



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

**Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών**

Διπλωματική Εργασία

***Προσομοίωση ενός Αυτόνομου Συστήματος Ενέργειας με χρήση Ανανεώσιμων
Πηγών Ενέργειας και κυψελών Υδρογόνου***

Παπαποστόλου Τάσος

A.M. : 2006030079

Χανιά, Σεπτέμβρης 2014

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται το αν ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που δεν είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο μπορεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες ενός χρήστη. Το σύστημα αυτό αποτελείται από μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια, μια κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, μια μονάδα ηλεκτρολύτη και μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου. Η κυψέλη καυσίμου καταναλώνει υδρογόνο, το οποίο παράγεται στον ηλεκτρολύτη που τροφοδοτείται από την περίσσεια ενέργεια της φωτοβολταϊκής γεννήτριας κατά τη διάρκεια της μέρας και αποθηκεύεται στη δεξαμενή, και χρησιμοποιείται για να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου όταν δεν αρκεί η φωτοβολταϊκή γεννήτρια (πχ τη διάρκεια της νύχτας). Το σύστημα δεν παράγει ρύπους και αποτελεί μία αξιόπιστη και φιλική προς το περιβάλλον λύση. Η μοντελοποίηση και προσομοίωση του γίνεται στο Simulink, όπου και δοκιμάζεται η λειτουργία του για τέσσερις μέρες του έτους χρησιμοποιώντας τις τυπικές τιμές για την θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία καθώς και για κάποιες ειδικές περιπτώσεις.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρακάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την ευκαιρία που μου πρόσφερε να ασχοληθώ με την παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης, τον καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη, των Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, για την καθοδήγηση, τις συμβουλές και την άριστη συνεργασία σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον επίκουρο καθηγητή κ. Ευτύχιο Κουτρούλη που δέχτηκε να είναι μέλος της επιτροπής εξέτασης.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	7
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	7
1.2 Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας	10
1.2.1 Συστήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής σε Κεντρικό Δίκτυο	11
1.2.2 Αυτόνομα Υβριδικά Συστήματα	11
1.3 Τεχνολογίες Υδρογόνου	
1.3.1 Το Υδρογόνο ως Καύσιμο	11
1.3.2 Κυψέλες Καυσίμου	12
1.3.3 Ηλεκτρολύτες	14
1.4 Φωτοβολταϊκά Συστήματα	15
1.5 Αντικείμενο της Εργασίας	17
1.6 Δομή Διπλωματικής Εργασίας	18
 Κεφάλαιο 2 - Μοντελοποίηση Φ/Β Γεννήτριας	19
2.1 Το Φωτοβολταϊκό Στοιχείο	19
2.2 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο	19
2.3 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκών Πλαισίων	22
2.4 Απόδοση Φ/Β Πλαισίου και Απώλειες Ισχύος	
2.4.1 Η Απόδοση του Φ/Β Πλαισίου και Παράγοντες που την Επηρεάζουν	27
2.4.2 Η Ισχύς Αιχμής του Φ/Β Πλαισίου	29
2.4.3 Απώλεια Ισχύος – Φαινόμενο HOT SPOT	30
2.5 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Παραγόμενης Ισχύος της Φωτογεννήτριας (M.P.P.T.)	32
2.6 Μοντελοποίηση στο Simulink της Φ/Β Γεννήτριας και του M.P.P.T.	34
 Κεφάλαιο 3 - Μοντελοποίηση Τεχνολογιών Υδρογόνου	36
3.1 Κυψέλη Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC)	
3.1.1 Αρχή Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου	36

3.1.2 Δομή της κυψέλης	37
3.1.2.1 Μembrάνη Πρωτονίων	38
3.1.2.2 Ηλεκτρόδια	39
3.1.2.3 Στρώμα Διάχυσης Αερίων	40
3.1.2.4 Πλάκα Ροής Αερίων και Διπολική Πλάκα	40
3.1.3 Υποσυστήματα Κυψέλης Καυσίμου	41
3.1.4 Μοντελοποίηση Κυψέλης Καυσίμου (PEMFC)	44
3.2 Ηλεκτρολύτης	
3.2.1 Τύποι Μονάδων Ηλεκτρολύσης	49
3.2.2 PEM Ηλεκτρολύτης	49
3.2.3 Μοντελοποίηση PEM Ηλεκτρολύτη	51
3.3 Δεξαμενή Αποθήκευσης Υδρογόνου	
3.3.1 Μέθοδοι Αποθήκευσης Υδρογόνου	53
3.3.2 Αποθήκευση Πεπιεσμένου Αέριου Υδρογόνου	54
3.3.3 Μοντελοποίηση Δεξαμενής Αποθήκευσης Υδρογόνου	55
Κεφάλαιο 4 - Μοντελοποίηση Επιπλέον Διατάξεων	57
4.1 Μοντελοποίηση Buck Converter	57
4.2 Μοντελοποίηση Boost Converter	60
Κεφάλαιο 5 - Προσομοίωση του Υβριδικού Συστήματος	62
5.1 Λειτουργία του Συστήματος και Δεδομένα για την Προσομοίωση	62
5.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης	
5.2.1 Αποτελέσματα για τις Τυπικές Τιμές	63
5.2.2 Αποτελέσματα για τις Ειδικές Περιπτώσεις	83
Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα – Προτάσεις	90
6.1 Συμπεράσματα	90

6.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Προεκτάσεις	91
Κεφάλαιο 7 - Βιβλιογραφία	92

Κεφ. 1 Εισαγωγή

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, λόγω της μεγάλης τεχνολογικής ανάπτυξης και της πληθυσμιακής αύξησης, η σταδιακή εξάντληση των συμβατικών ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται και τα διάφορα περιβαλλοντικά προβλήματα (ανθρακινές συνθήκες ζωής σε μεγάλα αστικά κέντρα, φαινόμενο του θερμοκηπίου κλπ) έχουν οδηγήσει στην αύξηση του ενδιαφέροντος και των πόρων για την έρευνα και την περαιτέρω αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, οι κυψέλες καυσίμου κλπ [1].

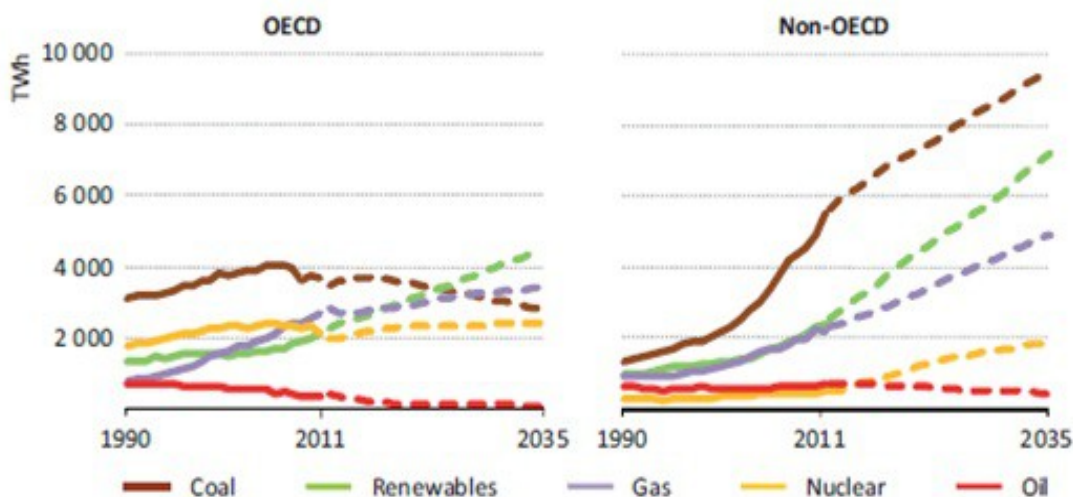
Σε μελλοντικά ενεργειακά συστήματα, θα χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου και η ζήτηση θα μπορεί να ικανοποιείται χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές και κυψέλες καυσίμου σε υβριδική τοπολογία. Επομένως, εναλλακτικά συστήματα μετατροπής ενέργειας όπως οι φωτοβολταϊκές κυψέλες ή οι ανεμογεννήτριες μπορούν να συνδυαστούν και να λειτουργήσουν με κυψέλες καυσίμου σε διάφορα αυτόνομα ή συνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε μικρής κλίμακας εφαρμογές, όπως η άντληση νερού ή εφαρμογές άρδευσης σε απομακρυσμένες περιοχές [2,3].

Η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι πλήρως εξαρτημένη από τις καιρικές συνθήκες. Για παράδειγμα, τη νύχτα ή σε περιόδους με πολύ συννεφιά, η ισχύς που θα παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα θα είναι 0. Επιπλέον, δεν είναι εύκολο να αποθηκευτεί η παραγόμενη από το φωτοβολταϊκό σύστημα ενέργεια για μελλοντική χρήση. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, ένα φ/β σύστημα μπορεί να ενοποιηθεί με άλλες εναλλακτικές πηγές ενέργειας και/ή συστήματα αποθήκευσης, όπως ηλεκτρολύτης, δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου, συστήματα κυψελών καυσίμου [4,5].

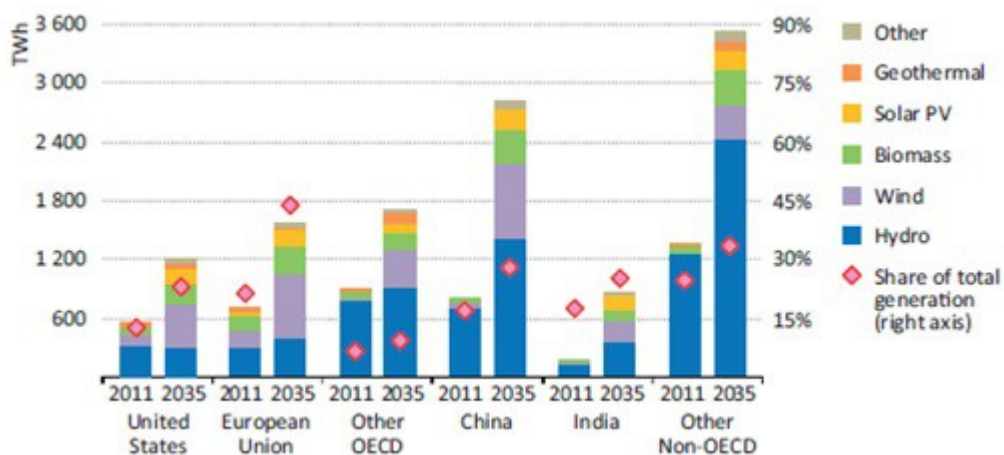
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) πρακτικά θεωρούνται ανεξάντλητες και το περιβάλλον δεν επιβαρύνεται από τη χρήση τους σε αντίθεση με συμβατικές πηγές, όπως π.χ. το πετρέλαιο και ο λιγνίτης. Για αυτό οι ΑΠΕ πρέπει να έχουν σημαντικό μερίδιο στο πολυμορφικό σύστημα παραγωγής που καλύπτει τις σύγχρονες ενεργειακές μας ανάγκες. Οι κυριότερες πηγές αειφόρου ενέργειας είναι η ηλιακή και αιολική ενέργεια, οι κυψέλες καυσίμου, τα μικρά υδροηλεκτρικά, η ενέργεια της βιομάζας, η γεωθερμική ενέργεια και η ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων. 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 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.

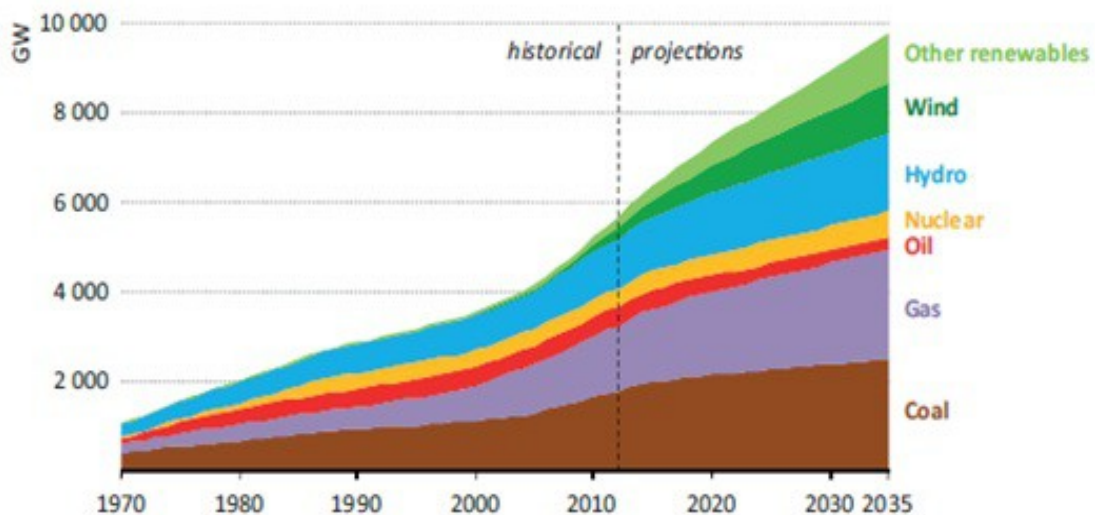
Παρακάτω παρατίθενται κάποια στατιστικά στοιχεία για την υπάρχουσα κατάσταση αλλά και μελλοντικές εκτιμήσεις σχετικά με τη συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή σε παγκόσμιο επίπεδο [6]. Στο σχήμα 1 φαίνεται η υπάρχουσα κατάσταση και μια ενδεχόμενη μελλοντική εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά καύσιμο για τις χώρες εντός ΟΟΣΑ (OECD) και τις υπόλοιπες (Non-OECD). Στο σχήμα 2 φαίνεται η ηλεκτροπαραγωγή των ΑΠΕ ανά τύπο αλλά και το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στη συνολική παραγωγή για την Ε.Ε., την Κίνα και άλλες μεγάλες χώρες. Στο σχήμα 3 φαίνεται η εγκατεστημένη ισχύς ανά καύσιμο.



Σχ. 1: Η εξέλιξη της ηλεκτροπαραγωγής ανά καύσιμο για τις χώρες εντός και εκτός ΟΟΣΑ

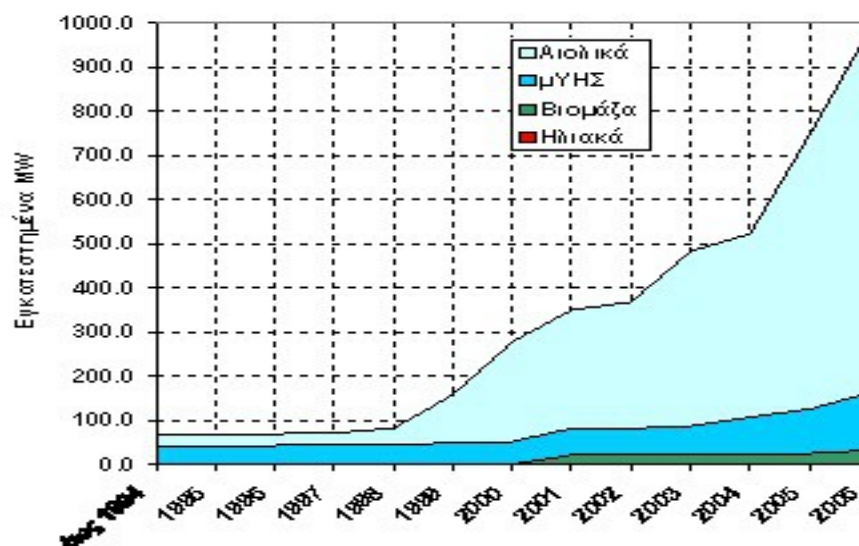


Σχ. 2: Ηλεκτροπαραγωγή ΑΠΕ ανά τύπο και ποσοστό συμμετοχής στη συνολική παραγωγή



Σχ 3: Εγκατεστημένη ισχύς ανά καύσιμο

Για την Ελλάδα η κυριότερη μορφή καυσίμου εξακολουθεί να είναι ο εγχώριος λιγνίτης που καλύπτει το 55,9% του συνόλου των αναγκών παραγωγής. Ακολουθεί το πετρέλαιο που χρησιμοποιείται κυρίως στις νησιωτικές εγκαταστάσεις του μη διασυνδεδεμένου συστήματος με την ηπειρωτική χώρα με 13,5% και το φυσικό αέριο με 12,9%. Οι εγκαταστάσεις ΑΠΕ περιλαμβάνουν τις συνδεδεμένες μονάδες που αποτελούν τα αιολικά πάρκα, τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, οι μονάδες αξιοποίησης βιομάζας και τα φωτοβολταϊκά συστήματα και συμμετέχουν με 3,1%. Στο σχήμα 4 φαίνεται η εξέλιξη των διαφόρων μορφών ΑΠΕ στο ελληνικό σύστημα από το 1984 έως το 2007, όπου είναι αξιοσημείωτη η αύξηση της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας [7].



Σχ. 4: Εγκατεστημένη ισχύς διαφόρων μορφών ΑΠΕ στην Ελλάδα (1984-2007)

Όπως φαίνεται από τα στατιστικά στοιχεία, αλλά και απο το γεγονός ότι η Ελλάδα είναι μια χώρα με αξιοποιήσιμο αιολικό και ηλιακό δυναμικό, η ανάπτυξη των ΑΠΕ τα επόμενα χρόνια αναμένεται αλματώδης, δημιουργώντας νέα δεδομένα στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Η νέα φιλοσοφία προσανατολίζεται στην αξιοποίηση ποικίλων ενεργειακών πηγών και στην ενσωμάτωση αυτών σε ένα ενιαίο υβριδικό σύστημα.

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 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 διαφόρων 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 υβριδικός σταθμός ορίζεται κάθε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που [8]:

- 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%.

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, 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.

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 έργου 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 [8].

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 έργου 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 [8].

1.3 Τεχνολογίες Υδρογόνου

1.3.1 Το Υδρογόνο ως Καύσιμο

Το υδρογόνο θεωρείται από πολλούς ως το ενεργειακό μέσο του μέλλοντος που θα αντικαταστήσει τα συμβατικά υγρά καύσιμα τόσο σε σταθερές εφαρμογές, όσο και στον τομέα των μεταφορών. Το υδρογόνο, μολονότι βρίσκεται σε αφθονία στη φύση, εμφανίζεται μόνο σε μορφή χημικών ενώσεων και μιγμάτων και απαιτούνται υψηλά ποσά ενέργειας για την παραγωγή του. Η πληθώρα των πηγών υδρογόνου, όπως το νερό ή οι υδρογονάνθρακες, σε συνδυασμό με την ποικιλία των μεθόδων εξαγωγής του από τις χημικές ενώσεις και τα μίγματα στα οποία εμφανίζεται, αποτελούν τους κύριους λόγους για τους οποίους θεωρείται το απόλυτο καύσιμο. Το υδρογόνο έχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μορφών ενέργειας όπως το ότι έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο και κάνει καθαρή καύση και δε συμβάλλει στη μόλυνση του περιβάλλοντος. Επίσης, μπορεί να παρασκευαστεί με πάρα πολλές μεθόδους σε οποιαδήποτε χώρα. Από την άλλη, έχει και κάποια μειονεκτήματα όπως προβλήματα αποθήκευσης (λόγω του ότι είναι πολύ ελαφρύ, η συμπίεση σε μικρού μεγέθους δεξαμενή είναι δύσκολη εξαιτίας των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται για να επιτευχθεί η υγροποίηση) και έλλειψη οργανωμένου δικτύου διανομής. Επίσης, ακόμα είναι αυξημένο το κόστος των τεχνολογιών υδρογόνου (κυψέλες καυσίμου, ηλεκτρολύτες κτλ) [9].

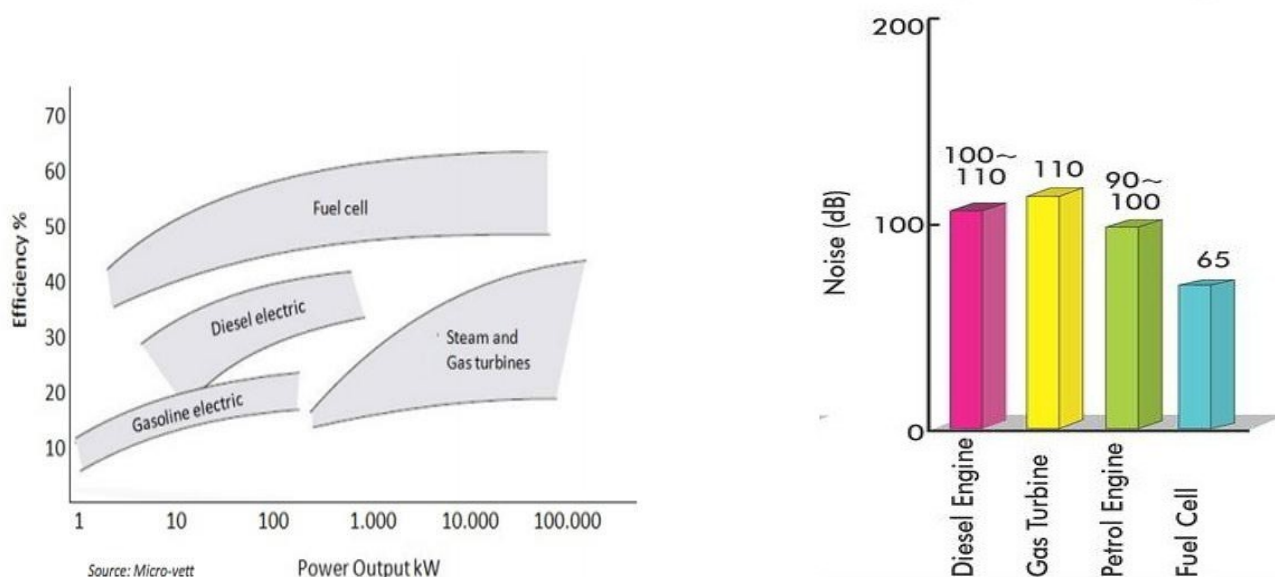
1.3.2 Κυψέλες Καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι συσκευές ηλεκτροχημικής μετατροπής. Ενώνουν ηλεκτροχημικά ένα καύσιμο, που κατά κανόνα είναι υδρογόνο, με ένα οξειδωτικό χωρίς καύση. Η χημική αντίδραση που πραγματοποιείται μέσα στην κυψέλη οδηγεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας και νερού, καθώς προστίθενται το καύσιμο και το οξυγόνο. Η συνεχόμενη εισροή του καυσίμου είναι αναγκαία για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Τα κύρια πλεονεκτήματα τους έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσης είναι τα εξής [10]:

- αποτελούν πιο καθαρή πηγή ενέργειας.
- έχουν μεγαλύτερη απόδοση (σχήμα 5). Οι κυψέλες καυσίμου δε λειτουργούν σε θερμοδυναμικό κύκλο, επομένως δεν έχουν το αντίστοιχο αυστηρό όριο για την απόδοση, αλλά ισχύει για αυτές το όριο απόδοσης της χημικής αντίδρασης, το οποίο όμως είναι υψηλότερο.
- είναι πολύ πιο αθόρυβα, καθώς τα κινούμενα μέρη είναι ελάχιστα (σχήμα 5).
- είναι πιο αξιόπιστα, για τον ίδιο λόγο.
- η συντήρησή τους είναι ευκολότερη.
- λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- ανταποκρίνονται πιο γρήγορα στις μεταβολές φορτίου.
- ευνοούν την κατανεμημένη παραγωγή της ενέργειας.

Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ενέργεια όσο τροφοδοτούνται με υδρογόνο και οξυγόνο σε αντίθεση με τις μπαταρίες που χρειάζονται φόρτιση. Επίσης, οι κυψέλες υδρογόνου είναι πιο αξιόπιστες, χρειάζονται λιγότερο τακτικά συντήρηση, έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και τα συστήματα κυψελών υδρογόνου είναι ελαφρύτερα σε σχέση με τις μπαταρίες.

Από την άλλη, το κόστος των κυψελών καυσίμου είναι ακόμα πολύ μεγάλο και αν συνυπολογιστεί όλος ο εξοπλισμός που χρειάζεται για τη λειτουργία τους, τα συστήματα κυψελών καυσίμου είναι βαρύτερα και πιο ογκώδη από μηχανές εσωτερικής καύσης, που είναι ικανές να παράγουν αντίστοιχη ποσότητα ενέργειας [10].



Σχ. 5: Σύγκριση απόδοσης και θορύβου κυψελών καυσίμου

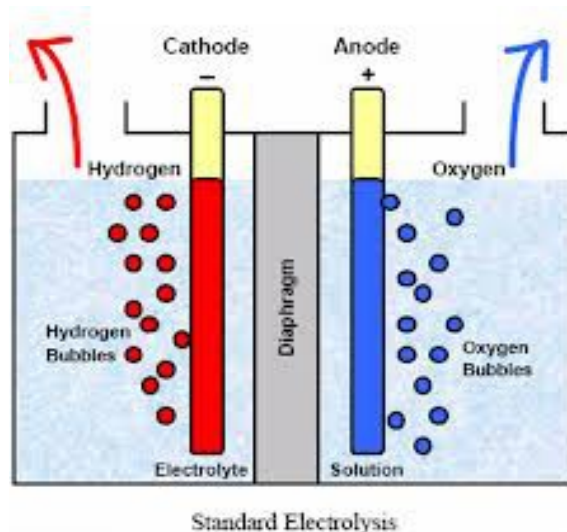
Είδος κυψέλης καυσίμου	Proton Exchange Membrane (PEMFC)	Alkaline (AFC)	Phosphoric Acid (PAFC)	Molten Carbonate (MCFC)	Solid Oxide (SOFC)
Ηλεκτρολύτης	πολυμερής μεμβράνη	30-50% KOH	φωσφορικό οξύ	τήγματα ανθρακικών αλάτων (Li_2CO_3 , K_2CO_3)	αγώγιμο κεραμικό υλικό
Θερμοκρασία	50-80°C	60-90°C	160-220°C	620-660°C	800-1000°C
Κάυσιο	H_2 , CH_4 , CH_3OH	H_2	H_2 , CH_4	CH_4	H_2 , CH_4
Αντίδραση	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
Ανόδου					
Αντίδραση	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$
Καθόδου					
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	αρκετές ώρες	αρκετές ώρες
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 επilogή του καυσίμου	υψηλή θερμοκρασία
Μειονεκτήματα	ακριβός καταλύτης (Pt)	πολύπλοκη απομάκρυνση του CO_2	Pt καταλύτης, μικρή ισχύς, ογκώδες και βαρύ	μικρή βιωσιμότητα	μικρή βιωσιμότητα

Πιν. 1: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου

1.3.3 Ηλεκτρολύτες

Οι ηλεκτρολύτες είναι ηλεκτροχημικές συσκευές, που χρησιμοποιούνται για τη διάσπαση των μορίων του νερού λόγω της διέλευσης ρεύματος. Ο πυρήνας της μονάδας ηλεκτρόλυσης είναι το ηλεκτροχημικό κελί, που στην πιο απλή του μορφή αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια μέσα σε διάλυμα ηλεκτρολύτη συνδεδεμένα με εξωτερικό κύκλωμα. Όταν η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων ξεπεράσει μία ορισμένη τιμή, που ονομάζεται κρίσιμη ή αντιστρέψιμη τάση, αρχίζει η αποσύνθεση του νερού και η παραγωγή υδρογόνου στο αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος) και οξυγόνου στο θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος). Ο ρυθμός παραγωγής των δύο αερίων είναι ευθέως ανάλογος με την τιμή του ρεύματος που διαρρέει το ηλεκτροχημικό κελί.

Γενικά, η μέθοδος της ηλεκτρόλυσης με ενέργεια από ΑΠΕ αποτελεί την καθαρότερη από άποψη εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, όμως το σημαντικότερο εμπόδιο στην ευρεία εξάπλωση της σε εφαρμογές παραγωγής υδρογόνου μεγάλης κλίμακας είναι η υψηλή ειδική κατανάλωση ενέργειας, η οποία σε γενικές γραμμές κυμαίνεται μεταξύ 4,1-6 kWh/Nm³ (χωρίς να συνυπολογιστεί η κατανάλωση των βοηθητικών φορτίων της ηλεκτρόλυσης). Για το λόγο αυτό, το κόστος παραγωγής του υδρογόνου συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες είναι υψηλό. Σημαντικό πλεονέκτημα της ηλεκτρόλυσης είναι η παραγωγή υδρογόνου πολύ υψηλής καθαρότητας, που εν γένει είναι μεγαλύτερη από 99,8%. Δύο είναι οι κυρίαρχες τεχνολογίες μονάδων ηλεκτρόλυσης νερού: οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες και οι ηλεκτρολύτες μεμβράνης εναλλαγής πρωτονίων (PEM) [8].



Σχ. 6: Γενική διαδικασία ηλεκτρόλυσης

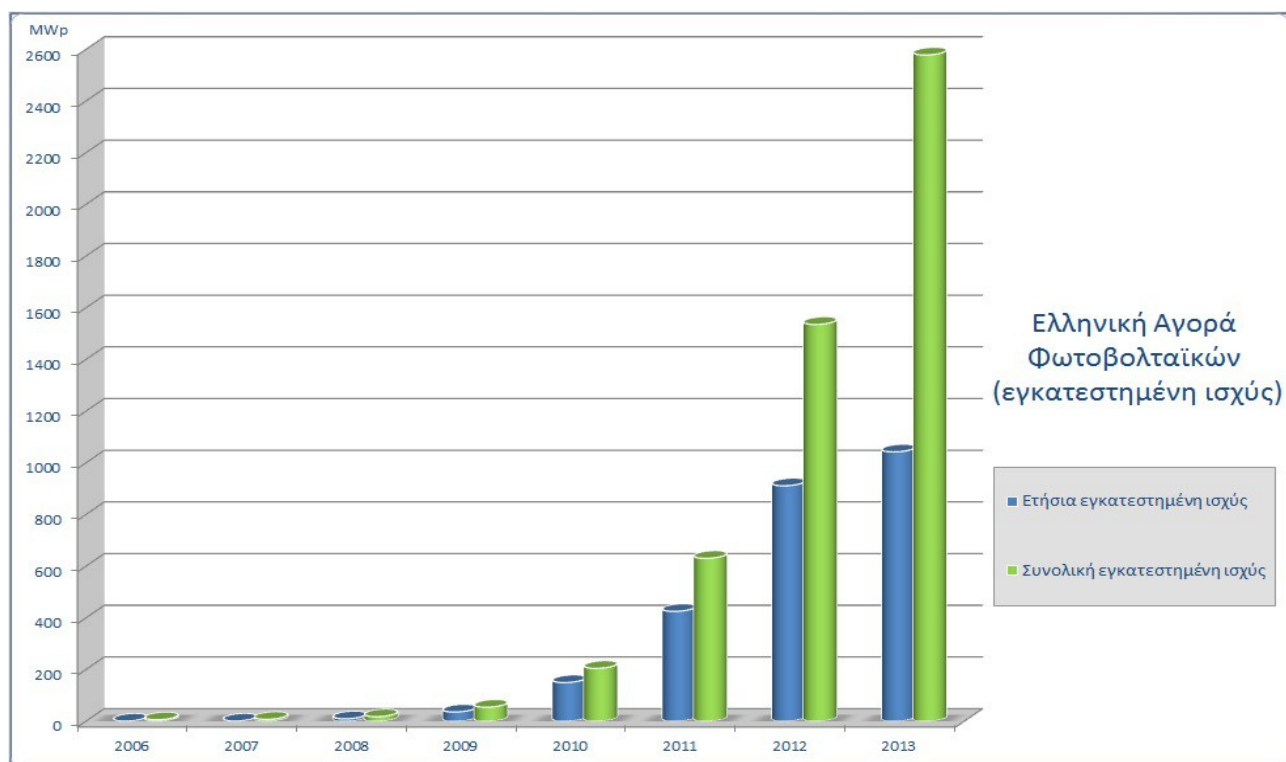
1.4 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια, εκμεταλλευόμενα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, και αποτελούν μια από τις εφαρμογές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας με τεράστιο ενδιαφέρον για την Ελλάδα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, από τα οποία τα κυριότερα είναι:

- Αθόρυβη και καθαρή λειτουργία, χωρίς κινητά μέρη και χωρίς να προκαλούνται ρύποι.
- Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, διατίθεται παντού και δεν στοιχίζει απολύτως τίποτα.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής, σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης και δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης, ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών.
- Αν ένα κομμάτι πάθει βλάβη το σύστημα συνεχίζει τη λειτουργία του μέχρι την αντικατάστασή του.
- Γρήγορη απόκριση σε ξαφνικές μεταβολές της ηλιοφάνειας, αποδοτικά σε χαμηλές θερμοκρασίες και μεγάλες δυνατότητες σε μια ευρεία περιοχή ισχύων (mW μέχρι MW).
- Μπορούν να εγκατασταθούν πάνω σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, όπως είναι π.χ. η στέγη ενός σπιτιού ή η πρόσοψη ενός κτιρίου.
- Διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές: τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν άριστα τόσο ως αυτόνομα συστήματα, όσο και ως αυτόνομα υβριδικά συστήματα όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας (συμβατικές ή ανανεώσιμες) και συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας.

Ένα από τα κυριότερα μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελεί το κόστος τους, το οποίο παραμένει ακόμα σχετικά υψηλό, παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις, αλλά τελευταία γίνονται προσπάθειες να ξεπεραστεί το πρόβλημα (πχ με επιδοτήσεις της αγοράς και της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών). Επίσης, υπάρχει και η ανάγκη αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών λόγω ετεροχρονισμού φορτίου και παραγωγής.

Παρακάτω φαίνεται στο σχήμα 7 η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών στην ελληνική αγορά [11] και στο σχήμα 8 βλέπουμε μια αναμενόμενη μελλοντική εξέλιξη τα επόμενα χρόνια [12].



Σχ. 7: Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών για την Ελλάδα



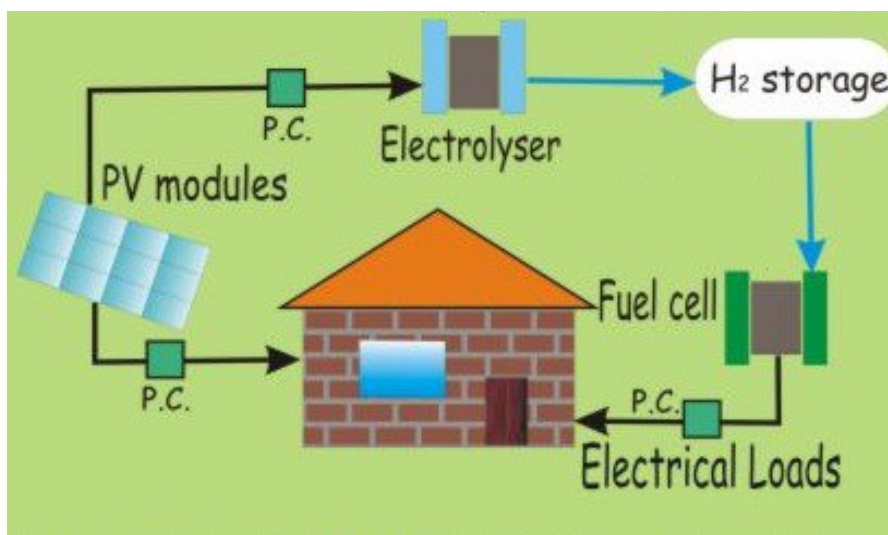
Σχ. 8: Αναμενόμενη εξέλιξη για τα επόμενα χρόνια

1.5 Αντικείμενο της Εργασίας

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που συνδυάζει διάφορες ενεργειακές πηγές και συστήματα αποθήκευσης. Η κύρια ενεργειακή πηγή στο σύστημα είναι μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια, η οποία όμως δεν μπορεί να παράγει την απαιτούμενη ισχύ για να ικανοποιήσει το φορτίο κατά τη διάρκεια της νύχτας ή κάτω από ακατάλληλες καιρικές συνθήκες (πχ έντονη συννεφιά). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται μια κυψέλη καυσίμου για να τροφοδοτήσει την ισχύ του φορτίου που υπερβαίνει την ισχύ της παραγωγής, η οποία ως καύσιμο χρησιμοποιεί καθαρό υδρογόνο. Για την παραγωγή του υδρογόνου υπάρχει ένας ηλεκτρολύτης, ο οποίος τροφοδοτείται όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας και το υδρογόνο αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή αποθήκευσης. Η ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται για μια περίοδο λειτουργίας, αναπληρώνεται από τον ηλεκτρολύτη.

Το σύστημα αυτό βρίσκεται στην Εύβοια, στην περιοχή της Χαλκίδας. Η μέση θερμοκρασία και η σχετικά υψηλή ηλιακή ακτινοβολία της περιοχής την καθιστούν μια καλή επιλογή για την παραγωγή ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών. Επίσης, υπάρχουν πολλές απομακρυσμένες περιοχές στην Εύβοια, για τις οποίες στο μέλλον, με την μείωση του κόστους κυρίως, το συγκεκριμένο σύστημα θα μπορούσε να αποτελεί μια λύση στο πρόβλημα ηλεκτροδότησης τους.

Ο σχεδιασμός και η προσομοίωση του αυτόνομου υβριδικού συστήματος που περιγράφηκε παραπάνω έγινε στο περιβάλλον Matlab / Simulink.



1.6 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στα υβριδικά συστήματα ενέργειας καθώς και στην εξέλιξη τους στην Ελλάδα και τον κόσμο. Επίσης, αναφέρονται τα κύρια μέρη του υπό μελέτη συστήματος και κάποια εισαγωγικά στοιχεία για αυτά.

Στα κεφάλαια 2, 3 και 4 έχουμε τη μαθηματική μοντελοποίηση και την εφαρμογή του Simulink για το κάθε μέρος του αυτόνομου υβριδικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, στο δεύτερο κεφάλαιο μοντελοποιείται η φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των διάφορων τεχνολογιών υδρογόνου που χρησιμοποιούνται: η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, ο ηλεκτρολύτης μεμβράνης εναλλαγής πρωτονίων και η δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η μοντελοποίηση κάποιων επιπλέον διατάξεων απαραίτητων για το σύστημα και την προσομοίωση (πχ buck converter).

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η στρατηγική ελέγχου, προσομοιώνεται το σύστημα και δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο συζητιούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την κάθε μέρα που προσομοιώθηκε η λειτουργία του παραπάνω συστήματος.

Κεφ. 2 Μοντελοποίηση Φ/Β Γεννήτριας

2.1 Το Φωτοβολταϊκό Στοιχείο

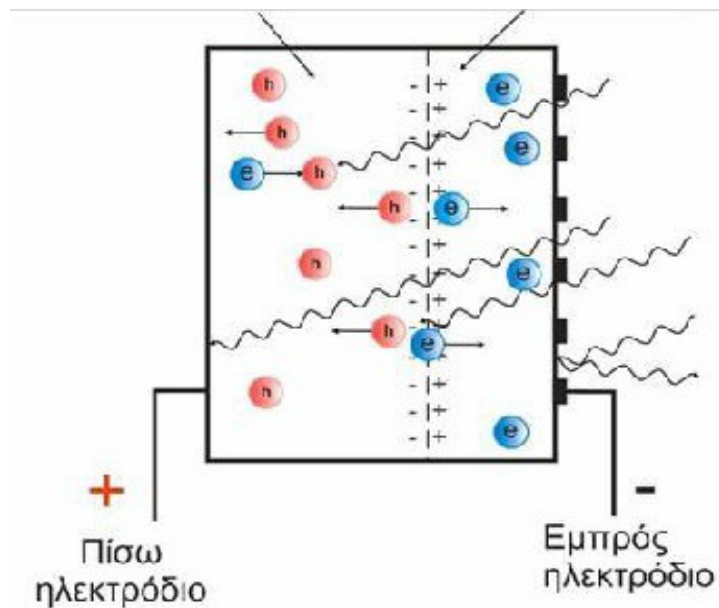
Τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών και η καρδιά κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες. Αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που καθώς δέχονται στην επιφάνεια τους την ηλιακή ακτινοβολία εκδηλώνουν μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την ένταση ακτινοβολίας που δέχονται, ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να δώσει τάση μέχρι 0,5 - 1,0 Volt και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20 - 40 mA ανά cm^2 της επιφανείας του. Το είδος του ημιαγωγού που επιλέγεται ως υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων καθορίζεται με κυριότερο κριτήριο όπως θα δούμε και στη συνέχεια, την τιμή του ενεργειακού διακένου του η οποία καθορίζει και την απόδοση του στοιχείου. Ως συντελεστής απόδοσης ή απλούστερα ως απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του. Οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας είναι περίπου 25% και μπορούν να πραγματοποιηθούν με φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό διάκενο περίπου 1,5 eV.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς που είναι στοιχεία τετρασθενή με τετραεδρική κρυσταλλική δομή όπως το πυρίτιο (Si). Στα στοιχεία αυτά δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και δε διαθέτουν ηλεκτρική αγωγιμότητα στην υποθετική περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή είναι εντελώς υποβαθμισμένος ενεργειακά. Όταν όμως απορροφήσουν κάποια αξιόλογη ενέργεια, π.χ. με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας, πραγματοποιείται μια ριζική μεταβολή.

2.2 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Είναι γνωστό ότι τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου, (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας.

Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου.



Σχ. 9: Ο μηχανισμός της εκδήλωσης του ϕ/β φαινομένου σε ένα ηλιακό στοιχείο

Τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός όψη του, τύπου n στο παράδειγμα του σχήματος, παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές). Ένα μέρος από τους φορείς αυτούς διαχωρίζεται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα εμπρός (τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, e^-) ή προς τα πίσω (οι οπές, h^+), δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου. Οι υπόλοιποι φορείς επανασυνδέονται και εξαφανίζονται. Επίσης ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου χωρίς να απορροφηθεί, μέχρι να συναντήσει το πίσω ηλεκτρόδιο. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p , με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων p και n μιας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικά ημιαγωγό, το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ενός ηλιακού στοιχείου, αλλά και κάθε φωτοβολταϊκής διάταξης, μπορεί να προέρχεται επίσης και από διόδους άλλων π.χ. από διόδους Σότκυ που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο.

Συμπερασματικά, η συνεργασία των δύο προαναφερθέντων παραγόντων, του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου των δύο σε επαφή φωτοαγώγιμων υλικών και του φωτός, παράγει το

φωτοβολταϊκό φαινόμενο:

$$\text{Επαφή υλικών} + \text{φως} = \text{Φωτοβολταϊκό φαινόμενο}$$

Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φ/β στοιχείων είναι:

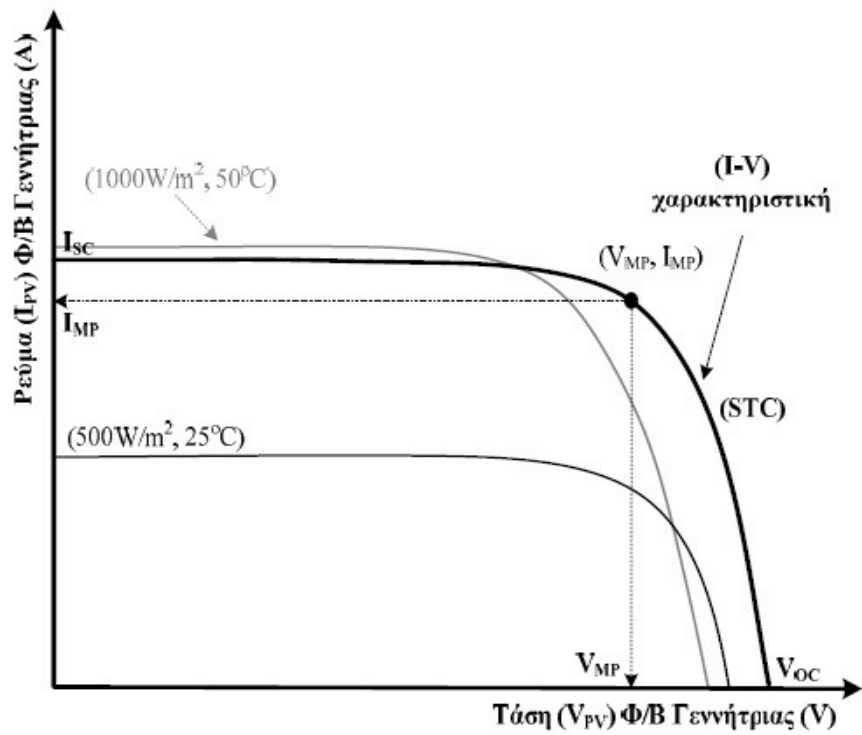
1. Τεχνολογία παραγωγής ημιαγώγιμων υλικών με κρυσταλλική δομή, την πλειοψηφία των οποίων αποτελεί το πυρίτιο.
2. Τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film), η οποία ονομάζεται έτσι επειδή το πάχος των στοιχείων είναι πολύ μικρό (μερικά μόνο μm).
3. Άλλες τεχνολογίες που σκοπό έχουν να γίνει λιγότερο ενεργοβόρα η παραγωγή του καθαρού πυριτίου, περιορίζοντας τις απώλειες σε ακριβό καθαρό πυρίτιο (π.χ. μέθοδος EFG, edge defined film fed growth και μέθοδος String Process).

Οι κρύσταλλοι και η μορφή λεπτού φιλμ διαφέρουν μεταξύ τους όσον αφορά την απόδοση απορρόφησης του φωτός, την απόδοση μετατροπής της μια μορφής ενέργειας στην άλλη, την τεχνολογία κατασκευής και το κόστος κατασκευής.

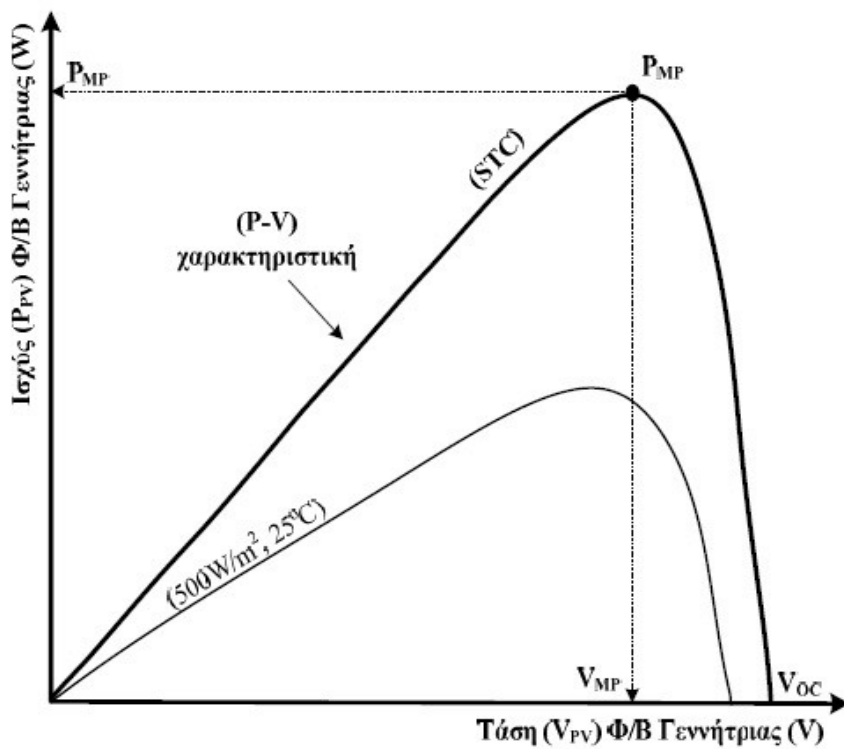
2.3 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Φωτοβολταϊκών Πλαισίων

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από ένα τυπικό Φ/Β κύτταρο είναι αρκετά μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών φορτίων. Για το λόγο αυτό, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους και τοποθετούνται σε ενιαίο πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο, συγκροτώντας έτσι ένα Φ/Β πλαίσιο. Η μέγιστη τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου καθορίζεται από τον αριθμό των εν σειρά συνδεδεμένων ηλιακών στοιχείων, ενώ το μέγιστο ρεύμα εξόδου προσδιορίζεται από τον αριθμό των κυττάρων (ή των εν σειρά συνδεδεμένων ομάδων κυττάρων) που συνδέονται παράλληλα. Συνεπώς η διαφοροποίηση των Φ/Β πλαισίων, πέρα από το υλικό κατασκευής τους, μπορεί να πραγματοποιηθεί επιπλέον με βάση τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα κάθε Φ/Β πλαίσιο συνοδεύεται από ένα πίνακα στον οποίο αναφέρονται οι τιμές της μέγιστης δυνατής αποδιδόμενης ισχύος P_{MP} , της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} , του ρεύματος βραχυκυκλώματος I_{SC} καθώς επίσης και οι τιμές της τάσης V_{MP} και του ρεύματος I_{MP} στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος. Τα μεγέθη αυτά μετρούνται για συγκεκριμένες συνθήκες έντασης ηλιακής ακτινοβολίας (1000W/m^2), θερμοκρασίας (25°C) και αέριας μάζας. Η αέρια μάζα αναφέρεται στο πάχος της ατμόσφαιρας το οποίο διαπερνά το ηλιακό φως και αποτελεί ένα σημαντικό δείκτη των χαρακτηριστικών του διαθέσιμου φωτός, διότι οι ηλιακές κυνέλες αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Οι τιμές των παραπάνω συνθηκών ονομάζονται Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμών (Standard Test Conditions, STC).

Στα σχήματα 10 και 11 παρουσιάζονται οι τυπικές ποιοτικές χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος- τάσης (χαρακτηριστική I-V) και ισχύος-τάσης (χαρακτηριστική P-V) ενός Φ/Β πλαισίου, επί των οποίων σημειώνονται τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά ηλεκτρικά του μεγέθη. Για δεδομένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, η μέγιστη τιμή της τάσης στα άκρα της φωτογεννήτριας συμβολίζεται με V_{OC} και εμφανίζεται στην περίπτωση που τα άκρα της είναι ανοιχτοκυκλωμένα ($I_{PV}=0$), ενώ αντίστοιχα η μέγιστη τιμή της έντασης του ρεύματος που μπορεί να παραχθεί συμβολίζεται με I_{SC} και παρουσιάζεται όταν η έξοδος της φωτογεννήτριας βραχυκυκλωθεί ($V_{PV}=0$). Συνεπώς, στα δύο αυτά σημεία λειτουργίας της φωτογεννήτριας (ζεύγος τιμών τάσης και ρεύματος), η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς μηδενίζεται. Αντίθετα, η μέγιστη τιμή της P_{MP} , επιτυγχάνεται για ένα συγκεκριμένο ζεύγος τιμών τάσης V_{MP} και ρεύματος I_{MP} όπως αποδεικνύεται και από την P-V χαρακτηριστική. Από την προσεκτική μελέτη των σχημάτων διαπιστώνεται ότι οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες παρουσιάζουν μια αρκετά ιδιόμορφη συμπεριφορά συγκριτικά με τις συνήθεις πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή την τιμή της τάσης τους στην περιοχή κανονικής λειτουργίας τους, η τάση των φωτογεννητριών μεταβάλλεται δραστικά και μάλιστα μη γραμμικά συναρτήσει της έντασης του ρεύματος που παρέχουν σε κάποιο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, ακόμα και για σταθερές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Αναλυτικότερα, η ένταση του παραγόμενου ρεύματος εξαρτάται από την τιμή της τάσης που επικρατεί στα άκρα του Φ/Β πλαισίου και μάλιστα με τρόπο που καθορίζεται από την μορφή της καμπύλης ρεύματος- τάσης (χαρακτηριστική I-V).



Σχ. 10: Τυπική ποιοτική χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσης ($I-V$) Φ/Β πλαισίου



Σχ. 11: Τυπική ποιοτική χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος - τάσης ($P-V$) Φ/Β πλαισίου

Μια πιο ενδελεχής μελέτη της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης, αποδεικνύει ότι αριστερά του γονάτου της καμπύλης, η ένταση του ρεύματος που παρέχεται από το Φ/Β πλαίσιο σε ένα εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα μεταβάλλεται ελάχιστα για μεγάλες μεταβολές της τάσης, ενώ αντίθετα δεξιά του γονάτου το ρεύμα μεταβάλλεται σημαντικά για μικρές μεταβολές της τάσης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τάση που εμφανίζεται στα άκρα ενός ηλιακού κυττάρου καθορίζεται από τις ιδιότητες του υλικού κατασκευής του, ενώ το ρεύμα που δύναται να παράσχει σε ένα εξωτερικό κύκλωμα είναι σχεδόν ευθέως ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα για την εξάρτηση της λειτουργικής συμπεριφοράς των φωτογεννητριών από τις τιμές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας:

α) Υπό την προϋπόθεση ότι η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή, η παραγομένη ηλεκτρική ισχύς, όπως και η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} , μεταβάλλονται ευθέως ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ η τιμή της V_{oc} δεν επηρεάζεται αξιοσημείωτα. Συνεπώς, η μορφή των χαρακτηριστικών $I-V$ και $P-V$ δεν εξαρτώνται από τις μεταβολές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας αλλά σημειώνεται παράλληλη μετατόπιση των χαρακτηριστικών ως προς τον κατακόρυφο άξονα.

β) Η αύξηση της θερμοκρασίας υπό την προϋπόθεση ότι η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας διατηρείται σταθερή, επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών γεννητριών. Συγκεκριμένα, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγίμου υλικού και αύξηση του αριθμού των επανασυνδεόμενων φορέων φορτίου. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η αισθητή μείωση της V_{oc} και η ελαφριά αύξηση της τιμής του I_{sc} . Απόρροια αυτών των μεταβολών, είναι αφ' ενός μεν η μείωση της ισχύος εξόδου της Φ/Β γεννήτριας, αφ' ετέρου δε η αλλοίωση της μορφής της χαρακτηριστικής $I-V$ (το γόνατο της καμπύλης αποκτά πιο στρογγυλεμένη μορφή) [13, 14]. Η επίδραση της θερμοκρασίας στις τιμές της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος εξόδου της Φ/Β γεννήτριας, προσδιορίζεται από τρεις συντελεστές. Οι δύο πρώτοι εκφράζουν σε απόλυτα μεγέθη τη μείωση της V_{oc} και την αύξηση του I_{sc} αντίστοιχα για μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας της φωτογεννήτριας ανά βαθμό Κελσίου, ενώ ο τρίτος την επί της εκατό μεταβολή του P_{MP} για ίδια μεταβολή της θερμοκρασίας. Οι συντελεστές αυτοί παρέχονται, συνήθως, από τον κατασκευαστή μαζί με τα υπόλοιπα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Φ/Β πλαισίου.

Το μαθηματικό μοντέλο το οποίο περιγράφει την ηλεκτρική συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού κύτταρου (όπως αυτή αναλύθηκε παραπάνω) δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση [13, 14, 15]:

$$I_{cell} = I_{L, cell} - I_{O, cell} \left[\exp\left(\frac{V_{cell} + I_{cell} R_{S, cell}}{n_{cell} V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + I_{cell} R_{S, cell}}{R_{SH, cell}} \quad (1)$$

όπου:

V_T : η θερμική τάση (V), η οποία δίνεται από τη σχέση $V_T = kT/q$, k η σταθερά Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Joule/Kelvin), T η απόλυτη θερμοκρασία του κυττάρου σε βαθμούς Kelvin και q το φορτίο ηλεκτρονίου ($1.6022 \cdot 10^{-19}$ Coulomb). Για θερμοκρασία δωματίου ($27^\circ C = 300^\circ K$) $V_{T, 27^\circ C} \approx 25,85 mV$

n_{cell} : συντελεστής διόρθωσης, που οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης και μη ιδανικής διάχυσης, τα οποία συμβαίνουν στην περιοχή της P-N επαφής. Λαμβάνει τιμές μεταξύ 1 και 2

I_{cell} : το ρεύμα στην έξοδο του κυττάρου

V_{cell} : η τάση στην έξοδο του κυττάρου

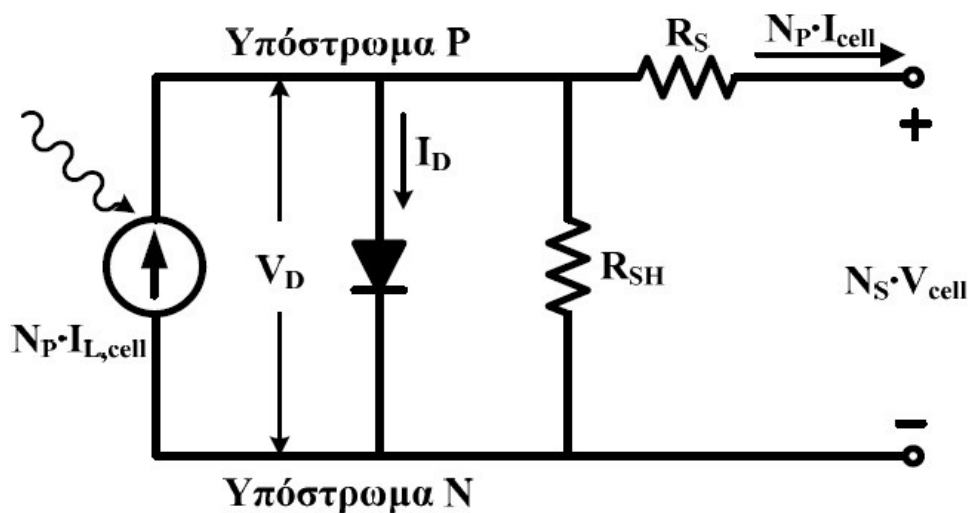
$I_{L,\text{cell}}$: το ρεύμα που παράγεται λόγω του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός επί του κυττάρου (φωτόρεύμα)

$I_{O,\text{cell}}$: ρεύμα κόρου της διόδου με τιμές μεταξύ $10^{-4} \sim 10^{-15} \text{ A}$

$R_{S,\text{cell}}$: Παριστάνει σε συγκεντρωμένη μορφή όλα τα κατανεμημένα στοιχεία αντίστασης κατά την ροή των φορέων στον κυρίως ημιαγωγό, την επιφανειακή ροή στον ημιαγωγό (συνήθως τύπου-N), που βρίσκεται στην πλευρά που προσπίπτει το φως και αποτελείται από πολύ λεπτό στρώμα, την ενδοεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού – ωμικής επαφής και την ωμική επαφή. Η αντίσταση $R_{S,\text{cell}}$ είναι συνήθως μικρότερη από 1Ω

$R_{SH,\text{cell}}$: Παριστάνει τις διαρροές των φορέων που συμβαίνουν είτε στην επαφή P-N (επανασύνδεση), είτε στην εξωτερική παράπλευρη επιφάνεια του κυττάρου (επιφανειακή διαρροή), είτε σε άλλες ανωμαλίες του κρυστάλλου και δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλη την επιφάνεια του κυττάρου ούτε μεταξύ δυο ομοίων κυττάρων. Η αντίσταση $R_{SH,\text{cell}}$ είναι συνήθως της τάξης των $k\Omega$

Η εξίσωση αυτή είναι μη γραμμική, της μορφής $I=f(I,V)$, και υπό μορφή ισοδύναμου κυκλώματος, μπορεί να παρασταθεί από το ηλεκτρικό κύκλωμα που φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 12.



Σχ. 12: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός φ/β πλαισίου

Τέλος, στην περίπτωση ενός Φ/Β πλαισίου (αν θεωρήσουμε ότι απαρτίζεται από N_s ίδια ηλιακά κύτταρα σε σειρά και N_p ίδιες αλυσίδες παράλληλα), η εξίσωση μετασχηματίζεται στην ακόλουθη μορφή:

$$N_p I_{cell} = N_p I_{L, cell} - N_p I_{O, cell} \left(\exp \left[\frac{N_s V_{cell} + N_p I_{cell} \left(\frac{N_s}{N_p} R_{S, cell} \right)}{N_s n_{cell} V_T} \right] - 1 \right) - \frac{N_s V_{cell} + N_p I_{cell} \left(\frac{N_s}{N_p} R_{S, cell} \right)}{\frac{N_s}{N_p} R_{SH, cell}} \quad (2)$$

όπου:

$N_p I_{cell}$ και $N_s V_{cell}$ είναι το ρεύμα και η τάση στην έξοδο του Φ/Β πλαισίου αντίστοιχα,

$N_p I_{L, cell}$ το συνολικό ισοδύναμο φωτόρευμα του Φ/Β πλαισίου,

$N_p I_{O, cell}$ το συνολικό ισοδύναμο ρεύμα κόρου της διόδου,

$(N_s/N_p)R_{S, cell}$ και $(N_s/N_p)R_{SH, cell}$ η ισοδύναμη εν σειρά και παράλληλη αντίσταση του μαθηματικού μοντέλου του Φ/Β πλαισίου αντίστοιχα.

2.4 Απόδοση Φ/Β Πλαισίου και Απώλειες Ισχύος

2.4.1 Η Απόδοση του Φ/Β Πλαισίου και Παράγοντες που την Επηρεάζουν

Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο παρουσιάζει τα δικά του τεχνικά χαρακτηριστικά (απόδοση, τάση, ισχύ) που διαμορφώνονται από τα αντίστοιχα μεγέθη των χωριστών ηλιακών στοιχείων που περιέχει. Ο συντελεστής απόδοσης του φ/β πλαισίου (n_{π}) εκφράζει τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φ/β πλαίσιο (P_{π}), προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του S :

$$n_{\pi} = P_{\pi} / H \cdot S \quad (W)/(w/m^2) \cdot (m^2)$$

Αν E η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια και Π πυκνότητα της ηλιακής ενέργεια που πέφτει στην επιφάνεια του φ/β πλαισίου σε ισοδύναμη μορφή η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$n_{\pi} = E / \Pi \cdot S \quad (KW)/(Kw/m^2) \cdot (m^2)$$

Ισχύει ακόμα η σχέση :

$$n_{\pi} = n \cdot PF$$

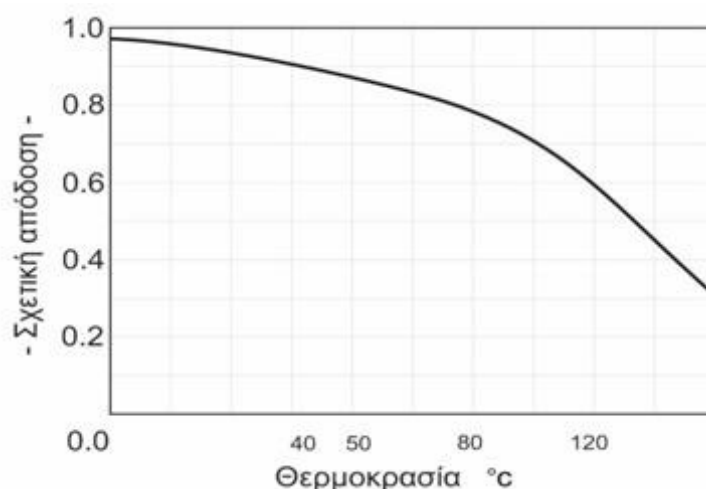
Όπου n : η μέση απόδοση των ηλιακών στοιχείων

PF : ο συντελεστής κάλυψης του πλαισίου

Ο PF ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων δηλ της επιφάνειας όπου γίνεται η απορρόφηση προς τη συνολική επιφάνεια του φ/β πλαισίου. Η τιμή του εξαρτάται από το σχήμα και την πυκνότητα τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων στο φ/β πλαίσιο και κυμαίνεται από 0.78 έως 0.98

Η απόδοση των Φ/Β στοιχείων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Όμως, ο συντελεστής απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία ή για τα Φ/Β πλαίσια αντιστοιχεί σε μία συμβατική θερμοκρασία 20° C, που συχνά, ιδίως στους θερινούς μήνες, διαφέρει αξιόλογα από την πραγματική θερμοκρασία του στοιχείου. Έχει μετρηθεί ότι αφενός και κυρίως λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται, αλλά και λόγω των ηλεκτρικών απωλειών που πραγματοποιούνται πάνω τους, στις αντιστάσεις σειράς, τα ηλιακά στοιχεία αποκτούν κατά την λειτουργία τους θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος κατά 25 ως 30° C, ανάλογα και με την ταχύτητα του ανέμου. Ως μέσο όρο στους υπολογισμούς μας παίρνουμε συνήθως αύξηση της θερμοκρασίας κατά 30 ° C. Για τη διόρθωση του παραπάνω σφάλματος χρησιμοποιείται ένας αδιάστατος συντελεστής σ_{θ} με τον οποίο πολλαπλασιάζουμε τον συντελεστή απόδοσης των ηλιακών στοιχείων. Το ίδιο εφαρμόζουμε και για τα Φ/Β πλαίσια. Δηλαδή, για θερμοκρασίες διαφορετικές από τη συμβατική, ως συντελεστή απόδοσης των Φ/Β πλαισίων παίρνουμε το γινόμενο: $n_{\pi} \cdot \sigma_{\theta}$

Σε συμβατική θερμοκρασία ο σ_{θ} είναι ίσος με την μονάδα και για τα συνηθισμένα ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από αυτή.



Σχ. 13: Τυπική καμπύλη της μεταβολής της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους. Η κλίμακα του άξονα των τεταγμένων δίνει το ποσοστό της απόδοσης του στοιχείου σε σχέση με την απόδοσή του στη συμβατική θερμοκρασία 20° C. Η κλίμακα της θερμοκρασίας στον άξονα των τεταγμένων είναι λογαριθμική. [15]

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να μειώσει την ηλεκτροπαραγωγή των Φ/Β πλαισίων, ιδίως όταν έχουν μικρή κλίση, είναι η ρύπανση της επιφάνειας του από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των Φ/Β πλαισίων χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνει περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας των Φ/Β πλαισίων με απορρυπαντικό. Πάντως, σε περιοχές σε συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση 90° για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού ή τουλάχιστον 45° για να μην συγκρατείται η σκόνη.

Όταν η Φ/Β γεννήτρια βρίσκεται σε μια περιοχή όπου εκτιμάμε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς μας η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα Φ/Β πλαίσια, με τη χρησιμοποίηση ενός αδιάστατου συντελεστή καθαρότητας σ_p ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το ρυπασμένο Φ/Β πλαίσιο προς την ηλεκτρική ισχύ όταν η επιφάνεια του είναι τελείως καθαρή. Η τιμή του σ_p είναι τόσο μικρότερη από τη μονάδα, όσο εντονότερη είναι η ρύπανση του περιβάλλοντος, όσο μικρότερη είναι η κλίση του Φ/Β πλαισίου, όσο σπανιότερες είναι οι βροχές στην περιοχή κτλ. Έτσι, όποτε είναι απαραίτητο, ως συντελεστή απόδοσης των Φ/Β πλαισίων για τους υπολογισμούς μας, παίρνουμε το γινόμενο του ενδεικτικού συντελεστή απόδοσης n_π , που δίνεται για συμβατική θερμοκρασία και καθαρή επιφάνεια, επί τους συντελεστές διόρθωσης για τη θερμοκρασία σ_θ και για τη ρύπανση σ_p . Δηλαδή, η προηγούμενη σχέση παίρνει τη γενικότερη μορφή:

$$E = P \cdot S \cdot n_\pi \cdot \sigma_\theta \cdot \sigma_p$$

2.4.2 Η Ισχύς Αιχμής του Φ/B Πλαισίου

Συχνά, δεν είναι διαθέσιμα όλα τα λεπτομερειακά κατασκευαστικά δεδομένα και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φ/B πλαισίων (διαστάσεις, συντελεστής κάλυψης, συντελεστής απόδοσης των ηλιακών στοιχείων κλπ), αλλά δίνεται μόνο μια ενδεικτική ισχύς αιχμής (P_a), που αντιστοιχεί στην παραγόμενη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν το Φ/B πλαίσιο δεχτεί ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1 ήλιου, δηλαδή 1 kW/m^2 .

Οι μονάδες ισχύος που εκφράζουν την ισχύ αιχμής ενός Φ/B πλαισίου μιας ολόκληρης Φ/B εγκατάστασης ή ενός ηλιακού στοιχείου ονομάζονται συχνά βατ αιχμής (W_p , Watt peak) και κιλοβάτ αιχμής (kW_p).

Από την σχέση που δίνει την απόδοση n_p είναι φανερό ότι:

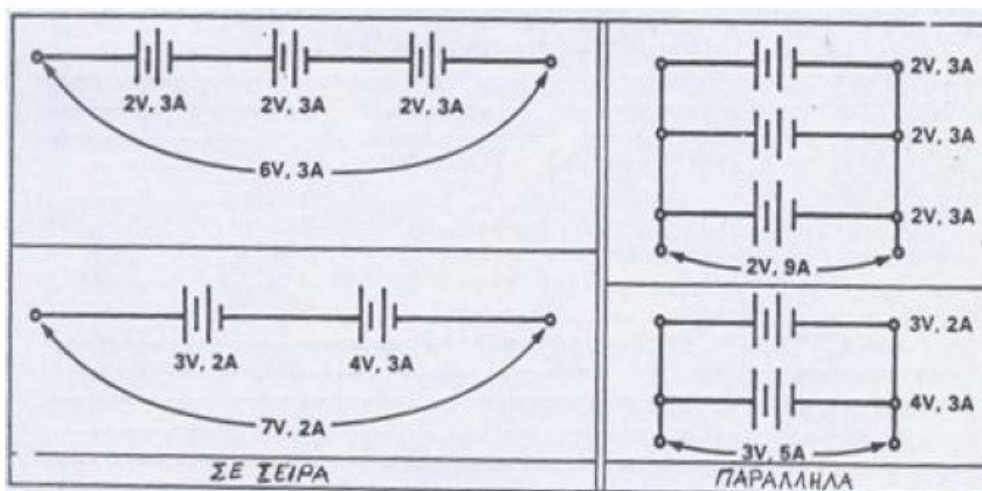
$$P_a (kW_p) = I (kW/m^2) \cdot S (m^2) \cdot n_p$$

Στην περίπτωση λοιπόν, που γνωρίζουμε μόνο την ισχύ αιχμής P για τον υπολογισμό της μέσης ημερήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Φ/B πλαισίου αντί για την παραπάνω σχέση χρησιμοποιούμε την ισοδύναμη σχέση:

$$E (kWh/d) = \Pi (kWh/m^2) \frac{P_a (kW_p)}{1 (kW/m^2)} \sigma_\theta \sigma_\rho$$

2.4.3 Απώλεια Ισχύος – Φαινόμενο HOT SPOT

Οι αιτίες της μη προσαρμογής των χαρακτηριστικών των κυττάρων μιας συστοιχίας είτε ενυπάρχουν και οφείλονται σε κατασκευαστικούς λόγους κατά τη μαζική παραγωγή τους, είτε προκύπτουν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Από τις τελευταίες, πρωτεύουσα θέση κατέχει η μερική ή ολική σκίαση ενός ή περισσότερων κυττάρων και μπορεί να οφείλεται σε σύννεφα, παρακείμενα δένδρα, κτίρια, πουλιά κλπ. Άλλη αιτία είναι η θραύση ενός ή περισσότερων κυττάρων και μπορεί να οφείλεται σε διαφορετική διαστολή μεταξύ του κυττάρου και του υλικού πάνω στο οποίο στηρίζεται, σε χαλάζι, σε ελαττωμένη αντοχή που προέκυψε κατά τη διάρκεια της κατασκευής του ή της ενσωμάτωσής του στο πλαίσιο. Ας σημειωθεί ότι η ολική θραύση ενός κυττάρου σημαίνει από ηλεκτρική άποψη, ανοιχτό κύκλωμα. Τέλος, μια άλλη αιτία μπορεί να είναι ανοιχτοκυκλωμένες ηλεκτρικές συνδέσεις και να οφείλεται σε διαφορετική θερμική διαστολή κλπ. Επίσης, είναι γνωστό ότι οι τάσεις σε σειρά προστίθενται, ενώ παράλληλα είναι ισοδύναμες με την τιμή της μικρότερης τάσης. Επιπλέον, ρεύματα παράλληλα προστίθενται, ενώ σε σειρά είναι ισοδύναμα με την τιμή του μικρότερου σχήματος (σχ. 14). Έτσι, αν δύο κύτταρα με ανόμοια χαρακτηριστικά συνδεθούν σε σειρά η συμπεριφορά τους (που απαιτεί να διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα), περιγράφεται αν αθροίσουμε τις τάσεις των δύο κυττάρων για τις διάφορες τιμές του ρεύματος.

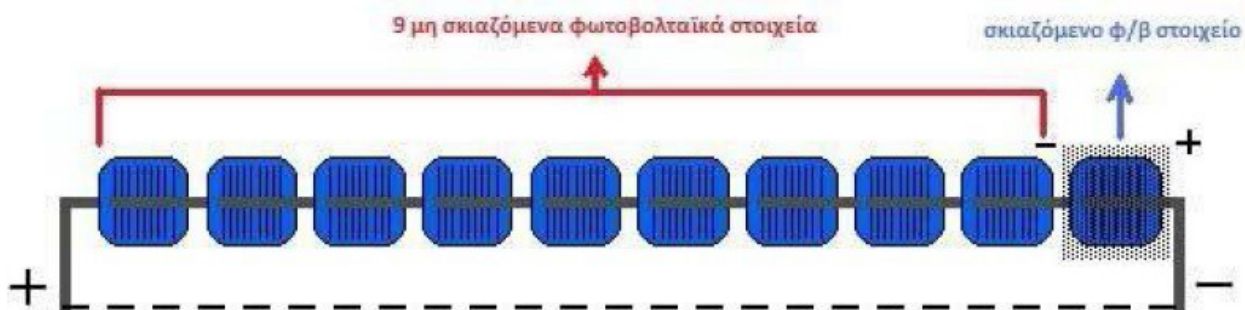


Σχ. 14: Βασικός συνδυασμός πηγών τάσεως και ρεύματος με διαφορετικά χαρακτηριστικά [14]

Ισχυρές αποκλίσεις από την προσαρμογή των χαρακτηριστικών των κυττάρων μιας συστοιχίας είναι δυνατόν να προκαλέσουν απώλεια της ικανότητας παραγωγής ισχύος από τα «καλύτερα», από άποψη χαρακτηριστικών κύτταρα. Με άλλα λόγια, η μη προσαρμογή των χαρακτηριστικών των κυττάρων μιας συστοιχίας συνεπάγεται ότι η συνολική ισχύς εξόδου θα είναι μικρότερη από το άθροισμα των ισχύων των επί μέρους κυττάρων. Η απώλεια αυτή ισχύος καλείται απώλεια προσαρμογής (mismatch loss) και αποτελεί ένα φαινόμενο με μεγάλο ενδιαφέρον, ιδιαίτερα για κύτταρα συνδεδεμένα σε σειρά.

Η μη προσαρμογή των χαρακτηριστικών των κυττάρων μιας συστοιχίας, εκτός από μείωση της ισχύος εξόδου, είναι δυνατόν να προκαλέσει κι ένα άλλο φαινόμενο, ιδιαίτερα σημαντικό, που καλείται φαινόμενο hot-spot. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε ανάστροφη πόλωση ενός ή περισσότερων κυττάρων και συνεπάγεται υπερθέρμανσή τους, που πολλές φορές μπορεί να είναι καταστροφική.

Πιο συγκεκριμένα, το φαινόμενο hot-spot συμβαίνει όταν υπάρχει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, συνδεδεμένο σε σειρά με κάποια άλλα, που δίνει χαμηλό ρεύμα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Δηλαδή, αν μια αλυσίδα από κύτταρα βραχυκυκλωθεί (σχ. 15) τότε η ισχύς που παράγουν τα μη σκιαζόμενα στοιχεία καταναλώνεται δια μέσου του σκιαζόμενου φωτοβολταϊκού στοιχείου. Το σκιαζόμενο στοιχείο μειώνει το ρεύμα δια μέσου των μη σκιαζόμενων στοιχείων, προκαλώντας τα «καλά» στοιχεία να παράγουν υψηλότερη τάση η οποία μπορεί να προκαλέσει ανάστροφη πόλωση του σκιαζόμενου φωτοβολταϊκού στοιχείου. Έτσι, η ενέργεια που χάνεται στο σκιαζόμενο στοιχείο μετατρέπεται σε θερμότητα (υπερβολική τοπική αύξηση της θερμοκρασίας) με πιθανό αποτέλεσμα την θραύση ή ακόμη και την πλήρη καταστροφή του πλαισίου.



Σχ. 15: Φ/Β στοιχεία σε σειρά με ένα σκιαζόμενο

2.5 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Παραγόμενης Ισχύος της Φωτογεννήτριας (M.P.P.T.)

Η ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο από ένα Φ/Β σύστημα, εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας της φωτογεννήτριας. Συνεπώς, η μεγιστοποίηση της ενεργειακής συνεισφοράς των παραπάνω συστημάτων σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, έγκειται στην ικανότητα (εξαναγκασμό) της φωτοβολταϊκής γεννήτριας να λειτουργεί συνεχώς στο έκαστο σημείο μέγιστης παραγόμενης ισχύος (Maximum Power Point, M.P.P.), ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος. Από την άλλη πλευρά, η ανίχνευση του M.P.P. δεν μπορεί να είναι αποτέλεσμα μιας στατικής μεθόδου, καθώς το σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (ζεύγος τιμών τάσης ρεύματος) εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία του πλαισίου. Ένα ακόμα στοιχείο που δυσκολεύει τον ακριβή προσδιορισμό του M.P.P. είναι η μερική σκίαση του Φ/Β πλαισίου. Βάσει των παραπάνω συλλογισμών, τεκμαίρεται πως απαιτείται δραστικός έλεγχος των φωτογεννητριών, ώστε στις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες να επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής ενός Φ/Β συστήματος. Ο έλεγχος αυτός, γνωστός και ως ανίχνευση του σημείου λειτουργίας μέγιστης παραγόμενης ισχύος (M.P.P.T - Maximum Power Point Tracking), είναι ενσωματωμένος στη μονάδα ελέγχου του ηλεκτρονικού μετατροπέα και βασίζεται στην κατάλληλη προσαρμογή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών εισόδου του τελευταίου, με γνώμονα τις εξωτερικές συνθήκες.

Η αποτελεσματικότητα ενός M.P.P.T. προσδιορίζεται από το λόγο της ενέργειας που αντλήθηκε από το Φ/Β πλαίσιο σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο, προς την μέγιστη θεωρητική ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί στο ίδιο χρονικό διάστημα με την εφαρμογή ενός ιδεατού ελεγκτή. Πρακτικά, η επιλογή ενός M.P.P.T. δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στην αποτελεσματικότητα του, αλλά πρέπει να γίνεται ένας συγκερασμός μεταξύ αυτής, της ταχύτητας εύρεσης του M.P.P. της ικανότητας απόκρισης του σε γρήγορες μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών, του κόστους υλοποίησης και της ευκολίας προσαρμογής στις ιδιαιτερότητες της εκάστοτε εφαρμογής (μέγεθος Φ/Β γεννήτριας, τοπολογία μετατροπέα κ.λ.π.). Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως το κόστος ενός M.P.P.T. καθορίζεται από τον αριθμό και το είδος των απαιτούμενων μετρητικών διατάξεων, καθώς επίσης και από την ενδεχόμενη ανάγκη χρησιμοποίησης προηγμένου μικροελεγκτή για την επεξεργασία των μετρούμενων μεγεθών. Ανάλογα με τη βαρύτητα που δίνεται στα παραπάνω κριτήρια, έχουν παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία αρκετές μέθοδοι ανίχνευσης του σημείου λειτουργίας μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος [16-19]. Οι απλούστερες από αυτές βασίζονται στη γνώση των λόγων της τάσης στο M.P.P. προς την τάση ανοιχτού κυκλώματος και του ρεύματος στο σημείο αυτό προς το ρεύμα βραχυκύκλωσης, ενώ οι πιο προηγμένες βασίζονται στην χρησιμοποίηση τεχνικών ασαφούς ελέγχου (Fuzzy Logic Control) ή τεχνικών νευρωνικών δικτύων (Neural Network). Οι πρώτες αν και είναι ιδιαίτερα απλές και οικονομικές, δεν μπορούν να οδηγήσουν στο ακριβή προσδιορισμό του σημείου M.P.P. ενώ επιπρόσθετα αποτυγχάνουν στην εύρεση αυτού, σε περιπτώσεις μερικής σκίασης του Φ/Β πλαισίου. Αντίθετα, οι τεχνικές ασαφούς ελέγχου όπως και αυτές που στηρίζονται στη θεωρία των νευρωνικών δικτύων, επιτρέπουν τον γρήγορο και ακριβή προσδιορισμό του σημείου M.P.P. για οποιοσδήποτε περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά από την άλλη απαιτούν τη χρήση προηγμένων μικροελεγκτών και την ανάπτυξη πολύπλοκων μαθηματικών μοντέλων, τα οποία μεταξύ των παραμέτρων που λαμβάνουν υπόψη τους θα πρέπει να συνυπολογίζουν και τη γήρανση του Φ/Β πλαισίου.

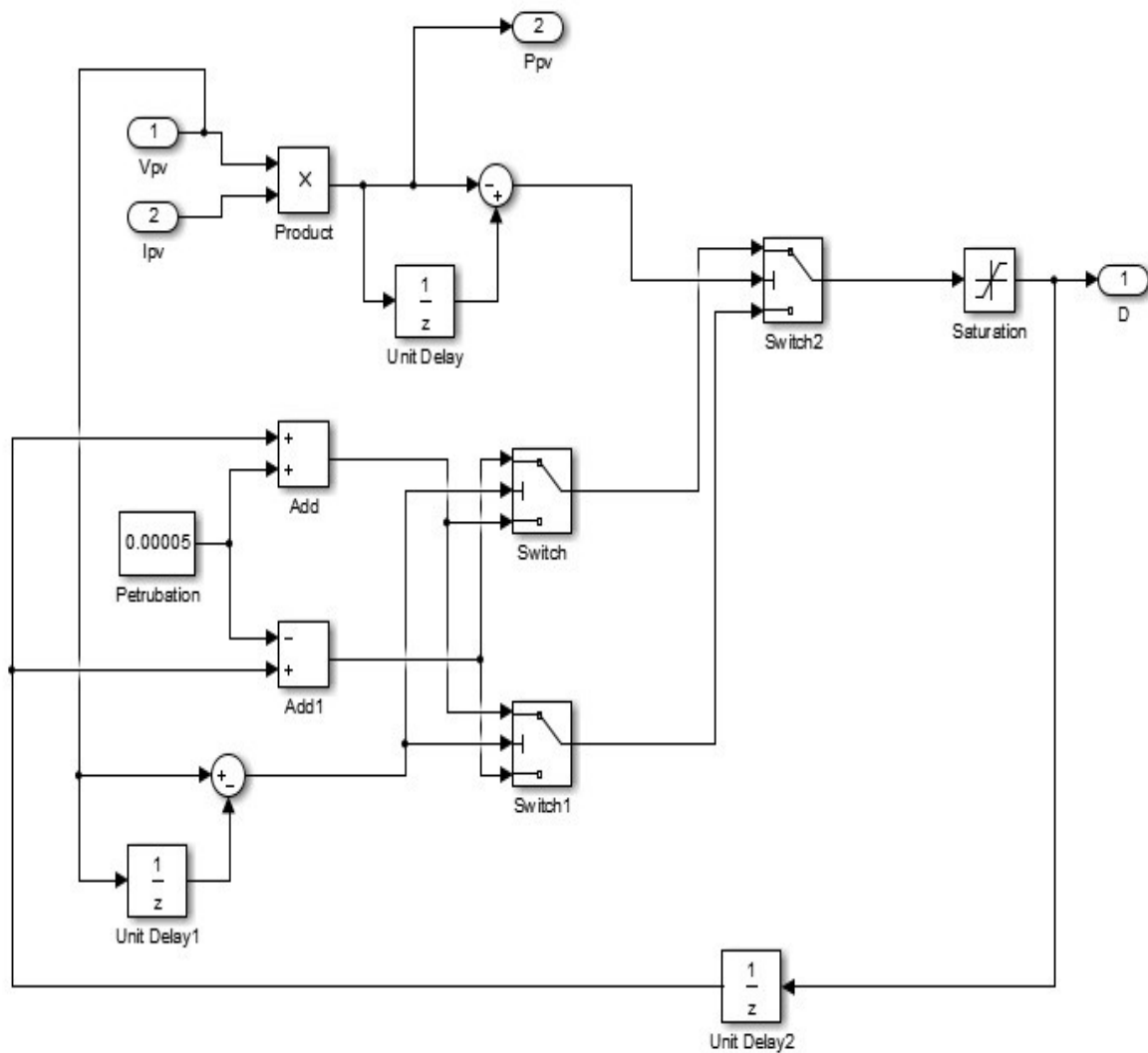
Στην πλειονότητα όμως των εφαρμογών, χρησιμοποιούνται μέθοδοι οι οποίες εντοπίζουν το σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος, μέσω μικρών ηθελημένων διαταραχών των ηλεκτρικών μεγεθών εισόδου του μετατροπέα (συνήθως στην τάση). Σε αυτές τις περιπτώσεις προκαλείται μια μικρή αύξηση ή μείωση της τάσης ΔV (ή του ρεύματος ΔI) εισόδου του μετατροπέα και παρατηρείται η επίδρασή της στην τιμή της ισχύος εξόδου του Φ/Β. Η διαδικασία αυτή,

επαναλαμβανόμενη με μικρά βήματα οδηγεί τελικά στην ανίχνευση του M.P.P. (perturbation and observation method) [16]. Βέβαια σε αυτές τις περιπτώσεις, το σημείο λειτουργίας της φωτογεννήτριας ταλαντώνεται γύρω από το σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος, ενώ το μέγεθος της προκαλούμενης διαταραχής (ΔV ή ΔI) καθορίζει την ταχύτητα σύγκλισης και το εύρος της ταλάντωσης γύρω από το M.P.P. Επίσης, σε συνθήκες μειωμένης ηλιοφάνειας ή απότομων περιβαλλοντικών αλλαγών, οι εν λόγω τεχνικές μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένη διάγνωση του M.P.P. Στην περίπτωση εύρεσης του σημείου μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος, μέσω της παρατήρησης των εναλλασσόμενων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών εξόδου του μετατροπέα, εφαρμόζεται παρόμοια μεθοδολογία με αυτή που αναλύθηκε προηγουμένως. Σε αυτήν όμως την περίπτωση το ηλεκτρικό μέγεθος στο οποίο προκαλούνται οι ηθελημένες διαταραχές είναι το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα.

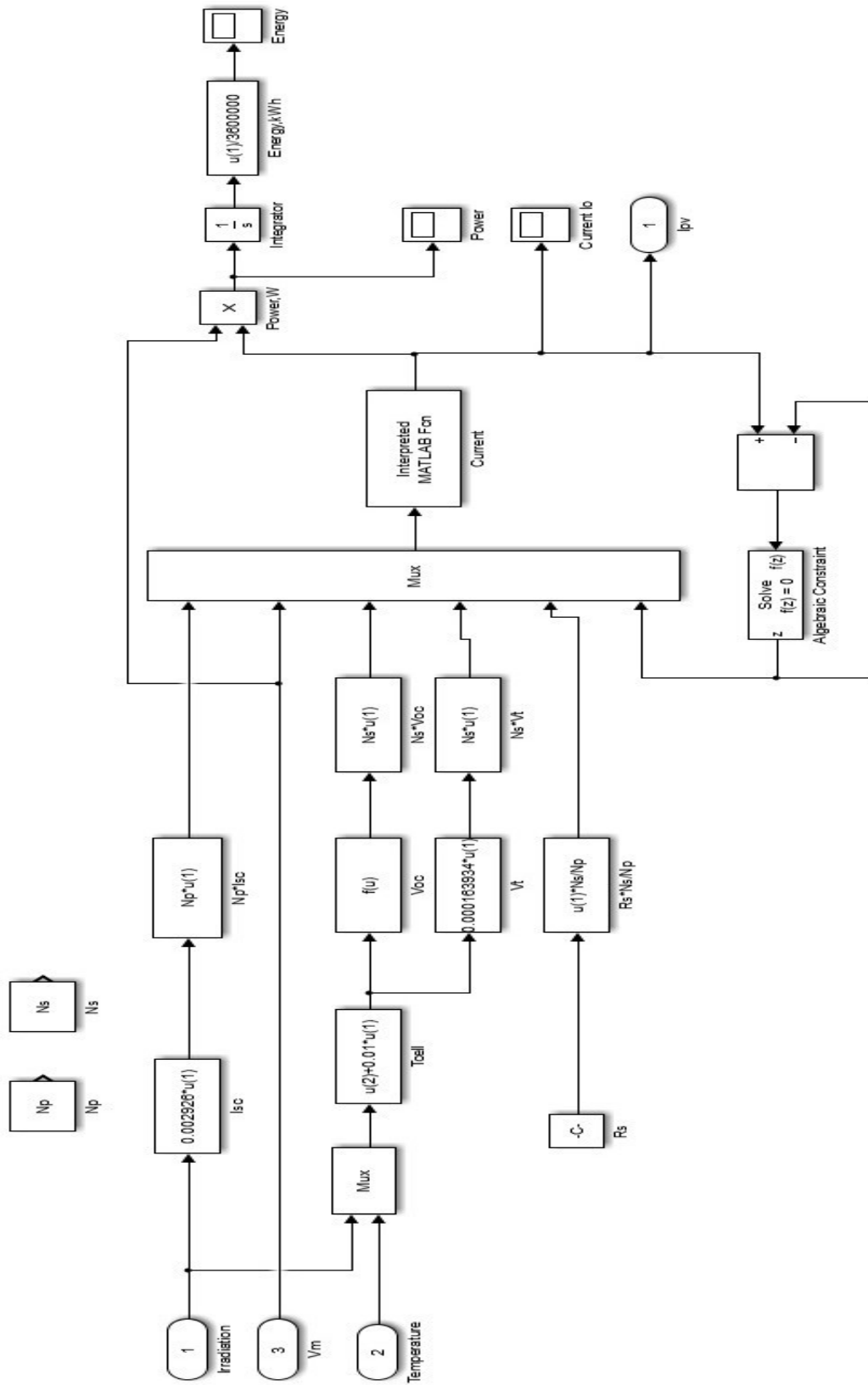
Σημειώνεται επίσης ότι ένας παράγοντας που δυσχεραίνει την εφαρμογή των τεχνικών ανίχνευσης του M.P.P, είναι η διακοπτική λειτουργία των ηλεκτρονικών μετατροπέων και η έντονη χαμηλόσυχνη κυμάτωση του ρεύματος εισόδου αυτού, η οποία είναι αποτέλεσμα της παραγωγής μονοφασικής εναλλασσόμενης τάσης από τη συνεχή τάση που παρέχουν οι φωτογεννήτριες. Για να καταστεί λοιπόν δυνατή η αποδοτική συνεργασία μεταξύ του ηλεκτρονικού μετατροπέα και της Φ/Β γεννήτριας απαιτείται είτε η χρήση ηλεκτρολυτικών πυκνωτών μεγάλης χωρητικότητας, είτε η χρησιμοποίηση μετατροπέων πολύπλοκης τοπολογίας ή η εφαρμογή ενεργών φίλτρων.

2.6 Μοντελοποίηση στο Simulink της Φ/Β Γεννήτριας και του Μ.Ρ.Ρ.Τ.

Στα επόμενα δύο σχήματα φαίνονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στο Simulink για την προσομοίωση της Φ/Β γεννήτριας και του ΜΡΡΤ.



Σχ. 16: Μοντέλο Simulink Μ.Ρ.Ρ.Τ. [30-33]



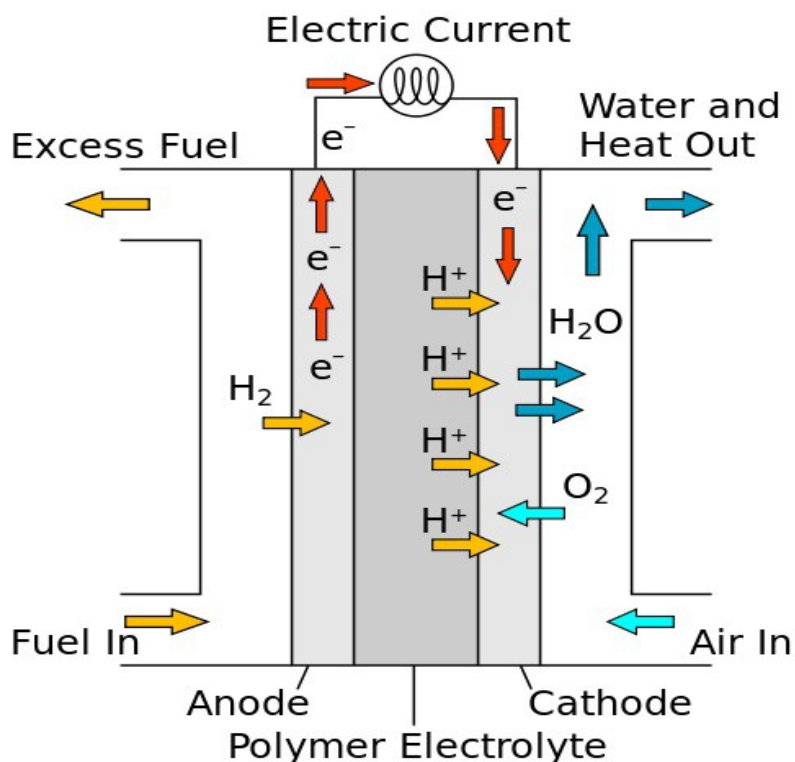
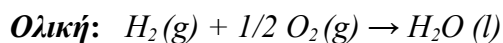
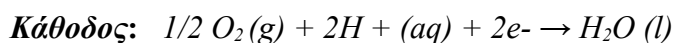
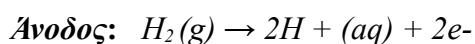
Σχ. 17: Μοντέλο Simulink φ/β γεννήτριας [30-33]

Κεφ. 3 Μοντελοποίηση Τεχνολογιών Υδρογόνου

3.1 Κυψέλη Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC)

3.1.1 Αρχή Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου

Σε κάθε τύπο κυψέλης καυσίμου πραγματοποιείται μια οξειδοαναγωγή στα ηλεκτρόδιά της. Στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (*PEM*) (σχ. 18) οξειδώνεται το υδρογόνο H_2 , ενώ στην κάθοδο έχουμε αναγωγή του οξυγόνου O_2 . Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μια τέτοια κυψέλη είναι οι εξής:

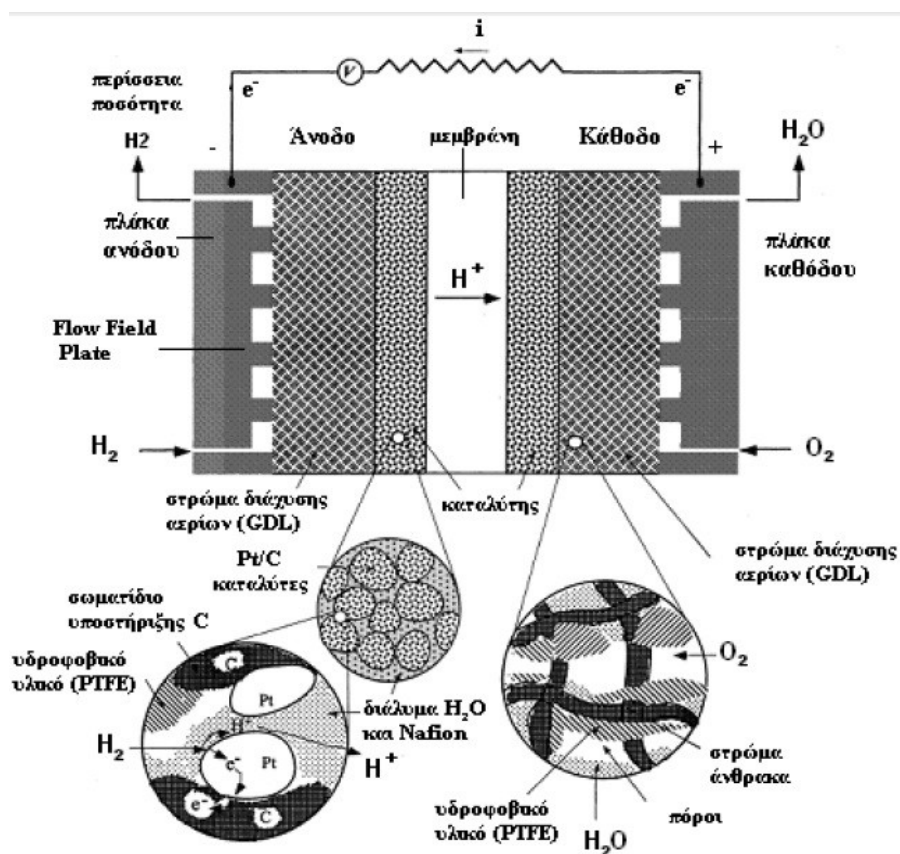


Σχ. 18: Κυψέλη Καυσίμου PEM

Στην άνοδο το εισερχόμενο υδρογόνο υπό την επίδραση ενός καταλύτη (λευκόχρυσος Pt) οξειδώνεται και διασπάται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Το μεταφερόμενο ιόν, που στην περίπτωση της κυψέλης καυσίμου PEM είναι το κατιόν H^+ , μεταφέρεται από την άνοδο στην κάθοδο, διασχίζοντας τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι αγωγίμος μόνο για πρωτόνια. Τα ηλεκτρόνια, που προκύπτουν από την οξείδωση, διασχίζουν εξωτερικό κύκλωμα, παράγοντας ηλεκτρικό έργο και καταλήγουν στην κάθοδο. Στην κάθοδο αντιδρούν με το εισερχόμενο οξυγόνο (αναγωγή) και με τα πρωτόνια που καταφθάνουν από την άνοδο, διασχίζοντας τον ηλεκτρολύτη. Η χημική αντίδραση που πραγματοποιείται στην κάθοδο έχει ως προϊόν το νερό, το οποίο στην συνέχεια εξάγεται από την κυψέλη ή επαναχρησιμοποιείται στην ενυδάτωση των αερίων αντιδρώντων [10].

3.1.2 Δομή της κυψέλης

Η αποδοτικότητα της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων είναι συνάρτηση των δομικών στοιχείων που την απαρτίζουν. Ένας παράγοντας που κατέχει σημαντική θέση στην εύρυθμη λειτουργία της είναι η διαχείριση του νερού. Η κυψέλη πρέπει να ανατροφοδοτείται με τα αέρια αντιδρώντα και να συλλέγεται το προϊόν της αντίδρασης τους, που είναι το νερό. Η διαχείριση του νερού μέσα στην κυψέλη είναι μία κύρια δραστηριότητα που πρέπει να προβλεφθεί διότι συσχετίζεται άμεσα με την αγωγιμότητα της μεμβράνης και με την αντίδραση της αναγωγής στην κάθοδο της κυψέλης. Στο σχήμα 19 παρακάτω βλέπουμε την εσωτερική δομή της κυψέλης.



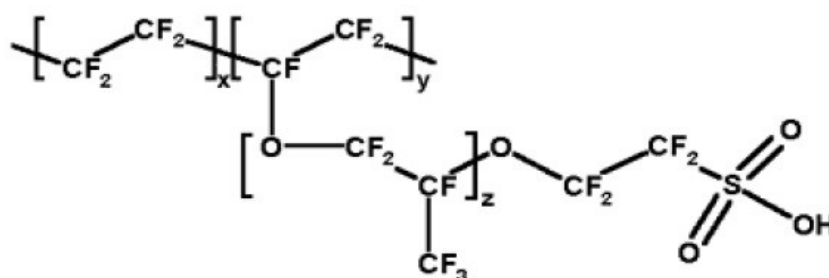
Σχ. 19: Εσωτερική δομή κυψέλης καυσίμου PEM

Τα κύρια δομικά της στοιχεία είναι τα εξής:

- Μεμβράνη Πρωτονίων (Proton Exchange Membrane).
- Ηλεκτρόδια Ανόδου και Καθόδου.
- Στρώμα Διάχυσης Αερίων (Gas Diffusion Layer).
- Πλάκα Ροής Αερίων (Flow Field Plate) & Διπολική Πλάκα.
- Συστοιχία Κυψελών Καυσίμου.

3.1.2.1 Μεμβράνη Πρωτονίων

Η μεμβράνη της κυψέλης αποτελείται συνήθως από έναν 25-200μm λεπτό ηλεκτρολύτη που είναι αγωγίμος για τα πρωτόνια. Η μεμβράνη αυτή πρέπει να είναι επίσης αεροστεγής, να είναι μονωτής για τα ηλεκτρόνια και να έχει μεγάλη μηχανική και θερμική αντοχή σε περίπτωση μεταβολής της πίεσης. Οι ηλεκτρολύτες των κυψελών καυσίμου PEMFC αποτελούνται από μία πολυμερή μεμβράνη σε στερεά μορφή. Το πιο συνηθισμένο πολυμερές που χρησιμοποιείται σήμερα είναι το Nafion.

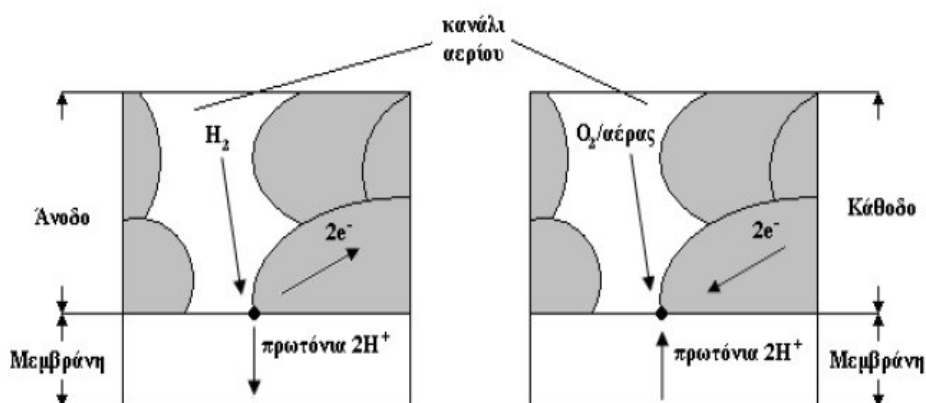


Σχ. 20: Δομή του πολυμερούς Nafion

Από το παραπάνω σχήμα μπορούμε να διακρίνουμε τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή είναι ο κορμός των φθοροανθράκων $(-CF_2-CF-CF_2-)$, η οποία επαναλαμβάνεται εκατοντάδες φορές μέσα στη μεμβράνη. Η δεύτερη περιοχή αποτελείται από την πλευρική αλυσίδα $(O-CF_2-CF(CF_3)-O-CF_2-CF_2-$ και συνδέει τον κορμό με την τρίτη περιοχή που αποτελείται από ιόντα θειικού οξέος SO_3^- . Συνεπώς, καθώς διασπάται το μόριο του υδρογόνου στην άνοδο, τα μονατομικά κατιόντα υδρογόνου H^+ εισέρχονται στη μεμβράνη και μεταπηδούν από ένα μόριο SO_3 στο επόμενο [20]. Για να επιτευχθεί αυτό, η μεμβράνη πρέπει να είναι ενυδατωμένη για να είναι αγωγίμη για τα H^+ . Για το λόγο αυτό η θερμοκρασία λειτουργίας πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Όλη αυτή η λειτουργία επιδεικνύει πόσο απαραίτητη και σημαντική είναι η διαχείριση του νερού μέσα στην κυψέλη καυσίμου. Στην πράξη η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί κάτω από τους $100^\circ C$, ενώ σε περιπτώσεις που λειτουργούν κυψέλες καυσίμου πάνω από τους $100^\circ C$, πρέπει να επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης ώστε το νερό να διατηρείται σε υγρή μορφή.

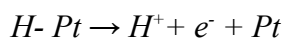
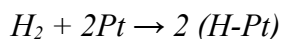
3.1.2.2 Ηλεκτρόδια

Τα ηλεκτρόδια μαζί με τη μεμβράνη αποτελούν την MEA (Membrane Electrode Assembly). Περιέχουν σωματίδια λευκόχρυσου (Pt) ως καταλύτη και παρουσιάζουν καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, μεγάλη επιφάνεια σύνδεσης με τον ηλεκτρολύτη και καλές ιδιότητες μεταφοράς αερίων και ιόντων. Η πορώδης μορφή των ηλεκτροδίων επιτρέπει την εύκολη πρόσβαση των αερίων αντιδρώντων στην επιφάνεια αντίδρασης, όπου πραγματοποιείται η οξείδωση και η αναγωγή (σχ. 21).



Σχ. 21: Σημεία χημικών αντιδράσεων

Ο καταλύτης, ο λευκόχρυσος, προσφέρει υψηλούς ρυθμούς αναγωγής του οξυγόνου, το οποίο είναι απαραίτητο, διότι η αντίδραση της καθόδου είναι περίπου εκατό φορές αργότερη από την αντίδραση της οξείδωσης του υδρογόνου. Στην πραγματικότητα η αντίδραση που πραγματοποιείται στην κυψέλη καυσίμου είναι πιο πολύπλοκη. Στην άνοδο, το υδρογόνο αντιδρά με το λευκόχρυσο και στη συνέχεια διασπάται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια σύμφωνα με την αντίδραση:



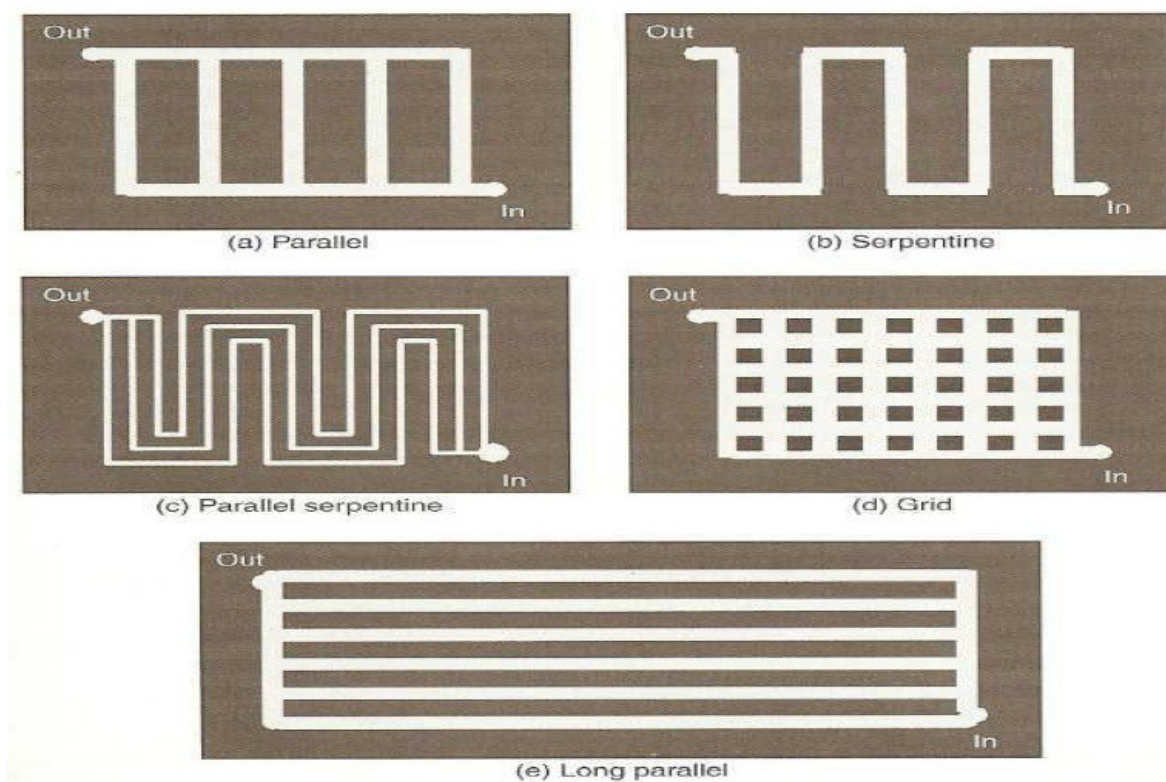
Πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι λόγω του υψηλού κόστους του λευκόχρυσου, τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται από πορώδη άνθρακα (σχ. 19), στον οποίο γίνεται ομοιόμορφη διασπορά μορίων λευκόχρυσου, τα οποία προσκολλώνται στα άτομα του άνθρακα. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται το κόστος παραγωγής των ηλεκτροδίων.

3.1.2.3 Στρώμα Διάχυσης Αερίων

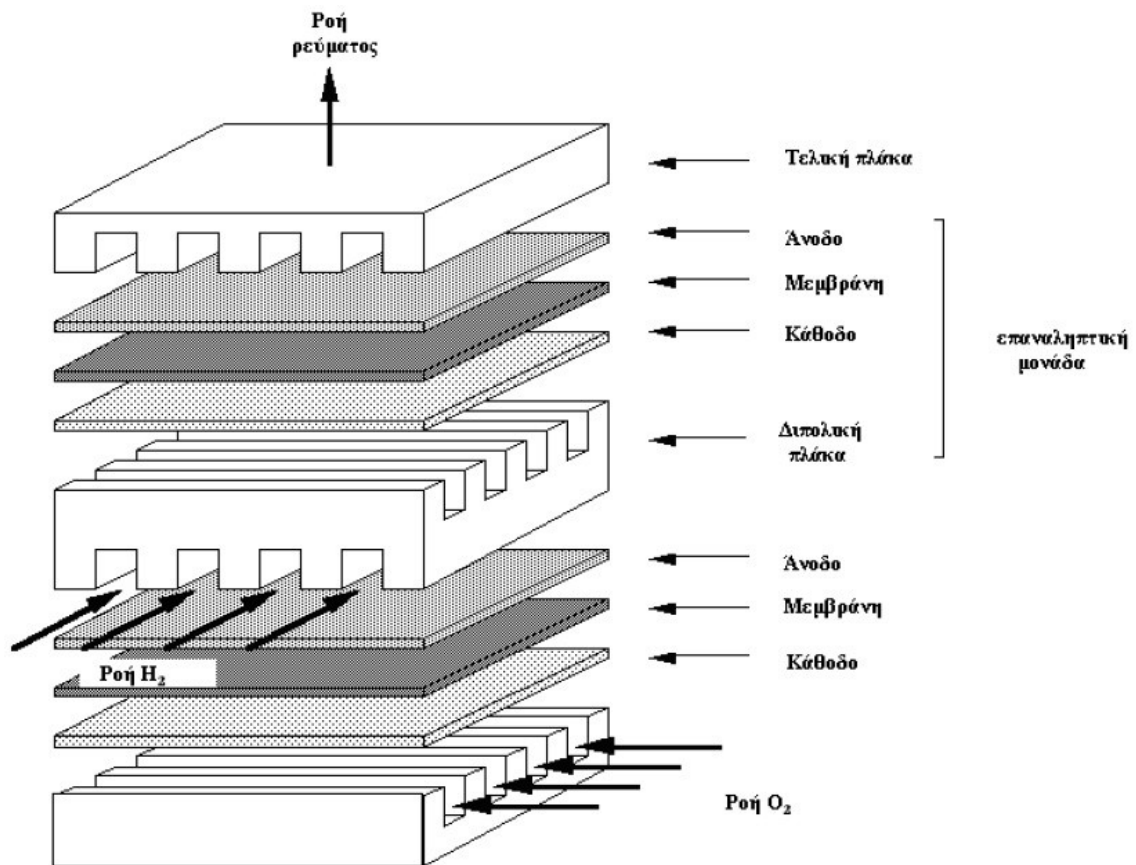
Η κύρια λειτουργία αυτού του στρώματος είναι να διαχέει ομοιόμορφα τα αέρια αντιδρώντα στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Το στρώμα διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layer) αποτελείται από υδροφοβικό χαρτί γραφίτη που επιτρέπει την εύκολη μεταφορά των αερίων καθώς και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των ηλεκτρονίων. 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 διαπερνάται ώστε να καταφθάνει στα ηλεκτρόδια και στη μεμβράνη.

3.1.2.4 Πλάκα Ροής Αερίων και Διπολική Πλάκα

Η πλάκα ροής των αερίων (flow field plate) χαράσσεται πάνω στην τελική πλάκα (από γραφίτη) της ανόδου και της καθόδου σε περίπτωση που πρόκειται για μία μόνο κυψέλη. Επειδή, όμως, η τάση που εμφανίζει μία συγκεκριμένη κυψέλη καυσίμου είναι μικρή, ενώνονται σε σειρά πολλές κυψέλες, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο τη λειτουργική τάση. Επομένως είναι αναγκαίο να υπάρχουν πλάκες που να έχουν και από τις δύο πλευρές τους χαραγμένα κανάλια (εξ' ου και το όνομα διπολική πλάκα) ώστε να υπάρχει πιο ομοιόμορφη κατανομή των αερίων στο στρώμα διάχυσης. Τα κανάλια αυτά μπορούν να έχουν, ανάλογα με την κατασκευή, διαφορετική διάρθρωση (σχ. 22, στην πλειοψηφία επικρατούν ελικοειδή και παράλληλα κανάλια). Στο σχήμα 23 παρουσιάζεται η δομή μίας συστοιχίας κυψελών καυσίμου.



Σχ. 22: Παραδείγματα διαφορετικών flow field plate

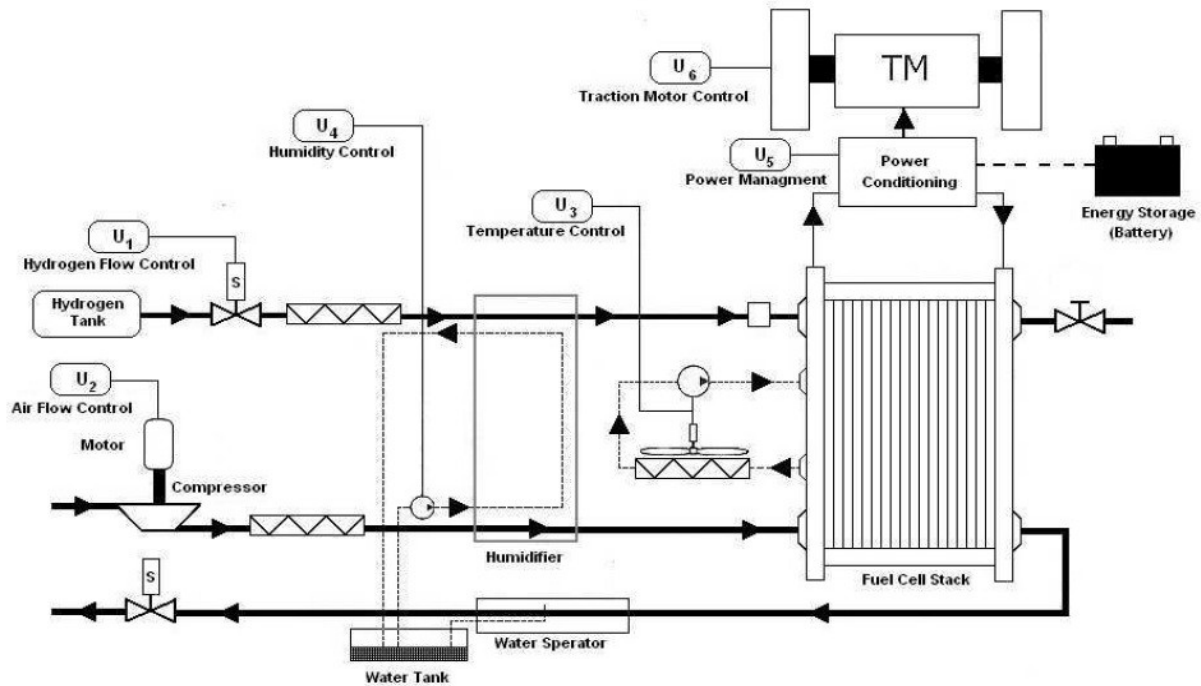


Σχ. 23: Συστοιχία κυψελών καυσίμου

3.1.3 Υποσυστήματα Κυψέλης Καυσίμου

Τα αναγκαία συστήματα που απαιτούνται για τη λειτουργία μίας κυψέλης καυσίμου παρουσιάζονται στο σχήμα 24. Στο σχήμα διακρίνονται οι μηχανισμοί ροής των αντιδρώντων (υδρογόνο, ατμοσφαιρικός αέρας), καθώς και η διακίνηση του νερού που αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για την αποδοτική λειτουργία της κυψέλης.

Για τη ροή του συστήματος που εφοδιάζει την πλευρά της καθόδου της κυψέλης με αέρα, και συνεπώς με οξυγόνο, είναι αναγκαία η χρήση ενός συμπιεστή και του συνοδευτικού κινητήρα ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ροή και πίεση του αέρα. Ο ρυθμισμένος ως προς την πίεση αέρας στη συνέχεια ψύχεται, ώστε η θερμοκρασία εισόδου του στην κυψέλη να είναι σε επιθυμητά επίπεδα. Ο υγραντήρας έπειτα προσθέτει τον απαιτούμενο ατμό προς αποφυγήν αφυδάτωσης της μεμβράνης. Ο εξερχόμενος από την κάθοδο αέρας περιέχει επίσης ποσότητα νερού (προϊόν αντίδρασης) και στις εφαρμογές απαιτείται ένας διαχωριστής νερού ώστε το νερό να επαναχρησιμοποιηθεί για την ενυδάτωση του αέρα και του υδρογόνου.



Σχ. 24: Σχεδιάγραμμα βοηθητικών στοιχείων υποστήριξης μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου για ένα ολοκληρωμένο σύστημα ηλεκτροκίνησης

Η άνοδος της συστοιχίας τροφοδοτείται από υδρογόνο που είναι αποθηκευμένο σε δεξαμενή υπό ρυθμισμένη πίεση. Χρησιμοποιείται βαλβίδα για να ελέγχεται η ροή του υδρογόνου και στη συνέχεια προστίθεται ατμός από τον υγραντήρα. Πέραν του νερού, ως προϊόν της αντίδρασης, εκλύεται και θερμότητα. Η εκλυόμενη αυτή θερμότητα πρέπει να εξάγεται ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία της κυψέλης κάτω από τους 100°C . Αυτό επιτυγχάνεται είτε με αποϊονισμένο νερό που απάγει τη θερμότητα της κυψέλης και στη συνέχεια ψύχεται, είτε με κατάλληλο σχεδιασμό της κυψέλης που να επιτρέπει την εκ φύσεως απαγωγή της θερμότητας.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ο ρυθμός ροής των αντιδρώντων όπως και η μερική πίεση τους, η εσωτερική θερμοκρασία της κυψέλης και το ποσοστό της υγρασίας της μεμβράνης είναι παράμετροι που πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα. Η ρύθμιση αυτών των παραμέτρων εξασφαλίζει την καλή λειτουργία της κυψέλης είτε αυτή αναφέρεται στη γρήγορη απόκριση των δυναμικών μεταβολών του φορτίου, στις εκκινήσεις και στις διακοπές της λειτουργίας, είτε στην ανθεκτικότητα και στην ικανότητα προσαρμογής της. Πρέπει να τονισθεί το γεγονός ότι οι παράμετροι δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, η μεταβολή μίας παραμέτρου επηρεάζει και τις υπόλοιπες.

Στις εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, όπως είναι φυσικό παρουσιάζονται διαφορετικά επίπεδα φορτίου και ακαριαίες μεταβολές του φορτίου. Για να πραγματοποιηθεί η ομαλή και επιτυχημένη εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου σε τέτοιου είδους εφαρμογές απαραίτητη είναι η αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων με όσο το δυνατόν καλύτερο και αποδοτικότερο τρόπο. Για αυτόν το λόγο, κατά τη μεταβατική λειτουργία του συστήματος το σύστημα ελέγχου πρέπει να διατηρεί τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία, υγρασία μεμβράνης, μερικές πιέσεις

των αντιδρώντων), ώστε να αποφευχθεί μείωση της τάσεως και συνεπώς μείωση του βαθμού απόδοσης και της ανθεκτικότητας της συσκευής [10, 21].

Επομένως, το ολικό σύστημα που πλαισιώνει τη συστοιχία της κυψέλης καυσίμου μπορεί να διακριθεί σε τέσσερα επιμέρους συστήματα:

- Σύστημα ροής αντιδρώντων.
- Σύστημα ψύξης και ελέγχου της θερμοκρασίας των αντιδρώντων.
- Σύστημα διαχείρισης νερού.
- Σύστημα διαχείρισης ισχύος.

3.1.4 Μοντελοποίηση Κυψέλης Καυσίμου (PEMFC)

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται μια παρόμοια έκδοση του μοντέλου κυψέλης καυσίμου που περιγράφεται στις αναφορές [22, 23]. Το μοντέλο αυτό φτιάχτηκε αξιοποιώντας την σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου και της μερικής πίεσης του υδρογόνου, οξυγόνου και νερού. Στο σχήμα 25 φαίνεται το μοντέλο της κυψέλης καυσίμου PEMFC που χρησιμοποιήθηκε και ενσωματώθηκε στο υβριδικό σύστημα που προσομοιώθηκε στη Matlab. Οι παράμετροι που φαίνονται στο σχήμα είναι οι εξής:

B, C	Σταθερές για να προσομοιώσουμε την τάση λειτουργίας κυψέλης [A^{-1}] και [V]
E	Στιγμιαία τάση Nernst [V]
E ₀	Αρχική τάση [V]
F	Σταθερά Faraday [C/kmol]
I _{FC}	Το ρεύμα της κυψέλης [A]
K _{an}	Σταθερά βαλβίδας ανόδου [$\sqrt{kmol\ kg\ (atm\ s)^{-1}}$]
K _{H₂}	Μοριακή σταθερά βαλβίδας υδρογόνου [kmol/(atm s)]
K _{H₂O}	Μοριακή σταθερά βαλβίδας νερού [kmol/(atm s)]
K _{O₂}	Μοριακή σταθερά βαλβίδας οξυγόνου [kmol/(atm s)]
K _r	Σταθερά μοντελοποίησης [kmol/(s A)]
M _{H₂}	Γραμμομοριακή μάζα [$kg\ kmol^{-1}$]
N ₀	Αριθμός σειρών στην κυψέλη
N _s	Αριθμός κυψελών που χρησιμοποιούνται στην κυψέλη λειτουργίας
p _{H₂}	Μερική πίεση υδρογόνου [atm]
p _{H₂O}	Μερική πίεση νερού [atm]
p _{O₂}	Μερική πίεση οξυγόνου [atm]
q _{O₂}	Μοριακή ροή εισόδου οξυγόνου [kmol/s]
q _{H₂}	Μοριακή ροή εισόδου υδρογόνου [kmol/s]
q _{H₂_in}	Ροή εισόδου υδρογόνου [kmol/s]
q _{H₂_out}	Ροή εξόδου υδρογόνου [kmol/s]
q _{H₂_r}	Ροή υδρογόνου που αντιδρά [kmol/s]
q _{H₂_req}	Απαραίτητη ροή υδρογόνου για τη μεταβολή φορτίου [kmol/s]
R	Παγκόσμια (Rydberg) σταθερά αερίων [J/(kmol K)]
r _{H-O}	Λόγος ροής υδρογόνου-οξυγόνου
R _{int}	Εσωτερική αντίσταση κυψέλης καυσίμου [Ω]
T	Απόλυτη θερμοκρασία [K]

U	Ποσοστό χρησιμοποίησης
V _{an}	Όγκος ανόδου [m ³]
V _{cell}	Τάση εξόδου συνεχούς ρεύματος κυψέλης [V]
τ _{H₂}	Σταθερά χρόνου υδρογόνου [s]
τ _{O₂}	Σταθερά χρόνου οξυγόνου [s]
τ _{H₂O}	Σταθερά χρόνου νερού [s]
η _{act}	Πτώση τάσης – Απώλειες ενεργοποίησης [V]
η _{ohmic}	Πτώση τάσης – Απώλειες εσωτερικών αντιστάσεων [V]

Η σχέση μεταξύ της μοριακής ροής οποιουδήποτε αερίου (υδρογόνου) μέσω της βαλβίδας και η μερική πίεση μέσα στον αγωγό μπορεί να εκφραστεί ως [24]:

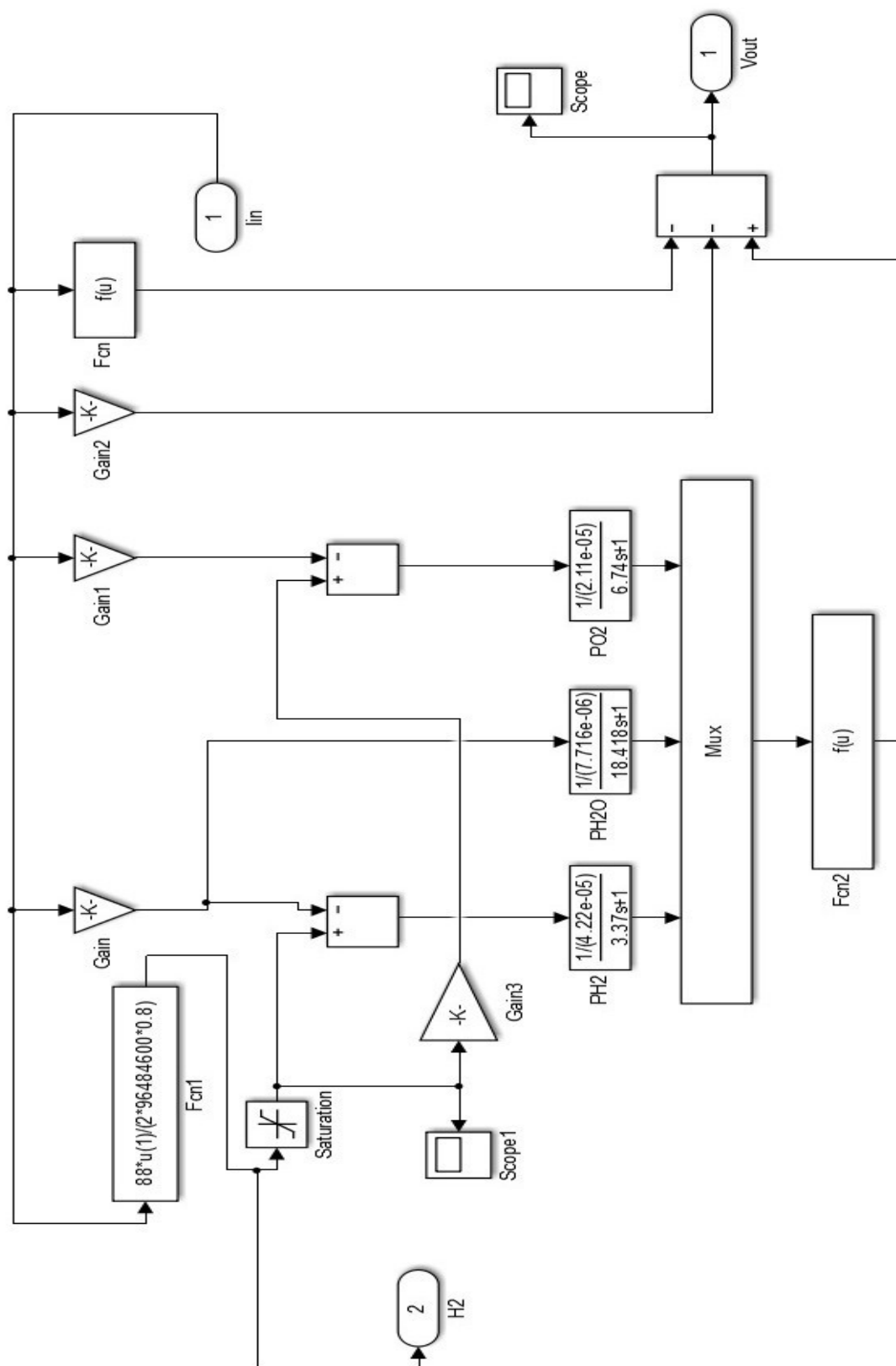
$$\frac{q_{H_2}}{p_{H_2}} = \frac{K_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = K_{H_2} \quad (3)$$

Για την μοριακή ροή του υδρογόνου, έχουμε τρεις σημαντικούς παράγοντες: η ροή εισόδου του υδρογόνου, η ροή εξόδου του και η ροή κατά τη διάρκεια της αντίδρασης [24]. Η σχέση μεταξύ αυτών των τριών παραγόντων μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (4)$$

Σύμφωνα με τη βασική ηλεκτροχημική σχέση μεταξύ της ροής υδρογόνου και του ρεύματος που διαρρέει την κυψέλη, ο ρυθμός ροής του υδρογόνου που έχει αντιδράσει δίνεται από την σχέση [24]:

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0 N_S I_{FC}}{2F} = 2K_r I_{FC} \quad (5)$$



Σχ. 25: Μοντέλο Simulink κοψέλης PEMFC [25]

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3) και (5) και εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό Laplace, η μερική πίεση του υδρογόνου μπορεί να επιτευχθεί στον τομέα s ως:

$$p_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2}s} (q_{H_2}^{in.} - 2 K_r I_{FC}) \quad (6)$$

όπου

$$\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{K_{H_2} R T} \quad (7)$$

Ομοίως, μπορούμε να υπολογίσουμε και τη μερική πίεση του νερού και του οξυγόνου. Η καμπύλη πόλωσης για την κυψέλη μπορεί να υπολογιστεί από το άθροισμα της τάσης Nernst, της τάσης ενεργοποίησης και της ωμικής τάσης. Υποθέτοντας σταθερή θερμοκρασία και συγκέντρωση οξυγόνου, η τάση εξόδου της κυψέλης μπορεί να εκφραστεί ως [23, 26]:

$$V_{cell} = E + \eta_{act} + \eta_{ohmic} \quad (8)$$

όπου

$$\eta_{act} = -B \ln(C I_{FC}) \quad (9)$$

και

$$\eta_{ohmic} = -R_{int.} I_{FC}. \quad (10)$$

Η στιγμιαία τάση Nernst μπορεί να εκφραστεί ως [23]:

$$E = N_0 [E_0 + \frac{RT}{2F} \log [\frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}}]] \quad (11)$$

Η κυψέλη καταναλώνει υδρογόνο σύμφωνα με τις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος. Το υδρογόνο παρέχεται από δεξαμενή υψηλής πίεσης. Σε συνθήκες λειτουργίας, για να ελέγχεται ο ρυθμός που ρέει το υδρογόνο σύμφωνα με την ισχύ της κυψέλης, χρησιμοποιείται μια στρατηγική ελέγχου ανατροφοδότησης. Για να επιτευχθεί αυτό, το ρεύμα της κυψέλης από την έξοδο επανέρχεται στην είσοδο όσο το υδρογόνο μετατρέπεται σε μοριακή μορφή [23,27]. Η διαθέσιμη ποσότητα υδρογόνου από την δεξαμενή δίνεται από τον τύπο:

$$q_{H_2}^{req} = \frac{N_0 N_s I_{FC}}{2FU} \quad (12)$$

Ανάλογα με την διαμόρφωση της κυψέλης, και τη ροή του υδρογόνου και του οξυγόνου, η κυψέλη παράγει τάση εξόδου συνεχούς ρεύματος (dc). Ο λόγος ροής υδρογόνου-οξυγόνου (rH-O) στην κυψέλη καθορίζει τον ρυθμό που ρέει το οξυγόνο [23].

Η κυψέλη καταναλώνει υδρογόνο σύμφωνα με τη ζήτηση, το οποίο παρέχεται από την δεξαμενή αποθήκευσης. Για να ελεγχθεί η ροή του υδρογόνου σύμφωνα με την απόδοση (ισχύ) της κυψέλης, χρησιμοποιείται μια στρατηγική ελέγχου ανατροφοδότησης παίρνοντας το ρεύμα εξόδου της κυψέλης και πάλι στην είσοδο.

3.2 Ηλεκτρολύτης

3.2.1 Τύποι Μονάδων Ηλεκτρόλυσης

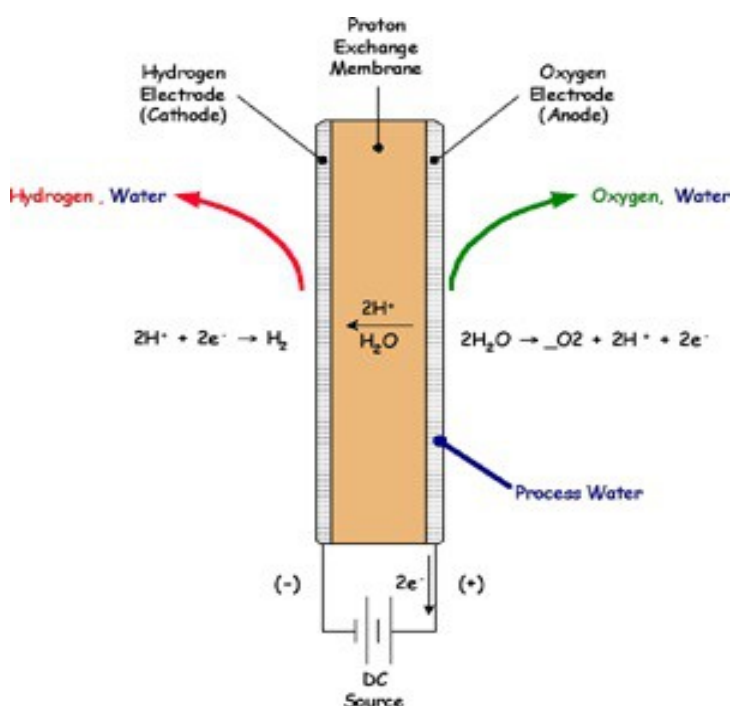
Οι κυριότεροι τύποι μονάδων ηλεκτρόλυσης είναι ο αλκαλικός ηλεκτρολύτης και ο ηλεκτρολύτης μεμβράνης εναλλαγής πρωτονίων (PEM). Οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες είναι επί του παρόντος πιο οικονομικοί, ενώ οι ηλεκτρολύτες PEM είναι ακριβοί και όχι πλήρως εμπορικά διαθέσιμοι σε μεσαία και μεγάλη κλίμακα. Από την άλλη, η τεχνολογία PEM εμφανίζει κάποια εγγενή πλεονεκτήματα έναντι των αλκαλικών ηλεκτρολυτών, τα οποία είναι [8]:

- 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 διαφορετική 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.

3.2.2 PEM Ηλεκτρολύτης

Οι μονάδες ηλεκτρόλυσης PEM βασίζονται στη χρήση μίας πολυμερούς μεμβράνης εναλλαγής πρωτονίων, που παίζει το ρόλο του στερεού ηλεκτρολύτη, και παρά το γεγονός ότι η αρχή λειτουργίας τους είναι αντίστροφη από αυτή των κυψελών καυσίμου, τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι διαφορετικά από αυτά των PEM κυψελών καυσίμου λόγω προβλημάτων διάβρωσης. Η άνοδος του κελιού κατασκευάζεται από πορώδες τιτάνιο και ως ενεργό υλικό χρησιμοποιείται καταλύτης από μικτό ευγενές οξείδιο μετάλλου. Το υλικό κατασκευής της μεμβράνης είναι το Nafion. Η κάθοδος αποτελείται από συλλέκτη ρεύματος κατασκευασμένο από πορώδη γραφίτη με λευκόχρυσο ή μικτό οξείδιο ως ηλεκτροκαταλύτη. Τα επιμέρους κελιά στοιχίζονται σε διπολική διάταξη με διαχωριστές γραφίτη, παρέχοντας τους απαραίτητους πολλαπλούς αγωγούς για την τροφοδοσία νερού και τη διαφυγή των αερίων. Η ροή του νερού μπορεί να γίνεται ή από την κάθοδο ή από την άνοδο, με την δεύτερη επιλογή να εφαρμόζεται στους περισσότερους εμπορικούς ηλεκτρολύτες. Επιπλέον, οι PEM ηλεκτρολύτες απαιτούν τροφοδοσία νερού υψηλότερης καθαρότητας σε σχέση με τους αλκαλικούς.

Η PEM ηλεκτρόλυση είναι στην ουσία η αντίστροφη διαδικασία από αυτή που πραγματοποιείται σε μια PEM κυψέλη καυσίμου. Το νερό διίσταται σε οξυγόνο, πρωτόνια (κατιόντα υδρογόνου) και ηλεκτρόνια στην άνοδο με την εφαρμογή μίας DC τάσης υψηλότερης από την θερμο-ουδέτερη τάση (1,482 V). Το παραγόμενο αέριο οξυγόνο και το νερό που δε συμμετείχε στην αντίδραση συλλέγονται στο κανάλι ροής της ανόδου. Τα πρωτόνια διαπερνούν τη μεμβράνη του πολυμερούς ηλεκτρολύτη και φτάνοντας στην κάθοδο συνδυάζονται με ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα σχηματίζοντας μόρια υδρογόνου. Η διέλευση των πρωτονίων διαμέσου της μεμβράνης συνοδεύεται από το φαινόμενο της μεταφοράς νερού [28]. Παρακάτω στο σχήμα 26 φαίνεται η αρχή λειτουργίας του κελιού ενός PEM ηλεκτρολύτη καθώς και οι εξισώσεις των αντιδράσεων.



Σχ. 26: Λειτουργία κελιού PEM ηλεκτρολύτη και εξισώσεις αντιδράσεων

3.2.3 Μοντελοποίηση PEM Ηλεκτρολύτη

Η ηλεκτροχημική αντίδραση της ηλεκτρόλυσης του νερού δίνεται από τον τύπο:



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

$$n_{\text{H}_2} = \frac{\eta_F n_C i_e}{2F} \quad (13)$$

όπου:

F είναι η σταθερά Faraday [C/kmol],

i_e είναι το ρεύμα λειτουργίας του ηλεκτρολύτη [A],

n_C είναι ο αριθμός κυψελών του ηλεκτρολύτη,

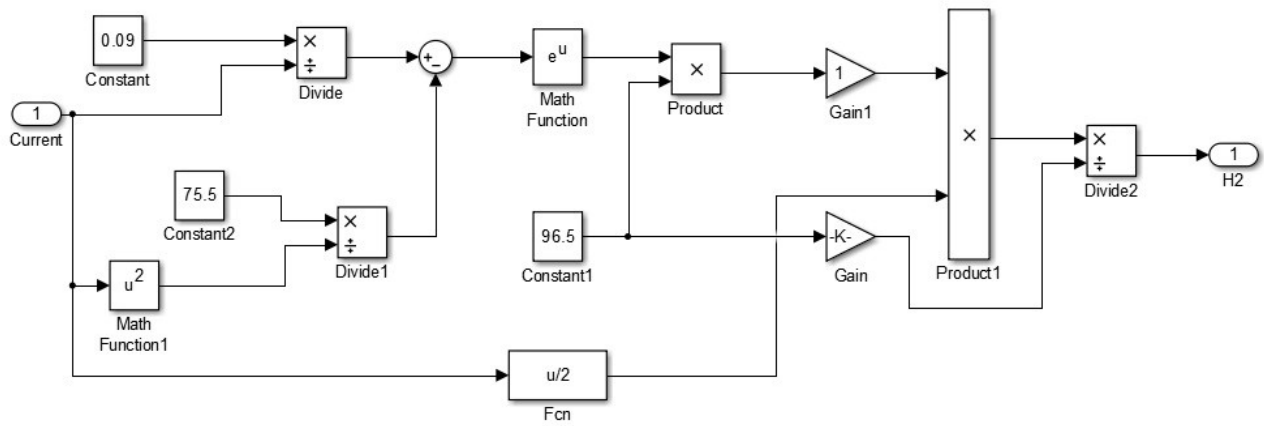
η_F είναι ο βαθμός απόδοσης Faraday,

n_{H_2} είναι το παραγώμενο υδρογόνο [mol/s].

Η αναλογία μεταξύ της πραγματικής και της θεωρητικής ποσότητας του υδρογόνου που παράγεται στον ηλεκτρολύτη ονομάζεται βαθμός απόδοσης Faraday. Υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία λειτουργίας του ηλεκτρολύτη είναι 40° C, ο βαθμός απόδοσης Faraday υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\eta_F = 96,5 e^{(0,09/i_e - 75,5/i_e^2)} \quad (14)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, αναπτύχθηκε το μοντέλο του ηλεκτρολύτη με χρήση του Simulink, το οποίο φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 27.



Σχ. 27: Το μοντέλο του ηλεκτρολύτη [25]

3.3 Δεξαμενή Αποθήκευσης Υδρογόνου

3.3.1 Μέθοδοι Αποθήκευσης Υδρογόνου

Σήμερα είναι διαθέσιμες αρκετές μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου. Οι κυριότερες από αυτές αναφέρονται παρακάτω.

- Η απλούστερη από αυτές είναι το πεπιεσμένο αέριο υδρογόνο. Επιτυγχάνεται σε θερμοκρασία δωματίου, η ροή εισόδου και εξόδου είναι απλή. Ωστόσο, η πυκνότητα αποθήκευσης είναι χαμηλή σε σχέση με άλλες μεθόδους.
- Υπάρχει, επίσης, η επιλογή της αποθήκευσης υγρού υδρογόνου. Σε αυτή την περίπτωση, όμως, απαιτείται το 25% με 45% της αποθηκευμένης ενέργειας για την υγροποίηση του υδρογόνου. Με αυτή τη μέθοδο η πυκνότητα αποθήκευσης του υδρογόνου είναι πολύ υψηλή, αλλά χρειάζεται πολύ ισχυρή μόνωση λόγω του ότι το υδρογόνο βράζει στους περίπου -253°C , θερμοκρασία η οποία πρέπει να διατηρείται σε αυτά τα επίπεδα.
- Στη μέθοδο αποθήκευσης μεταλλοϋδριδίων κάποιο μέταλλο ή κράμα μετάλλου δεσμεύει χημικά το υδρογόνο κάτω από υψηλές πιέσεις. Κατά τη διάρκεια που σχηματίζεται παράγεται θερμότητα (εξωθερμική), ενώ για την αντίστροφη διαδικασία είναι απαραίτητη η παροχή θερμοκρασίας (ενδοθερμική). Το βασικό πρόβλημα με αυτή τη μέθοδο είναι το βάρος των μετάλλων (εδώ θα είχαμε μία δεξαμενή 600kg σε αντίθεση με την αποθήκευση αέριου υδρογόνου όπου η δεξαμενή θα ήταν 80kg) και το αρκετά υψηλό κόστος της.
- Η πιο σύγχρονη μέθοδος, και αρκετά διάσημη στις μέρες μας, είναι η απορρόφηση άνθρακα. Με εφαρμογή πίεσης το υδρογόνο δένει με πορώδη ανθρακώδη υλικά (πχ nanotubes).

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε πως αυτή η τεχνολογία πρέπει να εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα, αλλά η αποθήκευση υδρογόνου ακόμα δεν μπορεί να ανταγωνιστεί αυτή των καυσίμων από υδρογονάνθρακες [29].

3.3.2 Αποθήκευση Πεπιεσμένου Αέριου Υδρογόνου

Η πιο απλή μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου είναι η συμπίεση του σε αέρια μορφή κάτω από υψηλή πίεση (μεγαλύτερη των 200 bar). Σε διάφορα οχήματα υδρογόνου χρησιμοποιείται πεπιεσμένο αέριο υδρογόνο το οποίο είναι αποθηκευμένο σε δεξαμενές με πίεση 350 και 700 bar. Υπάρχουν δύο προσεγγίσεις όσον αφορά την αύξηση της σταθμικής και ογκομετρικής αποθηκευτικής ικανότητας των δεξαμενών αποθήκευσης πεπιεσμένου αέριου υδρογόνου. Η πρώτη από αυτές, η οποία συναντάται και στις δεξαμενές αποθήκευσης που φαίνονται στο σχήμα 28, βασίζεται στο γεγονός ότι για σταθερές τιμές πίεσης και όγκου η ογκομετρική ικανότητα της δεξαμενής αερίου αυξάνεται καθώς μειώνεται η θερμοκρασία της δεξαμενής. Με αυτό τον τρόπο, ψύχοντας μια δεξαμενή από θερμοκρασία δωματίου σε θερμοκρασία υγρού αζώτου (77 K), αυξάνεται η ογκομετρική της ικανότητα. Ωστόσο, η συνολική ογκομετρική ικανότητα του συστήματος είναι μικρότερη του 1 λόγω του αυξημένου όγκου που απαιτείται για το σύστημα ψύξης. Ο περιορισμός αυτού του συστήματος είναι η ενέργεια που χρειάζεται για την συμπίεση του αερίου. Περίπου το 20% του ενεργειακού περιεχομένου του υδρογόνου χάνεται εξαιτίας της μεθόδου αποθήκευσης. Η ενέργεια που χάνεται για την αποθήκευση του υδρογόνου μπορεί να μειωθεί με την ανάπτυξη μιας νέας κατηγορίας ελαφρών σύνθετων κυλίνδρων [29].



Σχ. 28: Δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέριου υδρογόνου

3.3.3 Μοντελοποίηση Δεξαμενής Αποθήκευσης Υδρογόνου

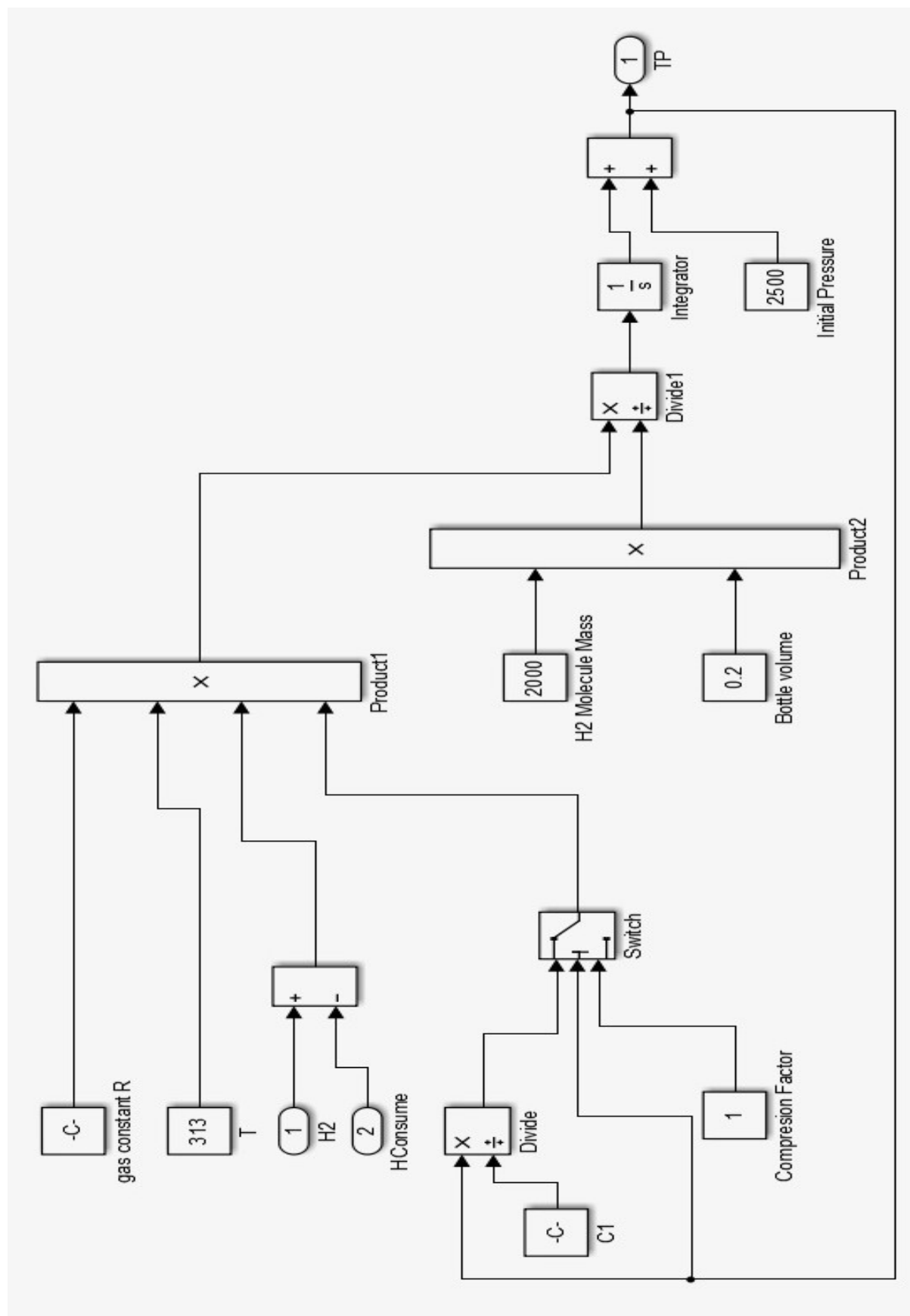
Η ποσότητα του υδρογόνου που χρειάζεται η κυψέλη για να λειτουργήσει βασίζεται στη σχέση ανάμεσα στην απαιτούμενη ισχύ και στις απαιτήσεις σε υδρογόνο της κυψέλης. Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί είτε σαν συμπιεσμένο αέριο είτε σε υγρή μορφή. Εδώ χρησιμοποιείται το μοντέλο αποθήκευσης που περιγράφεται στην αναφορά [5]. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου είναι οι εξής:

M_{H_2}	Μοριακή μάζα υδρογόνου [$kg\ kmol^{-1}$]
N_{H_2}	Mole υδρογόνου ανα δευτερόλεπτο που φτάνουν στην δεξαμενή [kmol/s]
P_b	Πίεση της δεξαμενής [Pascal]
P_{bi}	Αρχική πίεση της δεξαμενής [Pascal]
R	Παγκόσμια (<i>Rydberg</i>) σταθερά αερίων [J/(kmol K)]
T_b	Θερμοκρασία λειτουργίας [K]
V_b	Όγκος της δεξαμενής [m^3]
z	Παράγοντας συμπίεσης συναρτήσει της πίεσης

Μία τεχνική αποθήκευσης υδρογόνου είναι η φυσική αποθήκευση υδρογόνου, η οποία περιλαμβάνει τη χρησιμοποίηση δεξαμενών είτε συμπιεσμένου αερίου υδρογόνου είτε υδρογόνο σε υγρή μορφή. Το μοντέλο αποθήκευσης υδρογόνου βασίζεται στην εξίσωση (15) και υπολογίζει απευθείας την πίεση της δεξαμενής χρησιμοποιώντας τον λόγο της ροής υδρογόνου στη δεξαμενή. Το παραγόμενο υδρογόνο αποθηκεύεται στη δεξαμενή, της οποίας οι δυναμικές μπορούν να εκφραστούν με τον παρακάτω τρόπο [5]:

$$P_b - \hat{P}_{bi} = z \frac{N_{H_2} R T_b}{M_{H_2} V_b} \quad (15)$$

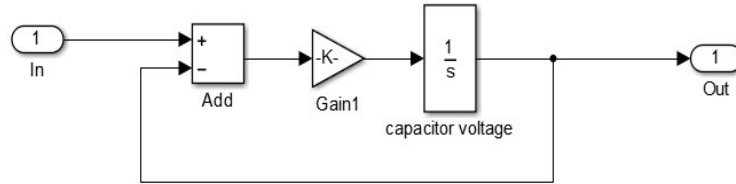
Στους υπολογισμούς μας δεν έχουν ληφθεί υπ' όψιν ούτε οι δυναμικές συμπίεσης ούτε η απαραίτητη για την συμπίεση ενέργεια. Όλες οι βοηθητικές ενεργειακές απαιτήσεις όπως αντλίες, βαλβίδες έχουν αγνοηθεί στην κατασκευή του δυναμικού μοντέλου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στο Simulink για την δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου.



Σχ. 29: Το μοντέλο της δεξαμενής αποθήκευσης [25]

Κεφ. 4 Μοντελοποίηση Επιπλέον Διατάξεων

Για την διευκόλυνση της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα για εξομαλύνεται το σήμα (σχ. 30) καθώς και μετατροπείς dc/dc.



Σχ. 30: Το φίλτρο για την εξομάλυνση του σήματος

Ένας μετατροπέας dc/dc έχει την ικανότητα να δέχεται ένα εύρος τάσεων εισόδου και να τη μετατρέπει σε μια καθορισμένη τιμή τάσεως εξόδου. Ο μετατροπέας dc/dc άλλοτε επιθυμούμε να αυξάνει την τάση εισόδου και άλλοτε να την μειώνει. Οι μετατροπείς που μπορούν να δώσουν τάσεις μικρότερες της τάσης εισόδου ονομάζονται “ Buck Converters “ ενώ για τάσεις μεγαλύτερες της εισόδου χρησιμοποιούμε τους “ Boost Converters “.

4.1 Μοντελοποίηση Buck Converter

Ο μετατροπέας buck converter φαίνεται στο σχήμα 31a. Η πιο συνηθισμένη στρατηγική ελέγχου της εκπεμπόμενης ισχύος στο φορτίο είναι ο Παλμός Διαμόρφωσης Πλάτους (PWM). Μία τάση ελέγχου V_m συγκρίνεται με την τριγωνική τάση V_t . Η τριγωνική τάση V_t καθορίζει την συχνότητα εναλλαγής f_t . Ο διακόπτης T ελέγχεται σύμφωνα με τη διαφορά $V_m - V_t$ (σχ. 31b). Διακρίνονται τρεις καταστάσεις λειτουργίας όπως βλέπουμε και στο σχήμα 31c:

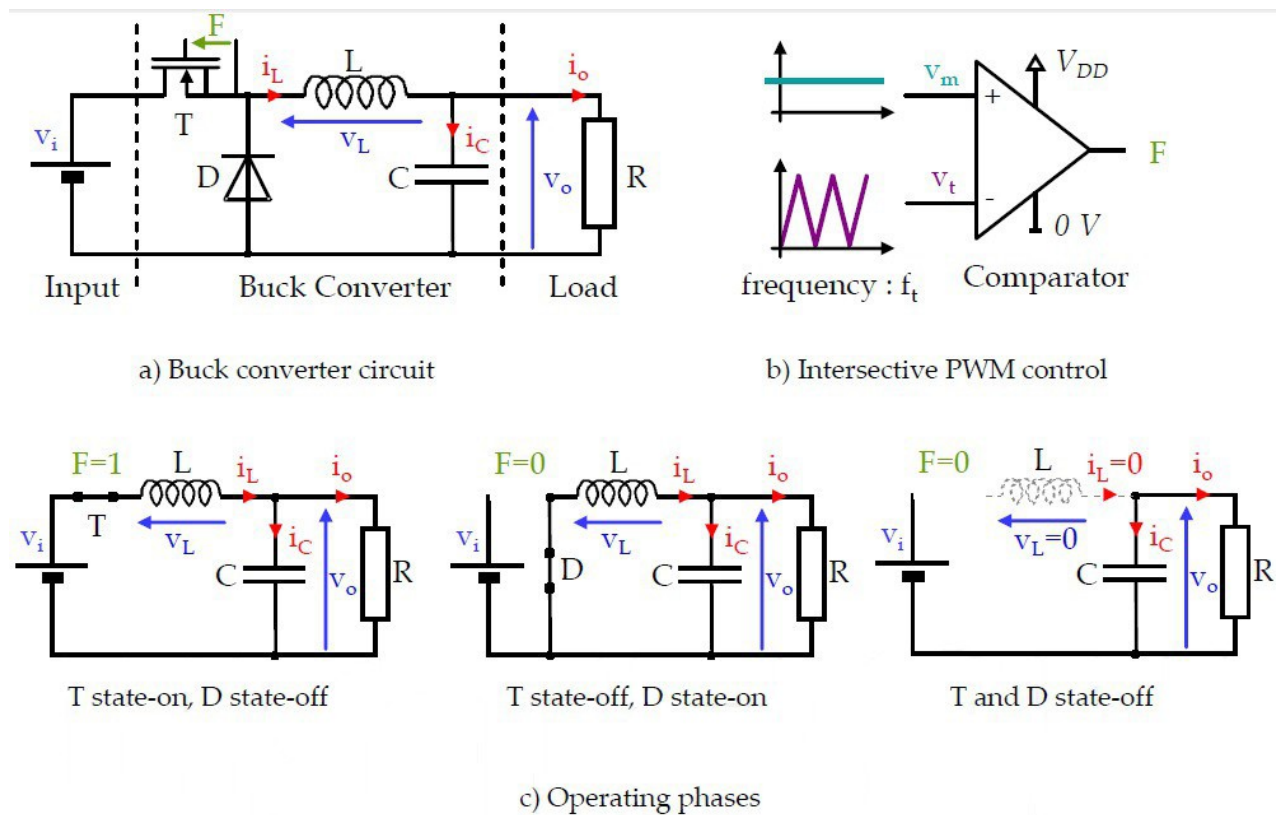
- T κατάσταση-on και D κατάσταση-off
- T κατάσταση-off και D κατάσταση- on
- T και D κατάσταση-off

$$i_c(t) = i_L(t) - i_o(t) = C \frac{dv_o}{dt} \quad (16)$$

$$v_o(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt = \frac{1}{C} \int (i_L(t) - i_o(t)) dt \quad (17)$$

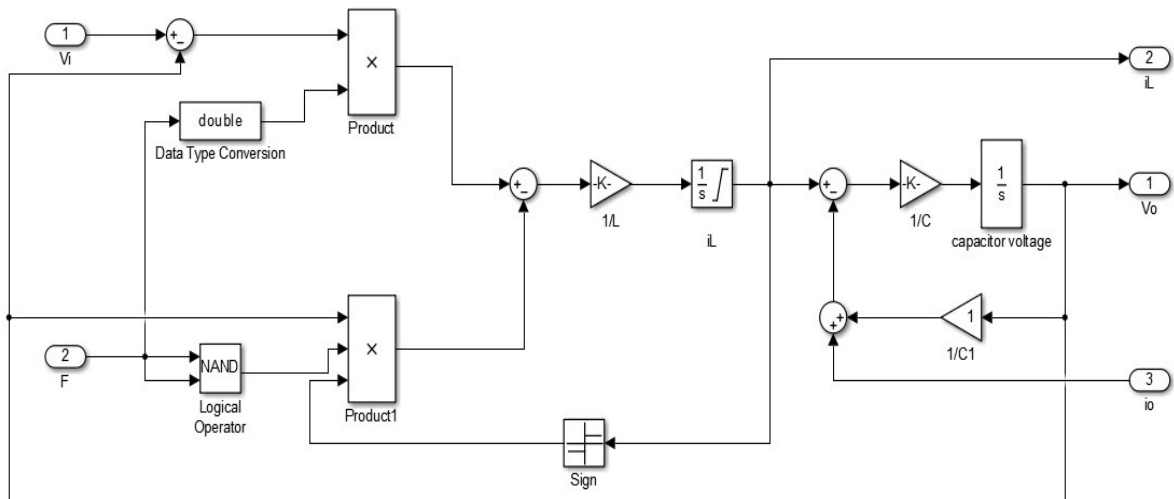
$$v_L(t) = (v_i(t) - v_o(t)) * F - v_o(t) * \overline{F} * \text{sign}(i_L) \quad (18)$$

Η μεταβολή του ρεύματος μέσω του πυκνωτή C ορίζεται από την εξίσωση (16). Η μεταβολή της τάσης μέσω της χωρητικότητας δίνεται από την εξίσωση (17). Η εξίσωση (18) περιγράφει την μεταβολή της τάσης δια μέσου της επαγωγής η οποία εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας. Η μεταβλητή F είναι μια λογική μεταβλητή η οποία ισούται με 1 εάν $V_m \geq V_t$ ή 0 στην αντίθετη περίπτωση. Η μεταβλητή $\text{sign}(i_L)$ είναι επίσης λογική και ισούται με 1 εάν $\text{sign}(i_L) > 0$ ή 0 εάν $\text{sign}(i_L) = 0$.



Σχ. 31: *Buck Converter* [34]

Το μοντέλο του buck converter που χρησιμοποιήθηκε και ενσωματώθηκε στο σύστημα μας στο Simulink φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 32.



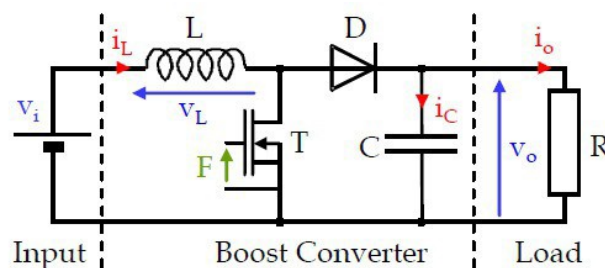
Σχ. 32: Το μοντέλο του *buck converter* που χρησιμοποιήθηκε στο *Simulink* [34]

4.2 Μοντελοποίηση Boost Converter

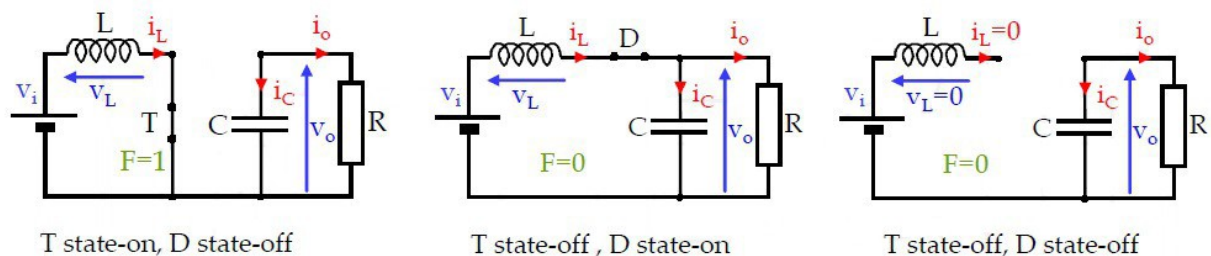
Το κύκλωμα του boost converter φαίνεται στο σχήμα 33a. Η βασική αρχή του διακόπτη ελέγχου περιγράφεται στο σχήμα 31b.

Διακρίνονται τρεις καταστάσεις λειτουργίας όπως βλέπουμε και στο σχήμα 33b:

- T κατάσταση-on και D κατάσταση-off
- T κατάσταση-off και D κατάσταση-on
- T και D κατάσταση-off



a) Boost converter circuit



b) Operating phases

Σχ. 33: Boost Converter [34]

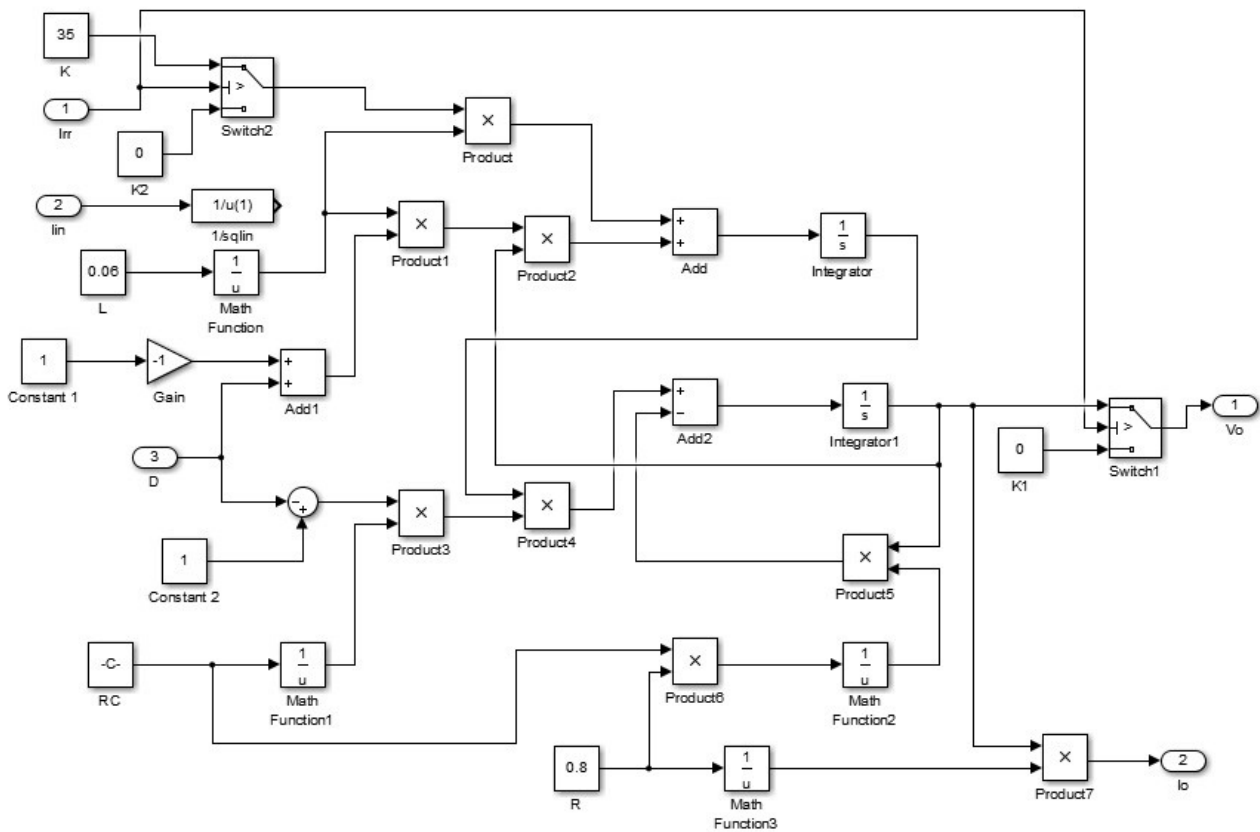
Η μεταβολή της τάσης κατά μήκος της επαγωγής L (19) και το ρεύμα μέσω της χωρητικότητας (20) εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας.

$$v_L(t) = v_i(t) * F + (v_i(t) - v_o(t)) * \bar{F} * \text{sign}(i_L) \quad (19)$$

$$i_C(t) = -i_o(t) * F + i_L(t) * \bar{F} * \text{sign}(i_L) = C \frac{dv_o}{dt} \quad (20)$$

$$v_o = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt = \frac{1}{C} \int (-i_o(t) * F + i_L * \bar{F} * \text{sign}(i_L)) dt \quad (21)$$

Το μοντέλο του boost converter που χρησιμοποιήθηκε και ενσωματώθηκε στο σύστημα μας στο Simulink φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 34.



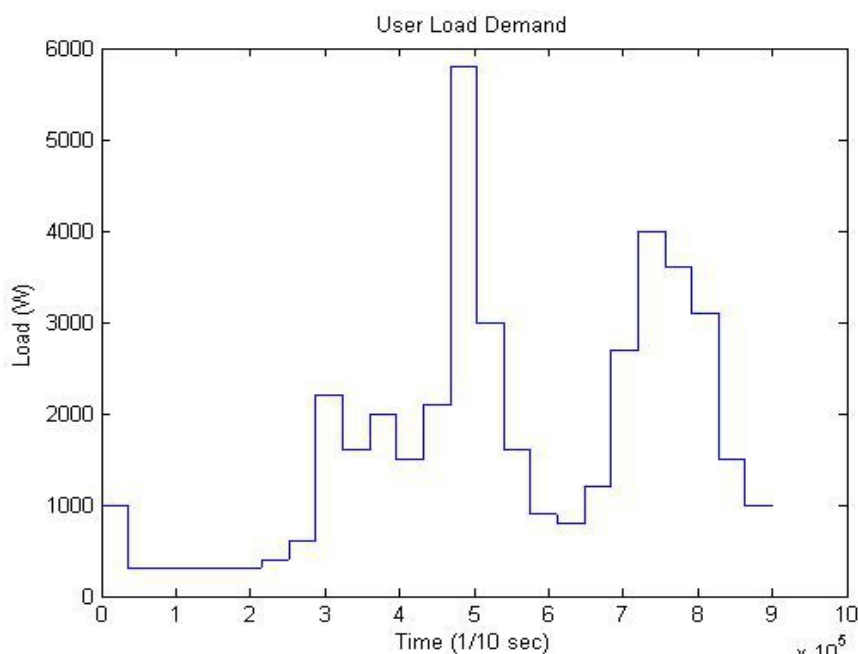
Σχ. 34: Το μοντέλο του boost converter που χρησιμοποιήθηκε στο Simulink [34,35]

Κεφ. 5 Προσομοίωση του Υβριδικού Συστήματος

5.1 Λειτουργία του Συστήματος και Δεδομένα για την Προσομοίωση

Αρχικά υπολογίζεται η διαφορά του φορτίου της φ/β γεννήτριας με τη ζήτηση. Εάν το αποτέλεσμα είναι θετικό (πλεόνασμα) τότε τροφοδοτείται ο ηλεκτρολύτης και παράγεται υδρογόνο το οποίο αποθηκεύεται σε δεξαμενή για να χρησιμοποιηθεί όποτε χρειαστεί από την κυψέλη καυσίμου. Εάν είναι αρνητικό (έλλειμα) τότε τίθεται σε λειτουργία η κυψέλη καυσίμου προκειμένου να καλυφθούν οι επιπλέον ανάγκες ζήτησης.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τις ανάγκες ενός νοικοκυριού κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου (00:00 έως 23:59).



Σχ. 35: Φορτίο ενός σπιτιού για μια ημέρα

Το φορτίο παραμένει το ίδιο για κάθε μέρα που προσομοιώνουμε το σύστημα. Επίσης, τα δεδομένα μας (θερμοκρασία και ηλ. ακτινοβολία) είναι ανά ώρα. Η απόδοση του συστήματος ελέγχθηκε κάτω από τις παρακάτω συνθήκες:

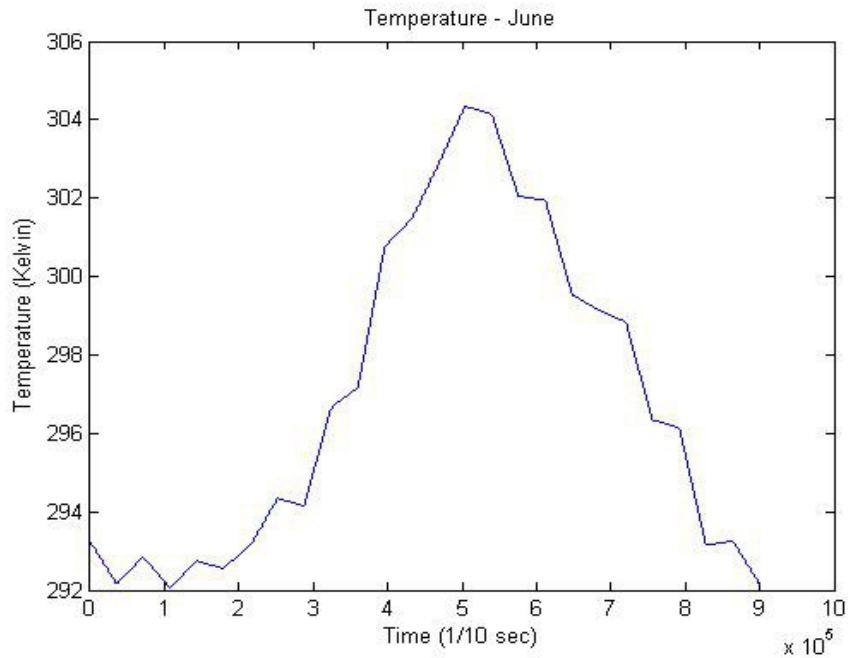
- μια χειμωνιάτικη μέρα (1η Ιανουαρίου).
- μια ανοιξιιάτικη μέρα (1η Απριλίου).
- μια καλοκαιρινή μέρα (1η Ιουνίου).
- μια φθινοπωρινή μέρα (1η Νοεμβρίου).

Επιπλέον, για τις μέρες του Ιανουαρίου και του Νοεμβρίου το σύστημα ελέγχθηκε και κάτω από συνθήκες συννεφιάς, όπου η λειτουργία των φ/β είναι περιορισμένη. Τέλος, ελέγχθηκε και η λειτουργία της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου όταν η πίεση φτάνει στην μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της.

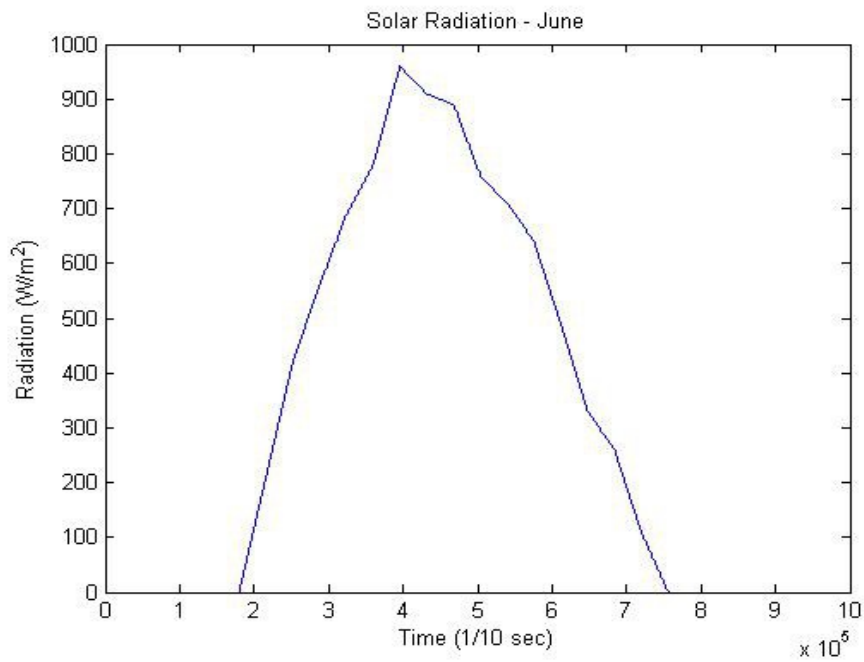
5.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

5.2.1 Αποτελέσματα για τις Τυπικές Τιμές

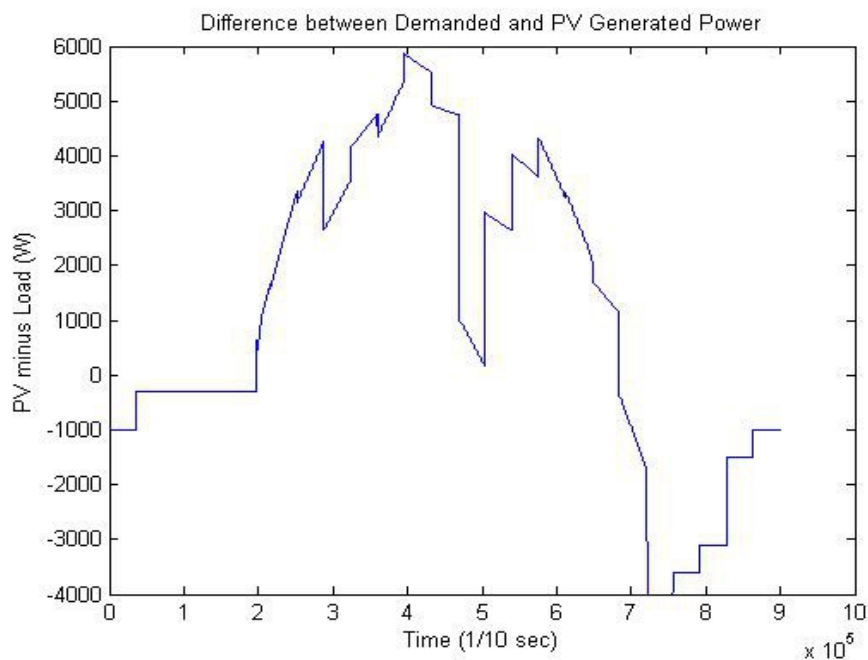
Στα επόμενα σχήματα (36 - 43) βλέπουμε τα αποτελέσματα για την ημέρα του Ιουνίου.



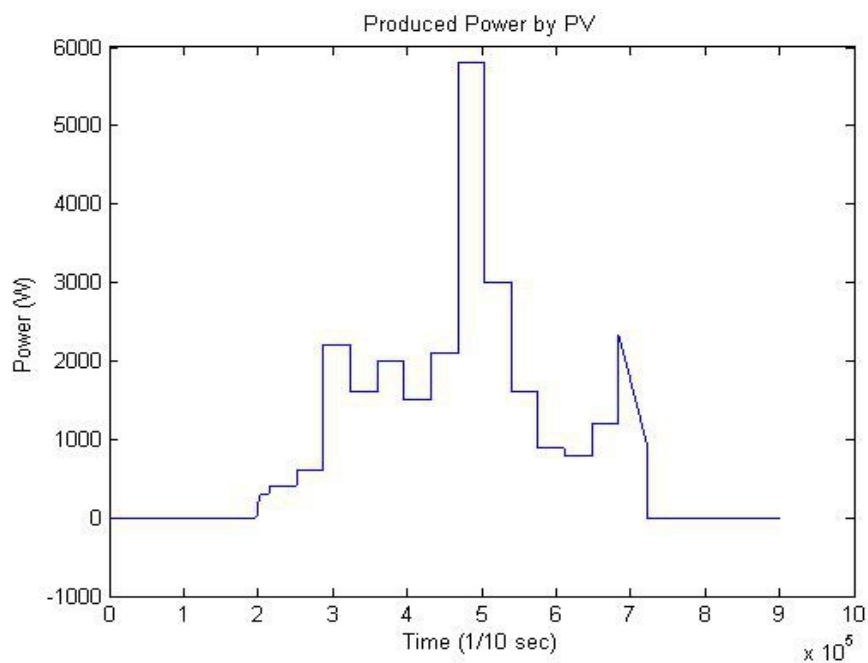
Σχ. 36: Η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin



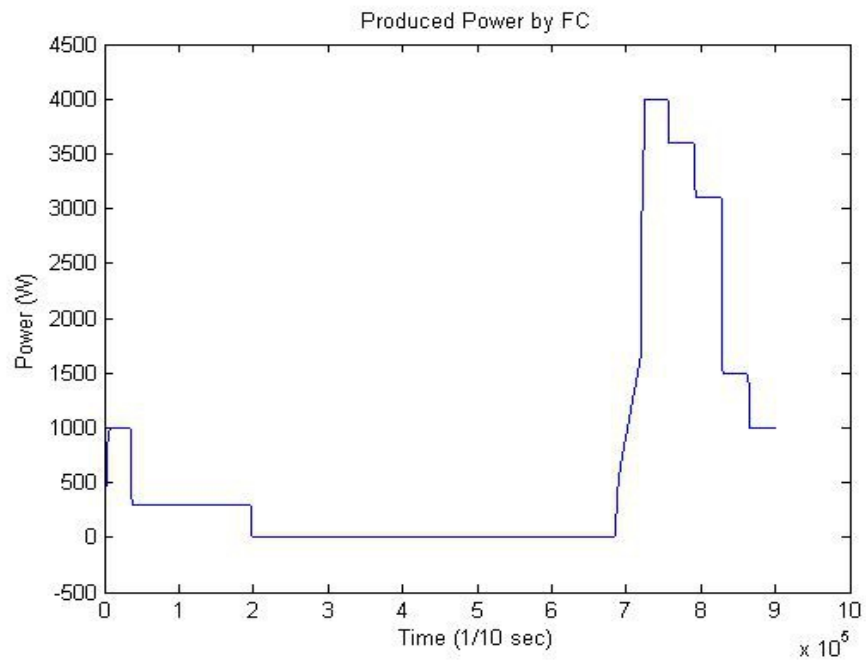
Σχ. 37: Η ακτινοβολία για αυτή τη μέρα



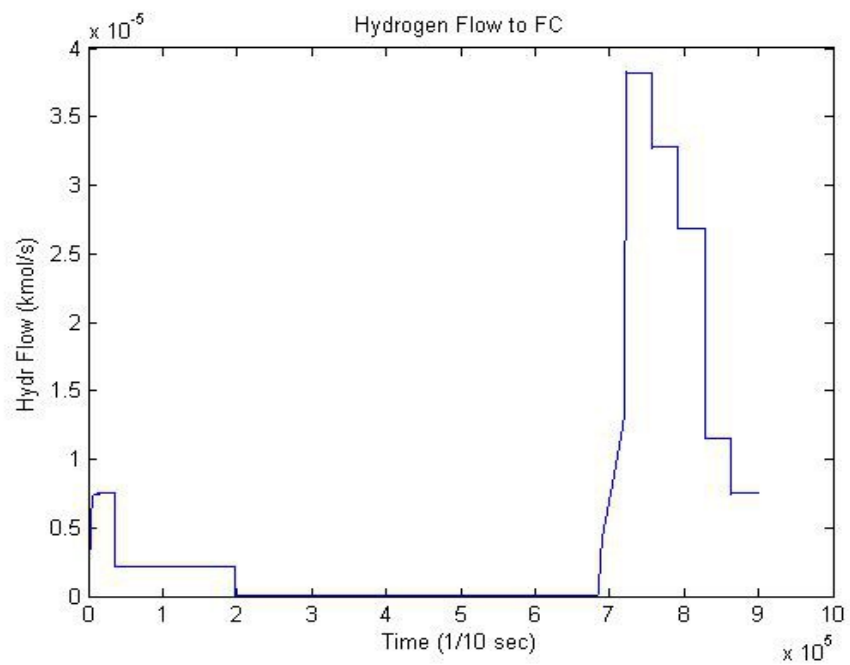
Σχ. 38: Η διαφορά της παραγόμενης ισχύος της φ/β γεννήτριας από την συνολική ζήτηση



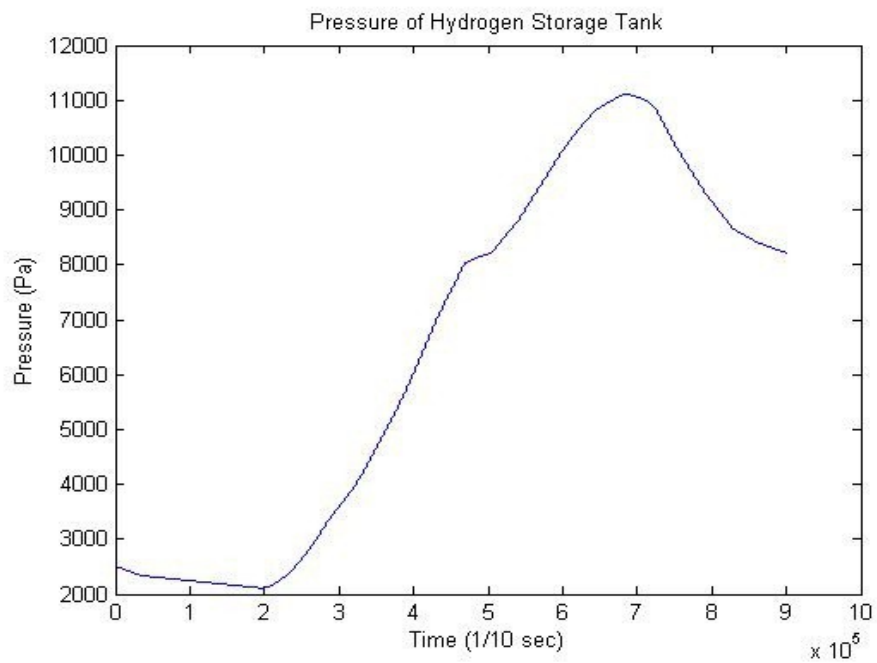
Σχ. 39: Η ισχύς που παράγει η φ/β γεννήτρια κατά τη διάρκεια μίας μέρας



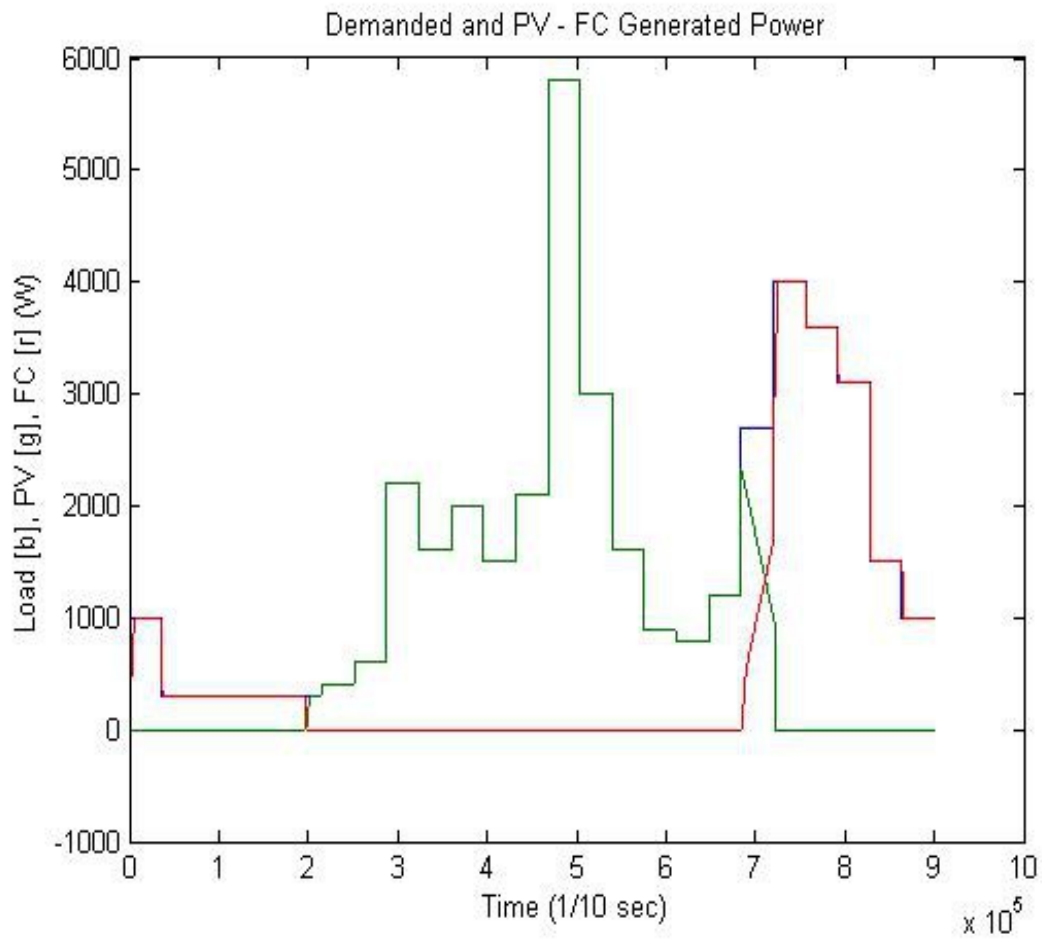
Σχ. 40: Η ισχύς που παράγει η κυψέλη καυσίμων κατά τη διάρκεια μίας μέρας



Σχ. 41: Ροή υδρογόνου που τροφοδοτείται προς την κυψέλη καυσίμων

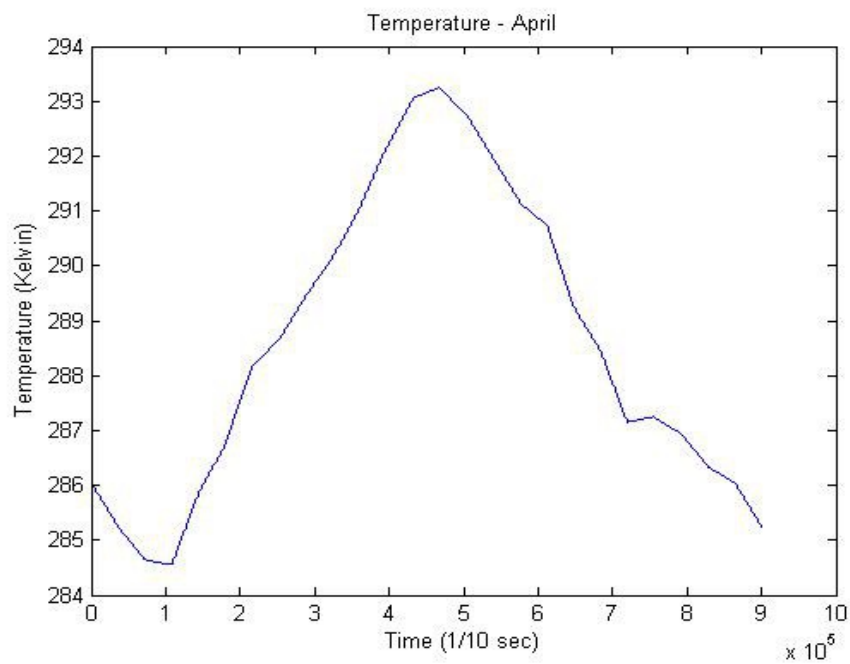


Σχ. 42: Η πίεση της δεξαμενής υδρογόνου

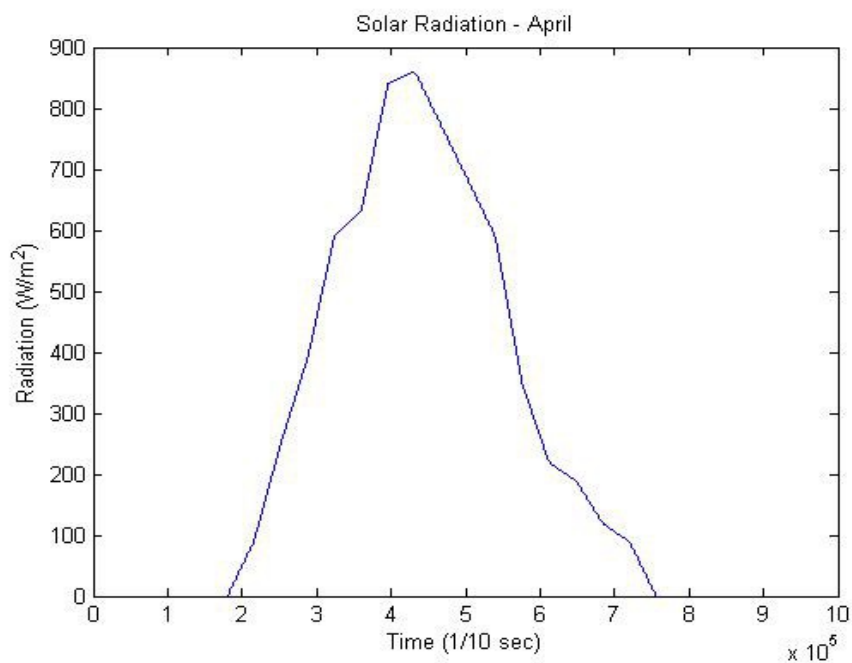


Σχ. 43: Η συνολική ζήτηση (μπλε), η παραγωγή από φ/β (πράσινο) και από την κυψέλη καυσίμου (κόκκινο). Βλέπουμε ότι η ζήτηση καλύπτεται είτε από τα φ/β, είτε από την κυψέλη είτε και από τα δύο όπως στο σημείο 7 της προσομοίωσης όπου η φ/β γεννήτρια δεν αρκεί και τίθεται σε λειτουργία η κυψέλη καυσίμου

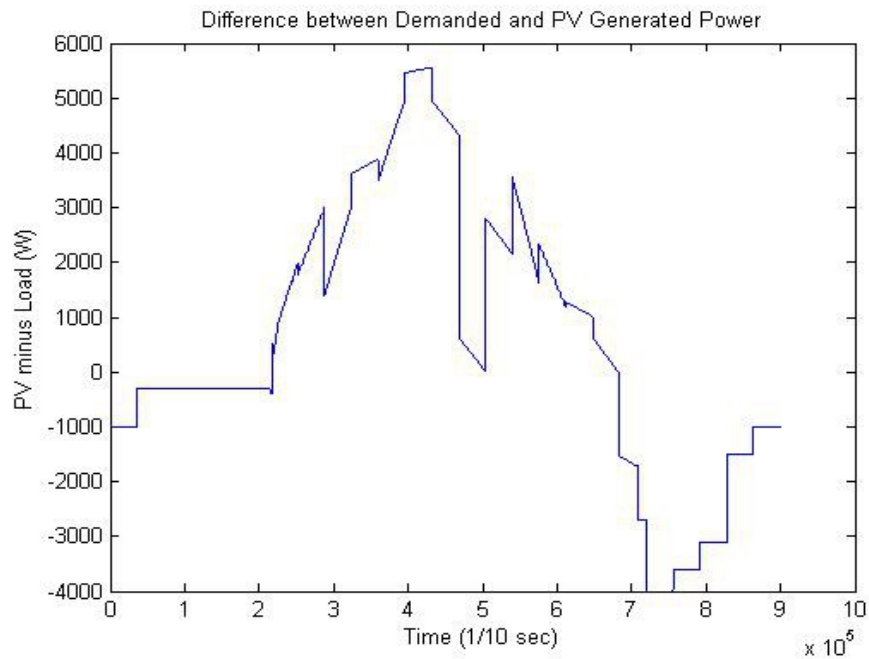
Παρακάτω, στα σχήματα (44 - 51) βλέπουμε τα αποτελέσματα για την ημέρα του Απριλίου.



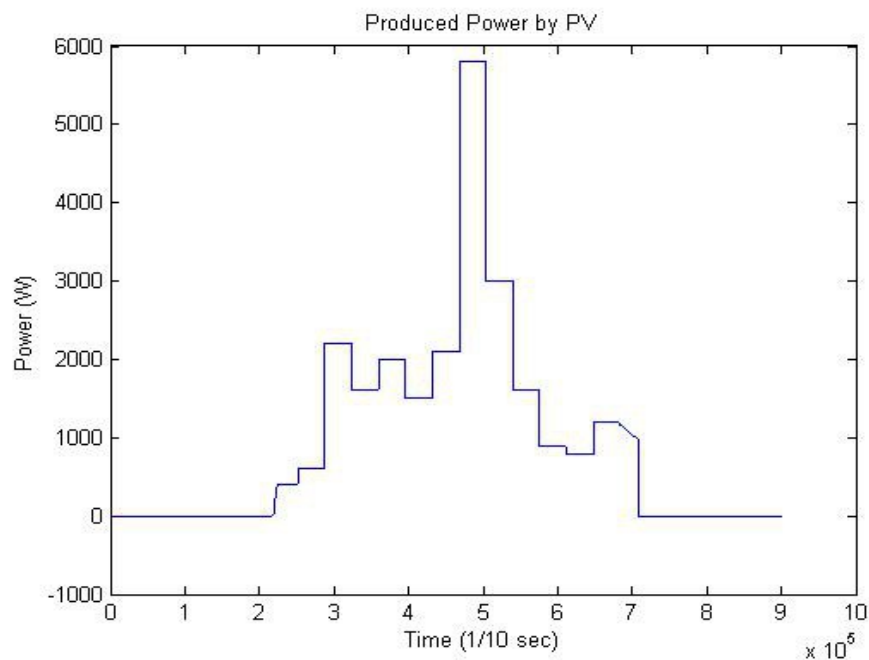
Σχ. 44: Η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin



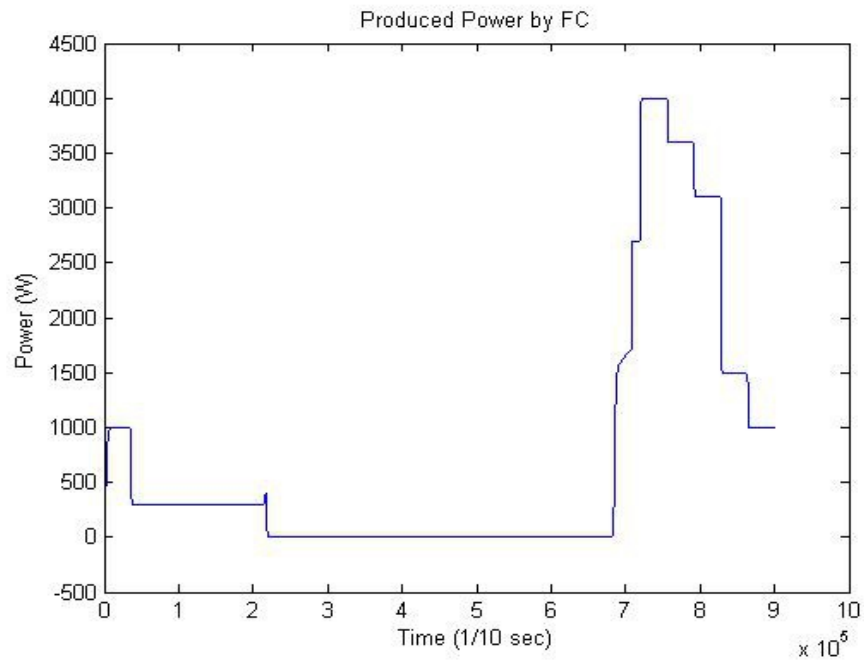
Σχ. 45: Η ακτινοβολία για αυτή τη μέρα



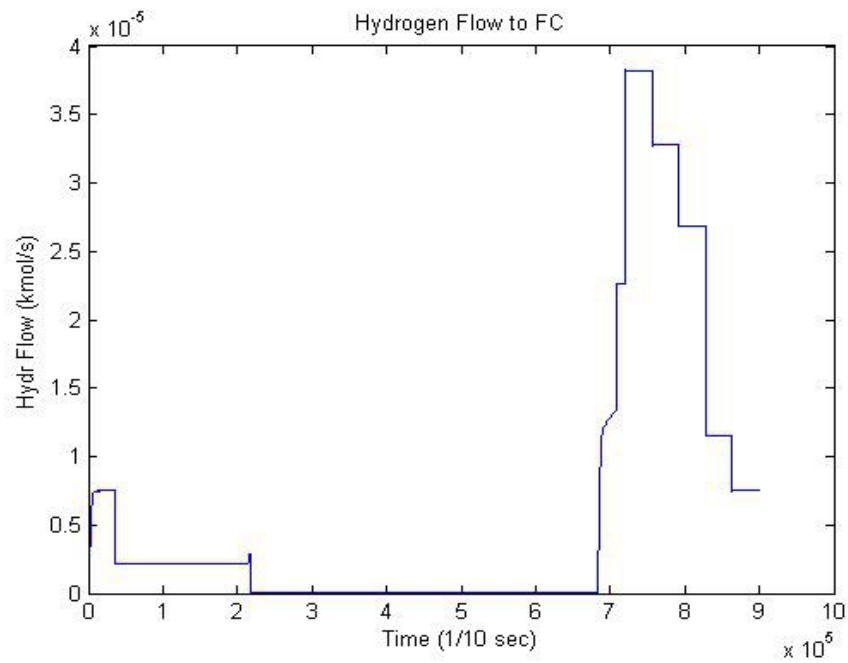
Σχ. 46: Η διαφορά της παραγόμενης ισχύος της φ/β γεννήτριας από την συνολική ζήτηση



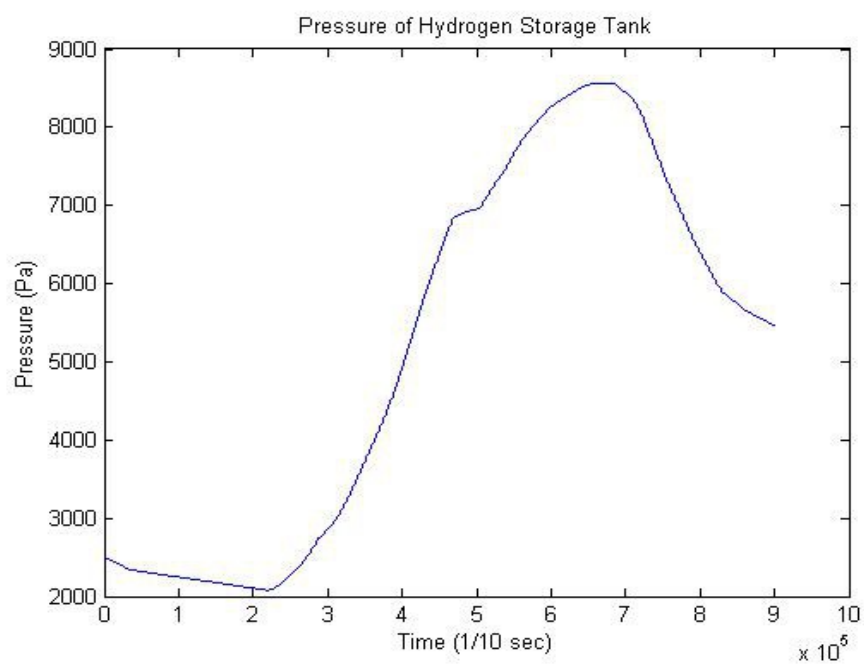
Σχ. 47: Η ισχύς που παράγει η φ/β γεννήτρια κατά τη διάρκεια μίας μέρας



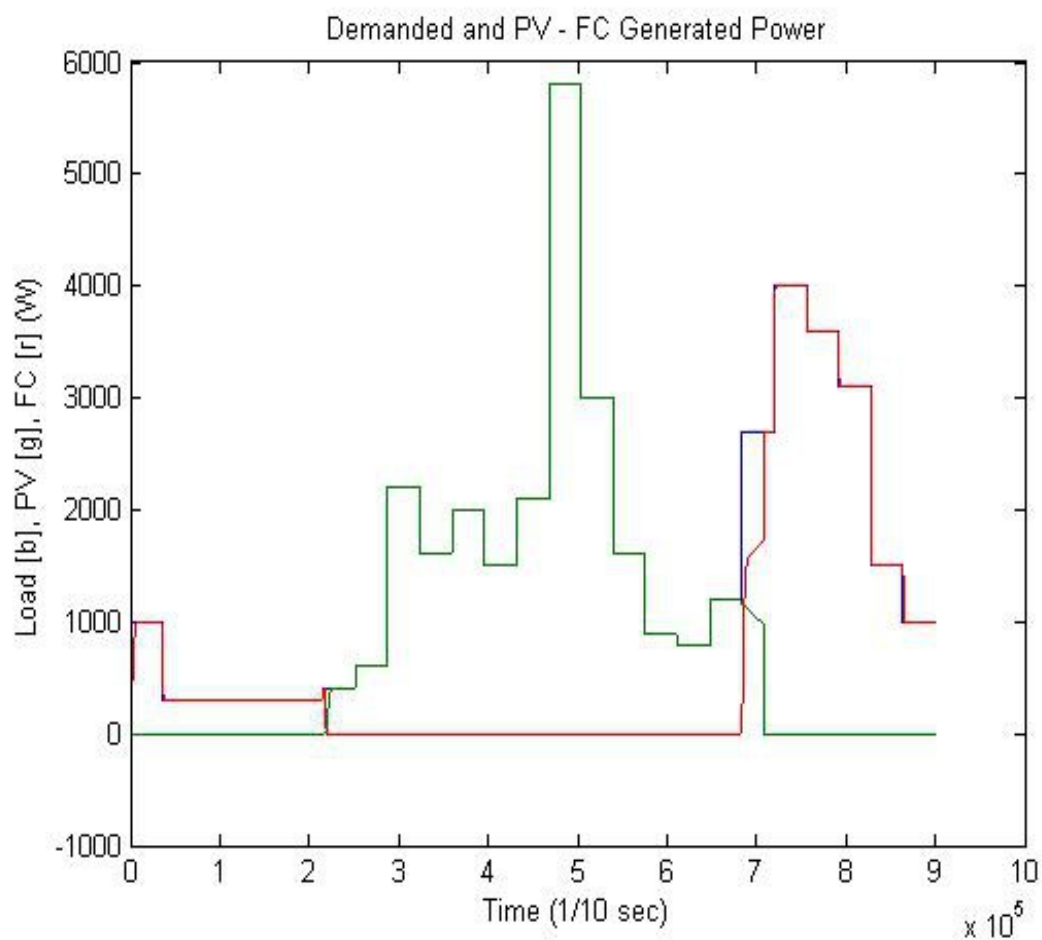
Σχ. 48: Η ισχύς που παράγει η κυψέλη καυσίμου κατά τη διάρκεια μίας μέρας



Σχ. 49: Ροή υδρογόνου που τροφοδοτείται προς την κυψέλη καυσίμου

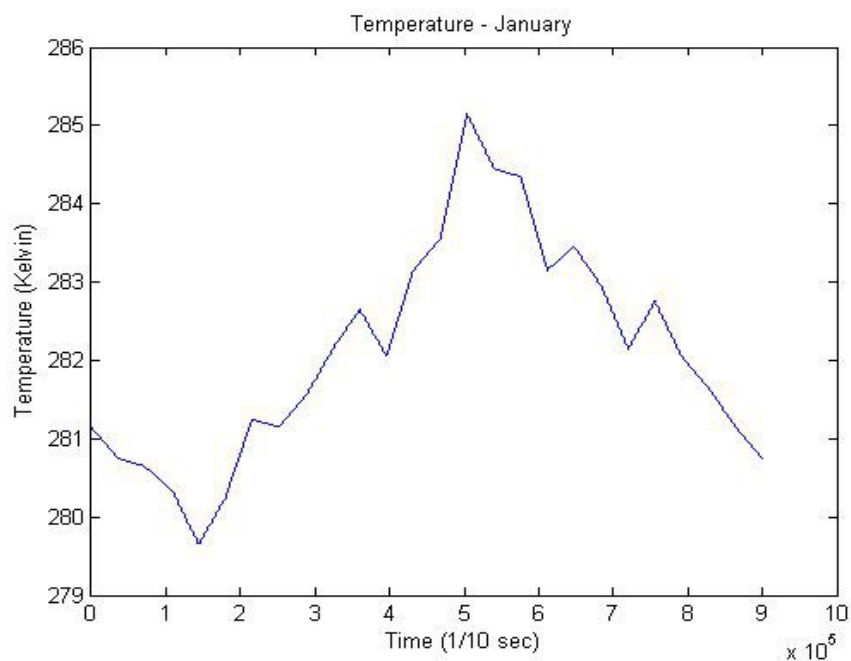


Σχ. 50: Η πίεση της δεξαμενής υδρογόνου

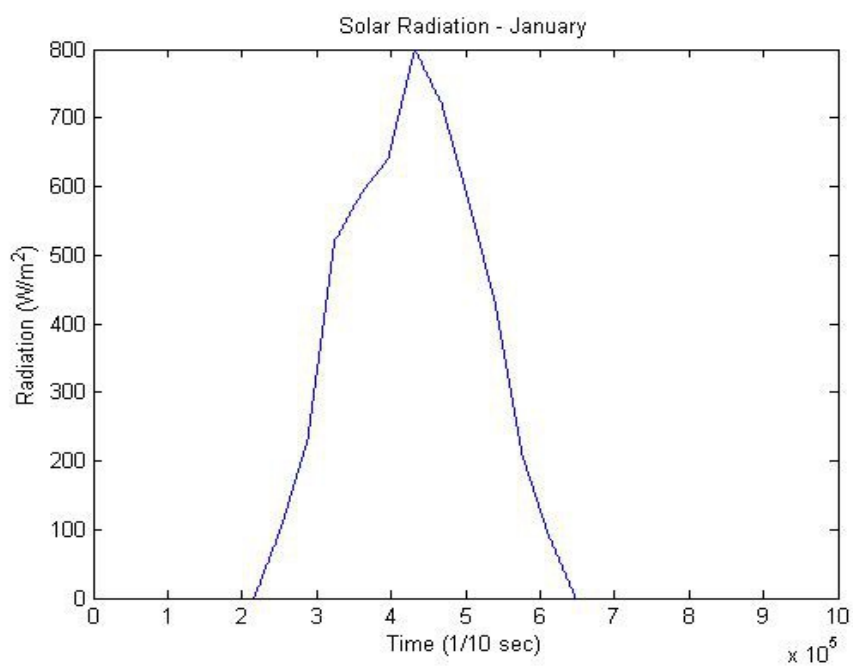


Σχ. 51: Η συνολική ζήτηση (μπλε), η παραγωγή από φ/β (πράσινο) και από την κυψέλη καυσίμου (κόκκινο). Βλέπουμε ότι η ζήτηση καλύπτεται είτε από τα φ/β, είτε από την κυψέλη είτε και από τα δύο όπως στα σημεία 2,1 και 7 της προσομοίωσης όπου η φ/β γεννήτρια δεν αρκεί και τίθεται σε λειτουργία η κυψέλη καυσίμου

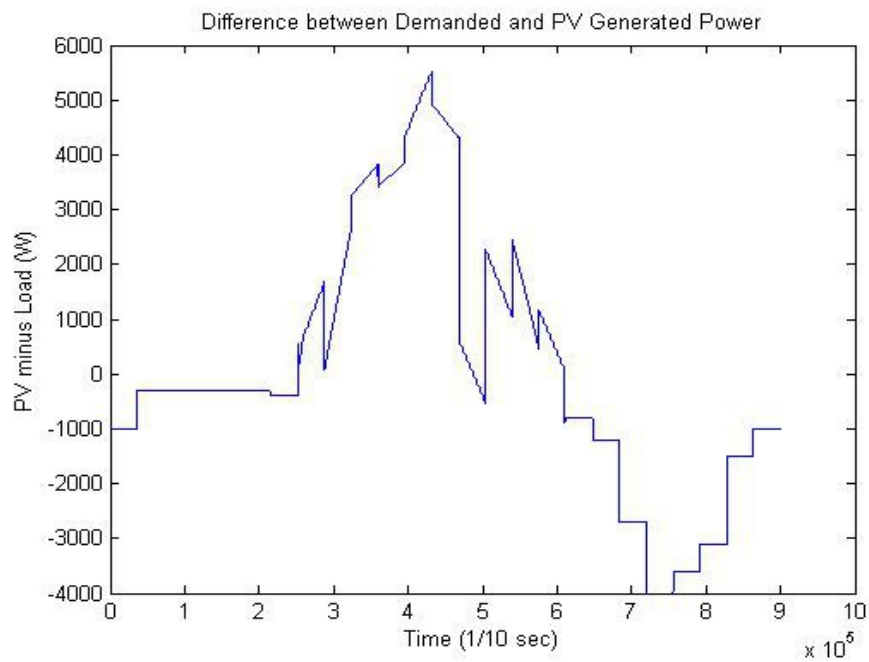
Στα παρακάτω σχήματα (52 - 59) φαίνονται τα αποτελέσματα για τη μέρα του Ιανουαρίου.



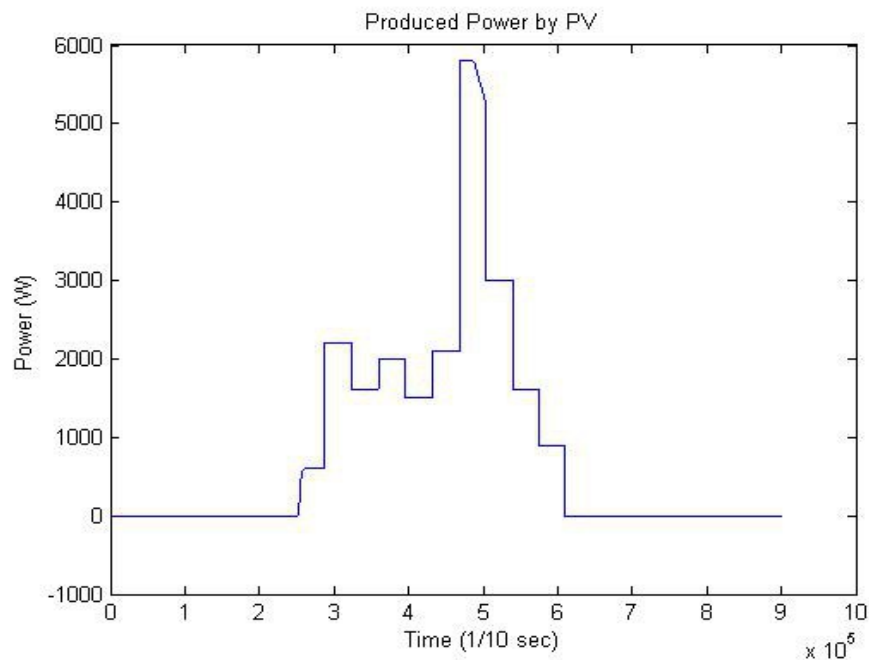
Σχ. 52: Η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin



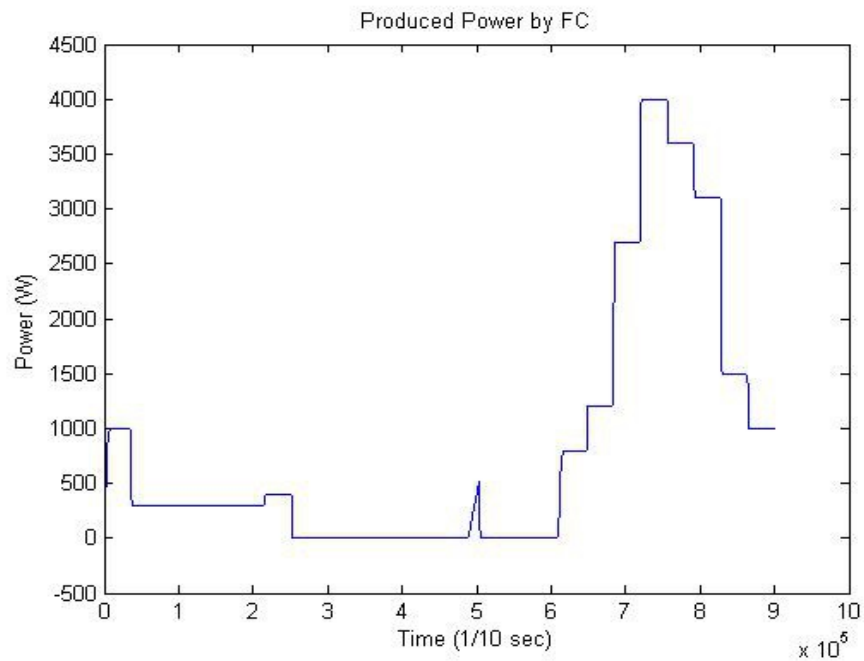
Σχ. 53: Η ακτινοβολία για αυτή τη μέρα



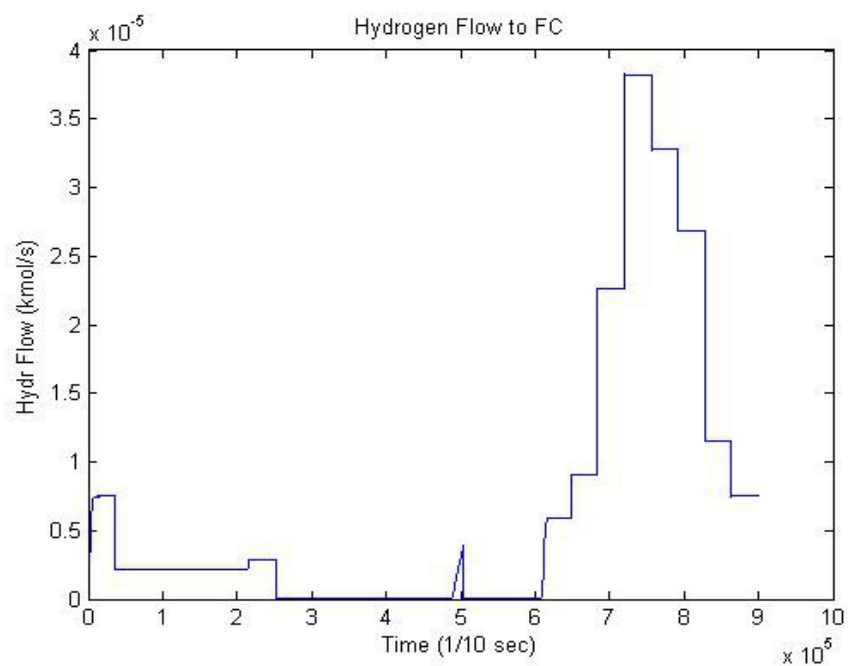
Σχ. 54: Η διαφορά της παραγόμενης ισχύος της φ/β γεννήτριας από την συνολική ζήτηση



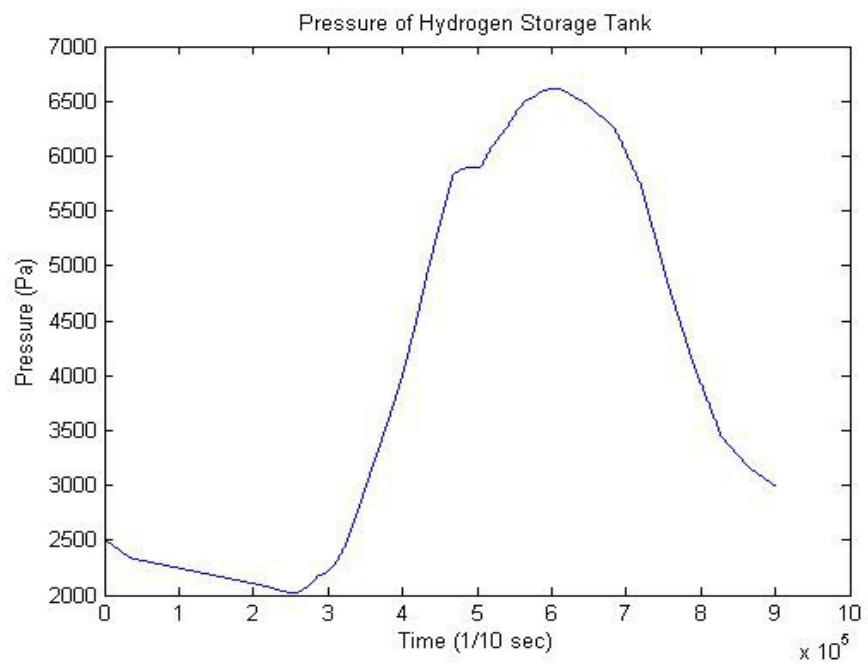
Σχ. 55: Η ισχύς που παράγει η φ/β γεννήτρια κατά τη διάρκεια μίας μέρας



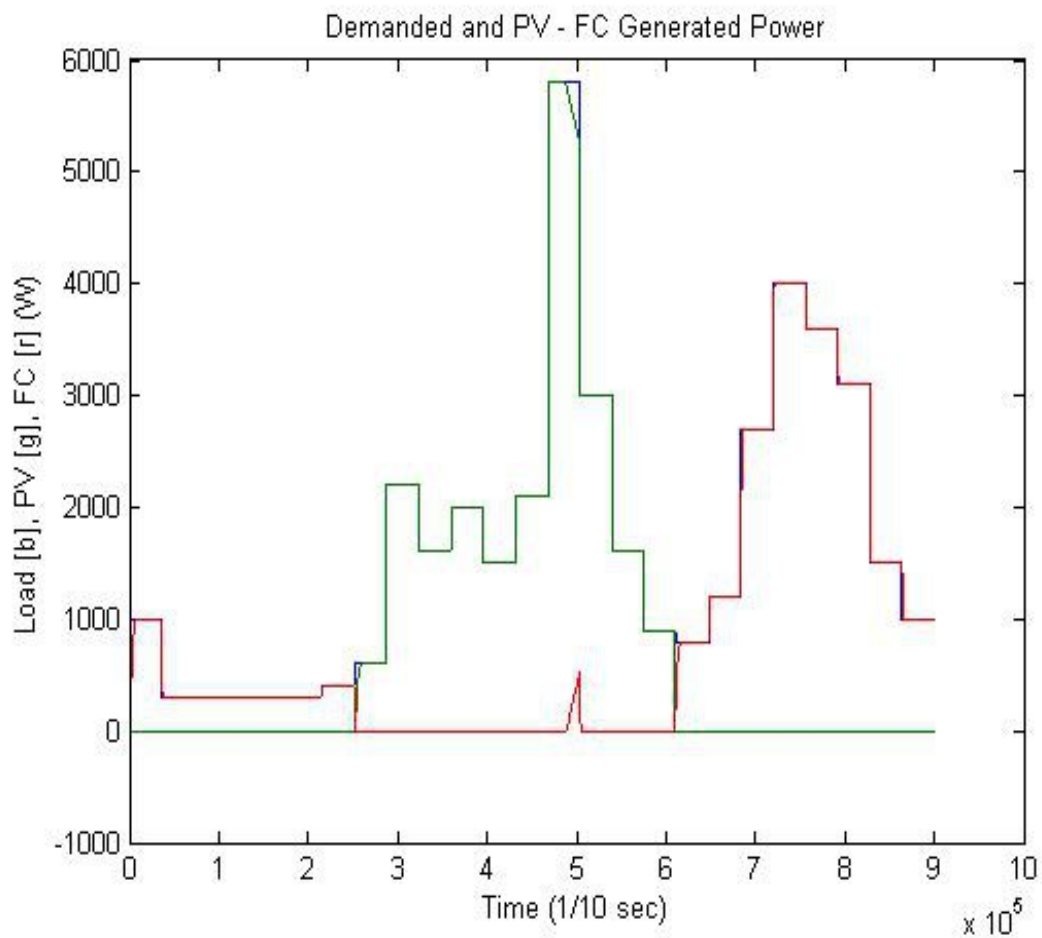
Σχ. 56: Η ισχύς που παράγει η κυψέλη καυσίμων κατά τη διάρκεια μίας μέρας



Σχ. 57: Ροή υδρογόνου που τροφοδοτείται προς την κυψέλη καυσίμων

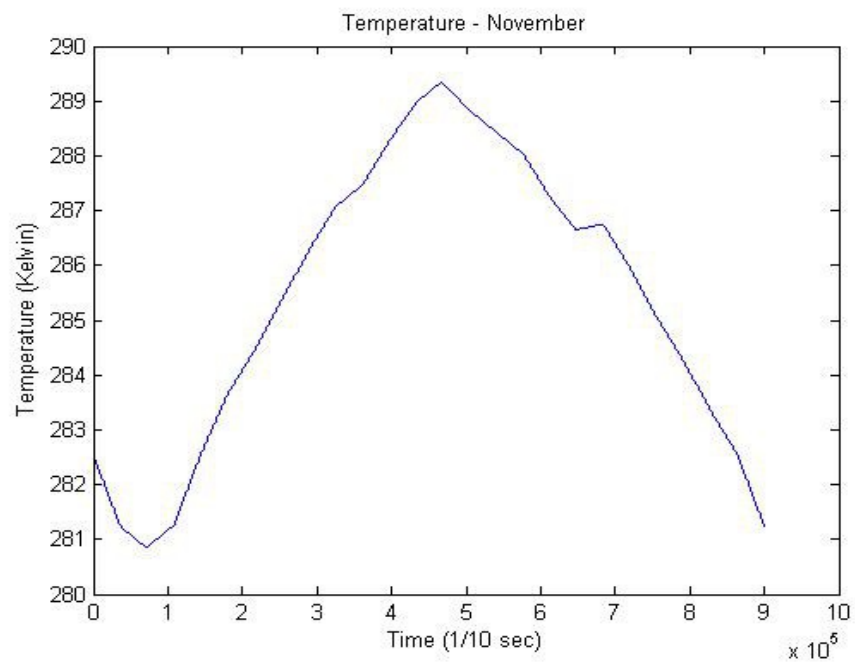


Σχ. 58: Η πίεση της δεξαμενής υδρογόνου

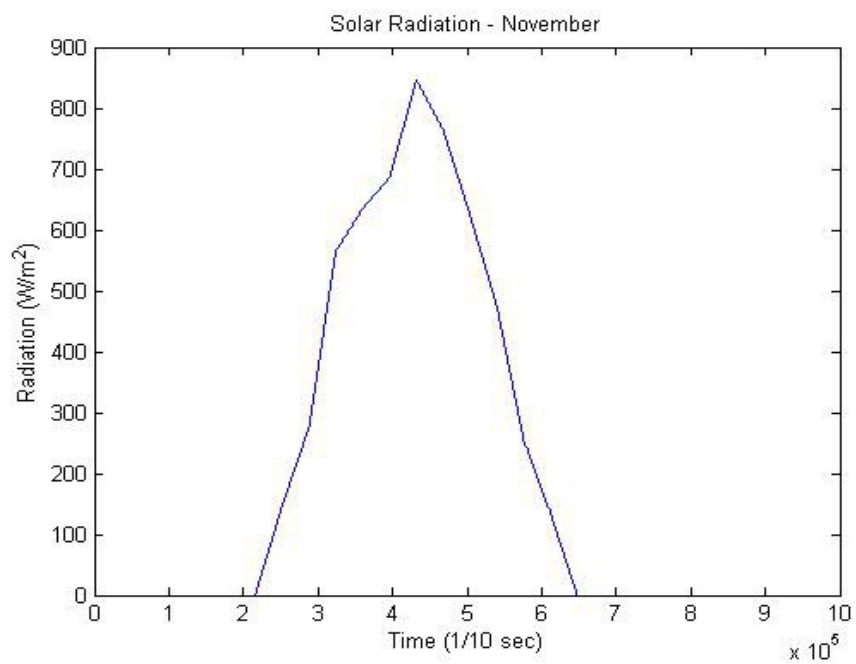


Σχ. 59: Η συνολική ζήτηση (μπλε), η παραγωγή από φ/β (πράσινο) και από την κυψέλη καυσίμου (κόκκινο). Βλέπουμε ότι η ζήτηση καλύπτεται είτε από τα φ/β, είτε από την κυψέλη είτε και από τα δύο όπως στο σημείο 5 της προσομοίωσης όπου η φ/β γεννήτρια δεν αρκεί και τίθεται σε λειτουργία η κυψέλη καυσίμου

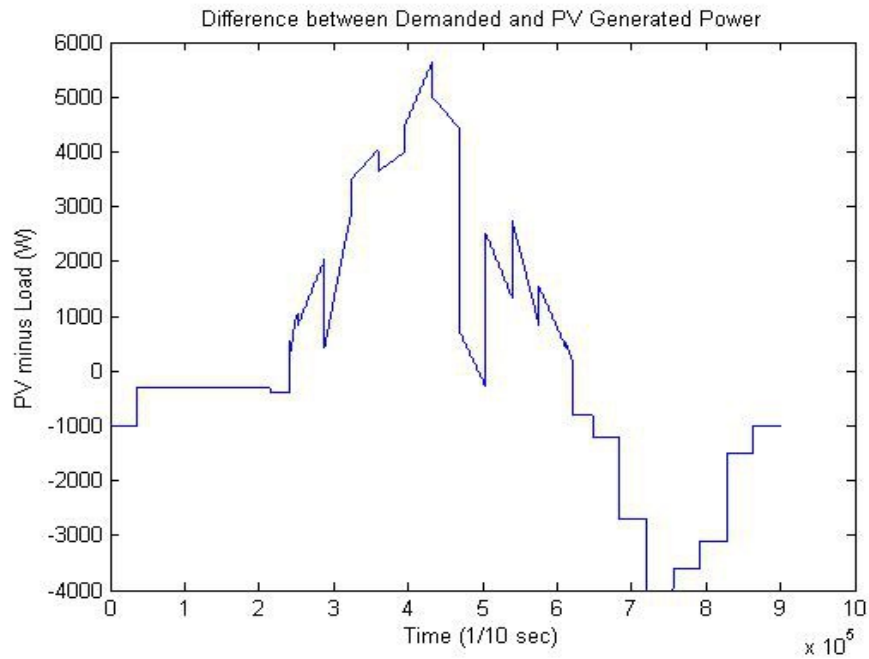
Ακολουθούν τα αποτελέσματα (σχ. 60 - 67) για τη μέρα του Νοεμβρίου.



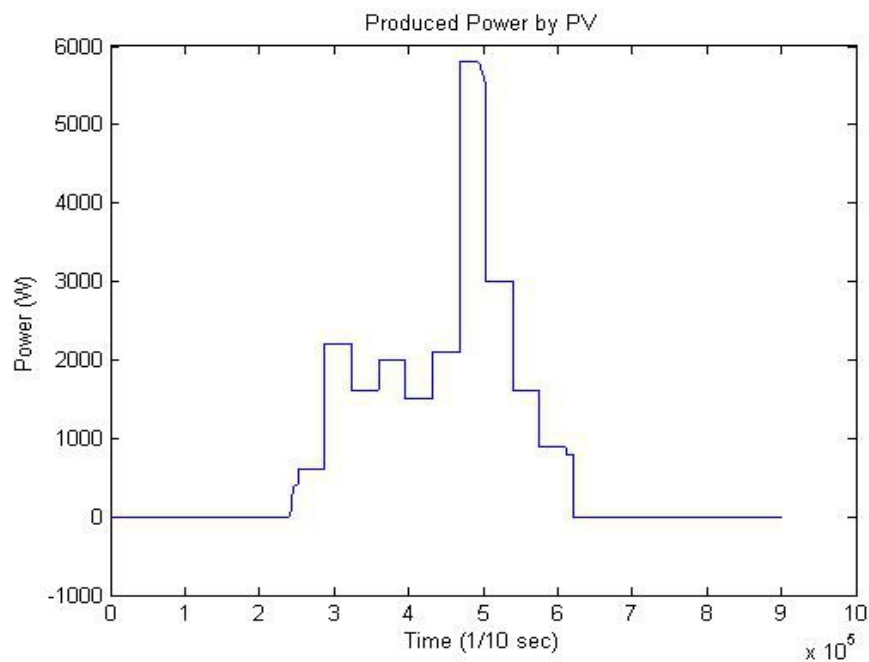
Σχ. 60: Η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin



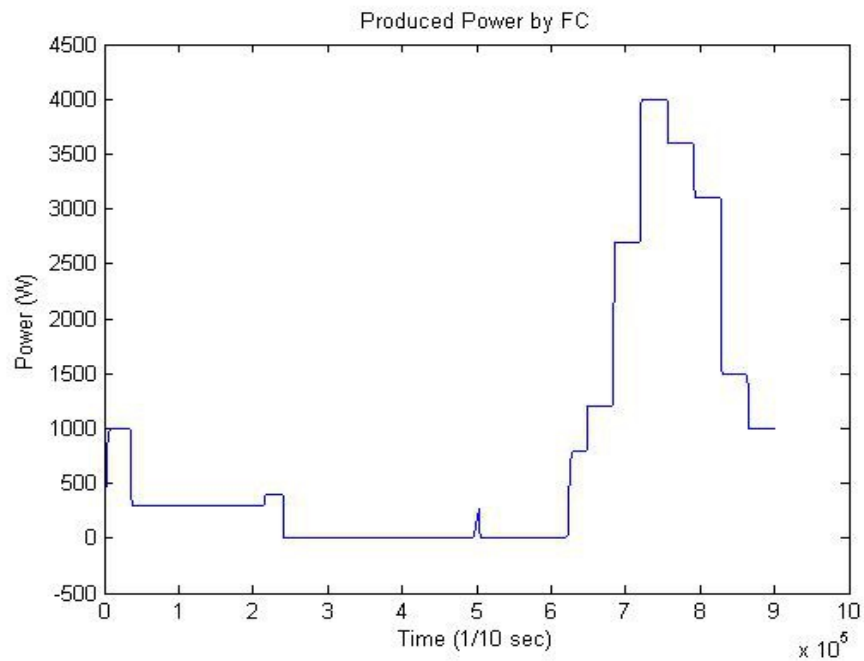
Σχ. 61: Η ακτινοβολία για αυτή τη μέρα



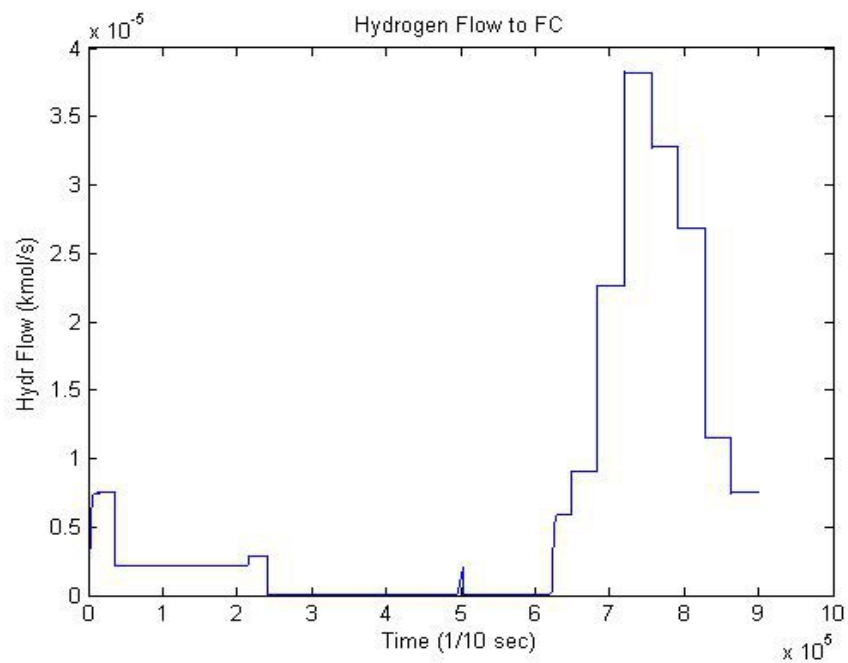
Σχ. 62: Η διαφορά της παραγόμενης ισχύος της φ/β γεννήτριας από την συνολική ζήτηση



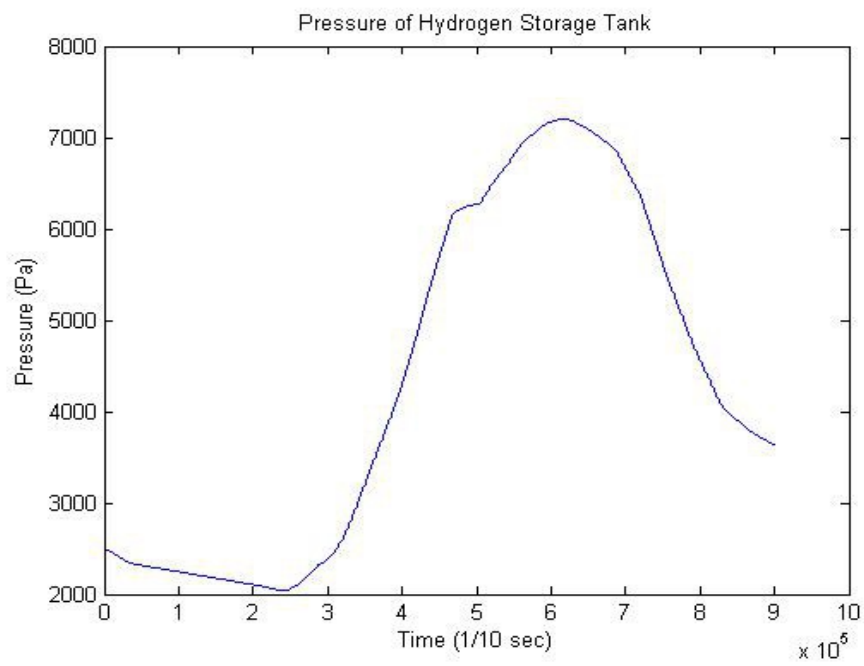
Σχ. 63: Η ισχύς που παράγει η φ/β γεννήτρια κατά τη διάρκεια μίας μέρας



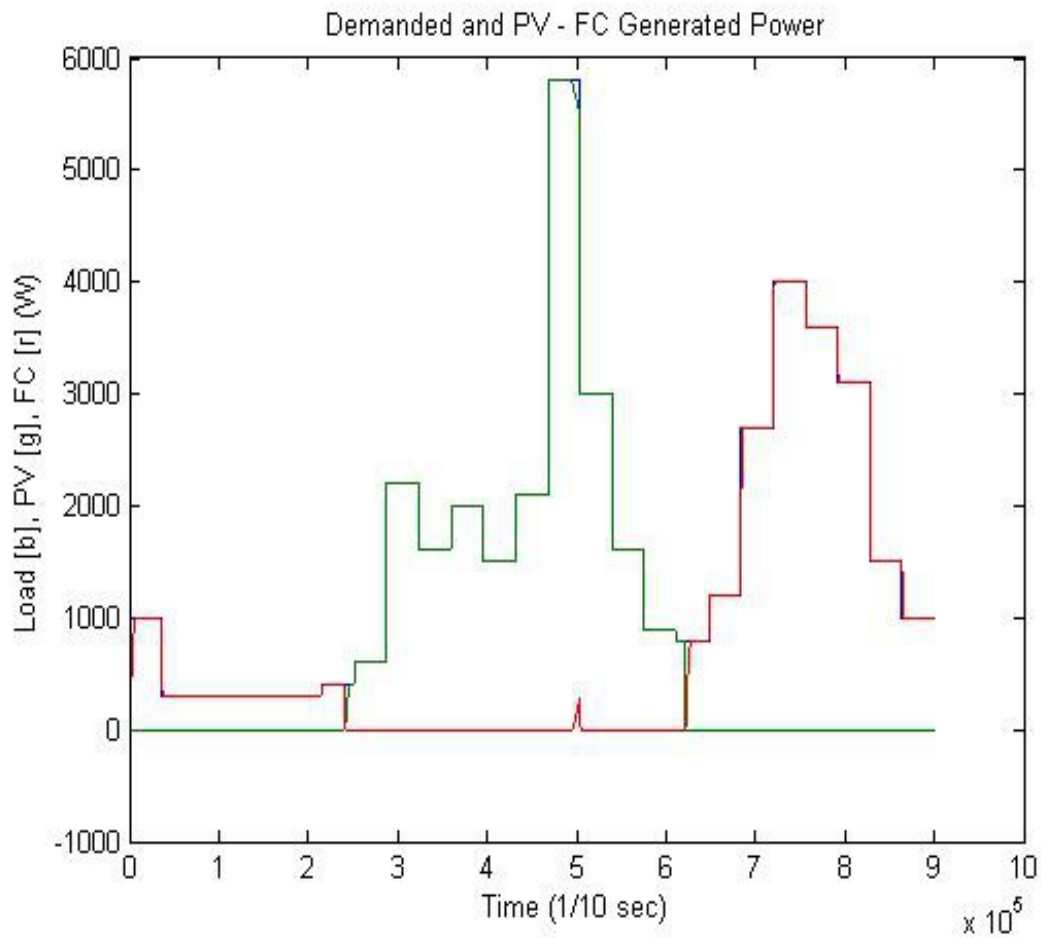
Σχ. 64: Η ισχύς που παράγει η κυψέλη καυσίμων κατά τη διάρκεια μίας μέρας



Σχ. 65: Ροή υδρογόνου που τροφοδοτείται προς την κυψέλη καυσίμων



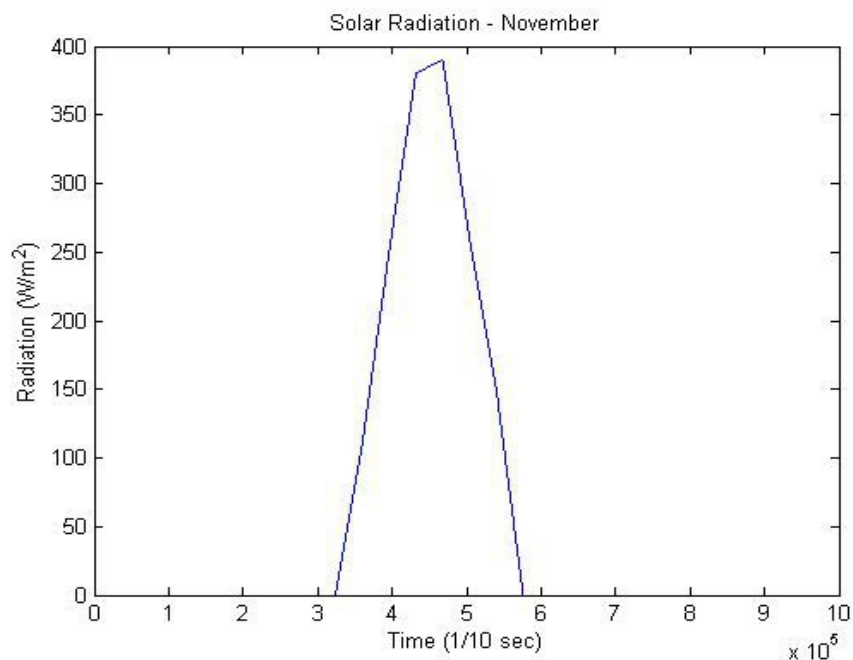
Σχ. 66: Η πίεση της δεξαμενής υδρογόνου



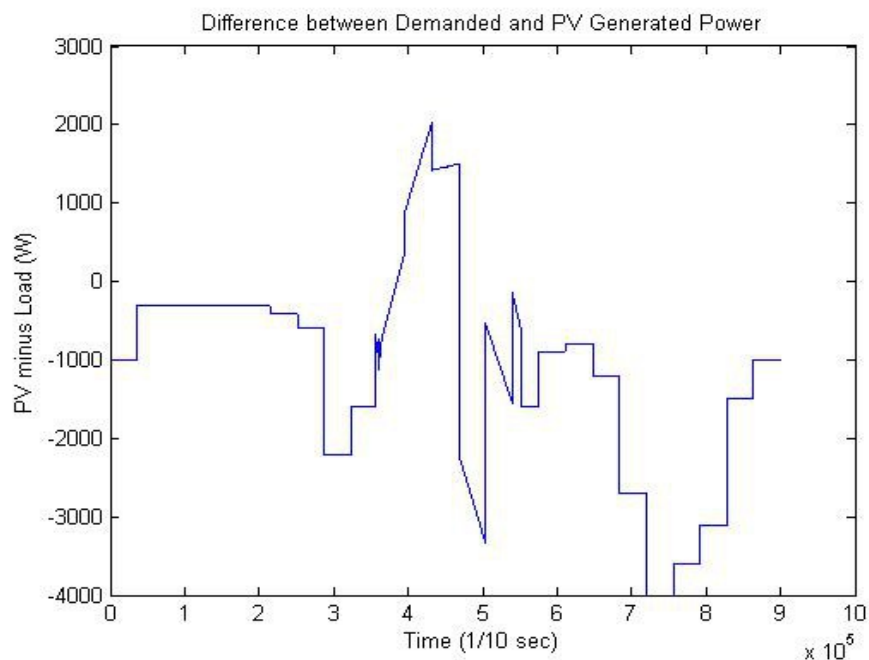
Σχ. 67: Η συνολική ζήτηση (μπλε), η παραγωγή από φ/β (πράσινο) και από την κυψέλη καυσίμου (κόκκινο). Βλέπουμε ότι η ζήτηση καλύπτεται είτε από τα φ/β, είτε από την κυψέλη είτε και από τα δύο όπως στο σημείο 5 της προσομοίωσης όπου η φ/β γεννήτρια δεν αρκεί και τίθεται σε λειτουργία η κυψέλη καυσίμου

5.2.2 Αποτελέσματα για τις Ειδικές Περιπτώσεις

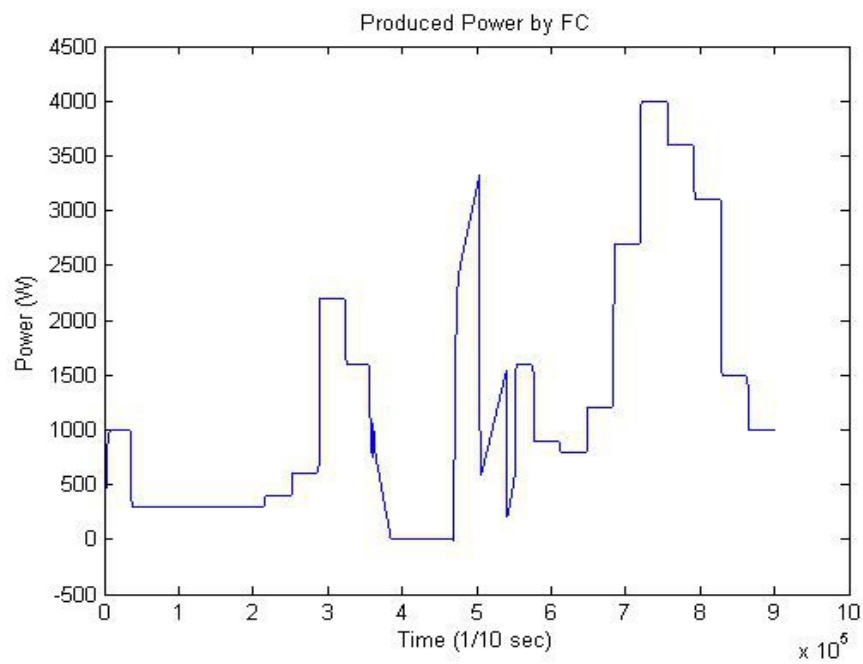
Παρακάτω βλέπουμε τα αποτελέσματα (σχ. 68 - 72) για μια μέρα του Νοεμβρίου με συννεφιά (όπως φαίνεται και από τις χαμηλές τιμές της ακτινοβολίας).



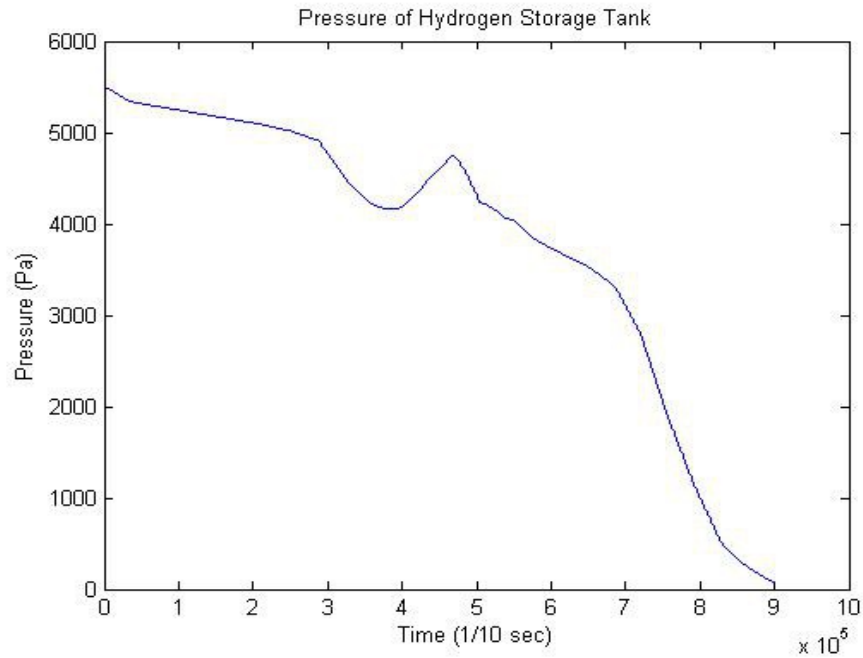
Σχ. 68: Η ακτινοβολία για αυτή τη μέρα



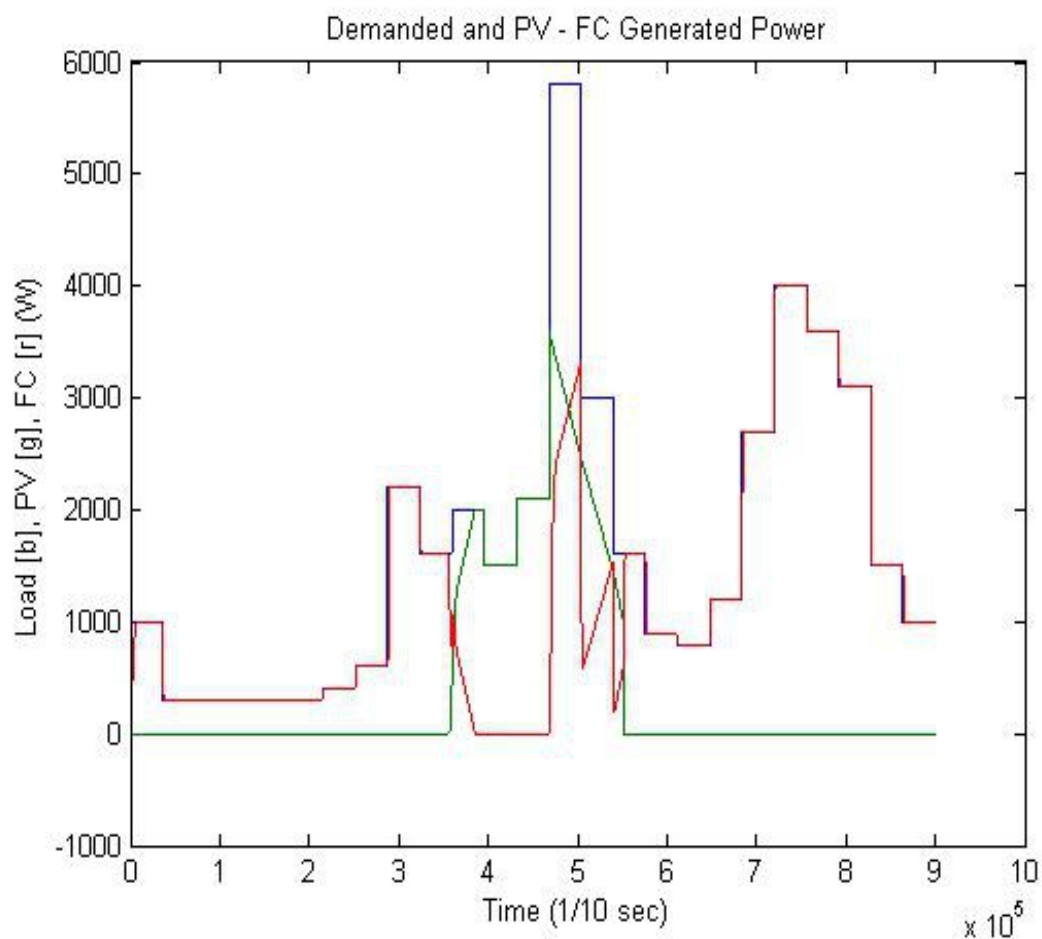
Σχ. 69: Η διαφορά της παραγόμενης ισχύος της φ/β γεννήτριας από την συνολική ζήτηση



Σχ. 70: Η ισχύς που παράγει η κυψέλη καυσίμου κατά τη διάρκεια μίας μέρας

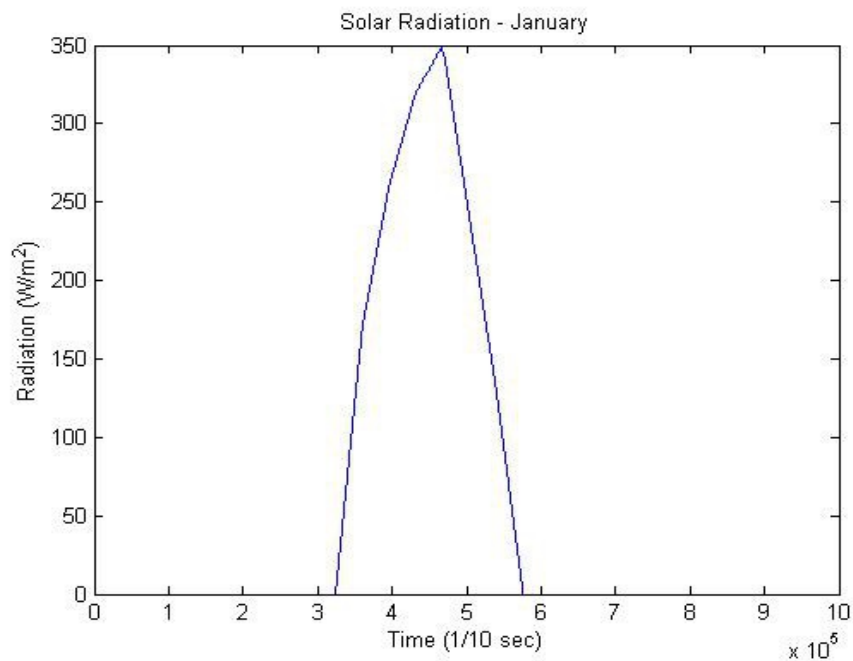


Σχ. 71: Η πίεση της δεξαμενής υδρογόνου

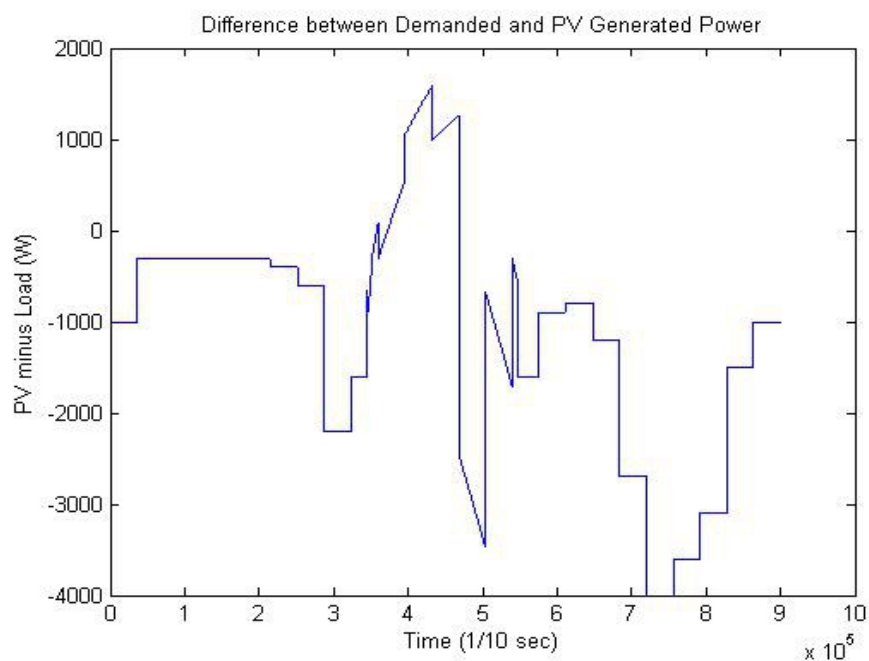


Σχ. 72: Η συνολική ζήτηση (μπλε), η παραγωγή από φ/β (πράσινο) και από την κυψέλη καυσίμου (κόκκινο). Βλέπουμε ότι η ζήτηση καλύπτεται κυρίως από την κυψέλη (εκτός από τα σημεία 4 έως 5,5 της προσομοίωσης όπου λειτουργούν και τα φ/β) λόγω της συννεφιάς

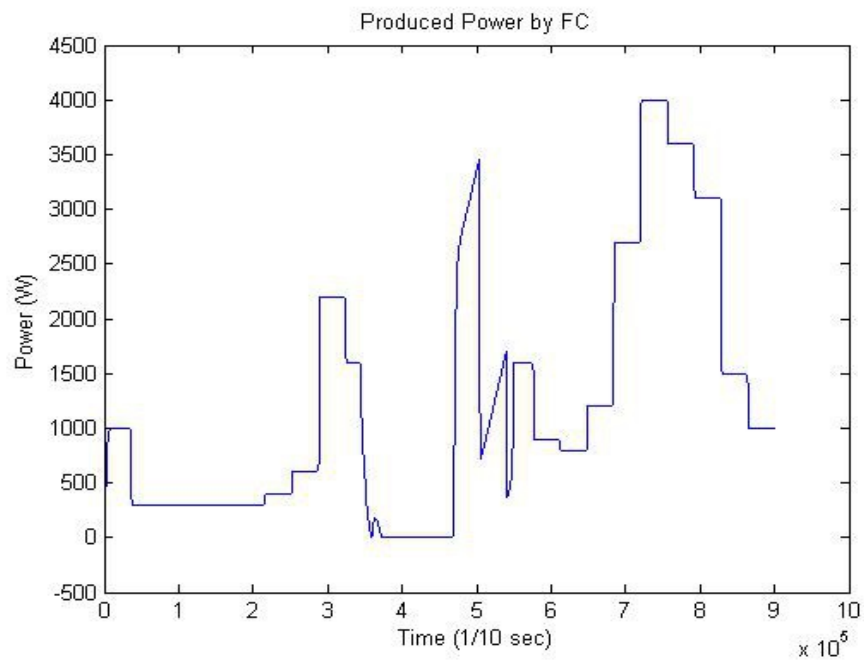
Παρακάτω βλέπουμε τα αποτελέσματα (σχ. 73 - 77) για μια μέρα του Ιανουαρίου με συννεφιά (όπως φαίνεται και από τις χαμηλές τιμές της ακτινοβολίας).



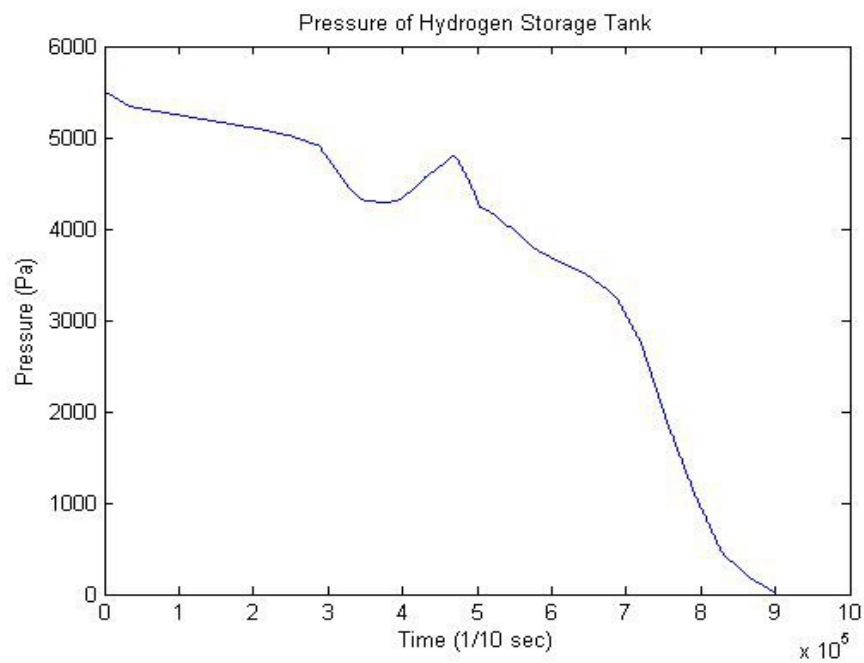
Σχ. 73: Η ακτινοβολία για αυτή τη μέρα



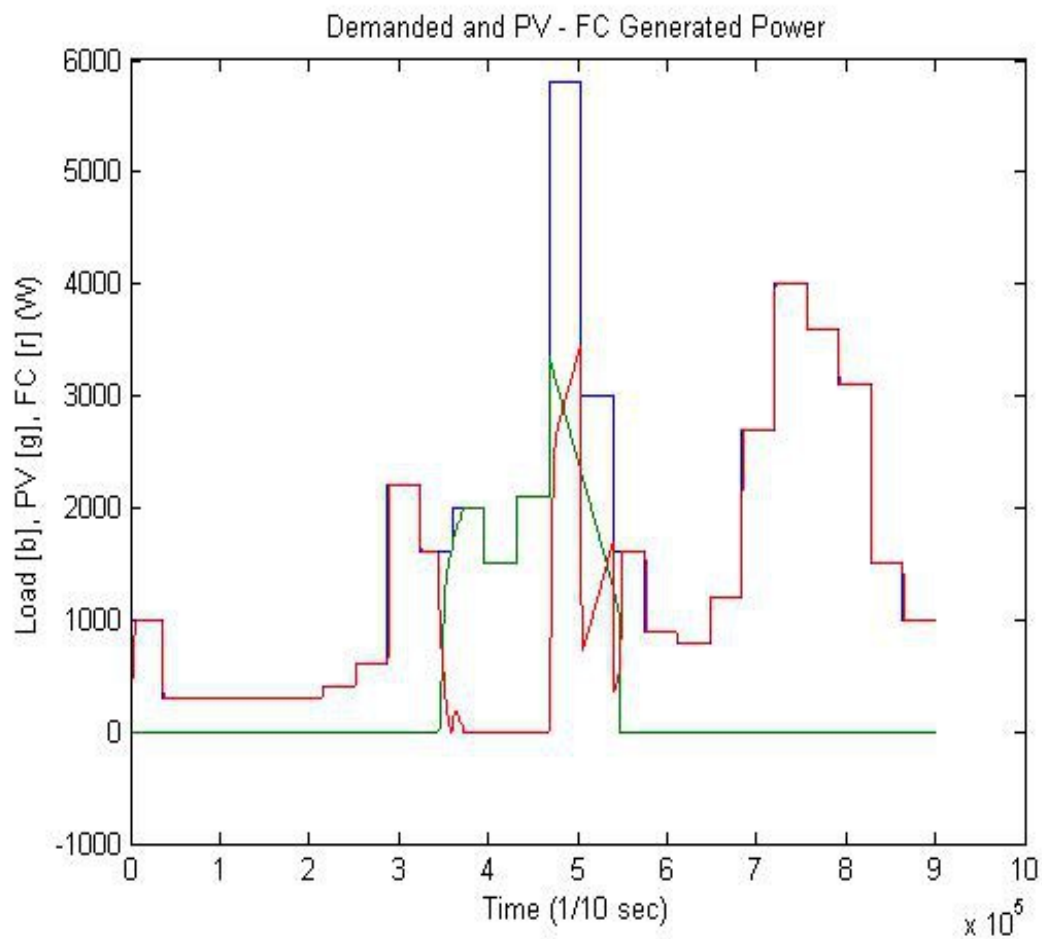
Σχ. 74: Η διαφορά της παραγόμενης ισχύος της φ/β γεννήτριας από την συνολική ζήτηση



Σχ. 75: Η ισχύς που παράγει η κυψέλη καυσίμου κατά τη διάρκεια μίας μέρας

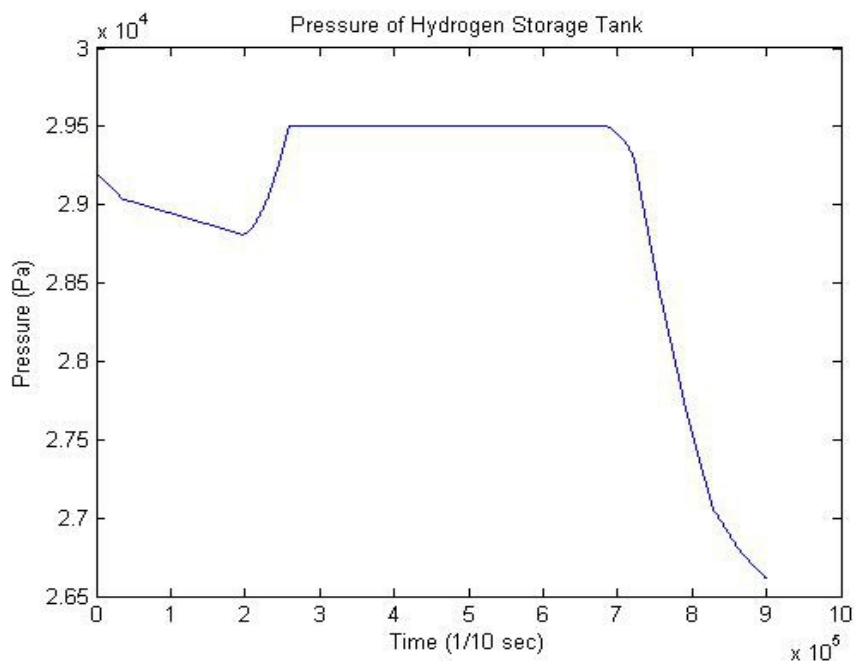


Σχ. 76: Η πίεση της δεξαμενής υδρογόνου



Σχ. 77: Η συνολική ζήτηση (μπλε), η παραγωγή από φ/β (πράσινο) και από την κυψέλη καυσίμου (κόκκινο). Βλέπουμε ότι η ζήτηση καλύπτεται κυρίως από την κυψέλη (εκτός από τα σημεία 4 έως 5,5 της προσομοίωσης όπου λειτουργούν και τα φ/β) λόγω της συννεφιάς

Τέλος, έχουμε τα αποτελέσματα για την ειδική περίπτωση της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου. Όπως βλέπουμε στο σχήμα 78, όταν η πίεση στη δεξαμενή φτάσει στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της (29500 Pa στο σημείο 2,7 της προσομοίωσης) τότε η ροή του υδρογόνου προς τη δεξαμενή σταματά.



Σχ. 78: Η πίεση της δεξαμενής υδρογόνου. Η ροή υδρογόνου διακόπτεται όταν η πίεση φτάσει 29500 Pa

Κεφ. 6 Συμπεράσματα - Προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Στη διπλωματική αυτή εξετάστηκε το εάν ένα αυτόνομο (μη συνδεδεμένο στο δίκτυο) υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από φωτοβολταϊκά και κυψέλη καυσίμου μπορεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες ενός χρήστη.

Για να γίνει αυτό, το κάθε μέρος του συστήματος (φωτοβολταϊκή γεννήτρια, κυψέλη καυσίμου, ηλεκτρολύτης, δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου) μοντελοποιήθηκε με μαθηματικές εξισώσεις και σχεδιάστηκε ξεχωριστά στο Simulink της Matlab.

Στη συνέχεια, το σύστημα προσομοιώθηκε για διάφορες ημέρες του χρόνου και υπό διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας και από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι:

- είχαμε αδιάλειπτη παροχή ισχύος,
- σωστή λειτουργία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας (και του ελεγκτή M.P.P.T.) με κάλυψη των αναγκών το πρωί τις περισσότερες φορές (εκτός από τις ειδικές περιπτώσεις με πολύ χαμηλή ακτινοβολία) και τροφοδότηση του ηλεκτρολύτη για την παραγωγή υδρογόνου και αποθήκευσής του για μελλοντική χρήση,
- σωστή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου με κάλυψη των αναγκών όποτε χρειάστηκε, είτε τις βραδινές ώρες (όταν δεν έχουμε λειτουργία φ/β) είτε για μεγάλα χρονικά διαστήματα μέσα στα 24ωρα της προσομοίωσης για άσχημες συνθήκες ακτινοβολίας,
- σωστή λειτουργία του ηλεκτρολύτη και της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου αφού η λειτουργία του ηλεκτρολύτη διακόπτεται όταν η πίεση της δεξαμενής φτάσει στη μέγιστη τιμή της και σταματά η τροφοδότηση της δεξαμενής.

Είναι μια εργασία που επικεντρώνεται στην παραγωγή και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση καθαρών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε μια εποχή που η επιστημονική κοινότητα αναζητά τρόπους για μεγαλύτερης κλίμακας εφαρμογές που χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως καύσιμο σε συνδυασμό με άλλες μορφές ενέργειας όπως η ηλιακή.

6.2 Προτάσεις για Περαιτέρω Προεκτάσεις

- Προσθήκη μιας ακόμα ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, για παράδειγμα εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με την προσθήκη μιας ανεμογεννήτριας.
- Πλήρη ανάλυση (σχεδιασμός και κόστος) για την εγκατάσταση αυτού του αυτόνομου συστήματος ενέργειας.
- Προσθήκη επιπλέον διατάξεων, όπως πχ συστοιχία υπερπυκνωτών.
- Προσομοίωση του συστήματος με πραγματικά δεδομένα για τη συγκεκριμένη περιοχή για τη διάρκεια ενός έτους.
- Προσομοίωση με χρήση διαφορετικών τεχνολογιών είτε για την φωτοβολταϊκή γεννήτρια είτε για την κυψέλη καυσίμου.

Κεφ. 7 Βιβλιογραφία

- [1] Blaabjerg F, Zhe C, Kjaer SB. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems. IEEE Transactions on Power Electronics 2004;19(5):1184-94.
- [2] Sukamongkol Y, Chungpaibulpatana S, Ongsakul W. A simulation model for predicting the performance of a solar photovoltaic system with alternating current loads. Renewable Energy 2002;27(2):237-58.
- [3] Santarelli M, Pellegrino D. Mathematical optimization of a RES-H₂ plant using a black box algorithm. Renewable Energy 2005;30(4):493-510.
- [4] El-Shatter TF, Eskandar MN, El-Hagry MT. Hybrid PV/fuel cell system design and simulation. Renewable Energy 2002;27(3):479-85.
- [5] Gorgun H. Dynamic modeling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer. International Journal of Hydrogen Energy 2006;31(1):29-38.
- [6] <http://www.energypress.gr/news/feature/IEA-World-Energy-Outlook-2013>
- [7] <http://allaboutenergy.gr/Paragogi327.html>
- [8] Ε. ΒΡΕΤΤΟΣ, “Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών – Υδρογόνου”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2010.
- [9] Μ. ΑΝΤΩΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ, “Ανάλυση Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ενέργειας που συνδυάζει ΑΠΕ και Τεχνολογίες Υδρογόνου”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2010.
- [10] Η. ΓΚΟΥΓΚΑΣ, “Ανάλυση Λειτουργίας και Ισοδύναμων Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων για τη Μελέτη της Δυναμικής Συμπεριφοράς Κυψελών Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC)”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2009.
- [11] Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών.
- [12] <http://library.tee.gr/digital/m2483>
- [13] Antonio Luque and Steven Hegedus: “Handbook of Photovoltaic Science and Engineering”, Copyright John Wiley & Sons Ltd, England, August 2005.
- [14] Θ. Ζαχαρίας: “Ηπιες Μορφές Ενέργειας ΙΙ”, Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων, Αθήνα 1986.
- [15] Κ. Καγκαράκης: “Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1992.
- [16] T. Esmar, P. L. Chapman: “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques”, IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.22, No. 7, pp. 439-449, June 2007.
- [17] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo: M. Vitelli: “Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method”, IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 20, No. 4, pp.

963-973, July 2005.

- [18] M. A. S. Masoum, H. Dehbonei, E. F. Fuchs: "Theoretical and experimental analysis of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking", IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 17, No. 4, pp. 514-522, December 2002.
- [19] D. Shmilovitz: "On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters", IEEE Electric Power Applications, Vol. 152, No. 2, March 2005, pp. 239-248.
- [20] <http://www.eia.doe.gov/>
- [21] M.J. KHAN, M.T. IQBAL, "Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system", Renewable Energy, Vol. 30, pp. 421-439, 2005.
- [22] Uzunoglu M, Alam MS. Dynamic modeling, design and simulation of a combined PEM fuel cell and ultra-capacitor system for stand alone residential applications. IEEE Transactions on Energy Conversion 2006;21(3):767-75.
- [23] El-Shark MY, Rahman A, Alam MS, Byrne PC, Sakla AA, Thomas T. A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications. Journal of Power Sources 2004;138(1-2):199-204.
- [24] Padulles J, Ault GW, McDonald JR. An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation. Journal of Power Sources 2000;86(1-2): 495-500.
- [25] Uzunoglu M., Onar O.C., Alam M.S. Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications. Renewable Energy 2009; 509-520
- [26] Hamelin J, Agbossou K, Laperriere A, Laurencelle F, Bose TK. Dynamic behavior of a PEM fuel cell stack for stationary applications. International Journal of Hydrogen Energy 2001;26(6):625-9.
- [27] Hauer KH. Analysis tool for fuel cell vehicle hardware and software (controls) with an application to fuel cell economy comparisons of alternative system designs. Ph.D. Dissertation, Department of Transportation Technology and Policy, University of California Davis; 2001.
- [28] FRANO BARBIR, PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources, Solar Energy, Vol. 78 (2005): 661-669.
- [29] Krishna R., Titus E., Salimian M., Okhay O. Hydrogen Storage for Energy Application, 2012, 10.5772/51238.
- [30] Tariq A., Asim M., Tariq M. Simulink based modeling, simulation and Performance Evaluation of an MPPT for maximum power generation on resistive load, 2011 2nd International Conference on Environmental Science and Technology IPCBEE vol.6 (2011).
- [31] Villalva M. G., Gazoli J. R., Ruppert F. Modeling and Circuit-Based Simulation of Photovoltaic Arrays, Brazilian Journal of Power Electronics, 2009 vol. 14, no. 1, pp. 35-45, ISSN 1414-8862.

- [32] Villalva M. G., Gazoli J. R., Ruppert F. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 24, NO. 5, MAY 2009.
- [33] Al-Refai M. A., Matlab/Simulink Simulation of Solar Energy Storage System, International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering Vol:8 No:2, 2014.
- [34] Batard C., Poitiers F., Millet C., Ginot N. Simulation of Power Converters Using Matlab-Simulink, 2012, <http://dx.doi.org/10.5772/46419>.
- [35] Tucker J. Understanding output voltage limitations of DC/DC buck converters, 2008 Texas Instruments Incorporated.