}{2F}) \left(\frac{1}{K_{O_2}} \right)}{\frac{V}{K_{O_2} RT} s + 1} \quad \text{Θεωρούμε ότι ο λόγος } \frac{V}{K_{O_2} RT} = \tau_{O_2} \text{ εκφράζει τη}$$

$$p_{O_2} = \frac{1/K_{O_2}}{(\tau_{O_2, s+1})} \left(q_{O_2}^{in} - \frac{I}{2F} \right) \quad (2.5)$$

57

Εικ.2.4 Blockυπολογισμού πίεσης Οξυγόνου (P_{O_2})



Υπολογισμός Πίεσης Νερού (P_{H_2O})

Αντίστοιχα με τον υπολογισμό πιέσεων των αντιδρώντων, ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης είναι συνάρτηση της μοριακής ροής:

$$\frac{d}{dt}p_{H_2O} = \frac{RT}{V} (q_{H_2O}^{in} - q_{H_2O}^{out} - \frac{I}{2F}) \Rightarrow$$

$$\frac{V}{RT} \frac{d}{dt}p_{H_2O} + K_{H_2O}p_{H_2O} = (q_{H_2O}^{in} - \frac{I}{2F}) \Rightarrow$$

Μετασχηματίζοντας την εξίσωση κατά Laplace:

$$(\frac{V}{RT}s + K_{H_2O}) p_{H_2O}(s) = (q_{H_2O}^{in} - \frac{I}{2F}) \Rightarrow$$

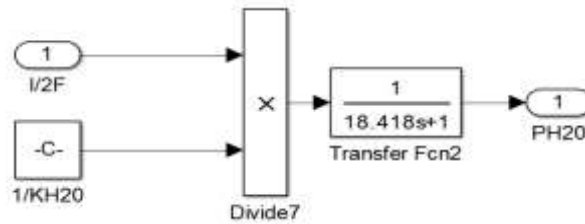
$$p_{H_2O}(s) = \frac{(q_{H_2O}^{in} - \frac{I}{2F})(1/K_{H_2O})}{\frac{V}{K_{H_2O}RT}s + 1} \text{ Θεωρούμε ότι ο λόγος } \frac{V}{K_{H_2O}RT} = \tau_{H_2O} \text{ εκφράζει}$$

τη χρονική σταθερά του οξυγόνου σε sec \Rightarrow

$$p_{H_2O} = \frac{1/K_{H_2O}}{(\tau_{H_2O}s + 1)} \left(q_{H_2O}^{in} - \frac{I}{2F} \right) \quad (2.6)$$

Σύμφωνα με την ανωτέρω εξίσωση υπολογίζεται η πίεση του παραγόμενου νερού για ορισμένες παραμέτρους θεωρώντας ότι η εισερχόμενη ποσότητα $q_{H_2O}^{in}$ είναι μηδενική καθώς το νερό αποτελεί το προϊόν της διαδικασίας, με τον τρόπο που φαίνεται παρακάτω.

Εικ.2.5 Blockυπολογισμού πίεσης Οξυγόνου (P_{O_2})



2.1.3 Υποσύστημα Απωλειών Ενεργοποίησης $V_{activation}$

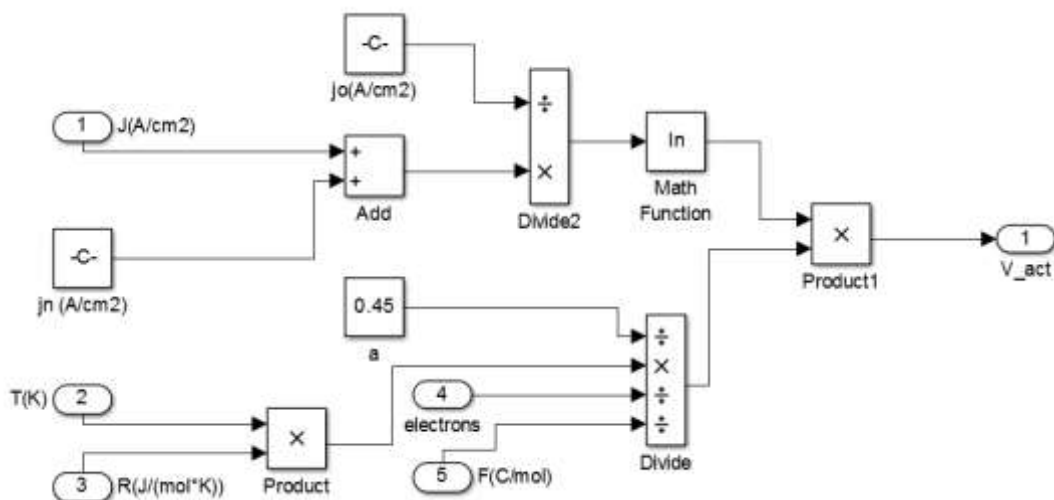
Οι απώλειες ενεργοποίησης όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο σχετίζονται με την επίδραση εσωτερικών ρευμάτων αλλά και με τη διάχυση του H_2 και υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{act} = \frac{RT}{2aF} \ln \left(\frac{j + j_n}{j_o} \right)$$

j_n : πυκνότητα ρεύματος που χάνεται λόγω εσωτερικών ρευμάτων και διάχυση καυσίμου (A/cm^2).

Εκτιμώντας τις παραμέτρους όπως συνοψίζονται στον αντίστοιχο πίνακα με βάση την καλή προσαρμογή του μοντέλου, η μοντελοποίηση των απωλειών αυτών φαίνεται παρακάτω:

Εικ.2.6 Υποσύστημα Απωλειών Ενεργοποίησης $V_{activation}$



2.1.4 Υποσύστημα Ωμικών Απωλειών V_{ohmic}

Οι ωμικές απώλειες προκαλούνται κυρίως λόγω της αντίστασης που παρουσιάζει η ηλεκτρολυτική μεμβράνη στη ροή των κατιόντων του υδρογόνου και προέρχεται τόσο από την ηλεκτρονιακή όσο και από την ιοντική αντίσταση.

Η μείωση των απωλειών αυτών μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ηλεκτροδίων που διαθέτουν την υψηλότερη δυνατή αγωγιμότητα, περιορίζοντας το πάχος του ηλεκτρολύτη αλλά και με τη χρήση των κατάλληλων υλικών κατασκευής για τις διασυνδέσεις και τις διπολικές πλάκες.

Ο υπολογισμός των ωμικών απωλειών στηρίζεται στην ακόλουθη εξίσωση με τις τιμές των παραμέτρων να αναγράφονται στον αντίστοιχο πίνακα:

$$V_{ohm} = j \cdot d \cdot r_M$$

r_M : ειδική αντίσταση της μεμβράνης στη ροή των ιόντων (ohm·cm)

d : πάχος πολυμερούς μεμβράνης (cm)

j : πυκνότητα του ρεύματος (A/cm²)

Η ειδική αντίσταση r_M υπολογίζεται συναρτήσει της πυκνότητας του ρεύματος J (A/cm²) που διαρρέει την κυψέλη και της θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης $T(K)$. Η σταθερά λ εκφράζει το ποσοστό ενυδάτωσης της ηλεκτρολυτικής μεμβράνης και λαμβάνει τιμές από το διάστημα τιμών [14,23].

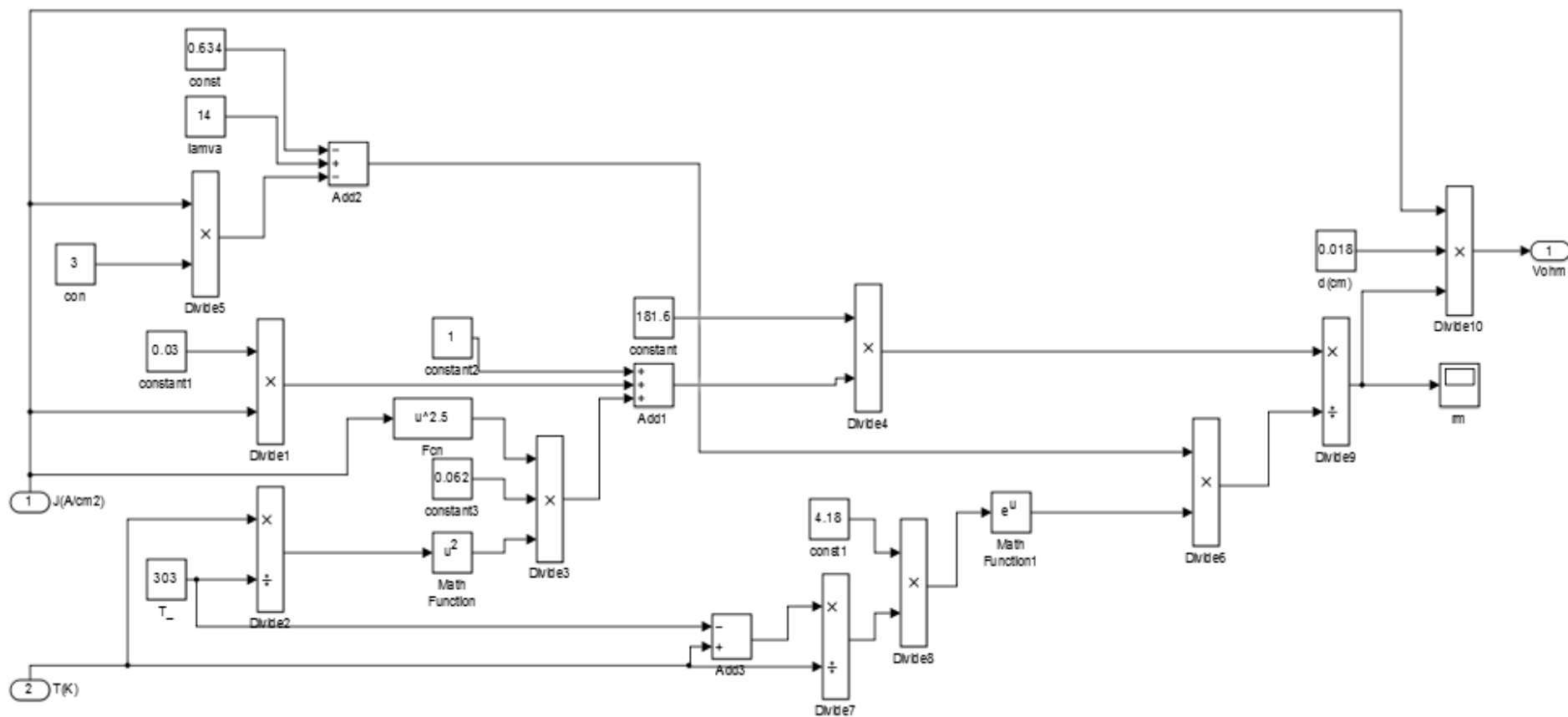
Στο μοντέλο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να μην εξεταστεί η περίπτωση κατακράτησης νερού στο εσωτερικό της κυψέλης καθώς απαιτείται ειδική διαχείριση ώστε να αποτραπεί η καταστροφή της κυψέλης. Για το λόγο η παράμετρος λ λαμβάνει την μικρότερη δυνατή επιτρεπτή τιμή ώστε να επιτυγχάνεται επαρκής ενυδάτωση της ηλεκτρολυτικής μεμβράνης και ταυτόχρονα η κυψέλη να λειτουργεί χωρίς να σημειώνονται προβλήματα.

Η ειδική αντίσταση r_M δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$r_M = \frac{181.6 \left[1 + 0.03j + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 j^{2.5} \right]}{(\lambda - 0.634 - 3j) e^{4.18 \left[\frac{T-303}{T} \right]}}$$

Η ανωτέρω εξίσωση υπολογίζεται με τον τρόπο που φαίνεται παρακάτω:

Εικ.2.7Υποσύστημα Ωμικών Απωλειών V_{ohmic}



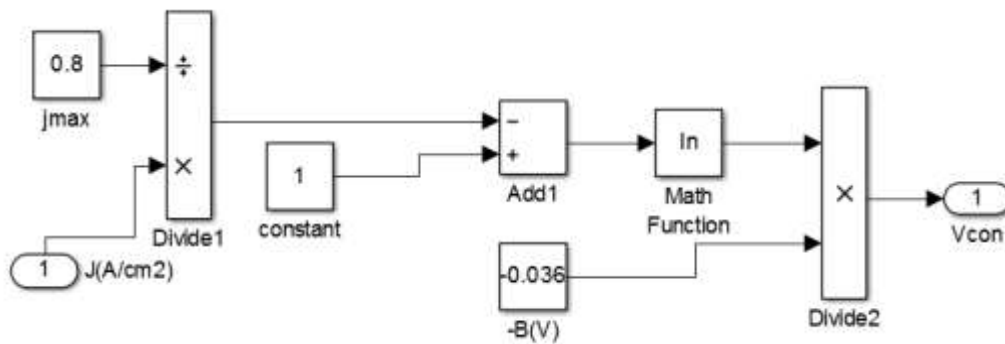
2.1.5 Υποσύστημα Απωλειών Συγκέντρωσης $V_{concentration}$

Η εξίσωση που επιλύεται για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω συγκέντρωσης είναι η ακόλουθη:

$$V_{con} = -B \cdot \ln\left(1 - \frac{j}{j_{max}}\right)$$

Η σταθερά B εξαρτάται από το είδος και τις συνθήκες λειτουργίας της κυψέλης. Είσοδος του υποσυστήματος είναι η πυκνότητα του ρεύματος και έξοδος η πτώση της τάσης που οφείλεται στις απώλειες συγκέντρωσης.

Εικ.2.8Υποσύστημα Απωλειών Ενεργοποίησης $V_{activation}$



2.2 Μοντελοποίηση Μεταβατικής Συμπεριφοράς της Τάσης Εξόδου

Για να μοντελοποιηθεί η μεταβατική συμπεριφορά της τάσης εξόδου είναι απαραίτητη η χρήση του ισοδύναμου κυκλώματος της κυψέλης κατά το οποίο το φαινόμενο της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας που αναπτύσσεται μοντελοποιείται ως ηλεκτρικός πυκνωτής και οι πτώσεις που παρουσιάζονται εξαιτίας των απωλειών τάσεως ως αντιστάσεις.

Ως είσοδοι δίνονται οι τιμές των ηλεκτρικών αντιστάσεων όπως υπολογίστηκαν στο μοντέλο της τάσης εξόδου της κυψέλης υδρογόνου, το ρεύμα που διαρρέει την κυψέλη και η χωρητικότητα του πυκνωτή C , η τιμή της οποίας τέθηκε στα $5F$.

Συγκεκριμένα, οι ηλεκτρικές αντιστάσεις που αντιπροσωπεύουν τις μη αντιστρεπτές απώλειες ενεργοποίησης και συγκέντρωσης υπολογίστηκαν ως εξής:

$$R_{act} = \frac{V_{act}}{I} \quad (2.7)$$

$$R_{con} = \frac{V_{con}}{I} \quad (2.8)$$

Το μοντέλο αποτελεί έκφραση των παρακάτω εξισώσεων, όπως έχουν αναπτυχθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο:

$$\frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{C(R_{act} + R_{conc})}V_c - \frac{i}{C} = 0$$

Η ανωτέρω διαφορική εξίσωση ολοκληρώνεται και προσομοιώνεται με τη χρήση ολοκληρωτή:

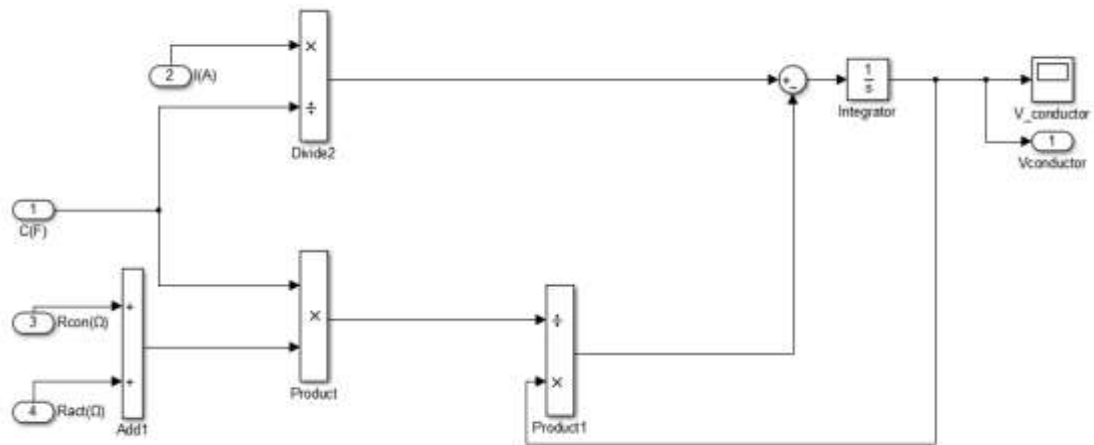
$$V_c = \int_0^\tau \left[\frac{i(t)}{C} - \frac{1}{C(R_{act} + R_{conc})}V_c(t) \right] dt$$

Μετασχηματίζοντας την εξίσωση κατά Laplace:

$$V_c(s) = \frac{1}{s} \left[\frac{i(s)}{C} - \frac{1}{C(R_{act} + R_{conc})}V_c(s) \right] \quad (2.9)$$

Η υλοποίηση των ανωτέρω εξισώσεων προϋποθέτουν γνώση της τιμής της τάσης V_c που εκφράζει τις απώλειες τάσης εξαιτίας του φαινομένου της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας. Συνεπώς απαιτείται ανατροφοδότηση στο σύστημα, το οποίο απεικονίζεται παρακάτω:

Εικ.2.9 Προσομοίωση Μεταβατικής Συμπεριφοράς *Transitive Condition* με Ισοδύναμο Κύκλωμα



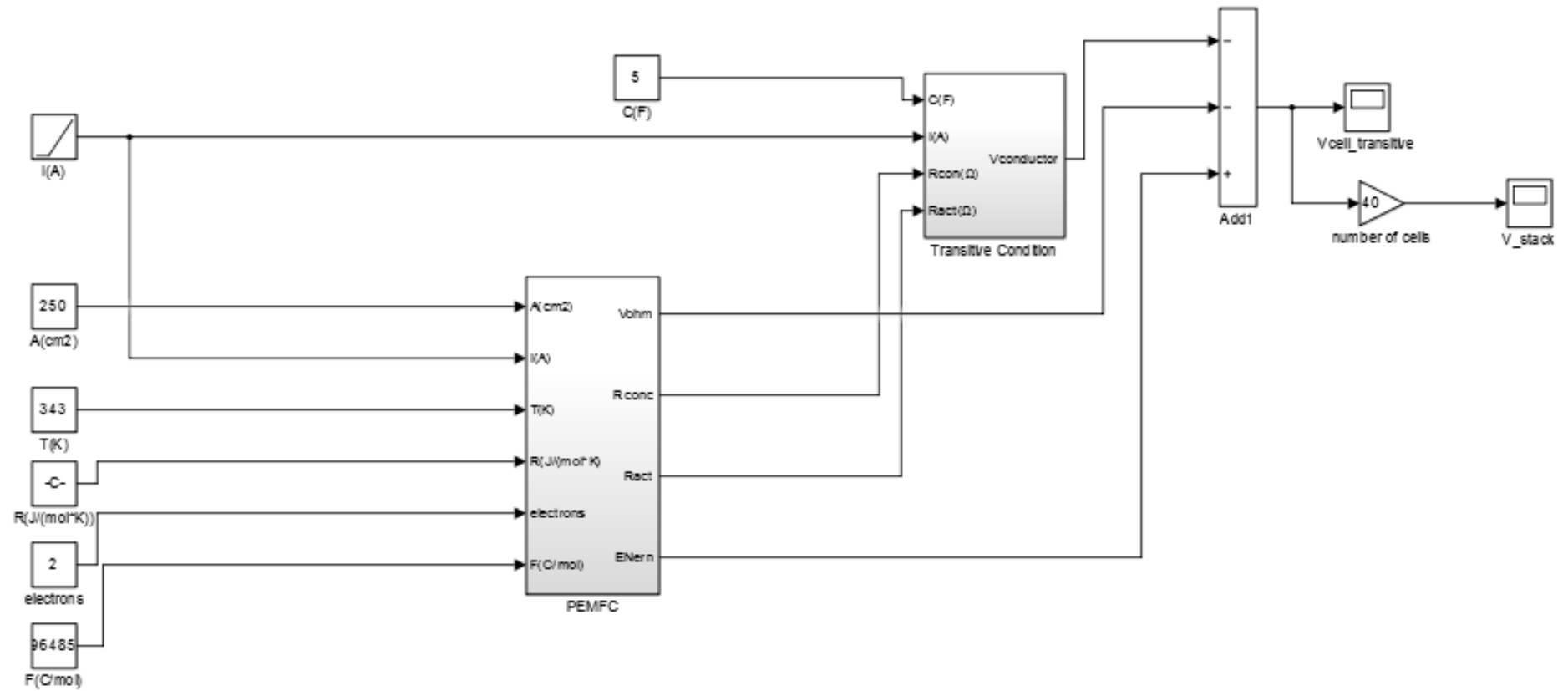
Η τάση εξόδου του συστήματος υπολογίζεται αφαιρώντας τις τάσεις που προκύπτουν από αναπτυσσόμενες απώλειες, όπως φαίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{cell_transitive} = E_{Nernst} - V_C - V_{ohm}$$

Τα μεγέθη E_{Nernst} , V_{ohm} έχουν υπολογιστεί στο μοντέλο τάσης εξόδου της κυψέλης υδρογόνου η οποία παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Το παρακάτω σύστημα όπως έχει μοντελοποιηθεί, μπορεί να δώσει τις αναγκαίες πληροφορίες για τη μεταβατική συμπεριφορά της τάσης εξόδου κατά τις μεταβολές που παρουσιάζει το ρεύμα, αλλά και για τη χρονική απόκριση του συστήματος στις μεταβολές αυτές. Η λειτουργία του φαίνεται συγκεντρωτικά παρακάτω:

Εικ.2.10 Προσομοίωση Τάσης Εξόδου Μεταβατικής Συμπεριφοράς Κυψέλης Υδρογόνου



2.3 Μοντέλο Προσομοίωσης Λειτουργίας Κυψέλης Υδρογόνου υπό Μεταβαλλόμενο Φορτίο

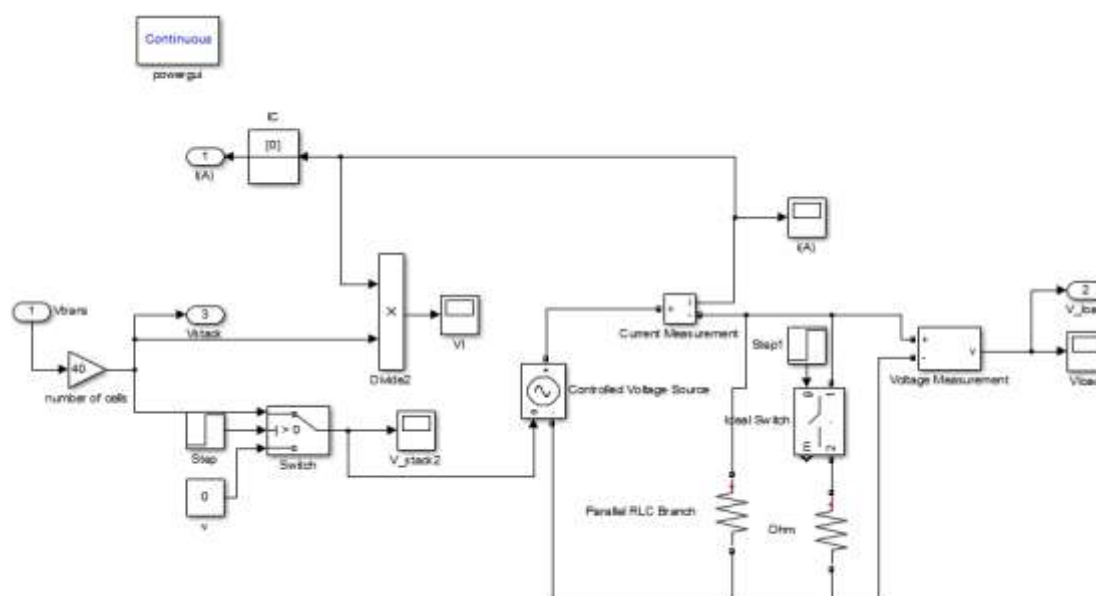
Με άξονα αναφοράς τη μεταβατική συμπεριφορά της κυψέλης, κρίνεται σκόπιμη η σύνδεση της με ηλεκτρικές αντιστάσεις ώστε να εξεταστεί η απόκριση του συστήματος στη μεταβολή του φορτίου. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το μοντέλο περιγραφής της μεταβατικής συμπεριφοράς όπως αναπτύσσεται στο υποσύστημα *Ohmic Load* όταν η κυψέλη συνδεθεί με φορτίο 2 Ω και 1 Ω αντίστοιχα όπως φαίνεται στο ακόλουθο κύκλωμα.

Το σύστημα που μοντελοποιήθηκε δέχεται ως είσοδο την τάση της κυψέλης $V_{cell_transitive}$ όπως διαμορφώνεται συναρτήσει των μεταβατικών φαινομένων με την εκτέλεση των απαραίτητων πράξεων και υπολογισμών όπως υπαγορεύουν οι μαθηματικές σχέσεις του μοντέλου περιγραφής της τάσης εξόδου της κυψέλης. Στο τέλος εμφανίζεται η τάση V_{load} που αναπτύσσεται στα άκρα του φορτίου, η τάση της συστοιχίας κυψελών V_{stack} και η ένταση I του ρεύματος που τροφοδοτεί την κυψέλη.

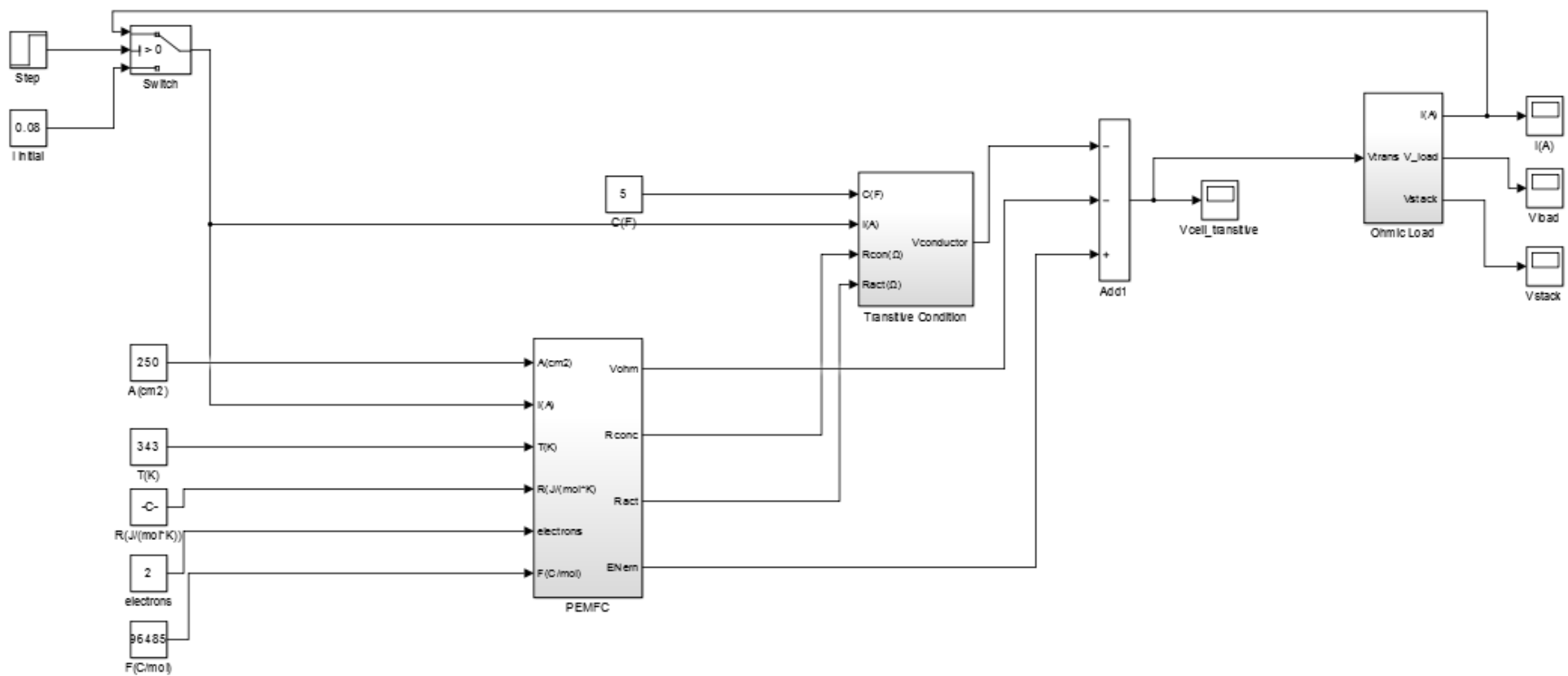
Για την ανάπτυξη του μοντέλου, δόθηκε αρχικά μια πολύ μικρή τιμή στην εναρκτήρια ένταση του ρεύματος ως είσοδος εκκίνησης του συστήματος έως ότου ανοίξει ο χρονοδιακόπτης που επιτρέπει τη διάθεση του παραγόμενου ρεύματος που διαρρέει το φορτίο προς τροφοδοσία της κυψέλης.

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται το υποσύστημα υπολογισμού της τάσης του μεταβαλλόμενου φορτίου αλλά και συνολικά το σύστημα κυψέλης υδρογόνου αφότου συνδεθεί με το εν λόγω φορτίο, όπως φαίνεται παρακάτω:

Εικ.2.11 Υποσύστημα Υπολογισμού Μεταβαλλόμενου Φορτίου *Ohmic Load*



Εικ.2.12 Προσομοίωση Κυψέλης Υδρογόνου υπό Μεταβαλλόμενο Φορτίο



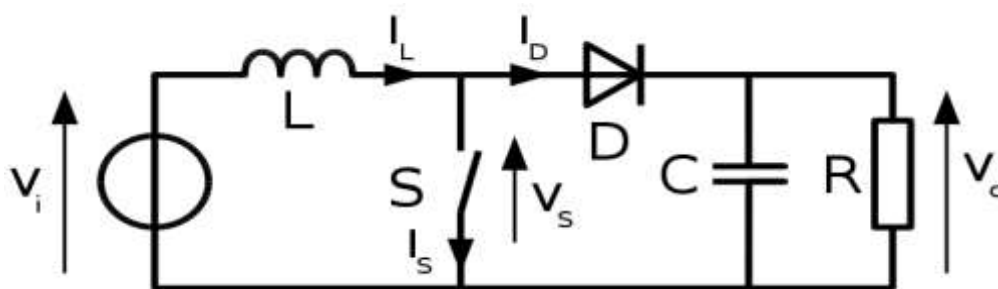
2.4 Μοντελοποίηση DC/DC Μετατροπέα Τάσης

Ο μετατροπέας συνεχούς τάσης αποτελεί το στάδιο κατά το οποίο η τάση που παράγεται από την κυψέλη σταθεροποιείται και ανυψώνεται προτού μετατραπεί σε εναλλασσόμενη ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί από το δίκτυο. Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης βρίσκουν πολλές εφαρμογές, δυο από τις οποίες είναι σε συστήματα ελέγχου ταχύτητας κινητήρα συνεχούς ρεύματος και σε συστήματα ηλεκτρικής τροφοδοσίας.

Αποτελούν διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος δηλαδή κυκλώματα μετατροπής μιας πηγής συνεχούς τάσης σε πηγή συνεχούς τάσης άλλης τιμής και ορισμένες φορές άλλης πολικότητας. Η μετατροπή αυτή στηρίζεται στη χρήση διακοπτικών στοιχείων, η ελεγχόμενη αγωγή των οποίων βοηθά στον καθορισμό της τάσης εξόδου και τη σταθεροποίηση της σε ορισμένη τιμή.

Το κύκλωμα λειτουργίας ενός μετατροπέα ανύψωσης φαίνεται παρακάτω:

Εικ.2.13 Κύκλωμα Λειτουργίας Μετατροπέα Ανύψωσης.



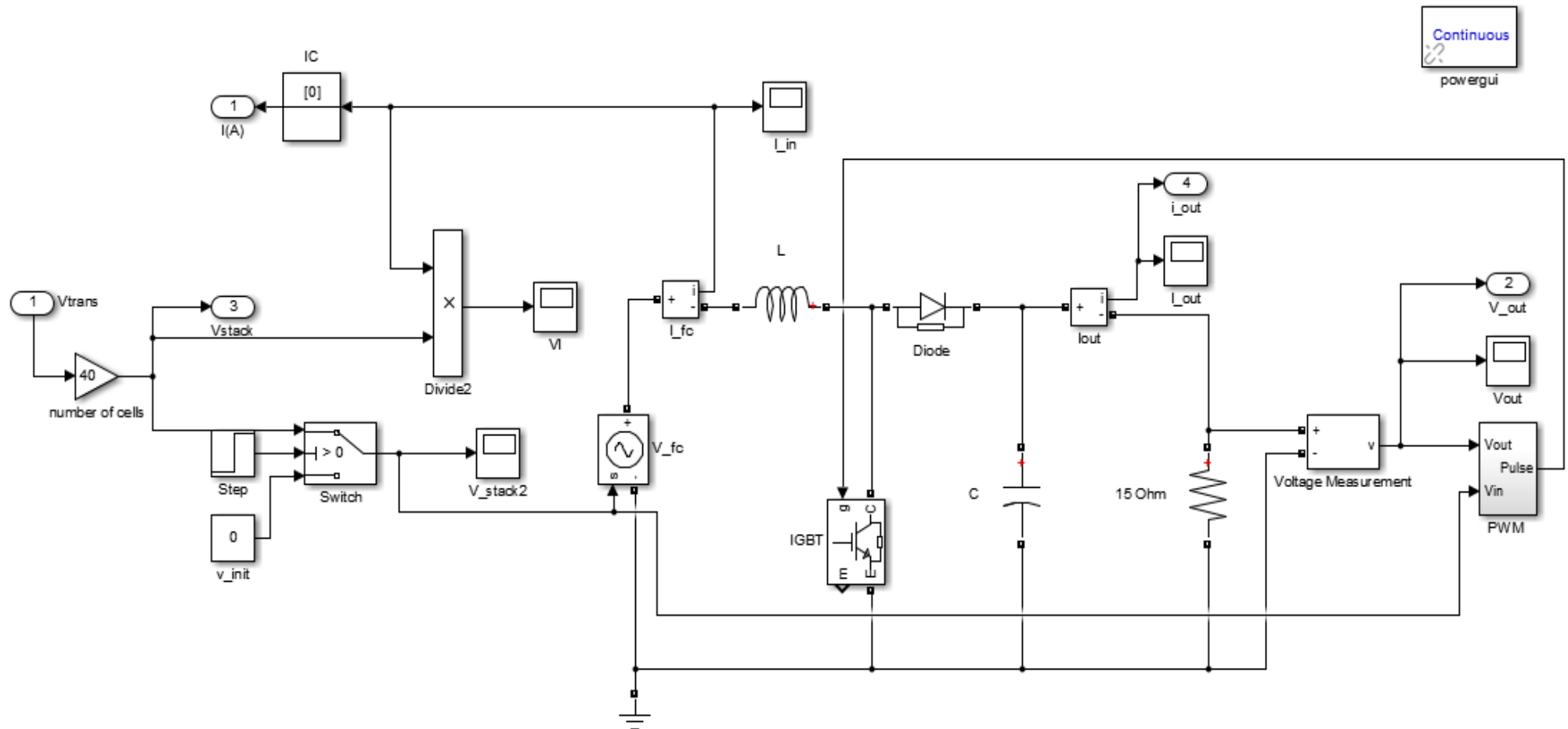
Το υποσύστημα του DC/DC μετατροπέα τάσης που όπως απεικονίζεται στην επόμενη σελίδα μοντελοποιήθηκε για μη διακοπτόμενο ρεύμα πηνίου ώστε να ανυψώνει και να σταθεροποιεί την τάση εξόδου που δέχεται από την κυψέλη στα 80 V.

Ο μετατροπέας ανύψωσης αποτελείται από ένα πηνίο L, έναν πυκνωτή εξόδου C, μια δίοδο D και ένα διακοπτικό στοιχείο δηλαδή ενός τρανζίστορ IGBT χαρακτηριστικό του οποίου είναι οι μικρές απώλειες αγωγιμότητας κατά τον χειρισμό υψηλών ρευμάτων. Η επιλογή των τιμών αυτεπαγωγής του πηνίου L και της χωρητικότητας του πυκνωτή C έχουν ιδιαίτερη σημασία για τη λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης επειδή το ενδεχόμενο της μη ανταπόκρισης του στις απαιτήσεις λειτουργίας καθιστά μη αξιοποιήσιμη την παραγόμενη ισχύ της κυψέλης.

Η σχετική διάρκεια αγωγής της διόδου D καθορίζει την τιμή που θα λάβει η τάση εξόδου και προσαρμόζεται κατάλληλα κάθε στιγμή με τη βοήθεια ενός ελεγκτή PWM (Pulse Width Modulation), ο οποίος μοντελοποιήθηκε ως μέρος του συστήματος. Οι τιμές των παραμέτρων της διάταξης του μετατροπέα ανύψωσης που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση αναγράφονται παρακάτω:

Παράμετροι DC/DC Μετατροπέα Ανύψωσης		
Αυτεπαγωγή Πηνίου	L	200mH
Χωρητικότητα Πυκνωτή	C	400μF
Αναλογικό Κέρδος Ελεγκτή	K_p	0.0034
Ολοκληρωτικό Κέρδος Ελεγκτή	K_i	0.0048

Εικ.2.14 Υποσύστημα DC/DC Μετατροπέα Ανύψωσης Τάσης.

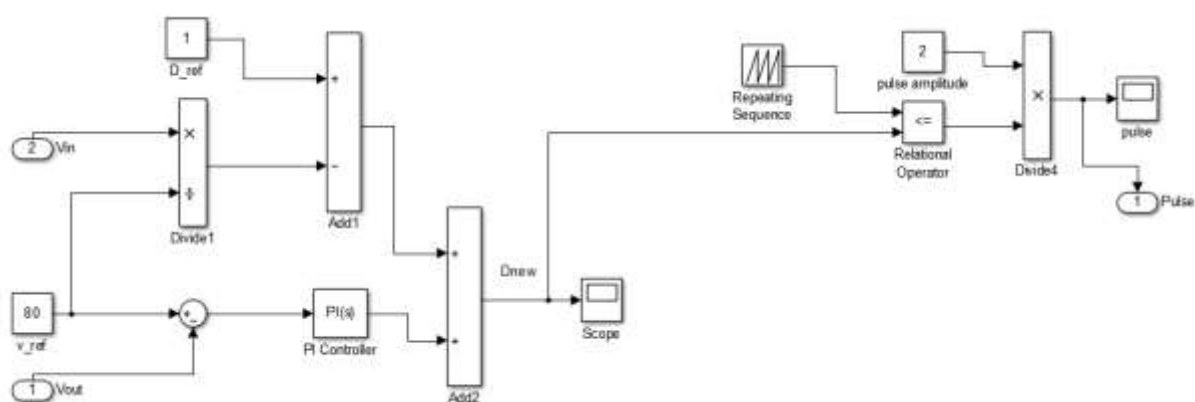


2.4.1 Υποσύστημα Ελέγχου PWM

Είσοδος του υποσυστήματος ελέγχου είναι η τάση της συστοιχίας V_{in} αλλά και η τάση εξόδου του DC/DC μετατροπέα ανύψωσης V_{out} . Στο υποσύστημα Ελέγχου PWM δίνεται ως σταθερά η επιθυμητή τιμή αναφοράς της τάσης εξόδου $V_{out_{ref}}$, η οποία ορίζεται στα 80V.

Έξοδος του υποσυστήματος είναι μια παλμοσειρά μεταβλητού εύρους παλμών και πλάτους 2V, η οποία καθορίζει το χρόνο αγωγής του IGBT τρανζίστορ που ελέγχει τη ροή του συνεχούς ρεύματος για κάθε περίοδο λειτουργίας.

Εικ.2.15 Υποσύστημα PWM.



Η διαμόρφωση της τιμής της σχετικής διάρκειας αγωγής D του IGBT τρανζίστορ πραγματοποιείται με τον υπολογισμό της διαφοράς της τιμής εξόδου ενός ελεγκτή PI με αναλογικό και ολοκληρωτικό κέρδος K_p και K_i αντίστοιχα από την τιμή ενός σήματος αναφοράς D_{ref} που δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$D_{ref} = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out_{ref}}}$$

Ο ελεγκτής PI δέχεται ως είσοδο το παρατηρούμενο σφάλμα, την απόκλιση δηλαδή της πραγματικής τιμής της τάσης από την επιθυμητή τιμή αναφοράς των 80V. Επιλέγοντας κατάλληλα τις τιμές των K_p, K_i η νέα τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής D_{new} προκύπτει ως το άθροισμα της εξόδου του ελεγκτή PI και του σήματος αναφοράς D_{ref} . Η παλμοσειρά ελέγχου της αγωγής του IGBT τρανζίστορ συγκρίνεται κάθε στιγμή με την τιμή D_{new} .

Στην περίπτωση που η τιμή της παλμοσειράς είναι μικρότερη της D_{new} αποστέλλεται παλμός πλάτους 2V με αποτέλεσμα το IGBT τρανζίστορ να άγει, διαφορετικά στην περίπτωση που η παλμοσειρά έχει μεγαλύτερη τιμή της D_{new} ο παλμός που αποστέλλεται έχει μηδενικό πλάτος και το IGBT τρανζίστορ παρέρχεται σε κατάσταση αποκοπής. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται διαρκώς έως ότου η τιμή της D_{new} προσεγγίσει τη τιμή που αντιστοιχεί στην επιθυμητή τάση εξόδου του μετατροπέα.

2.4.2 Προσομοίωση Συστήματος Κυψέλης – Μετατροπέα Ανύψωσης υπό Μεταβαλλόμενο Φορτίο

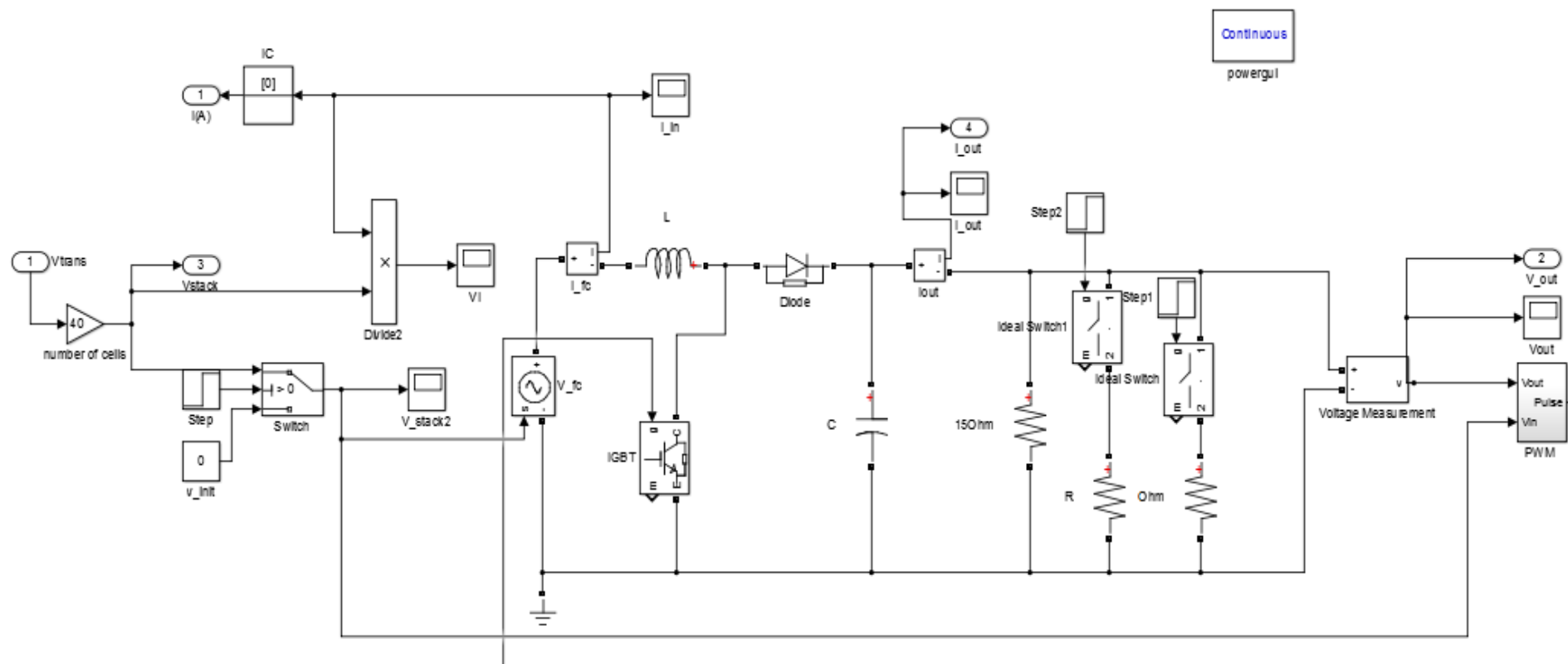
Η λειτουργία του κυκλώματος του DC/DC Μετατροπέα Ανύψωσης που τροφοδοτεί η συστοιχία των κυψελών μπορεί να αξιολογηθεί ως προς την χρονική απόκριση όταν οι απαιτήσεις του φορτίου αυξάνονται κατά την περίοδο λειτουργίας του συστήματος. Το επίπεδο της τάσης που ρυθμίζεται με τη μεταβολή της διάρκειας αγωγής του διακοπτικού στοιχείου οφείλει να διατηρείται σταθερό χωρίς να επηρεάζεται από τις αναταράξεις που εμφανίζονται στην τιμή του διασυνδεδεμένου φορτίου, ανά πάσα στιγμή εντός της περιόδου λειτουργίας του συστήματος.

Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, το αρχικό φορτίο των 15Ω της διάταξης μεταβάλλεται καθώς πραγματοποιείται παράλληλη σύνδεση αντιστάσεων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές του διαστήματος που αποτελεί τον χρόνο προσομοίωσης, όπως διαμορφώθηκε στο υποσύστημα του DC/DC μετατροπέα τάσης που απεικονίζεται παρακάτω. Η χρήση απλών χρονοδιακοπών επιτρέπει τη σύνδεση των φορτίων αυτών με το σύστημα έπειτα από προκαθορισμένες χρονικές στιγμές ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του. Αυτή η απότομη αλλαγή στην τιμή του φορτίου επηρεάζει την τιμή της τάσης και του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα, διαμορφώνοντας τις κατάλληλες συνθήκες αγωγής και αποκοπής του IGBT τρανζίστορ στο υποσύστημα PWM ελέγχου ώστε η τάση εξόδου του μετατροπέα να ισορροπήσει στην επιθυμητή τιμή που έχει οριστεί στο συγκεκριμένο υποσύστημα. Η επίδραση του φορτίου είναι εμφανής και στα υπόλοιπα μεγέθη εξόδου του μοντέλου επηρεάζοντας τη λειτουργία της κυψέλης.

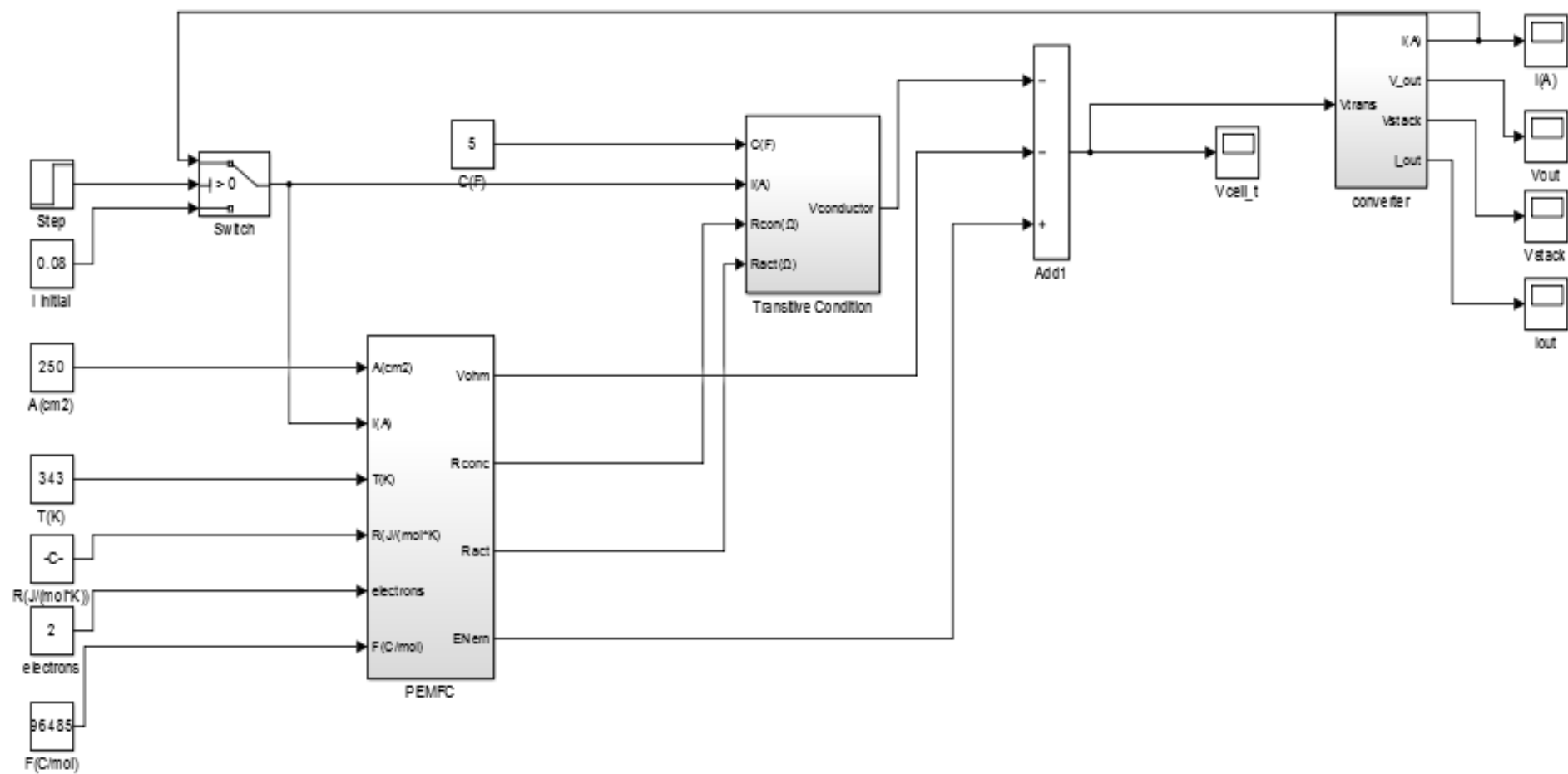
Η αντίσταση του IGBT τρανζίστορ και της διόδου D λαμβάνουν πολύ μικρές τιμές που στην πράξη θεωρούνται αμελητέες. Ακολουθώντας στο γενικό μοντέλο της κυψέλης PEMFC και του DC/DC μετατροπέα ανύψωσης εμφανίζονται ως έξοδοι η τάση της συστοιχίας και το ρεύμα της που αξιοποιείται προς τροφοδοσία της κυψέλης, μαζί με την τάση και το ρεύμα εξόδου του DC/DC μετατροπέα ανύψωσης.

Τέλος, η τάση και το ρεύμα εξόδου του συστήματος είναι διαθέσιμα προς αξιοποίηση από το υπάρχον δίκτυο εάν το συνεχές ρεύμα μετατραπεί σε εναλλασσόμενο, με τη χρήση ενός DC/AC μετατροπέα.

Εικ.2.16 Υποσύστημα DC/DC Μετατροπέα Τάσης και Σύνδεση με Φορτίο.



Εικ.2.17 Γενικό Μοντέλο Κυψέλης Υδρογόνου – Μετατροπέα DC/DC Τάσης.



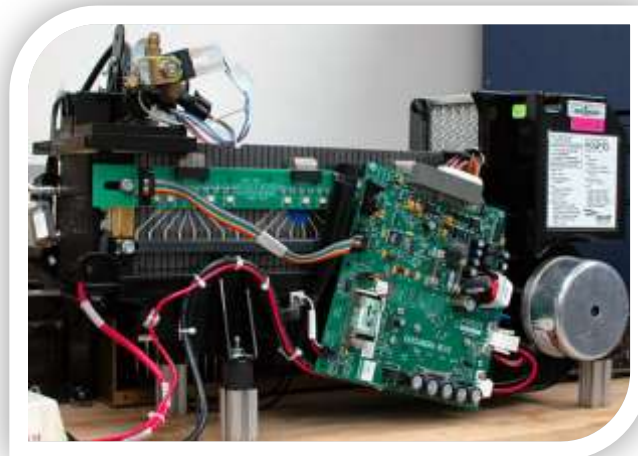
3. Αποτελέσματα Προσομοίωσης Συστήματος Κυψέλης Καυσίμου –Συνεχούς Μετατροπέα Ανύψωσης

Εισαγωγή Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η συμπεριφορά του συστήματος κυψέλης PEMFC – DC/DC Μετατροπέα Τάσης, η οποία αξιολογείται ως προς την αποτελεσματικότητα των εν λόγω μοντέλων, όπως αναπτύχθηκαν και παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Σημαντικό στοιχείο της προσομοίωσης αποτελεί η απόδειξη ότι τα ρεαλιστικά μοντέλα όλων των υποσυστημάτων αντιδρούν στη δυναμική των διεργασιών με τον ίδιο τρόπο όπως και το πραγματικό σύστημα, επαληθεύοντας τα χαρακτηριστικά του. Κατά συνέπεια η ικανότητα αυτή αποτελεί βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση του μοντέλου. Γενικά, ο εντοπισμός της αιτίας που καθιστά το σύστημα μη αποτελεσματικό μέσω της δυναμικής προσομοίωσης του επιτρέπει τις κατάλληλες διορθωτικές κινήσεις που θα εξασφαλίσουν καλές συνθήκες ελέγχου, προσεγγίζοντας όσο το δυνατόν πιστότερα το πραγματικό σύστημα με στόχο την ιδανική αναπαράσταση της λειτουργίας του.

Συνοψίζοντας, ο συνδυασμός της μοντελοποίησης και δυναμικής προσομοίωσης του συστήματος δημιουργεί θετικές προοπτικές για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των διατάξεων αλλά και του ελέγχου. Στόχος είναι να επηρεάζονται θετικά οι επιδόσεις και κατ'επέκταση η απόδοση του συστήματος που προσομοιώνεται όπως αποδεικνύεται στο πέρας του κεφαλαίου αυτού.

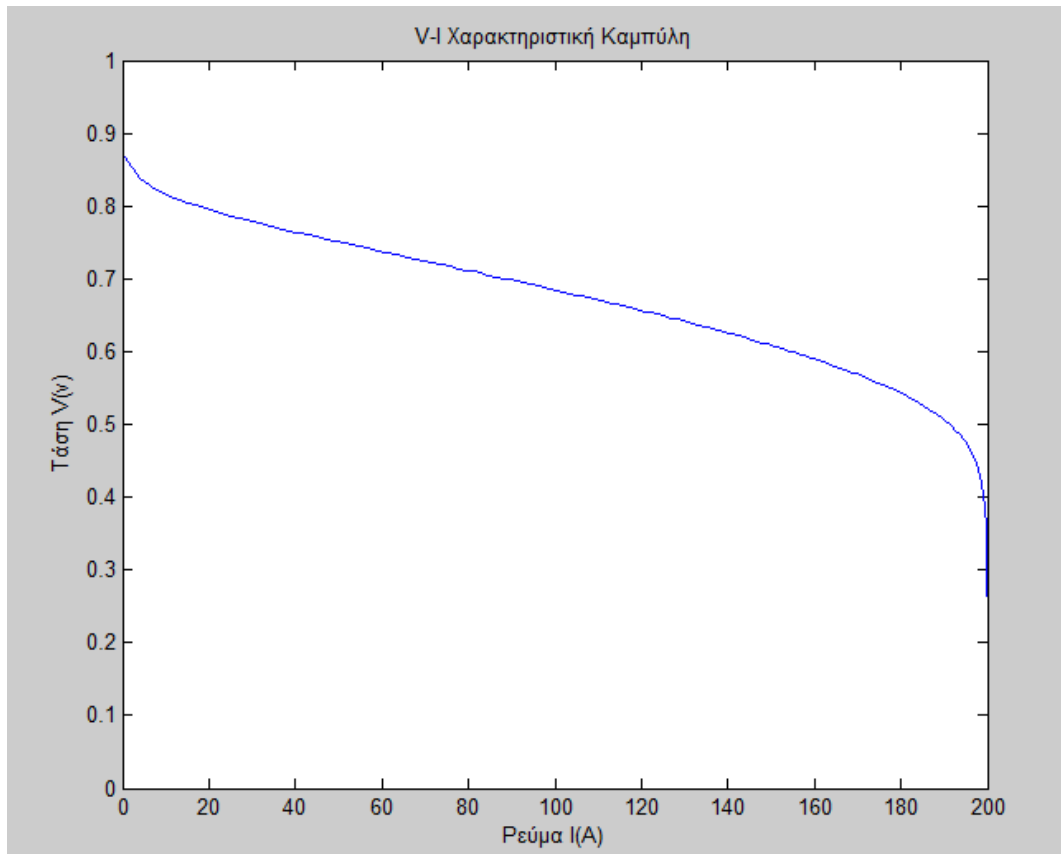


3.1 Αποτελέσματα Μοντέλου Τάσης Εξόδου Κυψέλης Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων(PEMFC)

Χαρακτηριστικές Καμπύλες $V-I$ και $P-I$

Η εκτιμώμενη από το μαθηματικό μοντέλο καμπύλη πόλωσης $V-I$ της κυψέλης υδρογόνου βάσει γνωστών παραμέτρων (ενότητα 2.1.1) έχει την ακόλουθη μορφή:

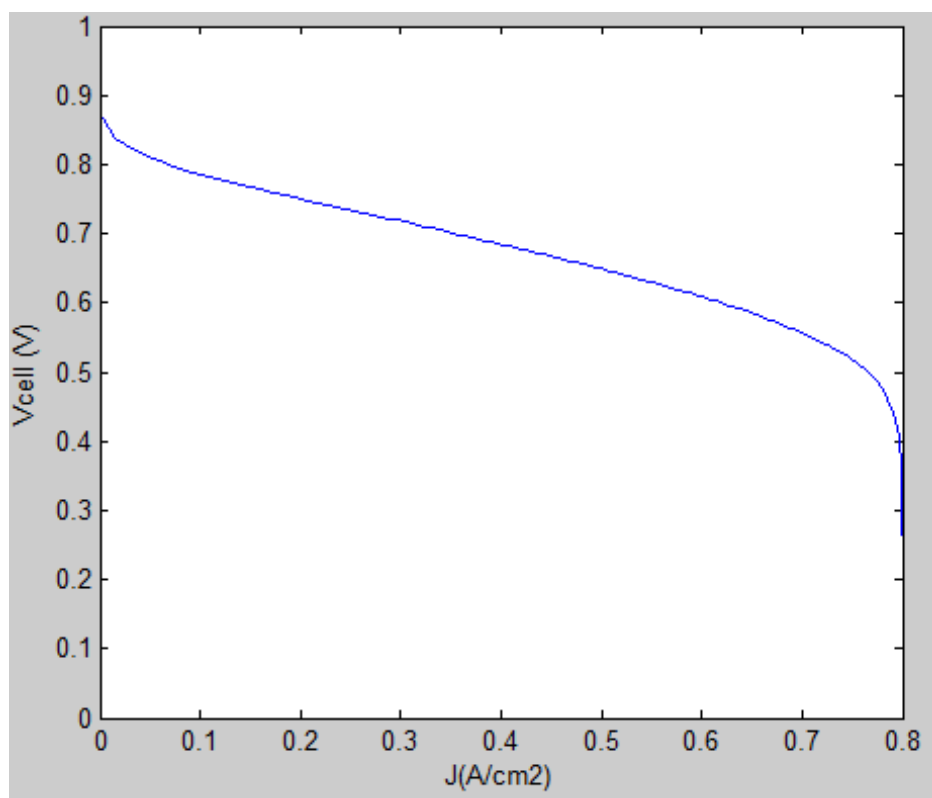
Εικ.3.1 Χαρακτηριστική καμπύλη $V-I$ κυψέλης PEMFC.



Η καμπύλη $V-I$ έχει την προσδωκόμενη μορφή, αναπαριστώντας τη μείωση της τάσης της κυψέλης ανάλογα με την αύξηση του ρεύματος, παρουσιάζοντας έτσι την επίδραση των διάφορων μη αντιστρεπτών φαινομένων που προκαλούν απώλειες στην τάση εξόδου.

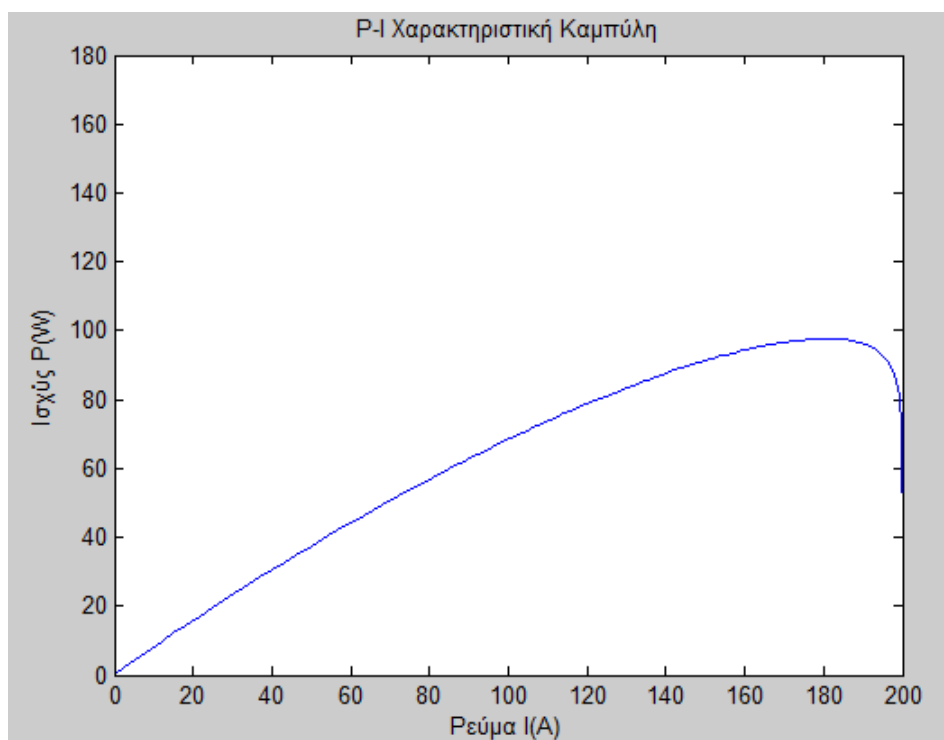
Η μεταβολή της τάσης ως προς την πυκνότητα του ρεύματος έχει την ακόλουθη μορφή:

Εικ.3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη V-J κυψέλης PEMFC.



Η χαρακτηριστική καμπύλη P-I κατασκευάζεται βάσει της σχέσης $P = V * I$ και αναπαριστά γραφικά την ισχύ εξόδου σε συνάρτηση με το ρεύμα, η μεταβολή της οποίας έχει ως εξής:

Εικ.3.3 Χαρακτηριστική καμπύλη P-I κυψέλης PEMFC.



Χαρακτηριστικό της καμπύλης P-I είναι η απότομη μείωση της ισχύος εξαιτίας της υψηλής πτώσης της τάσης οπότε και προτιμάται η λειτουργία κοντά στο μέγιστο της καμπύλης αυτής.

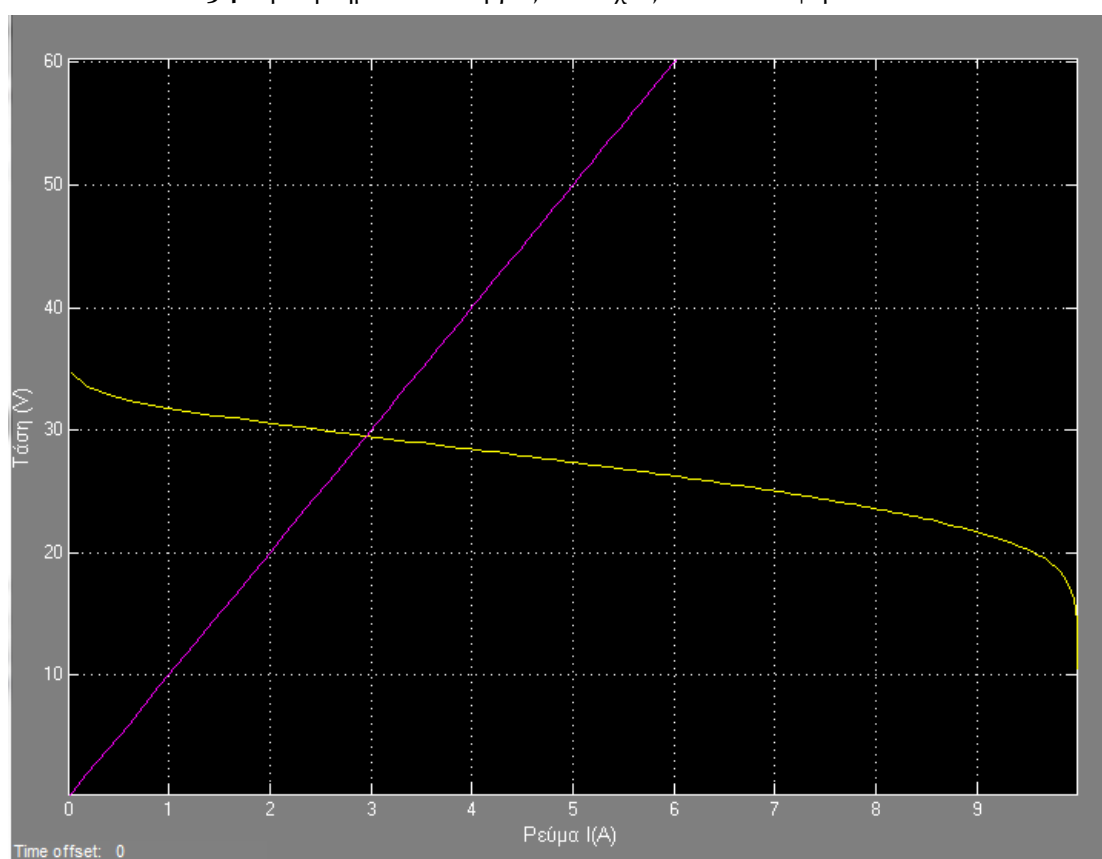
Εύρεση Σημείου Λειτουργίας κατά τη σύνδεση με Φορτίο R

Για τον προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας της κυψέλης υπό φορτίο R, είναι δυνατή η χρήση του νόμου του Οhm ώστε να σχεδιαστεί η ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και τέμνει την καμπύλη πόλωσης V-I στο σημείο λειτουργίας:

$$\frac{V}{I} = R = \tan\theta \Rightarrow V = R * I$$

Σχεδιάζοντας την ανωτέρω ευθεία για ορισμένη τιμή του φορτίου R προσδιορίζεται γραφικά το σημείο λειτουργίας της κυψέλης από την τομή της καμπύλης πόλωσης με την ευθεία αυτή. Για παράδειγμα, στην περίπτωση σύνδεσης της συστοιχίας με σταθερό φορτίο $R = 10 \Omega$ το σημείο λειτουργίας αποτελεί το σημείο τομής της ευθείας $y = 10x$ με την χαρακτηριστική καμπύλη V-I, όπως φαίνεται παρακάτω:

Εικ.3.4 Εύρεση Σημείου Λειτουργίας Συστοιχίας PEMFC υπό φορτίο 10Ω .



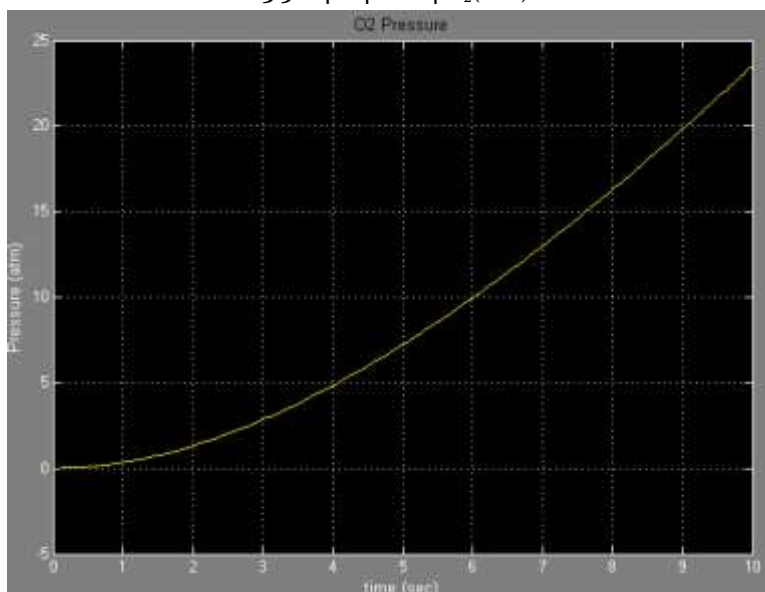
Όπως είναι εμφανές, το ζεύγος τιμών 2,9537 A και 29,537V αποτελεί το σημείο λειτουργίας της συστοιχίας υπό φορτίο $R = 10 \Omega$.

Μερικές Πιέσεις

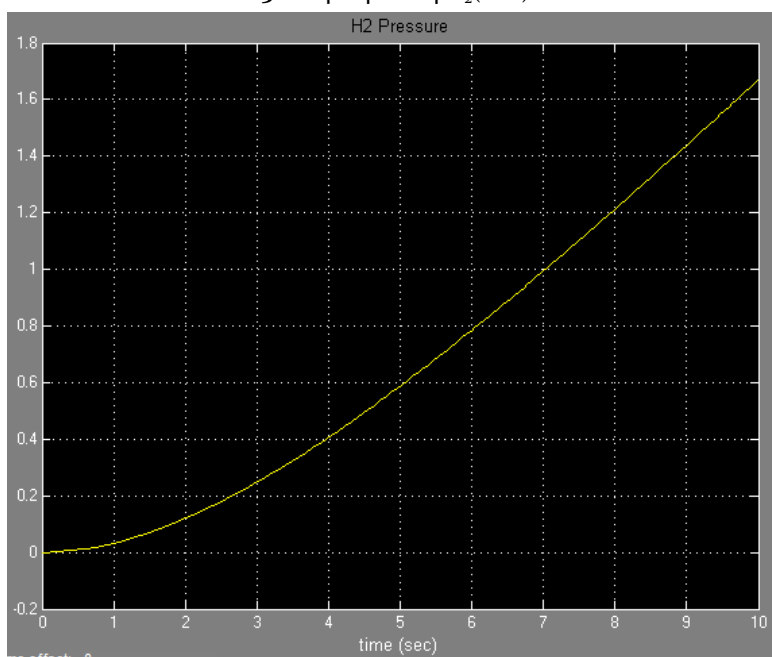
Στην παράγραφο αυτή εμφανίζονται οι μερικές πιέσεις των συμμετεχόντων αερίων θεωρώντας σταθερές τις εισερχόμενες ποσότητες των αντιδρώντων προς παραγωγή νερού και αξιοποιήσιμης ηλεκτρικής ισχύος.

Γενικά, ο ρυθμός κατανάλωσης των αντιδρώντων αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συγκέντρωση των αερίων στην κυψέλη που οδηγεί στην παραγωγή καθαρού νερού και ενέργειας. Τα διαγράμματα των μερικών πιέσεων παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω:

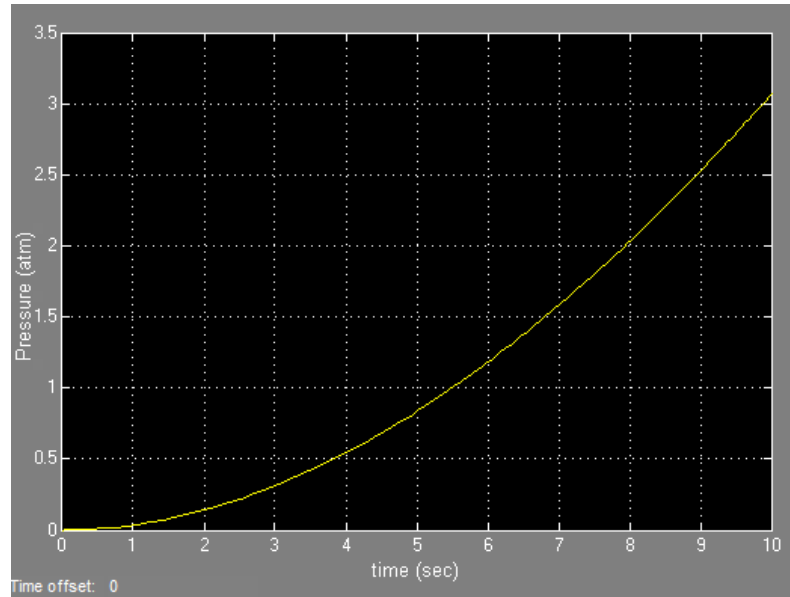
Εικ.3.5 Μερική Πίεση O_2 (atm)



Εικ.3.6 Μερική Πίεση H_2 (atm)



Εικ.3.7 Μερική Πίεση H₂O(atm)



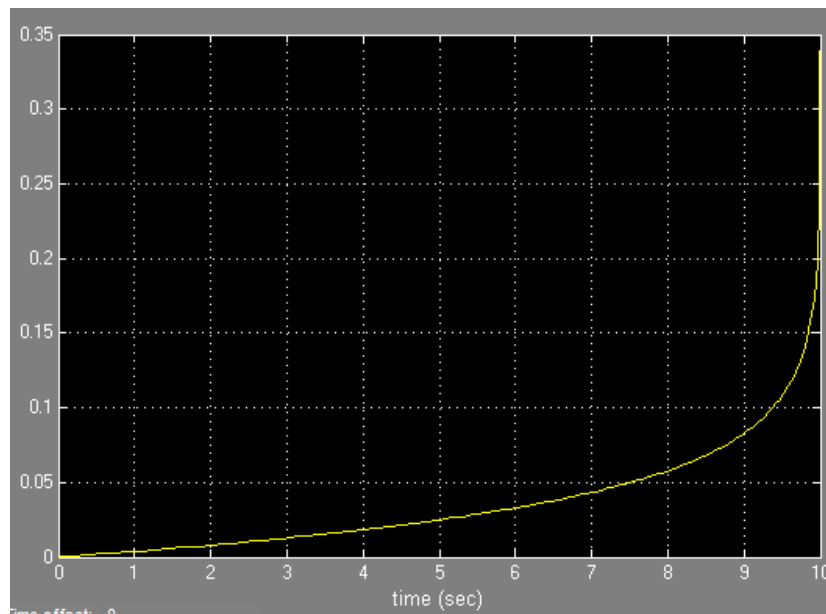
Απώλειες Τάσης

Ο υπολογισμός των απωλειών τάσης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης εμφανίζονται μεμονωμένα για κάθε τύπο απωλειών, όπως αναπτύχθηκαν στα αντίστοιχα υποσυστήματα του μοντέλου. Η αφαίρεση του συνόλου των απωλειών αυτών από την τάση Nernst διαμορφώνει την τάση εξόδου της κυψέλης όπως εμφανίστηκε προηγουμένως.

Απώλειες Συγκέντρωσης

Οι απώλειες συγκέντρωσης σχετίζονται με τη μεταφορά μάζας εντός της κυψέλης καθορίζοντας ως ένα βαθμό την ταχύτητα διεξαγωγής της χημικής αντίδρασης. Κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης σύμφωνα με όσα εμφανίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα, παρατηρείται αύξηση των απωλειών αυτών, οι οποίες όμως διατηρούνται σε γενικά χαμηλές τιμές χωρίς να παρουσιάζονται προβλήματα κατά τη λειτουργία της διάταξης.

Εικ.3.8 Εξέλιξη Απώλειών Συγκέντρωσης V_{con} (V) με την πάροδο του χρόνου.

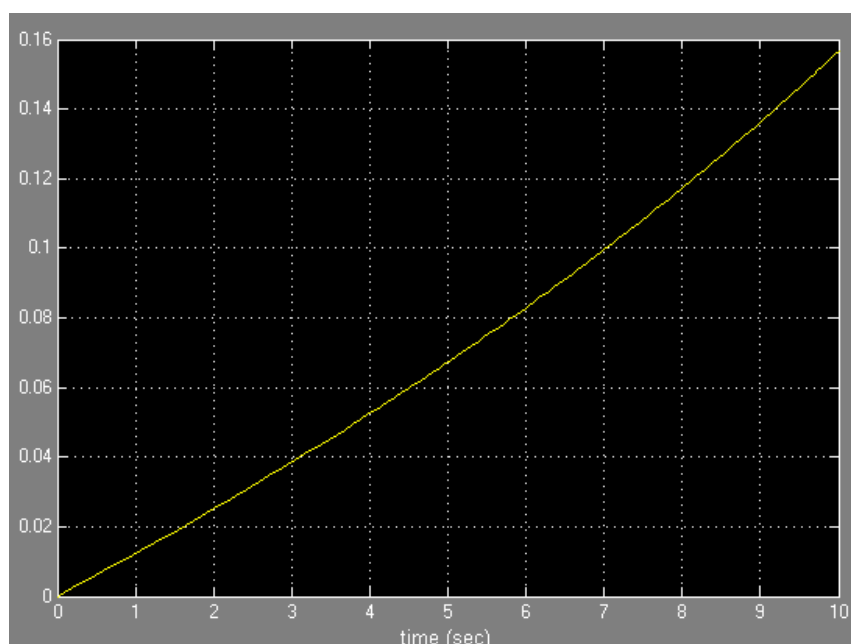


Για περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης της διάταξης είναι δυνατή η χρήση ελεγκτή καυσίμου αντί να θεωρηθεί σταθερή η εισερχόμενη ποσότητα των αντιδρώντων ώστε να καθορίζεται με ακρίβεια η μεταφορά της μάζας των συμμετεχόντων αερίων προς περιορισμό των απωλειών συγκέντρωσης.

Ωμικές Απώλειες

Οι ωμικές απώλειες ευθύνονται για την αντίσταση που αναπτύσσεται στη ροή των ιόντων και των ηλεκτρονίων προκαλώντας πτώση στην τάση της διάταξης. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης οι απώλειες αυτές αυξάνονται γρήγορα συναρτήσει του χρόνου, όπως παρατηρείται στο διάγραμμα που ακολουθεί.

Εικ.3.9 Εξέλιξη Ωμικών Απωλειών V_{ohm} (V) με την πάροδο του χρόνου.

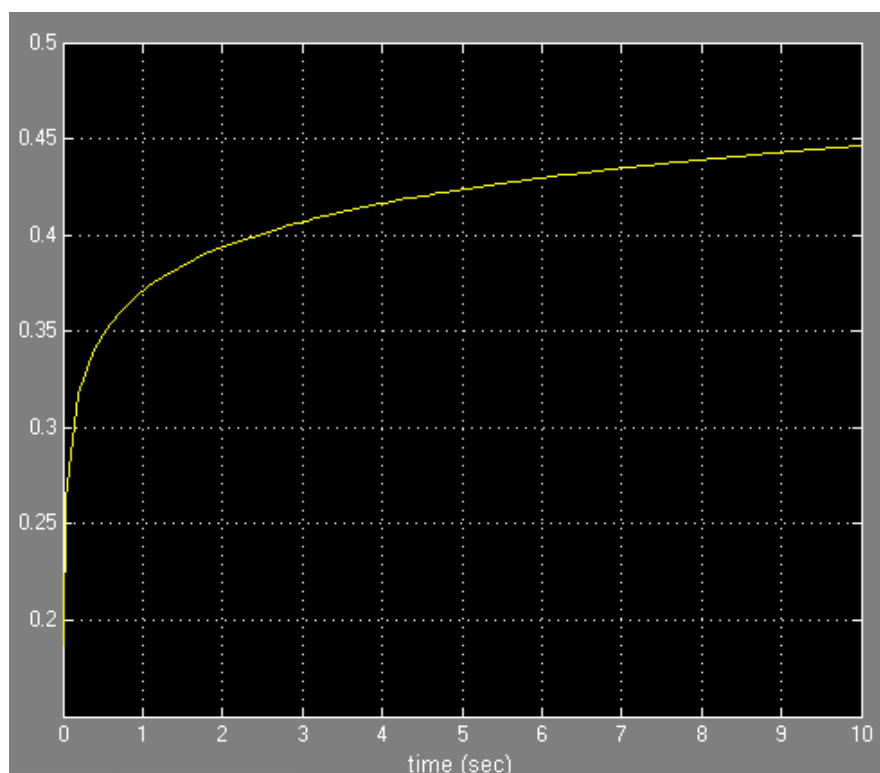


Απώλειες Ενεργοποίησης

Οι απώλειες ενεργοποίησης εξαρτώνται από την πυκνότητα του φορτίου στη διεπαφή ηλεκτροδίου και ηλεκτρολύτη, η οποία καθορίζει την ταχύτητα διεξαγωγής των αντιδράσεων και την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η πυκνότητα του ρεύματος επηρεάζει αρκετά τις απώλειες ενεργοποίησης, των οποίων η μείωση είναι δυνατή με αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος ανταλλαγής και με την επιτάχυνση των χημικών αντιδράσεων που διεξάγονται.

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα, η τιμή των απωλειών αυτών αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, διατηρείται όμως σε σχετικά χαμηλά επίπεδα τιμών, όπως φαίνεται παρακάτω.

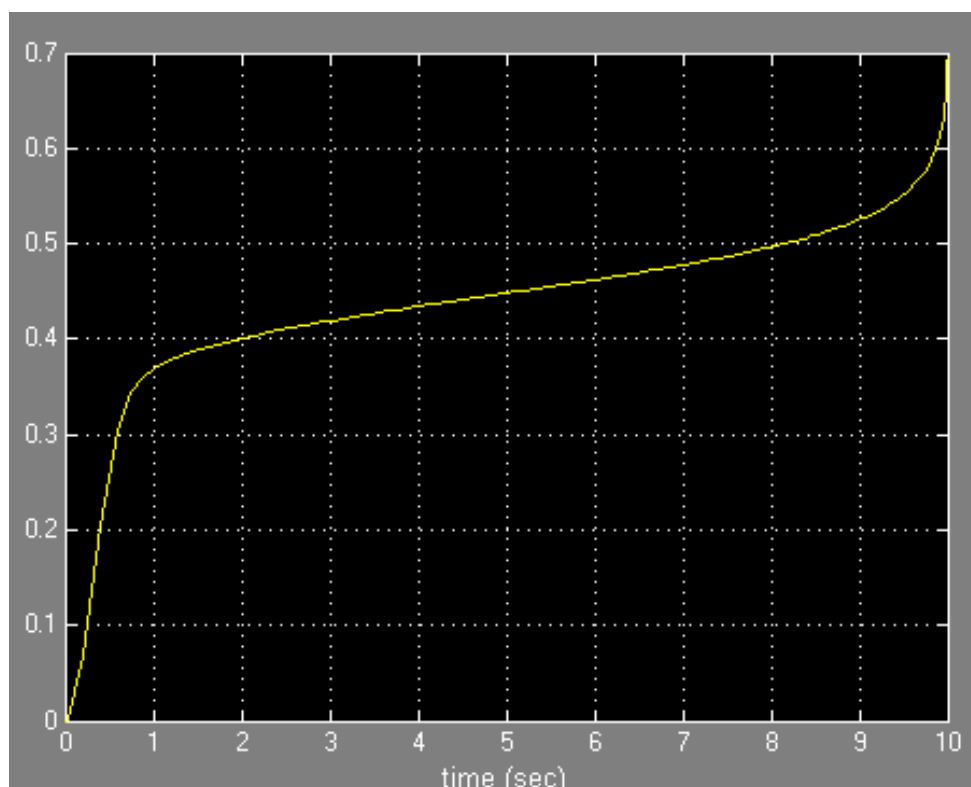
Εικ.3.10 Εξέλιξη Απωλειών Ενεργοποίησης V_{ohm} (V) με την πάροδο του χρόνου.



3.2 Αποτελέσματα Μεταβατικής Συμπεριφοράς Τάσης Εξόδου Κυψέλης PEMFC

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παριστάνονται οι απώλειες ενεργοποίησης λαμβάνοντας υπ' όψιν τη συγκέντρωση φορτίου και ενέργειας στη διεπαφή ηλεκτρολύτη – ηλεκτροδίου, η οποία αποκτά χαρακτηριστικά ηλεκτρικού πυκνωτή. Οι απώλειες αυτές είναι εμφανείς παρακάτω:

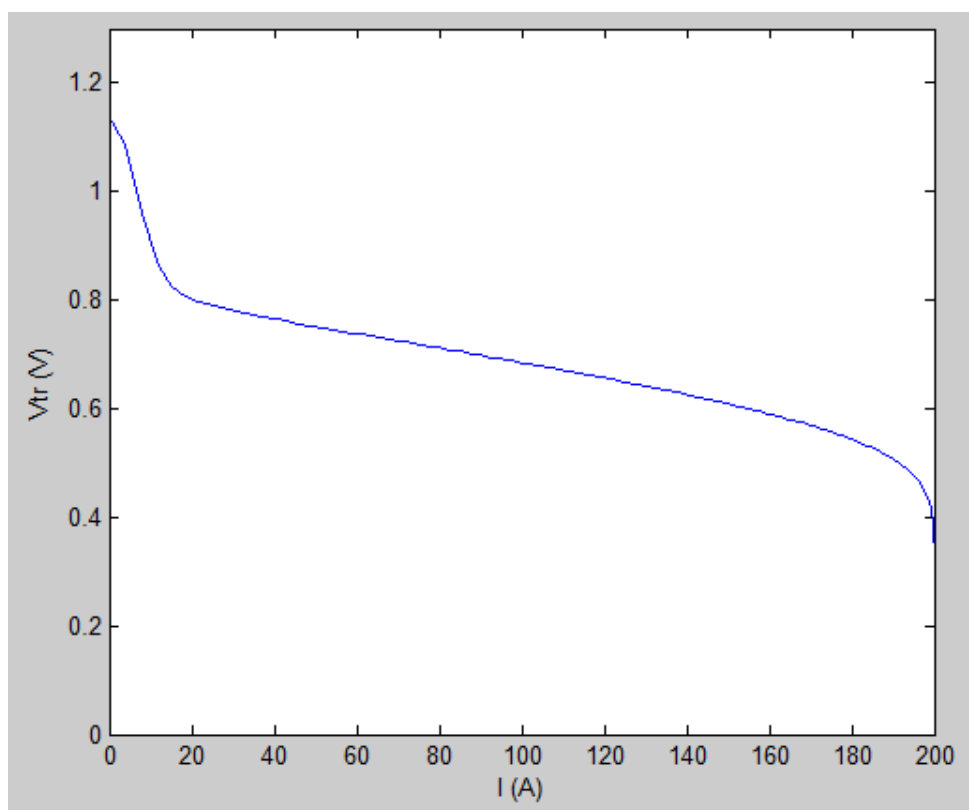
Εικ.3.11 Απώλειες Ενεργοποίησης στη Μεταβατική Κατάσταση.



Γενικά, οι απώλειες ενεργοποίησης στη μεταβατική κατάσταση καθυστερούν τη διεξαγωγή των χημικών αντιδράσεων.

Η καμπύλη πόλωσης V-I διαμορφώνεται συνεπώς ως εξής:

Εικ.3.12 Διάγραμμα V-I στη Μεταβατική Κατάσταση.



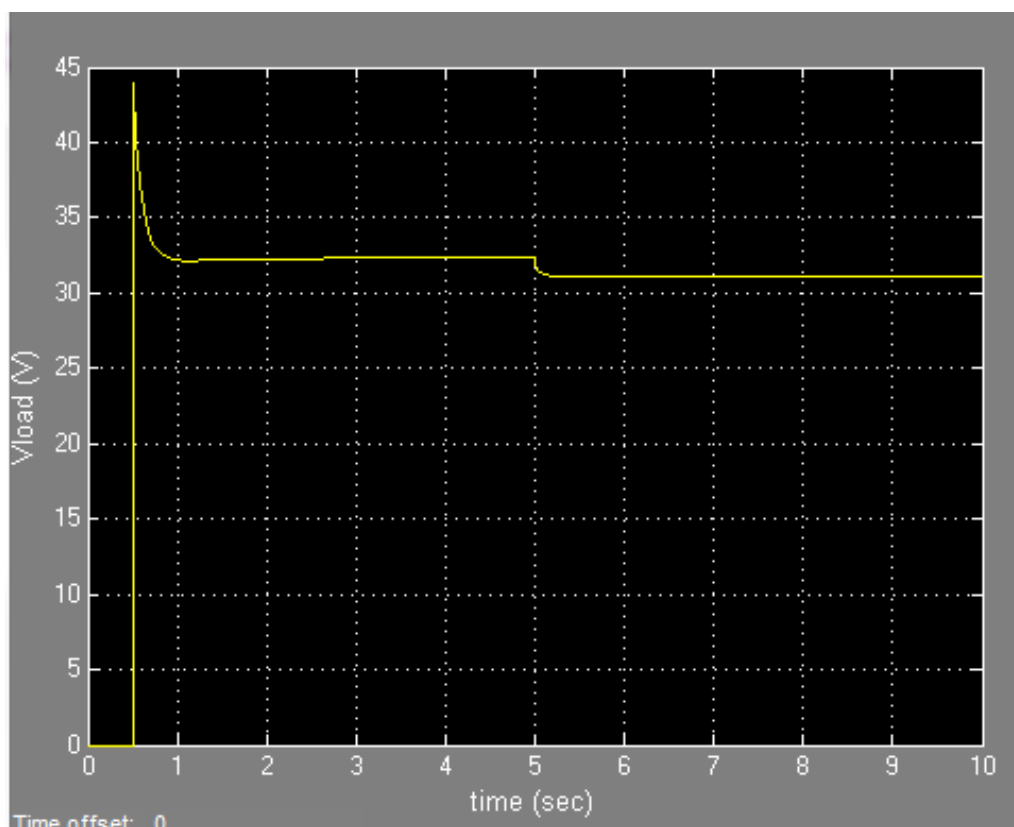
Όπως είναι εμφανές στο ανωτέρω διάγραμμα, στη μεταβατική κατάσταση η μεταβολή της τάσης κατά την ενεργοποίηση αργεί αρκετά να ακολουθήσει τη μεταβολή του ρεύματος, σε σχέση με τη μόνιμη κατάσταση. Αυτό συμβαίνει διότι η μεταβολή στην πτώση της τάσης εξομαλύνεται λόγω της συγκέντρωσης φορτίου και ενέργειας στη διάταξη. Το εν λόγω γεγονός αυξάνει τις απώλειες καθιστώντας αργή την ενεργοποίηση της κυψέλης.

Ωστόσο, η ωμική πτώση της τάσης αλλά και η πτώση λόγω συγκέντρωσης των αντιδρώντων μεταβάλλονται άμεσα, όπως ακριβώς συμβαίνει και για τη μόνιμη κατάσταση.

3.3 Αποτελέσματα Μοντέλου Προσομοίωσης υπό Μεταβαλλόμενο Φορτίο

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η συμπεριφορά του μοντέλου κατά τη σύνδεση της κυψέλης αρχικά με φορτίο $2\ \Omega$ τη χρονική στιγμή των $0.5\ \text{sec}$ και έπειτα μεταβάλλοντας την τιμή του φορτίου αυτού με την παράλληλη σύνδεση επιπλέον αντίστασης $2\ \Omega$ την χρονική στιγμή των $5\ \text{sec}$. Επομένως με το κλείσιμο του χρονοδιακόπτη για $t = 5\ \text{sec}$ η συνολική αντίσταση λαμβάνει πλέον την τιμή $R = \frac{2 \cdot 2}{2+2} = 1\ \Omega$. Η συμπεριφορά της τάσης εξόδου κατά τη διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης φαίνεται παρακάτω:

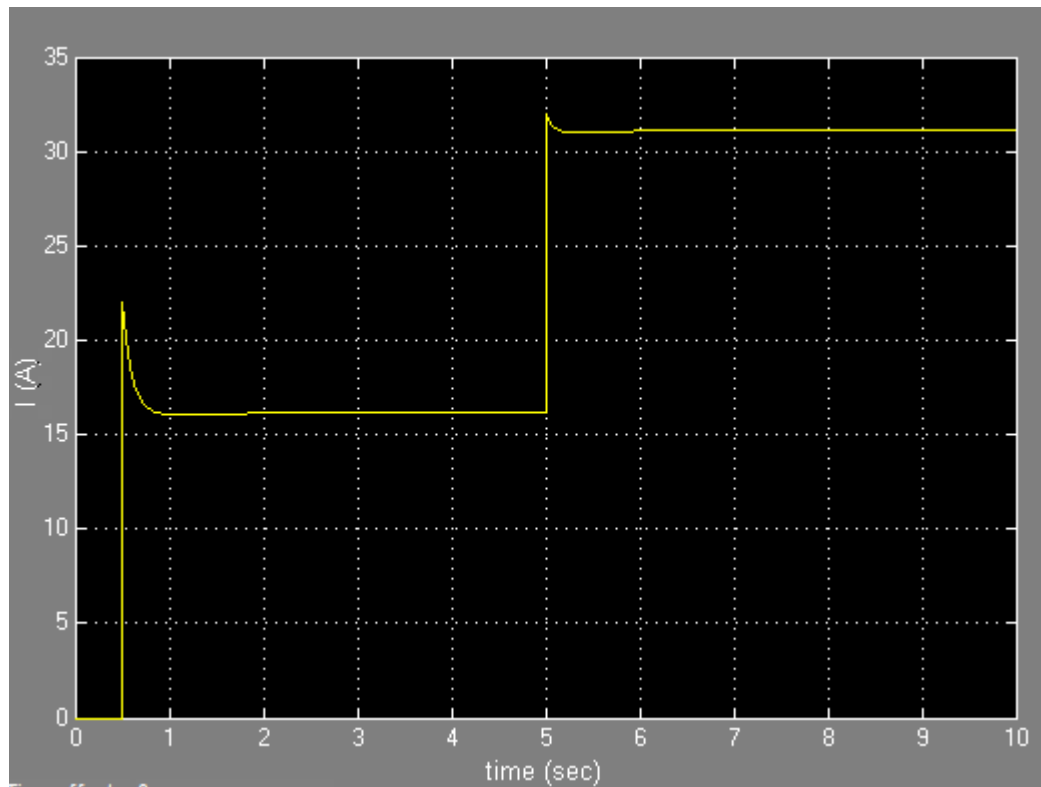
Εικ.3.13 Τάση στα άκρα του διασυνδεδεμένου φορτίου συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης ($t = 10\ \text{sec}$).



Η τάση V_{load} της κυψέλης μειώνεται μέχρι να ισορροπήσει έπειτα από μικρή χρονική καθυστέρηση ορισμένων δέκατων του δευτερολέπτου, αρχικά στην τιμή των 32.26V και έπειτα στην τιμή των 31.12V . Η χρονική αυτή καθυστέρηση καθορίζεται από την τιμή της χωρητικότητας C που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του φαινομένου της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας και εξαρτάται από τα υλικά κατασκευής της κυψέλης.

Αντίστοιχα το ρεύμα που διαρρέει το φορτίο και έπειτα τροφοδοτεί την κυψέλη έχει την ακόλουθη μορφή:

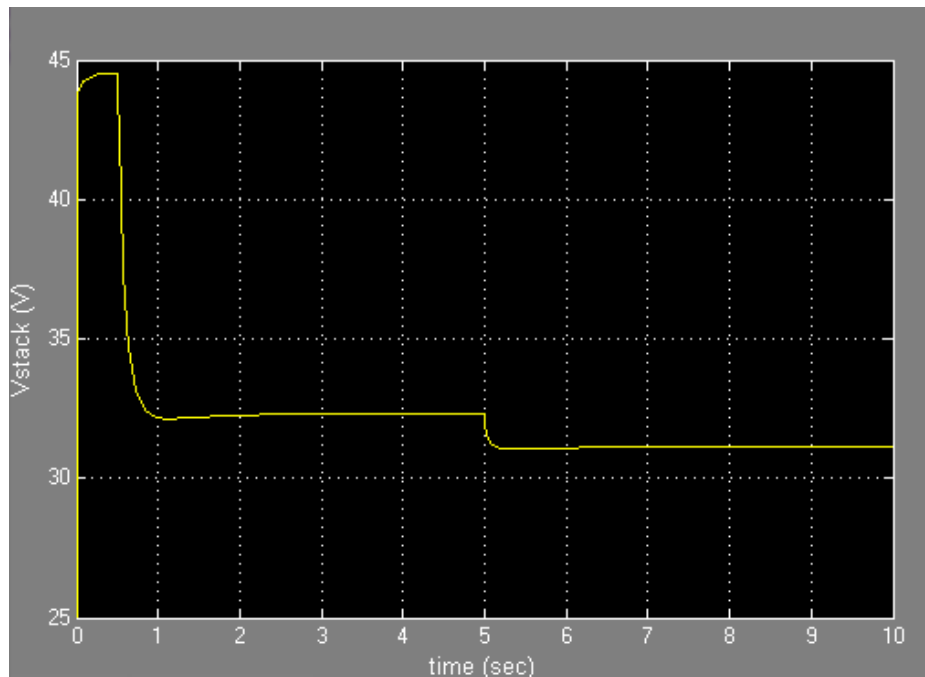
Εικ.3.14 Ρεύμα εξόδου διασυνδεδεμένου φορτίου συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης ($t = 10 \text{ sec}$).



Όπως φαίνεται παραπάνω, το ρεύμα ξεκινά να διαρρέει το φορτίο τη χρονική στιγμή των 0.5sec και μειώνεται έως ότου ισορροπήσει στην τιμή των 16.16A εξαιτίας της αντίστασης των 2Ω που προκαλεί την πτώση αυτή. Για $t = 5 \text{ sec}$ η συνολική αντίσταση λαμβάνει την τιμή του 1Ω και η τιμή του ρεύματος σταθεροποιείται στα 31.11A. Το ρεύμα αυτό δίνεται ως είσοδος στην κυψέλη τροφοδοτώντας τις ανάγκες της κάθε στιγμή.

Η τάση εξόδου της συστοιχίας κυψελών ακολουθεί και αυτή τη μεταβολή του φορτίου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης όπως φαίνεται στο διάγραμμα που βρίσκεται παρακάτω:

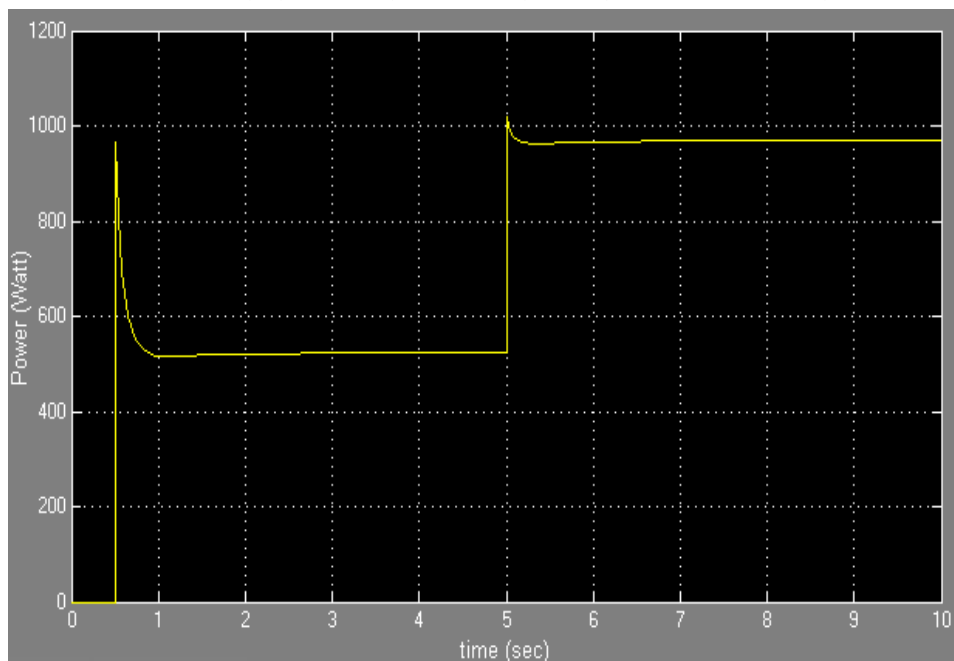
Εικ.3.15 Τάση εξόδου Συστοιχίας συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης ($t = 10 \text{ sec}$).



Όπως παρατηρούμε, η μεταβολή του φορτίου προκαλεί πτώση στην τάση κατά τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές, με την τάση της συστοιχίας να ισορροπεί αρχικά στην τιμή των 32.34V και μετά το κλείσιμο του χρονοδιακόπτη που συνδέει παράλληλα άλλη μια ίδια αντίσταση, η τάση της συστοιχίας σταθεροποιείται στην τιμή των 31.11V.

Αντίστοιχη συμπεριφορά με απότομη πτώση στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές και σταθεροποίηση στην τελική τιμή παρουσιάζει η ισχύς της συστοιχίας που υπολογίζεται από την εξίσωση $P = V * I$ εκφράζοντας την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει το σύστημα.

Εικ.3.16 Παραγώμενη Ισχύς Συστοιχίας συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης ($t = 10 \text{ sec}$).

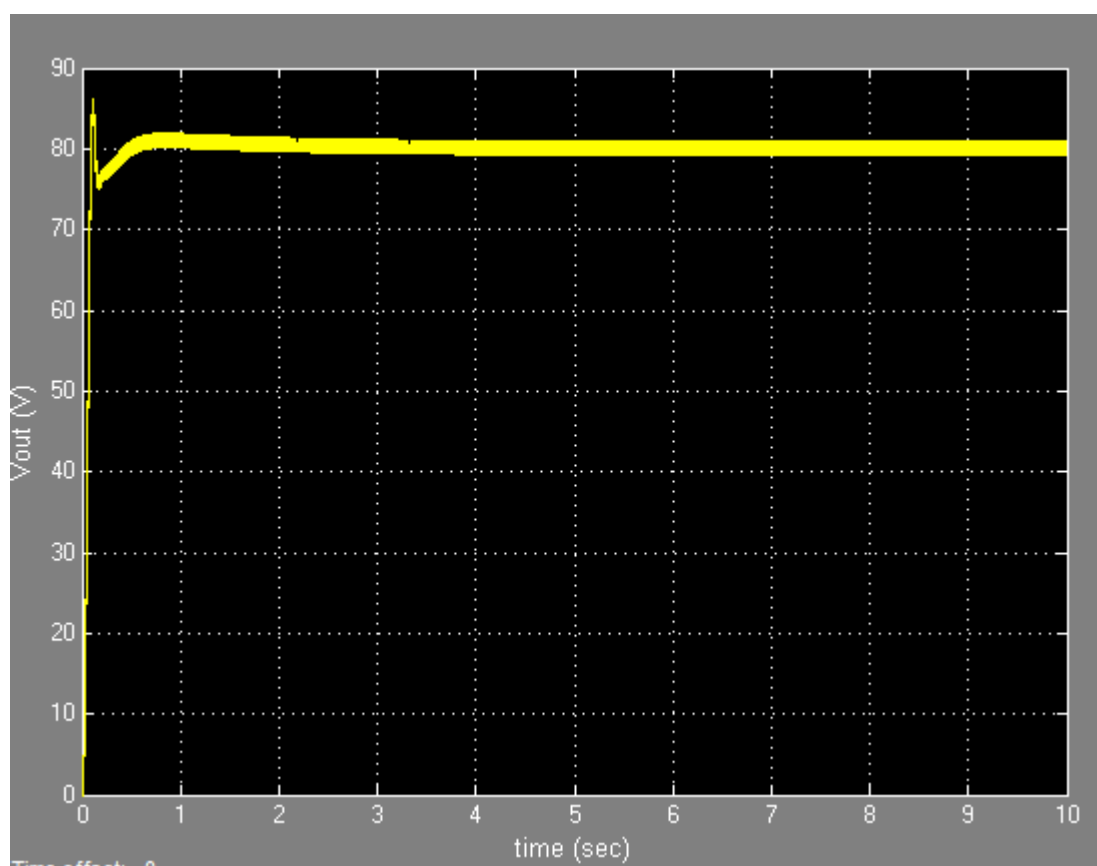


3.4 Αποτελέσματα Μοντέλου DC/DC Μετατροπέα Τάσης

Η λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης αξιολογείται βάσει της ικανότητας του συστήματος να ανυψώνει και να σταθεροποιεί την τάση στην τιμή αναφοράς.

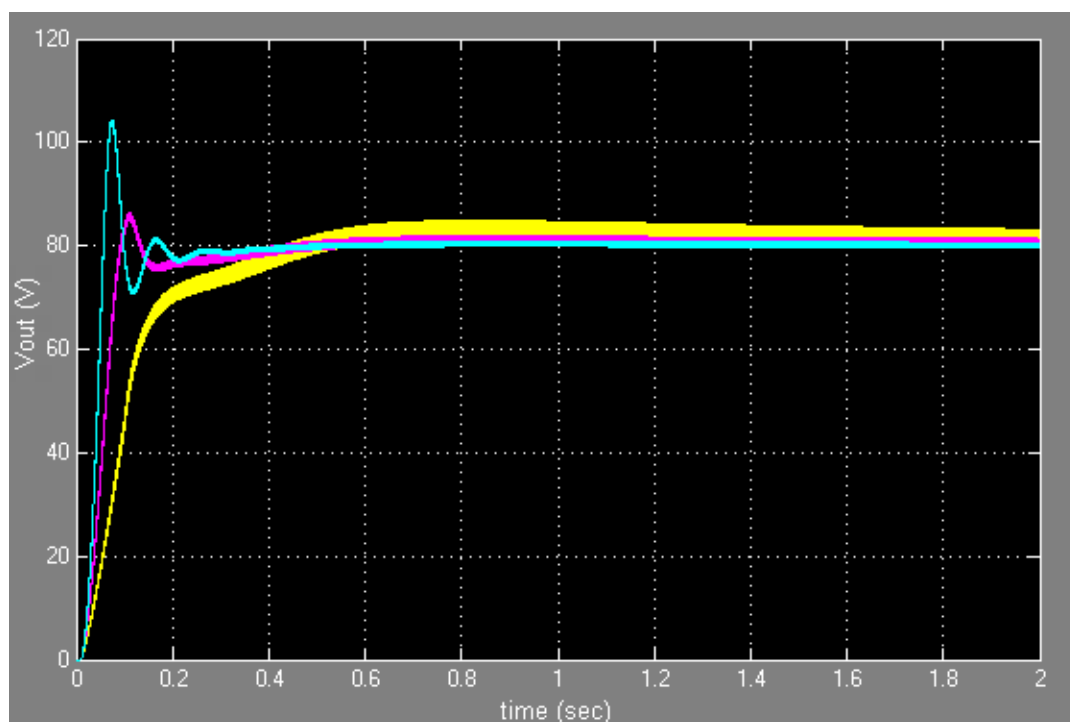
Όπως είναι εμφανές, η τάση εξόδου σταθεροποιείται σχετικά γρήγορα, λαμβάνοντας τιμές που προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα 80V. Κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης παρατηρείται αυξομείωση στην τιμή της τάσης που οφείλεται στο μέγεθος του φορτίου, προτού επέλθει η επιθυμητή ισορροπία γύρω από την τιμή αναφοράς. Ο χρόνος ανύψωσης είναι γρήγορος, γεγονός που οφείλεται στη χρήση του κατάλληλου αναλογικού ελεγκτή κέρδους K_p ωστόσο υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης του κέρδους K_i του ολοκληρωτικού ελεγκτή προκειμένου να εξασφαλιστεί καλύτερη μεταβατική απόκριση χωρίς ταλαντώσεις.

Εικ.3.17 Τάση Εξόδου του DC/DC Μετατροπέα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης ($t = 10 \text{ sec}$).



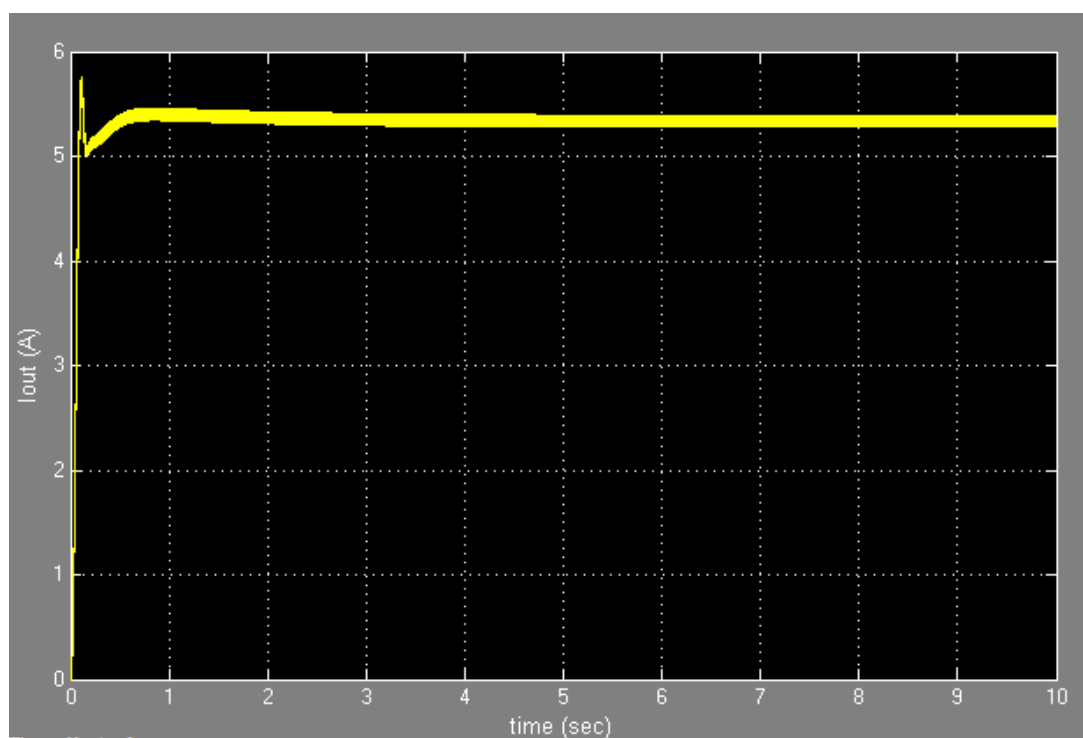
Ενδεικτικά εμφανίζεται παρακάτω η απόκριση του DC/DC μετατροπέα για μεγέθη διασυνδεδεμένων φορτίων στα 30Ω (γαλάζιο), 15Ω (μωβ) και 7.5Ω (κίτρινο). Όπως παρατηρείται, οι ταλαντώσεις κατά την έναρξη της προσομοίωσης αυξάνονται με το μέγεθος του φορτίου.

Εικ.3.18 Τάση Εξόδου του DC/DC Μετατροπέα για διάφορες τιμές διασυνδεδεμένου φορτίου.



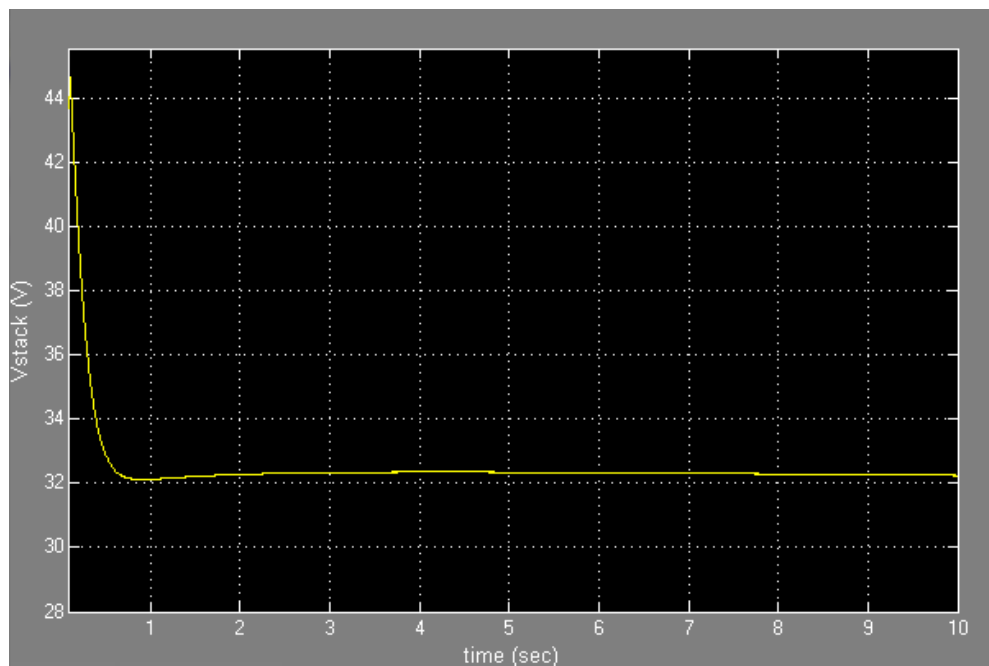
Το ρεύμα εξόδου του DC/DC μετατροπέα συμπεριφέρεται με τρόπο όμοιο της τάσης εξόδου. Η τιμή του ρεύματος εξόδου σταθεροποιείται σε ένα εύρος τιμών κοντά στα 5.37 A.

Εικ.3.19 Ρεύμα Εξόδου Μετατροπέα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης ($t = 10 \text{ sec}$).

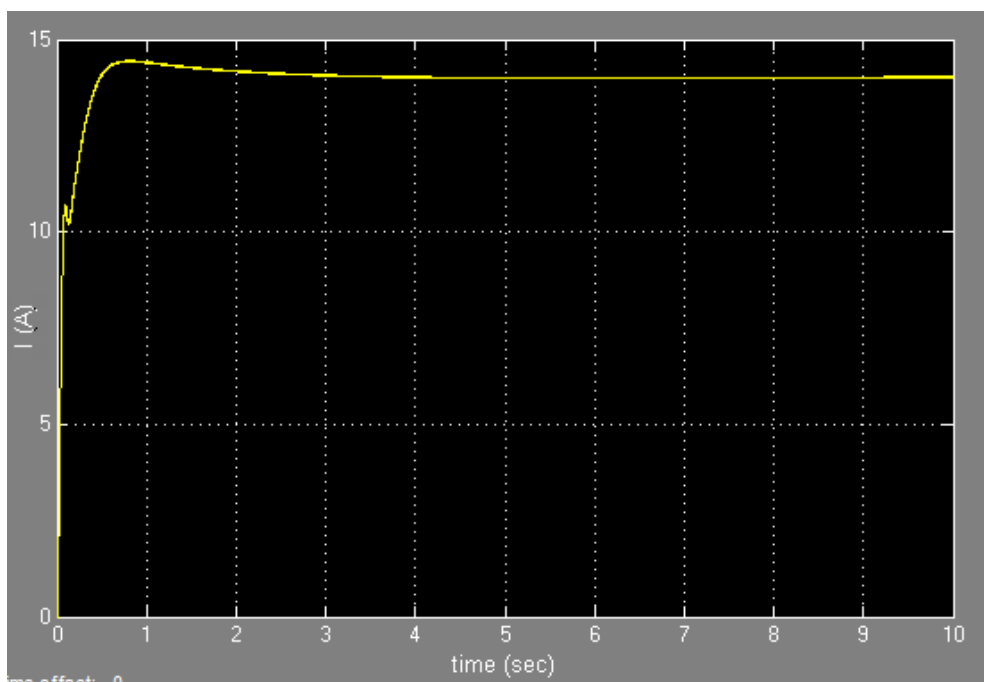


Η τάση και το ρεύμα της συστοιχίας εμφανίζονται στα ακόλουθα διαγράμματα. Η τιμή της τάσης εμφανίζει πτώση και λαμβάνει τελική τιμή κοντά στα 32.28V ενώ αντίστοιχα το ρεύμα σταθεροποιείται στα 14.18 A. Η τιμή του ρεύματος της συστοιχίας είναι σαφέστερα μεγαλύτερη του ρεύματος εξόδου εξαιτίας της ανύψωσης της τάσης στην έξοδο.

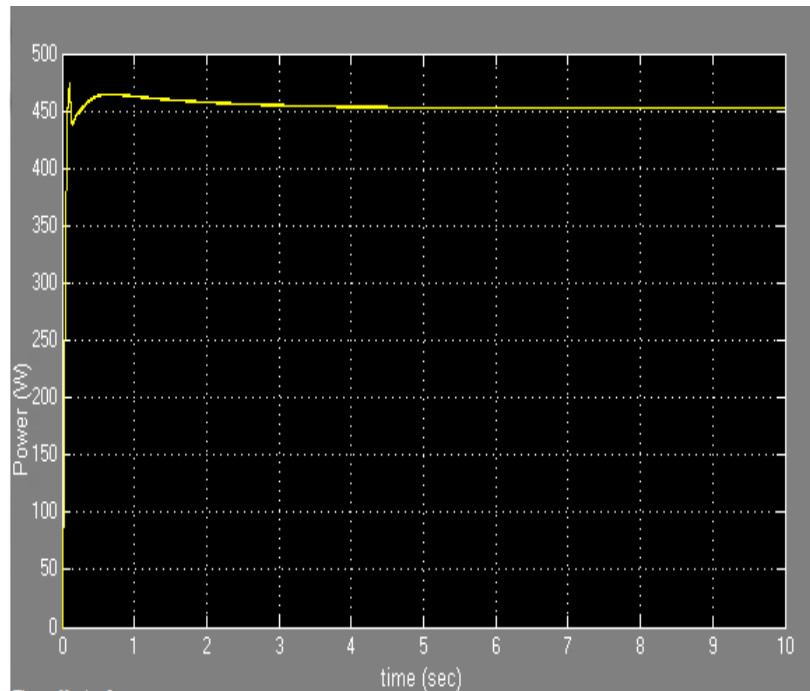
Εικ.3.20 Τάση Συστοιχίας συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης ($t = 10 \text{ sec}$).



Εικ.3.21 Ρεύμα Συστοιχίας συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης ($t = 10 \text{ sec}$).



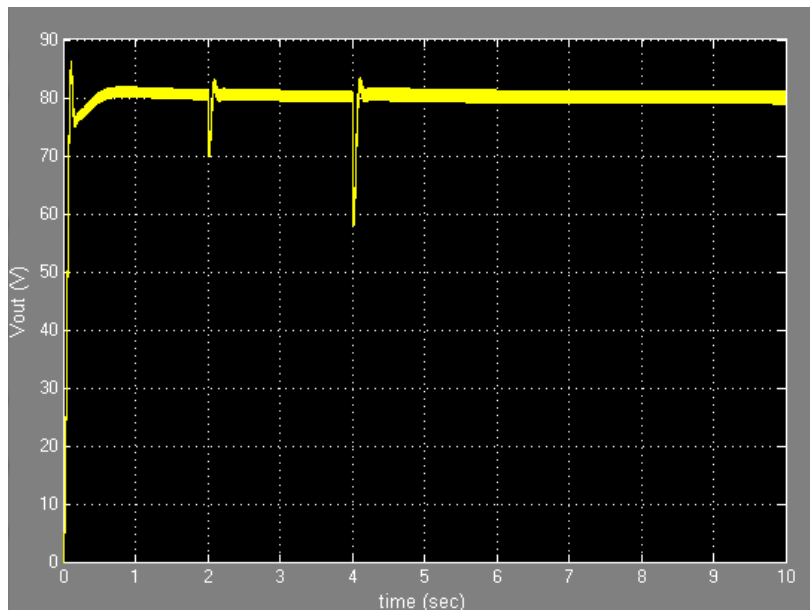
Εικ.3.22 Ισχύς Συστοιχίας συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης ($t = 10 \text{ sec}$)



Προσομοίωση Συστήματος Κυψέλης -DC/DC Μετατροπέα Ανύψωσης υπό Μεταβαλλόμενο Φορτίο

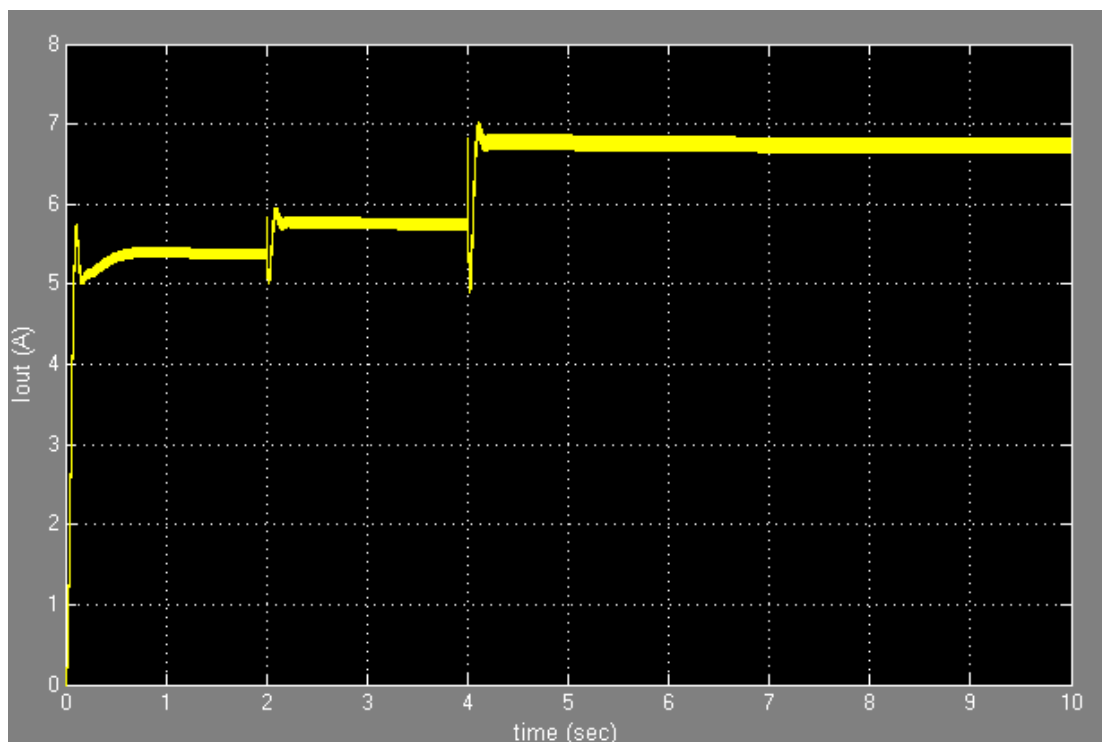
Το φορτίο των 15Ω της διάταξης μεταβάλλεται καθώς πραγματοποιείται παράλληλη σύνδεση αντιστάσεων τις χρονικές στιγμές 2 sec και 4 sec . Η συνολική τιμή της αντίστασης μετά τα 2 πρώτα δευτερόλεπτα λαμβάνει την τιμή των 13.95Ω και μετά τα 4 sec την τιμή των 11.88Ω . Οι μεταβολές αυτές στο φορτίο μειώνουν απότομα την τιμή της τάσης, η οποία στη συνέχεια σταθεροποιείται άμεσα στην τιμή αναφοράς.

Εικ.3.23 Τάση Εξόδου DC/DC Μετατροπέα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης ($t = 10 \text{ sec}$).



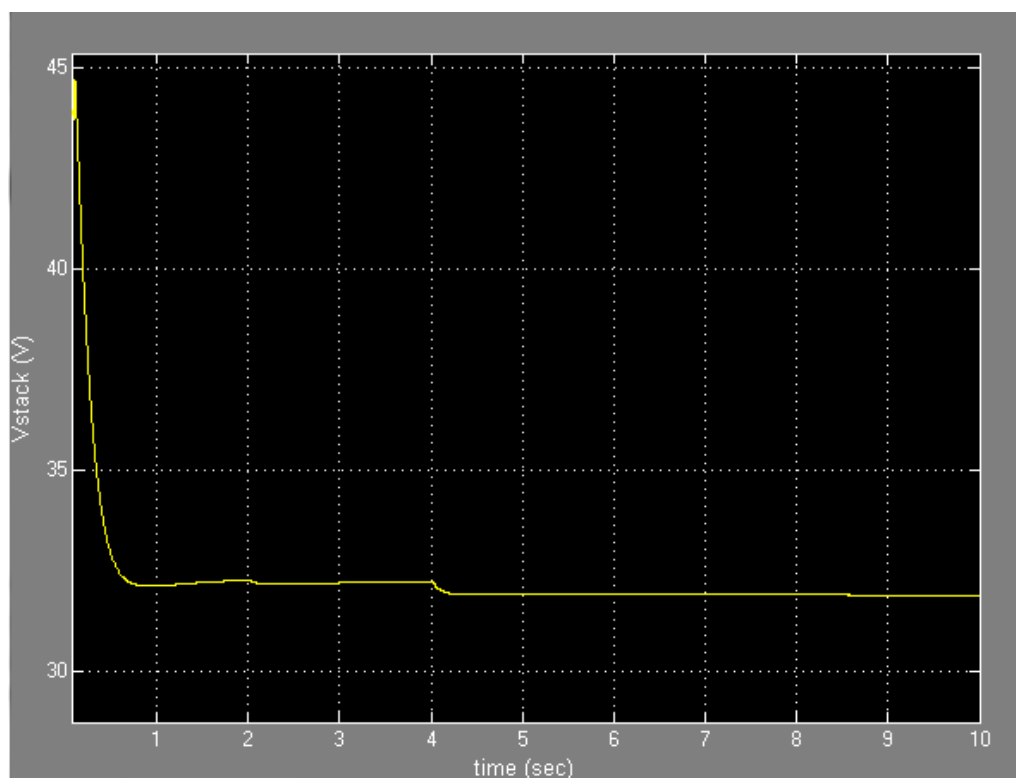
Η επίδραση της αλλαγής του φορτίου στο ρεύμα εξόδου του DC/DC μετατροπέα είναι αντίστοιχη με την επίδραση που έχει στο διάγραμμα της τάσης εξόδου. Η τιμή του ρεύματος ανεβαίνει προοδευτικά μετά από κάθε πτώση που οφείλεται στη μεταβολή του φορτίου έως ότου σταθεροποιηθεί στα 6.85 A.

Εικ.3.24 Ρεύμα Εξόδου DC/DC Μετατροπέα συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης ($t = 10 \text{ sec}$).

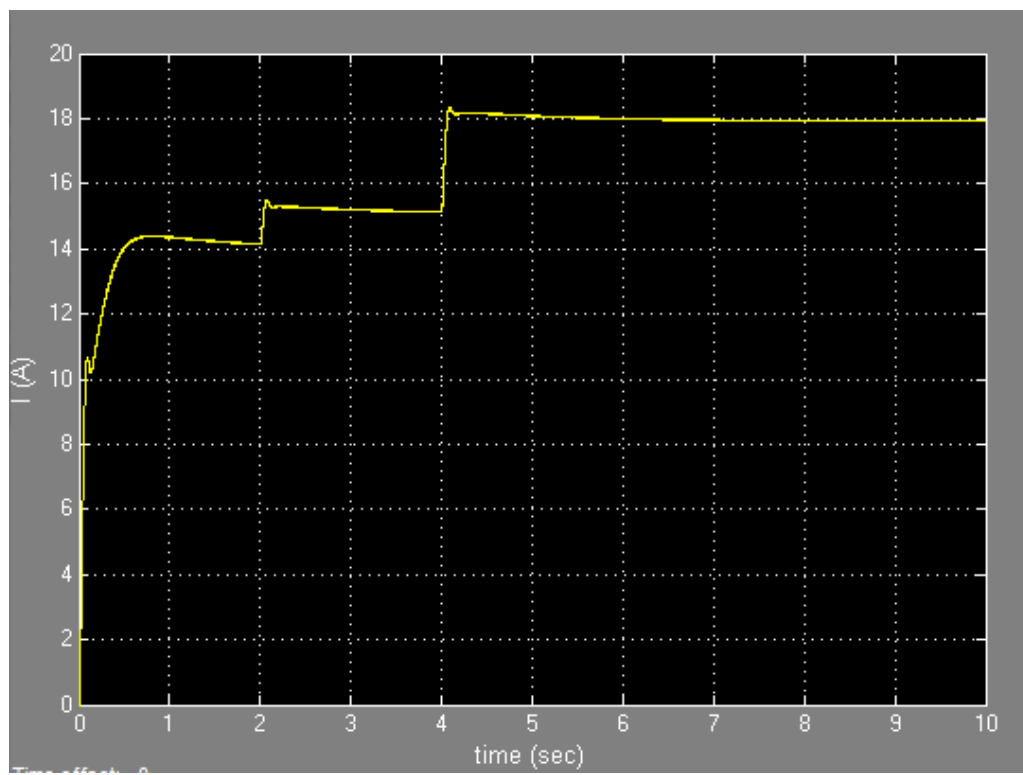


Οι μεταβολές στην τιμή της τάσης και του ρεύματος της συστοιχίας λόγω της απότομης αλλαγής του φορτίου εμφανίζονται στα ακόλουθα διαγράμματα. Η πτώση της τάσης και η προοδευτική αύξηση στην τιμή του ρεύματος αντιστοιχούν στις μεταβολές των μεγεθών εξόδου του DC/DC μετατροπέα. Στο τέλος της προσομοίωσης η τιμή της τάσης βρίσκεται κοντά στα 31.94V ενώ η τελική τιμή του ρεύματος σταθεροποιείται κοντά στα 18A.

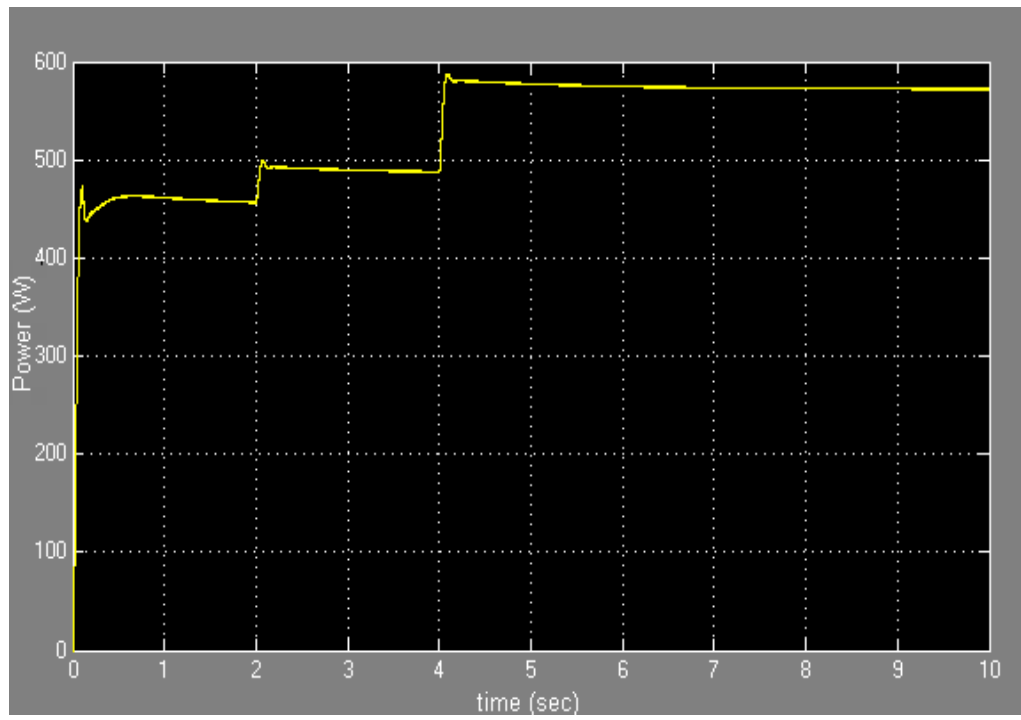
Εικ.3.25 Τάση Συστοιχίας συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης ($t = 10 \text{ sec}$).



Εικ.3.26 Ρεύμα Συστοιχίας συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης ($t = 10 \text{ sec}$)



Εικ.3.27 Ισχύς Συστοιχίας συναρτήσει του χρόνου προσομοίωσης ($t = 10 \text{ sec}$)



3.5 Γενικά Συμπεράσματα

Το μοντέλο περιγράφει ικανοποιητικά το σύστημα της κυψέλης PEMFC – DC/DC Μετατροπέα Τάσης, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να αξιοποιηθεί εφεδρικά για μεσαίες είτε μικρές εφαρμογές ισχύος.

Η απόκριση του συστήματος στις αλλαγές του φορτίου είναι αρκετά γρήγορη ενώ για τον περιορισμό των απωλειών ενδείκνυται η χρήση κατάλληλου ελεγκτή ώστε να ρυθμίζεται η ποσότητα του εισερχόμενου καυσίμου με επιθυμητό τρόπο.

Η απόδοση της κυψέλης PEMFC μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τον ακόλουθο τύπο, λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της τάσης της συστοιχίας κατά τη λειτουργία του συστήματος της κυψέλης PEMFC- DC/DC Μετατροπέα Τάσης. Διαιρώντας την τάση αυτή με τον αριθμό των κυψελών που απαρτίζουν τη συστοιχία λαμβάνεται η τάση κάθε κυψέλης. Επειδή η τάση της συστοιχίας κυμαίνεται κοντά στα 32V είτε το σύστημα συνδέεται με μεταβαλλόμενο φορτίο είτε όχι, θεωρούμε ότι η τιμή αυτή προσεγγίζει αρκετά καλά το αποτέλεσμα σε κάθε περίπτωση.

Επομένως η απόδοση της κυψέλης προσεγγίζεται ως εξής:

$$\eta = 0.83 \frac{V_{cell}}{V_{ideal}} = 0.83 \frac{V_{cell}}{1.229} = 0.675 V_{cell} = 0.675 \frac{32}{40} = 54\%$$

Η απόδοση της κυψέλης και επομένως της συστοιχίας μπορεί να χαρακτηριστεί εξαιρετικά ικανοποιητική ώστε η λειτουργία του συστήματος σύμφωνα με την παραγώμενη ισχύ να ανταποκρίνεται στις προσδοκίες εφαρμογών μικρής ισχύος όπως η τροφοδοσία σταθερών μονάδων Η/Υ.

Τέλος, η τάση και το ρεύμα εξόδου του συστήματος μπορούν να αξιοποιηθούν από το υπάρχον δίκτυο εφόσον το συνεχές ρεύμα μετατραπεί σε εναλλασσόμενο με τη χρήση του κατάλληλου DC/AC μετατροπέα.

4. Προσομοίωση Συστήματος Κυψέλης Καυσίμου PEMFC– Ηλεκτρικού Οχήματος

Εισαγωγή Κεφαλαίου

Η ανάπτυξη μοντέλου λειτουργίας ηλεκτρικού οχήματος στοχεύει σε πολλαπλού επιπέδου προσομοίωση στηριζόμενη στις βιβλιοθήκες SimPowerSystems και SimDrive του Matlab ώστε να περιγραφεί κατάλληλα η δυναμική του οχήματος.

Το σύστημα PEMFC – DC/DC Μετατροπέα όπως μοντελοποιήθηκε συγκαταλέγεται στο ηλεκτρικό υποσύστημα του μοντέλου του οχήματος που αναπτύσσεται στο κεφάλαιο αυτό προκειμένου να τροφοδοτεί τον ηλεκτρικό κινητήρα με την απαιτούμενη ενέργεια για την κίνηση του οχήματος.

Στόχος της εφαρμογής αυτής είναι η αξιολόγηση της λειτουργίας του ηλεκτρικού οχήματος αλλάζοντας ορισμένες παραμέτρους του συστήματος κυψέλης PEMFC – DC/DC Μετατροπέα Τάσης ώστε η αλληλεπίδραση των υποσυστημάτων του μοντέλου του οχήματος να παρέχει πληροφορίες για τη δυναμική και τον καθορισμό της ταχύτητας του σε ορισμένα επίπεδα.

Στο τέλος του κεφαλαίου αναλύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αξιολογώντας τη λειτουργία του μοντέλου σε σχέση με τις επιδόσεις του οχήματος και προτείνονται βελτιώσεις με σκοπό την αύξηση της απόδοσης του ηλεκτρικού κινητήρα.

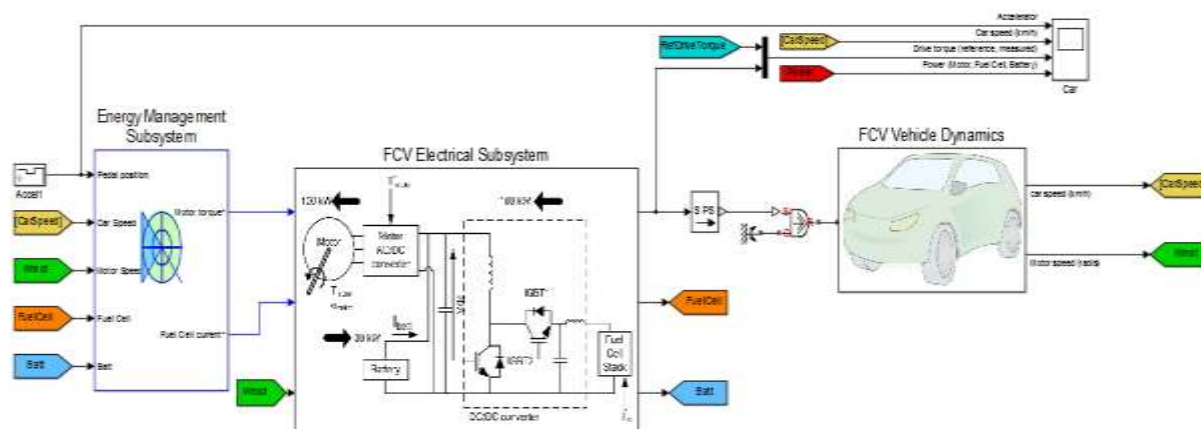


4.1 Παρουσίαση Μοντέλου Ηλεκτρικού Οχήματος

Το μοντέλο *Power_FCV_Powertrain* του οχήματος χρησιμοποιεί υδρογόνο ως καύσιμο παράγοντας ηλεκτρική ισχύ από μια συστοιχία κυψελών τύπου PEMFC που τροφοδοτεί έναν ηλεκτρικό κινητήρα για την οδήγηση του οχήματος. Μοναδική εκπομπή της εξάτμισης αποτελεί το νερό σε μορφή υδρατμών.

Τα κύρια μέρη του μοντέλου λειτουργίας διακρίνονται στο υποσύστημα διαχείρισης της ενέργειας, στο ηλεκτρικό υποσύστημα και στο υποσύστημα δυναμικής του οχήματος, όπως φαίνονται παρακάτω.

Εικ.4.1 Μοντέλο *Power_FCV_Powertrain* Ηλεκτρικού Οχήματος με τη χρήση συστοιχίας κυψελών PEMFC.



4.1.1 Υποσύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management Subsystem)

Η θέση του πεντάλ του γκαζιού καθορίζει τα σήματα αναφοράς που λαμβάνει ο ηλεκτρικός κινητήρας, η συστοιχία κυψελών PEMFC, η μπαταρία ιόντων λιθίου και ο DC/DC Μετατροπέας του ηλεκτρικού υποσυστήματος.

Ανάλογα με την τιμή πρόωσης είτε πέδησης που τίθεται από τον οδηγό ελέγχεται η ισχύς του κινητήρα ώστε η φόρτιση της μπαταρίας να διατηρείται μεταξύ 40 – 80 % και το όχημα να ανταποκρίνεται κατάλληλα στις αλλαγές της ταχύτητας. Η αρνητική τιμή στη θέση του πεντάλ αντιπροσωπεύει θετική τιμή πέδησης που αναγκάζει το όχημα να επιβραδύνει. Οι τιμές του πεντάλ και οι αντίστοιχες χρονικές στιγμές όπως δόθηκαν για διάστημα προσομοίωσης στα 30 sec φαίνονται παρακάτω.

Θέση πεντάλ Γκαζιού	Χρονική Στιγμή (sec)
0.5	0
0.25	4
0	8
-0.1	12
0	18
-0.1	20
0	25

4.1.2 Ηλεκτρικό Υποσύστημα Οχήματος (FCV Electrical Subsystem)

Το ηλεκτρικό υποσύστημα του οχήματος διαθέτει πέραν της συστοιχίας PEMFC και του DC/DC μετατροπέα ανύψωσης, έναν ηλεκτρικό κινητήρα και μια μπαταρία τύπου ιόντων λιθίου.

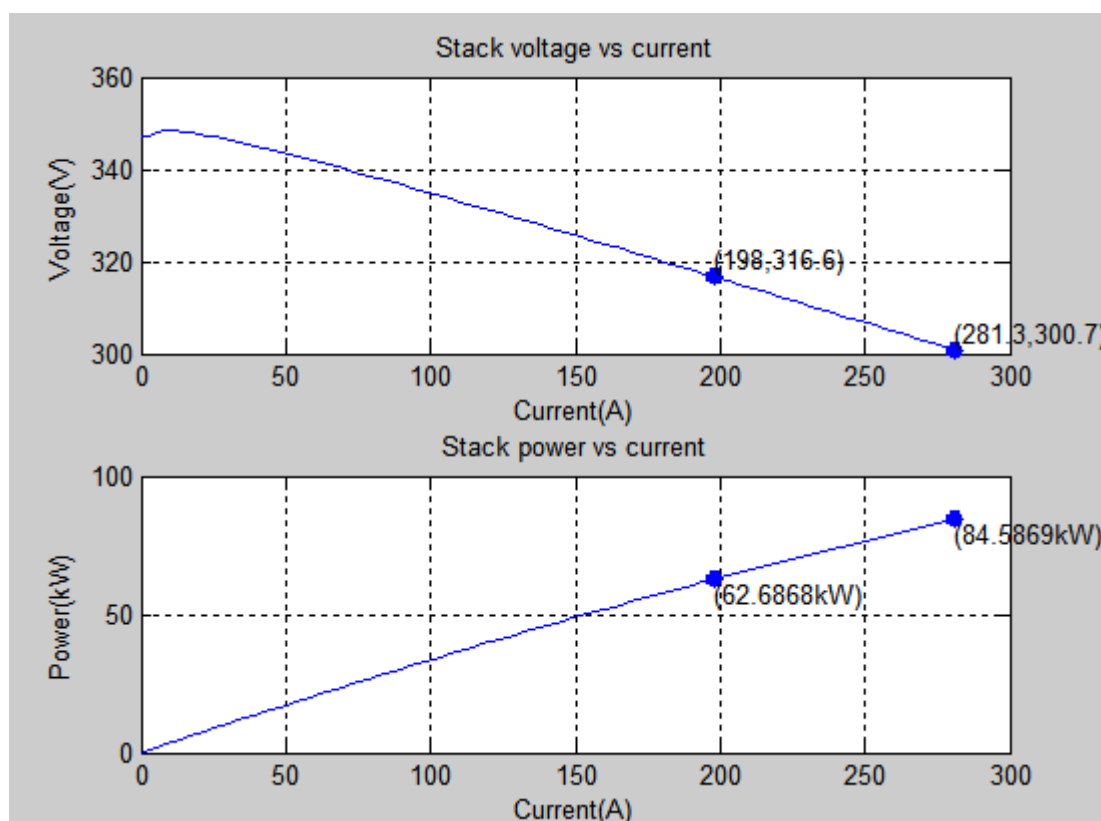
Ο ηλεκτρικός κινητήρας έχει μέγιστη ισχύ τα 100kW. Η ροπή της ατράκτου αποτελεί συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής για συγκεκριμένη DC τιμή του ρεύματος. Η περιστροφή της μηχανής εξαρτάται από το διαθέσιμο ρεύμα στους ακροδέκτες της συστοιχίας και της μπαταρίας, καθορίζοντας έτσι τη ζήτηση σε ροπή.

Η μπαταρία ιόντων λιθίου χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας, η οποία είτε παράγεται από τη συστοιχία, είτε προκύπτει από την επιβράδυνση του οχήματος και την πέδηση ως ανάκτηση της κινητικής ενέργειας. Η αποθηκευμένη αυτή ενέργεια χρησιμοποιείται ως συμπλήρωμα ισχύος όπου και όποτε είναι αναγκαίο. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η μπαταρία είναι χωρητικότητας 13.9 Ah και τάσης 288 V.

Συστοιχία Κυψελών PEMFC

Αυξάνοντας τη ροή και μεταβάλλοντας τις πιέσεις των αερίων όπως και το μέγεθος της κυψέλης λαμβάνονται οι ακόλουθες καμπύλες που περιγράφουν τη λειτουργία της συστοιχίας:

Εικ.4.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες συστοιχίας κυψελών PEMFC.



Στις καμπύλες πόλωσης εμφανίζονται α) το ονομαστικό σημείο λειτουργίας και β) το μέγιστο σημείο λειτουργίας της συστοιχίας.

Το ονομαστικό σημείο λειτουργίας (nominal operating point) έχει άμεση επίδραση στη λειτουργία και την απόδοση της συστοιχίας και επιλέγεται στα 198 A και 316.6V. Με τις τιμές αυτές επιτυγχάνεται καλή πυκνότητα ισχύος, η οποία είναι υψηλή για χαμηλές τιμές της τάσης και προκύπτει από τη σχέση $P = V * I$.

Θεωρητικά το ονομαστικό σημείο λειτουργίας μπορεί να ληφθεί οπουδήποτε εντός των σημείων της χαρακτηριστικής καμπύλης ωστόσο η τάση πρέπει να παραμείνει αρκετά μεγάλη ώστε η απόδοση να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα και να περιορίζεται η κατανάλωση καυσίμου. Γενικά η ενεργός περιοχή της κυψέλης πρέπει να αυξηθεί για υψηλές τιμές της τάσης, γεγονός που ανεβάζει το κόστος λειτουργίας και το μέγεθος της κυψέλης.

Το μέγιστο σημείο λειτουργίας (maximum operating point) αναφέρεται στη μέγιστη δυνατή ισχύ της συστοιχίας θεωρώντας σταθερή τη χρησιμοποίηση και τα ονομαστικά μεγέθη της συστοιχίας.

Αναλυτικά οι παράμετροι της συστοιχίας PEMFC, στις οποίες περιλαμβάνονται οι νέες πιέσεις, οι ροές όπως και το μέγεθος της συστοιχίας εμφανίζονται παρακάτω:

Παράμετροι Λειτουργίας Συστοιχίας Κυψελών PEMFC	
Τάση για 0A και 1A [$V_0(V)$, $V_1(V)$]	[347 345.695]
Ονομαστικό Σημείο Λειτουργίας [$I_{nom}(A)$, $V_{nom}(V)$]	[198 316.6]
Μέγιστο Σημείο Λειτουργίας [$I_{end}(A)$, $V_{end}(V)$]	[281.3 300.7]
Αριθμός Κυψελών N	400
Ονομαστική Απόδοση Συστοιχίας (%)	54
Θερμοκρασία Λειτουργίας (°C)	70
Ονομαστική Ροή Αερίων (lpm)	1698
Ονομαστική Πίεση Παροχής [$H_2 (bar)$, $O_2 (bar)$]	[3 3]
Ονομαστική Σύνθεση (%) [H_2 , O_2 , H_2O (Air)]	[99.95 21 1]

DC/DC Μετατροπέας Τάσης

Προκειμένου η παραγόμενη ισχύς να τροφοδοτεί τον κινητήρα και ποσοστό αυτής να παραμένει σε διαθεσιμότητα εφόσον αποθηκευτεί σε συσσωρευτή κρίνεται εύλογο να υπάρξει αλλαγή στις παραμέτρους που αφορούν την τιμή αναφοράς της τάσης εξόδου αλλά και τα κέρδη των ελεγκτών του DC/DC μετατροπέα.

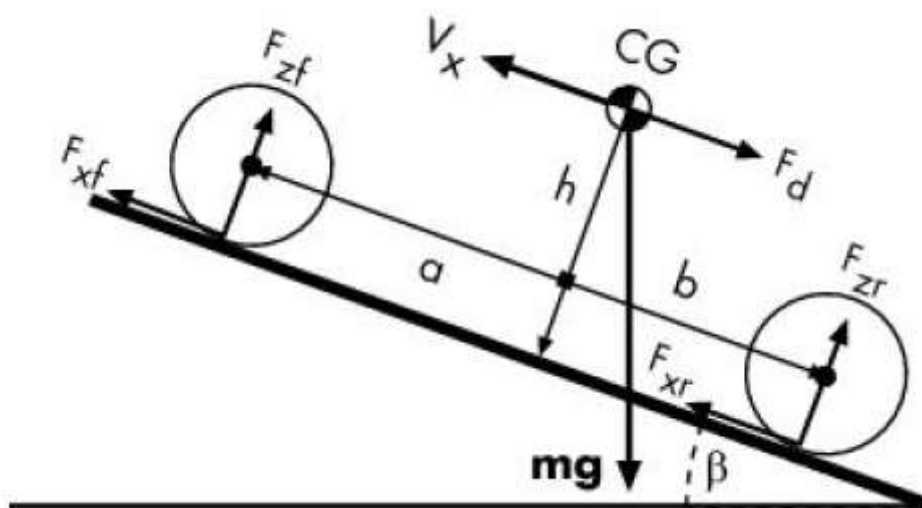
Παράμετροι DC/DC Μετατροπέα Ανύψωσης		
Αυτεπαγωγή Πηνίου	L	1000 μ H
Χωρητικότητα Πυκνωτή	C	1000 μ F
Αναλογικό Κέρδος Ελεγκτή	K_p	0.0005
Ολοκληρωτικό Κέρδος Ελεγκτή	K_i	0.1

4.1.3 Υποσύστημα Δυναμικής του Οχήματος (FCV Vehicle Dynamics)

Στο υποσύστημα αυτό μοντελοποιούνται τα μηχανικά μέρη του οχήματος με την επίλυση των εξισώσεων της δυναμικής του οχήματος και συγκεκριμένα των εξισώσεων κίνησης ενός τετράτροχου οχήματος.

Η κίνηση του οχήματος καθορίζεται από την επίδραση όλων των δυνάμεων που ενεργούν στο όχημα ανάλογα με τη γωνία κλίσης, οι οποίες δημιουργούν ροπές και έλκουν το όχημα μπροστά ή πίσω υπερνικώντας την αεροδυναμική αντίσταση. Προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία του μοντέλου είναι η απουσία κίνησης και ταλαντώσεων στον κάθετο σε σχέση με το έδαφος άξονα.

Εικ.4.3 Μοντέλο Δυναμικής Ηλεκτρικού Οχήματος.



Οι εξισώσεις που περιγράφουν την κινητική κατάσταση του μοντέλου είναι οι ακόλουθες:

Εικ.4.4 Εξισώσεις Κίνησης Ηλεκτρικού Οχήματος για μηδενική επιτάχυνση και απουσία ροπών στον κατακόρυφο άξονα.

$$\begin{aligned}
 m\dot{V}_x &= F_x - F_d - mg \cdot \sin \beta, \\
 F_x &= n(F_{xf} + F_{xr}), \\
 F_d &= \frac{1}{2} C_d \rho A (V_x - V_W)^2 \cdot \text{sgn}(V_x - V_W) \\
 F_{zf} &= \frac{-h(F_d + mg \sin \beta + m\dot{V}_x) + b \cdot mg \cos \beta}{n(a+b)}, \\
 F_{zr} &= \frac{+h(F_d + mg \sin \beta + m\dot{V}_x) + a \cdot mg \cos \beta}{n(a+b)} \\
 F_{zf} + F_{zr} &= mg \cdot \cos \beta / n.
 \end{aligned}$$

Το υποσύστημα μελετά και την πρόσφυση των ελαστικών στο έδαφος. Όταν εφαρμόζεται ροπή στον άξονα του κινητήρα το ελαστικό ωθεί το έδαφος και κινείται εξαιτίας της αναπτυσσόμενης τριβής. Το μοντέλο του ελαστικού προϋποθέτει αυστηρά διαμήκη κίνηση του οχήματος, δηλαδή απουσία κίνησης σε οποιοδήποτε άλλο άξονα. Το ελαστικό αναπτύσσει μια διαμήκη δύναμη F_x ως απόκριση στην ολίσθηση. Η ταχύτητα ολίσθησης του τροχού είναι $V_{sx} = V_x - r\Omega \neq 0$

Εικ.4.5 Δυνάμεις που εφαρμόζονται στο υποσύστημα των ελαστικών.



Το μοντέλο του διαφορικού συνδέει την περιστροφική κίνηση κατά μήκος του αμαξώματος με την περιστροφική κίνηση γύρω από δυο εγκάρσιους άξονες με δεδομένη σχέση μετάδοσης. Η διαμήκης κίνηση, η ροπή και η ισχύς μεταδίδονται στους εγκάρσιους άξονες από αυτόν τον άξονα με τη σχέση μετάδοσης κίνησης. Οι εγκάρσιοι άξονες εξόδου έχουν διαφορετικές γωνιακές ταχύτητες ανάλογα με το βαθμό

ελευθερίας των κινηματικών εξισώσεων. Η περιστροφική κίνηση των τριών συνδεδεμένων αξόνων (D, S_1, S_2) περιορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\omega_D = \pm (1/2) * g * D * (\omega_{S1} + \omega_{S2})$$

Οι ροπές κατά μήκος των πλευρικών αξόνων τ_{S1} και τ_{S2} περιορίζονται προς την διαμήκη ροπή τ_D κατά τέτοιο τρόπο ώστε η ισχύς ρέει μέσα και έξω από την σχέση μετάδοσης μείων οποιαδήποτε απώλεια ισχύος:

$$\omega_{S1} * \tau_{S1} + \omega_{S2} * \tau_{S2} + \omega_D * \tau_D - P_{loss} = 0$$

Όταν η κινηματικοί περιορισμοί συνδυάζονται με τους περιορισμούς ισχύος προκύπτει ότι:

$$g_D * \tau_D = 2 * (\omega_{S1} * \tau_{S1} + \omega_{S2} * \tau_{S2}) / (\omega_{S1} + \omega_{S2})$$

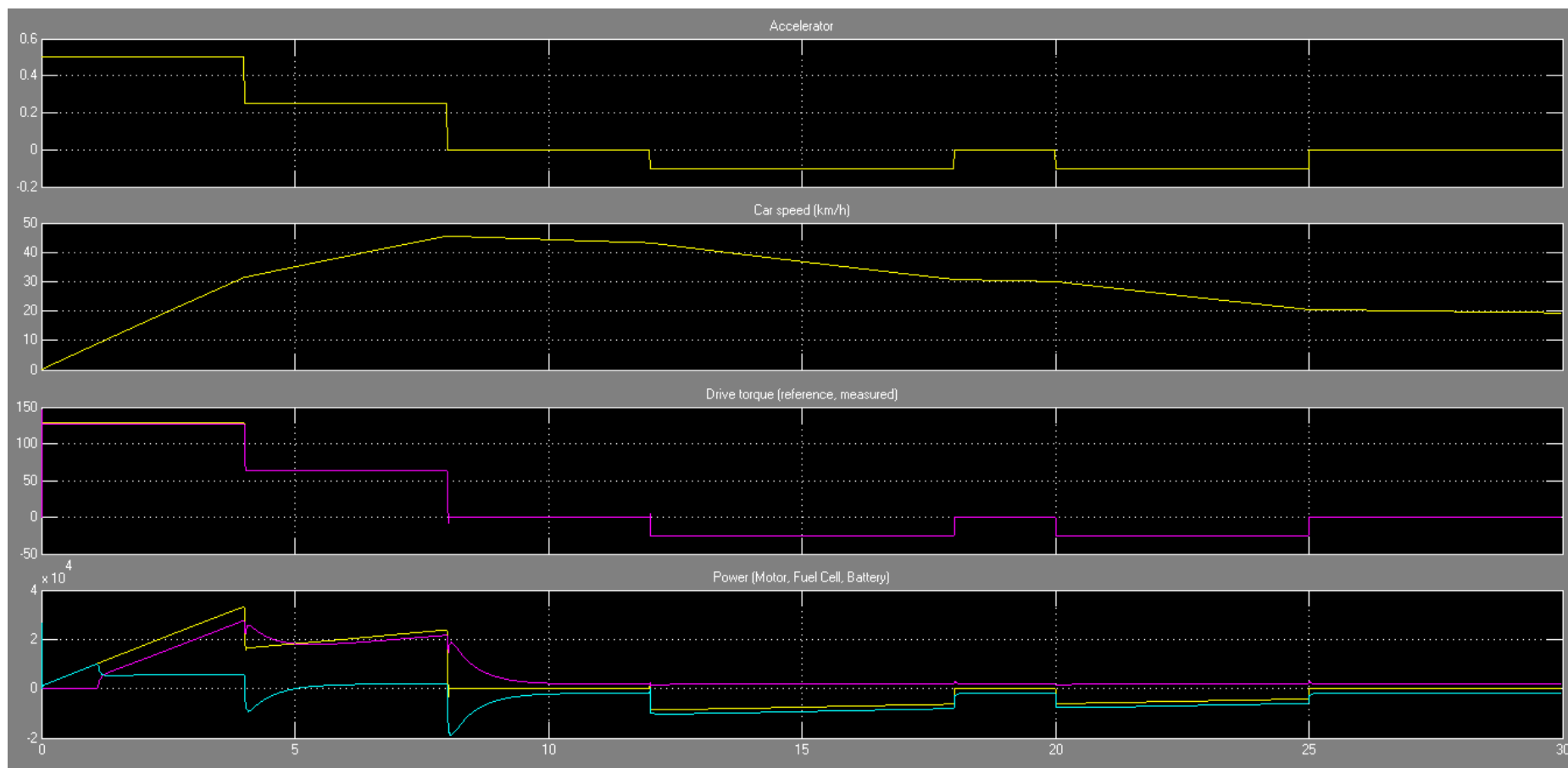
Απαραίτητη κρίνεται η χρήση μονοβάθμιου μειωτήρα στροφών που συνδέει τους άξονες ώστε να περιστρέφονται με σταθερή σχέση μετάδοσης καθορίζοντας τη φορά περιστροφής τους. Η ροπή που μεταφέρεται στους τροχούς δίνεται από τον ακόλουθο τύπο με $\tau_{loss} = 0$ στην ιδανική περίπτωση :

$$g * F_B * \tau_B + \tau_F - \tau_{loss} = 0$$

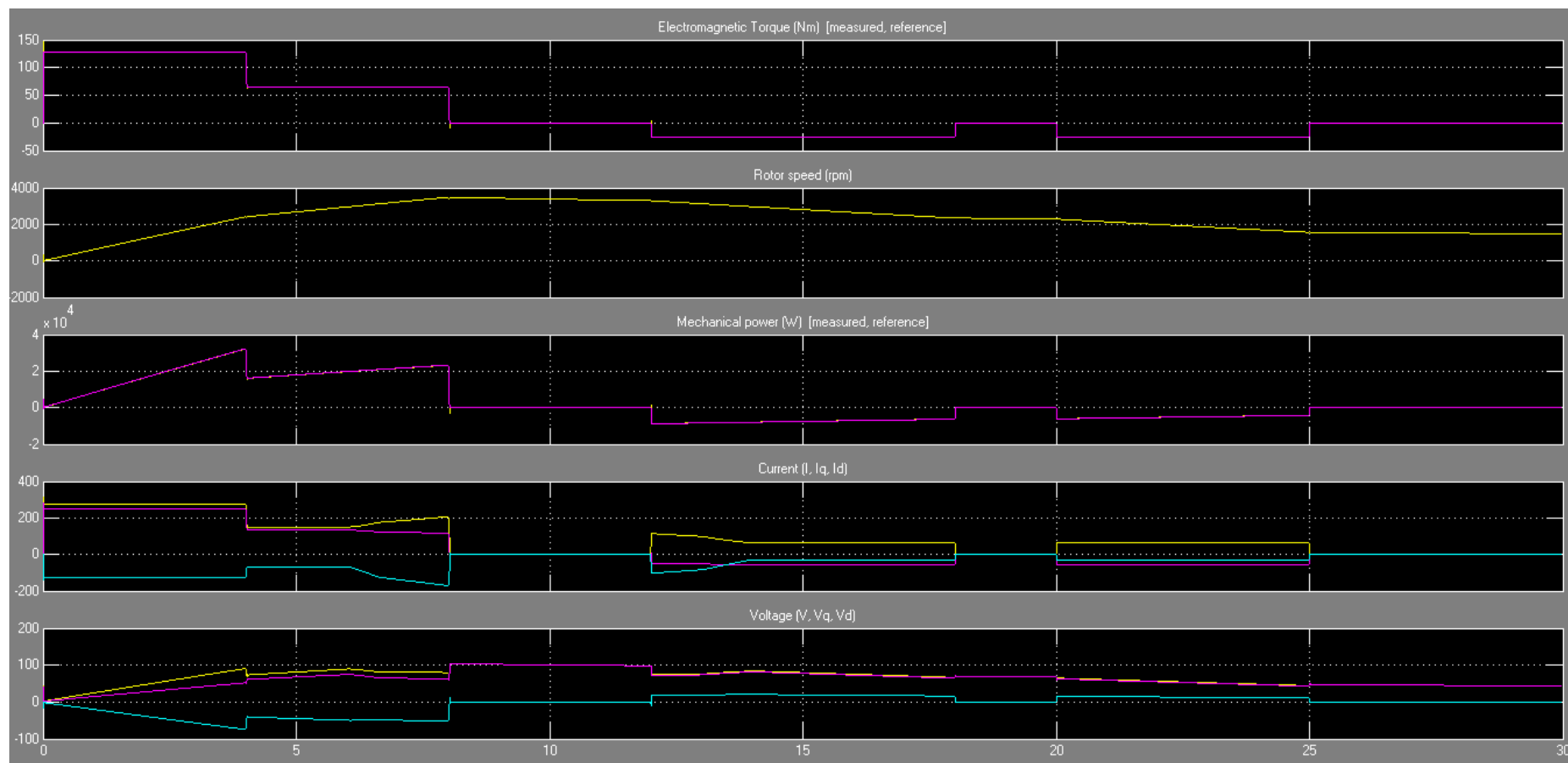
4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Συστήματος Κυψέλης PEMFC - Ηλεκτρικού Οχήματος

Στα ακόλουθα διαγράμματα παριστάνονται τα μεγέθη που αφορούν τα γενικά χαρακτηριστικά του οχήματος, τον σύγχρονο κινητήρα μόνιμου μαγνήτη (PMSM Drive) και το ηλεκτρικό υποσύστημα του μοντέλου για συνολικό χρόνο προσομοίωσης $t = 30 \text{ sec}$. Η τάση και το ρεύμα του στάτορα σε απόλυτη τιμή και με συνιστώσες στους άξονες q, d αναγράφονται προς κατανόηση της λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα.

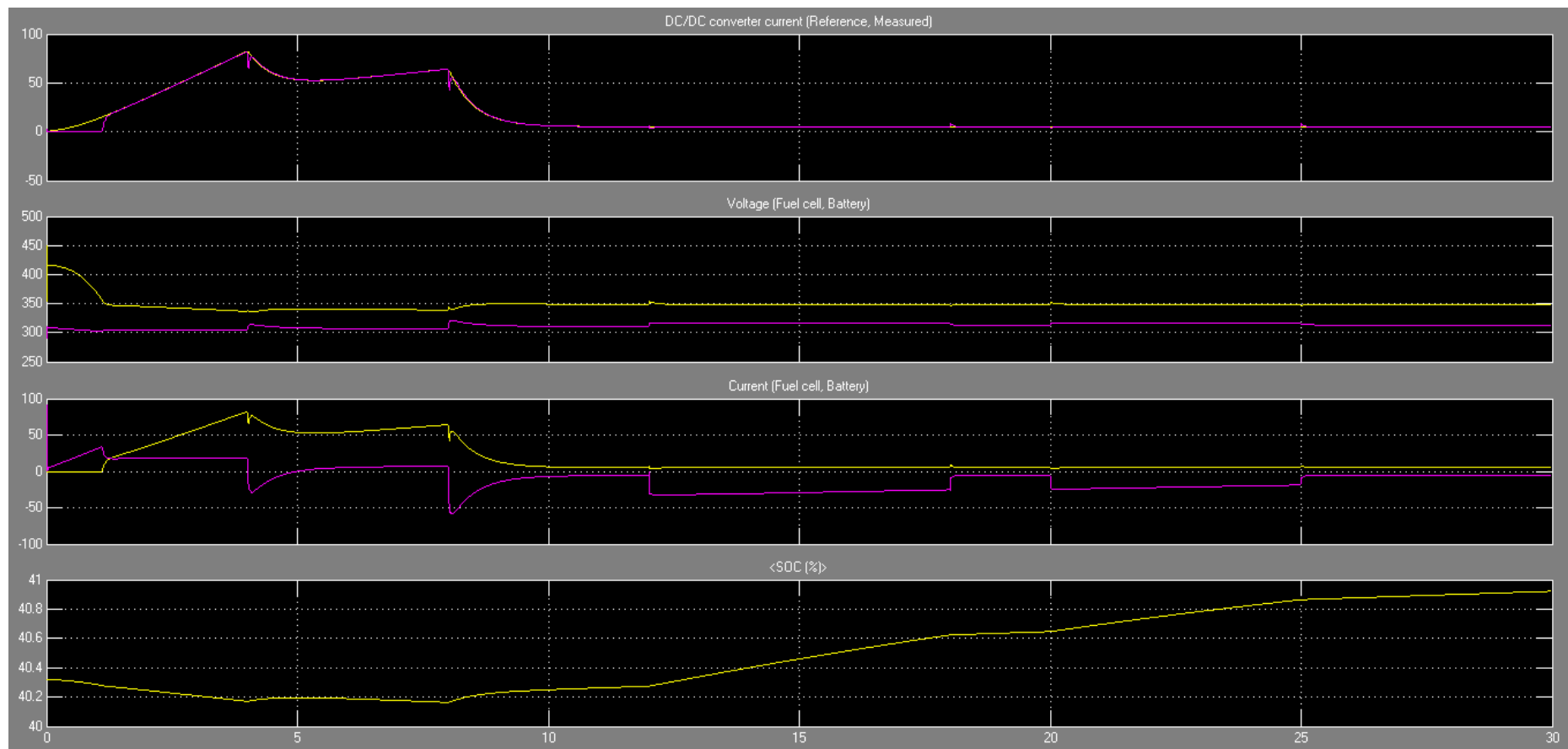
Εικ.4.3 Θέση πεντάλ Γκαζιού, Ταχύτητα, Ροπή Οδήγησης (εκτιμώμενη, μετρήσιμη) και Ισχύς Οχήματος(κινητήρας, κυψέλη καυσίμου, συσσωρευτής).



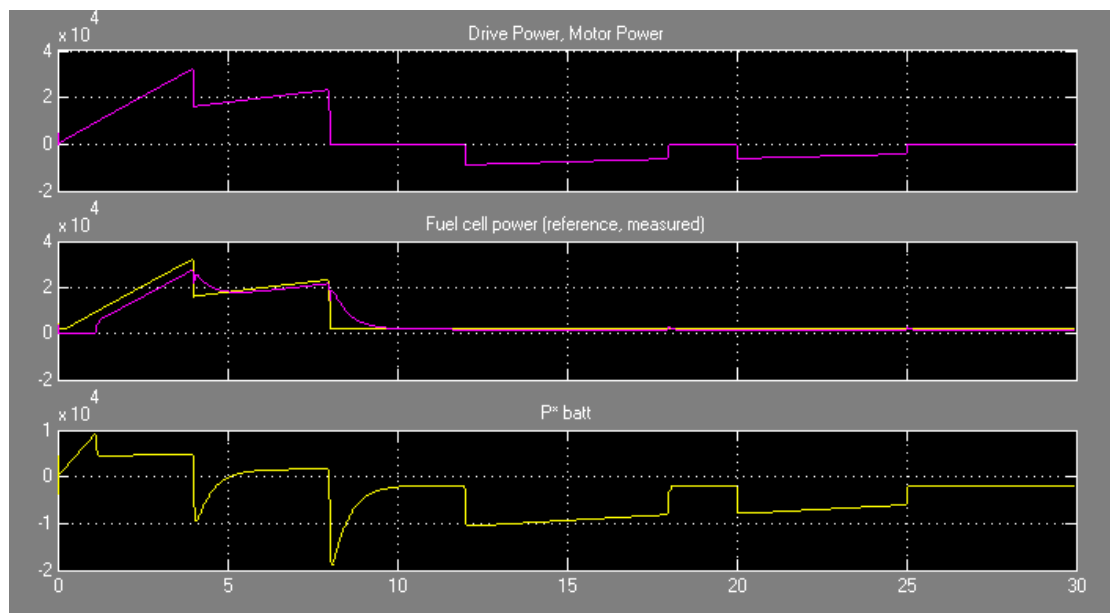
Εικ.4.4 Ηλεκτρομαγνητική Ροπή (μετρήσιμη, εκτιμώμενη), Ταχύτητα ρότορα, Μηχανική Ισχύς Οχήματος (μετρήσιμη, εκτιμώμενη), Ρεύμα (I , I_q , I_d) και Τάση (V , V_q , V_d).



Εικ.4.5 Ρεύμα DC/DC Μετατροπέα (εκτιμώμενο, μετρήσιμο), Τάση (Κυψέλη Καυσίμου, Μπαταρία), Ρεύμα (Κυψέλη Καυσίμου, Μπαταρία) και Κατάσταση Φόρτισης Συσσωρευτή(%)



Εικ.4.6 Θεωρητική και Πραγματική Ισχύς Κινητήρα, Ισχύς Κυψέλης Καυσίμου (εκτιμώμενη, μετρήσιμη) Ισχύς Συσσωρευτή.



Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

0 – 5 sec

Το πεντάλ του γκαζιού δίνει έναυσμα για πρόωση του οχήματος, το οποίο τίθεται σε κίνηση με την ταχύτητα του να αυξάνεται σχεδόν γραμμικά έως ότου πλησιάσει αρκετά τα 30km/h. Η ταχύτητα αυτή αυξάνεται πιο αργά με την τιμή του πεντάλ του γκαζιού να μειώνεται παραμένοντας ταυτόχρονα θετική. Η ροπή οδήγησης είναι υψηλή λόγω της επιτάχυνσης του οχήματος και η ισχύς του κινητήρα αυξάνεται γραμμικά απορροφώντας αρχικά ενέργεια από τη μπαταρία έως ότου ενεργοποιηθεί η κυψέλη καυσίμου που παράγει την απαιτούμενη ισχύ. Την μείωση της ισχύος του κινητήρα ακολουθούν αντίστοιχα η ισχύς της κυψέλης και της μπαταρίας (Εικ.4.3).

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή και η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα καθορίζονται από την πρόθεση του χρήστη να επιταχύνει είτε επιβραδύνει το όχημα ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ταχύτητα / ροπή οδήγησης. Επομένως τα 2 τελευταία μεγέθη ακολουθούν πιστά τις μεταβολές των πρώτων, όπως ακριβώς και η μηχανική ισχύς που δίδεται στο όχημα από την παραγόμενη ισχύ του κινητήρα (Εικ.4.4).

Για την εκκίνηση του συστήματος είναι απαραίτητη η απορρόφηση ενέργειας, γεγονός που οδηγεί σε πτώση της τάσης των συσσωρευτών (κυψέλη καυσίμου – μπαταρία) και αύξηση του ρεύματος που παράγουν, όπως φαίνεται και από την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας που μειώνεται επειδή συνεισφέρει στην τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα. Όταν η ενέργεια που δίνει η κυψέλη επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών του οχήματος, ξεκινά η επαναφόρτιση της μπαταρίας. Το ρεύμα που δίνει ο DC/DC Μετατροπέας αυξάνεται καθώς ακολουθεί τη συμπεριφορά της συστοιχίας(Εικ.4.5).

Η παραγόμενη ισχύς της κυψέλης καυσίμου αυξάνεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του οχήματος ώστε να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια που θα τροφοδοτήσει τον κινητήρα. Η ισχύς που αποδίδει η μπαταρία στον κινητήρα συμπεριφέρεται και αυτή ανάλογα με το ρεύμα που δίνει στον κινητήρα (Εικ.4.6).

5 – 15 sec

Η τιμή στο πεντάλ του γκαζιού μετά από ένα διάστημα σταθεροποίησης της σε μικρή αλλά θετική τιμή επιφέρει σταθεροποίηση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της ροπής οδήγησης και επιπλέον αύξηση της ταχύτητας του οχήματος έως ότου φτάσει πολύ κοντά στα 45km/h. Ακολουθώς αυξάνεται η ισχύς του κινητήρα και των συσσωρευτών που τον τροφοδοτούν. Έπειτα το πεντάλ αφήνεται ελεύθερο ώστε να επιβραδύνει, με την ταχύτητα να μειώνεται αργά, όπως και η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα, με τις ροπές (ηλεκτρομαγνητική, μηχανική, οδήγησης) να λαμβάνουν μηδενική τιμή, όπως αναμένεται. Η αποδιδόμενη ισχύς του κινητήρα μηδενίζεται, η ισχύς της κυψέλης μειώνεται και η μπαταρία φορτίζεται. Η τιμή του πεντάλ γίνεται έπειτα αρνητική ώστε το όχημα να επιβραδύνει γρηγορότερα, με τα μεγέθη να παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά (Εικ.4.3)-(Εικ.4.4).

Η επιτάχυνση του οχήματος μετά τα 5 πρώτα δευτερόλεπτα φαίνεται και από την αύξηση στο παραγόμενο ρεύμα του DC/DC Μετατροπέα και τα χαμηλά επίπεδα της τάσης των συσσωρευτών που τροφοδοτούν τον κινητήρα με επακόλουθη αύξηση του ρεύματος και της ισχύος τους. Μετά την πτώση της τιμής στο πεντάλ του γκαζιού, η μπαταρία φορτίζεται ξανά αποθηκεύοντας την ενέργεια που περισσεύει καθώς οι ανάγκες σε μηχανική ισχύ είναι μηδανικές. Για το λόγο αυτό αυξάνεται η τάση των συσσωρευτών και περιορίζεται το ρεύμα του μετατροπέα και συνεπώς η ισχύς που δίνεται στον κινητήρα από τα στοιχεία συσσώρευσης. Η μεταβολή στην τιμή του πεντάλ που πλέον λαμβάνει αρνητική τιμή προκαλεί όμοια φαινόμενα στα μεγέθη, λόγω επιβράδυνσης (Εικ.4.5)-(Εικ.4.6).

15 – 20sec

Η τιμή του πεντάλ του γκαζιού διατηρείται σταθερά σε ορισμένη τιμή πέδησης ώστε η ταχύτητα του οχήματος να μειωθεί στο διάστημα αυτό από τα 36 στα 32 km/h. Έπειτα το πεντάλ αφήνεται ελεύθερο ώστε το όχημα να επιβραδύνει φυσικά στα 30 km/h. Αντίστοιχα μηδενίζονται οι ανάγκες σε μηχανική και συνεπώς ηλεκτρική ισχύ όπως και οι ροπές του οχήματος (ηλεκτρομαγνητική, μηχανική, οδήγησης). Η μπαταρία φορτίζεται γρήγορα ενώ η ισχύς που παρέχει η μπαταρία και το ρεύμα του DC/DC μετατροπέα, της συστοιχίας και της μπαταρίας σταθεροποιούνται σε τιμές ανάλογες των μεταβολών (Εικ.4.3)-(Εικ.4.4)-(Εικ.4.5)-(Εικ.4.6).

25 – 30sec

Η τιμή του πεντάλ του γκαζιού μειώνεται σε ορισμένη τιμή πέδησης κοντά στο μηδέν ώστε η ταχύτητα του οχήματος να μειωθεί ομαλά. Τη χρονική στιγμή $t = 20 \text{ sec}$ ο χρήστης αφήνει ελεύθερο το πεντάλ με αποτέλεσμα την σταθεροποίηση της ταχύτητας του οχήματος στα 20 km/h. Στο σύστημα αποθηκεύεται η πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται καθώς το όχημα δεν έχει αυξημένες απαιτήσεις όσο βρίσκεται σε λειτουργία. Έτσι η ισχύς της μπαταρίας αυξάνεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά (Εικ.4.3)-(Εικ.4.4)-(Εικ.4.5)-(Εικ.4.6).

4.3 Συμπεράσματα Προσομοίωσης Συστήματος Κυψέλης PEMFC - Ηλεκτρικού Οχήματος

Το σύστημα κυψέλης PEMFC– DC/DC Μετατροπέα Ανύψωσης ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του ηλεκτρικού οχήματος καθώς προσαρμόζεται στις μεταβολές του πεντάλ του γκαζιού που καθορίζουν την κινητική κατάσταση του οχήματος. Σε συνδυασμό με τη μπαταρία ιόντων λιθίου, η συστοιχία κυψελών καυσίμου υποστηρίζει ικανοποιητικά το ηλεκτρικό υποσύστημα.

Ο χρόνος που χρειάζεται το όχημα για να ακολουθήσει τις μεταβολές στο πεντάλ του γκαζιού είναι ικανοποιητικός καθώς η ροπή οδήγησης δεν έχει απόκλιση από την εκτιμώμενη τιμή και η πραγματική ισχύς της κυψέλης προσεγγίζει καλά την εκτιμώμενη, με αποτέλεσμα η πραγματική ισχύς του κινητήρα να λαμβάνει τις αναμενόμενες τιμές για τις ομαλές αυτές μεταβολές της ταχύτητας. Αποκλίσεις παρατηρούνται στην αρχή της προσομοίωσης εξαιτίας της έναρξης της λειτουργίας της κυψέλης, οι οποίες όμως περιορίζονται στη συνέχεια αλλά αφήνουν περιθώρια για βελτίωση της λειτουργίας κατά την έναρξη ώστε η διαχείριση της ενέργειας να γίνεται πιο ορθολογικά.

Προκειμένου να βελτιωθούν οι επιδόσεις του οχήματος θα μπορούσαν να γίνουν αλλαγές στη χωρητικότητα της μπαταρίας και σε στοιχεία όπως η μάζα του οχήματος, ο αεροδυναμικός συντελεστής, η απόσταση του κέντρου βάρους του οχήματος από το έδαφος και άλλα χαρακτηριστικά για τον περιορισμό των μηχανικών απωλειών.

Κλείνοντας, η χρήση της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου σε αυτοκίνητα κρίνεται σκόπιμη καθώς διάφοροι τύποι οχημάτων, όπως τα αυτοκίνητα επιδόσεων, είναι οι πλέον ρυπογόνοι. Ο συνδυασμός των καλών επιδόσεων και του περιορισμού των ρύπων που εκπέμπονται βρίσκει και όλο και περισσότερες εφαρμογές παρουσιάζοντας ραγδαία ανάπτυξη.

Βιβλιογραφία

1. J. Zhang, “*PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers*”, Springer, 2008
2. C. Spiegel, “*PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB*”, Academic Press, 2008
- 3.
4. R. Shaffer , “*Fundamentals Of Power Electronics With Matlab*”, Charles River Media, 2006
5. Bei Gou, Woon Ki Na, Bill Diong, “*Fuel Cells: Modeling, Control, and Applications, Power Electronics and Applications Series*”, CRC Press, 2010
6. G. Hoogers, “*Fuel Cell Technology Handbook*”, CRC Press, 2003
7. K. Kuang, K. Easler, “*Fuel Cell Electronics Packaging*”, Springer, 2007
8. Ahmad W. Al-Dabbagh, Lixuan Lu, Antonio Mazza, “*Modelling, simulation and control of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) power system*” *Hydrogen Energy* 35, pp 5061-5069, 2010
9. M. Uzunoglu, M. S. Alam “*Dynamic Modeling, Design, and Simulation of a Combined PEM Fuel Cell and Ultracapacitor System for Stand-Alone Residential Applications*”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 3, September 2006
10. F. Laurencelle, R.Chahine, J. Hamelin, K. Agbossou, M. Fournier, T. K. Bose and A. Laperriere, “*Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack*”, *Fuel Cells* 1, pp 66-71, 2001
11. R. F. Mann, J. C. Amphlett, M. A.I. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley, P. R. Roberge, “*Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell*”, *Journal of Power Sources* 86, pp 173–180, 2000
12. Ν. Αβραμιώτης - Φαληρέας, “*Ανάλυση λειτουργίας και ανάπτυξη δυναμικού μοντέλου προσομοίωσης κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)*”, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Ιούλιος 2010
13. Ε. Ζουντουρίδου, “*Ανάλυση - λειτουργία κυψελών Καυσίμου και προσομοίωση λειτουργίας κυψελής καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας*”, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2006
14. Σ. Μανιάς, “*Ηλεκτρονικά Ισχύος*”, Συμewών 2010
15. www.fuelcelltoday.com
16. www.fuelcells.org
17. www.ballard.com
18. www.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell
19. www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33309-fuel-cell-vehicle--fcv--power-train
20. www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/fuelcellstack.html
21. https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/47_2_Boston_10-02_0225.pdf

22. <http://www.hybridcars.com/toyota-explains-why-fuel-cells-are-the-future/>
23. http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fct_h2_fuelcell_factsheet.pdf
24. http://www.fuelcelltoday.com/media/1889744/fct_review_2013.pdf
25. http://www.scientific-computing.com/features/feature.php?feature_id=126
26. http://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=f3gU1_3pnMkC&oi=fnd&pg=PP2&dq=matlab+fuel+cell+models&ots=zobFWNEil6&sig=cUL-Cuc3mb8WDzY_zXr585QeQxE#v=onepage&q=matlab%20fuel%20cell%20models&f=false
27. http://perweb.firat.edu.tr/personel/yayinlar/fua_612/612_57044.pdf