



Πολυτεχνείο Κρήτης

Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και

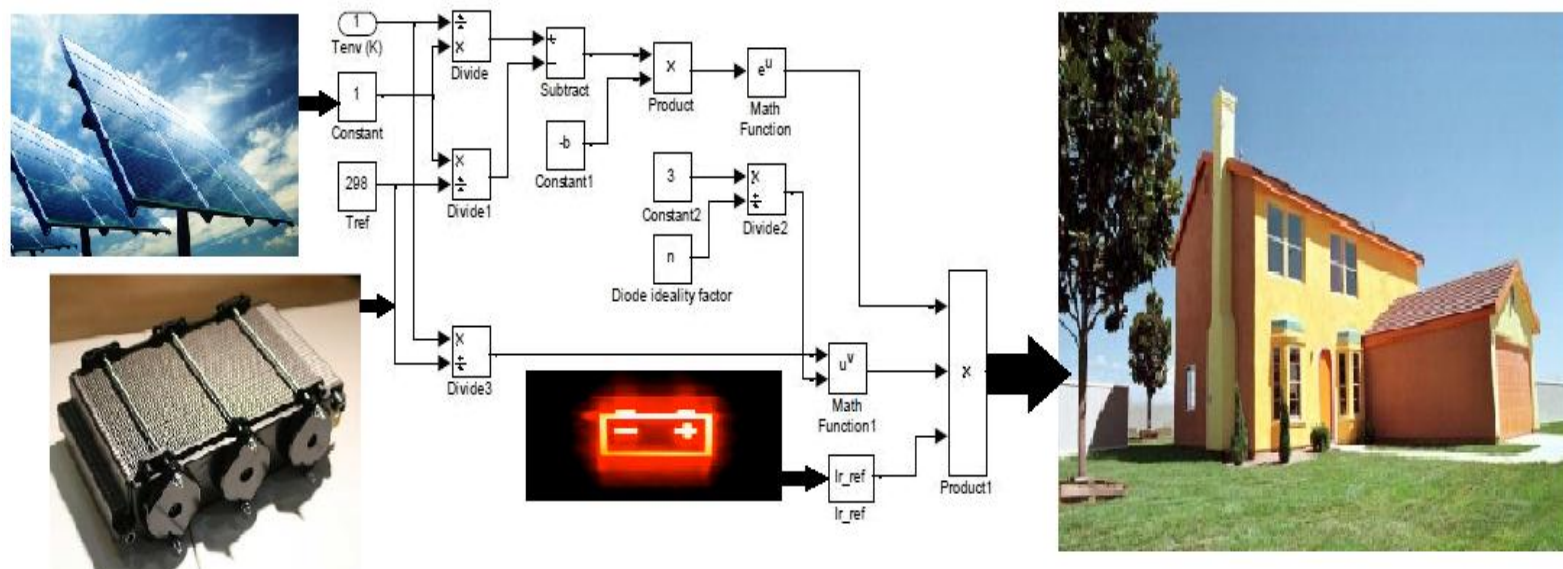
Μηχανικών Υπολογιστών

Διπλωματική Εργασία

Προσομοίωση και Διαχείριση ενός Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος Ενέργειας, με χρήση Γραφικών Εργαλείων Υπολογισμού.

Λεοντόπουλος Παναγιώτης

A.M. : 2003030109



Χανιά , Σεπτέμβρης 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας, το οποίο καλείται υβριδικό σύστημα «φωτοβολταϊκού - κυψέλης καυσίμου υδρογόνου (PVFC)». Πρόκειται για ένα αυτόνομο σύστημα που προμηθεύει με ηλεκτρική ενέργεια το φορτίο-χρήστη, χωρίς να είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο. Ένα τέτοιου είδους αποκεντρωμένο σύστημα, συναντάται συνήθως σε απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές, δεδομένου ότι, το πλέγμα αξιοποίησης-χρήσης (δίκτυο) είναι δύσκολο να φτάσει τις περιοχές αυτές. Το σύστημα, αποτελείται από μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια, μία κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), μία μονάδα ηλεκτρολύτη και μία μπαταρία. Το σύστημα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να αποτελέσει μια λύση φιλική προς το περιβάλλον, αφού επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της χρήσης ηλιακής ενέργειας. Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, που είναι η κύρια πηγή ενέργειας του συστήματος, δεν μπορεί να παράγει επαρκή ισχύ για να ικανοποιήσει το φορτίο ούτε κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών, ούτε και κάτω από συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες που θεωρούνται ακατάλληλες. Συνεπώς χρησιμοποιείται μια γεννήτρια κυψέλης καυσίμου για να ικανοποιήσει τις ενεργειακές ανάγκες στις περιπτώσεις που η φωτοβολταϊκή γεννήτρια δεν επαρκεί. Αυτή η κυψέλη καυσίμου, χρησιμοποιεί ως καύσιμο καθαρό υδρογόνο, το οποίο αντλείται από μια δεξαμενή αποθήκευσης υψηλής πίεσης. Το υδρογόνο αυτό, δεν προέρχεται από ορυκτά καύσιμα αλλά από έναν ηλεκτρολύτη, ο οποίος τροφοδοτείται από την περίσσεια ενέργεια που πιθανόν παράγει η φωτοβολταϊκή γεννήτρια κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η μπαταρία, χρησιμοποιείται αφενός για εφεδρική αποθήκευση ενέργειας, αφετέρου για να εξασφαλίσει τη διαρκή ρύθμιση της τάσης του δικτύου. Το σύστημα είναι και βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς δεν έχει απόβλητα, δεν προκαλεί ηχορύπανση και δεν είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο.

Αυτό το αυτόνομο σύστημα παραγωγής ενέργειας, βρίσκεται στα Χανιά της Κρήτης, τοποθεσία με χαρακτηριστικά υψηλή ηλιακή ακτινοβολία και μέση θερμοκρασία που αποτελούν ιδανικές συνθήκες για την παραγωγή ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών. Συν τοις άλλοις, η Κρήτη έχει πολλές απομακρυσμένες μη αστικές περιοχές, με χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα, για τις οποίες το σύστημα μπορεί να αποτελέσει μια ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροδότησης. Φυσικά, πολλά είναι αυτά που πρέπει να γίνουν ακόμα προς αυτήν την κατεύθυνση και κυρίως σε ότι αφορά τις κυψέλες καυσίμου, καθώς το κόστος αυτής της τεχνολογίας σήμερα, κάθε άλλο παρά ελκυστικό προς τον καταναλωτή μπορεί να θεωρηθεί.

Η προσομοίωση του συστήματος, έγινε σε περιβάλλον Matlab/Simulink, κυρίως λόγω των δυνατοτήτων που προσφέρει, αλλά και της εύχρηστης και κατανοητής αναπαράστασης μαθηματικών μοντέλων και κανόνων λειτουργίας, από τα μοντέλα του Simulink. Το βασικό

συμπέρασμα του πονήματος αυτού, είναι ότι η προσομοίωση του υπό εξέταση συστήματος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την απεικόνιση της πραγματικής λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος, σε τοποθεσία με χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν. Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί, ότι η εφαρμογή του Simulink, σχεδιάστηκε με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι εύκολη η παραμετροποίηση, ώστε να μπορούν να εξεταστούν διαφορετικές δομές του συστήματος ή διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας (άλλες περιοχές). Το σύστημα παρουσίασε πολύ καλή συμπεριφορά κάτω από τις συνθήκες που εξετάστηκαν αλλά εξαιτίας του υψηλού κόστους του, δεν μπορεί ακόμα να αποτελέσει μια δημοφιλή επιλογή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο στο μέλλον, ύστερα από μακρά έρευνα τόσο στον τομέα των φωτοβολταϊκών όσο και στον τομέα των κυψελών καυσίμου, σίγουρα θα γίνει δημοφιλές και δεδομένου πάντα ότι θα είναι διαθέσιμες πιο οικονομικές και αποτελεσματικές πρώτες ύλες.

Λέξεις Κλειδιά : Αυτόνομο υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας, Φωτοβολταϊκή γεννήτρια, Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, Ηλεκτρολύτης, Δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου, Μπαταρία .

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΞΕΤΑΣΗΣ

Καθηγητής Γεώργιος Σταυρακάκης , Επιβλέπων

Καθηγητής Γεώργιος Σταυρουλάκης (ΜΠΔ) , Συν-επιβλέπων

Καθηγητής Κωνσταντίνος Καλαϊτζάκης , Μέλος

Ευχαριστίες

Σ' αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρακάκη καθώς και τον συν-επιβλέποντα Καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη των Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν, τις συμβουλές και την άριστη συνεργασία σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας . Τέλος να ευχαριστήσω και τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Καλαϊτζάκη που δέχτηκε να είναι μέλος της επιτροπής εξέτασης .

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	7
1.2 Υβριδικά συστήματα ενέργειας.....	10
1.2.1 Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής σε κεντρικό δίκτυο.....	12
1.2.2 Αυτόνομα υβριδικά συστήματα	12
1.3 Φωτοβολταϊκή ενέργεια – Κυψέλη καυσίμου (PVFC).....	12
1.4 Στόχοι της μελέτης	14
1.5 Δομή εργασίας.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	16
2.1 Φωτοβολταϊκή παραγωγή	17
2.1.1 Γενική περιγραφή της φωτοβολταϊκής κυψέλης.....	20
2.1.2 Πηγές απώλειας σε μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια	21
2.1.3 Έλεγχος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)	23
2.2 Συστήματα ενέργειας υδρογόνου και τα μέρη τους.....	24
2.2.1 Ηλεκτρολύτης	24
2.2.2 Αποθήκευση υδρογόνου	27
2.2.2.1 – Αποθήκευση πεπιεσμένου αέριου υδρογόνου	29
2.2.2.2 – Αποθήκευση υγρού υδρογόνου	30
2.2.2.3 – Αποθήκευση μεταλλοϋδριδίων.....	31
2.3 Στρατηγική ελέγχου	33
2.4 Συμπεράσματα	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Φ/Β ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ.....	37
3.1 Κυψέλη φωτοβολταϊκών (PV cell).....	37
3.1.1 Μοντέλο μιας διόδου	37
3.1.2 Το μοντέλο δύο διόδων	40
3.1.2.1 - Αντίσταση σειράς.....	40
3.1.2.2 - Παράλληλη αντίσταση	40
3.1.2.3 - Επανασύνδεση (recombination).....	40

3.2 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module).....	41
3.3 Εφαρμογή του Simulink στην φωτοβολταϊκή γεννήτρια	45
3.3.1 Μοντέλο φ/β γεννήτριας	45
3.3.2 Μοντέλο φ/β κυψέλης.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	52
4.1 Εισαγωγή.....	52
4.2 Τύποι κυψελών καυσίμου	55
4.2.1 AFC – Αλκαλική κυψέλη καυσίμου	56
4.2.2 PAFC - Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος	57
4.2.3 MCFC – Κυψέλη καυσίμου ανθρακικού άλατος.....	57
4.2.4 SOFC – Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων.....	58
4.3 PEMFC - Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων	59
4.3.1 Ηλεκτρολύτης πολυμερικής μεμβράνης	60
4.3.2 Καταλύτης.....	61
4.3.3 Στρώμα διάχυσης αερίων	61
4.3.4 Διαχείριση νερού.....	62
4.4 Μαθηματική μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου PEM	62
4.4.1 Ενέργεια και EMF της κυψέλης καυσίμου PEM	62
4.4.2 Η εξίσωση του Nernst.....	65
4.4.3 Αποδοτικότητα της κυψέλης καυσίμου PEM	66
4.4.4 Κατανάλωση υδρογόνου από την κυψέλη καυσίμου.....	68
4.4.5 Απώλειες	68
4.4.5.1 – Απώλειες ενεργοποίησης.....	69
4.4.5.2 – Διασταύρωση καυσίμου και εσωτερικά ρεύματα.....	71
4.4.5.3 – Ωμικές απώλειες	71
4.4.5.4 – Απώλειες συγκέντρωσης	71
4.5 Μοντέλο κυψέλης καυσίμου PEM στο περιβάλλον Simulink	72
4.5.1 Συστοιχία κυψελών καυσίμου.....	75
4.5.2 Κυψέλη καυσίμου	76
4.5.2.1 – Λειτουργική πίεση στη συστοιχία κυψελών καυσίμου	78
4.5.2.2 – Η εξίσωση του Nernst	81
4.5.2.3 – Απώλειες.....	82
4.5.3 Ηλεκτρολύτης	83
4.5.4 Αποθήκευση	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	87
5.1 Δεδομένα.....	87

5.2 Απόδοση του συστήματος	91
5.2.1 Χειμερινή ημέρα	91
5.2.2 Ανοιξιάτικη μέρα	97
5.2.3 Θερινή ημέρα	102
5.2.4 Ειδικές περιπτώσεις	108
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ	113
 6.1 Μοντελοποίηση των μερών του υβριδικού συστήματος PVFC	113
6.1.1 Φ/β γεννήτρια.....	113
6.1.2 Σύστημα ενέργειας υδρογόνου.....	113
6.1.3 Συνολική λειτουργία του συστήματος PVFC	113
 6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα και επεκτάσεις	114
 6.3 Μελλοντικοί στόχοι - Επίλογος	115
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	117
 Παράρτημα.....	121

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

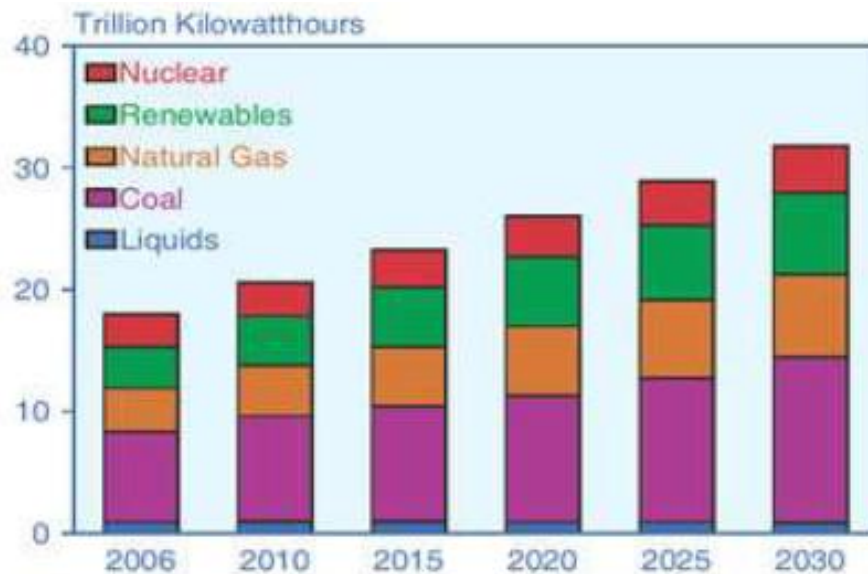
1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια οδήγησε, τα τελευταία χρόνια, στην επένδυση χρόνου και πόρων για την έρευνα και την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κυρίως από την πλευρά των περισσότερο ανεπτυγμένων χωρών. Καθώς η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια συνεχώς αυξάνεται, λόγω των τεχνολογικών εξελίξεων και της πληθυσμιακής αύξησης, τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα εξαντλούνται σταδιακά και τα περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και οι ανθυγιεινές συνθήκες ζωής στα μεγάλα αστικά κέντρα συνεχίζουν να διογκώνονται [1]. Είναι πλέον αποδεκτό πως για να καλυφθούν οι σύγχρονες ενεργειακές ανάγκες πρέπει να υπάρχει μια πολυμορφία στην ενεργειακή παραγωγή. Οι τρόποι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να προσανατολίζονται σε τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον, αλλά και να εξασφαλίζουν χαμηλό κόστος παραγωγής.

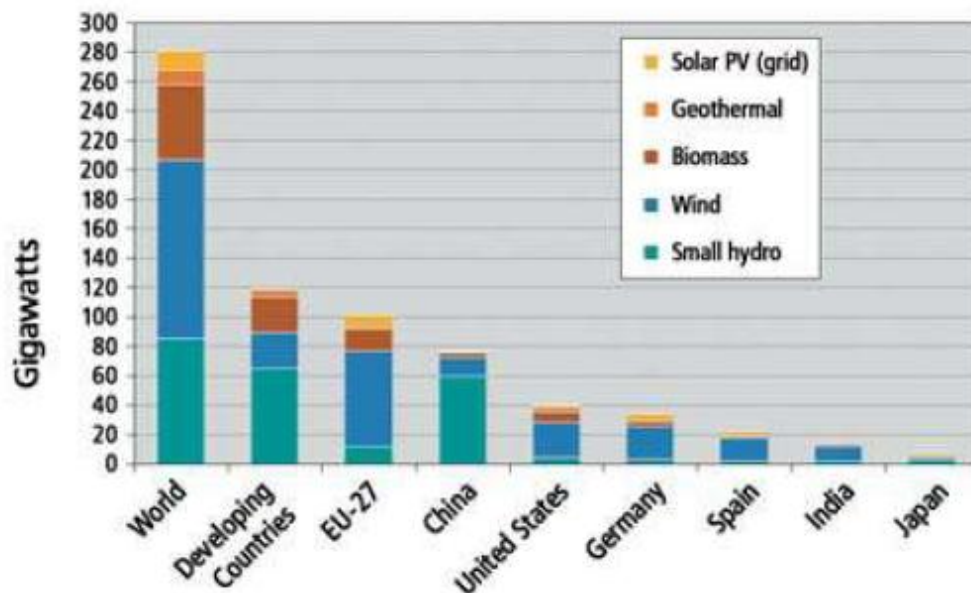
Για τους παραπάνω λόγους, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) οφείλουν να έχουν σημαντικό μερίδιο σε αυτό το πολυμορφικό σύστημα παραγωγής. Σε αντίθεση με τις συμβατικές πηγές, όπως οι γαιάνθρακες (π.χ. λιγνίτης) και το πετρέλαιο, οι ΑΠΕ θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες και η χρήση τους δεν επιβαρύνει το περιβάλλον. Η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, τα μικρά υδροηλεκτρικά, οι κυψέλες καυσίμου, η ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων, η γεωθερμική ενέργεια και η ενέργεια της βιομάζας αποτελούν τις κυριότερες πηγές αιωφόρου ενέργειας. Οι ΑΠΕ είναι εγχώριες πλουτοπαραγωγικές πηγές, οι οποίες συμβάλλουν στην ενεργειακή χειραφέτηση, καθώς και στην εξασφάλιση του εθνικού ενεργειακού ανεφοδιασμού χωρών, οι οποίες δεν έχουν άμεση πρόσβαση σε συμβατικά καύσιμα. Επίσης, συμβάλλουν στην γεωγραφικά διεσπαρμένη παραγωγή, μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά της ενέργειας, και δεν επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και τις τιμές των συμβατικών καυσίμων. Έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος και μπορούν να αποτελέσουν πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών. Προβλήματα, όπως οι περιορισμοί διείσδυσης των ΑΠΕ σε ασθενή δίκτυα ή το υψηλό κόστος επένδυσης, μπορούν να ξεπεραστούν με αναβάθμιση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και τη δημιουργία ελκυστικών οικονομικών επενδύσεων, είτε με κρατικές επιχορηγήσεις είτε με χρηματοδότηση από τρίτους (third party financing).

Ενδεικτικά, παρατίθενται κάποια στατιστικά στοιχεία για το παρόν και το μέλλον των ΑΠΕ σε παγκόσμιο επίπεδο [2]. Στον πίνακα 1.1 φαίνεται η υπάρχουσα κατάσταση, αλλά και μια ενδεχόμενη μελλοντική εξέλιξη της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής, ταξινομημένη με

βάση τη μορφή της ενέργειας ή του καυσίμου από το οποίο προέρχεται. Στον πίνακα 1.2 φαίνεται η αξιοποίηση των διαφόρων μορφών ΑΠΕ το έτος 2008 σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς και πιο συγκεκριμένα η εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρωπαϊκή Ένωση, στις αναπτυσσόμενες χώρες και στις 6 μεγαλύτερες χώρες (χωρίς τα μεγάλα υδροηλεκτρικά) .



Πίνακας 1.1. Παγκόσμια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά καύσιμο 2006-2030

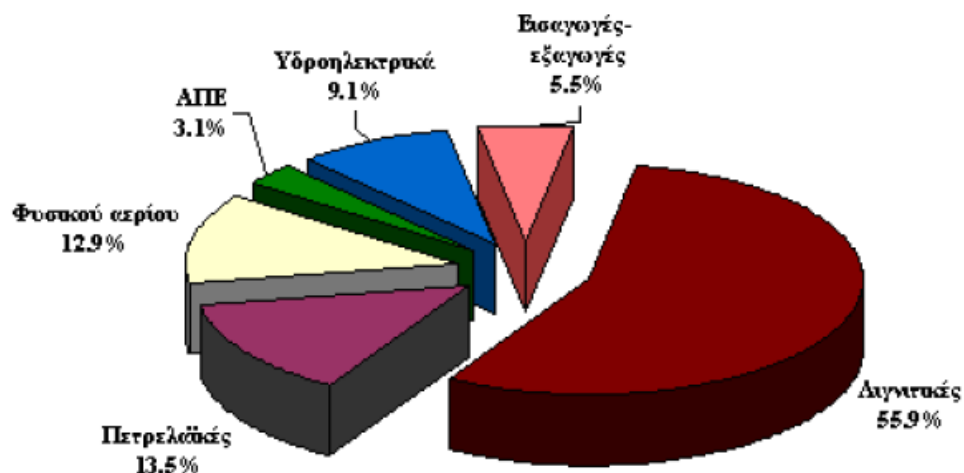


Πίνακας 1.2. Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ με στοιχεία έτους 2008
Σημείωση: χωρίς τα μεγάλα υδροηλεκτρικά

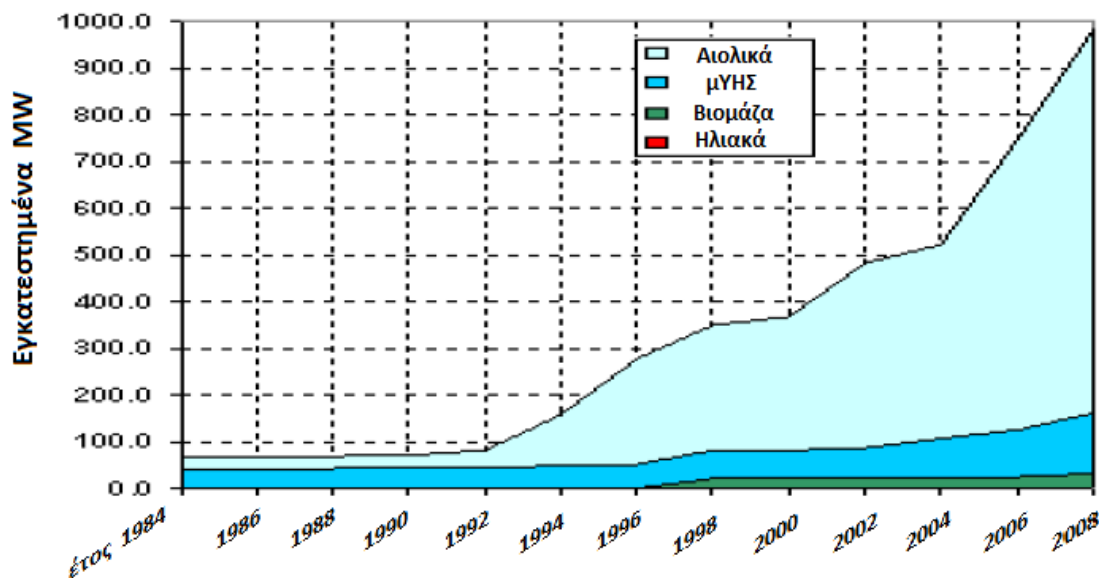
Η Ελλάδα είναι μια χώρα με αξιοποιήσιμο αιολικό και ηλιακό δυναμικό, πράγμα που ευνοεί την ανάπτυξη των ΑΠΕ σε πολλά μέρη της ηπειρωτικής και νησιωτικής χώρας. Στη

συνέχεια, παρατίθενται κάποια στατιστικά στοιχεία, που αντικατοπτρίζουν την διείσδυση των ΑΠΕ στην χώρα μας [3]. Στον πίνακα 1.3 φαίνεται η συμβολή των διαφόρων μορφών ενέργειας στην ελληνική ηλεκτροπαραγωγή το έτος 2005. Η κυριότερη μορφή καυσίμου εξακολουθεί να είναι ο εγχώριος λιγνίτης που καλύπτει το 55.9% του συνόλου των αναγκών παραγωγής. Το πετρέλαιο χρησιμοποιείται κυρίως στις νησιωτικές εγκαταστάσεις του μη διασυνδεδεμένου συστήματος με την ηπειρωτική χώρα. Οι εγκαταστάσεις ΑΠΕ περιλαμβάνουν τις συνδεδεμένες μονάδες που αποτελούν τα αιολικά πάρκα, τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, οι μονάδες αξιοποίησης βιομάζας και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Στον πίνακα 1.4 φαίνεται η εξέλιξη των διαφόρων μορφών ΑΠΕ στο ελληνικό σύστημα από το 1984 έως το 2007, με την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας να παρουσιάζει αλματώδη αύξηση.

Όπως φαίνεται από τα στατιστικά στοιχεία, η ανάπτυξη των ΑΠΕ τα επόμενα χρόνια αναμένεται αλματώδης, δημιουργώντας νέα δεδομένα στο τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Η νέα φιλοσοφία προσανατολίζεται στην αξιοποίηση ποικίλων ενεργειακών πηγών και στην ενσωμάτωση αυτών σε ένα ενιαίο υβριδικό σύστημα.



Πίνακας 1.3 Συμμετοχή μονάδων ηλεκτροπαραγωγής στην ετήσια κατανάλωση ενέργειας του 2005 στην Ελλάδα



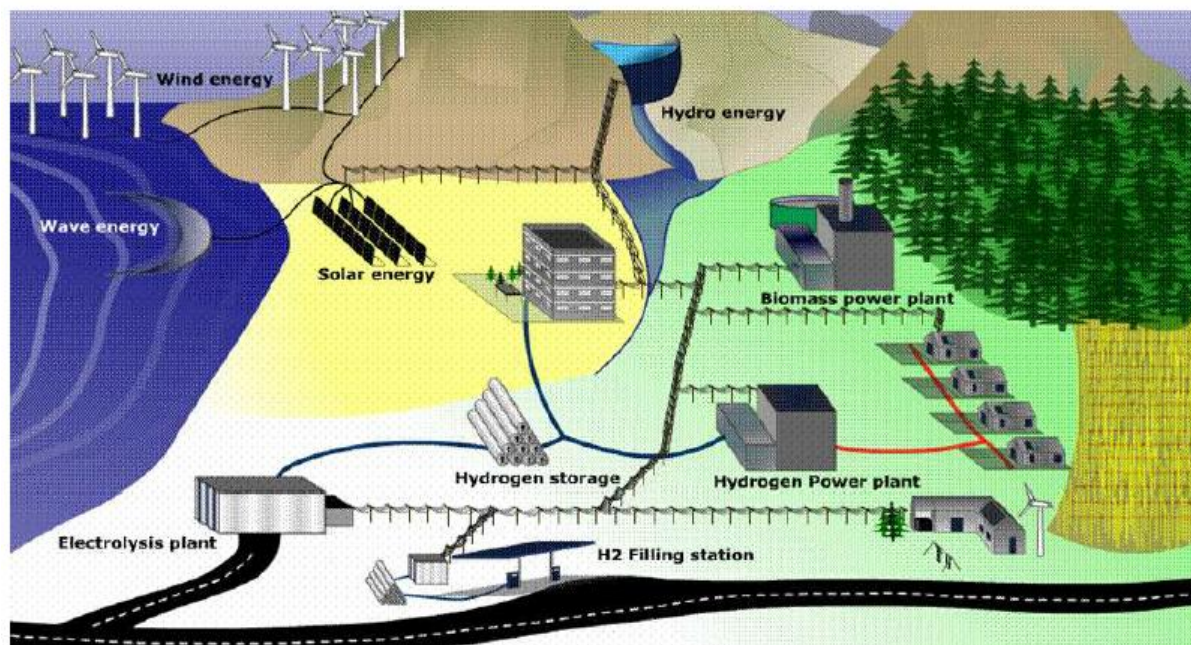
Πίνακας 1.4 Εγκατεστημένη ισχύς διαφόρων μορφών ΑΠΕ, τα έτη 1984-2008 στην Ελλάδα

1.2 Υβριδικά συστήματα ενέργειας

Ως Υβριδικό Σύστημα Ενέργειας (ΥΣΕ) ορίζεται οποιοδήποτε αυτόνομο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής, στο οποίο ενσωματώνονται περισσότερες από μία πηγές ενέργειας που λειτουργούν μαζί με τον απαραίτητο υποστηρικτικό εξοπλισμό, περιλαμβανομένης της αποθήκευσης της ενέργειας, με στόχο την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο ή στο σημείο εγκατάστασής του. Τα βασικά μέρη που συνιστούν ένα ΥΣΕ είναι: α) οι μονάδες παραγωγής της ενέργειας, β) η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας, γ) η μονάδα ελέγχου της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και συντονισμού των διάφορων διαθέσιμων επιλογών για βέλτιστη κάλυψη των αναγκών. Πιο συγκεκριμένα, ένα ΥΣΕ μπορεί να περιλαμβάνει μία συμβατική μονάδα παραγωγής σε συνδυασμό με μία τουλάχιστον μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, διατάξεις αποθήκευσης, συστήματα εποπτείας και ελέγχου, καθώς και σύστημα διαχείρισης φορτίου. Σύμφωνα με το νόμο 3468/2006, ως υβριδικό σύστημα ή αλλιώς υβριδικός σταθμός ορίζεται κάθε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που [4]:

- Χρησιμοποιεί μία, τουλάχιστον, μορφή ΑΠΕ.
- Η συνολική ενέργεια που απορροφά από το δίκτυο, σε ετήσια βάση, δεν υπερβαίνει το 30% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για την πλήρωση του συστήματος αποθήκευσης του σταθμού αυτού.
- Η μέγιστη ισχύς παραγωγής των μονάδων ΑΠΕ του σταθμού δε μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αποθήκευσης του σταθμού, προσαυξημένη κατά ποσοστό μέχρι 20%.

Το σχήμα 1.5 δείχνει ένα υβριδικό σύστημα ενέργειας, που αξιοποιεί διάφορες μορφές ΑΠΕ, δίνοντας έμφαση στην χρησιμοποίηση του υδρογόνου και του βιοντίζελ ως βασικά καύσιμα .



Σχήμα 1.5 Παράδειγμα Υβριδικού Συστήματος Ενέργειας, που χρησιμοποιεί διάφορες ΑΠΕ

Ως κυριότερα οφέλη από την αξιοποίηση των ΥΣΕ θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν τα εξής :

- Διασφαλίζουν την αξιοπιστία του συστήματος, καθώς οι ΑΠΕ εξαρτώνται από καιρικές συνθήκες, οι οποίες εμφανίζουν μεγάλες διακυμάνσεις, όπως η ταχύτητα ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία.
- Συμβάλλουν στην διαφοροποίηση των ενεργειακών πηγών (energy diversification), αποφεύγοντας έτσι την εξάρτηση από συγκεκριμένες ενεργειακές πηγές.
- Επιτυγχάνουν την οικονομικότερη λειτουργία των συμβατικών μονάδων, καθώς αυτές φορτίζονται με σταθερότερο φορτίο και πλησίον της χαμηλότερης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες υβριδικών συστημάτων, τα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο και τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα.

1.2.1 Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής σε κεντρικό δίκτυο

Αν ένας υβριδικός σταθμός συνδεθεί σε δίκτυο απείρου ζυγού, τότε γίνεται λόγος για διεσπαρμένη παραγωγή. Δεδομένου ότι το κεντρικό δίκτυο έχει την ευθύνη για τον έλεγχο της τάσης και της συχνότητας, αλλά και για την παραγωγή άεργου ισχύος, ο σχεδιασμός του υβριδικού συστήματος απλοποιείται, καθώς δεν απαιτούνται συστήματα ελέγχου. Όταν ζητείται περισσότερη ενέργεια από αυτήν που μπορεί να παράγει ο σταθμός, το έλλειμμα ενέργειας παρέχεται από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Παρομοίως, τυχούσα περίσσεια ενέργειας που παράγεται από το υβριδικό σύστημα μπορεί να απορροφηθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο με κάποιους περιορισμούς για την στιγμιαία παραγωγή ισχύος του ΥΣΕ. Στην περίπτωση ασθενούς δικτύου, όπου η ρύθμιση τάσης και συχνότητας μπορεί να επηρεαστεί από την ύπαρξη του ΥΣΕ, απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός και διατάξεις ελέγχου [4].

1.2.2 Αυτόνομα υβριδικά συστήματα

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα (ΑΥΣ) χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση απομονωμένων φορτίων/φορτίων ειδικού σκοπού ή απομονωμένων/νησιωτικών περιοχών, που δεν είναι συνδεδεμένες με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε δεν υπάρχει σύστημα μεταφοράς παρά μόνο σύστημα διανομής. Η σημαντικότερη διαφορά του αυτόνομου σε σχέση με ένα διασυνδεδεμένο υβριδικό σύστημα είναι ότι πρέπει να μπορεί να παρέχει όλη την ενέργεια που ζητείται οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή να κάνει αποκοπή φορτίου, όταν αυτό δεν είναι εφικτό. Επιπλέον, οφείλει να έχει την ικανότητα ρύθμισης συχνότητας και παραγωγής άεργου ισχύος, ώστε να ρυθμίζει την τάση του δικτύου. Όταν η ηλεκτρική παραγωγή από ΑΠΕ ξεπερνά το φορτίο, η περίσσεια ενέργειας πρέπει να αποθηκευτεί ή και να απορριφθεί με κάποιο τρόπο, ώστε να μην προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα. Για τους παραπάνω λόγους, τα περισσότερα ΑΥΣ περιλαμβάνουν διατάξεις αποθήκευσης και συστήματα ελέγχου και διαχείρισης φορτίου [4].

1.3 Φωτοβολταϊκή ενέργεια – Κυψέλη καυσίμου (PVFC)

Μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών, η φωτοβολταϊκή ενέργεια χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές χαμηλής ενέργειας. Επίσης, αποτελεί έναν πολλά υποσχόμενο τομέα έρευνας και ανάπτυξης για χρήστες μεγάλης κλίμακας, καθώς η κατασκευή συσκευών φωτοβολταϊκών χαμηλού κόστους, αποτελεί πλέον μια πραγματικότητα [5]. Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες είναι αυτές που μετατρέπουν απευθείας την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και έχουν πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα. Μερικά απ' αυτά είναι : είναι ανεξάντλητες, δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον, είναι αθόρυβες, χωρίς περιστρεφόμενα μέρη και με ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανεξάρτητη από το μέγεθος. Λόγω των πλεονεκτημάτων αυτών, έχουν

γίνει πλέον δημοφιλείς για εφαρμογές μικρής και μεγάλης κλίμακας. Με την αυξανόμενη εισχώρηση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συσκευών, πολλά συστήματα αντι-ρύπανσης μπορούν να λειτουργήσουν από την ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια, όπως για παράδειγμα ο καθαρισμός του πόσιμου νερού μέσω ηλεκτροχημικής επεξεργασίας ή η αναστολή της ερημοποίησης από φωτοβολταϊκή άντληση νερού με δένδροφύτευση.

Από πλευράς λειτουργικότητας, μια φωτοβολταϊκή μονάδα παραγωγής ενέργειας παρουσιάζει τεράστιες διακυμάνσεις στην αποδιδόμενη ενέργεια, λόγω των μεταβαλλόμενων καιρικών συνθηκών. Αυτά τα φαινόμενα μπορούν να προκαλέσουν λειτουργικά προβλήματα, όπως εκτεταμένες αποκλίσεις στη συχνότητα. Σε πολλές περιοχές του κόσμου, η διακυμαινόμενη φύση της ηλιακής ακτινοβολίας, σημαίνει ότι οι γεννήτριες παραγωγής αμιγώς φωτοβολταϊκής ενέργειας, για εφαρμογές εκτός δικτύου, πρέπει να είναι μεγάλες και κατά συνέπεια, ακριβές. Μία μέθοδος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα είναι ο συνδυασμός των φωτοβολταϊκών με άλλες πηγές ενέργειας, όπως ντίζελ, κυψέλες καυσίμου ή μπαταρία. [6], [7] και [8]. Η εφεδρική γεννήτρια ντίζελ για την φωτοβολταϊκή ενέργεια, μπορεί μεν να εξασφαλίσει παραγωγή ενέργειας επί 24ώρου βάσεως όμως έχει και σημαντικά μειονεκτήματα, όπως ο θόρυβος και τα ρυπογόνα αέρια. Επίσης, οι εφεδρικές γεννήτριες ντίζελ, για να έχουν έναν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας, πρέπει το εύρος της ενέργειας να είναι πάνω από 5KW, το οποίο είναι υπερβολικά υψηλό για έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Για μεσαίο ή χαμηλό εύρος η τεχνολογία αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αρκετά αποτελεσματικά.

Η εφεδρική γεννήτρια κυψέλης καυσίμου αποτελεί μια δελεαστική εναλλακτική λύση. Κατά βάση, έχει πολύ καλά τεχνικά χαρακτηριστικά, τα οποία την καθιστούν ενδιαφέρουσα για αυτόνομη παραγωγή ενέργειας: υψηλές τιμές αποδοτικότητας, χαμηλό κόστος συντήρησης, χαμηλό θόρυβο, άμεση απόκριση φορτίου και έλλειψη ρυπογόνων αερίων που βλάπτουν το περιβάλλον. Επί του παρόντος, τα βασικά μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος, η σχετικά χαμηλή αξιοπιστία και η ανάγκη για συχνή συντήρηση. Ευτυχώς, μέσα στα επόμενα χρόνια, αναμένεται να σημειωθεί αλματώδης πρόοδος πάνω σε όλους αυτούς τους τομείς. Κατά συνέπεια, είναι απολύτως λογικό να εξετάζεται η πιθανότητα της χρήσης κυψελών καυσίμου σε συνδυασμό με ένα σύστημα φωτοβολταϊκών, τόσο για αυτόνομες γεννήτριες παραγωγής ενέργειας, όσο και για συνδεδεμένες στο δίκτυο. Λόγω της δυνατότητας άμεσης απόκρισης του συστήματος παραγωγής ενέργειας με κυψέλη καυσίμου, ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών/ κυψέλης καυσίμου (PVFC) θα μπορούσε να λύσει το εγγενές πρόβλημα της διακοπτόμενης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν τα φωτοβολταϊκά [5].

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχει η παραγωγή ενέργειας από κυψέλη καυσίμου, είναι σχετικά μικρές, σε αντίθεση με άλλες πηγές ενέργειας που βασίζονται στη χρήση ορυκτών καυσίμων. Καθώς οι χημικές αντιδράσεις που συντελούνται μέσα στην κυψέλη

καυσίμου επιτυγχάνονται με τη χρήση καταλύτη, απαιτείται ένα καύσιμο, με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο [9]. Οι χαμηλές εκπομπές καυσαερίων από το σύστημα παραγωγής ενέργειας με κυψέλη καυσίμου, αποτελούν ένα χαρακτηριστικό που μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να αντισταθμίσει το κόστος εγκατάστασης εξοπλισμού για τον έλεγχο των εκπομπών καυσαερίου. Ωστόσο, για να έχει η κυψέλη καυσίμου θετικές συνέπειες για το περιβάλλον, πρέπει, το υδρογόνο που θα χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο, να προέρχεται από κάποια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και όχι από ορυκτό καύσιμο, κάτι το οποίο στις μέρες μας δεν εφαρμόζεται ακόμα. Κατά συνέπεια, το σύστημα κυψέλης καυσίμου παρουσιάζει μια τεράστια δυναμική συνύπαρξης με μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια, σε ένα αυτόνομο σύστημα παραγωγής ενέργειας, όπως αυτό που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

1.4 Στόχοι της μελέτης

Έχει ήδη τεκμηριωθεί επαρκώς ότι, σε μια φωτοβολταϊκή πηγή ενέργειας πρέπει να ενσωματωθεί κάποια άλλη πηγή ενέργειας τόσο στα αυτόνομα όσο και στα συνδεδεμένα με το δίκτυο συστήματα, καθώς η πρώτη δεν μπορεί να παράσχει ισχύ κατά τη διάρκεια των νυκτερινών ωρών ή υπό νεφελώδεις καιρικές συνθήκες. Το υπό εξέταση σύστημα, είναι ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών/κυψέλης καυσίμου υδρογόνου, το οποίο αποτελείται από μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια, έναν αλκαλικό ηλεκτρολύτη νερού, μια συστοιχία κυψελών καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων, μια μπαταρία ως δευτερεύουσα εφεδρική μονάδα και μια δεξαμενή για την αποθήκευση του υδρογόνου. Αυτό το σύστημα στοχεύει να αποτελέσει έναν μελλοντικό ανταγωνιστή των υβριδικών συστημάτων φωτοβολταϊκών/ντίζελ, κυρίως από περιβαλλοντικής σκοπιάς. Η παραγωγή υδρογόνου στο σύστημα, όπως προαναφέραμε, γίνεται μέσω της ηλεκτρόλυσης μορίων νερού και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Η μέθοδος αυτή, αποτελεί έναν πολύ αποτελεσματικό τρόπο παραγωγής και εκμετάλλευσης καθαρού υδρογόνου.

Για τη μελέτη του συστήματος, μελετήθηκαν τα φυσικά χαρακτηριστικά των μερών που το αποτελούν και παρήχθησαν οι αντίστοιχοι μαθηματικοί τύποι. Το περιβάλλον Matlab/Simulink χρησιμοποιήθηκε για την δυναμική προσομοίωση του συστήματος. Σε γενικές γραμμές, οι στόχοι αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι :

- Συλλογή και η σύνθεση των δεδομένων που είναι κατάλληλα να περιγράψουν τη λειτουργία του συστήματος και το προφίλ του φορτίου.
- Απεικόνιση και ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος με την παρακολούθηση της ροής ισχύος σε μεσοπρόθεσμο χρόνο, όπως μία ημέρα ή μία εβδομάδα.
- Δημιουργία ενός μοντέλου που προσομοιώνει με αξιοπιστία το σύστημα, ικανού να προβλέψει την απόδοση του πραγματικού συστήματος υδρογόνου PVFC.
- Παραμετροποίηση του συστήματος με τον πιο προσαρμόσιμο δυνατό τρόπο, ώστε τα μοντέλα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια μεγαλύτερη ποικιλία εφαρμογών.

Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι κάποιες από τις μονάδες ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση του συστήματος, όπως οι μετατροπείς DC/AC, πάρθηκαν από τη βιβλιοθήκη SimPowerSystems που παρέχει το Simulink.

1.5 Δομή εργασίας

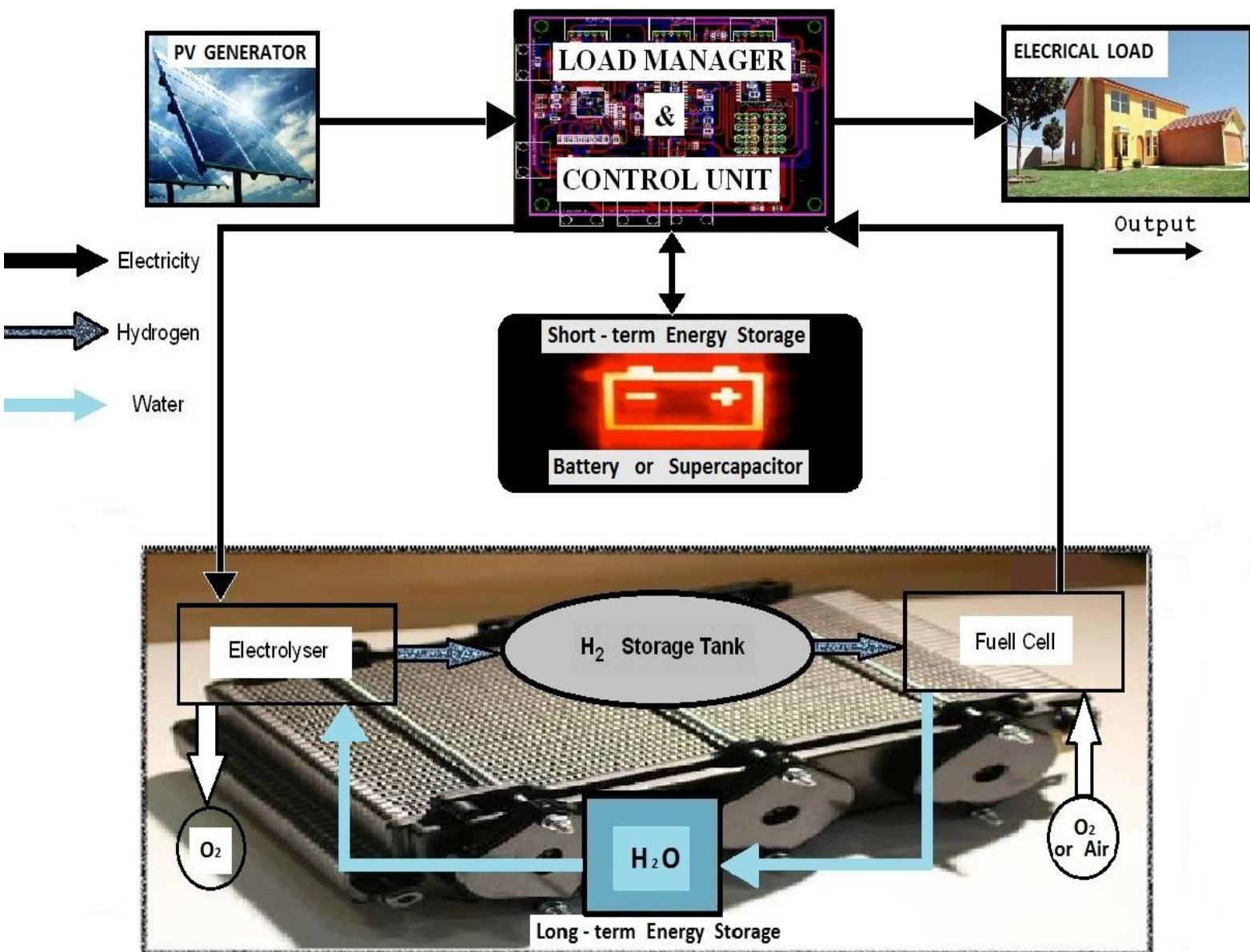
Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στην έννοια των υβριδικών συστημάτων, των φωτοβολταϊκών και των κυψελών καυσίμου, και περιγράφει τους στόχους της εργασίας αυτής. Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται μια συνοπτική παρουσίαση του συστήματος, κάποιες πληροφορίες για τα μέρη από τα οποία αποτελείται και η ανάλυση της στρατηγικής ελέγχου του συστήματος. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση και η εφαρμογή του Simulink στην φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Το τέταρτο κεφάλαιο περιέχει τη μαθηματική μοντελοποίηση και την εφαρμογή του Simulink στην συστοιχία κυψελών καυσίμου, στον ηλεκτρολύτη και στη δεξαμενή υδρογόνου. Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται και συζητούνται τα αποτελέσματα. Τέλος στο έκτο κεφάλαιο, συμπεριλαμβάνονται τα συμπεράσματα αυτής της διπλωματικής εργασίας καθώς και κάποιες κατευθύνσεις για μελλοντική μελέτη και επέκταση της δουλειάς.

Κεφάλαιο 2 – Συνοπτική παρουσίαση του συστήματος

Η αξιοποίηση των διακοπτόμενων φυσικών πηγών ενέργειας, όπως ο ήλιος, ο αέρας και το νερό, απαιτεί την ύπαρξη κάποιας μορφής αποθήκευσης ενέργειας. Η ιδέα της χρήσης υδρογόνου ως ουσίας για την αποθήκευση ενέργειας, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1. Στο πόνημα αυτό, εξετάζεται ένα υβριδικό σύστημα, βασισμένο στην φωτοβολταϊκή ενέργεια και στην τεχνολογία του υδρογόνου. Εστιάζοντας στα μέρη της τεχνολογίας υδρογόνου, αυτά που χρειαζόμαστε είναι : μια μονάδα παραγωγής υδρογόνου (ηλεκτρολύτη), μια μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου (δεξαμενή) και μια μονάδα αξιοποίησης του υδρογόνου (συστοιχία κυψελών καυσίμου PEM). Ωστόσο, το σύστημα βασίζεται σε διακοπτόμενες πηγές ενέργειας και πιθανόν να παρουσιάσει διακυμάνσεις στην εισροή ενέργειας, σε ημερήσια και ωριαία βάση ή ακόμα και μέσα σε ένα λεπτό. Συνεπώς, πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι ο βασικός σκοπός της ύπαρξης ενός συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου είναι να αποθηκεύει ενέργεια για μικρά και για μεγάλα χρονικά διαστήματα (π.χ. από τη μία ώρα στην άλλη, ή από την μία εποχή στην άλλη). Έτσι, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ακόμα μια μικρή μονάδα αποθήκευσης ενέργειας, η οποία θα παρέχει ισχύ σε ακραίες περιπτώσεις, όταν το σύστημα PVFC θα αδυνατεί να ανταποκριθεί στο φορτίο και η οποία θα πρέπει να δουλεύει διαρκώς, ώστε να χρησιμοποιείται με την ρύθμιση της τάσης. Επίσης, είναι απαραίτητο ένα σύστημα ελέγχου, το οποίο θα συντονίζει και θα καθοδηγεί τη λειτουργία των μερών του συστήματος. Το κεφάλαιο αυτό, αποτελείται από τέσσερα μέρη:

- Φωτοβολταϊκή γεννήτρια
- Σύστημα ενέργειας υδρογόνου και μέρη από τα οποία αποτελείται
- Μπαταρία
- Στρατηγική ελέγχου

Σε αυτό το μέρος, θα δοθεί μία σύντομη περιγραφή των επιμέρους μερών, ώστε το σύστημα φωτοβολταϊκών/ κυψέλης καυσίμου υδρογόνου να γίνει πιο εύκολα κατανοητό.

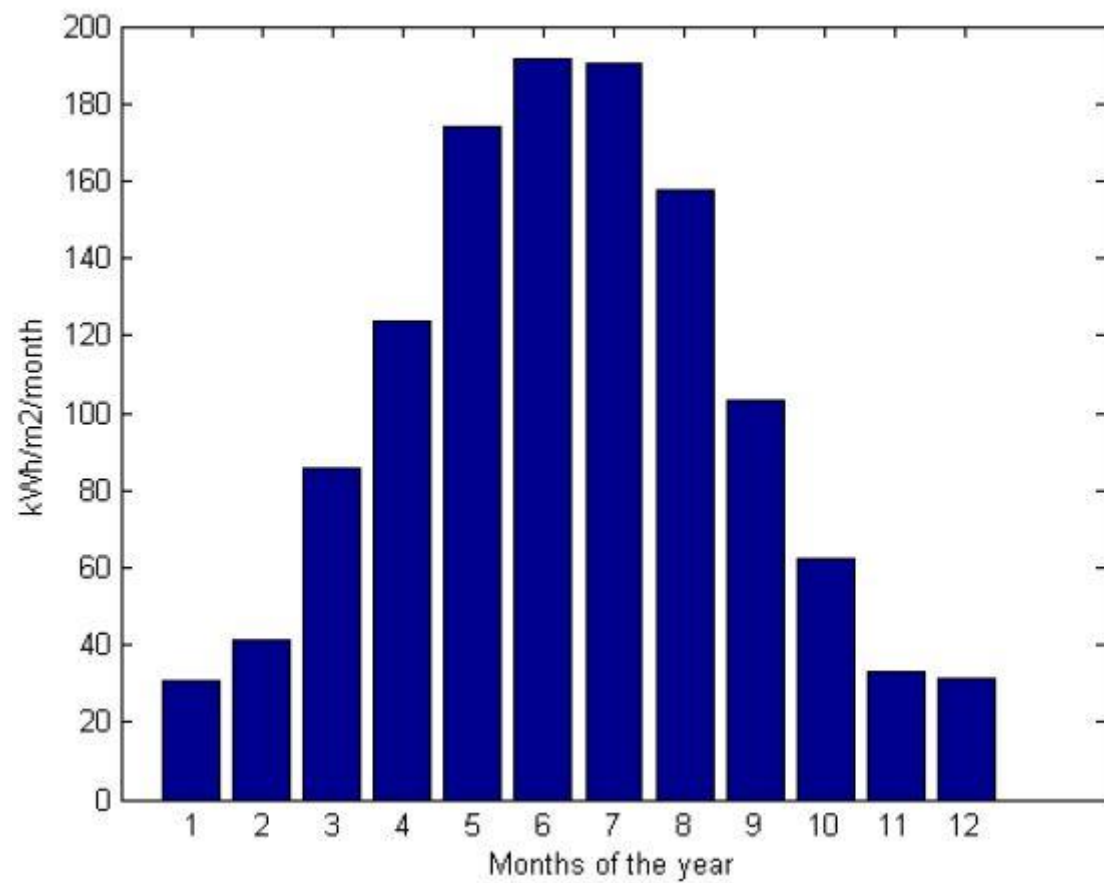


Σχήμα 2.1 Σχέδιο του αυτόνομου υβριδικού συστήματος PVFC

2.1 Φωτοβολταϊκή παραγωγή

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, οι βιομηχανία των φωτοβολταϊκών, προσέλκυσε το ενδιαφέρον πολύ μεγάλων εταιρειών ενέργειας και κυβερνητικών υπηρεσιών. Με το κεφάλαιο που επενδύθηκε, συντελέστηκε μια γιγάντια επιτάχυνση στην ανάπτυξη των φ/β πλαισίων. Στις μέρες μας, είναι διαθέσιμες ολόκληρες γραμμές παραγωγής με φ/β πλαίσια που μπορούν να παραμείνουν άφθαρτα για δεκαετίες. Επίσης, το κόστος έχει μειωθεί σημαντικά, χάρη στον αυτοματισμό, τα καλύτερα σχέδια και τις βελτιωμένες κατασκευαστικές τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών [10].

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε μήνα του χρόνου (στην περιοχή του Αιγαίου) .



Σχήμα 2.2. Πυκνότητα Ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήνα

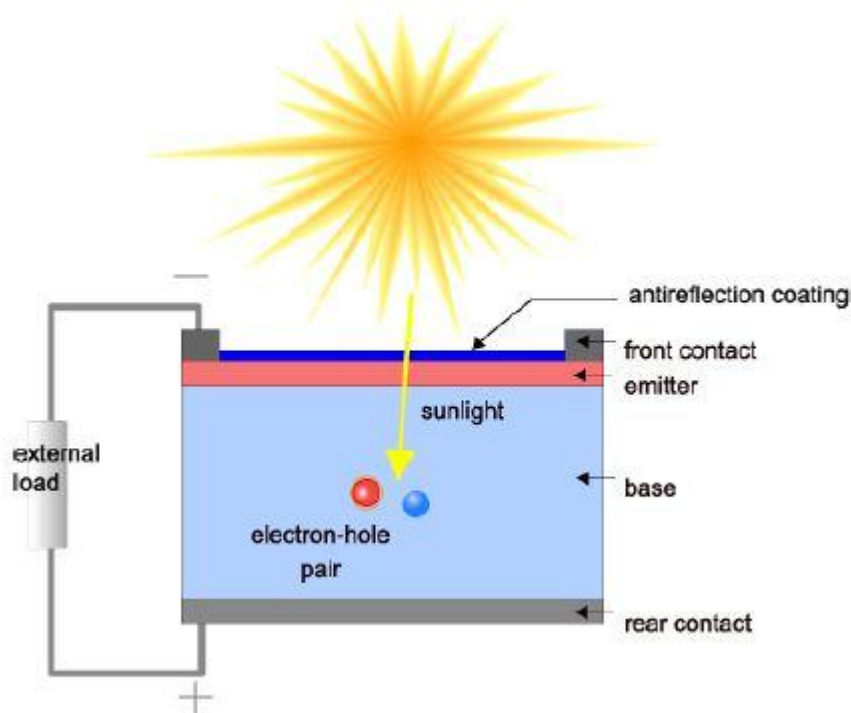
Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η μέση συνολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, για διάφορες περιοχές της Ελλάδας, με στοιχεία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος τον Ιούλιο του 2010 .

Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΙΑ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Ελληνικό)	63,0	79,0	117,7	154,3	195,4	214,0	222,4	202,7	152,6	109,0	70,7	55,7
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	63,3	77,7	118,9	152,7	190,4	207,4	214,5	198,6	156,0	111,1	68,1	54,4
Αγρίνιο	63,5	78,3	119,4	148,4	189,9	214,1	224,2	200,3	151,3	109,8	69,8	55,1
Αγχίαλος	61,3	74,3	112,5	149,2	189,7	212,7	217,4	195,1	146,8	98,8	63,1	51,5
Αλεξανδρούπολη	50,7	68,9	107,3	141,8	182,8	205,8	211,6	192,3	144,2	99,4	57,8	43,7
Αλιάρτος	51,0	70,0	114,0	158,0	206,0	216,0	220,0	204,0	153,0	102,0	66,0	49,0
Ανδραβίδα	68,4	83,4	128,4	159,5	200,2	220,6	228,4	205,5	156,1	115,6	75,2	60,1
Αραξος	62,6	78,6	119,7	155,6	196,1	210,9	217,8	197,6	152,4	110,2	69,4	54,6
Αργος (Πυργέλα)	68,7	83,6	127,7	159,5	202,5	220,8	229,0	206,4	157,2	115,5	74,8	59,2
Αργοστόλι	65,0	80,0	124,9	157,3	204,3	219,4	226,1	203,1	155,6	112,6	72,6	56,1
Ζάκυνθος	64,2	77,6	110,1	158,8	190,8	200,1	218,5	203,8	154,0	104,3	65,4	52,8
Άρτα	65,5	79,7	120,4	149,1	190,2	211,2	218,1	196,4	150,6	110,0	69,5	56,2
Ηράκλειο	65,6	81,6	125,0	166,5	207,3	222,4	227,1	207,0	163,0	117,3	78,6	61,2
Θεσσαλονίκη	52,6	67,5	103,2	140,7	179,1	198,6	209,5	184,7	136,7	91,4	56,6	45,5
Ιεράπετρα	73,0	89,0	137,0	174,0	210,0	220,0	224,0	205,0	165,0	125,0	89,0	69,0
Ιωάννινα	51,8	66,4	105,2	134,9	178,3	202,1	212,0	190,3	136,5	96,1	57,6	45,1
Καλαμάτα	68,2	82,3	126,1	156,2	198,7	216,0	222,0	200,9	154,9	114,5	75,2	59,3
Καστοριά	57,6	71,3	111,2	141,1	173,6	201,8	206,3	185,5	138,5	97,0	60,0	47,7
Κέρκυρα	57,7	73,5	116,7	149,9	195,4	213,6	221,0	197,8	148,2	103,1	64,4	50,7
Κομοτηνή	50,0	65,0	105,0	145,0	188,0	209,0	215,0	193,0	145,0	99,0	58,0	45,0
Κόνιτσα	53,0	65,0	112,0	138,0	190,0	200,0	216,0	194,0	141,0	99,0	63,0	50,0
Κόρινθος (Βέλο)	65,4	82,8	123,4	157,9	201,7	218,3	223,2	201,9	154,2	111,9	72,0	55,2
Κύθηρα	68,0	81,0	127,0	161,0	210,0	220,0	223,0	204,0	160,0	117,0	78,0	60,0
Λαμία	59,4	73,1	113,9	150,5	188,8	210,3	214,1	193,4	145,5	100,3	65,3	52,1
Λάρισα	55,1	71,4	112,1	151,1	190,9	210,8	215,8	194,3	145,9	97,8	61,2	47,8
Λήμνος	51,1	69,6	112,3	154,3	199,5	215,3	220,9	198,5	150,8	104,6	61,3	46,0
Μεθώνη	62,0	78,0	125,0	155,0	207,0	215,0	220,0	199,0	157,0	116,0	77,0	57,0
Μήλος	56,0	67,0	120,0	175,0	213,0	223,0	226,0	205,0	164,0	112,0	77,0	52,0
Μυτιλήνη	52,0	70,0	113,0	156,0	209,0	219,0	223,0	201,0	156,0	109,0	67,0	50,0
Νάξος	60,3	77,0	122,6	161,2	204,7	220,4	224,5	204,8	159,1	115,9	73,7	55,6
Πάρος	60,0	80,0	125,0	168,0	211,0	220,0	223,0	202,0	160,0	117,0	75,0	58,0
Πάτρα	55,0	72,0	124,0	147,0	200,0	215,0	218,0	197,0	153,0	107,0	66,0	53,0
Πύργος	68,4	83,1	127,5	157,9	200,4	215,6	223,8	202,1	155,0	115,9	75,5	59,3
Ρέθυμνο	62,0	81,0	119,0	164,0	211,0	218,0	223,0	204,0	160,0	106,0	81,0	58,0
Ρόδος	69,9	85,1	130,8	164,0	203,0	217,2	225,1	204,3	158,9	120,2	79,2	61,2
Σάμος	64,9	82,1	126,7	162,5	206,8	224,9	230,6	209,6	163,7	120,5	78,6	58,5
Σέρρες	50,8	68,0	105,7	141,0	180,5	202,8	209,7	187,7	140,8	94,7	56,5	43,7
Σητεία	66,5	83,0	128,4	165,2	207,4	223,2	227,1	207,5	163,7	119,3	80,4	61,9
Σκύρος	51,2	69,1	109,9	153,3	197,2	214,2	219,7	198,8	151,7	102,5	62,9	47,7
Σούδα	65,0	81,7	130,7	166,5	208,5	221,9	228,5	209,3	163,6	116,3	76,8	60,3
Σύρος	58,0	80,0	121,0	172,0	212,0	219,0	225,0	204,0	160,0	199,0	74,0	57,0
Τανάγρα	59,1	74,2	112,7	151,9	194,0	215,4	222,0	201,3	153,1	104,5	64,7	51,2
Τρίκαλα (Ημαθίας)	57,3	72,2	105,6	140,2	178,0	202,9	206,4	185,8	138,6	94,0	59,7	49,1
Τυμπάκιο	73,4	90,5	137,5	169,0	207,8	222,9	228,7	209,8	166,3	127,2	85,9	67,7
Χανιά	62,0	80,0	124,0	167,0	212,0	220,0	225,0	205,0	161,0	111,0	78,0	59,0
Χίος	55,0	72,0	119,0	161,0	210,0	220,0	225,0	203,0	159,0	116,0	71,0	53,0
Χρυσούπολη	57,5	78,0	111,3	137,6	189,9	204,0	208,8	187,6	141,8	97,7	62,1	43,3

Πίνακας 2.1. Μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (kWh/m²)

2.1.1 Γενική περιγραφή της φωτοβολταϊκής κυψέλης

Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η βασική πρώτη ύλη που είναι απαραίτητη για όλες σχεδόν τις φ/β κυψέλες που διατίθενται στην αγορά, είναι η σιλικόνη υψηλής καθαρότητας (Si), η οποία λαμβάνεται από άμμο ή χαλαζία. Βασικά, για την παραγωγή φ/β κυψελών, χρησιμοποιούνται οι εξής τρεις τεχνολογίες: πολυκρυσταλλικές, μονοκρυσταλλικές και άμορφες κυψέλες σιλικόνης [11]. Η τεχνολογία της κρυσταλλικής σιλικόνης, χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς ή ως βάση για την τεχνολογία παραγωγής ηλιακής ενέργειας. Γενικά, η τεχνολογία της φ/β κυψέλης, βασίζεται στον βαθμό απόδοσης και στο κατασκευαστικό κόστος. Ο βαθμός απόδοσης, καθορίζεται από την ικανότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών να απορροφούν την ενέργεια του φωτός σε μεγάλο εύρος και στο ενεργειακό διάκενο των υλικών.



Σχήμα 2.3. Φωτοβολταϊκό κύτταρο

Στον πίνακα 2.1 δίνονται κατά προσέγγιση οι τιμές του ενεργειακού διακενου των υλικών και οι μέγιστες πραγματικές και θεωρητικές τιμές της αποδοτικότητας σε θερμοκρασία δωματίου, για κάποια από τα υλικά που χρησιμοποιούνται [12] .

Material	Band gap [eV]	Max. current density [mA/cm ²]	Max. theoretical efficiency [%]
Silicon, Si	1.12	43.4	28
Gallium arsenide, GaAs	1.4	31.8	30
Cadmium telluride, CdTe	1.5	28.5	29
Amorphous silicon, a-Si	1.65	21.7	27

Πίνακας 2.2. Ενεργειακό διάκενο, μέγιστη πυκνότητα ρεύματος και θεωρητική απόδοση διαφόρων διαφορετικής τεχνολογίας ημιαγωγών .

Η κρυσταλλική και η πολυκρυσταλλική σιλικόνη, είναι τα δύο υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται στις φ/β κυψέλες. Τα βασικά πλεονέκτημα που έχουν οι κυψέλες σιλικόνης είναι η αφθονία σιλικόνης που υπάρχει στη γη. Η φ/β κυψέλη αποτελείται από διάφορα στρώματα ημιαγωγών υλικών με διαφορετικές ατομικές ιδιότητες. Σε μία τυπική πολυκρυσταλλική κυψέλη, το μεγαλύτερο μέρος της πρώτης ύλης είναι η σιλικόνη, αναμειγμένη με μια μικρή ποσότητα βορίου, για να δώσει έναν θετικό ή p-type χαρακτήρα. Ένα λεπτό στρώμα στο μπροστά τμήμα της κυψέλης, έχει ενισχυθεί με φώσφορο, ώστε να δώσει έναν αρνητικό ή n-type χαρακτήρα. Η διεπαφή των δύο αυτών στρωμάτων παράγει ένα ηλεκτρικό πεδίο και διαμορφώνει τη λεγόμενη «σύζευξη των κυψελών» [13] .

Όταν η κυψέλη εκτίθεται στο ηλιακό φως, ένα ποσοστό των εισερχόμενων φωτονίων απορροφάται στην περιοχή της σύζευξης (ένωσης) απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια στον κρύσταλλο σιλικόνης. Εάν τα φωτόνια έχουν αρκετή ενέργεια, τα ηλεκτρόνια θα μπορέσουν να ξεπεράσουν το ηλεκτρικό πεδίο της ένωσης και να κινηθούν μέσω της σιλικόνης σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Η κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος θα είναι αντίθετη από την κατεύθυνση που θα έχει εάν η συσκευή λειτουργεί ως δίοδος.

Μια φ/β γεννήτρια αποτελείται από έναν αριθμό πλαισίων (modules) που σχηματίζονται από τη διασύνδεση των φ/β κυψελών, που συνδέονται σε μία σειριακή – παράλληλη σύνδεση ώστε να εξασφαλίζουν την απαιτούμενη τάση και το ρεύμα. Συνεπώς, η απόδοση της φ/β γεννήτριας εξαρτάται από τα πλαίσια (modules) που συνθέτουν τη γεννήτρια και από τις κυψέλες που συνθέτουν τα πλαίσια. Το σημείο λειτουργίας της γεννήτριας, καθορίζεται από την διασταύρωση των χαρακτηριστικών ρεύματος-τάσης (I-V) με τη γραμμή φορτίου, του φορτίου που είναι συνδεδεμένο σε αυτή [5].

2.1.2 Πηγές απώλειας σε μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια

1. Απώλειες αντανάκλασης των Φ/Β πλαισίων : Όταν η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας διαφέρει από την κατακόρυφη ως προς το έδαφος κατεύθυνση

της φ/β γεννήτριας, δημιουργούνται απώλειες αντανάκλασης, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν υπερεκτίμηση της αναμενόμενης φ/β παραγωγής βάσει των ιδιοτήτων του πεδίου. Οι απώλειες αυτές, μπορούν να μειωθούν εάν η επιφάνεια καλυφθεί με ένα στρώμα «αντι-αντανάκλασης» [13].

2. Απώλειες που σχετίζονται με το φάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας : Η ηλιακή ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από ευρεία ηλιακή κατανομή, επειδή η τιμή της μάζας του αέρα αλλάζει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η ηλιακή ακτινοβολία περιέχει φωτόνια με ακραία διαφορετικές ενέργειες. Τα φωτόνια που έχουν ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο (band gap) δεν μπορούν να απορροφηθούν και κατά συνέπεια δεν χρησιμοποιούνται. Στις περιπτώσεις όπου τα φωτόνια έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο, αξιοποιείται μόνο το πόσο της ενέργειας που είναι ίσο με το διάκενο. Το υπόλοιπο, μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια στο ηλεκτρόνιο που απελευθερώθηκε από το δεσμό και τελικά σε θερμότητα στο δικτυωτό πλέγμα κρυστάλλου.
3. Απώλειες αστοχίας (mismatch) μεταξύ των Φ/Β πλαισίων : Τα χαρακτηριστικά ρεύματος – τάσης των φ/β πλαισίων, του ίδιου τύπου και του ίδιου κατασκευαστή μπορούν να ποικίλουν από πλαίσιο σε πλαίσιο. Με βάση τις πληροφορίες που δίνονται από τους προμηθευτές, το σημείο λειτουργίας με τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ (Maximum Power Point) ενός πλαισίου υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας (STC) μπορεί να αποκλίνει μέχρι και 10% από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του πλαισίου [14].
4. Απώλειες σκίασης : Η παρουσία μερικής σκίασης, επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της φ/β γεννήτριας και ιδιαίτερα την μέγιστη παραγόμενη ισχύ, τον συντελεστή πλήρωσης και την αποδοτικότητα της γεννήτριας. Συνεπώς, η επιλογή κατάλληλης τοποθεσίας για την φ/β γεννήτρια είναι πολύ σημαντική, ώστε να αποφεύγεται η μερική σκίαση κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της του φ/β συστήματος [15]. Ο συντελεστής πλήρωσης που προαναφέρθηκε καθορίζεται από τον λόγο της ισχύος εξόδου στο σημείο λειτουργίας με τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ, προς το γινόμενο του πολλαπλασιασμού της τάσης ανοιχτοκύκλωσης (V_{oc} , open-circuit voltage) με το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc} , short-circuit current)
5. Εξωτερικές απώλειες : Σε ένα πραγματικό σύστημα, η ισχύς εξόδου δεν είναι ακριβώς ίση με την ισχύ εισόδου. Για να υπολογίσουμε την ισχύ αυτή, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι απώλειες που προκαλούνται από την πτώση της τάσης εξαιτίας των αντιστάσεων των καλωδίων και των διόδων αντεπιστροφής. Οι απώλειες που προκαλούνται από τις αντιστάσεις των συνδεδεμένων καλωδίων (ωμικές απώλειες) πρέπει να υπολογίζονται βάσει του μήκους και της διαμέτρου των καλωδίων. Αυτή η

αντίσταση θεωρείται σειριακή και συζητιέται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Σε κάθε ακολουθία που αποτελεί την φ/β γεννήτρια, οι δίοδοι αντεπιστροφής είναι συνδεδεμένες σειριακά με αυτές τις ακολουθίες. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος σε μία ή περισσότερες ακολουθίες, οι δίοδοι αντεπιστροφής θα εμποδίσουν το ρεύμα να περάσει από τις τέλειες ακολουθίες στις προβληματικές. Κατά τη λειτουργία αυτή, σημειώνεται μια πτώση της τάσης κάθε δίοδου περίπου 0.7.V. Η τιμή αυτή πρέπει να αφαιρεθεί από την τάση εξόδου της φ/β γεννήτριας.

2.1.3 Έλεγχος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)

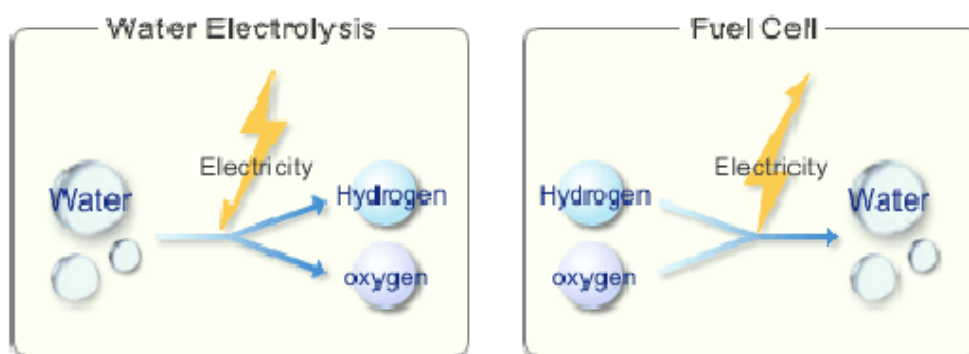
Η θέση των σημείων λειτουργίας με τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ (MPP) πάνω στην φ/β γεννήτρια, εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία της κυψέλης. Η θέση αυτή χρησιμοποιείται για την προσαρμογή της τάσης και του ρεύματος της πραγματικής λειτουργίας με τρόπο τέτοιο ώστε η πραγματική ισχύ να προσεγγίζει κατά το μέγιστο δυνατό, τη βέλτιστη τιμή. Η λειτουργία της φ/β γεννήτριας σε MPP, απαιτεί η εμπέδηση του φορτίου να ταιριάζει με αυτήν της γεννήτριας. Για το σκοπό αυτό, μια ηλεκτρονική συσκευή, συνήθως μια μονάδα ρύθμισης ισχύος, ικανή να πραγματοποιήσει τη λειτουργία του ελέγχου ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος, πρέπει να είναι συνδεδεμένη ανάμεσα στην φ/β γεννήτρια και το φορτίο. Συνεπώς η εύρεση των MPP, έχει κάποια σημασία μόνο εάν είναι εφικτή η επεξεργασία τους, αν δεν επιφέρει επιπλέον ενεργειακές απώλειες και αν έχει μικρό επιπλέον κόστος. Πολλές διαφορετικές τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των σημείων MPP για την φ/β γεννήτρια [16] και [17]. Οι τεχνικές αυτές, μπορούν να διαχωριστούν σε άμεσες και έμμεσες. Οι άμεσες μέθοδοι βασίζονται σε έναν αλγόριθμο αναζήτησης για τον προσδιορισμό της καμπύλης βέλτιστης δυνατής ισχύος, χωρίς να διακόπτεται η κανονική λειτουργία της φ/β γεννήτριας. Η ένταση που παράγεται από ένα φ/β στοιχείο, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα απ' ότι μεταβάλλεται η τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης – έντασης, το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του, ωστόσο, επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο φ/β δεν είναι σταθερή, ομοίως δεν είναι σταθερή και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό, για κάθε στιγμή το φ/β να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτές καθορίζονται από το φορτίο, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης – έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του. Οι έμμεσες μέθοδοι, χρησιμοποιούν ένα εξωτερικό σήμα για τον προσδιορισμό του MPP. Τέτοιου είδους εξωτερικά σήματα, μπορούν να δοθούν με τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας του πλαισίου, του ρεύματος βραχυκύκλωσης ή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης μιας φ/β κυψέλης αναφοράς. Ένα σετ φυσικών παραμέτρων πρέπει να προσδιοριστεί και το σετ του σημείου MPP προκύπτει από το σήμα.

2.2 Συστήματα ενέργειας υδρογόνου και τα μέρη τους

Το υδρογόνο αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο εναλλακτικό καύσιμο του μέλλοντος, χάρη στην ιδιότητά του να αποθηκεύει ενέργεια υψηλής ποιότητας. Έτσι, οι ειδικοί οραματίζονται ότι το υδρογόνο θα αποτελέσει τον ακρογωνιαίο λίθο των μελλοντικών συστημάτων ενέργειας, που θα βασίζονται στο συνδυασμό φωτοβολταϊκών και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πλήθος επιστημόνων παγκοσμίως, έχει μελετήσει την ιδέα της χρησιμοποίησης υδρογόνου για την μεταφορά και την αποθήκευση ενέργειας εντός του συστήματος [18] και [19].

Η τεχνολογία του υδρογόνου εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της ένωσης του υδρογόνου με το οξυγόνο για την παραγωγή νερού, δηλαδή την αντίστροφη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Οι συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του υδρογόνου σε ηλεκτρική μέσω αυτής της διαδικασίας ονομάζονται κυψέλες καυσίμου, ενώ οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδρογόνου από τη διάσπαση μορίων νερού ονομάζονται ηλεκτρολύτες. Οι βασικές διεργασίες που εκμεταλλεύονται οι τεχνολογίες υδρογόνου φαίνονται στο σχήμα 2.2 .

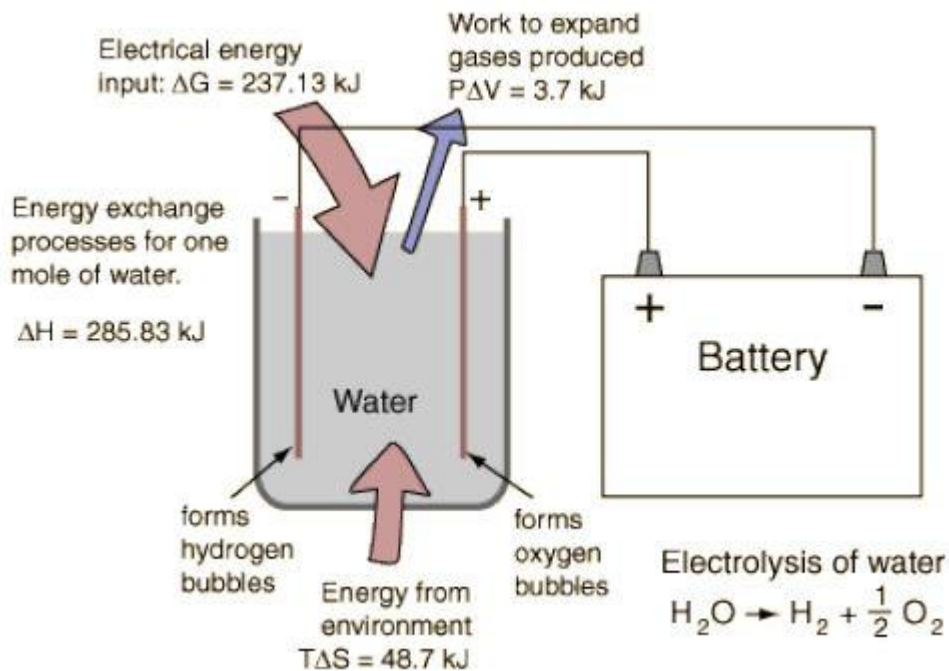
Η λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου και μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου, αναλύεται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 4. Στο παρόν κεφάλαιο, θα αναπτυχθεί η λειτουργία του ηλεκτρολύτη και της δεξαμενής .



Σχήμα 2.4. Ηλεκτρόλυση – Κυψέλη καυσίμου

2.2.1 Ηλεκτρολύτης

Ο ηλεκτρολύτης μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική, παράγοντας υδρογόνο. Το υδρογόνο, μπορεί παραδείγματος χάριν να αποθηκευτεί σε δεξαμενές υψηλής πίεσης, ή με μεταλλικά υδρίδια. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από ηλεκτρολύτες νερού, με διάφορους τρόπους όπως η αλκαλική, η όξινη και η ηλιακή παραγωγή. Επί του παρόντος, είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο οι αλκαλικοί και οι όξινοι ηλεκτρολύτες νερού.

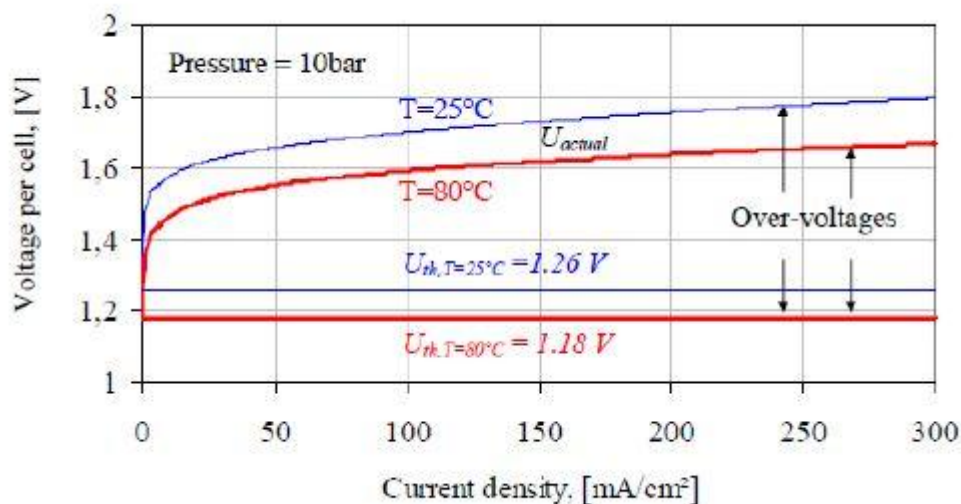


Σχήμα 2.5. Το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης του νερού

Η λειτουργία του αλκαλικού ηλεκτρολύτη νερού είναι η διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο, κάτι που επιτυγχάνεται ως εξής: συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα περνάει ανάμεσα από δύο ηλεκτρόδια που διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη KOH με καλή ιοντική αγωγιμότητα. Το νερό έχει πολύ φτωχή ιοντική αγωγιμότητα και για το λόγο αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας ιοντικά αγωγίμος ηλεκτρολύτης, ώστε η αντίδραση να συντελεστεί σε ένα τεχνικά αποδεκτό επίπεδο τάσης της κυψέλης. Οι αντιδράσεις είναι :

- Αντίδραση ανόδου : $2\text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2e^-$
- Αντίδραση καθόδου : $2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$
- Συνολική αντίδραση : $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$

Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση των θεωρητικών και των πραγματικών τάσεων για μια κυψέλη με αλκαλικό ηλεκτρολύτη νερού, σε σχέση με την πυκνότητα του ρεύματος σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Η διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών ρεύματος-τάσης, οφείλεται κυρίως στο ότι οι υπερ-τάσεις εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.



Σχήμα 2.6. Καμπύλες ρεύματος-τάσης για μια κυψέλη καυσίμου, με αλκαλικό ηλεκτρολύτη σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες.

Στο σύστημά μας, το μοντέλο του ηλεκτρολύτη δεν είναι πολύ περίπλοκο και αποτελείται από 75 κυψέλες.

Ένας κανονικός αλκαλικός ηλεκτρολύτης νερού, ο οποίος χρησιμοποιεί πηγές ηλεκτρισμού που προέρχονται από ορυκτά καύσιμα, είναι πολύ πιο οικονομικός σε σχέση με έναν ηλεκτρολύτη που κάνει χρήση ανανεώσιμων πηγών, ο οποίος χρησιμοποιεί ηλιακή ή αιολική ενέργεια ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο ο κανονικός αλκαλικός ηλεκτρολύτης νερού, επιφέρει τα περιβαλλοντικά πρόστιμα που επισειεί η καύση ορυκτών καυσίμων και κατά συνέπεια δεν αποτελεί παρά μια πολύ μικρή πρόοδο σε σχέση με το ισχύον ενεργειακό καθεστώς. Το κόστος του κεφαλαίου αρχικής επένδυσης που απαιτείται για ένα κανονικό αλκαλικό ηλεκτρολύτη νερού, κυμαίνεται από 300\$/kW έως 600\$/kW [20]. Για παράδειγμα, ένας κανονικός αλκαλικός ηλεκτρολύτης νερού 2MW, με αποδοτικότητα περίπου 80%, θα κόστιζε περίπου 600\$/kW και η τιμή του παραγόμενου υδρογόνου θα ήταν 20\$/GJ [20]. Παρά το ότι τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα του ηλεκτρολύτη που κάνει χρήση ανανεώσιμων πηγών, υπερέχουν μακράν σε σχέση με άλλες μεθόδους, η χρήση του δεν συνίσταται για το εγγύς, τουλάχιστον, μέλλον. Οι ανανεώσιμες μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρισμού, αποτελούν από μόνες τους μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία. Το κόστος της παραγωγής υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης με ανανεώσιμες πηγές, είναι απλά, αρκετά υψηλό. Ωστόσο, μακροπρόθεσμα, αυτή η μέθοδος παραγωγής αποτελεί έναν πολλά υποσχόμενο στόχο. Το κόστος του ηλεκτρολύτη διαρκώς θα μειώνεται, ενώ τα υλικά που τον αποτελούν θα εξελίσσονται.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τα χαρακτηριστικά των δύο κυριότερων τύπων ηλεκτρόλυσης :

Είδος ηλεκτρολύτη	Alkaline Electrolyzer	PEM Electrolyzer
Ηλεκτρολύτης	20-30% KOH	πολυμερής μεμβράνη
Θερμοκρασία	70-100°C	70-80°C
Αντίδραση Ανόδου	$2\text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
Αντίδραση Καθόδου	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

Πίνακας 2.3. Γενικά χαρακτηριστικά Αλκαλικού και PEM ηλεκτρολύτη

Οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες είναι επί του παρόντος πιο οικονομικοί, ενώ οι ηλεκτρολύτες PEM είναι ακριβοί και όχι πλήρως εμπορικά διαθέσιμοι σε μεσαία και μεγάλη κλίμακα. Από την άλλη μεριά, η τεχνολογία PEM εμφανίζει κάποια εγγενή πλεονεκτήματα έναντι των αλκαλικών ηλεκτρολυτών, τα οποία είναι [4] :

- Υψηλότερος βαθμός ασφάλειας και αξιοπιστίας δεδομένου ότι στα κελιά δεν κυκλοφορεί καυστικός ηλεκτρολύτης.
- Ελαχιστοποίηση προβλημάτων διάβρωσης και περιβαλλοντικών προβληματισμών λόγω απουσίας καυστικού ηλεκτρολύτη.
- Ευκολότερη συντήρηση.
- Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων αντέχουν υψηλότερη διαφορική πίεση και είναι πιο αποτελεσματικά στην αποτροπή μίξης των αερίων προϊόντων της ηλεκτρόλυσης.
- Παραγωγή υδρογόνου υψηλότερης εν γένει καθαρότητας (99.999%) σε υψηλό βαθμό απόδοσης (95%).
- Δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές τιμές πυκνότητας ρεύματος.
- Ταχύτερη απόκριση στις μεταβολές της ισχύος εισόδου.

2.2.2 Αποθήκευση υδρογόνου

Πριν προχωρήσουμε στην εξέταση κάποιων μεθόδων αποθήκευσης υδρογόνου, πρέπει να αναφερθούν οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του. Το υδρογόνο, είναι το πιο απλό και το πιο άφθονο στοιχείο του σύμπαντος, καθαρό και μη ρυπογόνο. Κάποια από τα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Είναι άχρωμο, άοσμο και άγευστο
- Είναι το ελαφρύτερο από όλα τα στοιχεία (μοριακό βάρος: 2.016g/mol). Η πυκνότητά του είναι περίπου 14 φορές μικρότερη σε σχέση με τον αέρα (0, 08376 kg / m³ υπό συνθήκες κανονικής πίεσης και θερμοκρασίας) και έχει πολύ υψηλό δείκτη διάθλασης.

- Είναι υγρό σε θερμοκρασίες κάτω από 20.3 K, σε ατμοσφαιρική πίεση. Η πυκνότητά του ως υγρό είναι $70.8 \text{ kg} / \text{m}^3$.
- Περιέχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους από όλες τις κυψέλες καυσίμου ($\text{HHV}=141.9 \text{ MJ} / \text{m}^3$ και $\text{HHV}= 111.9 \text{ MJ} / \text{kg}$ or $10.043 \text{ MJ} / \text{m}^3$). Ένα pound ($\approx 0,45 \text{ kg}$) υδρογόνου έχει τρεις φορές την ενέργεια ενός pound συμβατικής βενζίνης.
- Έχει μικρό μοριακό μέγεθος που του επιτρέπει να διαρρέει με ευκολία σε πορώδη υλικά, σε σχέση με άλλα κοινά αέρια σε όμοιες πιέσεις (περίπου 1.26 με 2.8 φορές πιο γρήγορα από το φυσικό αέριο).
- Είναι γενικά μη διαβρωτικό και δεν αντιδρά με τα τυπικά υλικά περιεχομένου.
- Είναι μη τοξικό και μη δηλητηριώδες. Αντιθέτως, τα παράγωγα προϊόντα άλλων συμβατικών καυσίμων είναι πολύ πιο τοξικά όταν εισπνέονται.

Όταν ένα ενεργειακό σύστημα βασίζεται εξολοκλήρου σε συστήματα παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες ή διακοπτόμενες πηγές, παρουσιάζεται το πρόβλημα της αδυναμίας ανταπόκρισης της παραγωγής ισχύος στις απαιτήσεις του συστήματος. Γι' αυτόν το λόγο, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο τοποθετείται ανάμεσα στην παραγωγή της ισχύος και στη χρήση της.

Το υδρογόνο, έχει προταθεί ως ένα βασικό μέσον για την επίλυση του προβλήματος αυτού. Το υδρογόνο, δεν αποτελεί πρωτεύουσα πηγή ενέργειας, αλλά χρησιμοποιείται ως «μεταφορέας» ενέργειας ανάμεσα στην παραγωγή της ενέργειας και στην αξιοποίησή της. Η ενέργεια, παράγεται από το υδρογόνο μέσω μετατροπής που γίνεται σε μια κυψέλη καυσίμου, είτε μέσω της καύσης, είτε σε μηχανές εσωτερικής καύσης ή σε μηχανές στροβίλων. Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε πολλές βασικές δομές, όπως πεπιεσμένο αέριο υδρογόνο, το οποίο και χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη, ή υδρογόνο σε υγρή μορφή σε μικροσκοπικά σφαιρίδια ή σε ενώσεις μεταλλοϋδριδίων. Οι διαφορετικές μορφές αποθήκευσης έχουν και διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η επιλογή μιας μορφής αποθήκευσης, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά αυτά, και κυρίως από την πυκνότητα της ενέργειας και το κόστος της κάθε μορφής. Οι διαφορετικές αυτές μορφές αποθήκευσης του υδρογόνου θα συζητηθούν στα επόμενα τμήματα της εργασίας.



Εικόνα 2.1 Δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου

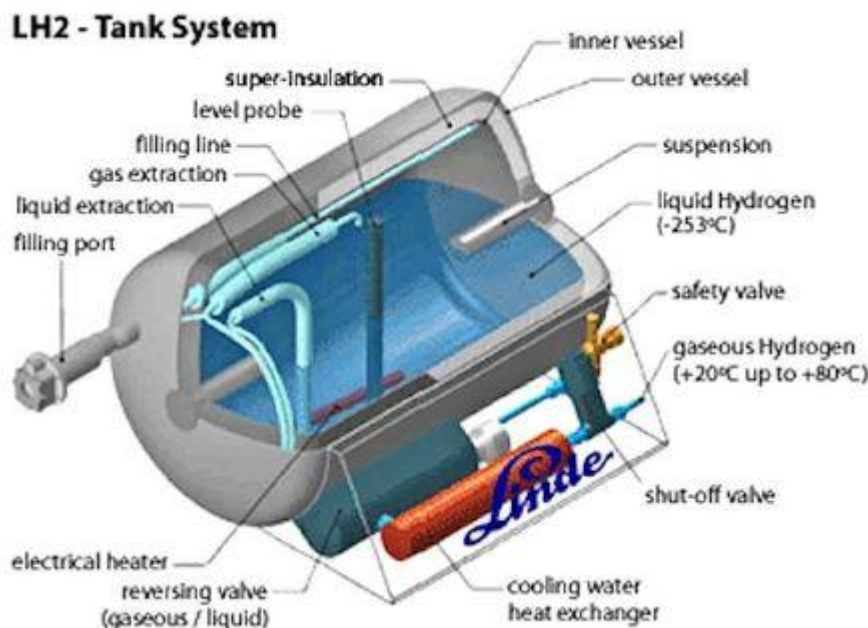
2.2.2.1 – Αποθήκευση πεπιεσμένου αέριου υδρογόνου

Το πεπιεσμένο υδρογόνο σε μορφή αερίου μπορεί να αποθηκευτεί σε δεξαμενές πίεσης σε θερμοκρασία αέρα και υπό πίεση 200 έως 700 bar. Τα πιο συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται για τις δεξαμενές υδρογόνου είναι το ατσάλι και το αλουμίνιο. Από όλες τις τεχνολογίες αποθήκευσης, το πεπιεσμένο αέριο υδρογόνο, είναι αυτή με τη μακρύτερη ιστορία και την χαμηλότερη τιμή. Αυτή η μορφή αποθήκευσης είναι κατάλληλη για τους ηλεκτρολύτες που μπορούν να παράσχουν υδρογόνο σε υψηλές πιέσεις. Η θεωρητική βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου μπορεί να υπολογιστεί, η μοριακή μάζα του μορίου του υδρογόνου (2.016g/mol) να είναι 39.4kWh/kg [18]. Η πραγματική βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό του δοχείου, καθώς τα ελαφριά υλικά συνήθως δεν μπορούν να αντέξουν την πίεση τόσο καλά όσο τα βαρύτερα υλικά. Με μια παραδοσιακή ατσάλινη δεξαμενή, μπορεί να επιτευχθεί ενέργεια της τάξεως του 0.45kWh/kg περίπου, που είναι ισοδύναμη με το 1,14% του βάρους του

αποθηκευμένου υδρογόνου. Η τεχνολογία των υλικών με τα οποία κατασκευάζονται οι δεξαμενές, έκανε αλματώδη πρόοδο με την ανάπτυξη διαφορετικών δεξαμενών, κατασκευασμένων από παραπάνω από ένα υλικά, των λεγόμενων «σύνθετων δεξαμενών». Με τη χρήση των σύνθετων δεξαμενών, η ενεργειακή πυκνότητα αυξάνεται στο 4.45kWh/kg που είναι ισοδύναμη με το 11,3% του βάρους του αποθηκευμένου υδρογόνου [21]. Το πεπιεσμένο υδρογόνο σε μορφή αερίου μπορεί να αποθηκευτεί είτε σε υπέργειες φορητές είτε σε ακίνητες δεξαμενές ή σε διαφορετικών ειδών σπηλιές. Οι υπέργειες δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου ποικίλουν σε μέγεθος αλλά έχουν την ίδια πίεση. Μια από τις καλύτερες ιδιότητες των δεξαμενών αυτών είναι ότι δεν επιτρέπουν διαρροές. Οι απώλειες της ικανότητας αποθήκευσης είναι, συνεπώς, ανύπαρκτες [22]. Κάποιες απώλειες ωστόσο μπορούν να προκύψουν μέσω των συνδέσεων, όμως με τους κατάλληλους ρυθμιστές μπορούν να ελαχιστοποιηθούν.

2.2.2.2 – Αποθήκευση υγρού υδρογόνου

Το υγρό υδρογόνο χρησιμοποιείται ως καύσιμο στις διαστημικές τεχνολογίες εδώ και αρκετά χρόνια [18]. Είναι ελαφρύ και ενέχει λιγότερους πιθανούς κινδύνους σε θέμα αποθηκευτικής πίεσης σε σχέση με το πεπιεσμένο αέριο. Το υδρογόνο υγροποιείται σε άχρωμο υγρό στους -253°C (20.3K) και κατά συνέπεια, οι δεξαμενές καυσίμου πρέπει να διαθέτουν εκλεπτυσμένες μονωτικές ιδιότητες. Το υγρό υδρογόνο αποθηκεύεται σε δεξαμενές τοποθετημένες σε όρθια ή οριζόντια θέση, χωρητικότητας 3-75m³ και υπό πίεση 12 bar [23]. Η ενέργεια που απαιτείται για την υγροποίηση του υδρογόνου είναι το 20% με 30% περίπου από το ενεργειακό περιεχόμενο του υδρογόνου, γεγονός που αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αφορούν στη χρήση υγρού υδρογόνου. Παρόλα αυτά, αυτή η απώλεια ενέργειας αντισταθμίζεται σε κάποιο βαθμό από την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα του υγρού υδρογόνου. Ένα 1% περίπου του αποθηκευμένου υδρογόνου πρέπει ημερησίως να εξατμίζεται, ώστε να διατηρείται η χαμηλή θερμοκρασία. Η βαρυμετρική πυκνότητα αποθήκευσης του υγρού υδρογόνου στα δοχεία αποθήκευσης είναι περίπου 25.9 wt.% (10.2 kWh/kg) και η ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα είναι περίπου 2760kWh/m³ [18]. Οι βελτιώσεις στις τεχνικές μόνωσης και στην πίεση των δεξαμενών, πρόκειται να επηρεάσουν τα παραπάνω δεδομένα. Αυτή η μορφή αποθήκευσης, τέλος, έχει πολύ γρήγορο ανεφοδιασμό καυσίμου (μια δεξαμενή 125 λίτρων υγρού υδρογόνου μπορεί να γεμίσει μέσα σε τρία μόλις λεπτά) [24] .



Εικόνα 2.2 Δεξαμενή αποθήκευσης υγρού υδρογόνου

2.2.2.3 – Αποθήκευση μεταλλοϋδριδίων

Ένας ιδιαίτερος τρόπος αποθήκευσης υδρογόνου είναι η χρήση μεταλλοϋδριδίων. Τα μεταλλοϋδρίδια είναι ένα μέταλλο ή κράμα μετάλλου, ικανό να δεσμεύσει χημικά το υδρογόνο. Αυτό το μέταλλο ή κράμα μετάλλου, μπορεί να αποθηκεύσει πολλαπλές εκατοντάδες της δυνατότητας του σε υδρογόνο. Κατά τη διάρκεια του σχηματισμού του υδριδίου με ένα μέταλλο ή κράμα μετάλλου, παράγεται θερμότητα και η διαδικασία είναι εξωθερμική. Αντίστροφα, για να ελευθερωθεί υδρογόνο από ένα μεταλλοϋδρίδιο, χρειάζεται παροχή θερμότητας και η διαδικασία είναι ενδοθερμική. Οι διαδικασίες αυτές, περιγράφονται από τις ακόλουθες χημικές αντιδράσεις [12] :

- Διαδικασία φόρτωσης ή απορρόφησης: $M + xH_2 \rightarrow MH_{2x}$
- Διαδικασία αποφόρτωσης ή εκρόφησης: $MH_{2x} \rightarrow M + xH_2$

Όπου το M αντιπροσωπεύει την ουσία του υδριδίου, δηλαδή το μέταλλο ή το κράμα μετάλλου. Ο ρυθμός αυτών των αντιδράσεων αυξάνεται με την επιφάνεια. Συνεπώς, σε γενικές γραμμές, οι ουσίες υδριδίων χρησιμοποιούν μια σκόνη για να επιταχύνουν τις αντιδράσεις. MH είναι το μεταλλοϋδρίδιο, x είναι ο λόγος του αριθμού των ατόμων υδρογόνου προς τον αριθμό των ατόμων της ουσίας του υδριδίου. Κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης του μεταλλοϋδριδίου, τα μόρια του υδρογόνου διασπώνται και άτομα υδρογόνου εισχωρούν στους

χώρους μέσα στο πλέγμα των μετάλλων ή των κραμάτων μετάλλων. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μια αποτελεσματική μορφή αποθήκευσης, σε σχέση με την πυκνότητα του υγρού υδρογόνου. Ωστόσο, όταν η μάζα του μετάλλου ή του κράματος συνυπολογίζεται, τότε η βαρυμετρική αποθηκευτική πυκνότητα του μεταλλοϋδριδίου είναι συγκρίσιμη με την αποθήκευση του πεπιεσμένου υδρογόνου. Η βέλτιστη δυνατή βαρυμετρική και ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης του υδρογόνου μπορεί να επιτευχθεί με 0.07kg/kg μετάλλου, και 101kg/m³ αντίστοιχα, για μια υψηλή θερμοκρασία υδριδίου όπως το MgH₂. Επίσης, η βαρυμετρική και η ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης του μεταλλοϋδριδίου αυτού, είναι 2.8kWh/kg και 4000kWh/m³ αντίστοιχα [21] και [25]. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποθήκευσης (charging) απελευθερώνεται θερμότητα, η οποία πρέπει να αφαιρεθεί, ώστε να επιτευχθεί η συνέχεια της αντίδρασης. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απελευθέρωσης του υδρογόνου (discharging) η δεξαμενή αποθήκευσης πρέπει να ενισχυθεί με επιπλέον θερμότητα.

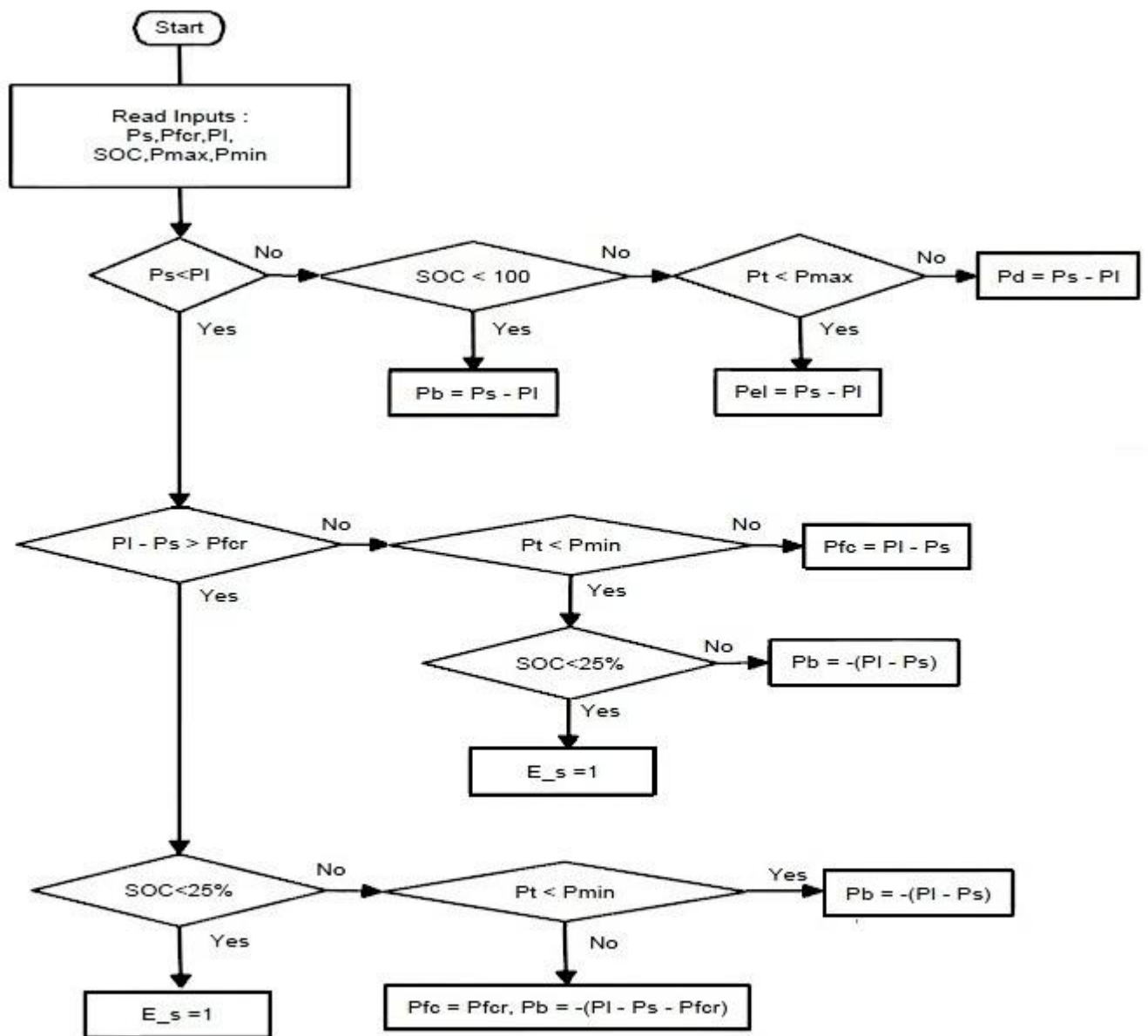
Για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε υδριδικές ουσίες, δύο τρόποι είναι διαθέσιμοι. Στην πρώτη μέθοδο, ενέργεια συνεχούς ρεύματος (DC) χρησιμοποιείται για την ηλεκτρόλυση του νερού και το παραγόμενο υδρογόνο αποθηκεύεται σε μια υδριδική ουσία. Όταν το σύστημα χρειαστεί ηλεκτρική ενέργεια, τότε το υδρογόνο απελευθερώνεται από την υδριδική ουσία με τη θερμότητα και χρησιμοποιείται σε μια κυψέλη καυσίμου για να παράγει ενέργεια συνεχούς ρεύματος (DC). Η θερμότητα από την κυψέλη καυσίμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απελευθέρωση του υδρογόνου από την υδριδική ουσία. Στην δεύτερη μέθοδο, ένα ηλεκτρόδιο του ηλεκτρολύτη καλύπτεται από μια υδριδική ουσία [24]. Κατά την ηλεκτρόλυση του νερού, το υδρογόνο που παράγεται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, απορροφάται άμεσα από την υδριδική ουσία που καλύπτει το ηλεκτρόδιο. Στη συνέχεια, όταν το σύστημα χρειαστεί ηλεκτρική ενέργεια, ο ηλεκτρολύτης λειτουργεί αντίστροφα σε σχέση με την πρώτη μέθοδο, καθώς μια κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιεί το υδρογόνο που απελευθερώθηκε από το μεταλλοϋδρίδιο για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια.

Η διαδικασία των μεταλλοϋδριδίων είναι αρκετά δαπανηρή, ευαίσθητη απέναντι στις ακαθαρσίες και έχει ορισμένη διάρκεια ζωής. Από την άλλη πλευρά, αυτό το είδος αποθήκευσης είναι σχετικά ασφαλές επειδή το υδρογόνο είναι δεσμευμένο πάνω σε ένα μέταλλο.

2.3 Στρατηγική ελέγχου

Στο σχήμα 2.7. παρουσιάζεται το διάγραμμα της στρατηγικής ελέγχου που εφαρμόστηκε για το σύστημα που μελετάμε. Οι παράμετροι που παρουσιάζονται στο σχήμα είναι οι εξής :

- ✓ P_s : Είναι η ισχύς των ηλιακών κυψελών
- ✓ P_l : Είναι το φορτίο
- ✓ P_{fcr} : Είναι η εκτιμώμενη ισχύς της συστοιχίας κυψελών καυσίμου
- ✓ SOC : Είναι το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας
- ✓ P_t : Είναι η πίεση της δεξαμενής υδρογόνου
- ✓ P_{max} : Είναι η μέγιστη πίεση της δεξαμενής υδρογόνου
- ✓ P_{min} : Είναι η ελάχιστη πίεση της δεξαμενής υδρογόνου
- ✓ P_{fc} : Είναι η ισχύς που πρέπει να παράσχει η κυψέλη καυσίμου
- ✓ P_{el} : Είναι η ισχύς την οποία ο ηλεκτρολύτης θα μετατρέψει σε υδρογόνο
- ✓ P_b : Είναι η ισχύς εισόδου/εξόδου της μπαταρίας
- ✓ E_s : Είναι το σήμα κινδύνου. Όταν η τιμή του είναι 1, το σύστημα πρέπει να σταματήσει .
- ✓ P_d : Είναι η ισχύς που θα απορριφθεί ως πλεόνασμα.



Σχήμα 2.7. Διάγραμμα στρατηγικής ελέγχου

Με λίγα λόγια, η στρατηγική ελέγχου λειτουργεί ως εξής: Εάν υπάρχει περίσσεια ισχύς από την φ/β γεννήτρια, τότε η ενέργεια αυτή η θα φορτίσει τη μπαταρία εφόσον να τη γεμίσει, ή, στην περίπτωση που η μπαταρία είναι ήδη γεμάτη, η ενέργεια αυτή θα μετατραπεί, με τη βοήθεια του ηλεκτρολύτη σε υδρογόνο, το οποίο θα αποθηκευτεί στη δεξαμενή. Εάν η δεξαμενή αποθήκευσης είναι γεμάτη, τότε η περίσσεια ισχύος θα απορριφθεί, ως πλεόνασμα ισχύος. Η δεξαμενή αποθήκευσης πρέπει να σχεδιαστεί με προσοχή, ώστε το μέγεθός της να της επιτρέπει να αποθηκεύει όσο το δυνατόν περισσότερη ισχύς κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και να καταναλώνει όσο το δυνατόν λιγότερη.

Στις περιπτώσεις που υπάρχει έλλειψη ισχύος, ο ελεγκτής ελέγχει εάν η ισχύς αυτή μπορεί να την παρέχει η συστοιχία κυψελών καυσίμου. Εάν όχι, τότε ο ελεγκτής ελέγχει εάν η δεξαμενή έχει την πίεση που είναι απαραίτητη για να λειτουργήσει η συστοιχία δεξαμενών καυσίμου και εάν την έχει, τότε η συστοιχία δεξαμενών καυσίμου παρέχει την εκτιμώμενη ισχύ της ενώ η υπόλοιπη ενέργεια παρέχεται από τη μπαταρία. Εάν η μπαταρία δεν είναι φορτισμένη αρκετά, τότε το σήμα κινδύνου πηγαίνει στην ένδειξη 1 και το σύστημα πρέπει να σταματήσει.

Η συστοιχία δεξαμενών καυσίμου στο υπό εξέταση σύστημα, έχει εκτιμώμενη ισχύ 1KW, και το φορτίο έχει μέγιστη τιμή τα 850W περίπου, συνεπώς η μπαταρία μπορεί να λειτουργήσει μόνο όταν η δεξαμενή υδρογόνου είναι άδεια. Επίσης, η ενέργεια λειτουργίας και η ενέργεια εν αναμονή του κάθε επιμέρους μέρους, δεν λαμβάνεται υπόψη λόγω έλλειψης των απαραίτητων δεδομένων.

2.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται εν συντομία τα περισσότερα από τα μέρη που αποτελούν το σύστημα, εκτός της μπαταρίας και κάποιων ρυθμιστικών μονάδων.

Εν κατακλείδι, αξίζει να σημειωθούν τα παρακάτω :

1. Για την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας του PVFC υβριδικού συστήματος, η φ/β ενέργεια πρέπει να παραχθεί με τη μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα, πριν μετατραπεί σε υδρογόνο και αποθηκευτεί με αυτήν τη μορφή.
2. Η αποθήκευση πεπιεσμένου υδρογόνου, είναι η καλύτερη εναλλακτική διαδικασία σε σχέση με άλλες δυνατότητες αποθήκευσης, κατά τις οποίες η ενεργειακή πυκνότητα δεν είναι σημαντική. Η χρησιμότητα του πεπιεσμένου υδρογόνου μπορεί να αυξηθεί, εάν το δοχείο αποθήκευσης έχει κατασκευαστεί από σύνθετα υλικά, τα οποία επιτρέπουν την αύξηση της πυκνότητας της βαρυμετρικής ενέργειας του

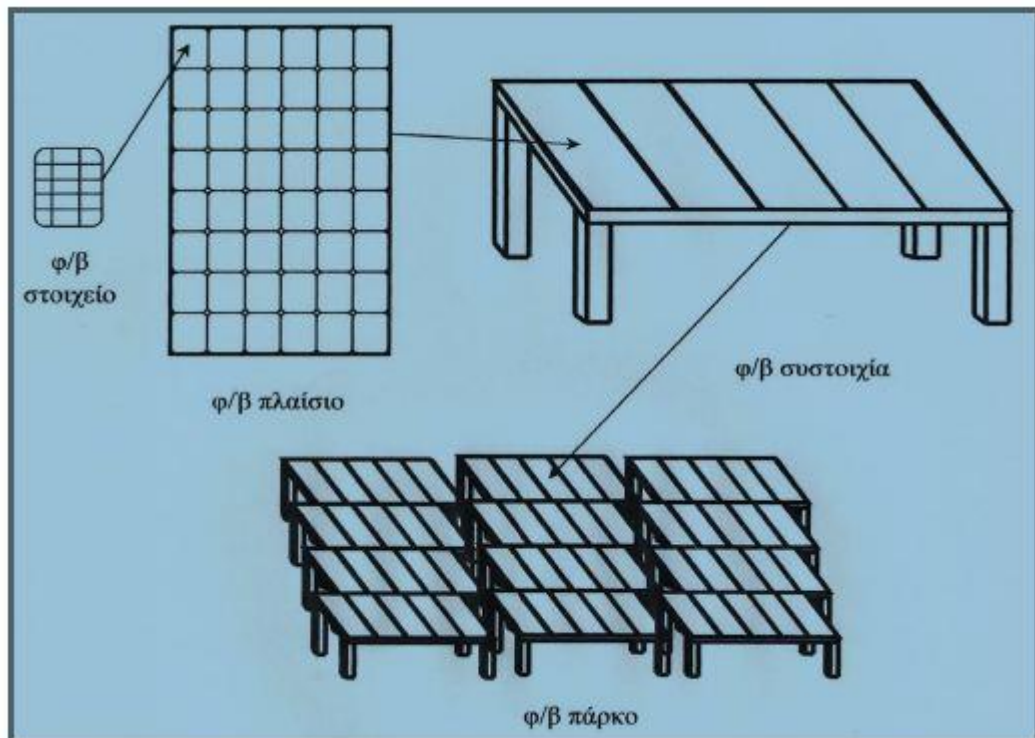
πεπιεσμένου υδρογόνου και κατά συνέπεια, την μείωση του αποθηκευτικού κόστους. Το υγροποιημένο υδρογόνο, είναι κατάλληλο για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπου το επιπλέον κόστος της υγροποίησης δεν έχει και τόση σημασία. Τα μεταλλοϋδρίδια είναι, ίσως, η καλύτερη επιλογή για εφαρμογές μικρής κλίμακας, λόγω της μεγάλης τους ικανότητας να αποθηκεύουν ενέργεια [25].

3. Η δυνατότητα για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας, που στην περίπτωση μας παρέχεται μέσω μιας μπαταρίας, είναι πολύ σημαντική για την αδιάλειπτη παροχή ισχύος στο φορτίο, βελτιώνοντας, παράλληλα την ποιότητα της ισχύος και την αποδοτικότητα του συστήματος. Επίσης, χρησιμοποιείται για να μειώσει το αρχικό κόστος επένδυσης, επιτρέποντας το να σχεδιαστεί το σύστημα πιο κοντά στις απαιτήσεις μιας σταθερής κατάστασης ισχύος και δεν χρειάζεται μια μεγαλύτερη γεννήτρια που θα ταίριαζε σε ένα φορτίο πιο ασταθές. Συνεπώς, το εν λόγω σύστημα, με τη χρήση μιας μπαταρίας μπορεί να εξυπηρετήσει δυναμικά φορτία και να παρέχει την ρύθμιση της ισχύος τόσο εάν είναι διασυνδεδεμένο όσο και εάν είναι αυτόνομο.

Κεφάλαιο 3 – Φ/Β Γεννήτρια

3.1 Κυψέλη φωτοβολταϊκών (PV cell)

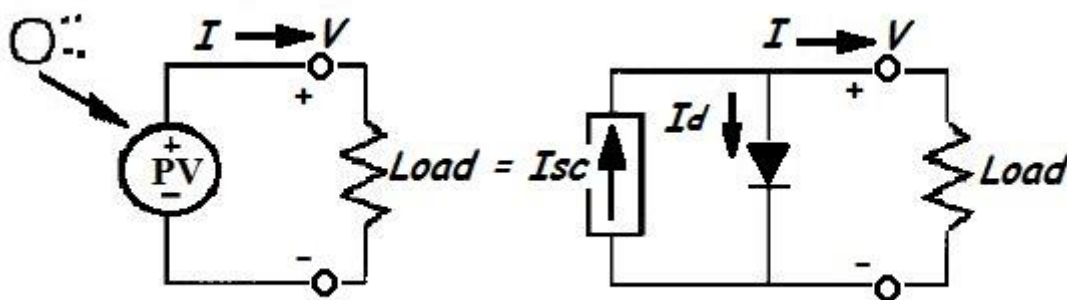
Η μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών μιας κυψέλης φ/β είναι εφικτή με τη χρήση ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Στη μελέτη αυτή, πρόκειται να συζητηθούν δύο μοντέλα, το μοντέλο μιας διόδου και το μοντέλο δύο διόδων.



Εικόνα 3.1. Δομή Φ/Β συστημάτων

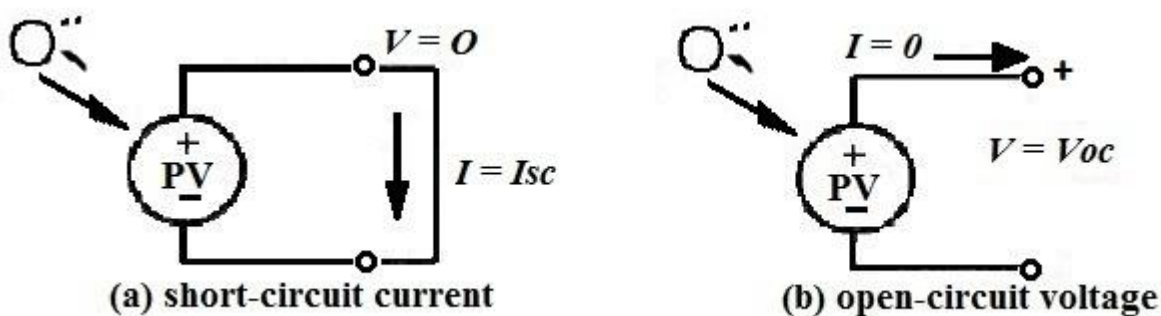
3.1.1 Μοντέλο μιας διόδου

Το απλούστερο μοντέλο μιας κυψέλης φ/β απεικονίζεται ως ένα ισοδύναμο κύκλωμα στο παρακάτω σχήμα, το οποίο αποτελείται από μια ιδανική πηγή ρεύματος παράλληλη με μια ιδανική δίοδο. Η πηγή ρεύματος αντιπροσωπεύει το ρεύμα που παράγεται από τα φωτόνια (I_{ph}) και η παραγωγή είναι σταθερή κάτω από σταθερή θερμοκρασία και σταθερή ακτινοβολία φωτός.



Σχήμα 3.1. Μοντέλο μιας διόδου

Υπάρχουν δύο παράμετροι – κλειδιά που συχνά χρησιμοποιούνται για το χαρακτηρισμό μιας κυψέλης φ/β. Ενώνοντας τα άκρα της κυψέλης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2 (α), το ρεύμα που παράγεται από τα φωτόνια θα διοχετευθεί έξω από την κυψέλη, όπως ένα ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}), συνεπώς $I_{sc} = I_{ph}$. Αντίθετα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. (β), όταν δεν υπάρχει σύνδεση στην κυψέλη (ανοιχτοκύκλωση), το ρεύμα που παράγεται από τα φωτόνια, θα διοχετευτεί εσωτερικά, μέσω της εσωτερικής επαφής p-n της διόδου. Αυτό δίνει μια τάση ανοιχτοκύκλωσης (V_{oc}). Οι κατασκευαστές του φ/β συστήματος ή της κυψέλης, συνήθως παρέχουν τις τιμές των παραμέτρων αυτών στα έντυπα με τα χαρακτηριστικά των συσκευών.



Σχήμα 3.2. Συνθήκες βραχυκύκλωσης και ανοιχτοκύκλωσης

Το ρεύμα εξόδου της φ/β κυψέλης προκύπτει από την εφαρμογή του νόμου του Kirchhoff (KCL) στο ισοδύναμο κύκλωμα που απεικονίζεται στο σχήμα 3.1.

$$I = I_{sc} - I_d \quad (3-1)$$

Όπου: I_{sc} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης το οποίο ισούται με το ρεύμα που παράγεται από τα φωτόνια και I_d είναι το ρεύμα της εσωτερικής διόδου.

Το ρεύμα της διόδου (I_d) δίνεται από την εξίσωση του Shockley:

$$I_d = I_0(e^{qV_d/KT} - 1) \quad (3-2)$$

Όπου:

I_0 είναι το αντίστροφο ρεύμα κόρου της διόδου (A)

q είναι το φορτίο ενός ηλεκτρονίου (1.602×10^{-19} eV)

V είναι η τάση της διόδου (V)

K είναι η σταθερά του Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K)

T είναι η απόλυτη θερμοκρασία της επαφής p-n

Αντικαθιστώντας το I_d της εξίσωσης (3-1) με την εξίσωση (3-2) έχουμε τη σχέση τάσης-ρεύματος της κυψέλης:

$$I = I_{sc} - I_0(e^{qV_d/KT} - 1) \quad (3-3)$$

Όπου : V είναι η τάση της κυψέλης και I είναι το ρεύμα εξόδου της κυψέλης

Το αντίστροφο ρεύμα κόρου της διόδου (I_0) είναι σταθερό, κάτω από σταθερή θερμοκρασία και μπορεί να υπολογιστεί ρυθμίζοντας τη συνθήκη ανοιχτοκύκλωσης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. (β). Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3-3), όπου $I = 0$ (μηδενικό ρεύμα εξόδου) και λύνοντας ως προς I_0 .

$$0 = I_{sc} - I_0(e^{qV_{oc}/KT} - 1) \quad (3-4)$$

$$I_{sc} = I_0(e^{qV_{oc}/KT} - 1) \quad (3-5)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{e^{qV_{oc}/KT} - 1} \quad (3-6)$$

Το ρεύμα που παράγεται από τα φωτόνια, το οποίο ισούται με I_{sc} , είναι, κατά προσέγγιση, ευθέως ανάλογο με την ένταση της ακτινοβολίας του φωτός που προσπίπτει στην κυψέλη ϕ/β [26]. Συνεπώς, η τιμή του I_{sc} , δίνεται από τον κατασκευαστή για ορισμένες συνθήκες ελέγχου $G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$ σε μάζα αέρα (A.M.)= 1.5, τότε το ρεύμα που παράγεται από τα φωτόνια υπό οποιαδήποτε άλλη ένταση ακτινοβολίας G (W/m^2) δίνεται από τη σχέση :

$$I_{sc_G} = \frac{G}{G_0} I_{sc_G_0} \quad (3-7)$$

3.1.2 Το μοντέλο δύο διόδων

Υπάρχουν κάποια πράγματα που δεν λάβαμε υπόψη στο μοντέλο που προηγήθηκε και τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση μιας φ/β κυψέλης στην πράξη. Εδώ, θα δώσουμε μια συνοπτική περιγραφή των παραγόντων αυτών:

3.1.2.1 - Αντίσταση σειράς

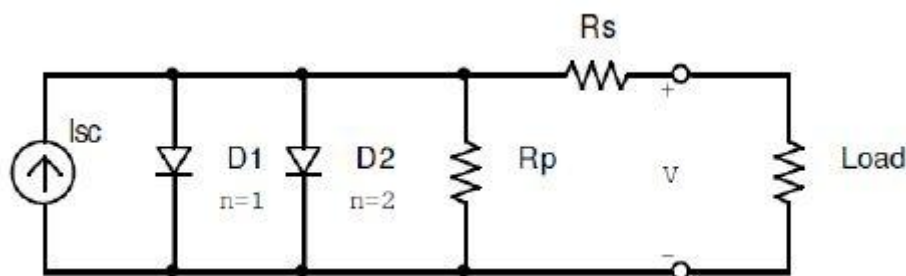
Σε μια φ/β κυψέλη υπάρχει μια αντίσταση σειράς στο μονοπάτι του ρεύματος μέσω του ημιαγωγού, του μεταλλικού πλέγματος, των επαφών και της ράβδου συλλογής ρεύματος [27]. Αυτές οι απώλειες συσσωρεύονται σε έναν αντιστάτη σειράς (R_s). Αυτές οι απώλειες αντίστασης έχουν πολύ σημαντική επίδραση στο φ/β σύστημα, το οποίο αποτελείται από πολλές κυψέλες, συνδεδεμένες με σειριακό τρόπο και η τιμή τους, πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των κυψελών.

3.1.2.2 - Παράλληλη αντίσταση

Καλείται επίσης αντίσταση εκτροπής. Πρόκειται για μια απώλεια που σχετίζεται μια μικρή διαρροή ρεύματος, μέσω ενός μονοπατιού ρεύματος, παράλληλου με την συσκευή [27]. Αυτό μπορεί να απεικονιστεί μια έναν παράλληλο αντιστάτη (R_p). Η επίδραση αυτών των απωλειών είναι τόσο σημαντική όσο και της αντίστασης σειράς και παρατηρείται μόνο στις περιπτώσεις φ/β πλαισίων συνδεδεμένων με παράλληλο τρόπο.

3.1.2.3 - Επανασύνδεση (recombination)

Η επανασύνδεση των περιοχών απογύμνωσης των φ/β κυψελών, δημιουργεί μη Ωμικά μονοπάτια ρεύματος, που είναι παράλληλα με την εσωτερική κυψέλη [27]. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3, αυτό απεικονίζεται από τη δεύτερη δίοδο (D_2) στο ισοδύναμο κύκλωμα.



Σχήμα 3.3. Μοντέλο δύο διόδων

Συνοψίζοντας, η σχέση ρεύματος – τάσης μιας φ/β κυψέλης, εκφράζεται ως εξής:

$$I = I_{sc} - I_{01} \left[e^{q \left(\frac{V + IR_s}{KT} \right)} - 1 \right] - I_{02} \left[e^{q \left(\frac{V + IR_s}{2KT} \right)} - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \quad (3-8)$$

Συνδυάζοντας την πρώτη και τη δεύτερη δίοδο μπορούμε να ξαναγράψουμε την εξίσωση (3-8) με την ακόλουθη μορφή:

$$I = I_{sc} - I_0 \left[e^{q \left(\frac{V + IR_s}{nKT} \right)} - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_p} \right) \quad (3-9)$$

Όπου : n είναι ο παράγων ιδανικότητας και μπορεί να πάρει τιμές από ένα έως δύο [10] .

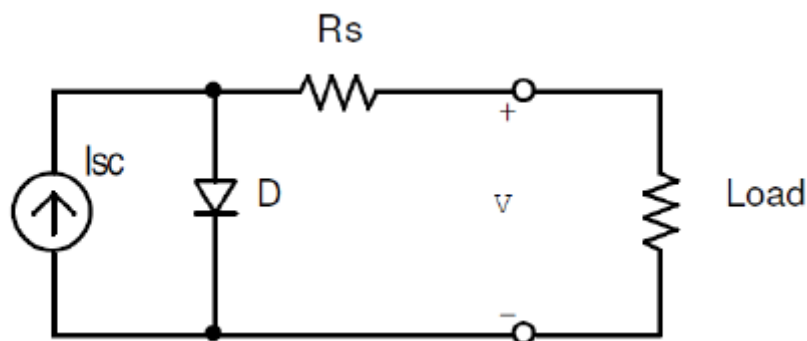
3.2 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module)

Ένα φ/β πλαίσιο έχει ισχύ παραγωγής μικρότερη από 1V (περίπου 0,6 για τις κυψέλες κρυσταλλικής σιλικόνης) και συνεπώς πολλές φ/β κυψέλες συνδέονται εν σειρά, για να παράσχουν την επιθυμητή ισχύ παραγωγής. Έτσι, όταν πολλές φ/β κυψέλες συνδεδεμένες εν σειρά μπουν σε ένα πλαίσιο, τότε έχουμε ένα φ/β πλαίσιο. Τα περισσότερα φ/β πλαίσια με κρυσταλλική σιλικόνη που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο, αποτελούνται είτε από 36 ή από 72 σειριακά συνδεδεμένες κυψέλες. Όταν οι φ/β κυψέλες είναι συνδεδεμένες εν σειρά, το ρεύμα εξόδου είναι το ίδιο με το ρεύμα της κάθε κυψέλης, όμως η τάση εξόδου είναι το άθροισμα των τάσεων των συνδεδεμένων κυψελών. Επίσης, τα φ/β πλαίσια μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους εν σειρά ή εν παραλλήλω, ώστε να αποδώσουν το απαραίτητο ρεύμα ή τάση. Στην περίπτωση αυτή, τα συνδεδεμένα φ/β πλαίσια, σχηματίζουν μία φ/β συστοιχία.

Για τη μοντελοποίηση του φ/β πλαισίου ακολουθήθηκε η ίδια στρατηγική με τη μοντελοποίηση της φ/β κυψέλης. Οι παράμετροι είναι όλες ίδιοι εκτός από μια παράμετρο τάσης (όπως η τάση ανοιχτού κυκλώματος) η οποία είναι διαφορετική και πρέπει να διαιρεθεί με τον αριθμό των κυψελών.

Η μελέτη του Walker [28], από το Πανεπιστήμιο του Queensland στην Αυστραλία, χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό μοντέλο, μέτριας περιπλοκότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα (3.4) και παρέχει αποτελέσματα αρκετά ακριβή. Το μοντέλο αποτελείται από μια πηγή ρεύματος (I_{sc}), μια δίοδο (D) και μια σειριακή αντίσταση (R_s). Μπορούμε να αγνοήσουμε την παράλληλη αντίσταση καθώς η επίδρασή της δεν είναι σημαντική σε επίπεδο ενός μόνο πλαισίου. Συμπεριλαμβάνονται επίσης οι επιδράσεις της θερμοκρασίας στο ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) και το αντίστροφο ρεύμα κόρου της διόδου (I_0), ώστε να ενισχυθεί η

ακρίβεια του μοντέλου. Χρησιμοποιεί μία δίοδο, με τον παράγοντα ιδανικότητας (n) ρυθμισμένο έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη καμπύλη ρεύματος-τάσης.



Σχήμα 3.4 Το ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε

Έτσι, υποθέτοντας ότι $R_p = \infty$, για να αφαιρέσουμε την επίδραση της παράλληλης αντίστασης, η εξίσωση (3-9) γίνεται:

$$I = I_{sc} - I_0 \left[e^{\frac{q(V + IR_s)}{nkT}} - 1 \right] \quad (3-10)$$

Όπου:

I είναι το ρεύμα του πλαισίου (A)

V είναι η τάση της κυψέλης (V)

T είναι η θερμοκρασία της κυψέλης (K)

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) υπολογίζεται αρχικά μια δεδομένη θερμοκρασία κυψέλης (T):

$$I_{sc_T} = I_{sc_Tref} \left[1 + \alpha (T - T_{ref}) \right] \quad (3-11)$$

Όπου:

Η τιμή I_{sc} στην θερμοκρασία T_{ref} δίνεται από τον κατασκευαστή.

T_{ref} : είναι η θερμοκρασία αναφοράς για την φ/β κυψέλη (στην περίπτωση μας 298K)

α : είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας του I_{sc} σε ποσοστό φόρτισης ανά βαθμών θερμοκρασίας (παρέχεται από τον κατασκευαστή)

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , είναι ανάλογο με την ένταση της ακτινοβολίας, κατά συνέπεια το I_{sc} για δεδομένη ακτινοβολία (G) είναι:

$$I_{sc_G} = \frac{G}{G_0} I_{sc_G_0} \quad (3-12)$$

Όπου $G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$, η ονομαστική τιμή για την ένταση της ακτινοβολίας.

Το αντίστροφο ρεύμα κόρου της διόδου (I_0), στη θερμοκρασία αναφοράς T_{ref} , δίνεται από την εξίσωση (3-6) με την προσθήκη του παράγοντα ιδανικότητας της διόδου:

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{(e^{(qV_{oc}/nkT)} - 1)} \quad (3-13)$$

Το αντίστροφο ρεύμα κόρου της διόδου (I_0), εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το I_0 σε μια δεδομένη θερμοκρασία (T), μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση [28]:

$$I_{0_T} = I_{0_T_{ref}} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{3/n} * e^{\frac{-qE_g}{nk} (1/T - 1/T_{ref})} \quad (3-14)$$

Ο παράγων ιδανικότητας της διόδου (n) είναι μια σταθερά που μπορεί να πάρει τιμές ανάμεσα στο 1 και το 2 (όπου 1 είναι η τιμή του για την ιδανική δίοδο). Ο καλύτερος τρόπος να τον υπολογίσουμε με ακρίβεια είναι ταιριάζοντας τις καμπύλες [28].

Η σειριακή αντίσταση (R_s) της φ/β κυψέλης έχει πολύ μεγάλη επίδραση στην κλίση της καμπύλης ρεύματος – τάσης κοντά στην τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}), η τιμή της R_s υπολογίζεται αξιολογώντας την κλίση $\frac{dV}{dI}$ της καμπύλης ρεύματος – τάσης στην τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) [28].

Η εξίσωση για την R_s παράγεται από την διαφοροποίηση της εξίσωσης (3-10) και την επαναρρύθμισή της σε σχέση με την R_s .

$$I = I_{sc} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right] \quad (3-15)$$

$$dI = 0 - I_0 q \left(\frac{dV + R_s dI}{nkT} \right) e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} \quad (3-16)$$

$$R_s = -\frac{dI}{dV} - \frac{nkT/q}{I_0 e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}}} \quad (3-17)$$

Στη συνέχεια, αξιολογώντας την εξίσωση (3-17) στην τάση ανοιχτοκύκλωσης όπου $V=V_{oc}$ και για $I=0$.

$$R_s = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{oc}} = \frac{nkT/q}{I_0 \cdot e^{\frac{qV_{oc}}{nkT}}}$$

Όπου : V_{oc} είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος της κυψέλης .

$\frac{dV}{dI}$ στην V_{oc} είναι η κλίση της καμπύλης ρεύματος-τάσης στην V_{oc} .

Χρησιμοποιούμε την καμπύλη ρεύματος-τάσης που παρέχεται από τον κατασκευαστή και στη συνέχεια τη διαιρούμε με τον αριθμό των κυψελών που είναι συνδεδεμένες εν σειρά.

Ο υπολογισμός που έγινε, με τη χρήση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος που δίνεται στο φυλλάδιο με τα δεδομένα της σειράς Sanyo Hip-215NKHE5 έδωσε για την σειριακή αντίσταση την τιμή: $R_s = 5,2 \text{ m}\Omega$.

Έτσι, μπορούμε επιτέλους να επιλύσουμε την εξίσωση (3-10). Ωστόσο, αυτό είναι κάπως περίπλοκο, αφού η λύση του ρεύματος είναι αναδρομική με το να συμπεριλάβουμε την σειριακή αντίσταση του μοντέλου. Παρά το ότι θα ήταν πιθανό να βρεθούν απαντήσεις με απλές επαναλήψεις, εν τούτοις, επιλέξαμε να μέθοδο για γρήγορη σύγκλιση της απάντησης [28] . Η μέθοδος Newton περιγράφεται ως εξής:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (3-19)$$

Όπου $f(x)$ είναι το παράγωγο της λειτουργίας $f(x)=0$, x_n είναι μια υπάρχουσα τιμή και x_{n+1} είναι η αμέσως επόμενη τιμή.

Ξαναγράφοντας την εξίσωση (3-10) έχουμε:

$$f(I) = I_{sc} - I - I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right] \quad (3-20)$$

Ενώ, βάζοντας το παραπάνω στην εξίσωση (3-19) έχουμε την ακόλουθη αναδρομική εξίσωση ενώ το ρεύμα εξόδου (I) υπολογίζεται με επαναληπτική μέθοδο:

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I_n - I_0 \left[e^{\frac{q(V+I_n R_s)}{nkT}} - 1 \right]}{-1 - I_0 \left(\frac{qR_s}{nkT} \right) e^{\frac{q(V+I_n R_s)}{nkT}}} \quad (3.21)$$

Για την εφαρμογή αυτού του τύπου στη μοντελοποίηση του συστήματος στο περιβάλλον Simulink, χρησιμοποιήθηκε ένας ενσωματωμένος κωδικός Matlab. Ο κώδικας αυτός, πραγματοποιεί τον υπολογισμό πέντε φορές κατ' επανάληψη, για να διαβεβαιώσει τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Περισσότερες και λεπτομερέστερες πληροφορίες πάνω σ' αυτό, βρίσκονται στο παρακάτω κεφάλαιο όπου εξετάζεται η εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου στο Simulink.

3.3 Εφαρμογή του Simulink στην φωτοβολταϊκή γεννήτρια

3.3.1 Μοντέλο φ/β γεννήτριας

Το μοντέλο Sanyo HIP-215NKHE5 επελέγη για να εφαρμοστεί στο περιβάλλον Simulink. Για την εφαρμογή, χρησιμοποιήθηκαν οι τύποι που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 3 και οι σταθερές που δίνονται στο φυλλάδιο με τα χαρακτηριστικά που παρέχει ο κατασκευαστής. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αυτού του φ/β πλαισίου, δίνονται παρακάτω, στον πίνακα 3.1

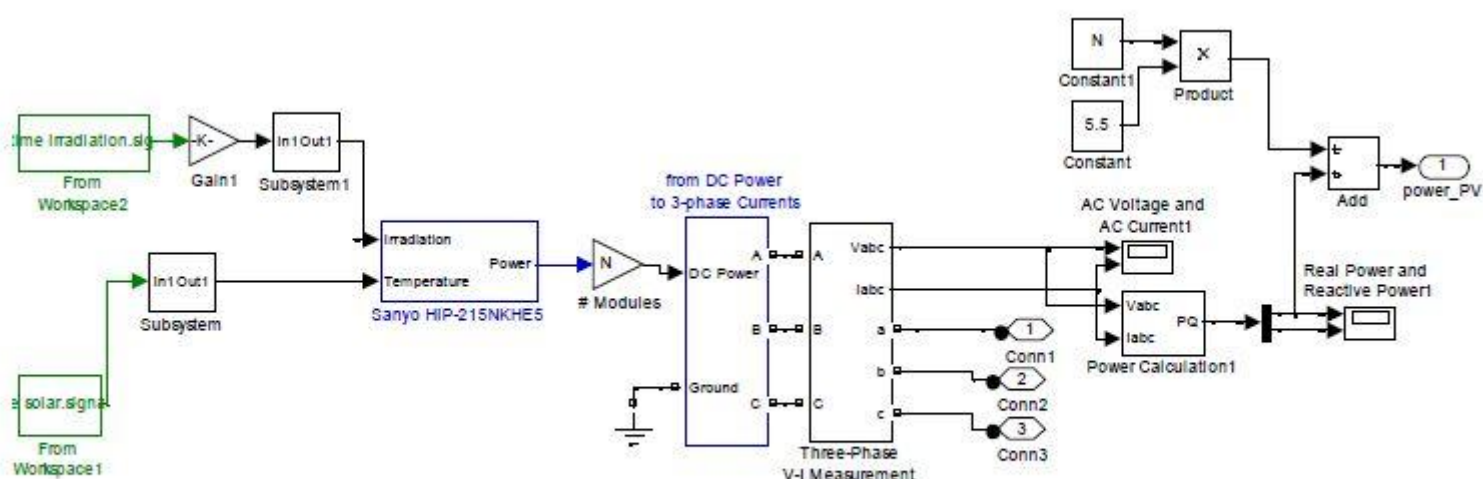
Το φ/β πλαίσιο παρέχει μικρότερη ισχύ από αυτήν που καθορίζεται από το φυλλάδιο του κατασκευαστή, κάτι που είναι, ωστόσο, φυσιολογικό, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία την πρώτη εβδομάδα του Ιανουαρίου, είναι μικρότερη από 1000W/m^2 .

Datasheet for the PV module

Models HIP-xxxNKHE5		
Electrical data	215	214
Maximum power (Pmax) [W]	215	214
Max. power voltage (Vpm) [V]	42.0	41.9
Max. power current (Ipm) [A]	5.13	5.12
Open circuit voltage (Voc) [V]	51.6	51.5
Short circuit current (Isc) [A]	5.61	5.60
Warranted min. power (Pmin) [W]	204.3	203.3
Maximum over current rating [A]	15	
Output power tolerance [%]	+10 / -5	
Max. system voltage [Vdc]	1000	
Temperature coeff. of Pmax [%/°C]	-0.30	
Temperature coeff. of Voc [V/°C]	-0.129	-0.129
Temperature coeff. of Isc [mA/°C]	1.68	1.68
NOCT [°C]	48.0	
Note 1: Standard test conditions: Air mass 1.5, Irradiance = 1000 W/m ² , Cell temperature = 25 °C.		
Note 2: The values in the above table are nominal.		

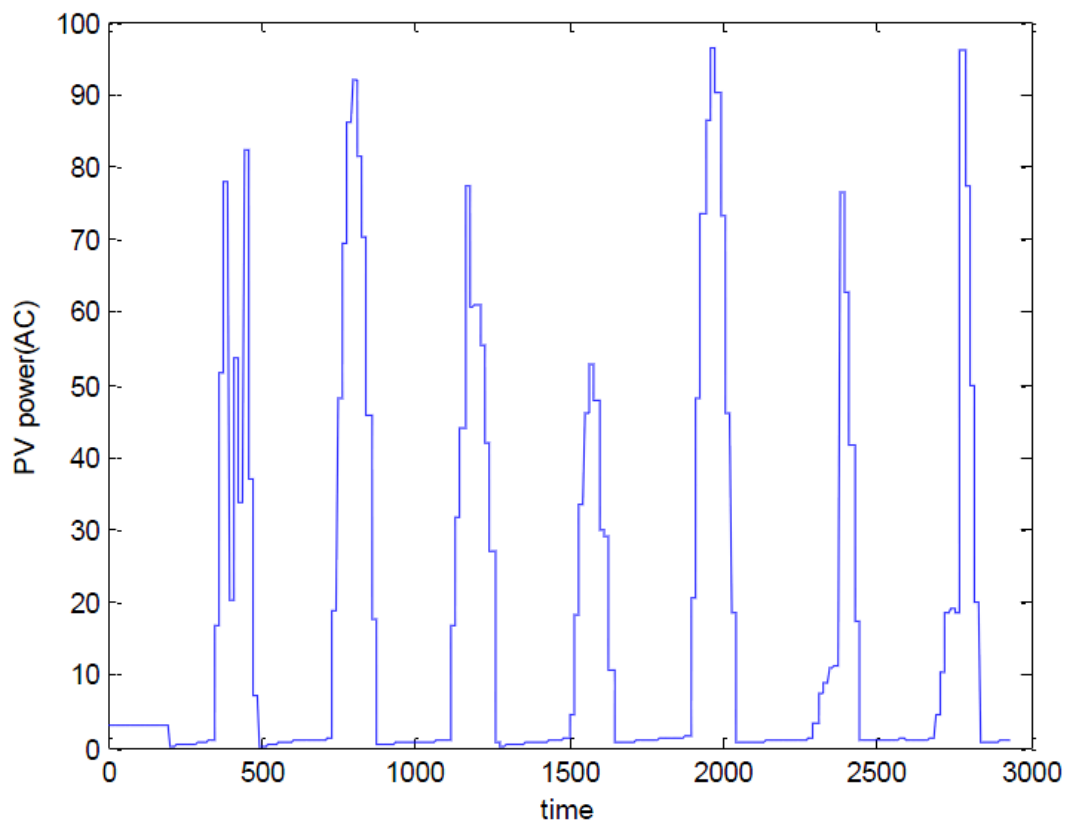
Πίνακας 3.1 Τα φυλλάδιο με τα δεδομένα για το Φ/Β πλαίσιο

Η διεπαφή της φ/β γεννήτριας με το υπόλοιπο σύστημα, φαίνεται στο σχήμα (3.5)



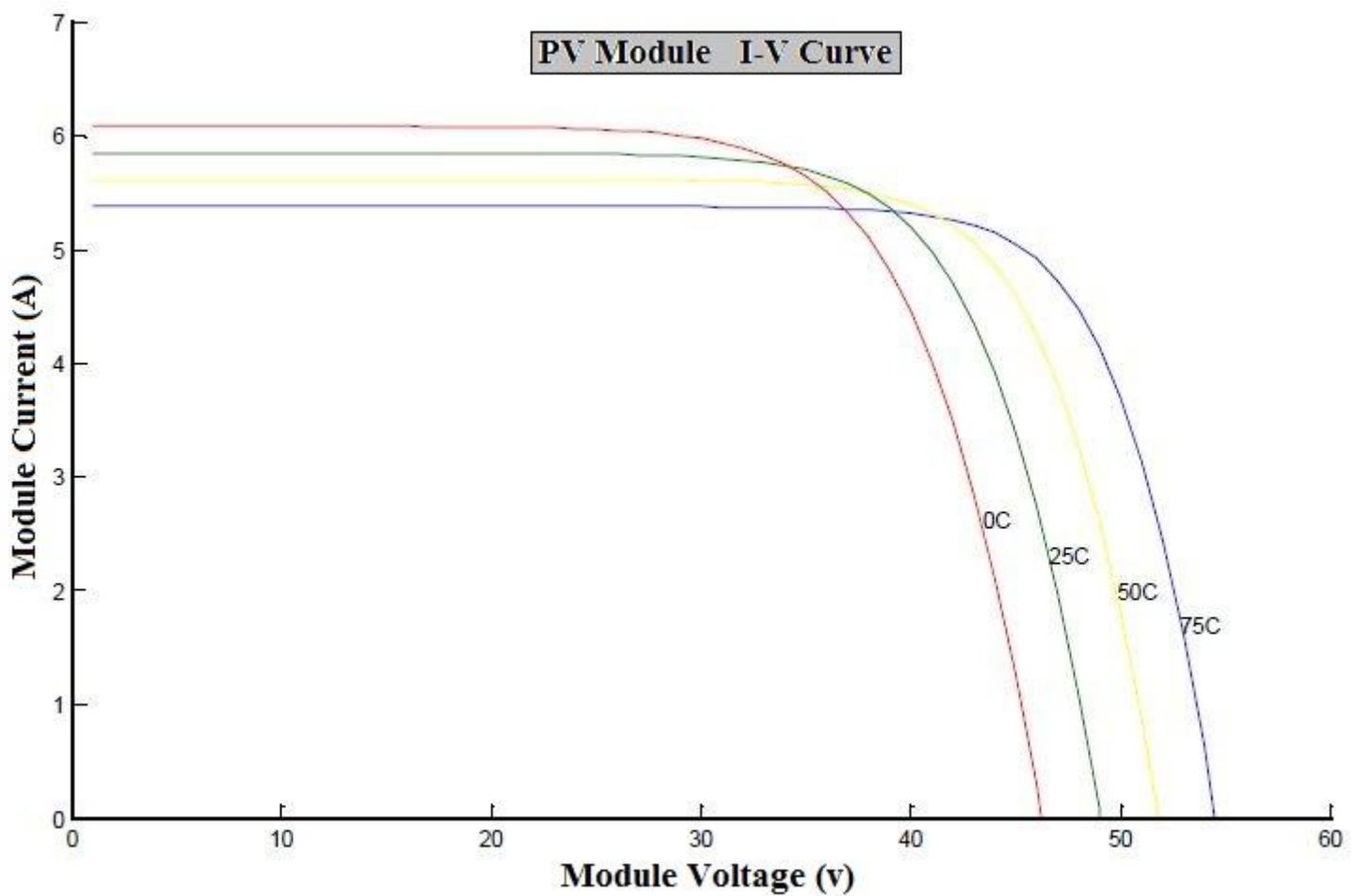
Σχήμα 3.5 Φ/β υποσύστημα

Το διάγραμμα αυτό, ονομάζει «ηλιακό υποσύστημα» (Solar Subsystem) και χρησιμοποιεί τα διαγράμματα «From Workspace» του Simulink για να αντλήσει τα απαραίτητα δεδομένα για την θερμοκρασία και την ακτινοβολία. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά εισέρχονται στο διάγραμμα «Sanyo HIP-215NKHE5» και παράγεται το συνεχές ρεύμα που παρέχει το φ/β πλαίσιο. Στη συνέχεια, το ρεύμα εξόδου πολλαπλασιάζεται επί N, όπου N είναι ο αριθμός φ/β πλαισίων του συστήματος. Στη συνέχεια, το συνεχές ρεύμα μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο και προστίθεται στο εικονικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε σαν ρυθμιστής τάσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ηλιακού υποσυστήματος για την πρώτη εβδομάδα του Ιανουαρίου, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:



Σχήμα 3.6 Φ/Β ισχύς για ένα Φ/Β πλαίσιο, την πρώτη εβδομάδα του Ιανουαρίου

Η φωτοβολταϊκή μονάδα παρέχει λιγότερη ενέργεια από αυτή που καθορίζεται στο δελτίο του κατασκευαστή, αλλά αυτό συμβαίνει συνήθως, αφού η ηλιακή ακτινοβολία κατά την πρώτη εβδομάδα του Ιανουαρίου είναι σημαντικά μικρότερη από 1.000 W/m^2 . Το μοντέλο αυτό, ελέγχθηκε επίσης για διαφορετικές τάσεις και θερμοκρασίες, και το διάγραμμα που προέκυψε, φαίνεται παρακάτω στο σχήμα (3.7).

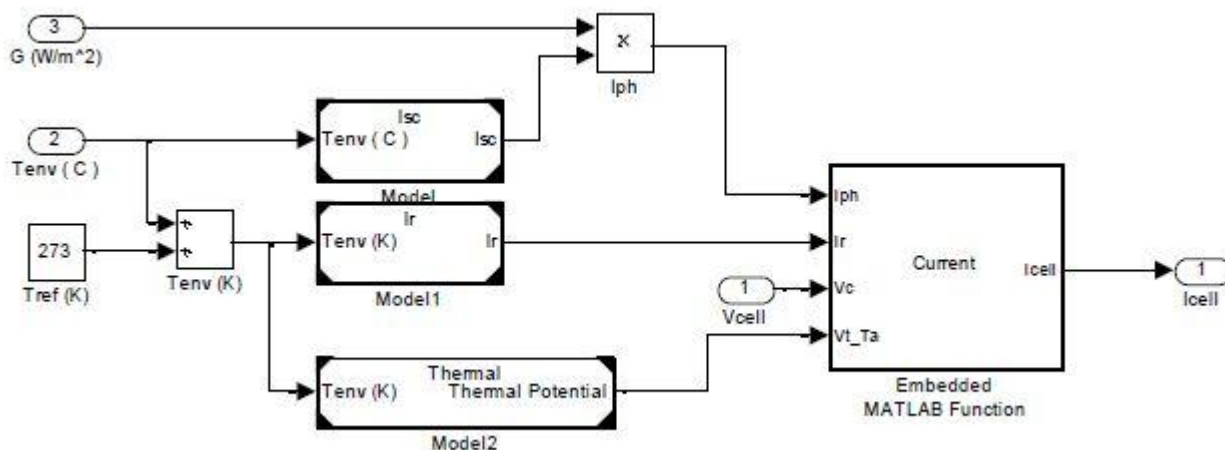


Σχήμα 3.7 Λειτουργία ενός φ/β πλαισίου με θερμοκρασία που ποικίλει

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου της φ/β κυψέλης, ανταποκρίνονται καλά στις φυσικές ιδιότητες ενός φ/β πλαισίου. Για μια θερμοκρασία 25°C και με δεδομένη ακτινοβολία 1000W/m^2 , περιμέναμε να παρέχεται τάση $51,6\text{ V}$, σύμφωνα με το φυλλάδιο του κατασκευαστή, ενώ η παραγόμενη τάση είναι 49 V . Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο προσεγγίζει την πραγματική απόδοση του πλαισίου Sanyo HIP-NKHE5.

3.3.2 Μοντέλο φ/β κυψέλης

Το μοντέλο για μία φ/β κυψέλη, απεικονίζεται παρακάτω στο σχήμα (3.8) :



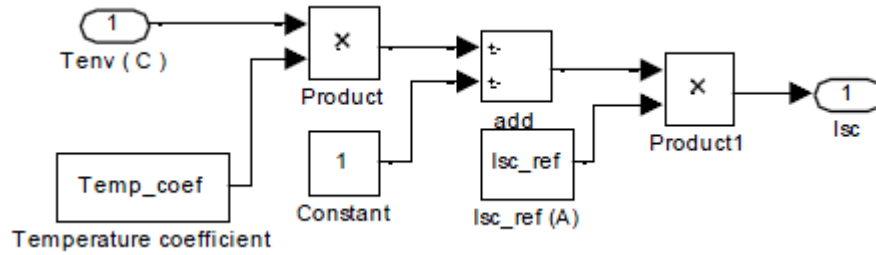
Σχήμα 3.8: Μοντέλο Simulink για μία φ/β κυψέλη.

Το μοντέλο έχει ως εισόδους την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία και υπολογίζει το αντίστοιχο ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}), το ανάστροφο ρεύμα κόρου (I_r) το ρεύμα που παράγεται από τα φωτόνια (I_{ph}) και τη θερμική δυναμική ($V_t Ta$). Τα διαγράμματα που υπολογίζουν τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα συζητηθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου. Η έξοδος αυτού του διαγράμματος (I_{cell}) υπολογίζεται με τη χρήση μιας ενσωματωμένης λειτουργίας του Matlab, η οποία εφαρμόζει, όπως αναφέρθηκε στο παραπάνω κεφάλαιο, τον παρακάτω τύπο:

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{sc} - I_n - I_0 \left[e^{\frac{q(V + I_n R_s)}{nkT}} - 1 \right]}{-1 - I_0 \left(\frac{qR_s}{nkT} \right) e^{\frac{q(V + I_n R_s)}{nkT}}}$$

Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε μια λειτουργία του Matlab και όχι ένα διάγραμμα Simulink είναι το ότι ο τύπος περιέχει ένα κύκλωμα το οποίο, εάν εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας το Simulink, προσθέτει μια περιττή πολυπλοκότητα και καθυστέρηση στο όλο σύστημα. Ο κώδικας του Matlab συμπεριλαμβάνεται στο παράρτημα στο τέλος .

Το μοντέλο του Simulink για τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{sc}) φαίνεται στο σχήμα (3.9) .



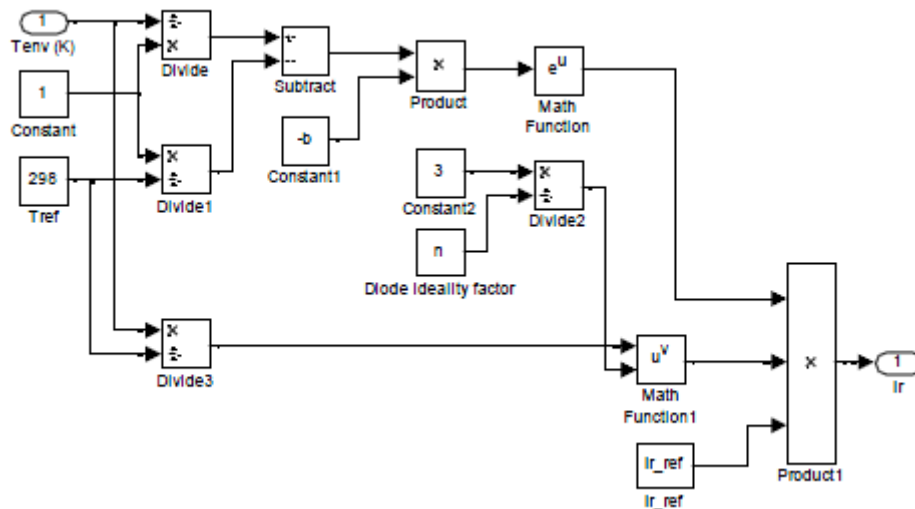
Σχήμα 3.9 Μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{sc})

Το μοντέλο, είναι η εφαρμογή στο Simulink, του παρακάτω τύπου:

$$I_{sc_T} = I_{sc_Tref} [1 + a(T - T_{ref})]$$

Το I_{sc_Tref} και το a βρίσκονται από το φυλλάδιο με τα χαρακτηριστικά, ενώ το I_{sc_T} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης για θερμοκρασία T .

Το μοντέλο του Simulink για τον υπολογισμό του ανάστροφου ρεύματος κόρου (I_r) φαίνεται στο σχήμα (3.10).



Σχήμα 3.10 Μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό του ανάστροφου ρεύματος κόρου (I_r)

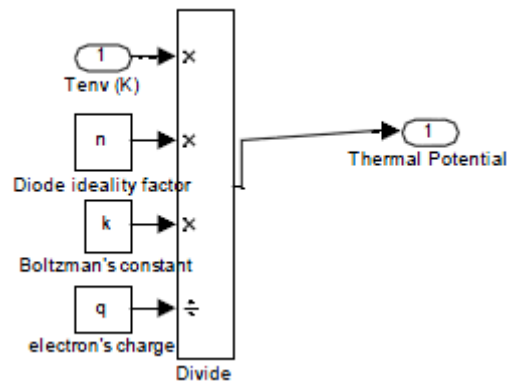
Το μοντέλο, είναι η εφαρμογή στο Simulink, του παρακάτω τύπου:

$$I_{0_T} = I_{0_Tref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{3/n} * e^{\frac{-qE_g}{nk} (1/T - 1/T_{ref})}$$

Το I_{0_Tref} είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου για την θερμοκρασία αναφοράς και μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$I_{0_Tref} = \frac{I_{sc}}{(e^{(qV_{oc}/nkT)} - 1)}$$

Το μοντέλο του Simulink για τον υπολογισμό της θερμικής δυναμικής, φαίνεται στο σχήμα (3.11).



Σχήμα 3.11: Μοντέλο Simulink για τον υπολογισμό της θερμικής δυναμικής.

Το μοντέλο, είναι η εφαρμογή στο Simulink, του παρακάτω τύπου:

$$V_t = nkT / q$$

Όπου : n είναι ο παράγων ιδανικότητας (1.62)

k Είναι η σταθερά του Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K)

T Είναι η απόλυτη θερμοκρασία της επαφής p-n

q Είναι το φορτίο ενός ηλεκτρονίου (1.602×10^{-19} eV)

Κεφάλαιο 4 – Κυψέλη Καυσίμου

4.1 Εισαγωγή

Μία κυψέλη καυσίμου αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, ένα αρνητικά φορτισμένο - άνοδο και ένα θετικά φορτισμένο - κάθοδο, τα οποία χωρίζονται από μια μεμβράνη ηλεκτρολύτη. Το υδρογόνο οξειδώνεται στην άνοδο και το οξυγόνο μειώνεται στην κάθοδο. Τα πρωτόνια μεταφέρονται από την άνοδο στην κάθοδο, μέσω της μεμβράνης ηλεκτρολύτη και τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται στην κάθοδο δια μέσου ενός εξωτερικού κυκλώματος. Στη φύση, τα μόρια δεν μπορούν να παραμείνουν ιονισμένα, συνεπώς επανενώνονται διαρκώς με άλλα μόρια ώστε να επιστέφουν στη φυσική τους κατάσταση. Τα πρωτόνια του υδρογόνου στις κυψέλες καυσίμου, παραμένουν ιονισμένα ταξιδεύοντας από μόριο σε μόριο διαμέσου μιας πολυμερούς μεμβράνης, κατασκευασμένης από ομάδες από σουλφουρικό οξύ σε μια ραχοκοκαλιά από τέφλον. Τα ηλεκτρόνια έλκονται από τα υλικά των ημιαγωγών και ταξιδεύουν στο φορτίο, όταν αυτό είναι απαραίτητο. Στην κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια, σχηματίζοντας νερό και παράγοντας θερμότητα. Τόσο η άνοδος όσο και η κάθοδος περιέχουν ένα καταλύτη που επιταχύνει τις ηλεκτροχημικές διαδικασίες, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.

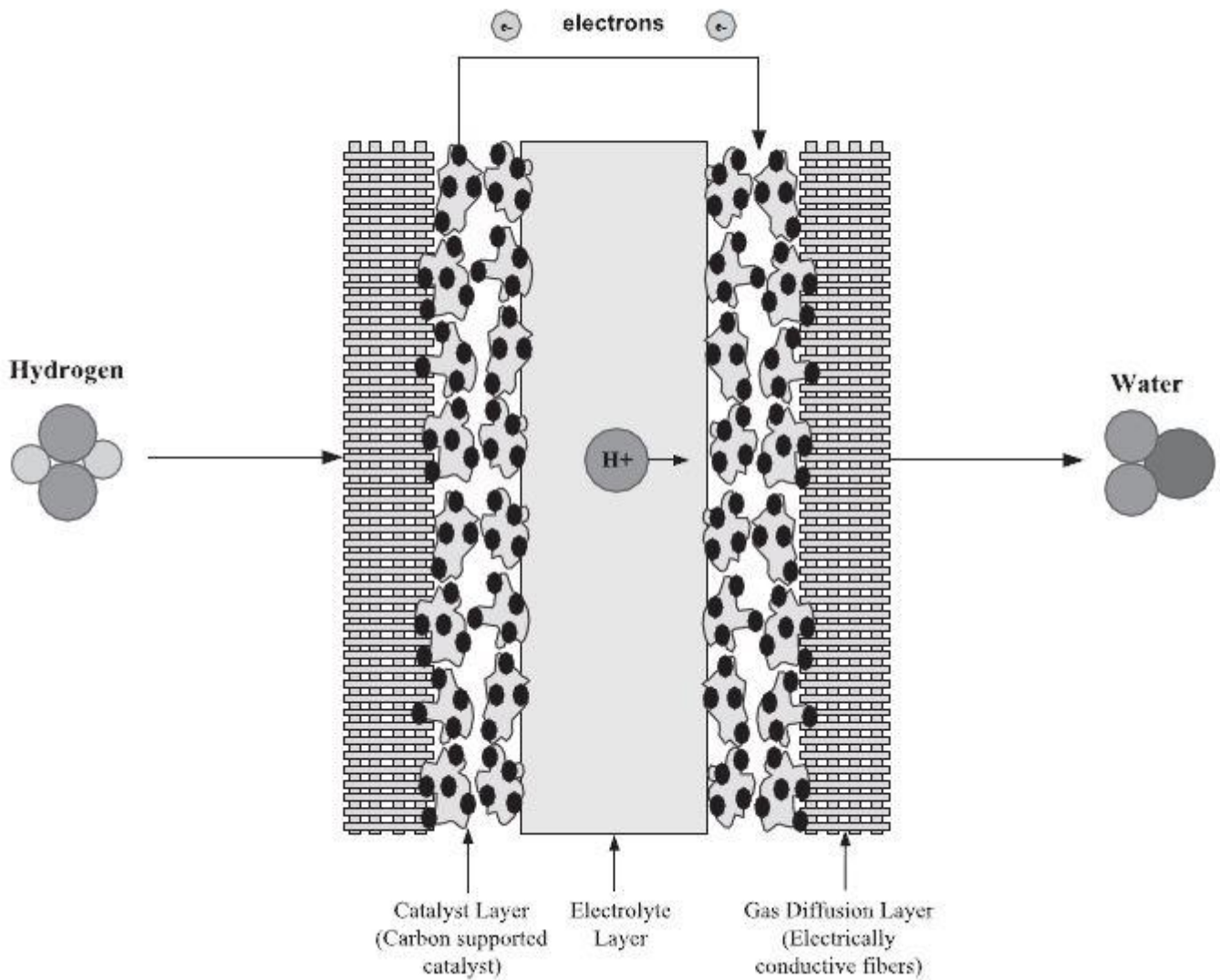
Σε μία τυπική PEM, (Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων) λαμβάνουν χώρα οι ακόλουθες αντιδράσεις: (Άνοδος, κάθοδος, ολική)

- Αντίδραση ανόδου :
$$H_2(g) \rightarrow 2H^+(aq) + 2e^-$$
- Αντίδραση καθόδου :
$$\frac{1}{2}O_2(g) + 2H^+(aq) + 2e^- \rightarrow H_2O(l)$$
- Συνολική αντίδραση :
$$H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(l) + electric\ energy + waste\ heat$$

Τα αντιδρώντα, μεταφέρονται με διάχυση ή και με τη μετάδοση της θερμότητας, στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων, όπου λαμβάνουν χώρα οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Το νερό και η περίσσεια θερμότητα που παράγονται από την κυψέλη καυσίμου πρέπει διαρκώς να αφαιρούνται και μπορούν να παρουσιάσουν σοβαρά προβλήματα στις κυψέλες καυσίμου PEM.

Τα κύρια δομικά στοιχεία μια κυψέλης καυσίμου PEM, είναι η μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), ο καταλύτης και το στρώμα διάχυσης αερίων (GDL), οι πλάκες ροής αερίων (FFP), οι φλάντζες και οι τελικές πλάκες, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.1. Στην πραγματικότητα, τα στρώματα της κυψέλης καυσίμου είναι η μεμβράνη ανταλλαγής

πρωτονίων, ο καταλύτης και το στρώμα διάχυσης αερίων. Τα στρώματα αυτά, στην ουσία στριμώνονται μεταξύ τους μέσω διάφορων διαδικασιών και το «σάντουιτς» αυτό, ονομάζεται «διάταξη μεμβράνης-ηλεκτροδίου» (MEA). Μια συστοιχία πολλών κυψελών, έχει πολλές διατάξεις μεμβράνης-ηλεκτροδίου στριμωγμένες ανάμεσα στις διπολικές πλάκες ροής και μόνο ένα σετ τελικές πλάκες [29] .



Σχήμα 4.1 Η διάταξη μιας κυψέλης καυσίμου PEM

Κάποια πλεονεκτήματα των συστημάτων κυψελών καυσίμου είναι τα εξής :

- Έχουν δυναμική για μεγάλη λειτουργική απόδοση
- Υπάρχουν πολλοί τύποι πηγών καυσίμου και πολλές μέθοδοι ανεφοδιασμού της κυψέλης με καύσιμο
- Ο σχεδιασμός τους ευνοεί την κατανομημένη παραγωγή ενέργειας

- Αποτελούν την πιο καθαρή πηγή ενέργειας (δεν ρυπαίνουν)
- Δεν έχουν κινούμενα μέρη, κατά συνέπεια είναι πιο αξιόπιστες και χρειάζονται λιγότερο τακτικά συντήρηση
- Δεν χρειάζονται επαναφόρτιση, και παρέχουν ισχύ αμέσως μετά τον ανεφοδιασμό τους με καύσιμο

Κάποιοι περιορισμοί, κοινοί σε όλες τις κυψέλες καυσίμου είναι οι ακόλουθοι :

- Το κόστος των κυψελών καυσίμου είναι ακόμα πολύ υψηλό, λόγω του ότι είναι απαραίτητα κάποια υλικά με συγκεκριμένες ιδιότητες. Υπάρχει ένα θέμα με φθηνά ανταλλακτικά, όπως ο λευκόχρυσος και το υλικό Nafion.
- Η διαδικασία αναμόρφωσης του καυσίμου, για να λειτουργήσει απαιτεί εξοπλισμό που είναι ακριβός και βαρύς
- Εάν χρησιμοποιηθεί κάποιο καύσιμο εκτός του υδρογόνου, η απόδοση της κυψέλης σταδιακά μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου εξαιτίας της φθοράς του καταλύτη και τη δηλητηρίαση του ηλεκτρολύτη από μονοξείδιο του άνθρακα.

<i>Component</i>	<i>Description</i>	<i>Common Types</i>
Proton exchange membrane	Enables hydrogen protons to travel from the anode to the cathode.	Persulfonic acid membrane (Nafion 112, 115, 117)
Catalyst layers	Breaks the fuel into protons and electrons. The protons combine with the oxidant to form water at the fuel cell cathode. The electrons travel to the load.	Platinum/carbon catalyst
Gas diffusion layers	Allows fuel/oxidant to travel through the porous layer, while collecting electrons	Carbon cloth or Toray paper
Flow field plates	Distributes the fuel and oxidant to the gas diffusion layer	Graphite, stainless steel
Gaskets	Prevent fuel leakage, and helps to distribute pressure evenly	Silicon, Teflon
End plates	Holds stack layers in place	Stainless steel, graphite, polyethylene, PVC

Πίνακας 4.1. Βασικά δομικά στοιχεία κυψέλης καυσίμου

4.2 Τύποι κυψελών καυσίμου

Αφήνοντας κατά μέρος τα πρακτικά ζητήματα, όπως τα κατασκευαστικά κόστη και το κόστος των υλικών, τα δύο θεμελιώδη τεχνικά προβλήματα με τις κυψέλες καυσίμου είναι ο χαμηλός δείκτης αντίδρασης, ο οποίος οδηγεί σε χαμηλή ισχύ και ρεύμα και το γεγονός ότι το υδρογόνο δεν είναι ένα καύσιμο που μπορεί να βρεθεί έτοιμο. Για την επίλυση των προβλημάτων αυτών, έχουν δοκιμαστεί πολλοί διαφορετικοί τύποι κυψελών καυσίμου. Αυτό που κατεξοχήν διαφοροποιεί τον έναν τύπο από τον άλλον είναι ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται, παρόλο που πάντοτε εντοπίζονται και κάποιες άλλες διαφορές. Επί του παρόντος, έξι κατηγορίες κυψελών καυσίμου φαίνεται ότι μπορούν να αποτελέσουν βιώσιμα συστήματα για το εγγύς μέλλον τουλάχιστον. Βασικές πληροφορίες για τα συστήματα αυτά δίνονται στον πίνακα 4.2.

Οι έξι τύποι κυψελών καυσίμου είναι οι εξής :

1. PEMFC- Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων
2. DMFC - Κυψέλη καυσίμου με άμεση παροχή μεθανόλης
3. PAFC – Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος
4. AFC – Αλκαλική κυψέλη καυσίμου
5. SOFC – Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων
6. MCFC – Κυψέλη καυσίμου ανθρακικού άλατος

Εκτός από το ότι αντιμετωπίζουν διαφορετικά προβλήματα, οι διαφορετικοί τύποι κυψελών καυσίμου προσπαθούν και να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου με διαφορετικό τρόπο.

Στη συνέχεια, θα εξετάσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που έχουν οι διαφορετικοί τύποι κυψελών καυσίμου. Η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων θα εξετασθεί λεπτομερώς παρακάτω, καθώς είναι αυτή που χρησιμοποιείται στο εν λόγω σύστημα.

Είδος κυψέλης καυσίμου	<i>Proton Exchange Membrane (PEMFC)</i>	<i>Alkaline (AFC)</i>	<i>Phosphoric Acid (PAFC)</i>	<i>Molten Carbonate (MCFC)</i>	<i>Solid Oxide (SOFC)</i>
Ηλεκτρολύτης	πολυμερής μεμβράνη	30-50% KOH	φωσφορικό οξύ	τήγματα ανθρακικών αλάτων (Li ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃)	αγώγιμο κεραμικό υλικό
Θερμοκρασία	50-80°C	60-90°C	160-220°C	620-660°C	800-1000°C
Καύσιμο	H ₂ , CH ₄ , CH ₃ OH	H ₂	H ₂ , CH ₄	CH ₄	H ₂ , CH ₄
Αντίδραση Ανόδου	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	H ₂ + 2OH ⁻ → 2H ₂ O + 2e ⁻	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	H ₂ + CO ₃ ²⁻ → H ₂ O + CO ₂ + 2e ⁻	H ₂ + O ²⁻ → H ₂ O + 2e ⁻
Αντίδραση Καθόδου	½O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O	½O ₂ + H ₂ O + 2e ⁻ → 2OH ⁻	½O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O	½O ₂ + CO ₂ + 2e ⁻ → CO ₃ ²⁻	½O ₂ + 2e ⁻ → O ²⁻
Βαθμός απόδοσης	50-60%	50-60%	55%	60-65%	55-65%
Δυναμική απόκριση	γρήγορη	γρήγορη	αργή	αργή	γρήγορη (όταν είναι ζεστή)
Χρόνος εκκίνησης	άμεσα	άμεσα	περίπου 30 min	αρκετός ώρος	αρκετός ώρος
Εφαρμογές	διαστημική τεχνολογία, οχήματα, υποβρύχια, κινητές εφαρμογές	διαστημική τεχνολογία, οχήματα, υποβρύχια	παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συμπαραγωγή θερμότητας, οχήματα	παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
Πλεονεκτήματα	απλή δομή, χαμηλή θερμοκρασία, μικρός χρόνος εκκίνησης	γρήγορη αντίδραση καθόδου λόγω υψηλής θερμοκρασίας	μεγάλος βαθμός απόδοσης (συμπ. θερμότητας)	υψηλή θερμοκρασία, ευελιξία στην επιλογή του καυσίμου	υψηλή θερμοκρασία
Μειονεκτήματα	ακριβός καταλύτης (Pt)	πολύπλοκη απομάκρυνση του CO ₂	Pt καταλύτης, μικρή ισχύς, ογκώδης και βαρύ	μικρή βιωσιμότητα	μικρή βιωσιμότητα

Πίνακας 4.2. Συγκεντρωμένα στοιχεία για τους διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου

4.2.1 AFC – Αλκαλική κυψέλη καυσίμου

Σε μια αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC), τα ιόντα υδροξυλίου (OH⁻) είναι διαθέσιμα και κινητικά. Στην άνοδο, αντιδρούν με το οξυγόνο απελευθερώνοντας ενέργεια και ηλεκτρόνια και παράγοντας νερό. Στην κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από το ηλεκτρόδιο και το νερό στον ηλεκτρολύτη, σχηματίζοντας νέα ιόντα υδροξυλίου (OH⁻).

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μια αλκαλική κυψέλη καυσίμου είναι οι εξής : (ολική, άνοδος, κάθοδος)

- Αντίδραση ανόδου : $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$
- Αντίδραση καθόδου : $2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$
- Συνολική αντίδραση : $O_2 + 4e^- + 2H_2O \rightarrow 4OH^-$

Τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των AFC κυψελών καυσίμου παρατίθενται από κάτω :

- +Χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας
- +Δεν χρειάζονται βαρύ συμπιεστή
- +Ταχεία κινητική καθόδου

- Πολύ μεγάλο μέγεθος
- Ανάγκη για καθαρό υδρογόνο και οξυγόνο
- Χρήση διαβρωτικού υγρού ηλεκτρολύτη

4.2.2 PAFC - Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος

Η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) αποτελεί έναν τύπο κυψέλης καυσίμου, που χρησιμοποιεί υγρό φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτη. Οι κυψέλες καυσίμου PAFC θεωρούνται κατάλληλες για χρήση μαζί με ένα CHP για παραγωγή υβριδικής ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των AFC κυψελών καυσίμου παρατίθενται από κάτω :

- +Διαθέσιμες στο εμπόριο
- +Ανεκτικές στα καύσιμα
- +Παράγουν θερμότητα για συμπαραγωγή
- Χαμηλή αποδοτικότητα
- Μικρή βιωσιμότητα
- Ακριβός καταλύτης

4.2.3 MCFC – Κυψέλη καυσίμου ανθρακικού άλατος

Οι κυψέλες καυσίμου ανθρακικού άλατος (MCFC) αποτελούν κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, που λειτουργούν σε θερμοκρασίες 600° C και πάνω. Επί του παρόντος εξελίσσονται για να χρησιμοποιηθούν για συστήματα με φυσικό αέριο και ενέργεια με βάση τον άνθρακα για εφαρμογές βιομηχανικές και στρατιωτικές. Οι κυψέλες MCFC χρησιμοποιούν έναν ηλεκτρολύτη που αποτελείται από ένα λειωμένο μίγμα ανθρακικού άλατος που αναστέλλεται σε ένα πορώδες, χημικά αδρανές κεραμικό πλέγμα ενός στερεού κεραμικού ηλεκτρολύτη από β-οξειδίου του αργιλίου (BASE). Καθώς η λειτουργία τους γίνεται σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μη πολύτιμα μέταλλα ως καταλύτες στην άνοδο και στην κάθοδο, μειώνοντας, με αυτόν τον τρόπο, το κόστος [Wikipedia.org].

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μια κυψέλη καυσίμου ανθρακικού άλατος (MCFC) είναι οι εξής : (ολική, άνοδος, κάθοδος)

- Αντίδραση ανόδου : $H_2 + \frac{1}{2} O_2 + CO_2 (anode) \rightarrow H_2O + CO_2 (cathode)$
- Αντίδραση καθόδου : $2H_2 + 2CO_2^{3-} \rightarrow 2H_2O + 2CO_2 + 4e^-$
- Συνολική αντίδραση : $O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow 2CO_2^{3-}$

Τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των MCFC κυψελών καυσίμου παρατίθενται από κάτω:

- +υψηλός βαθμός απόδοσης
- +παραγωγή θερμότητας
- αστάθεια ηλεκτρολύτη
- μικρή βιωσιμότητα

4.2.4 SOFC – Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων

Η SOFC είναι μια συσκευή σε απολύτως στερεή κατάσταση, η οποία χρησιμοποιεί ως ηλεκτρολύτη ένα οξείδιο, κεραμικό υλικό ιοντικά αγωγίμο. Είναι, κατά συνέπεια, μια πολύ πιο απλή σύλληψη σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα κυψελών καυσίμου. Για την ώρα, είναι ο λιγότερο ανεπτυγμένος τύπος κυψέλης καυσίμου, αλλά σε ερευνητικό στάδιο αναπτύσσονται διάφορες καινοτομίες πάνω στα υλικά και στο σχεδιασμό της κυψέλης.

Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μια κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) είναι οι εξής: (ολική, άνοδος με χρήση υδρογόνου ή μονοξειδίου του άνθρακα, κάθοδος)

- Συνολική αντίδραση: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$
- Αντίδραση ανόδου : $2H_2 + 2O^{2-} \rightarrow 2H_2O + 4e^-$, if hydrogen is used as fuel
 $2CO_2 + 2O^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 4e^-$, if carbon monoxide is used as fuel
- Αντίδραση καθόδου: $O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$

Τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των SOFC κυψελών καυσίμου παρατίθενται από κάτω :

- +Υψηλός βαθμός απόδοσης
- +Ανεκτικότητα στα καύσιμα
- +Παίρνει απευθείας φυσικό αέριο
- +Όχι αναμορφωτής
- +Παραγωγή θερμότητας
- Υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας
- Εξωτικά μέταλλα
- Ζητήματα οξείδωσης
- Χαμηλή ισχύς

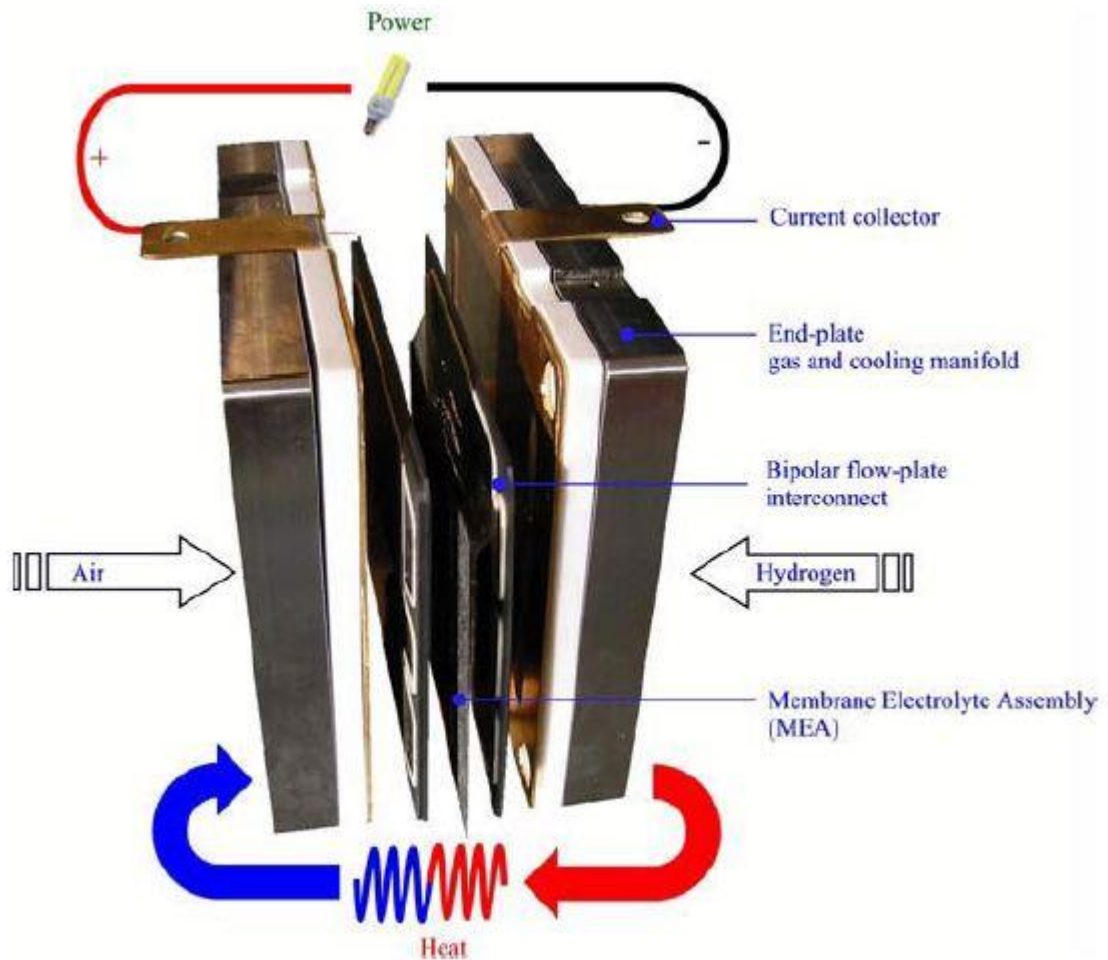
4.3 PEMFC - Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων

Η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) ονομάζεται επίσης στερεή κυψέλη καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (SPFC) και αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στις Ηνωμένες Πολιτείες, την δεκαετία του 1960 από την General Electric, ώστε να την χρησιμοποιήσει η NASA για τα πρώτα επανδρωμένα διαστημικά οχήματα. Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιεί είναι ένας πολυμερικός αγωγός ιόντων, ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε κάθε του πλευρά με ηλεκτροδίο πορώδους μορφής που περιέχουν καταλύτη (συνήθως λευκόχρυσο). Οι βασικές αρχές λειτουργίας αυτής της κυψέλης καυσίμου, συζητήθηκαν στην εισαγωγή αυτού του κεφαλαίου, όπως και οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία της.

Τα βασικά πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των κυψελών καυσίμου PEM είναι τα εξής:

- +Είναι εμπορικά διαθέσιμες κυψέλες με τεχνολογία αιχμής
- +Άριστες στη λειτουργία με υδρογόνο
- +Άμεση εκκίνηση και εκπληκτικά δυναμικά
- +Απλό σύστημα και έλεγχος
- +Εύχρηστος, ανθεκτικός και γερός σχεδιασμός
- +Μεγάλη βιωσιμότητα
- Υψηλό κατασκευαστικό κόστος
- Χρειάζονται καθαρό υδρογόνο
- Βαρύς εξοπλισμός και περίπλοκο σύστημα διαχείρισης νερού και θερμότητας

Στο σχήμα 4.2. απεικονίζεται η διάταξη της κυψέλης καυσίμου PEM. Είναι φανερό ότι ο σχεδιαστής της κυψέλης καυσίμου πρέπει να συνεκτιμήσει μια σειρά παραγόντων όπως η ροή καυσίμου και ψυκτικού, η αποφυγή διαρροής υδρογόνου στο περιβάλλον και η καλύτερη δυνατή επαφή ηλεκτρολύτη – καταλύτη – ηλεκτροδίων.



Σχήμα 4.2 . Διάταξη κυψέλης καυσίμου PEM

4.3.1 Ηλεκτρολύτης πολυμερικής μεμβράνης

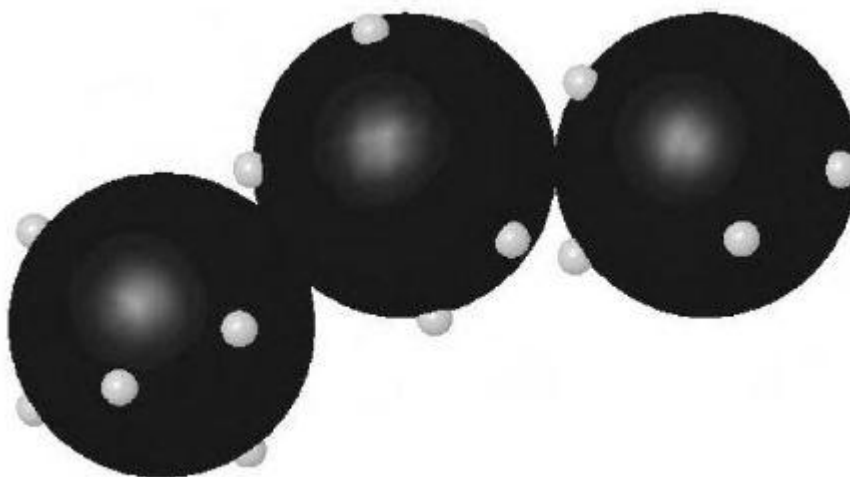
Η κύρια λειτουργία της χρήσης πολυμερικής μεμβράνης ως ηλεκτρολύτη είναι η δυνατότητα που έχουν τα H^+ ιόντα να τη διαπερνούν από την κάθοδο στην άνοδο. Επίσης, παρέχει ηλεκτρική μόνωση, εμποδίζοντας τα ηλεκτρόνια από το να τη διαπερνούν, καθώς κάτι τέτοιο θα επέφερε σημαντικές απώλειες ισχύος για την κυψέλη καυσίμου. Περισσότερες λεπτομέρειες πάνω σ' αυτά θα συζητηθούν στη συνέχεια, στο κεφάλαιο που αφορά τις απώλειες τάσεις. Η ευρύτερα γνωστή και καθιερωμένη πρώτη ύλη κατασκευής της μεμβράνης είναι το Nafion, το οποίο έχει δομικές ομοιότητες με το Teflon και την αλυσίδα του σουλφονικού οξέως. Από την οπτική της χρήσης σε κυψέλη καυσίμου, τα κύρια χαρακτηριστικά του Nafion είναι τα εξής:

- Παρουσιάζει υψηλή χημική αντίσταση
- είναι ανθεκτικό, επιτρέποντας την κατασκευή πολύ λεπτών λωρίδων
- είναι όξινο

- μπορεί να απορροφήσει μεγάλες ποσότητες νερού
- υπό κατάλληλες συνθήκες υγρασίας άγει πρωτόνια

4.3.2 Καταλύτης

Ο καλύτερος καταλύτης, τόσο για την άνοδο όσο και για την κάθοδο, είναι ο λευκόχρυσος. Η λειτουργία του είναι να διευκολύνει τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στα ηλεκτρόδια. Ο καταλύτης από λευκόχρυσο, σχηματίζεται από πολύ μικρά μόρια λευκόχρυσου που είναι διεσπαρμένα στην επιφάνεια ατόμων άνθρακα. Το αποτέλεσμα, σε μια ιδανική μορφή, απεικονίζεται στο σχήμα 4.3. Ο λευκόχρυσος είναι διεσπαρμένος σε πολύ μικρά σωματίδια, γεγονός που επιτρέπει μεγάλη επιφάνεια σύνδεσης με τον ηλεκτρολύτη.



Σχήμα 4.3. Η δομή του υποστηριζόμενου με άνθρακα καταλύτη

4.3.3 Στρώμα διάχυσης αερίων

Το στρώμα διάχυσης αερίων αποτελείτε από υδροφοβικό χαρτί ή ύφασμα γραφίτη. Οι λειτουργίες του είναι οι εξής:

- Μεταφορά των ηλεκτρονίων από και προς τον καταλύτη
- Μεταφορά των αερίων από και προς τον ηλεκτρολύτη
- Απομάκρυνση του νερού (προϊόν της αντίδρασης) από την κάθοδο του καταλύτη
- Παροχή μηχανικής δύναμης στη διάταξη μεμβράνης – ηλεκτροδίου

4.3.4 Διαχείριση νερού

Ένα πολύ σημαντικό θέμα σε σχέση με τις κυψέλες καυσίμου PEM είναι η διαχείριση του νερού. Το νερό (προϊόν της αντίδρασης) που συγκεντρώνεται στο στρώμα διάχυσης πρέπει να εξάγεται για να μην οδηγήσει την κυψέλη σε πλημμύρισμα, όμως παράλληλα πρέπει να αφήνεται μια ισορροπημένη ποσότητα νερού να διαπερνά ώστε να καταφθάνει στα ηλεκτρόδια και στη μεμβράνη.

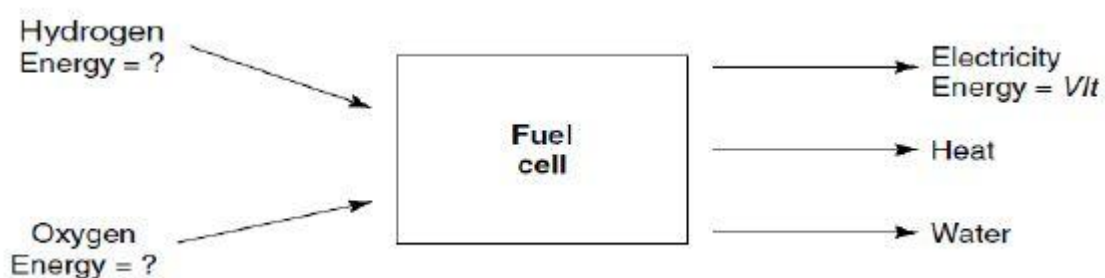
Κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, καθώς τα ιόντα διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη, σέρνουν μαζί τους από ένα έως πέντε μόρια νερού, ένα φαινόμενο που καλείται ήλεκτρο-όσμωση. Αυτό σημαίνει ότι, ιδιαίτερα σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος, η πλευρά της ανόδου του ηλεκτρολύτη μπορεί να στεγνώσει εντελώς, ακόμα και αν η πλευρά της καθόδου έχει αρκετό νερό. Ένα άλλο βασικό πρόβλημα είναι το φαινόμενο της ξηρότητας του αέρα σε υψηλές θερμοκρασίες. Ένας συνηθισμένος τρόπος επίλυσης των προβλημάτων αυτών, είναι υγραίνοντας τον αέρα, το υδρογόνο ή και τα δύο, πριν μπουν στην κυψέλη καυσίμου, κάτι που βελτιώνει τρομερά την απόδοση της κυψέλης καυσίμου.

4.4 Μαθηματική μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου PEM

Το παρόν μοντέλο της κυψέλης καυσίμου PEM, βασίζεται στην φυσική και θεωρητική ανάλυση, το λεγόμενο αναλυτικό μοντέλο. Αρχικά καθορίζεται η ιδανική απόδοση της μονάδας και στη συνέχεια, υπολογίζονται και αφαιρούνται από αυτήν, οι διάφορες απώλειες, με αποτέλεσμα μια καλή εκτίμηση της πραγματικής λειτουργίας. Για να απλουστευθεί η ανάλυση του μοντέλου, το κομμάτι της διαχείρισης του νερού πρέπει να εξαιρεθεί.

4.4.1 Ενέργεια και EMF της κυψέλης καυσίμου PEM

Έχοντας ήδη εξηγήσει τη βασική λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου, το σχήμα 4.4. απεικονίζει τις εισόδους και τις εξόδους της μονάδας.



Σχήμα 4.4. : Είσοδοι και έξοδοι της κυψέλης καυσίμου:

Η ηλεκτρική ισχύς και η ηλεκτρική ενέργεια μπορούν να υπολογιστούν με τους ακόλουθους τύπους:

$$\text{Ηλεκτρική Ισχύς : } I\sigma\chi\acute{\upsilon}\varsigma = VI \quad (4-1)$$

$$\text{Ηλεκτρική ενέργεια : } E\acute{\nu}\epsilon\rho\gamma\epsilon\iota\alpha = VIt \quad (4-2)$$

Η ενέργεια της χημικής εισόδου και εξόδου δεν μπορεί να καθοριστεί τόσο εύκολα. Η ενέργεια που είναι σημαντική στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου είναι η ελεύθερη ενέργεια Gibbs. Αυτή μπορεί να οριστεί ως «η ενέργεια που είναι διαθέσιμη για τη διεκπεραίωση εξωτερικών εργασιών, αψηφώντας οποιαδήποτε εργασία συμβαίνει εξαιτίας μεταβολών στην πίεση ή/και στον όγκο». Σε μια κυψέλη καυσίμου, οι «εξωτερικές εργασίες» συμπεριλαμβάνουν τη μεταφορά των ηλεκτρονίων γύρω από ένα εξωτερικό κύκλωμα, καθώς οποιαδήποτε εργασία συμβαίνει από κάποια αλλαγή στον όγκο ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο, δεν τιθασεύεται από την κυψέλη καυσίμου. Έτσι, για να προσδιοριστεί η ενέργεια που απελευθερώνεται στην κυψέλη καυσίμου, η διαφορά στην ελεύθερη ενέργεια Gibbs μεταξύ των αντιδρώντων και των προϊόντων πρέπει να προσδιοριστεί. Αυτό δίνεται από τον τύπο :

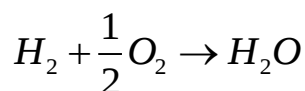
$$\Delta G = G \text{ προϊόντων} - G \text{ αντιδρώντων} \quad (4-3)$$

Ή, εάν τα αντιδρώντα και τα προϊόντα είναι υπό σταθερές συνθήκες ($T_0 = 298$, $15K$, $p_0 = 100kPa$), τότε, η εξίσωση (4-3) γίνεται:

$$\Delta G_f = G_f \text{ προϊόντων} - G_f \text{ αντιδρώντων} \quad (4-4)$$

Όπου G_f είναι η ελεύθερη ενέργεια Gibbs σχηματισμού

Η ελεύθερη ενέργεια Gibbs σχηματισμού δεν είναι σταθερή. Αλλάζει με την θερμοκρασία και με τη δομή (υγρό ή αέριο). Ο πίνακας 4.3. που ακολουθεί, απεικονίζει την ΔG_f για τη βασική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου :



Form of water product	Temperature (°C)	$\Delta \bar{g}_f$ (kJ mol ⁻¹)
Liquid	25	-237.2
Liquid	80	-228.2
Gas	80	-226.1
Gas	100	-225.2
Gas	200	-220.4
Gas	400	-210.3
Gas	600	-199.6
Gas	800	-188.6
Gas	1000	-177.4

Πίνακας 4.3. ΔG_f για τη βασική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου.

Εάν δεν υπάρχουν απώλειες σε μια κυψέλη καυσίμου, τότε όλη η ελεύθερη ενέργεια Gibbs μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Έτσι, μπορεί να βρεθεί η τάση λειτουργίας της κυψέλης (OCV).

Σύμφωνα με τη βασική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου, δύο ηλεκτρόνια περνούν γύρω από ένα εξωτερικό κύκλωμα για κάθε μόριο νερού που παράγεται και κάθε μόριο υδρογόνου που χρησιμοποιείται. Συνεπώς, για κάθε μόριο υδρογόνου που χρησιμοποιείται, 2N ηλεκτρόνια διαπερνούν το εξωτερικό κύκλωμα, όπου N είναι ο αριθμός Avogadro. Εάν $-e$ είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, τότε το φορτίο που ρέει είναι :

$$-2Ne = -2F \text{ (Coulombs)} \quad (4-5)$$

Όπου F είναι η σταθερά Faraday του φορτίου πάνω σε ένα μόριο ηλεκτρονίων.

Εάν E είναι η τάση της κυψέλης καυσίμου, τότε το ηλεκτρικό έργο που συντελείται με τη μετακίνηση του φορτίου γύρω από το κύκλωμα είναι :

- $\text{Ηλεκτρικό έργο που συντελείται} = \text{Φορτίο} \times \text{Τάση} = -2FE \text{ joules}$

Εάν το σύστημα είναι αναστρέψιμο (ή δεν έχει απώλειες) τότε το ηλεκτρικό έργο που θα συντελεστεί θα είναι ίσο με την ελεύθερη ενέργεια Gibbs που θα απελευθερωθεί ΔG_f . Οπότε:

$$\Delta G_f = -2FE \quad (4-6)$$

Και συνεπώς:

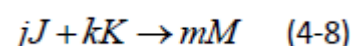
$$E = -\frac{\Delta G_f}{2F} \quad (4-7)$$

Η εξίσωση (4-7) δίνει την ηλεκτροκινητική δύναμη (EMF) ή την αναστρέψιμη τάση ανοιχτοκύκλωσης της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου.

4.4.2 Η εξίσωση του Nernst

Στο προηγούμενο τμήμα της μελέτης αυτής, σημειώθηκε ότι η ελεύθερη ενέργεια Gibbs σε μία εξίσωση, μεταβάλλεται με την μεταβολή της θερμοκρασίας. Εξίσου σημαντική, αν και πιο περίπλοκη, είναι η μεταβολή της η ελεύθερης ενέργειας Gibbs με την συμπίεση των αντιδρώντων και τη συγκέντρωση.

Θεωρήστε μια γενική αντίδραση ως:



Όπου j moles J αντιδρούν με k moles K και παράγουν m moles M. Κάθε ένα από τα αντιδρώντα και τα προϊόντα έχουν μια σχετική «δραστηριότητα». Αυτή η δραστηριότητα, σχεδιάζεται με a , a_j και a_k , να είναι η δραστηριότητα των αντιδρώντων και a_m η δραστηριότητα του προϊόντος. Στην περίπτωση ιδανικών αερίων, αποδεικνύεται ότι:

$$a = \frac{P}{P_0} \quad (4-9)$$

Όπου P είναι η συμπίεση ή μερική πίεση του αερίου και P_0 είναι η σταθερή πίεση 0.1 MPa.

Οι δραστηριότητες των αντιδρώντων και των προϊόντων, διαφοροποιούν την ελεύθερη ενέργεια Gibbs σε μια αντίδραση. Χρησιμοποιώντας επιχειρήματα από το χώρο της θερμοδυναμικής (Balmer, 1990) αυτό μπορεί να αποδειχτεί σε μια χημική αντίδραση όπως η (4-8) :

$$\Delta G_f = \Delta G_f^0 - RT \ln\left(\frac{a_J^j a_K^k}{a_M^m}\right) \quad (4-10)$$

Όπου ΔG_f^0 είναι η αλλαγή στην ελεύθερη ενέργεια Gibbs υπό σταθερή πίεση.

Στην περίπτωση της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου, η εξίσωση 4-10 γίνεται:

$$\Delta G_f = \Delta G_f^0 - RT \ln\left(\frac{a_{H_2} a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}}\right) \quad (4-11)$$

Για να φανεί το πώς αυτή η εξίσωση επηρεάζει την τάση, μπορούμε να υποκαταστήσουμε μέσα στην (4-7) την (4-11) και έχουμε:

$$E = \frac{\Delta G_f^0}{2F} - \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{a_{H_2} a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}}\right), \text{ or}$$

$$E = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{a_{H_2} a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}}\right) \quad (4-12)$$

Όπου $E^0 = \text{EMF}$ υπό σταθερή πίεση και παίρνει μια τιμή που φαίνεται στον πίνακα 4.4.

Η εξίσωση (4-12) είναι αυτή που δίνει τη σχέση μεταξύ θεωρητικής τάση της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου και της συγκέντρωσης και καλείται εξίσωση του Nernst.

4.4.3 Αποδοτικότητα της κυψέλης καυσίμου PEM

Η αποδοτικότητα μιας κυψέλης καυσίμου είναι ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου προς το καύσιμο εισόδου (σε μονάδες) όταν και τα δύο μετρώνται σε ίδιες μονάδες (W) για παράδειγμα:

$$\eta_{fc} = \frac{P_{fc}}{F_{in}} \quad (4-13)$$

Όπου P_{fc} είναι η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου και F_{in} είναι το καύσιμο εισόδου (σε μονάδες ισχύος).

Η ιδανική απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου μπορεί επίσης να δοθεί από τον τύπο:

$$\eta_{fc} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (4-14)$$

Όπου: ΔG (J/mol) είναι η μεταβολή στην ελεύθερη ενέργεια Gibbs που αντιπροσωπεύει την ηλεκτρική ενέργεια εξόδου της κυψέλης καυσίμου και ΔH (J/mol) είναι η μεταβολή της ενθαλπίας στην αντίδραση που αντιπροσωπεύει την θερμική ενέργεια εισόδου.

Η τιμή αποδοτικότητας των κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιείται ευρύτατα, βασίζεται στη μεταβολή της σταθερής ελεύθερης ενέργειας της αντίδρασης της κυψέλης. Σε μία H_2/O_2 κυψέλη καυσίμου PEM, η χημική αντίδραση παράγει νερό σε υγρή μορφή. Υπό σταθερή θερμοκρασία, η θερμική ενέργεια εισόδου ΔH_0 στην αντίδραση H_2/O_2 είναι -286 kJ/mol και η ελεύθερη ενέργεια που είναι διαθέσιμη για χρήσιμο έργο είναι 237.3 kJ/mol. Κατά συνέπεια, η μέγιστη H_2/O_2 απόδοση, είναι 0.83. Στον πίνακα 4.4, δίνονται διαφορετικές τιμές απόδοσης για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας.

Form of water product	Temp °C	$\Delta \bar{g}_f$, kJ mol ⁻¹	Max EMF V	Efficiency limit %
Liquid	25	-237.2	1.23	83
Liquid	80	-228.2	1.18	80
Gas	100	-225.2	1.17	79
Gas	200	-220.4	1.14	77
Gas	400	-210.3	1.09	74
Gas	600	-199.6	1.04	70
Gas	800	-188.6	0.98	66
Gas	1000	-177.4	0.92	62

Πίνακας 4.4. ΔG_f , μέγιστη EMF και όριο απόδοσης για κυψέλες καυσίμου υδρογόνου

Η απόδοση μιας πραγματικής σειράς από συνδεδεμένες κυψέλες καυσίμου, $\eta_{fc, Stack}$ μπορεί να εκφραστεί ως ο λόγος της τάσης λειτουργίας της σειράς κυψελών (U_{actual}) προς την αντιστρέψιμη τάση της σειράς κυψελών (U_{th}). Η πραγματική τάση της σειράς κυψελών είναι μικρότερη από την αντιστρέψιμη τάση εξαιτίας των απωλειών που σχετίζονται με τις υπερ-τάσεις της σειράς κυψελών και πρόκειται να συζητηθούν στη συνέχεια. Συνεπώς, η απόδοση μιας πραγματικής σειράς από συνδεδεμένες κυψέλες καυσίμου να δοθεί ως:

$$\eta_{fc, Stack} = 0.83 \frac{U_{actual}}{U_{th}} \quad (4-15)$$

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.4. η αντιστρέψιμη τάση της σειράς κυψελών μιας καθαρής αντίδρασης H_2/O_2 υπό συνθήκες αναφοράς, είναι 1.23V. Συνεπώς, η απόδοση της πραγματικής σειράς από συνδεδεμένες κυψέλες καυσίμου σε συνθήκες αναφοράς δίνεται από τον τύπο:

$$\eta_{fc, Stack} = 0.83 \frac{U_{actual}}{U_{th}} = 0.83 \frac{U_{actual}}{1.23} = 0.675 \times U_{actual} \quad (4-16)$$

Μία κυψέλη καυσίμου μπορεί να λειτουργήσει υπό διαφορετικές πυκνότητες ρεύματος. Στην περίπτωση αυτή, η αντίστοιχη τάση της κυψέλης, καθορίζει, κατά περίπτωση την απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Μειώνοντας την πυκνότητα του ρεύματος, αυξάνεται η τάση της κυψέλης και κατά συνέπεια, η απόδοσή της.

Όσο μειώνεται η πυκνότητα του ρεύματος, η ενεργός περιοχή της κυψέλης πρέπει να μεγαλώνει, ώστε να αποκτά το απαιτούμενο ποσό ισχύος. Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός μιας κυψέλης καυσίμου με μεγαλύτερη απόδοση, αυξάνει το κεφάλαιο της επένδυσης.

4.4.4 Κατανάλωση υδρογόνου από την κυψέλη καυσίμου

Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, η κατανάλωση υδρογόνου από την κυψέλη καυσίμου, είναι ευθέως ανάλογη με το ρυθμό της μεταφοράς ηλεκτρονίων στα ηλεκτρόδια, που είναι ισοδύναμο με το ρεύμα εξόδου στο εξωτερικό κύκλωμα. Άρα, ο συνολικός ρυθμός ροής της κατανάλωσης υδρογόνου σε μια κυψέλη καυσίμου, η οποία αποτελείται από ορισμένες κυψέλες συνδεδεμένες εν σειρά, μπορεί να εκφραστεί ως εξής [Busquet, 2003] :

$$q_{H_2} = \frac{N_e I}{nF} \times \frac{1}{\eta_f} \quad (4-17)$$

Όπου q_{H_2} είναι ο ρυθμός ροής υδρογόνου, $n=2$, ο αριθμός των ηλεκτρονίων ανά mole και η_f είναι η απόδοση Faraday.

Σε μια πραγματική κυψέλη καυσίμου, το υδρογόνο συνήθως παρέχεται με ρυθμούς ροής ελάχιστα υψηλότερους από την μέγιστη θεωρητική τιμή (στοιχειομετρία). Αυτή η ποσότητα υδρογόνου, μειώνει την απόδοση ρεύματος ή την απόδοση Faraday, για την κυψέλη καυσίμου. Η απόδοση Faraday, ορίζεται ως ο λόγος της θεωρητικής μέγιστης τιμής της κατανάλωσης υδρογόνου στην κυψέλη καυσίμου προς την πραγματική κατανάλωση. Κατά συνέπεια, η απόδοση Faraday μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

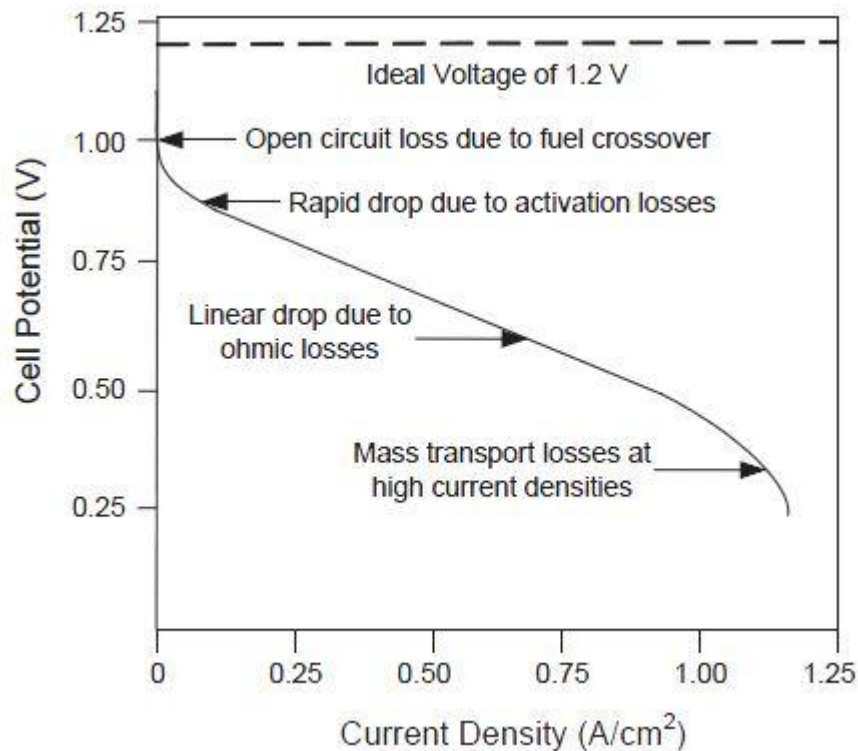
$$\eta_f = \frac{q_{H_2, th}}{q_{H_2, actual}} \quad (4-18)$$

Όπου $q_{H_2, th}$ και $q_{H_2, actual}$ (mol/s) είναι ο θεωρητικός και πραγματικός ρυθμός ροής αντίστοιχα.

4.4.5 Απώλειες

Το σχήμα 4.5 δείχνει την απόδοση μιας τυπικής κυψέλης καυσίμου, η οποία λειτουργεί σε θερμοκρασία 70° C, υπό κανονική πίεση. Τα σημεία- κλειδιά που πρέπει να παρατηρήσουμε στο γράφημα αυτό, αναφορικά με την τάση της κυψέλης σε σχέση με την πυκνότητα του ρεύματος είναι τα εξής :

- Ακόμα και η τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι μικρότερη από την θεωρητική της τιμή.
- Υπάρχει μια ραγδαία αρχική πτώση στην τάση
- Στη συνέχεια, η τάση πέφτει λιγότερο γρήγορα και πιο γραμμικά
- Όταν παρατηρείται μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος, τότε η τάση πέφτει πιο γρήγορα



Σχήμα 4.5. Γράφημα Τάσεως - Πυκνότητας ρεύματος για μια κυψέλη καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας.

Το χαρακτηριστικό σχήμα των γραφημάτων Τάσεως - Πυκνότητας ρεύματος του σχήματος 4.5 απορρέει από τέσσερις βασικούς μη αναστρέψιμους λόγους που πρόκειται να συζητηθούν στη συνέχεια.

4.4.5.1 – Απώλειες ενεργοποίησης

Οι απώλειες ενεργοποίησης προκαλούνται από τον βραδύ ρυθμό με τον οποίο συντελούνται οι αντιδράσεις στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Ένα τμήμα της παραγόμενης τάσης χάνεται στη χημική αντίδραση που μεταφέρει τα ηλεκτρόνια από και προς το ηλεκτρόδιο. Ο Τάφελ, παρατήρησε το 1905 ότι η υπερ-τάση (απώλειες) στην επιφάνεια ενός ηλεκτροδίου, ακολουθούσε παρόμοια μέθοδο σε πολλές διαφορετικές ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Για τις περισσότερες τιμές της υπερ-τάσης οι αξίες δίνονται από την εξίσωση του Τάφελ:

$$\Delta V_{act} = A \log\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (4-19)$$

Όπου i είναι η πυκνότητα του ρεύματος, i_0 είναι η πυκνότητα του ρεύματος ανταλλαγής και A είναι μια σταθερά.

Στην περίπτωση της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου, η σταθερά A δίνεται από τον τύπο:

$$A = \frac{RT}{2aF} \quad (4-20)$$

Στον τύπο (4-20) α είναι ο συντελεστής μεταφοράς, ο οποίος είναι το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε για την αλλαγή του ρυθμού της ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Η τιμή του, εξαρτάται από την αντίδραση που λαμβάνει χώρα και από το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο το ηλεκτρόδιο αλλά σε εύρος από 0 έως 1. Για ηλεκτρόδια υδρογόνου, η τιμή του είναι περίπου 0.5 για μεγάλη ποικιλία υλικών ηλεκτροδίων.

Η εμφάνιση του T στον τύπο (4-20) μπορεί να δημιουργήσει την εντύπωση ότι αυξάνοντας τη θερμοκρασία, αυξάνεται και η υπερ-τάση. Ωστόσο, αυτό συμβαίνει πολύ σπάνια, καθώς η επίδραση της αύξησης του i_0 με τη θερμοκρασία, ξεπερνά μακράν σε σπουδαιότητα οποιαδήποτε αύξηση στο A. Το κλειδί για την ελαχιστοποίηση της υπερ-τάσης είναι το i_0 , το οποίο μπορεί να πάρει τιμές που κυμαίνονται ανάμεσα σε δέκα τάξεις δυνάμεων του 10, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.5. Όσο μικρότερο το i_0 τόσο μεγαλύτερη η πτώση της τάσης. Στον πίνακα 4.5. δίνονται διαφορετικές τιμές του i_0 για διάφορα υλικά ηλεκτροδίων.

Metal	i_0 (A cm ⁻²)
Pb	2.5×10^{-13}
Zn	3×10^{-11}
Ag	4×10^{-7}
Ni	6×10^{-6}
Pt	5×10^{-4}
Pd	4×10^{-3}

Πίνακας 4.5: i_0 για διάφορα υλικά ηλεκτροδίων για όξινο ηλεκτρολύτη

Υπάρχουν πολλοί τρόποι να αυξήσουμε την πυκνότητα του ρεύματος ανταλλαγής και κατά συνέπεια να μειώσουμε την υπερ-τάση (απώλειες) ενεργοποίησης και να βελτιώσουμε την απόδοση της κυψέλης καυσίμου :

-Χρήση αποτελεσματικότερου καταλύτη

-Αύξηση της τραχύτητας του ηλεκτροδίου. Αυτό αυξάνει την πραγματική επιφάνεια κάθε ονομαστικού τετραγωνικού εκατοστού και αυτό αυξάνει το i_0 .

-Αύξηση της συγκέντρωσης του αντιδρώντος, χρησιμοποιώντας, παραδείγματος χάριν, καθαρό οξυγόνο αντί για αέρα. Αυτό μπορεί να λειτουργήσει επειδή οι χώροι των καταλυτών καταλαμβάνονται πιο αποτελεσματικά από τα αντιδρώντα.

-Αύξηση της πίεσης. Αυτό λειτουργεί με αντίστοιχο τρόπο αυξάνοντας την κατάληψη του χώρου των καταλυτών.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η εξίσωση Τάφελ, ισχύει μόνο όταν : $i > i_0$

4.4.5.2 – Διασταύρωση καυσίμου και εσωτερικά ρεύματα

Αυτού του είδους η ενεργειακή απώλεια, απορρέει από την αχρήστευση του καυσίμου που διαπερνά τον ηλεκτρολύτη και, σε ένα μικρότερο βαθμό, από την μετάδοση της θερμότητας των ηλεκτρονίων μέσω του ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης, πρέπει να μεταφέρει μόνο ιόντα στην κυψέλη. Πάρα ταύτα, ένα κάποιο ποσό διαρροής καυσίμου και ροής ηλεκτρονίων πάντα θα υπάρχει. Τα εσωτερικά ρεύματα δεν είναι εύκολο να μετρηθούν, έτσι η μοντελοποίηση αυτής της υπερ-τάσης συνήθως γίνεται μέσω της προσθήκης του εσωτερικού ρεύματος i_n στην εξίσωση 4-19 .

$$\Delta V_{act} = A \log\left(\frac{i + i_n}{i_0}\right)$$

Σε γενικές γραμμές, το εσωτερικό ρεύμα και η διαρροή υδρογόνου μέσω του ηλεκτρολύτη μιας κυψέλης καυσίμου, συνήθως δεν έχει και τόση σημασία, όσον αφορά την απόδοση. Ωστόσο, σε περιπτώσεις κυψελών που λειτουργούν υπό χαμηλές θερμοκρασίες, τα παραπάνω έχουν αξιοσημείωτη επίδραση στην τάση ανοιχτοκύκλωσης.

4.4.5.3 – Ωμικές απώλειες

Πρόκειται για τις απώλειες που δημιουργούνται εξαιτίας της ηλεκτρικής αντίστασης των ηλεκτροδίων και της αντίστασης στη ροή των ιόντων δια μέσω του ηλεκτρολύτη. Το μέγεθος της απώλειας τάσης είναι ανάλογο προς το ρεύμα:

$$\Delta V = IR \quad (4-21)$$

Υπάρχουν τρεις τρόποι για να μειωθεί η εσωτερική αντίσταση της κυψέλης :

- Η χρήση ηλεκτροδίων με τη μεγαλύτερη δυνατή αγωγιμότητα
- Σωστός σχεδιασμός και κατάλληλα υλικά για τις διπολικές πλάκες
- Κατασκευή του λεπτότερου δυνατού ηλεκτρολύτη

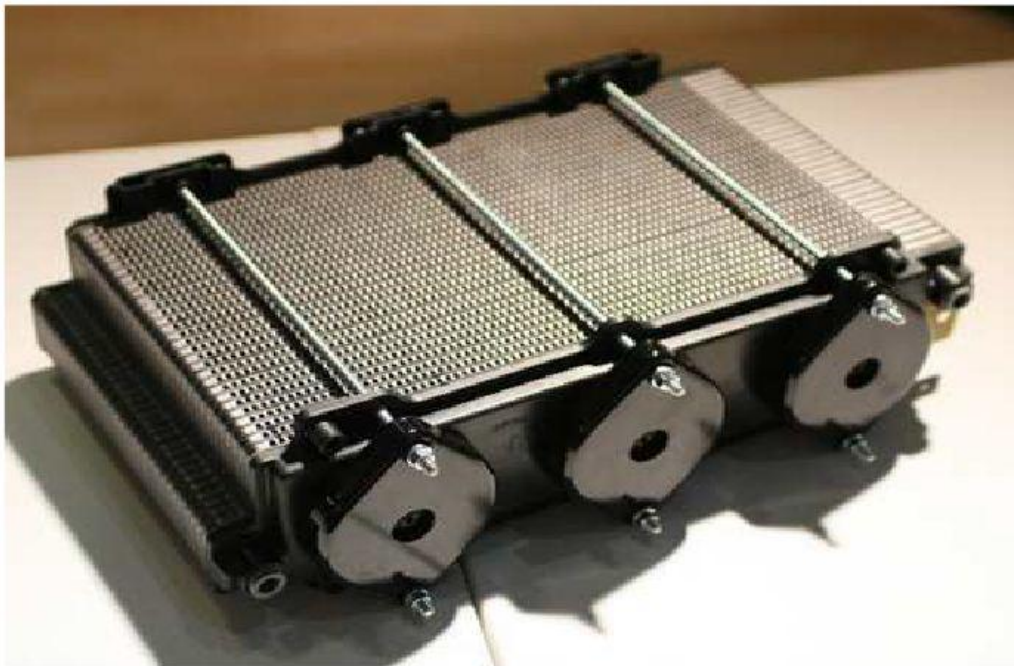
4.4.5.4 – Απώλειες συγκέντρωσης

Αυτού του είδους οι απώλειες, προκύπτουν από τη μεταβολή στη συγκέντρωση των αντιδρώντων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, καθώς χρησιμοποιείται το καύσιμο. Είναι φυσιολογικό να μειώνεται η συγκέντρωση του υδρογόνου, καθώς αυτό διαχέεται μέσω του ηλεκτρολύτη και το ίδιο ισχύει για το οξυγόνο. Η μείωση στην πίεση του αερίου, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της τάσης. Ωστόσο, είναι κοινώς αποδεκτό στην κοινότητα των

ερευνητών των κυψελών καυσίμου, ότι δεν υπάρχει αναλυτική λύση στο πρόβλημα της μοντελοποίησης των αλλαγών στην τάση, η οποία να μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά σε όλες τις περιπτώσεις [Kim κ.α., 1995] .

4.5 Μοντέλο κυψέλης καυσίμου PEM στο περιβάλλον Simulink

Στο σημείο αυτό, θα παρουσιαστεί η εφαρμογή των τύπων που συζητήθηκαν παραπάνω στο περιβάλλον Simulink. Στον πίνακα 4.6 φαίνονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου (από το φυλλάδιο του κατασκευαστή) . Στο σχήμα 4.6. παρουσιάζεται το διάγραμμα ενός υποσυστήματος κυψέλης καυσίμου.



Εικόνα 4.1. Mark 1020 ACS Fuel Cell Stack

Datasheet for Fuel Cell unit

Power Data	
Electrical rated power	2kW (2 × 1kW)
Maximum electric power	3kW (2 × 1.5kW)
Open circuit voltage	2 × ca. 48V
Rated electric current	34A
Rated electric voltage	30V
Maximum electric current per stack	60A
Hydrogen consumption at rated electric power	Ca. 1.6Nm ³ /h (every stack 0.8Nm ³ /h)
CHP coefficient at operating point	0.92
Power peripheral supply	Max. 10A at 24V _{DC}
Fuel Gas Supply	
Operating pressure of hydrogen	20 – 40kPa
Maximum operating pressure of hydrogen	50kPa
Connection pressure of hydrogen	500kPa
Tube/flexible tube diameter for hydrogen supply	High-grate steel, outside diameter 10mm
Hydrogen loss through sink cycle	40kPa per purge (0.3s) ca. 570ml
Dimensions	
Width × depth × high	110cm × 70cm × 172cm
Environmental Conditions	
Permissible ambient temperature	15 to 25°C
Permissible relative humidity	30 to 70%

Πίνακας 4.6. Φυλλάδιο δεδομένων για την κυψέλη καυσίμου

Οι είσοδοι αυτού του διαγράμματος είναι:

- *Power_fc* : Είναι η ενέργεια που η κυψέλη καυσίμου πρέπει να παράσχει στο σύστημα, όταν η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί για να καλυφθούν οι ανάγκες
- *Power_electrolyzer_command* : Είναι η ενέργεια που πρόκειται να αποθηκευτεί σε μορφή υδρογόνου από τον ηλεκτρολύτη

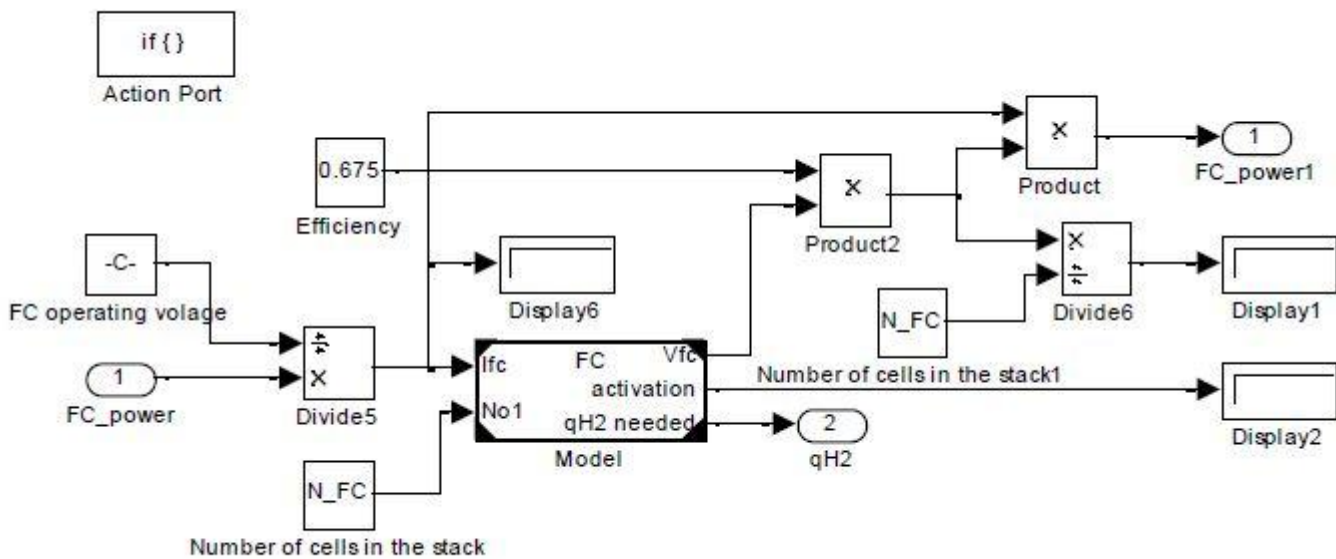
Οι έξοδοι αυτού του διαγράμματος είναι :

- *Power_FC* : Είναι η ενέργεια που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου
- *Power_electrolyzer* : Είναι η ενέργεια που χρησιμοποιεί ο ηλεκτρολύτης
- *Tank1* : Είναι η πίεση του υδρογόνου στη δεξαμενή όπου έχει αποθηκευτεί
- *Conn1, Conn2, Conn3* : Είναι οι συνδέσεις με το οικιακό δίκτυο

Στην αρχή αυτού του διαγράμματος υπάρχει ένα διάγραμμα-εάν (if-block) το οποίο αποφασίζει εάν θα λειτουργήσει η κυψέλη καυσίμου ή ο ηλεκτρολύτης. Τα δύο αυτά μέρη του συστήματος δεν μπορούν να λειτουργήσουν ταυτόχρονα, σύμφωνα με τον ελεγκτή μας. Η ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου, όπως και η ενέργεια που καταναλώνει ο ηλεκτρολύτης, μετατρέπονται σε τριφασικό ρεύμα στα μέρη που παρέχει το Simulink, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7.

4.5.1 Συστοιχία κυψελών καυσίμου

Στο παρακάτω σχήμα , απεικονίζεται το διάγραμμα μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου .



Σχήμα 4.7. Συστοιχία κυψελών καυσίμου

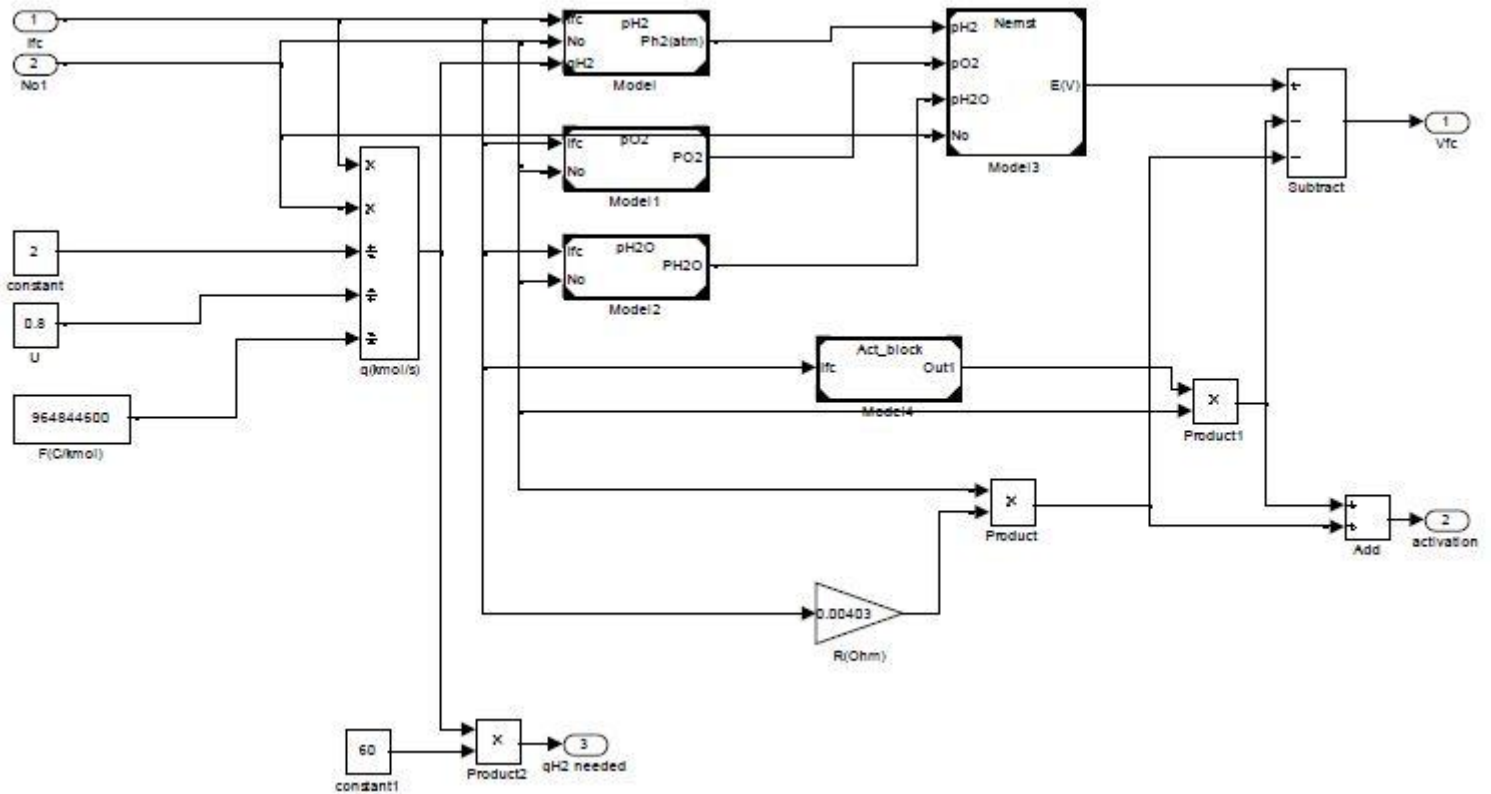
Οι είσοδοι αυτού του διαγράμματος είναι FC_power , δηλαδή η ενέργεια που πρέπει να παράσχει η κυψέλη καυσίμου, $FC_operating_voltage$ που είναι η τάση λειτουργίας των συνδεδεμένων εν σειρά κυψελών καυσίμου και η οποία έχει παρθεί από το φυλλάδιο με τα χαρακτηριστικά του προϊόντος, ώστε να γίνει μια εκτίμηση του ρεύματος που θα διαρρέει την συστοιχία. Το διάγραμμα περιέχει επίσης το μπλοκ κυψέλης καυσίμου που είναι το μοντέλο του Simulink, για μία μόνο κυψέλη καυσίμου, που θα συζητηθεί στη συνέχεια. Η τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου, πολλαπλασιάζεται με την απόδοση της συστοιχίας, κατ' αντιστοιχία με τον τύπο (4-16) και στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με το N_FC που είναι ο αριθμός των κυψελών καυσίμου που είναι συνδεδεμένες στη συστοιχία (στην εν λόγω περίπτωση 75).

Οι έξοδοι του συστήματος είναι:

- FC_power1 : Είναι η ενέργεια που η συστοιχία κυψελών καυσίμου παρέχει στο σύστημα
- $qH2$: Είναι η ροή υδρογόνου που πρέπει να παρασχεθεί στην κυψέλη ώστε αυτή να μπορέσει να αποδώσει την απαιτούμενη ενέργεια

4.5.2 Κυψέλη καυσίμου

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα της κυψέλης καυσίμου



Σχήμα 4.8. Κυψέλη καυσίμου

Οι είσοδοι αυτού του διαγράμματος είναι:

- I_{fc} : Είναι το ρεύμα που ρέει στην κυψέλη καυσίμου
- $No1$: Είναι ο αριθμός κυψελών καυσίμου στη συστοιχία

Πρώτον, η ποσότητα των moles υδρογόνου ανά δευτερόλεπτο που χρειάζεται η συστοιχία, εκτιμάται από τον διαχωριστή q (kmol/s), που αντιστοιχεί στον τύπο (4-17) . Η απόδοση Faraday, η_f , είναι στην περίπτωση μας 0.8. Επίσης, οι πιέσεις του υδρογόνου, του οξυγόνου και του νερού της κυψέλης εκτιμώνται στα διαγράμματα pH_2 , pO_2 , pH_2O αντίστοιχα, τα οποία θα συζητηθούν αργότερα. Αυτές οι τιμές των πιέσεων είναι απαραίτητες για την εκτίμηση της πραγματικής τάσης της κυψέλης, κάτι το οποίο πραγματοποιείται μέσω του διαγράμματος του Nernst. Τέλος, δύο είδη απωλειών έχουν αφαιρεθεί από την πραγματική τάση της κυψέλης καυσίμου – οι ωμικές απώλειες και οι απώλειες ενεργοποίησης.

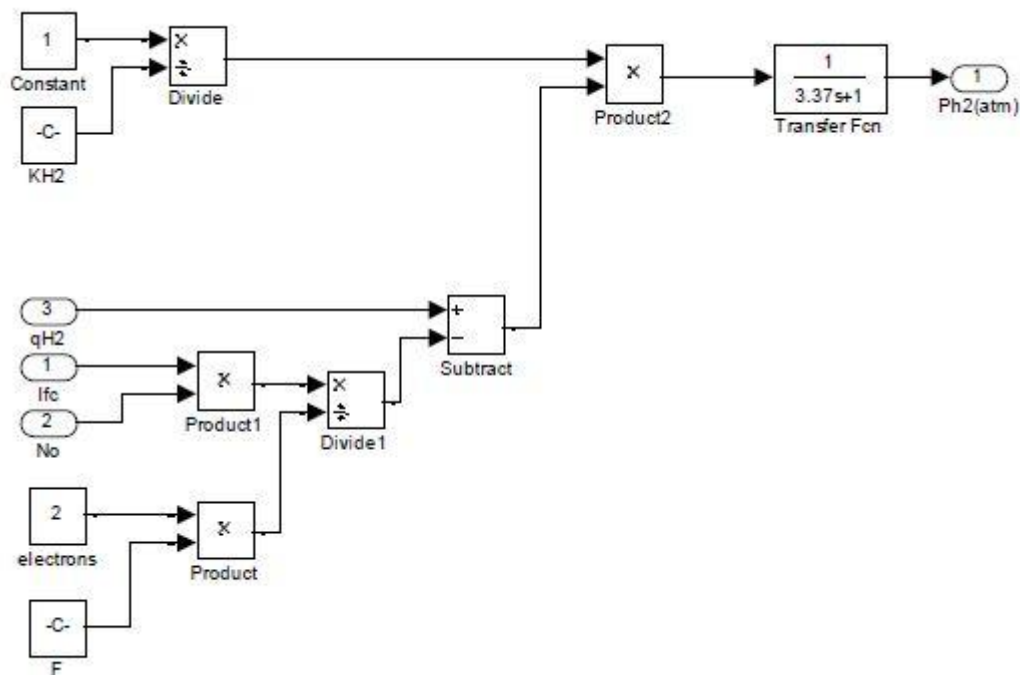
Οι έξοδοι του διαγράμματος αυτού είναι:

- V_{fc} : Είναι η πραγματική τάση της κυψέλης καυσίμου
- $Activation$: Είναι οι απώλειες ενεργοποίησης

Πρέπει να σημειωθεί ότι η εκτιμώμενη από τον τύπο (4-17) ροή υδρογόνου στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται επί 60, εφόσον χρειαζόμαστε τη ροή υδρογόνου ανά λεπτό ενώ ο τύπος εκτιμά τη ροή υδρογόνου ανά δευτερόλεπτο. Υποθέτουμε μια σταθερή θερμοκρασία 323K .

4.5.2.1 – Λειτουργική πίεση στη συστοιχία κυψελών καυσίμου

Στο σχήμα 4.9. βλέπουμε το διάγραμμα όπου γίνεται ο υπολογισμός της λειτουργικής πίεσης του υδρογόνου.



Σχήμα 4.9. Πίεση του υδρογόνου

Οι είσοδοι αυτού του διαγράμματος είναι:

- qH_2 : Είναι η ροή υδρογόνου στην κυψέλη καυσίμου
- Ifc : Είναι το ρεύμα που διαπερνά την κυψέλη καυσίμου
- No : Είναι ο αριθμός των συνδεδεμένων κυψελών καυσίμου

Ο υπολογισμός της πίεσης του υδρογόνου γίνεται σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$p_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} s} (q_{H_2_in} - q_{H_2_out}), \quad \text{όπου :} \quad \tau_{H_2} = \frac{V_a}{K_{H_2} R T} [s] \quad \text{και} \quad q_{H_2} = \frac{I}{2F}$$

Όπου : $-K_{H2}$ είναι η σταθερά βαλβίδας υδρογόνου, $4.7955 \cdot 10^{-7}$ kmol/atm*s

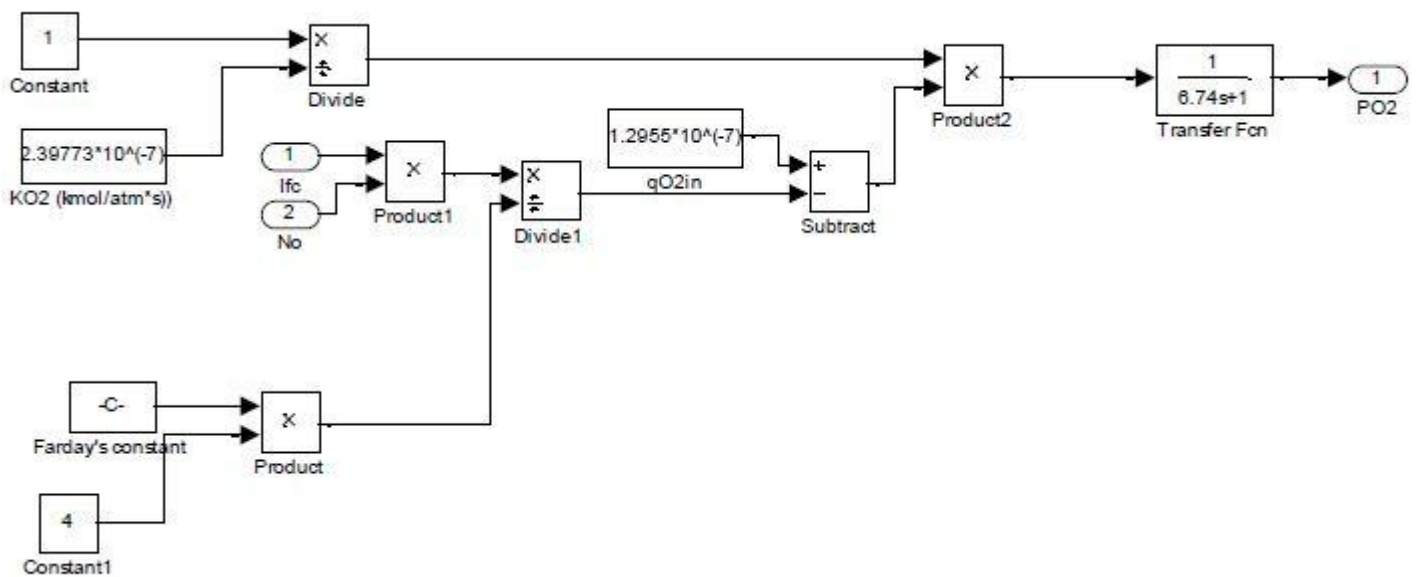
$-\tau_{H2}$ είναι η σταθερά χρόνου του υδρογόνου, 3.37s

$-q_{H2_in}$ είναι η ροή υδρογόνου στην κυψέλη καυσίμου

$-q_{H2_out}$ είναι το υδρογόνο που αντιδρά στην κυψέλη καυσίμου

Η έξοδος αυτού του διαγράμματος είναι η λειτουργική πίεση του υδρογόνου.

Στο σχήμα 4.10, απεικονίζεται το διάγραμμα όπου γίνεται ο υπολογισμός της λειτουργικής πίεσης του οξυγόνου .



Σχήμα 4.10. Πίεση του οξυγόνου

Οι είσοδοι του διαγράμματος είναι:

- Ifc : Είναι το ρεύμα που διαπερνά την κυψέλη καυσίμου
- No : Είναι ο αριθμός των συνδεδεμένων κυψελών

Ο υπολογισμός της πίεσης του οξυγόνου γίνεται με τη χρήση του ακόλουθου τύπου:

$$p_{O_2} = \frac{1/K_{O_2}}{1 + \tau_{O_2}s} (q_{O_2_in} - q_{O_2_out}), \quad \text{όπου :} \quad \tau_{O_2} = \frac{V_c}{K_{O_2}RT} [s] \quad \text{και} \quad q_{O_2} = \frac{1}{2} \frac{I}{2F}$$

Η έξοδος του διαγράμματος είναι το λειτουργικό σύστημα του οξυγόνου. Στο σχήμα 4.11 απεικονίζεται το διάγραμμα όπου γίνεται ο υπολογισμός της λειτουργικής πίεσης του νερού.

Όπου $-K_{H_2O}$ είναι η σταθερά βαλβίδας οξυγόνου, $8.768 \cdot 10^{-7}$ kmol/atm*s

$-\tau_{H_2O}$ είναι η σταθερά χρόνου του υδρογόνου, 18.418s

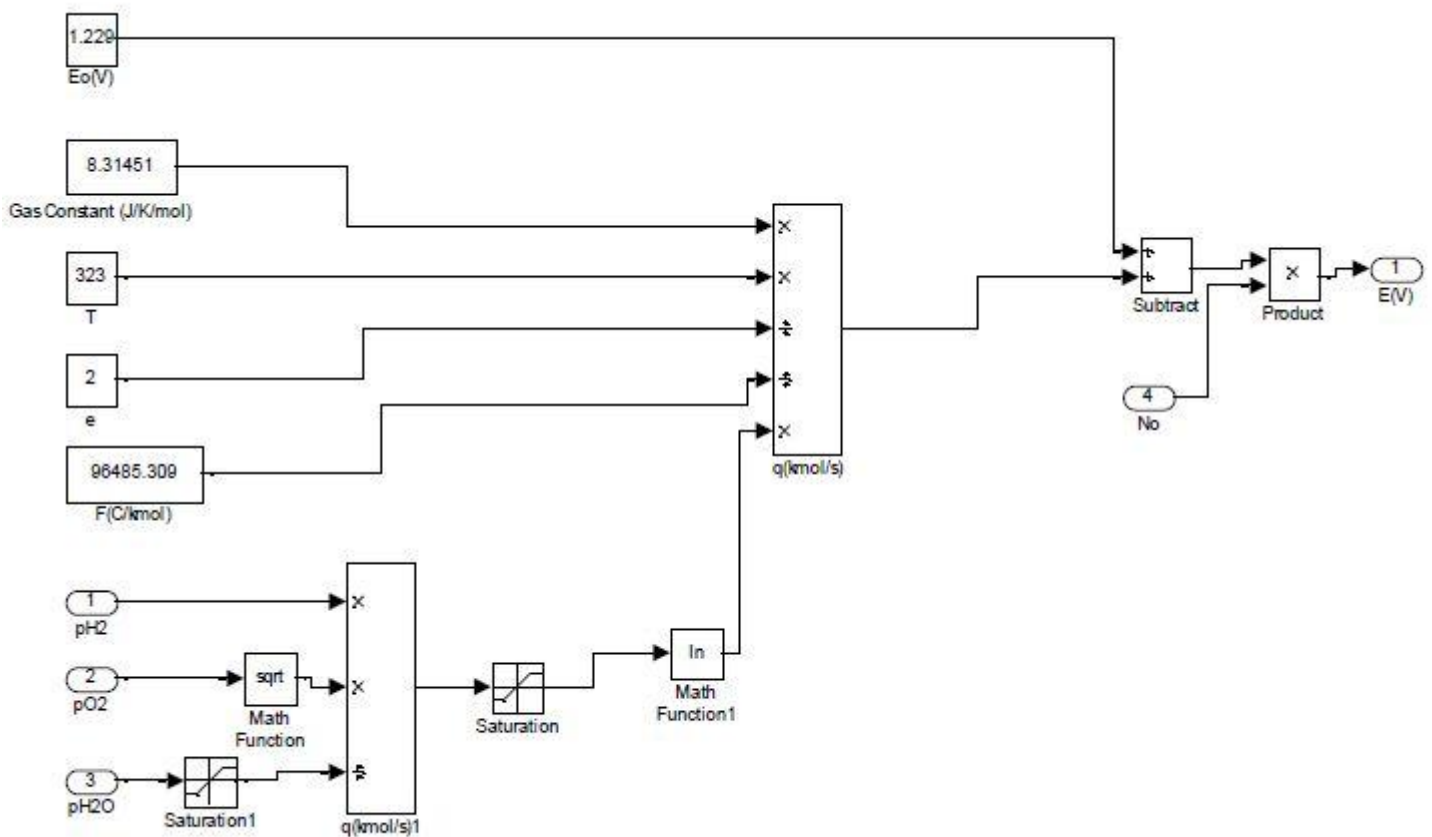
$-q_{H_2O_in}$ είναι η ροή υδρογόνου στην κυψέλη καυσίμου

$-q_{H_2O_out}$ είναι το υδρογόνο που αντιδρά στην κυψέλη καυσίμου

Η έξοδος του διαγράμματος είναι η λειτουργική πίεση του νερού.

4.5.2.2 – Η εξίσωση του Nernst

Στο σχήμα 4.12 , απεικονίζεται το διάγραμμα όπου γίνεται ο υπολογισμός της θεωρητικής τάσης της συστοιχίας κυψελών καυσίμου, χωρίς απώλειες:



Σχήμα 4.12. Εξίσωση του Nernst

Οι είσοδοι του διαγράμματος αυτού είναι:

- p_{H_2} : Η λειτουργική πίεση του υδρογόνου
- p_{O_2} : Η λειτουργική πίεση του οξυγόνου
- p_{H_2O} : Η λειτουργική πίεση του νερού

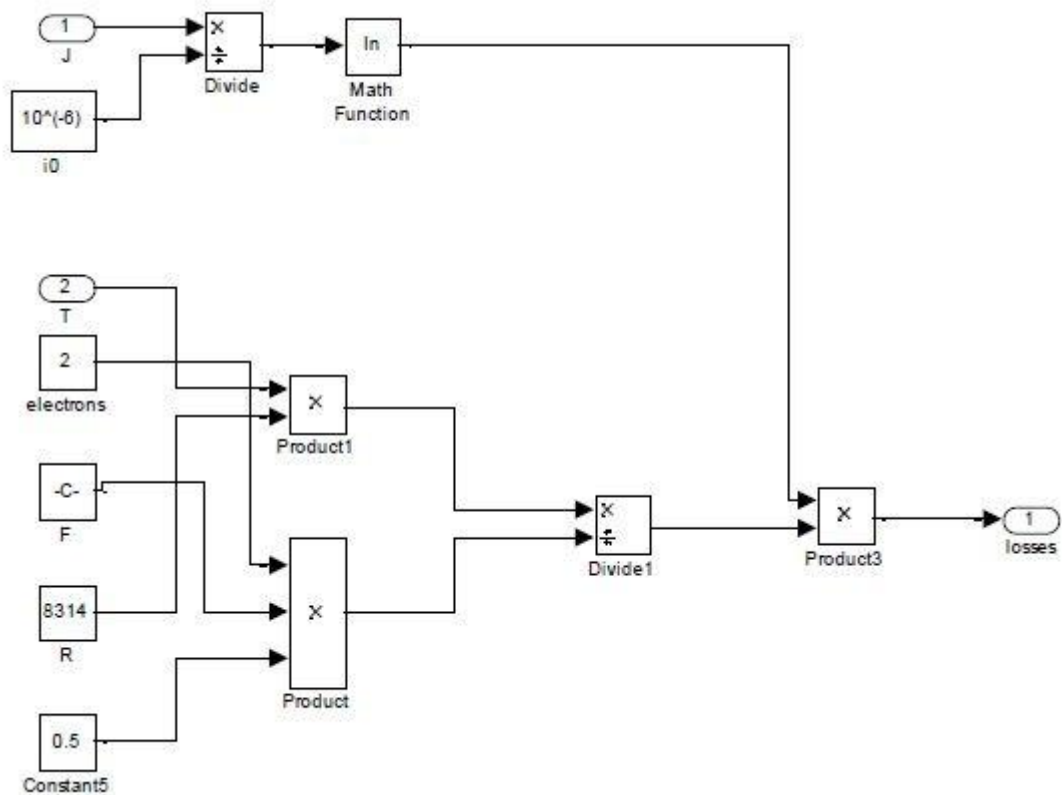
Η εφαρμογή της εξίσωσης του Nernst σ' αυτό το διάγραμμα δίνεται στον τύπο (4-12) :

$$E = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}}\right)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι μετά την εκτίμηση της θεωρητικής τάσης της κυψέλης καυσίμου, το αποτέλεσμα που προκύπτει πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των συνδεδεμένων εν σειρά κυψελών, ώστε να εκτιμηθεί η θεωρητική τάση του συνόλου της συστοιχίας κυψελών καυσίμου, η οποία είναι και η έξοδος του διαγράμματος.

4.5.2.3 – Απώλειες

Στο τμήμα αυτό, θα συζητηθούν τα διαγράμματα του Simulink, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή των τύπων που υπολογίζουν τις απώλειες τάσης στη συστοιχία κυψελών καυσίμου. Όπως προαναφέρθηκε, στο εν λόγω σύστημα λαμβάνονται υπόψη μόνο οι απώλειες ενεργοποίησης και οι ωμικές απώλειες καθώς οι απώλειες των καυσίμων και του εσωτερικού ρεύματος είναι αμελητέες και η εκτίμηση των απωλειών συγκέντρωσης δεν έχει αναλυτική λύση (βλ. κεφ. 4.4.5.4.). Στο σχήμα 4.13., απεικονίζεται το διάγραμμα όπου συμβαίνει η εκτίμηση των απωλειών ενεργοποίησης:



Διάγραμμα 4.13. Απώλειες ενεργοποίησης

Οι είσοδοι του διαγράμματος είναι:

- J : Η πυκνότητα του ρεύματος στην κυψέλη καυσίμου
- T : Η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης

Το διάγραμμα αυτό, αποτελεί την εφαρμογή της εξίσωσης Tafel που δίνεται από τον τύπο (4-19) :

$$\Delta V_{act} = A \log\left(\frac{i}{i_0}\right)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι έχουμε υποθέσει την πυκνότητα για το ρεύμα ανταλλαγής:

$$i_0 = 10^{(-6)} \text{A/cm}^2$$

Η έξοδος αυτού του διαγράμματος είναι οι απώλειες ενεργοποίησης για μια κυψέλη καυσίμου.

Οι ωμικές απώλειες μοντελοποιήθηκαν με βάση τον τύπο (4-21), με εσωτερική αντίσταση 0.00403Ω , βάσει βιβλιογραφίας. Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε ένα διάγραμμα με σταθερή τιμή πολλαπλασιασμού (gain block) που σημαίνει ότι το ρεύμα που διαπερνά την κυψέλη, πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των συνδεδεμένων κυψελών εξάγοντας ως αποτέλεσμα, τις ωμικές απώλειες. Τέλος, οι ωμικές απώλειες, αφαιρούνται από την θεωρητική τάση της συστοιχίας κυψελών καυσίμου.

4.5.3 Ηλεκτρολύτης

Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, ο ρυθμός παραγωγής υδρογόνου είναι ευθέως ανάλογος της έντασης του ρεύματος λειτουργίας του ηλεκτρολύτη και αυτό δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$q_{H_2} = \frac{\eta_f N_e i_e}{2F} \quad (4-22)$$

Όπου: q_{H_2} : είναι το παραγόμενο υδρογόνο (mole/s)

η_f : είναι η βαθμός απόδοσης Faraday

N_e : είναι ο αριθμός κυψελών του ηλεκτρολύτη

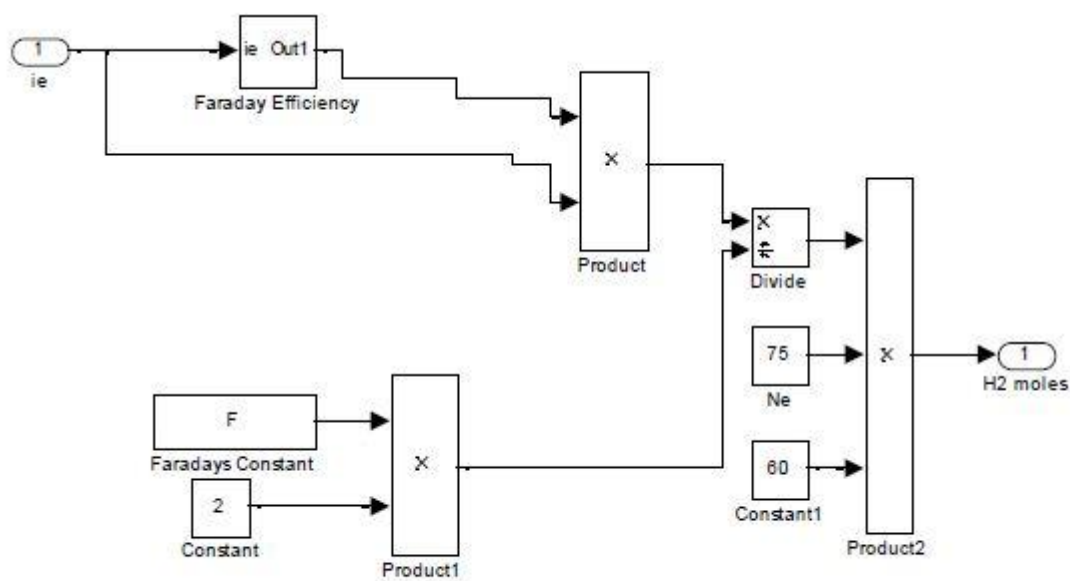
i_e : είναι το ρεύμα που διαπερνά τον ηλεκτρολύτη

F : είναι η σταθερά Faraday

Έστω ότι η θερμοκρασία λειτουργίας του ηλεκτρολύτη είναι 40°C, τότε, ο βαθμός απόδοσης Faraday υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\eta_f = 96.5e^{(0.09/i_e - 75.5/i_e^2)} \quad (4-23)$$

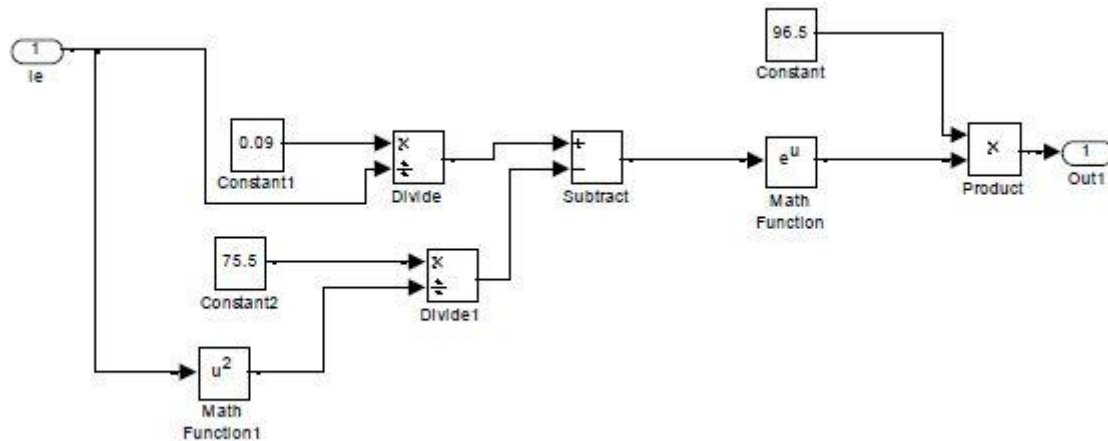
Στο σχήμα 4.14, απεικονίζεται η εφαρμογή του τύπου (4-22) :



Σχήμα 4.14 Νόμος του Faraday

Η είσοδος του διαγράμματος είναι i_e , δηλαδή το ρεύμα που διαπερνά τον ηλεκτρολύτη. Το υδρογόνο που παράγεται σύμφωνα με τον τύπο, πολλαπλασιάζεται επί 60, καθώς η έξοδος του συστήματος πρέπει να είναι το υδρογόνο που παράγεται ανά λεπτό και όχι ανά δευτερόλεπτο.

Το μοντέλο Simulink που υπολογίζει τον βαθμό απόδοσης Faraday σύμφωνα με τον τύπο (4-23), απεικονίζεται στο σχήμα 4.15 :



Σχήμα 4.15 Βαθμός απόδοσης Faraday

4.5.4 Αποθήκευση

Η μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα είναι η φυσική αποθήκευση υδρογόνου, η οποία συμπεριλαμβάνει τη χρήση μιας δεξαμενής για την αποθήκευση υδρογόνου σε αέρια μορφή. Το μοντέλο της αποθήκευσης υδρογόνου, υπολογίζει κατευθείαν την πίεση της δεξαμενής, χρησιμοποιώντας το λόγο της ροής υδρογόνου προς τη δεξαμενή και βασίζεται στον παρακάτω τύπο:

$$P_b - P_{bi} = z \frac{q_{H_2} R T_b}{M_{H_2} V_b} \quad (4-24)$$

Όπου: P_b : είναι η πίεση της δεξαμενής (Pa)

P_{bi} : είναι η αρχική πίεση της δεξαμενής (Pa)

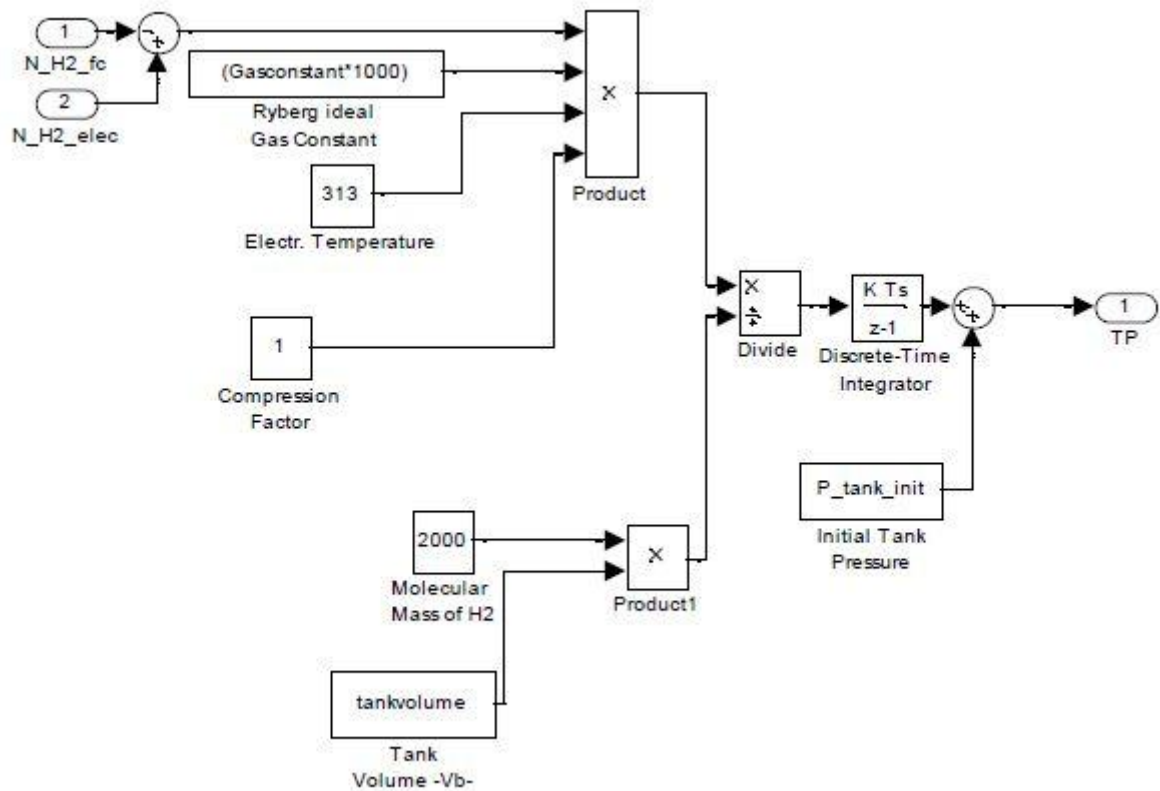
q_{H_2} : είναι η ροή υδρογόνου από και προς τη δεξαμενή (moles/s)

T_b : είναι η ροή λειτουργίας της δεξαμενής 313K

M_{H_2} : είναι η μοριακή μάζα του υδρογόνου (2gr/mol)

V_b : είναι ο όγκος της δεξαμενής (L)

Το μοντέλο του συστήματος στο Simulink έχει αρχική πίεση 50atm και όγκο 1m³ και απεικονίζεται στο σχήμα 4.16 :



Σχήμα 4.16 Δεξαμενή Υδρογόνου

Οι είσοδοι του διαγράμματος αυτού είναι:

- N_{H2_fc} , που είναι το υδρογόνο που απαιτείται από την κυψέλη καυσίμου
- N_{H2_elec} , που είναι το υδρογόνο που παράγει ο ηλεκτρολύτης

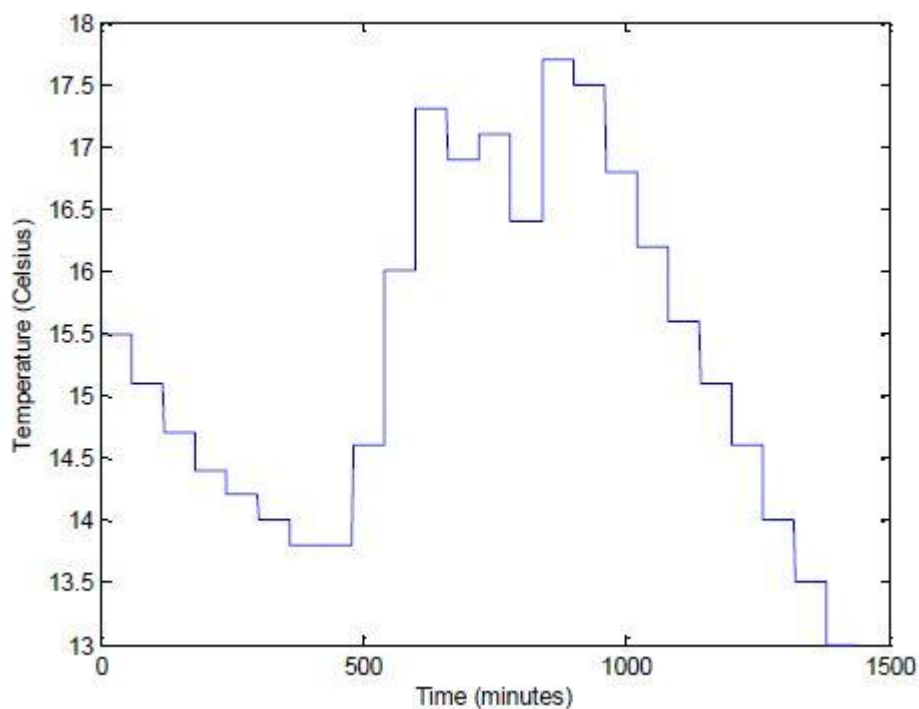
Η έξοδος του διαγράμματος είναι η πίεση της δεξαμενής.

Κεφάλαιο 5 - Αποτελέσματα της προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Simulink.

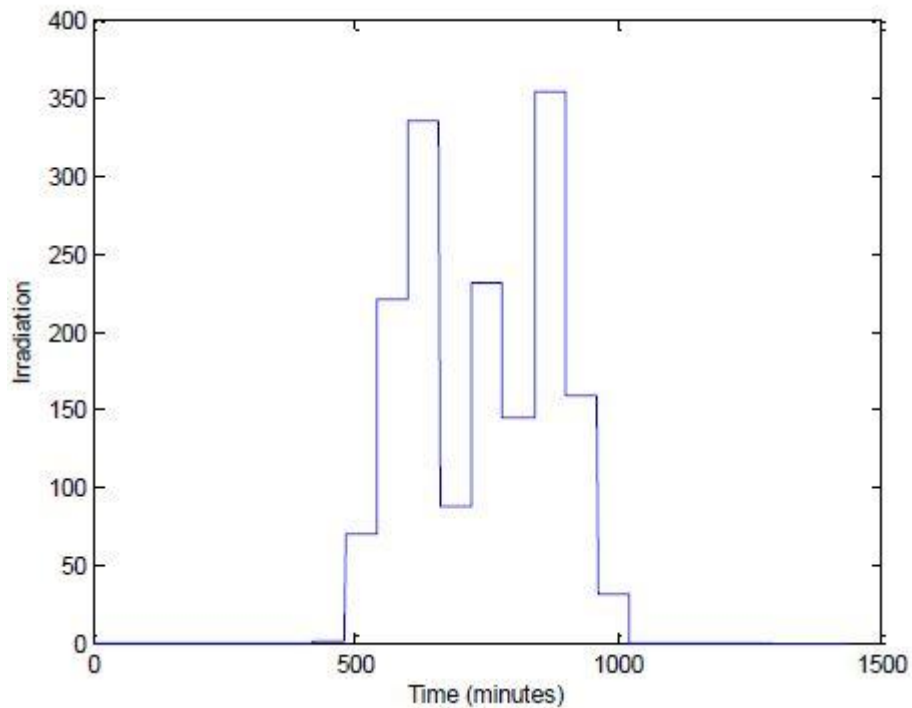
5.1 Δεδομένα

Για την προσομοίωση του συστήματος, περισυλλέγησαν δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία για διάστημα ενός χρόνου για την πόλη των Χανίων, όπου τοποθετείται το αυτόνομο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που περιγράφεται στην παρούσα εργασία. Επελέγησαν τρεις ημέρες για το μοντέλο, μια ημέρα του χειμώνα, μία της άνοιξης και μία του καλοκαιριού . Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα ελέγχθηκε κάτω από διαφορετικές συνθήκες : ακραίες, όπως οι θερινές και οι χειμερινές ημέρες και πιο ήπιες, όπως οι ανοιξιάτικη ημέρα. Η προσομοίωση διήρκεσε κάθε φορά για μία ημέρα καθώς το υπολογιστικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε δεν επέτρεπε μεγαλύτερης διάρκειας προσομοιώσεις . Στο σχήμα 5.1. δίνεται η θερμοκρασία στην πόλη των Χανίων για την 1^η Ιανουαρίου :



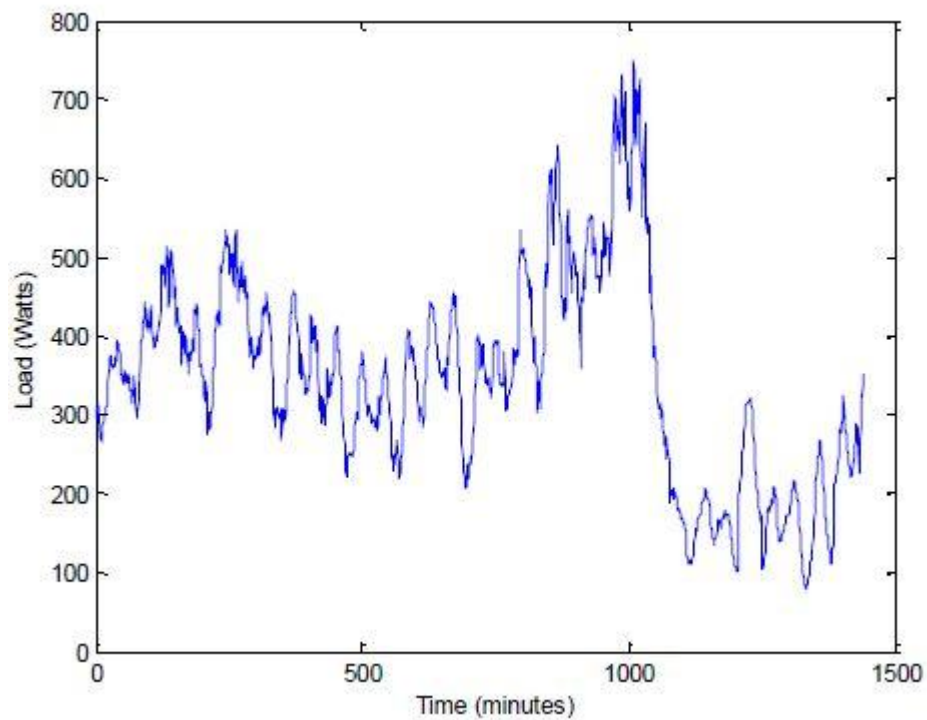
Σχήμα 5.1. 1^η Ιανουαρίου – θερμοκρασία

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα μόνα διαθέσιμα δεδομένα για τη θερμοκρασία και την ακτινοβολία στην πόλη των Χανίων ήταν ανά ώρα. Δεδομένου ότι η προσομοίωση είναι ανά λεπτό, είναι λογικό τα γραφήματα της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας να μην παρουσιάζουν διακυμάνσεις πολύ συχνά (δηλ όχι συχνότερα από, ανά μία ώρα), όπως φαίνεται στα σχήματα. Η ακτινοβολία για την ίδια ημέρα φαίνεται στο σχήμα 5.2 .



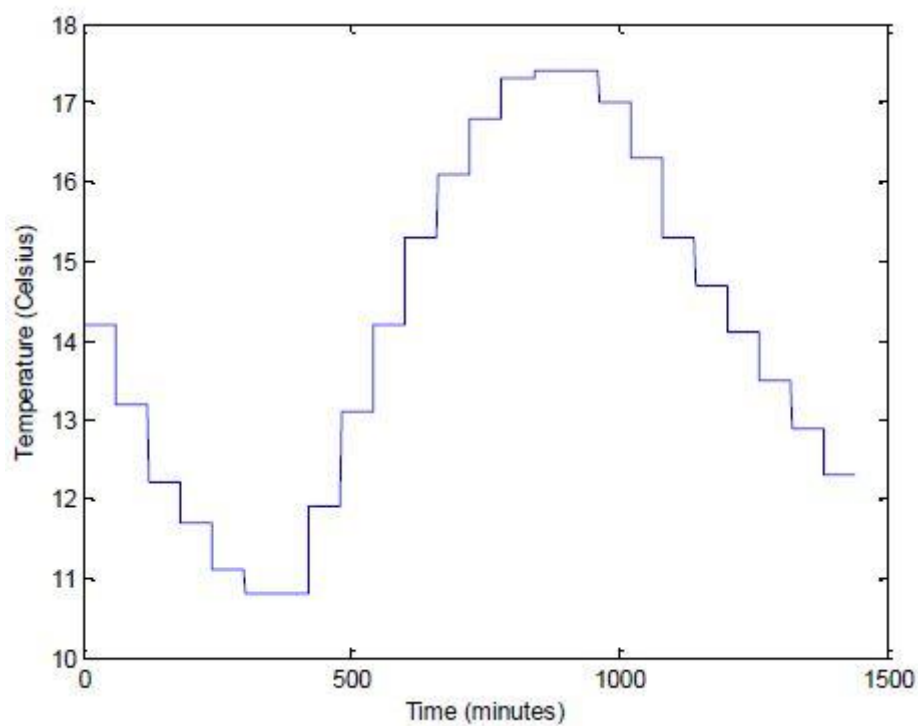
Σχήμα 5.2. 1^η Ιανουαρίου-Ακτινοβολία

Όπως φαίνεται από το γράφημα αυτό (5.2) η ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας του χειμώνα είναι σχετικά χαμηλή. Τέλος, στο σχήμα 5.3. παρουσιάζεται το (ηλεκτρικό) φορτίο ενός νοικοκυριού για διάρκεια μίας ημέρας:



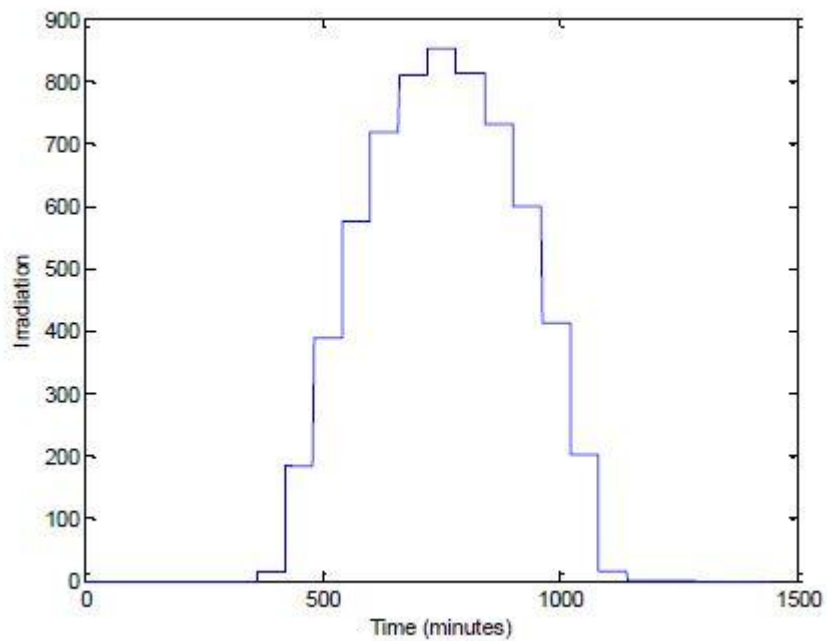
Σχήμα 5.3. Φορτίο ενός νοικοκυριού για μία ημέρα

Το φορτίο παραμένει το ίδιο για κάθε ένα από τα πειράματα. Στο σχήμα 5.4. απεικονίζεται η θερμοκρασία της 1^{ης} Απριλίου :



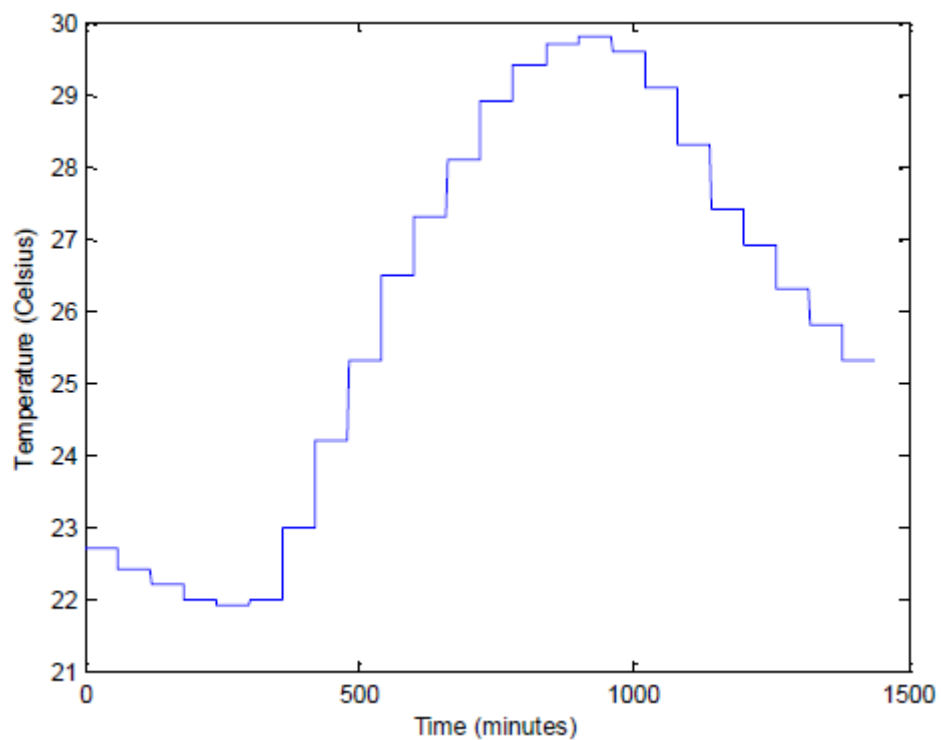
Σχήμα 5.4. 1^η Απριλίου - Θερμοκρασία

Στο σχήμα 5.5. απεικονίζεται η ακτινοβολία για την 1^η Απριλίου :



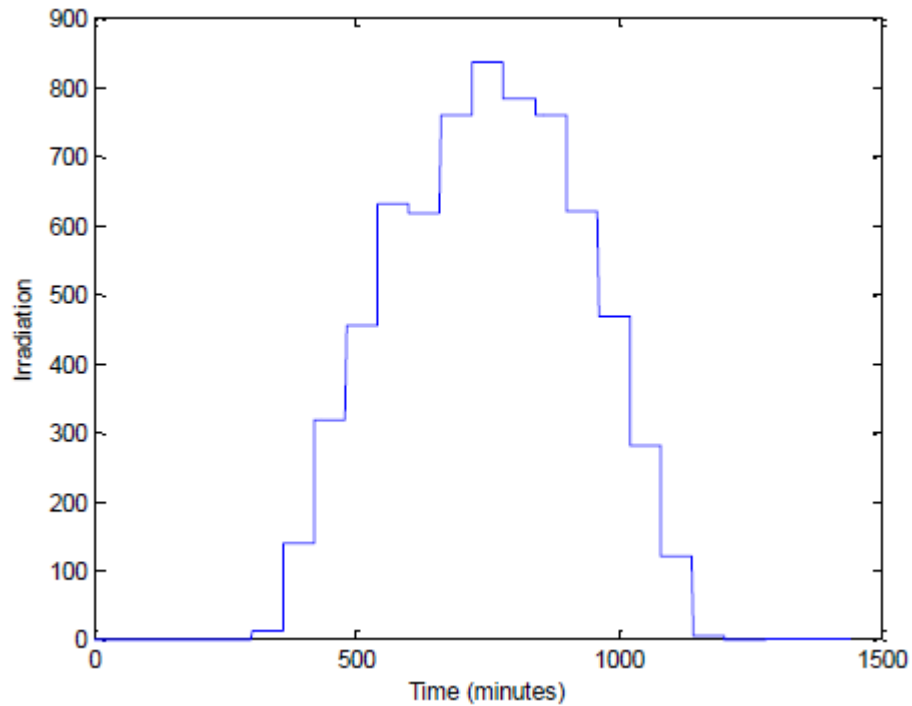
Σχήμα 5.5. 1^η Απριλίου - Ακτινοβολία

Τέλος, στο σχήμα 5.6 απεικονίζεται η θερμοκρασία στην πόλη των Χανίων για την πρώτη Ιουλίου :



Σχήμα 5.6. 1^η Ιουλίου – Θερμοκρασία

Και στο σχήμα 5.7. απεικονίζεται η ακτινοβολία για την 1^η Ιουλίου :



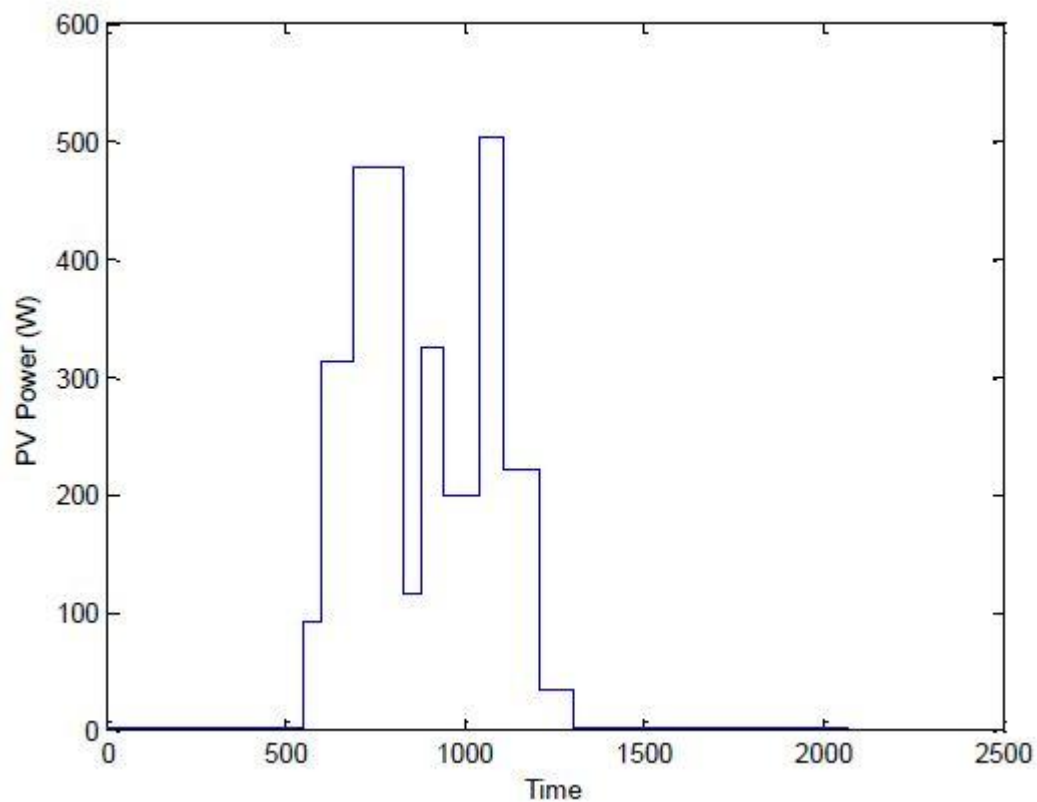
Σχήμα 5.7. 1^η Ιουλίου-Ακτινοβολία

5.2 Απόδοση του συστήματος

Η απόδοση του υπό μελέτη συστήματος θα ελεγχθεί κάτω από τις συνθήκες που προέκυψαν από τα ανωτέρω δεδομένα καθώς και για κάποιες ειδικές περιπτώσεις που ίσως να μην συναντήσουμε κάτω από αυτές τις συνθήκες.

5.2.1 Χειμερινή ημέρα

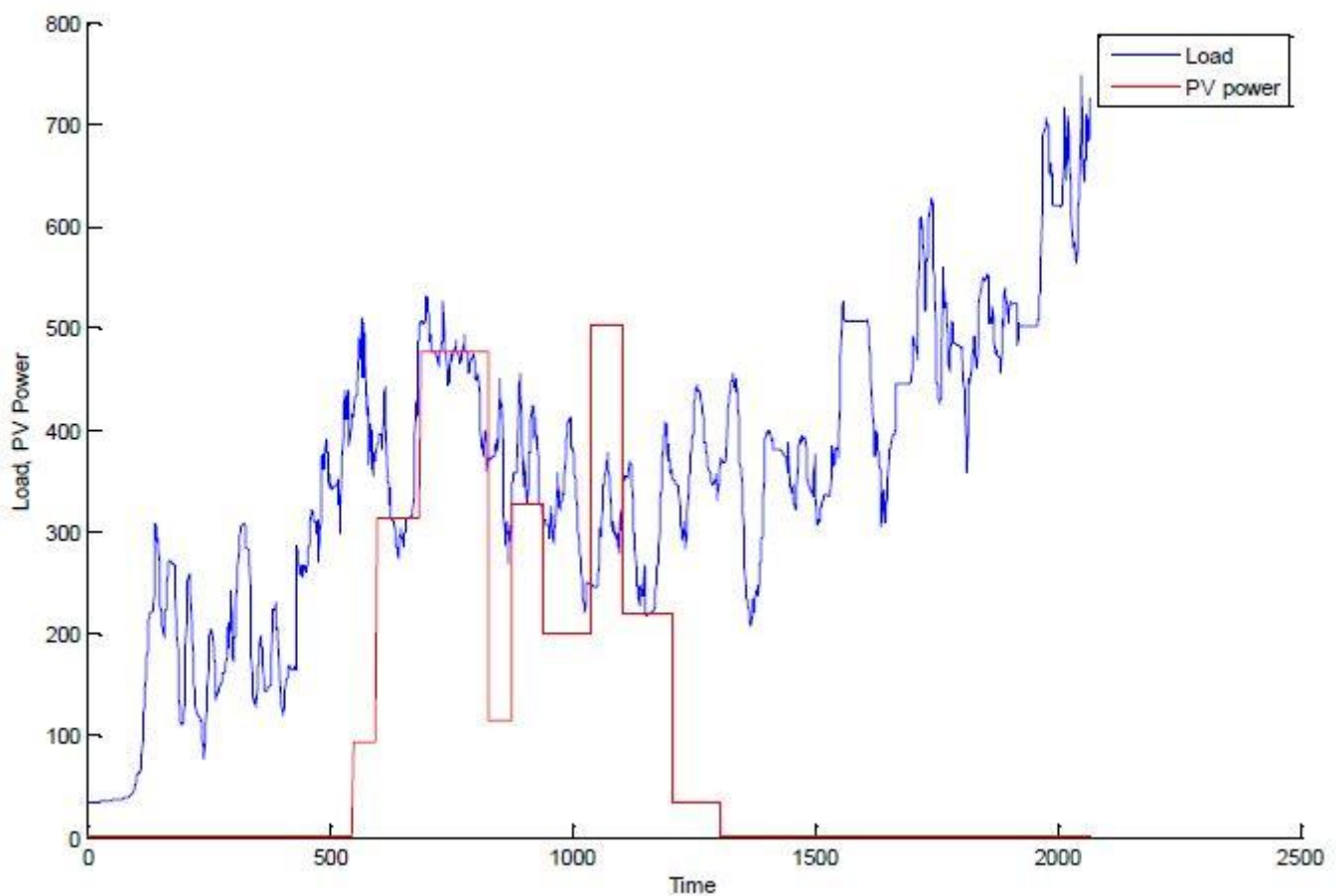
Στο σχήμα 5.8 απεικονίζεται η ισχύς που παράγεται από τα επτά φ/β πλαίσια του συστήματος :



Σχήμα 5.8.: Φ/β παραγωγή ισχύος για τη χειμερινή ημέρα

Είναι προφανές ότι, κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η φ/β γεννήτρια δεν παράγει επαρκή ισχύ, κυρίως λόγω της πολύ χαμηλής ακτινοβολίας που καταγράφεται εκείνη την εποχή. Η θερμοκρασία είναι επίσης χαμηλότερη σε σχέση με το καλοκαίρι, παραμένει ωστόσο μια υψηλή θερμοκρασία σε σχέση με τις περιπτώσεις που ελέγχθηκαν.

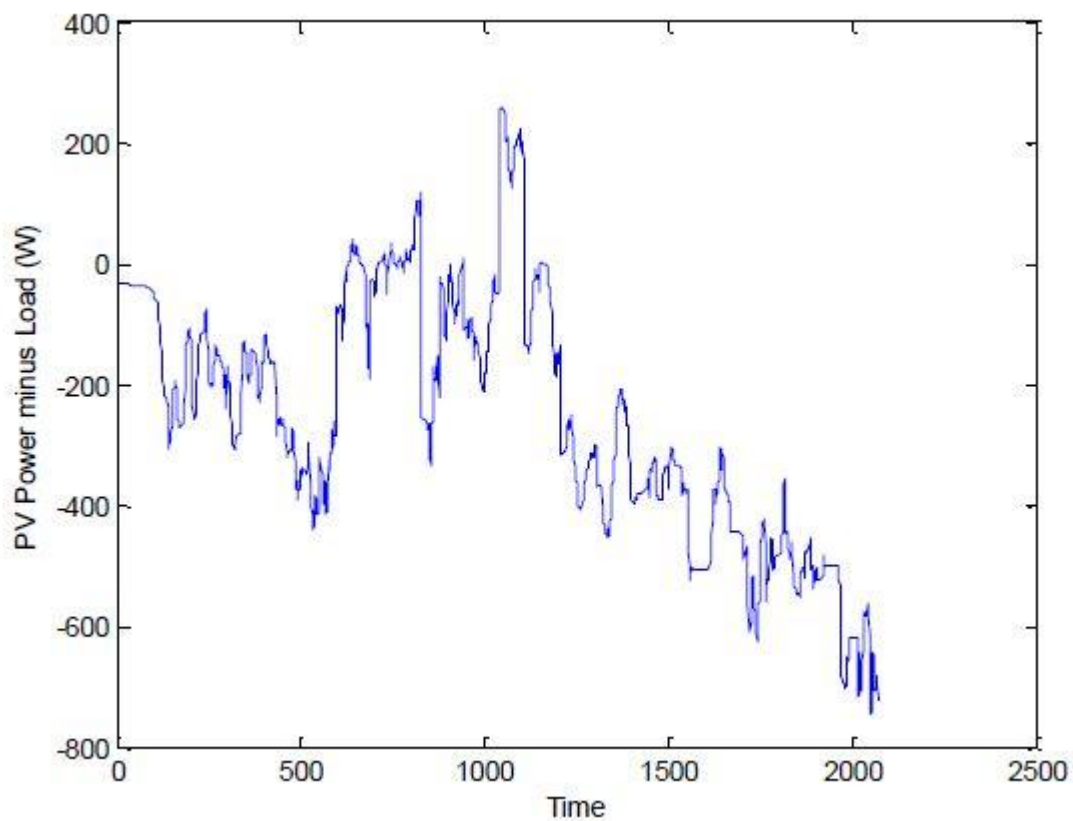
Στο σχήμα 5.9. δίνεται η γραφική απεικόνιση φ/β ενέργειας και φορτίου .



Σχήμα 5.9. Φ/β ενέργεια και φορτίο για την 1^η Ιανουαρίου

Είναι προφανές ότι η ισχύς που παράγεται από την φ/β γεννήτρια δεν επαρκεί για να παραχθεί η απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια του αυτόνομου συστήματος, οπότε η κυψέλη καυσίμου πρέπει να παράσχει τη διαφορά.

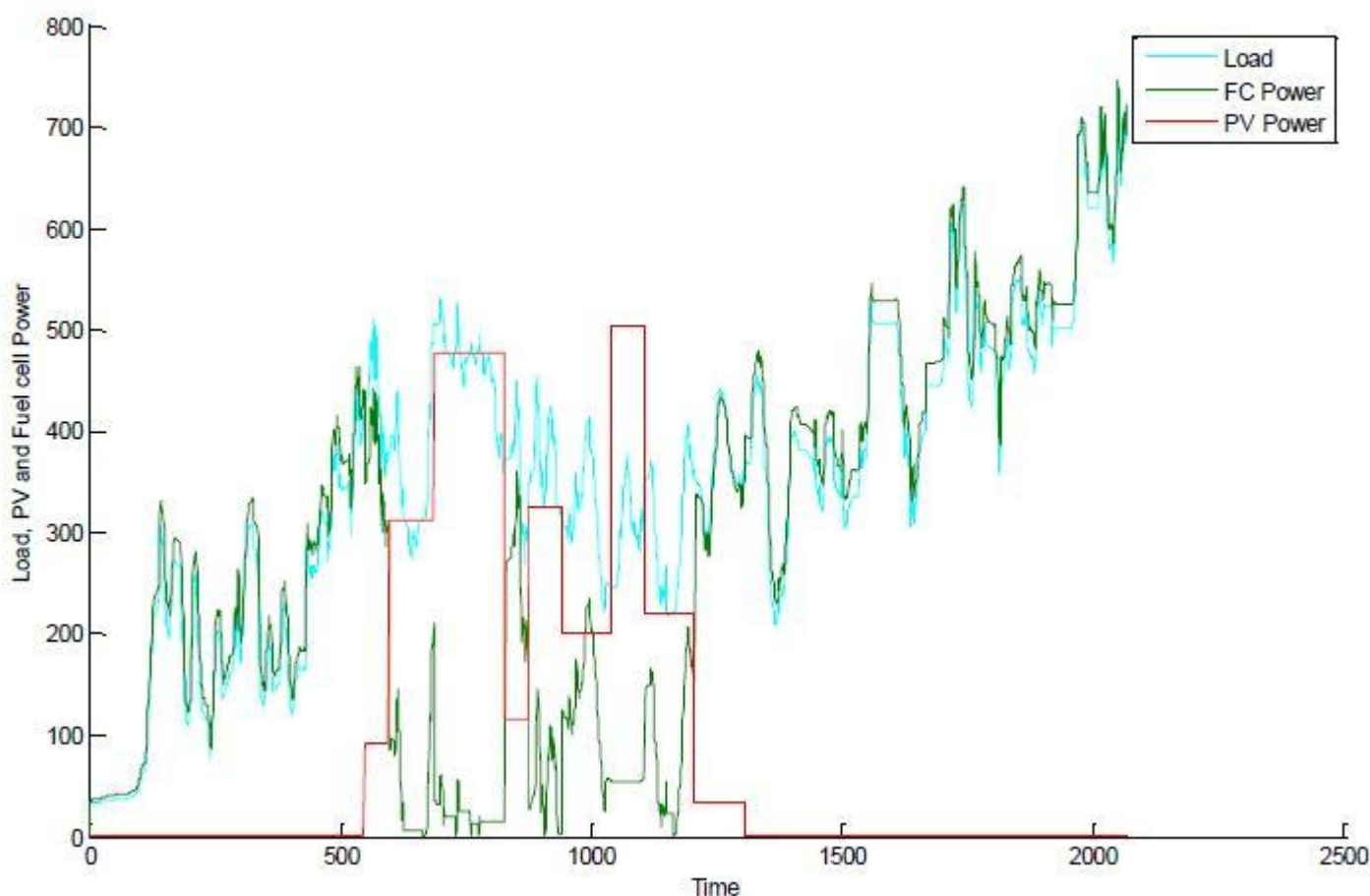
Στο σχήμα 5.10, απεικονίζεται η διαφορά στην ενέργεια μεταξύ του φορτίου και της παραγωγής της φ/β γεννήτριας .



Σχήμα 5.10. Διαφορά μεταξύ φ/β παραγωγής και φορτίου

Μόνο κατά τις ώρες της ημέρας, η φ/β γεννήτρια παράγει ισχύ ικανή να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου. Και πάλι, αυτό θα είναι εφικτό μόνο κάτω από τις καιρικές συνθήκες εκείνες που θα επιτρέπουν την φ/β παραγωγή ενέργειας.

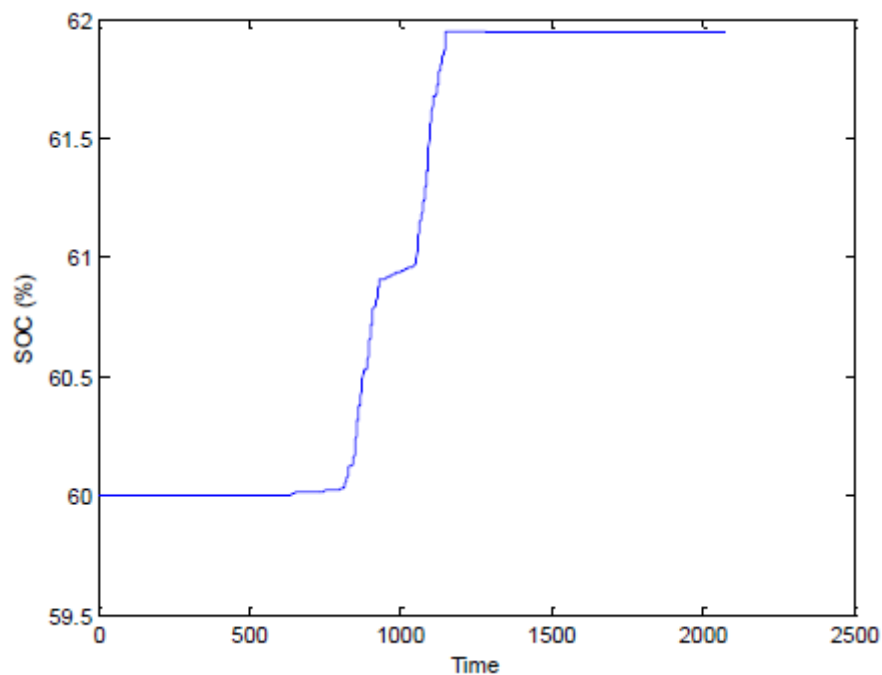
Στο σχήμα 5.11, απεικονίζονται η ισχύς που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου, η φ/β ισχύς και το φορτίο .



Σχήμα 5.11. Ενέργεια κυψέλης καυσίμου, φ/β ενέργεια και φορτίο

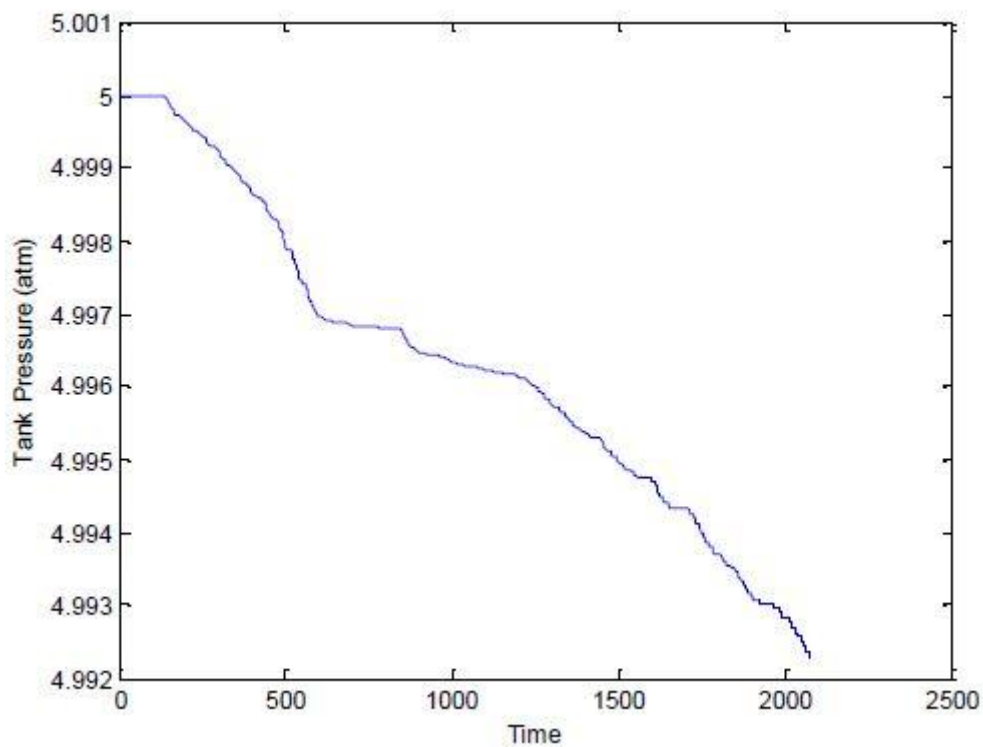
Η κυψέλη καυσίμου ανταποκρίνεται καλά στις ενεργειακές ανάγκες του συστήματος και είναι προφανές ότι ο ελεγκτής λειτουργεί αποτελεσματικά, καθώς τα αποτελέσματα στο γράφημα αυτό είναι τα αναμενόμενα. Αυτό σημαίνει ότι η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί κατά τη διάρκεια των ωρών της νύχτας, παρέχοντας ισχύ για το σύστημα και καλύπτοντας την υπολειπόμενη ισχύ της ημέρας. Αυτό είναι φυσιολογικό, καθώς η κυψέλη έχει ισχύ 1KW, το οποίο υπερβαίνει το φορτίο.

Στο σχήμα 5.12, η περίσσεια ενέργεια που παράγεται από την φ/β γεννήτρια χρησιμοποιείται για να φορτίσει τη μπαταρία :



Σχήμα 5.12. SOC (φόρτιση της μπαταρίας) για την 1^η Ιανουαρίου

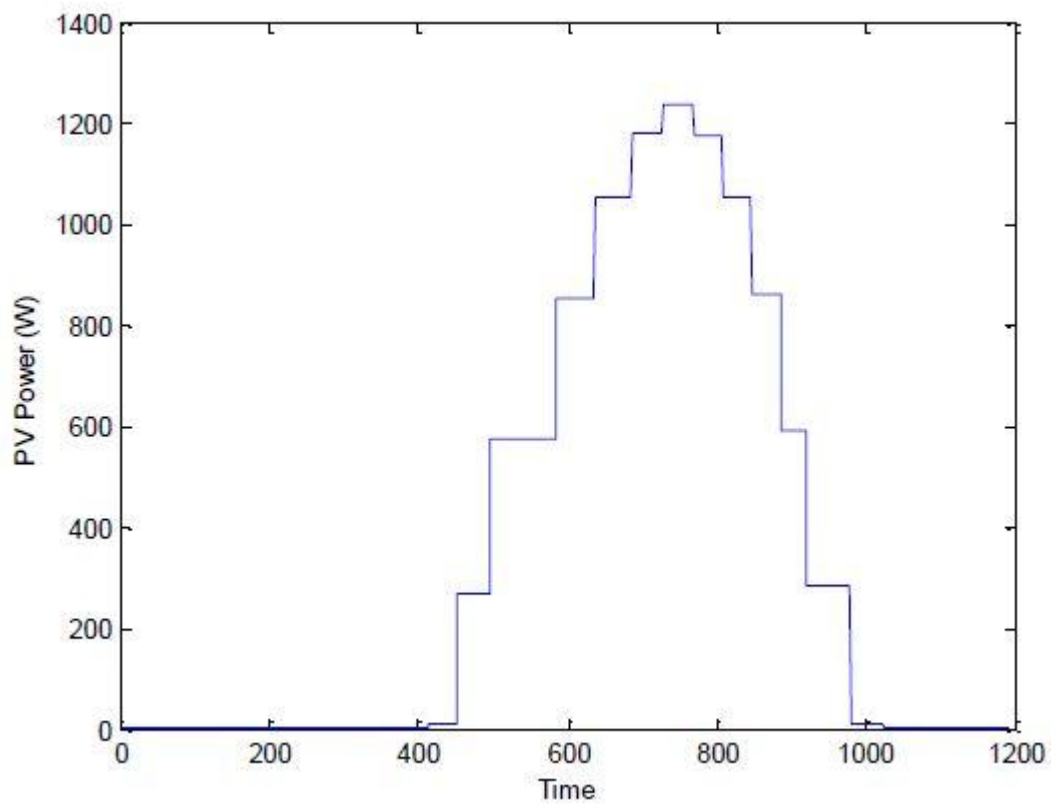
Φυσικά, η μπαταρία φορτίζεται μόνο όταν η φ/β γεννήτρια παρέχει ισχύ. Τέλος, στο σχήμα 5.13, η δεξαμενή αδειάζει λόγω της χρήσης της κυψέλης καυσίμου :



Σχήμα 5.13. 1^η Ιανουαρίου - Πίεση δεξαμενής

5.2.2 Ανοιξιάτικη μέρα

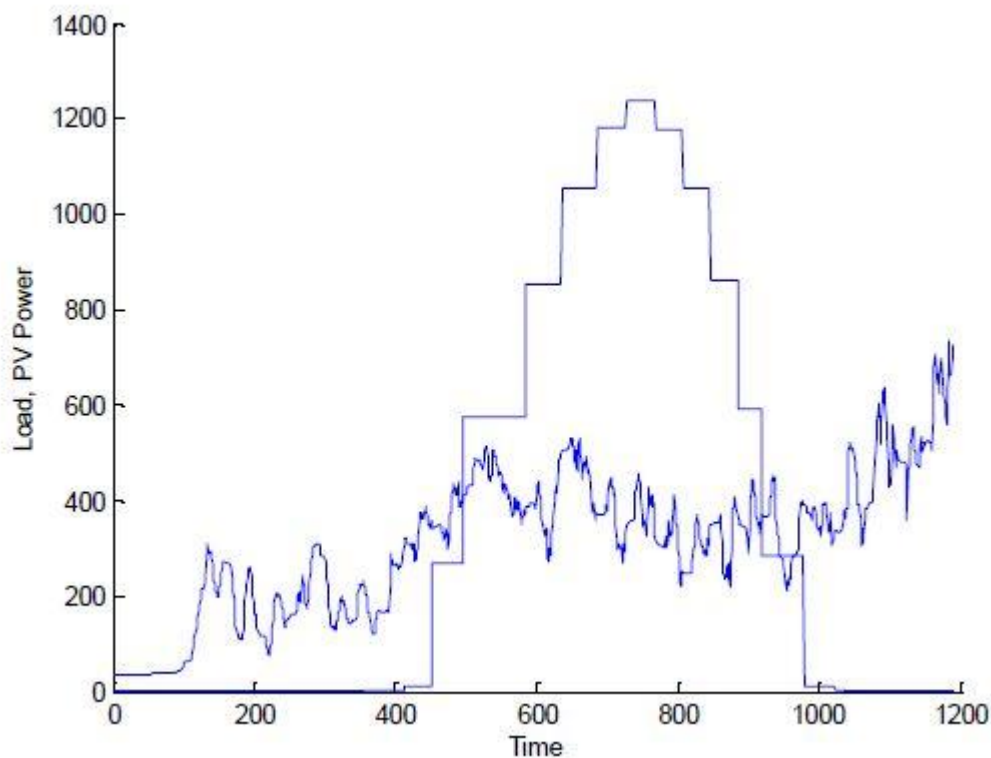
Στο σχήμα 5.14 φαίνεται η ισχύς που παράγεται από την φ/β γεννήτρια .



Σχήμα 5.14 Φ/β ισχύς για την 1^η Απριλίου

Κατά τη διάρκεια της ανοιξιάτικης ημέρας, η φ/β γεννήτρια παράγει πάνω από τη διπλάσια ενέργεια σε σχέση με το χειμώνα, λόγω της αύξησης στην θερμοκρασία και την ακτινοβολία.

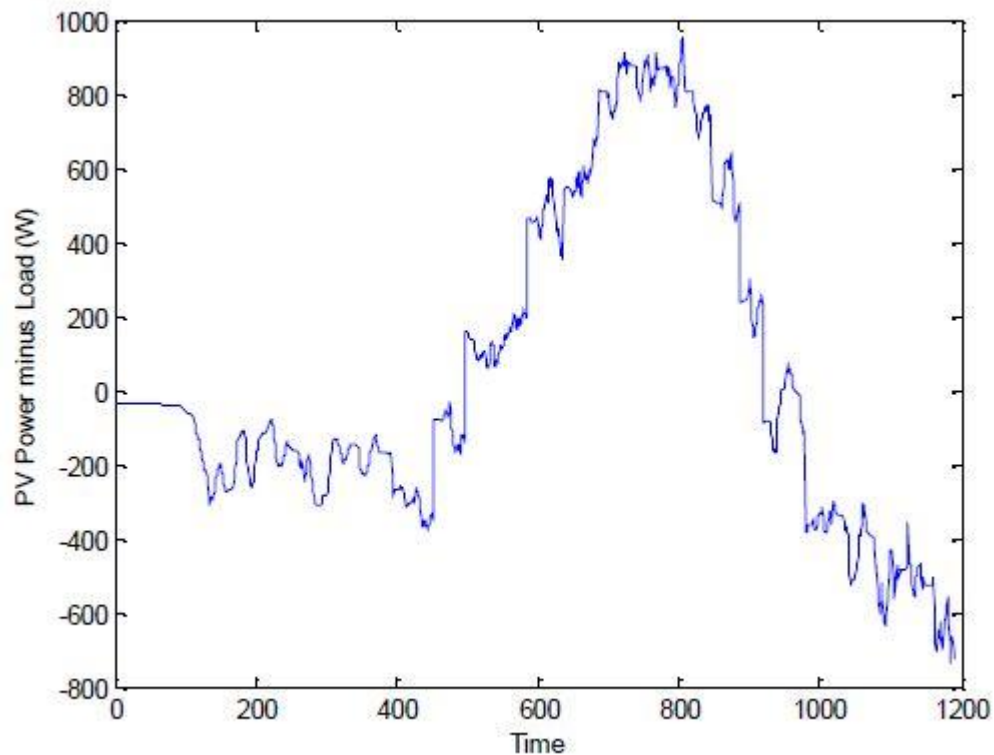
Στο σχήμα 5.15, η φ/β ισχύς απεικονίζεται στο ίδιο γράφημα με το ηλεκτρικό ρεύμα, ώστε να παρατηρήσουμε τη συμπεριφορά τους :



Σχήμα 5.15. Φ/β ισχύς και φορτίο για την 1^η Απριλίου

Η φ/β γεννήτρια παράγει μεγάλο ποσό περίσσειας ισχύος, η οποία, κρίνοντας από το γράφημα, ίσως είναι ικανή να αποθηκευτεί κατά τη διάρκεια της ημέρας, ώστε να καλύψει την έλλειψη ισχύος κατά τη διάρκεια των νυκτερινών ωρών. Το γεγονός αυτό είναι πολύ θετικό για το σύστημα που μελετάται, καθώς η άνοιξη θεωρείται μία μέση περίπτωση, χωρίς σημαντικές ενεργειακές απώλειες ή πλεονάσματα .

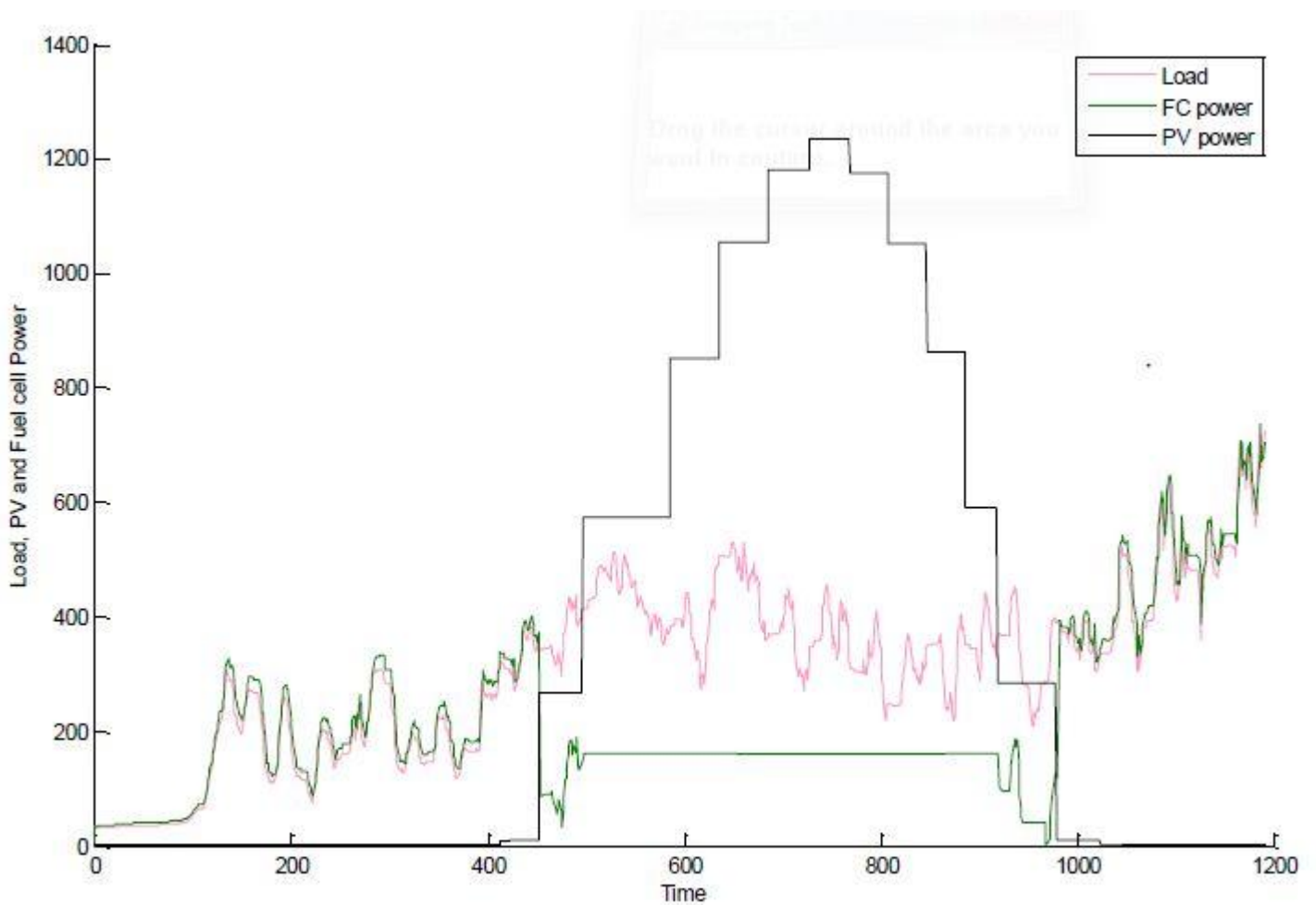
Στο σχήμα 5.16, απεικονίζεται η διαφορά μεταξύ φ/β ισχύος και φορτίου:



Σχήμα 5.16. Διαφορά μεταξύ φορτίου και φ/β ισχύος για την 1^η Απριλίου

Τα συμπεράσματα που εξάγουμε από το γράφημα αυτό, είναι, σε γενικές γραμμές, τα ίδια με του προηγούμενου γραφήματος. Αυτό που παρατηρείται, σε σχέση με το αντίστοιχο γράφημα της χειμερινής μέρας, είναι ότι κατά την διάρκεια ολόκληρης της μέρας, η περίσσεια ισχύος (PV power - Load) είναι πολύ μεγαλύτερη (περίπου τετραπλάσια) από την αντίστοιχη της χειμερινής μέρας.

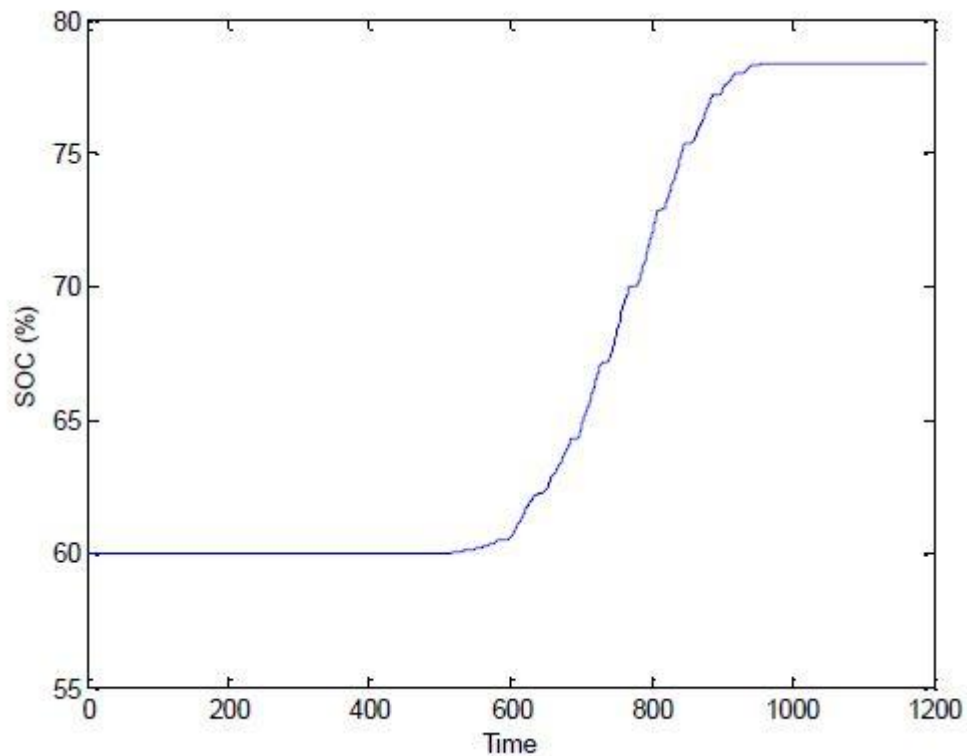
Στο σχήμα 5.17. απεικονίζεται η σχέση μεταξύ φ/β ισχύος, ισχύος της κυψέλης καυσίμου και φορτίου.



Σχήμα 5.17. Φ/β ισχύς και ισχύς κυψέλης καυσίμου – Φορτίο για την 1^η Απριλίου

Το σημαντικό στοιχείο σε αυτό το γράφημα είναι ότι η κυψέλη καυσίμου δεν πέφτει στο μηδέν όταν υπάρχει περίσσεια ισχύς από την φ/β γεννήτρια. Αυτό συμβαίνει λόγω του χαμηλού βαθμού ακρίβειας του λύτη (low accuracy solver) που επιλέξαμε για την προσομοίωση στο Simulink. Η χρήση του συγκεκριμένου αυτού λύτη (solver) έγινε από Matlab, καθώς ο λύτης που χρησιμοποιούνταν προηγουμένως παρήγαγε κάποια πολύ ασυνήθιστα αποτελέσματα. Ο ελεγκτής του συστήματος δουλεύει καλά, όπως φάνηκε στο σχήμα 5.12.

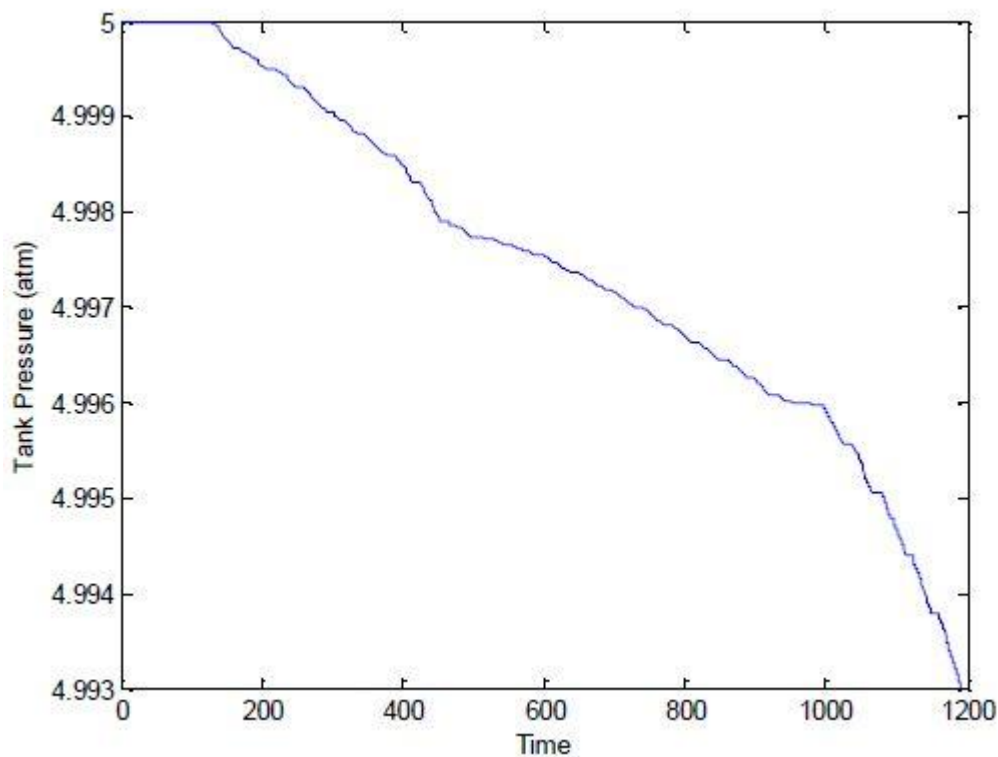
Η συμπεριφορά της μπαταρίας παραμένει η ίδια, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.18 :



Σχήμα 5.18. SOC για την 1^η Απριλίου

Αξίζει να σημειωθεί ότι παρατηρήθηκε μια αύξηση στο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας κατά 25% , μόνο με μία ημέρα όπου είχαμε περίσσεια ισχύς στο σύστημα. Αυτό είναι φυσιολογικό επειδή η μπαταρία δεν αποτελεί το κυρίως μέσον αποθήκευσης ισχύος του συστήματος, αλλά υπάρχει για ακραίες περιπτώσεις και για να εξασφαλίζει την συνεχή ρύθμιση της τάσης.

Τέλος, στο σχήμα 5.19, η συμπεριφορά της δεξαμενής βρέθηκε να είναι ίδια με την χειμερινή ημέρα, καθώς η περίσσεια ισχύς της φ/β γεννήτριας χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της μπαταρίας.

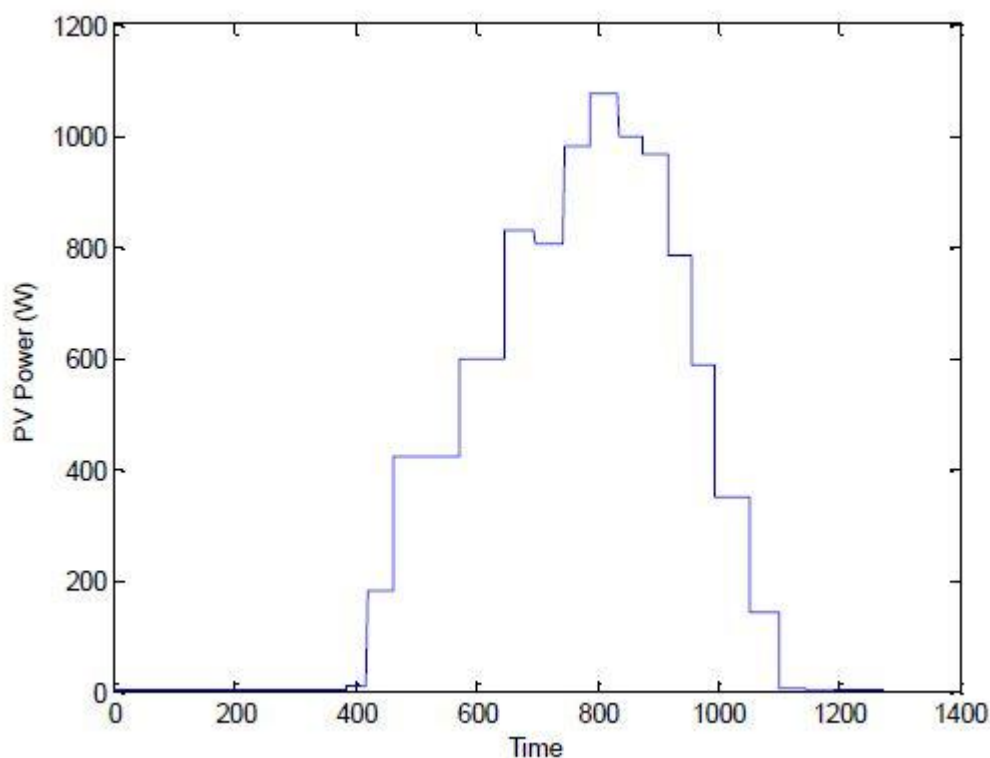


Σχήμα 5.19: Πίεση της δεξαμενής για την 1^η Απριλίου

Όπως βλέπουμε, δεν υπάρχουν σημαντικές απώλειες στην πίεση της δεξαμενής. Κατά συνέπεια, δεν έγινε αρκετή χρήση του υδρογόνου σε σύγκριση με αυτό που αποθηκεύτηκε. Αυτό είναι θετικό και φυσιολογικό, καθώς έχει επιλεγεί μια δεξαμενή που αποθηκεύει υδρογόνο πολύ υψηλής συμπίεσης.

5.2.3 Θερμική ημέρα

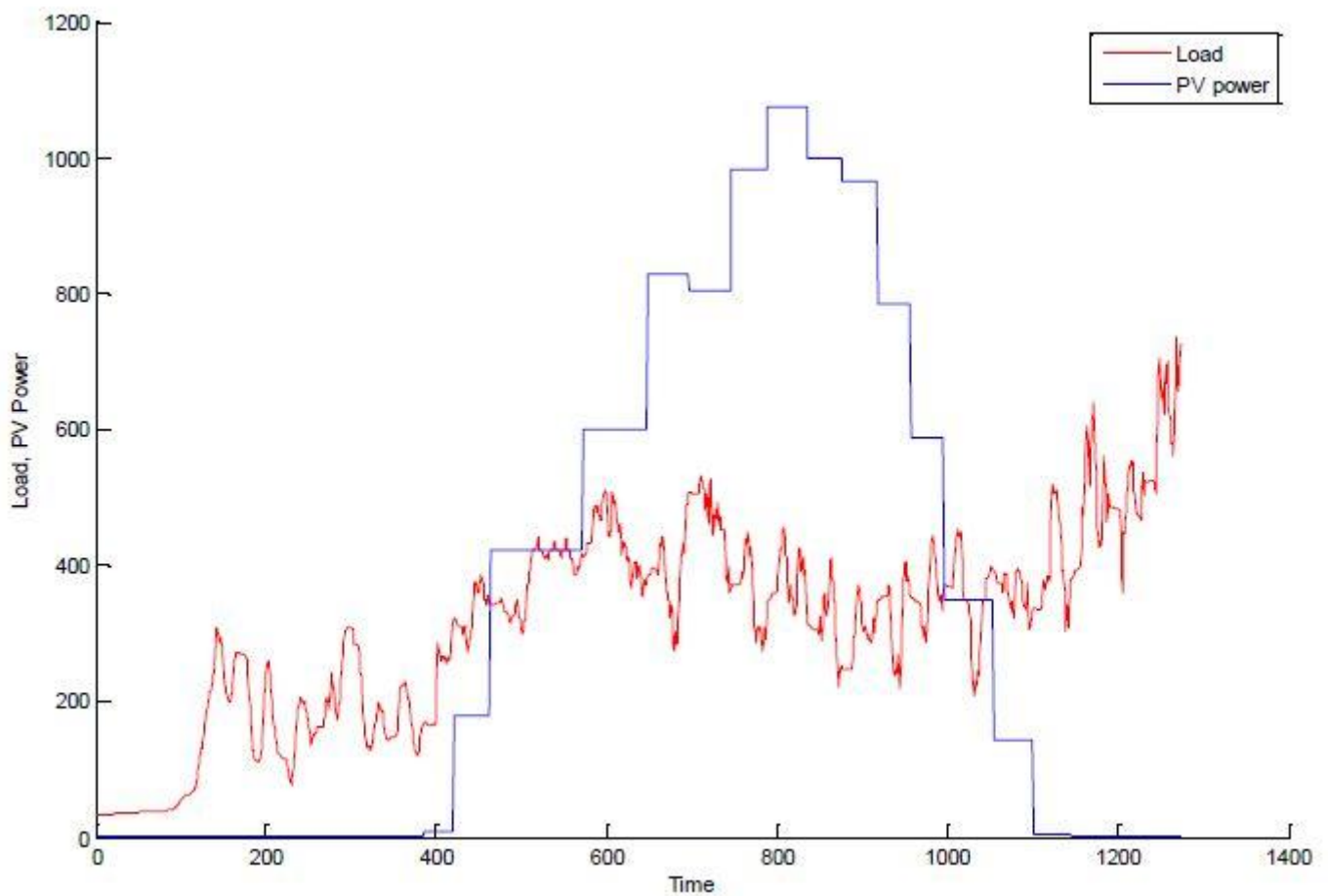
Όπως και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, αρχικά παρουσιάζεται η ισχύς που παράγεται από την φ/β γεννήτρια, στο σχήμα 5.20 :



Σχήμα 5.20. Φ/β ισχύς για την 1^η του Ιουλίου

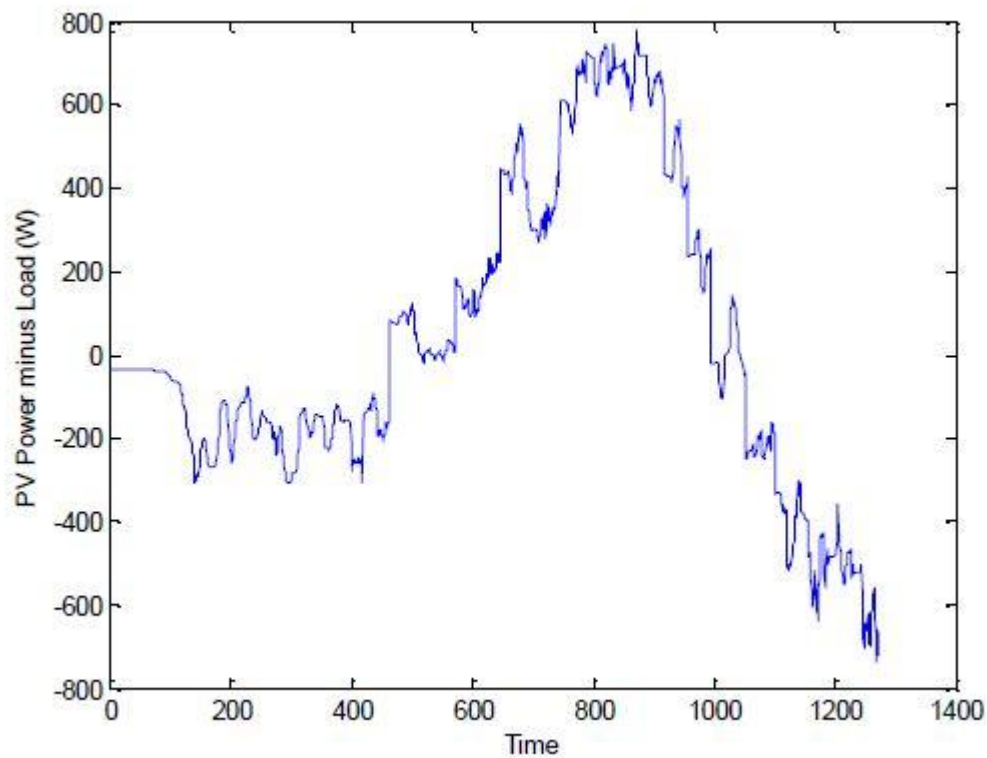
Κοιτάζοντας την προηγούμενη περίπτωση, παρατηρούμε ότι την ημέρα της άνοιξης, η ισχύς που παρήγαγε η φ/β γεννήτρια είναι περισσότερη από την ισχύ της θερινής ημέρας. Αυτό είναι φυσιολογικό, καθώς, σύμφωνα με τα δεδομένα, η ακτινοβολία ήταν περισσότερη την ανοιξιάτικη ημέρα. Το καλοκαίρι η θερμοκρασία είναι υψηλότερη αλλά είναι σαφές και αναμενόμενο, ότι αυτό που είναι πιο σημαντικό για την φ/β παραγωγή ισχύος είναι η ακτινοβολία. Επίσης υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την φ/β παράγωγη ενέργειας κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, όπως η αυξημένη υγρασία.

Στο σχήμα 5.21. απεικονίζεται το διάγραμμα φ/β ισχύος και φορτίου :



Σχήμα 5.21. Φ/β ισχύς και φορτίο για την 1^η Ιουλίου

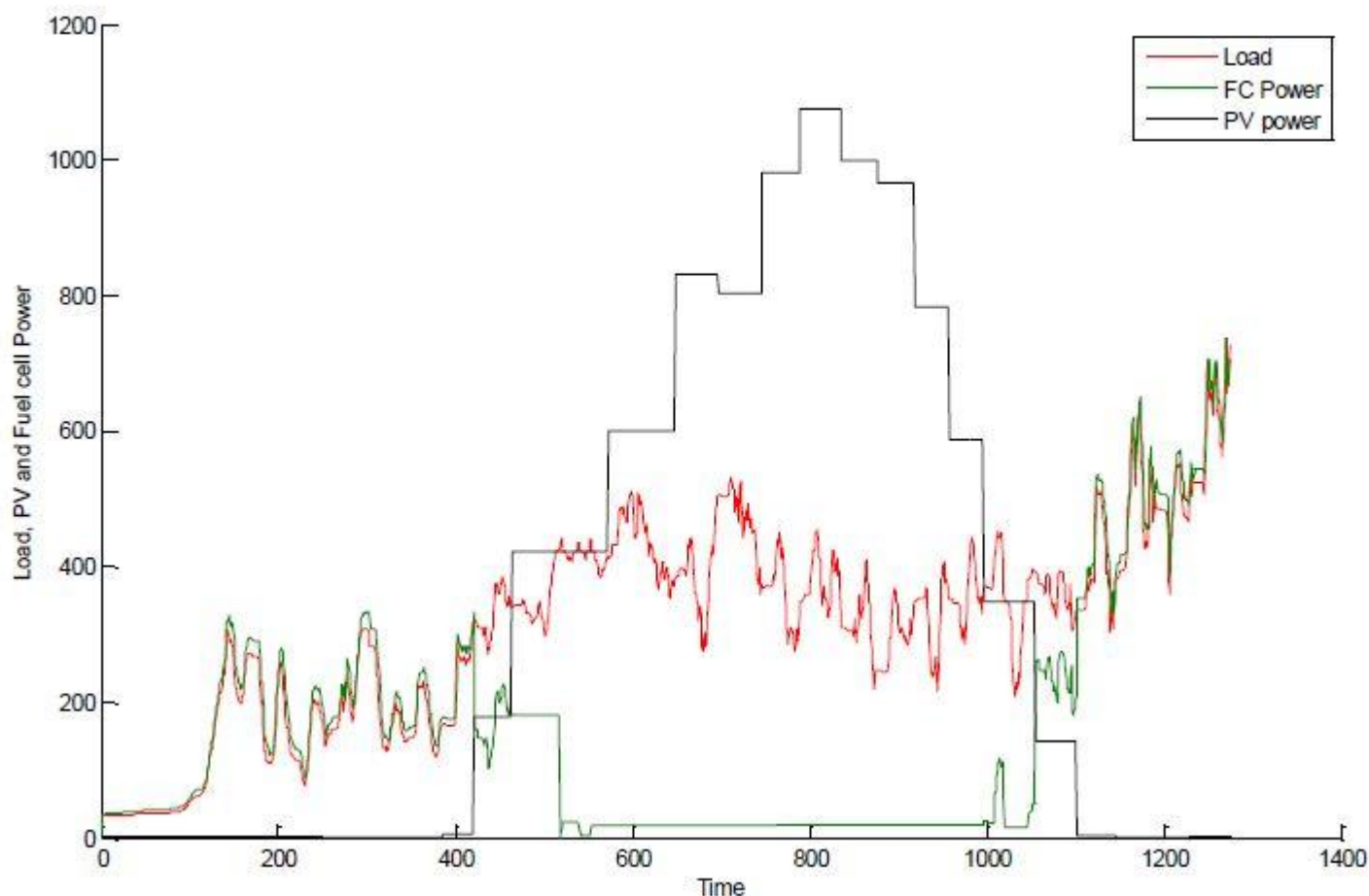
Και πάλι, η φ/β παραγωγή ισχύος κατά τη διάρκεια της ημέρας, επαρκεί για να καλύψει το έλλειμμα ισχύος κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών. Αυτό φαίνεται καλύτερα στο σχήμα 5.22 :



Σχήμα 5.22. Διαφορά μεταξύ φ/β ισχύος και φορτίου για την 1^η Ιουλίου

Αυτό που παρατηρείται, σε σχέση με το αντίστοιχο γράφημα της ανοιξιάτικης μέρας, είναι ότι κατά την διάρκεια της μέρας, η περίσσεια ισχύς (PV power - Load) είναι λίγο μικρότερη από την αντίστοιχη της ανοιξιάτικης μέρας, αλλά και πάλι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της χειμερινής μέρας .

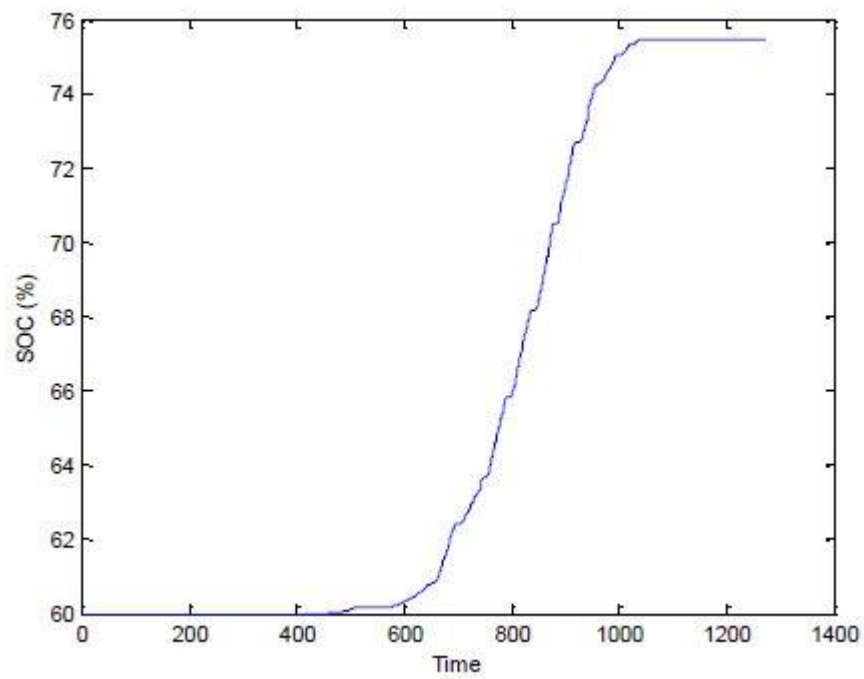
Η σχέση μεταξύ φ/β ισχύος, ισχύος της κυψέλης καυσίμου και φορτίου, απεικονίζεται στο σχήμα 5.23 :



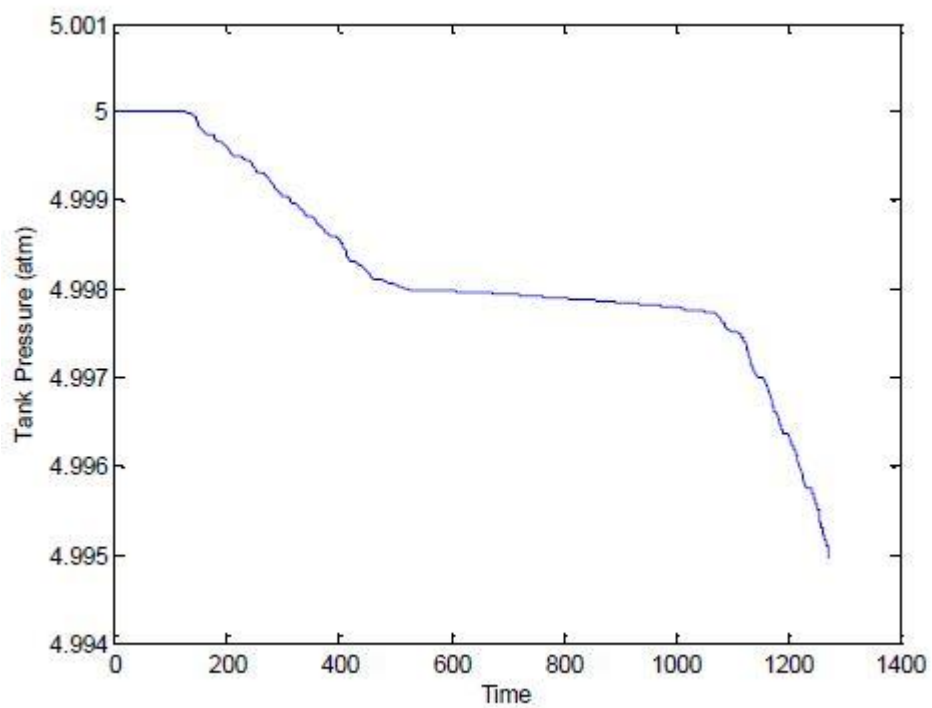
Σχήμα 5.23. Ισχύς φ/β και κυψέλης καυσίμου και φορτίο για την 1^η Ιουλίου

Και πάλι βλέπουμε ότι η κυψέλη καυσίμου ανταποκρίνεται καλά στις ενεργειακές ανάγκες του συστήματος και είναι προφανές ότι ο ελεγκτής λειτουργεί αποτελεσματικά, καθώς τα αποτελέσματα στο γράφημα αυτό είναι τα αναμενόμενα. Αυτό σημαίνει ότι η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί κατά τη διάρκεια των ωρών της νύχτας, παρέχοντας ισχύ για το σύστημα και καλύπτοντας την υπολειπόμενη ισχύ της ημέρας .

Στα δύο τελευταία γραφήματα του μέρους αυτού, τα σχήματα 5.24 και 5.25 , απεικονίζονται η συμπεριφορά της μπαταρίας και της δεξαμενής υδρογόνου αντίστοιχα. Οι παρατηρήσεις είναι ίδιες με την περίπτωση της ανοιξιάτικης μέρας :



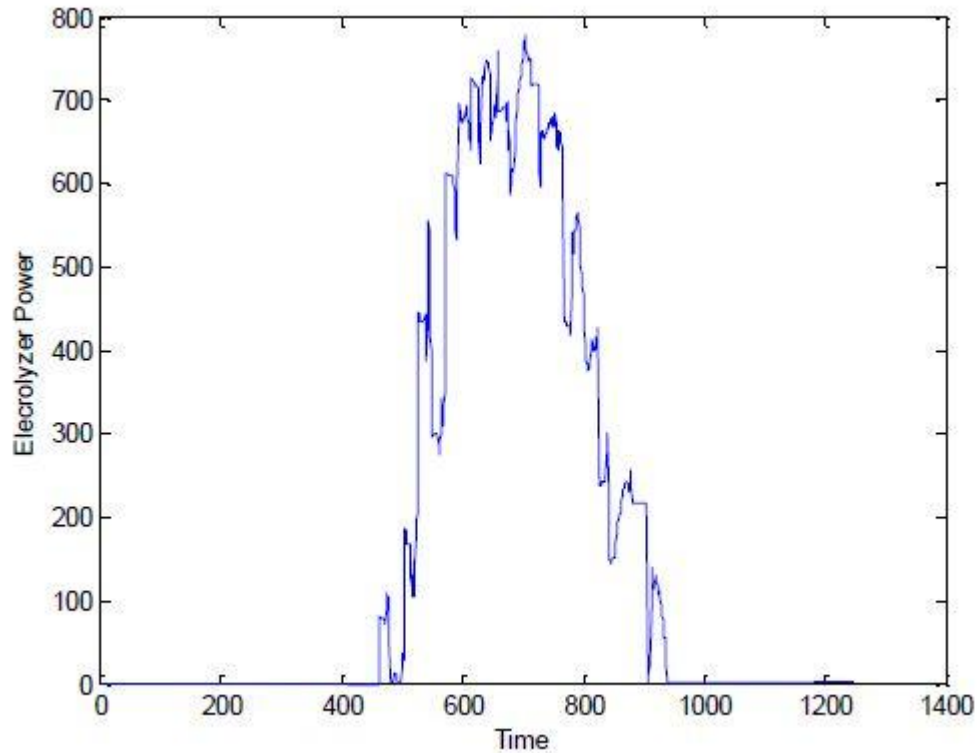
Σχήμα 5.24. SOC για την 1^η Ιουλίου



Σχήμα 5.25. Πίεση δεξαμενής για την 1^η Ιουλίου

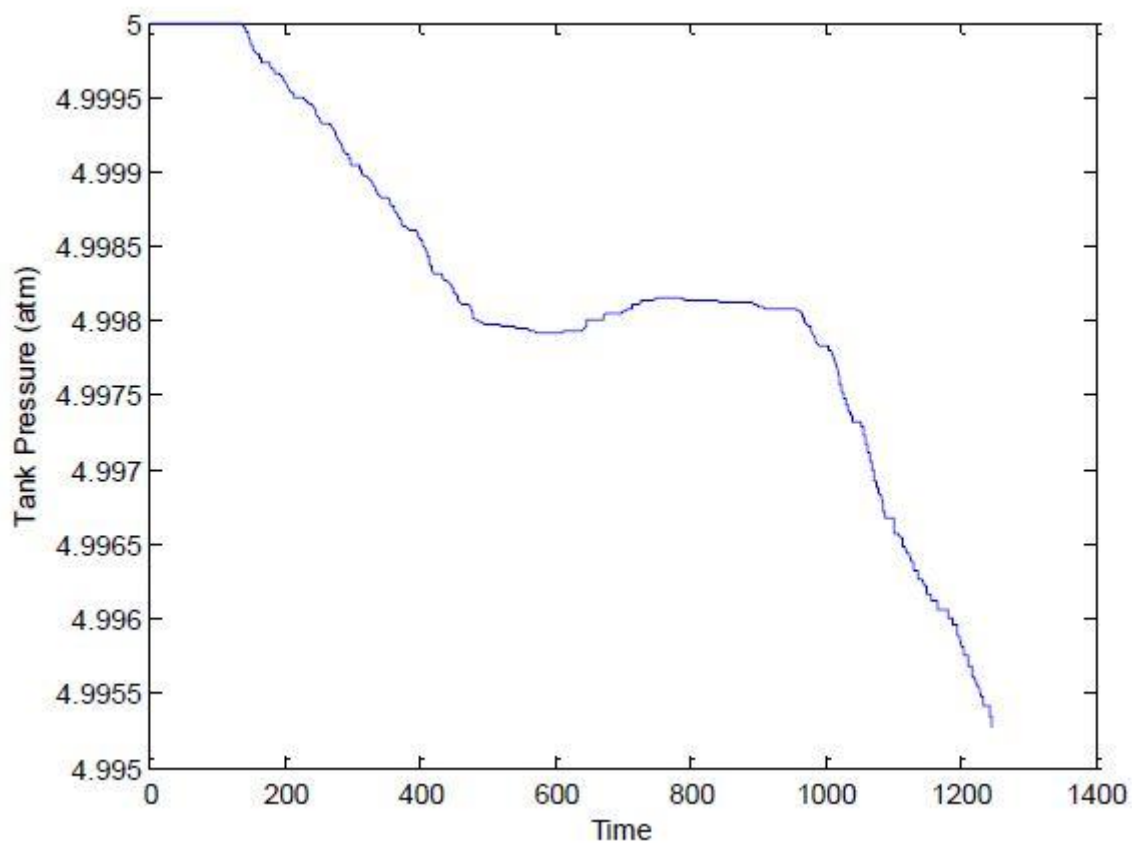
5.2.4 Ειδικές περιπτώσεις

Πρώτον, εξετάστηκε η συμπεριφορά του ηλεκτρολύτη, όταν η μπαταρία είναι φορτισμένη. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 5.26 :



Σχήμα 5.26. Ηλεκτρολύτης σε λειτουργία

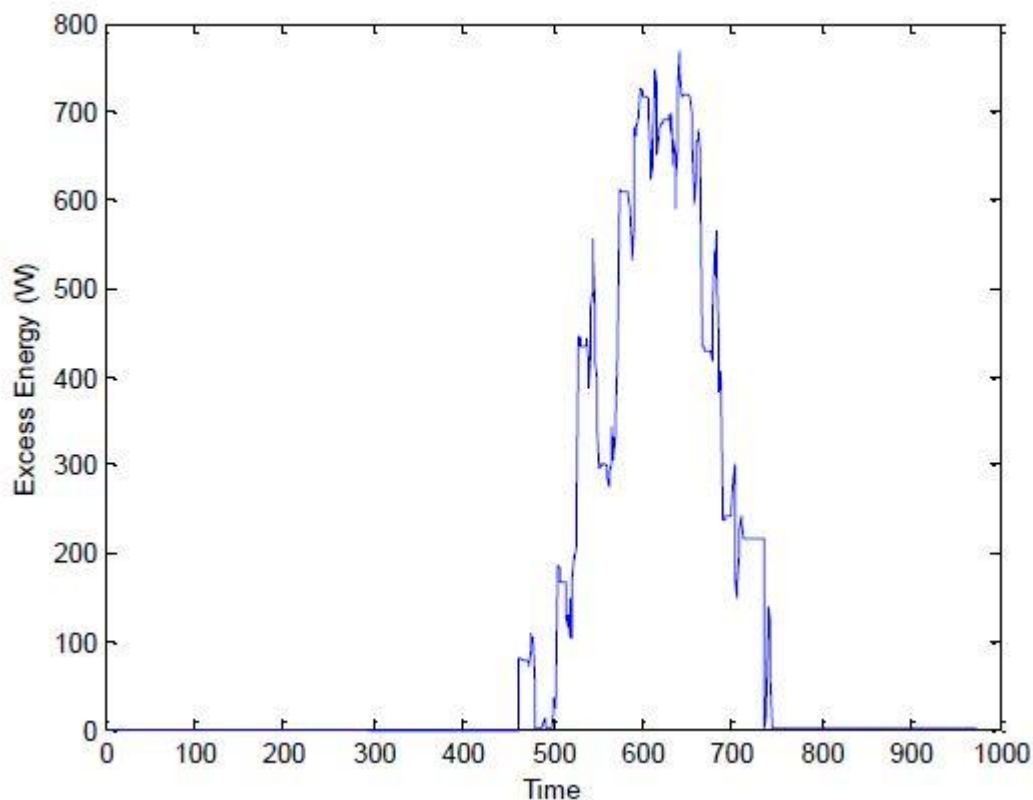
Βλέπουμε ότι ο ηλεκτρολύτης μετατρέπει ισχύ κατά τη διάρκεια των ωρών της ημέρας, όταν υπάρχει περίσσεια ισχύος. Η ισχύς αυτή μετατρέπεται σε υδρογόνο στη δεξαμενή υδρογόνου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.27:



Σχήμα 5.27 Πίεση της δεξαμενής στην περίπτωση της χρησιμοποίησης του ηλεκτρολύτη

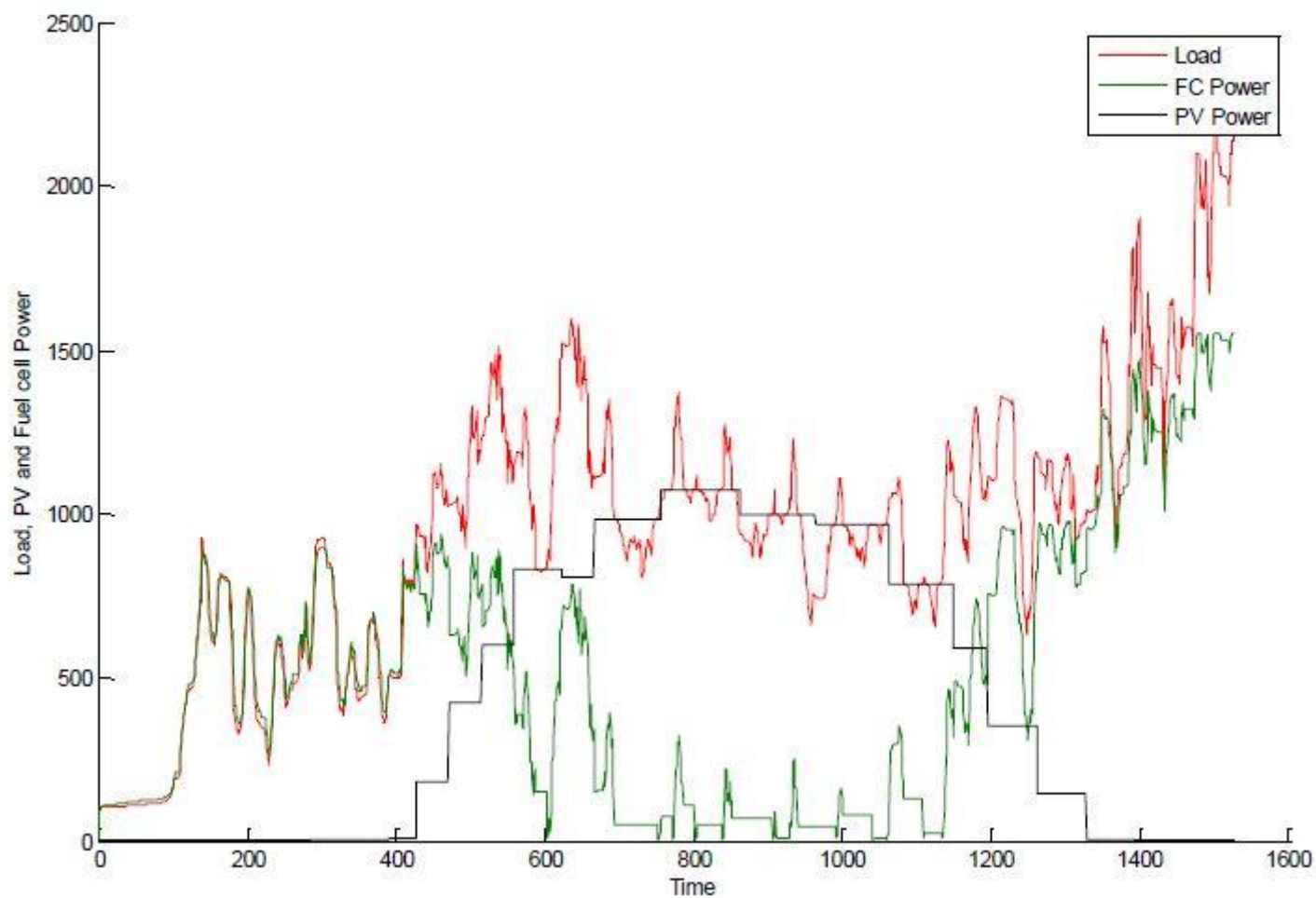
Είναι προφανές ότι η πίεση αυξάνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, όταν ο ηλεκτρολύτης είναι σε λειτουργία.

Εάν η πίεση της δεξαμενής είναι στο μέγιστο, τότε, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.28, η περίσσεια ισχύς πρέπει να απορριφθεί ως πλεόνασμα .

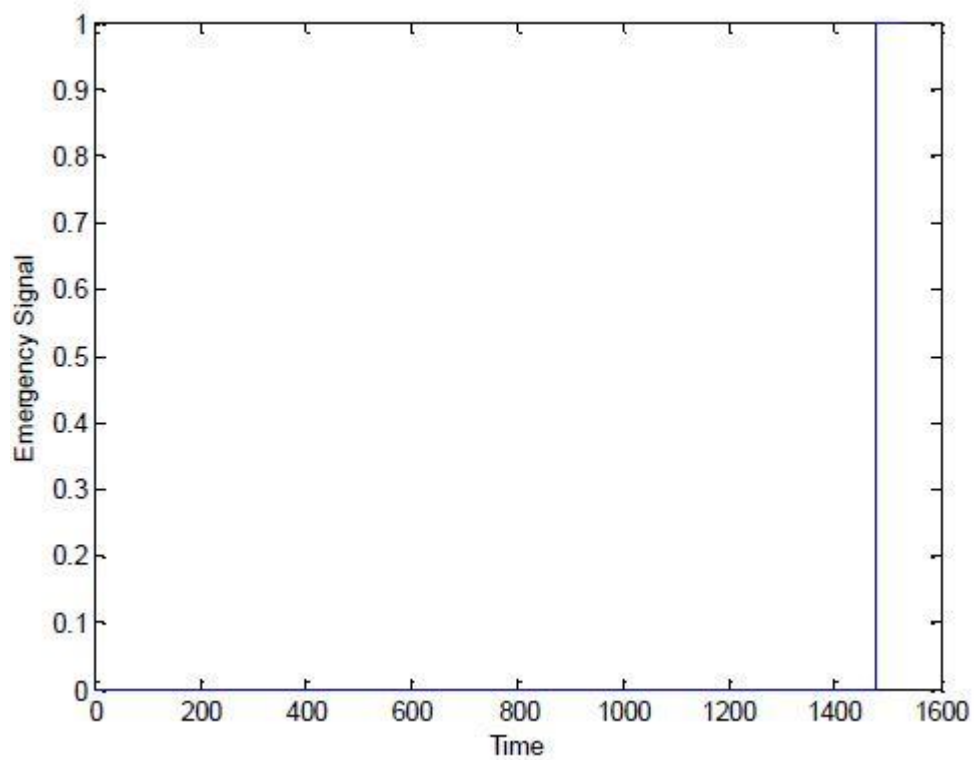


Σχήμα 5.28. Πλεόνασμα ισχύος

Η τελευταία ειδική περίπτωση που εξετάζεται είναι η περίπτωση όπου το φορτίο είναι ακραίο και το σύστημα πρέπει να σταματήσει τη λειτουργία του. Στο σχήμα 5.29, φαίνεται ότι η φ/β γεννήτρια, από κάποιο σημείο κι έπειτα, σε συνεργασία με την συστοιχία κυψελών καυσίμου, αδυνατεί να παράγει την ισχύ που είναι απαραίτητη για την κάλυψη των αναγκών του φορτίου. Η μπαταρία είναι άδεια, με αποτέλεσμα την εκπομπή σήματος εκτάκτου ανάγκης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.30.



Σχήμα 5.29. Ισχύς φ/β και κυψέλης καυσίμου – Υπερβολικό φορτίο



Σχήμα 5.30. Σήμα εκτάκτου ανάγκης

Στο επόμενο κεφάλαιο, παρατίθενται τα συμπεράσματα της προσομοίωσης.

Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα και προτάσεις για το μέλλον

Στην εργασία αυτή, παρουσιάστηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών και κυψέλης καυσίμου υδρογόνου, το οποίο εφαρμόστηκε στο περιβάλλον Simulink με στόχο να προβλεφθεί η λειτουργική απόδοσή του, μέσω μιας δυναμικής προσομοίωσης.

6.1 Μοντελοποίηση των μερών του υβριδικού συστήματος PVFC

Για την προσομοίωση ενός υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών και κυψέλης καυσίμου υδρογόνου δόθηκαν λεπτομερείς περιγραφές των μοντέλων των επιμέρους μερών που αποτελούν το σύστημα. Τα μοντέλα αυτά, βασίστηκαν κατά κύριο λόγο σε ηλεκτρικές και ηλεκτροχημικές σχέσεις.

Ωστόσο, χρησιμοποιήθηκαν και κάποιες εμπειρικές σχέσεις για κάποια μοντέλα. Τα μοντέλα της φ/β γεννήτριας και της συστοιχίας κυψελών καυσίμου συζητήθηκαν με λεπτομέρεια, ενώ ο ηλεκτρολύτης και η δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου, μοντελοποιήθηκαν με πολύ πιο απλό τρόπο. Ο ελεγκτής δόθηκε από ένα διάγραμμα ροής και η εφαρμογή του στο Simulink δεν έχει κάποιο ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού αποτελείται κυρίως από διαγράμματα δράσης (action blocks).

6.1.1 Φ/β γεννήτρια

Στη μελέτη αυτή, εξετάστηκαν δύο μοντέλα φ/β γεννήτριας: το μοντέλο μιας διόδου και το μοντέλο δύο διόδων. Για το σύστημά μας, επελέγη το δεύτερο μοντέλο, καθώς ανταποκρίνεται καλύτερα στις φυσικές ιδιότητες της φ/β γεννήτριας.

6.1.2 Σύστημα ενέργειας υδρογόνου

Η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, μοντελοποιήθηκε με τη χρήση αναλυτικών εξισώσεων, περιέχοντας ωστόσο και κάποιες εμπειρικές πτυχές (π.χ. η εσωτερική αντίσταση) αλλά μόνο στις περιπτώσεις όπου η θεωρητική ανάλυση ήταν ιδιαίτερα πολύπλοκη ή οι παράμετροι δεν ήταν προσβάσιμες .

6.1.3 Συνολική λειτουργία του συστήματος PVFC

Το κυριότερο συμπέρασμα που εξήχθη από την προσομοίωση του συστήματος είναι ότι το μοντέλο ανταποκρίνεται καλά στην απόδοση ενός πραγματικού συστήματος. Τα

αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η λειτουργική απόδοση του συστήματος δεν εξαρτάται μόνο από την αποδοτικότητα των μερών που το αποτελούν αλλά και από το σχεδιασμό του συστήματος και την συμπεριφορά του στο θέμα της κατανάλωσης. Είδαμε επίσης ότι και ο ελεγκτής δουλεύει πολύ καλά, αφού καλύπτει επακριβώς τις ανάγκες του φορτίου χρησιμοποιώντας τότε την φ/β (κατά την διάρκεια της μέρας) , τότε την κυψέλη καυσίμου (κατά την διάρκεια της νύχτας, ή όταν δεν επαρκεί η ισχύς του φ/β) και τέλος την μπαταρία σαν μέσον αποθήκευσης ισχύος του συστήματος, αλλά σε ακραίες περιπτώσεις και για να εξασφαλίζει την συνεχή ρύθμιση της τάσης.

Ο σχεδιασμός του μεγέθους του συστήματος δεν ήταν ο βέλτιστος, καθώς η προσομοίωση για τη θερινή ημέρα έδειξε ότι ίσως δεν αποθηκεύεται σημαντικό ποσό ενέργειας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Ωστόσο, η φ/β γεννήτρια που επελέγη έχει μέγεθος ένα τετραγωνικό μέτρο, κατά συνέπεια, η προσθήκη ενός ή δύο επιπλέον πλαισίων είναι εύκολη .

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα και επεκτάσεις

- Η προσθήκη μιας ακόμα ανανεώσιμης πηγής ενέργειας στο σύστημα, όπως μια ανεμογεννήτρια. Η αιολική ενέργεια θα μείωνε την απαιτούμενη περιοχή για την φ/β γεννήτρια και τον όγκο της δεξαμενής αποθήκευσης του υδρογόνου. Ο συνδυασμός φ/β γεννήτριας και ανεμογεννήτριας είναι μια πολύ ενδιαφέρουσα πρόκληση για τα συστήματα που βρίσκονται σε τοποθεσίες με ανέμους υψηλών ταχυτήτων.

- Η προσθήκη ενός ή δύο ή και παραπάνω φ/β πλαισίων στο σύστημα, ώστε όλα μαζί συνδεδεμένα να βοηθούν στην μέγιστη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας . Καθώς και η τοποθέτηση μίας μεγαλύτερης μπαταρίας ή ενός υπερ-πυκνωτή για μεγαλύτερη αποθήκευση ενέργειας και σταθερότητας στο σύστημα μας .

- Η χρήση φωτοβολταϊκών μοντέλων πολλαπλών επαφών (multijunction) ή άλλων τεχνολογιών που επιτυγχάνουν αρκετά μεγαλύτερες αποδόσεις, θα αύξαναν την αποδοτικότητα του συστήματος μας. Βέβαια τέτοια μοντέλα δεν έχουν κάνει ακόμα την εμφάνισή τους στην αγορά λόγω υψηλού κόστους.

- Η προσθήκη ενός ανιχνευτή MPP (σημείο λειτουργίας με τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ) στο σύστημα, με στόχο την βελτιστοποίηση της απόδοσης της φ/β γεννήτριας .

- Η δοκιμή διαφορετικών ειδών κυψελών καυσίμου, στη θέση της κυψέλης καυσίμου PEM (μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων). Η κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) αποτελεί μια πολύ ελκυστική εναλλακτική για συνεργασία με μια μηχανή CHP, αφού λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες, παράγοντας χρήσιμη ενέργεια με τη μορφή θερμότητας .

- Πέρα από την αποθήκευση καθαρού υδρογόνου μπορούμε να αξιοποιήσουμε τα επιτεύγματα της νανοτεχνολογίας με τα οποία μπορούμε να κατασκευάσουμε δομές που θα φέρουν υδρογόνο με μεγαλύτερη συγκέντρωση και ταυτόχρονα θα είναι σημαντικά πιο ελαφριές από τις έως τώρα τεχνολογίες όπως τα μεταλλικά υδρίδια .

- Προώθηση συγκεκριμένων ηλεκτρικών συσκευών χαμηλής κατανάλωσης από τους χρήστες, που ηλεκτροδοτούνται απ' το αυτόνομο υβριδικό σύστημα, με σκοπό την μείωση του φορτίου του συστήματος .

- Τεχνική-οικονομική ανάλυση και συγκεκριμένη πρόταση για εγκατάσταση αυτόνομων υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας, σαν το σύστημα που εξετάστηκε στη παρούσα μελέτη. Είναι βασικό ο μηχανικός που αναλαμβάνει τη μελέτη ενός έργου, πριν μεταβεί από τη θεωρία στη πράξη, να εξετάσει την βιωσιμότητα μιας αντίστοιχης επένδυσης .

6.3 Μελλοντικοί στόχοι - Επίλογος

Ένα εμπόδιο για την εγκατάσταση υβριδικών συστημάτων στις μέρες μας, είναι η προσπάθεια που θα πρέπει να καταβληθεί για τον αποτελεσματικό και αποδοτικό συνδυασμό τους. Για παράδειγμα ας αναλογιστούμε τον συνδυασμό ενός συστήματος που περιλαμβάνει τις τεχνολογίες στην παρακάτω λίστα :

- Φωτοβολταϊκό Σύστημα
- Ανεμογεννήτρια
- Γεννήτρια αξιοποίησης υδροηλεκτρικής ενέργειας
- Κυψέλες Καυσίμου
- Μπαταρίες
- Υπερ-πυκνωτές
- Electrolyzer

Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός πως καθένα από αυτά τα συστήματα έχει τελείως διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά με τα υπόλοιπα. Επομένως είναι αναγκαίο να γίνει

ανάπτυξη και μαζική παραγωγή μονάδων διαχείρισης ισχύος που θα δίνουν τη δυνατότητα εύκολης προσαρμογής του κάθε συστήματος σε μεγάλο εύρος ισχύος ώστε να μπορούν να βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλη γκάμα συστημάτων. Ταυτόχρονα αυτά τα συστήματα διαχείρισης ισχύος θα πρέπει να προσφέρουν υψηλή απόδοση για όλο το εύρος ισχύος. Έτσι θα είναι δυνατή η εύκολη διασύνδεση όλων των ανωτέρω τεχνολογιών σε ένα κοινό κανάλι μονοφασικού ή τριφασικού δικτύου χωρίς να γίνονται προσαρμοστικές τροποποιήσεις που θα ωφελούν περισσότερο το ένα ή το άλλο μέσο παραγωγής ή αποθήκευσης ενέργειας.

Η εργασία είχε ως στόχο τον προσανατολισμό προς μορφές παραγωγής ή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας φιλικές προς το περιβάλλον, δεδομένου ότι είναι κοινή εμπειρία όλων των ανθρώπων η σημερινή υποβάθμιση της ποιότητας ζωής από τη χρήση καταστροφικών για το περιβάλλον μέσων παραγωγής ενέργειας όπως η καύση των ορυκτών καυσίμων. Η προστασία του περιβάλλοντος είναι αυξημένης βαρύτητας στη σημερινή εποχή και πολύ πιθανόν στο προσεχές μέλλον να μην έχουμε την πολυτέλεια για περιττούς ρύπους στην ατμόσφαιρα, το νερό ή το έδαφος. Πρέπει να θεσπίσουμε ως πρώτη μας προτεραιότητα την υιοθέτηση διαδικασιών φιλικών προς το περιβάλλον. Η δική μας ευθύνη είναι να κάνουμε τις λεπτομέρειες της κάθε διαδικασίας βιώσιμες και οικονομικές .

Κεφάλαιο 7 - Βιβλιογραφία

- [1] B.K. BOSE, “Global Warming : Energy, Environmental Pollution and the Impact of Power Electronics”, IEEE Industrial Electronics Magazine, pp. 6-17, Mar. 2010.
- [2] <http://www.eia.doe.gov/>
- [3] <http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi327.html>
- [4] Ε. ΒΡΕΤΤΟΣ, “Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών – Υδρογόνου”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2010
- [5] Abou El-Maaty Metwally Metwally Aly Abd El-Aal From Ain Shams University/Egypt, Modeling and Simulation of a Photovoltaic Fuel Cell Hybrid System, 2006
- [6] S. Krauter and R. Araujo: New Power Conditioning Unit Incorporating Charge Controller, Energy Flow Monitor, Data Logger, DC/AC Converter for Stand Alone and Combined PV-Diesel Operation, Proc. 16th EPVSEC, Glasgow, UK, 2000, pp. 2575-2577.
- [7] P. Hollmuller, J. Joubert, B. Lachal, and K. Yvon: Evaluation of a 5 kWp Photovoltaic Hydrogen Production and Storage Installation for a Residential Home in Switzerland, International Journal of Hydrogen Energy 25, 2000, pp. 97-109.
- [8] M. Almonacid and J. Aguilera: Fuzzy Logic Charge Regulator, 2nd World Conference And Exhibition on PV Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, 1998, pp. 32733275.
- [9] G. Hoogers: Fuel Cell Technology handbook, CRC press LLC, 2003.

- [10] Winfried Hoffmann: PV Solar Electricity: One Among the New Millennium Industries, 17th EPVSEC, Paper No. PB 2.1, Munich, Germany, 2001, pp. 851-861.
- [11] Bryan Fry: Simulation of Grid-Tied Building Integrated Photovoltaic Systems, M.Sc., University of Wisconsin, Madison, 1998.
- [12] Oystein Ulleberg: Stand-alone power systems for the future: optimal design, operation & control of Solar-Hydrogen energy systems, Ph.D. dissertation, Norwegian University, Trondheim, 1998.
- [13] Franz Kininger: Photovoltaic Systems Technology, Rationelle Energiewandlung, Universistät Kassel, Deutchland, 2003.
- [14] Rejane Moraes-Duzat: Analytical and Experimental Investigation of Photovoltaic Pumping Systems, Ph.D. dissertation, University Oldenburg, Germany, 2000.
- [15] G. E. Ahmad, M. A. Mohamad, S. A. Kandil, and R. Hanitsch: Fault Detection in PV Generators Using an Improved Electronic Load, 14th EPVSEC, Barcelona, Spain, 1997, pp. 199-202.
- [16] Yeong-Chau Kuo and Tsorng-Juu Liang: Novel Maximum-Power-Point-Tracking Controller for Photovoltaic Energy Conversion System, IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 48, No. 3, 2001, pp. 594-601.
- [17] M. Jantsch, M. Real, H. Häberlin, C. Whitaker, K. Kurokawa, G. Blässer, P. Kremer, and C. W. G. Verhoeve: Measurement of PV Maximum Power Point Tracking Performance, 14th EPVSEC, Barcelona, Spain, 1997, pp. 2188-2193.
- [18] T. Hottinen: Technical Review and Economic Aspects of Hydrogen Storage Technologies, MSc, Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics, Espoo, 2001.

- [19] Dr. Joan M. Ogden: Review of Small Stationary Reformers for Hydrogen Production, a report for International Energy Agency (IEA) agreement on the production and utilization of Hydrogen, Princeton University, 2002.
- [20] R. Bafna, J. Beulow, and et al: *Transition to a Hydrogen-Based Energy Systems: The next Ten Years*, Conferences-Reinforcement Papers, Toronto, Canada, 2002
- [21] Web Site, Quantum Technologies, Inc., Visit 2003. <http://www.qtw.com>
- [22] VLEEM: Final report: Very Long Term Energy Environment Modelling, 2002. <http://www.vleem.org/PDF/annex8-monograph-distribution.pdf>
- [23] C. Möller and R. Lucks: Seminar: Fuel Cells, Technical faculty, University of Kiel, Germany, 2000. <http://www.texnic.de/FC/>
- [24] F. Barbir: *Review of Hydrogen Conversion Technologies*, Clean Energy Research Institute, University of Miami, Coral Gables, FL 33124, U.S.A, Visit 2003. <http://www.iahi.org/H2Convrt.doc>
- [25] M. Noponen: Experimental Studies and Simulations on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Based Energy Storage Systems, MSc, Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics, Espoo, 2000.
- [26] Messenger, Roger & Jerry Ventre, *Photovoltaic systems engineering 2nd Edition*, CRC Press, 2003
- [27] Castanes, Luis & Santiago Silvestre, *Modeling Photovoltaic Systems Using Pspice*, John Wiley & Sons Ltd, 2002
- [28] Walker, Geoff R. , *Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model*, Australian Universities Power Engineering Conference, Brisbane 2000

- [29] Collen Spiegel, *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab* , Elsevier 2008 , www.elsevier.com .

Επίσης μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν διάφορα βιβλιογραφικά στοιχεία και από τις παρακάτω πηγές :

- ❖ <http://el.wikipedia.org/wiki> , ήπιες μορφές ενέργειας
- ❖ <http://wikipedia.org/wiki> , hybrid systems
- ❖ <http://el.wikipedia.org/wiki> , ηλιακή ενέργεια
- ❖ <http://en.wikipedia.org/wiki> , Fuel Cell
- ❖ Σημειώσεις μαθήματος ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Πολυτεχνείο Κρήτης , Καθηγητής Γ. Σταυρακάκης
- ❖ MATLAB SimPowerSystems for Use with Simulink User's Guide , Version 4.1.1 , <http://www.mathworks.com>

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση (θερμοκρασία, μέση ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή των Χανίων) πάρθηκαν από δημοσιευμένα στοιχεία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος .

- ❖ Τεχνική Οδηγία, Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος, Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701 – 3/2010, *ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ - Α' έκδοση*, Αθήνα Ιούλιος 2010

Επίσης τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το ηλεκτρικό φορτίο ενός μέσου νοικοκυριού ημερησίως και εισήχθησαν στο Matlab Simulink, προέρχονται από τα στοιχεία της ΔΕΗ για την μέση κατανάλωση των νοικοκυριών. Καθώς και από πηγές στο διαδίκτυο , ενδεικτικά : <http://www.allaboutenergy.gr/> και <http://www.homerenergy.com/> .

Παράρτημα

Matlab code for estimation of PV current

Matlab code for estimation of formula (3-21) :

```
function Icell = Current(Iph, Ir, Vc, Vt-Ta)

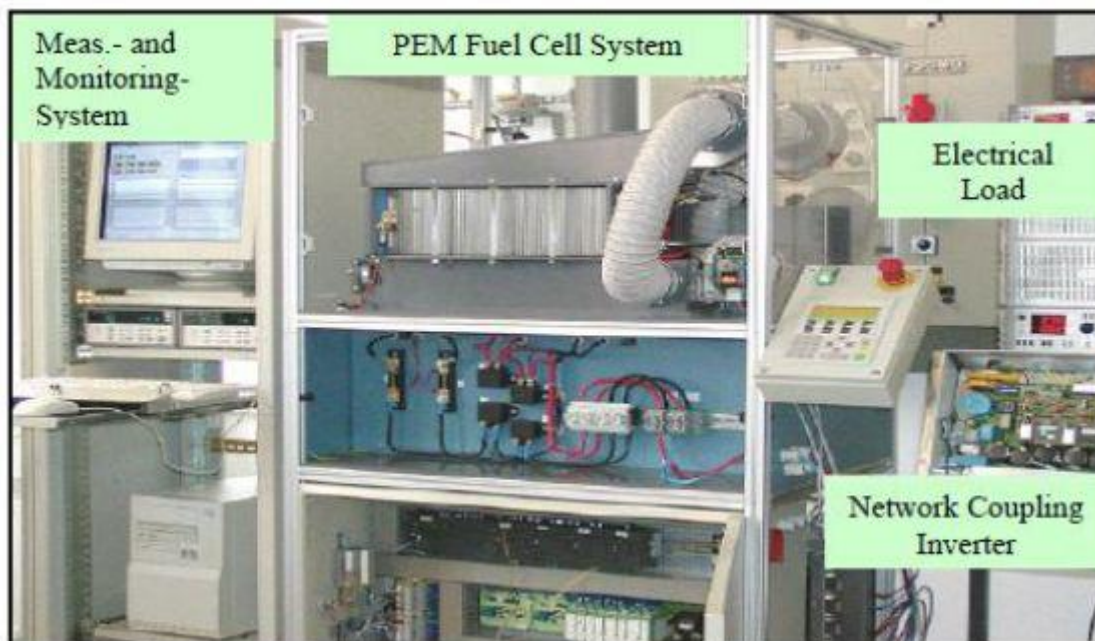
Rs = 5.1*10^(-3); % Rs = 5.1 ;

Ia=zeros(size(Vc)); % Initialize Ia with zeros
% Perform 5 iterations

for j=1:5;
    Ia = Ia - (Iph - Ia - Ir .* ( exp((Vc + Ia .* Rs) ./ Vt-Ta) -1))...
        ./ (-1 - Ir * (Rs ./ Vt-Ta) .* exp((Vc + Ia .* Rs) ./ Vt-Ta)) ;
    j=j+1
end

Icell = Ia;
```

Αυτός είναι ο ενσωματωμένος κώδικας Matlab που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό , με ικανοποιητική ακρίβεια, του ρεύματος της φωτοβολταϊκής μονάδας. Η ακρίβεια είναι εγγυημένη από το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται 5 επαναλήψεις για την εκτίμηση της τιμής του ρεύματος .



2 kW PEM FC system in ISET (KASSEL, Germany)

Αυτή η μονάδα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιήθηκε ως μοντέλο για το υπό μελέτη σύστημα, με την διαφορά ότι μόνο μια στοιβία χρησιμοποιήθηκε και όχι δύο, όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα .