



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική εργασία:

***Σχεδιασμός και Προσομοίωση Λειτουργίας Αυτόνομου Υβριδικού
Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Χρήση ΑΠΕ και
Κυψελών Υδρογόνου***

Δινοπούλου Βαΐα

A.M. 2007030092

Επιτροπή:

Γεώργιος Σταυρακάκης (Επιβλέπων Καθηγητής)

Γεώργιος Σταυρουλάκης (Καθηγητής)

Κωνσταντίνος Καλαϊτζάκης (Καθηγητής)

Χανιά, Νοέμβριος 2016

Diploma Thesis:

***Design and Simulation of the Operation of an Autonomous Hybrid Power System
Using Renewable Energy Sources and Hydrogen Fuel Cells***

Dinopoulou Vaia

Thesis Committee:

Georgios Stavrakakis (Supervisor)

Georgios Stavroulakis (Professor)

Konstantinos Kalaitzakis (Professor)

Chania, November 2016

Περίληψη

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες. Σημαντικοί παράγοντες, όπως η απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα όπως είναι το πετρέλαιο καθώς η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια συνεχώς αυξάνεται και οι πόροι αυτοί σιγά σιγά εξαντλούνται, όπως επίσης και η αντιμετώπιση σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων που προκαλούνται από την απελευθέρωση τόσο στον αέρα όσο και στα ύδατα βλαβερών αερίων και αποβλήτων, έχουν οδηγήσει τις οικονομίες παγκόσμια να στραφούν στις ανανεώσιμες πηγές 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, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης της ενέργειας, με στόχο την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο ή στο σημείο εγκατάστασής του.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη ενός δυναμικού μοντέλου που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός αυτόνομου υβριδικού σταθμού παραγωγής ΑΠΕ – υδρογόνου. Το υπό μελέτη σύστημα περιλαμβάνει μία ανεμογεννήτρια και μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια, οι οποίες αποτελούν τις κύριες ενεργειακές πηγές, ενώ μία κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιείται για να τροφοδοτεί την ισχύ του φορτίου που υπερβαίνει την ισχύ της παραγωγής. Μία μονάδα ηλεκτρόλυσης και μία δεξαμενή αποθήκευσης χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της περίσσειας ισχύος σε υδρογόνο. Η διασύνδεση των επιμέρους υποσυστημάτων και η διαχείριση της ισχύος πραγματοποιούνται μέσω ενός κοινού ζυγού με τη βοήθεια ειδικά σχεδιασμένων ελεγκτών. Το σύστημα δεν παράγει ρύπους και αποτελεί μία αξιόπιστη και φιλική προς το περιβάλλον λύση.

Τα υποσυστήματα μοντελοποιήθηκαν αναλυτικά με μαθηματικές εξισώσεις στο περιβάλλον του Matlab/Simulink, όπου και πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τέσσερα εικοσιτετράωρα του έτους 2015, ένα για κάθε εποχή του χρόνου, προκειμένου να εξεταστεί η απόδοση του συνολικού υβριδικού συστήματος. Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν αφορούν την περιοχή των Χανίων καθώς, συν τοις άλλοις, η Κρήτη έχει πολλές απομακρυσμένες μη αστικές περιοχές, με χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα, για τις οποίες το σύστημα μπορεί να αποτελέσει μια ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροδότησης.

Λέξεις Κλειδιά

διαχείριση ενέργειας, αποθήκευση ενέργειας, αποθήκευση με υδρογόνο, κυψέλη καυσίμου, αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Abstract

Renewable energy sources are forms of usable energy from various natural processes. Important factors such as the dependence on fossil fuels such as oil as demand for electricity is increasing and these resources are gradually depleted, as well as addressing serious environmental problems caused by the release of harmful gases and waste into both air and waters, have led the global economies to shift to renewable energy sources. A Hybrid Energy System is any autonomous power system, incorporating more than one energy sources that work together with the necessary supporting equipment, including energy storage, in order to provide electricity to the network or at the point of installation.

This thesis deals with the development of a dynamic model that simulates the operation of an autonomous hybrid plant RES - hydrogen. In the studied system a wind turbine and a photovoltaic generator are included, which are the main energy sources, while a fuel cell is used for supplying power to the load when the latter exceeds the produced output power. An electrolyzer and a hydrogen storage tank are used in order to convert excess power generation into hydrogen. The interconnection of individual subsystems and power management is carried out through a common DC bus with the help of specially designed controllers. The system produces no pollutants and is a reliable and environmentally friendly solution.

All the subsystems are modeled in detail with mathematical equations in the Matlab /Simulink environment, where simulations were performed for four days of the year 2015, one for each season, in order to test the performance of the overall hybrid system. The data used for the simulation concern the area of Chania, as Crete has many remote rural areas with low population density, for which the system can provide a satisfactory solution to the electricity problem.

Keywords

energy management, energy storage, hydrogen storage, fuel cell, wind power, solar energy, electricity production

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρακάκη για την ευκαιρία που μου πρόσφερε να ασχοληθώ με την παρούσα διπλωματική εργασία, 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, καθώς επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Καλαϊτζάκη που δέχτηκε να είναι μέλος της επιτροπής εξέτασης.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για την υπομονή τους και την στήριξη που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, τον Μυτάκη Δημήτρη για βοήθεια που μου προσέφερε και που ήταν στο πλευρό μου όλα αυτά τα χρόνια, τον Τάσο Παπαποστόλου για την πολύτιμη καθοδήγησή του στο δικό του κομμάτι της διπλωματικής που ανέλαβα να εξελίξω, καθώς επίσης τον Διευθυντή Ερευνών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών / Ινστιτούτου Περιβαλλοντικών Ερευνών, Δρ. Κώστα Λαγουβάρδο, για τον χρόνο που αφιέρωσε για να μου παράσχει τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους και συντρόφους μου που όλα αυτά τα χρόνια βρίσκονται στη ζωή μου τόσο στις δύσκολες όσο και στις καθημερινές, πλην όμως σημαντικές στιγμές.

1	Κεφάλαιο 1^ο Εισαγωγή.....	9
1.1	Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	9
1.2	Συνεισφορά διπλωματικής εργασίας.....	9
1.3	Δομή διπλωματικής εργασίας	9
1.4	Το περιβάλλον Matlab/Simulink.....	10
2	Κεφάλαιο 2^ο Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	11
2.1	Τύποι ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	11
2.2	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	12
2.3	Η ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα	14
2.4	Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας	15
2.4.1	Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής σε κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας	16
2.4.2	Αυτόνομα υβριδικά συστήματα.....	16
3	Κεφάλαιο 3^ο Αιολική Ενέργεια και Αιολικές Μηχανές	18
3.1	Αιολική ενέργεια.....	18
3.2	Συστήματα και τύποι ανεμογεννητριών.....	19
3.3	Ανεμογεννήτριες σταθερής – μεταβλητής ταχύτητας	21
3.4	Ασύγχρονες γεννήτριες.....	24
3.5	Σύγχρονες γεννήτριες.....	27
3.6	Κατηγοριοποίηση Σύγχρονων Μηχανών Μόνιμου Μαγνήτη	28
3.7	Υλικά Μονίμων Μαγνητών.....	31
3.8	Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος	32
3.9	Μετατροπείς ac-dc ή Ανορθωτές (Rectifiers)	33
3.9.1	Ανορθωτική διάταξη μισού κύματος (Απλή ανόρθωση)	33
3.9.2	Ανορθωτική διάταξη πλήρους κύματος.....	34
3.10	Μετατροπέας ανύψωσης τάσης συνεχούς ρεύματος (Boost DC-DC Converter)	36
3.10.1	Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης συνεχούς ρεύματος (Step down/Buck DC-DC Converter)	36
3.10.2	Αμφίδρομος μικτός μετατροπέας συνεχούς ρεύματος (Bidirectional Buck-Boost DC-DC Converter)	37
3.11	Αντιστροφέας Συστήματος (Inverter).....	38
4	Κεφάλαιο 4^ο Σχεδιασμός και προσομοίωση ανεμογεννήτριας	39
4.1	Αεροδυναμικές παράμετροι.....	39

4.1.1	Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους	42
4.2	Σύστημα μετάδοσης κίνησης	43
4.3	Σύγχρονη Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη – Permanent Magnet Synchronous Generator	44
4.3.1	Field Oriented Control (FOC)	46
4.4	Ηλεκτρονικός μετατροπέας AC-DC (Ανορθωτής/Rectifier)	47
4.5	Μετατροπέας ανύψωσης τάσης – DC-DC Boost Converter	49
4.6	Έλεγχος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος – Maximum Power Tracking Control (MPPT)	51
4.7	Συνολική στρατηγική ελέγχου ανεμογεννήτριας	55
4.8	Έλεγχος λειτουργίας ανεμογεννήτριας	56

5 Κεφάλαιο 5^ο Αυτόνομο Υβριδικό Σύστημα Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας 63

5.1	Το φωτοβολταϊκό στοιχείο	63
5.2	Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	64
5.3	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου	66
5.4	Απόδοση Φ/Β πλαισίων και απώλειες ισχύος	70
5.4.1	Η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου και παράγοντες που την επηρεάζουν	70
5.4.2	Η ισχύς αιχμής του Φ/Β πλαισίου	72
5.4.3	Απώλεια ισχύος – φαινόμενο HOT SPOT	72
5.5	Ανίχνευση σημείου μέγιστης παραγόμενης ισχύος της Φ/Β γεννήτριας (MPPT)	73
5.6	Τεχνολογίες υδρογόνου	77
5.7	Κυψέλες καυσίμου (Fuel Cells)	78
5.8	Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)	81
5.8.1	Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου	81
5.8.2	Δομή της κυψέλης	82
5.8.3	Μεμβράνη	83
5.8.4	Ηλεκτρόδια	84
5.8.5	Στρώμα διάχυσης αερίων	85
5.8.6	Πλάκα ροής των αερίων και διπολική πλάκα	85
5.8.7	Υποσυστήματα κυψέλης καυσίμου	87
5.9	Μοντελοποίηση κυψέλης καυσίμου (PEMFC)	88
5.10	Ηλεκτρολύτες (Electrolyzers)	92
5.10.1	Τύποι μονάδων ηλεκτρόλυσης	93
5.10.2	PEM Ηλεκτρολύτης	93
5.11	Μοντελοποίηση PEM ηλεκτρολύτη	94
5.12	Δεξαμενή αποθήκευσης Υδρογόνου	95
5.12.1	Μέθοδοι αποθήκευσης Υδρογόνου	95
5.12.2	Αποθήκευση πεπιεσμένου αερίου	96
5.12.3	Μοντελοποίηση Δεξαμενής Υδρογόνου	97
5.13	Ελεγχόμενο φορτίο (Dump Load)	98

6 Κεφάλαιο 6ο Προσομοίωση και αποτελέσματα.....100

6.1	Διαχειριστικός έλεγχος συστήματος	100
6.2	Προσομοίωση χειμωνιάτικης μέρας – 1 ^η Ιανουαρίου 2015	102
6.3	Προσομοίωση ανοιξιάτικης μέρας – 1 ^η Απριλίου 2015.....	109
6.4	Προσομοίωση καλοκαιρινής μέρας – 1 ^η Ιουλίου 2015.....	115
6.5	Προσομοίωση φθινοπωρινής μέρας – 1 ^η Νοεμβρίου 2015	121

7 Κεφάλαιο 7ο Συμπεράσματα – Προτάσεις128

7.1	Συμπεράσματα	128
7.2	Προτάσεις για περαιτέρω επέκταση	129

Βιβλιογραφία130

Παράρτημα Α.....135

A.1	PID Controller	135
A.2	Τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation)	136
A.3	Μετατροπέας ανύψωσης τάσης DC-DC Boost Converter.....	137
A.4	Μετατροπέας Υποβιβασμού Τάσης συνεχούς ρεύματος (Step Down DC-DC Converter)	138
A.5	Φίλτρα.....	140

Κεφάλαιο 1^ο - Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η προσομοίωση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο συνδυάζει δύο ενεργειακές πηγές καθώς επίσης και συστήματα αποθήκευσης, προκειμένου να εξεταστεί η δυνατότητα ικανοποίησης των αναγκών ενός χρήστη. Η ανάλυση αυτού του συστήματος γίνεται στους εξής άξονες:

- Μοντελοποίηση των υποσυστημάτων
- Σχεδιασμός ελεγκτών για τη βέλτιστη λειτουργία και διαχείριση του συστήματος
- Προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος σε τέσσερις ημέρες του χρόνου.

Οι ενεργειακές πηγές του υπό μελέτη συστήματος είναι μια ανεμογεννήτρια (Α/Γ) τύπου PMSG και μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια (Φ/Β). Στις περιπτώσεις που η παραγόμενη ισχύς είναι μικρότερη από την ισχύ που είναι απαραίτητη για την τροφοδοσία του φορτίου, μια κυψέλη καυσίμου (fuel cell) αναλαμβάνει να καλύψει αυτή την έλλειψη. Επιπλέον, στις περιπτώσεις πλεονάσματος στην παραγόμενη ισχύ, ένας ηλεκτρολύτης (electrolyzer) αναλαμβάνει την μετατροπή αυτής της περίσσειας σε υδρογόνο προκειμένου να αποθηκευτεί σε μια δεξαμενή. Το αποθηκευμένο αυτό υδρογόνο έχει ροή προς την κυψέλη καυσίμου και η διάταξη αυτή διασφαλίζει τη λειτουργία του συστήματος σε κάθε περίπτωση, ακόμα και όταν δεν μπορούν να καλυφθούν οι ανάγκες του φορτίου από τις ενεργειακές πηγές. Τέλος, όταν η δεξαμενή είναι πλήρης και υπάρχει περίσσεια ισχύος που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το σύστημα, χρησιμοποιείται ένα ελεγχόμενο φορτίο (dump load) το οποίο καταναλώνει αυτή την περίσσεια.

1.2 Συνεισφορά διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία μοντελοποιεί και προσομοιώνει πειραματικά τη λειτουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συνδυάζει ΑΠΕ και τεχνολογίες υδρογόνου, σε συνδυασμό με μια σειρά από ελεγκτές που εξασφαλίζουν την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Στο υπόλοιπο του πρώτου κεφαλαίου γίνεται μια περιγραφή της δομής της διπλωματικής εργασίας καθώς επίσης και του περιβάλλοντος του Matlab/Simulink το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση και προσομοίωση του συστήματος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στους διάφορους τύπους Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, καθώς επίσης και μια σύντομη ανάλυση της συμβολής των ΑΠΕ και των υβριδικών συστημάτων στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη σύγχρονη εποχή.

Το τρίτο κεφάλαιο αφορά την αιολική ενέργεια και τις αιολικές μηχανές. Γίνεται μια περιγραφή των τύπων αιολικών μηχανών που υπάρχουν, με μεγαλύτερη βαρύτητα να δίνεται στις

σύγχρονες γεννήτριες, ενώ μια σύντομη ανάλυση γίνεται για τα απαραίτητα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιούνται.

Το τέταρτο κεφάλαιο αφορά τον σχεδιασμό και την προσομοίωση της ανεμογεννήτριας. Παρουσιάζεται η μοντελοποίηση κάθε τμήματος της ανεμογεννήτριας αρχικά με μαθηματικές εξισώσεις και στη συνέχεια στο περιβάλλον Matlab/Simulink, ακολουθούμενο από αποτελέσματα προσομοιώσεων που εξετάζουν την ορθότητα της λειτουργίας του μοντέλου που αναπτύχθηκε. Ξεχωριστή αναφορά γίνεται στον αλγόριθμο ελέγχου MPPT και πως αυτός υλοποιήθηκε προκειμένου να εξασφαλίσει τη λειτουργία την Α/Γ στο μέγιστο της απόδοσής της.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του συνολικού υβριδικού συστήματος που περιλαμβάνει εκτός από την Α/Γ, τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια, την κυψέλη καυσίμου, τον ηλεκτρολύτη, τη δεξαμενή αποθήκευσης του υδρογόνου καθώς επίσης μια σειρά από ελεγκτές που είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία του συστήματος.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συνολικού υβριδικού συστήματος στο περιβάλλον Matlab/Simulink, με παράθεση γραφημάτων από τις διαφορετικές περιπτώσεις που δοκιμάστηκαν.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από τις προσομοιώσεις και τη διεξαγωγή της εργασίας συνολικότερα, ενώ παρατίθενται και προτάσεις βελτίωσης και περαιτέρω συνέχισης της εργασίας.

1.4 Το περιβάλλον Matlab/Simulink

Το περιβάλλον Matlab/Simulink, που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αναπτύχθηκε από τη MathWorks και αποτελεί ένα γραφικό περιβάλλον προγραμματισμού για τη μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάλυση πολλών τομέων των δυναμικών συστημάτων. Το κύριό του interface είναι ένα γραφικό εργαλείο διαφόρων block diagram και ένα προσαρμόσιμο σύνολο block βιβλιοθηκών. Προσφέρει τη δυνατότητα επικοινωνίας/ενσωμάτωσής του με το υπόλοιπο περιβάλλον της Matlab και μπορεί είτε να εξάγει δεδομένα προς χρησιμοποίηση για τη Matlab είτε να προγραμματιστεί από αυτή. Το περιβάλλον του Simulink χρησιμοποιείται ευρέως στον αυτόματο έλεγχο και την επεξεργασία ψηφιακού σήματος για πολλούς τομείς της προσομοίωσης και του Model-based design.



Κεφάλαιο 2ο – Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

2.1 Τύποι Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) (ή ήπιες μορφές ενέργειας, ή νέες πηγές ενέργειας, ή πράσινη ενέργεια) είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες.[20] Η ανάγκη για αξιοποίηση αυτών των πηγών ενέργειας, καθώς επίσης ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη τεχνολογιών που όχι μόνο θα δεσμεύουν το δυναμικό τους αλλά θα λειτουργούν και αποδοτικά, εμφανίστηκε μετά την πετρελαϊκή κρίση του '73 και εδραιώθηκε τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Οι δύο πιο κρίσιμοι παράγοντες που ώθησαν τις ανεπτυγμένες βιομηχανικά χώρες στις ΑΠΕ, ήταν πρωταρχικά η ανάγκη να αντιμετωπιστεί η ενεργειακή ανασφάλεια, που σημαίνει απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα όπως είναι το πετρέλαιο, καθώς η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια συνεχώς αυξάνεται και οι πόροι αυτοί σιγά σιγά εξαντλούνται, και δευτερευόντως η αντιμετώπιση σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων που προκαλούνται σε παγκόσμια κλίμακα από την απελευθέρωση τόσο στον αέρα όσο και στα ύδατα, βλαβερών αερίων και αποβλήτων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα. Γι' αυτούς τους λόγους οι σύγχρονοι τρόποι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να προσανατολίζονται σε τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον ενώ ταυτόχρονα θα εξασφαλίζουν χαμηλό κόστος παραγωγής.

Ο όρος « Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας» αναφέρεται κυρίως στις ακόλουθες [19][20]:

1. Αιολική Ενέργεια
2. Ηλιακή Ενέργεια (Θερμικά Ηλιακά, Φωτοβολταϊκά)
3. Μικρά Υδροηλεκτρικά (Ρ εγκατεστημένη<10MW)
4. Στοιχεία Καυσίμου
5. Ενέργεια από τη θάλασσα
6. Γεωθερμική Ενέργεια
7. Βιομάζα
8. Ωσμωτική ενέργεια

Με βάση τις υφιστάμενες τεχνολογίες, ο καλύτερος τρόπος αξιοποίησης των ΑΠΕ είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας άμεσα από τις πηγές 1-8. Ειδικότερα για κάθε μία από αυτές σημειώνονται τα εξής:

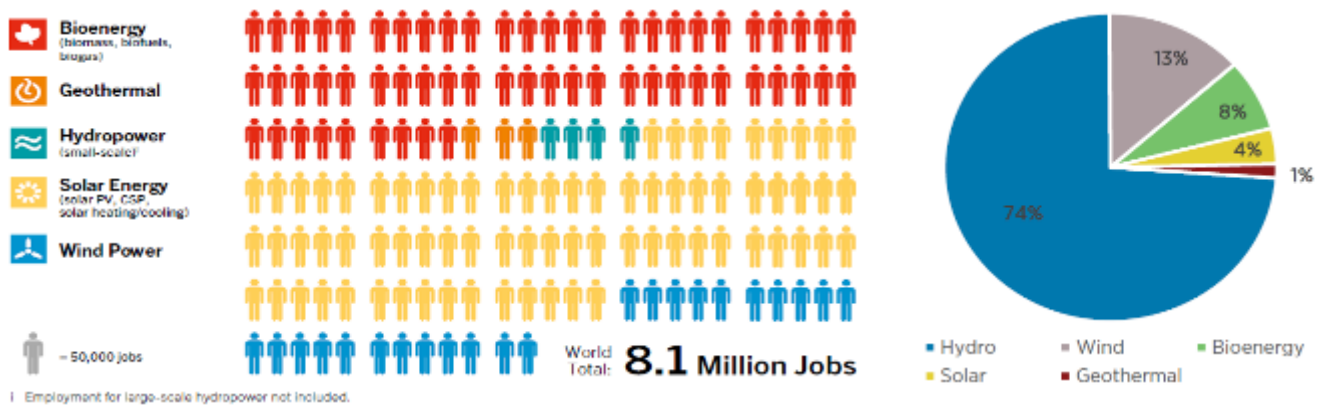
1. Η αιολική ενέργεια αξιοποιείται μέσω των «ανεμογεννητριών» (Α/Γ), οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική.
2. Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται είτε μέσω των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) γεννητριών, οι οποίες μετατρέπουν απ' ευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, είτε με τη συγκέντρωση των ηλιακών ακτίνων μέσω ηλιακών συλλεκτών ώστε να επιτευχθούν υψηλές θερμοκρασίες και τελικά η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος εκτεταμένη χρήση της ηλιακής ενέργειας γίνεται για τη θέρμανση νερού ή χώρων.
3. Με τα «μικρά υδροηλεκτρικά» (ΜΥΗΕ) γίνεται εκμετάλλευση υδάτινων ρευμάτων, για τα οποία δεν απαιτούνται μεγάλα έργα αποθήκευσης (π.χ. φράγματα).

4. Τα «στοιχεία καυσίμου» μετατρέπουν απ' ευθείας την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική με τη χρήση κατάλληλων διατάξεων και ηλεκτρολυτών.
5. Η ενέργεια που προκύπτει από τη θάλασσα έχει τις εξής κατηγορίες:
 - Ενέργεια από παλίρροιες: Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό. Έχει εφαρμοστεί στην Αγγλία, τη Γαλλία, τη Ρωσία και αλλού.
 - Ενέργεια από κύματα: Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.
 - Ενέργεια από τους ωκεανούς: Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας.
6. Η «γεωθερμική ενέργεια», δηλαδή η θερμότητα των εσωτερικών στρωμάτων της γης, γίνεται εκμεταλλεύσιμη όταν υπάρχουν κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες.
7. Η βιομάζα συνίσταται από τα πάσης φύσεως γεωργικά και δασικά υπολείμματα , από τα οποία με κατάλληλες θερμοχημικές διεργασίες μπορούν να ληφθούν καύσιμα.
8. Ωσμωτική ενέργεια: Η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, όπως συμβαίνει όταν ένα ποτάμι εκβάλλει στον ωκεανό. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται ωσμωτική ενέργεια (ή γαλάζια ενέργεια) και ανακτάται όταν το νερό του ποταμού και το θαλασσινό νερό είναι διαχωρισμένα από μια ημι-διαπερατή μεμβράνη και το γλυκό νερό περνάει μέσω αυτής.

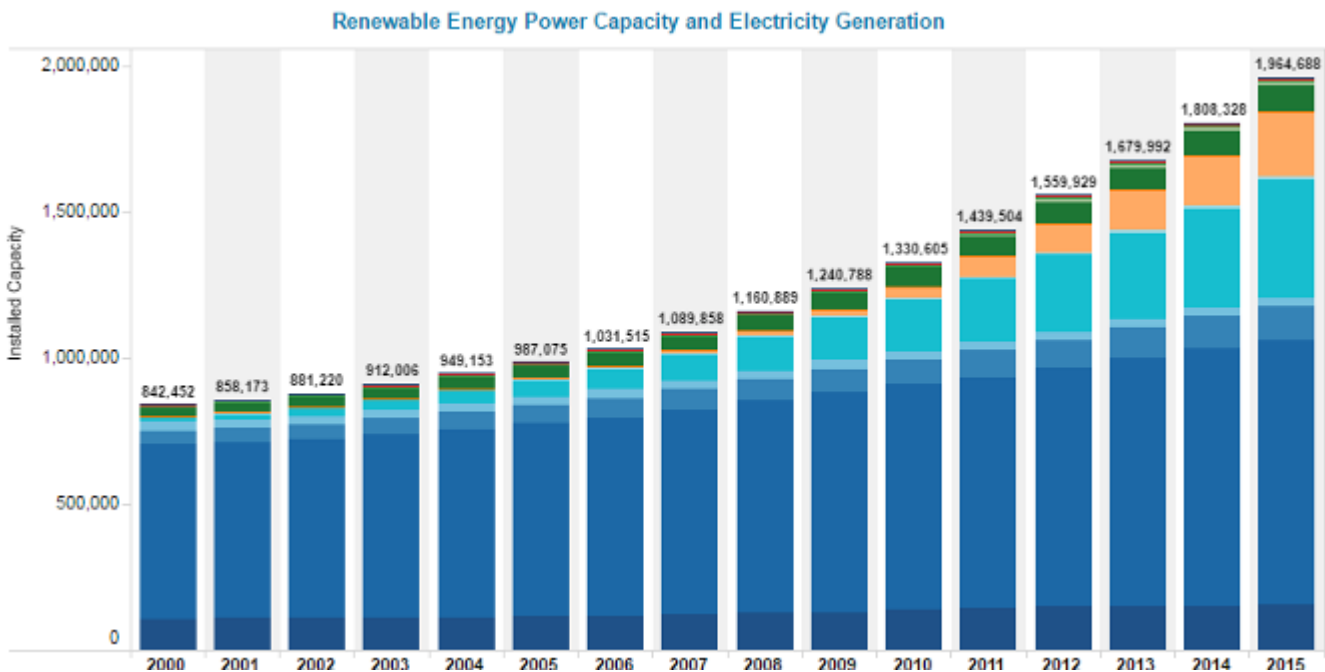
2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

Η σπουδαιότητα των ΑΠΕ συνίσταται στους ακόλουθους λόγους:

- Είναι «καθαρές» πηγές ενέργειας με ελάχιστη επίδραση στο περιβάλλον.
- Κατά κανόνα είναι ανεξάντλητες σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα που προβλέπεται να αρχίσουν να εξαντλούνται από το 2020-2060.
- Ενισχύουν την εθνική οικονομία αφού συχνά μπορούν να βασιστούν σε επενδύσεις μέσα στην ίδια την χώρα, σε αντίθεση με τις αυξημένου κόστους εισαγωγές ενέργειας, δίνοντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα δημιουργίας πολλών νέων θέσεων εργασίας.
- Ενισχύουν την ενεργειακή ασφάλεια αφού ανεξαρτητοποιούν ενεργειακά την χώρα.
- Βοηθούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος καθώς δίνεται η δυνατότητα ύπαρξης τους γεωγραφικά διάσπαρτα. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό-περιφερειακό επίπεδο με επιπλέον πλεονέκτημα την μείωση των απωλειών κατά τη μεταφορά ενέργειας καθώς επίσης και την “ελάφρυνση” των συστημάτων υποδομής.
- Καθώς δεν επηρεάζονται από τις τιμές των συμβατικών καυσίμων οι οποίες καθορίζονται από τη διεθνή οικονομία, μπορούν να έχουν χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.
- Τέλος, με ορθολογική χρήση τους αλλά και ανάπτυξή τους χωρίς επιβάρυνση του γεωγραφικού τοπίου και των τοπικών οικονομιών (όπως π.χ. κτηνοτροφία, γεωργία κτλ) μπορούν να αποτελέσουν εναλλακτική λύση σε διάφορα ενεργειακά ζητήματα.



Εικόνα (2.1) : Θέσεις εργασίας στις ΑΠΕ παγκοσμίως και Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ το 2015, πηγή: IRENA,2016[13]



Εικόνα (2.2): Παγκόσμια Εγκατεστημένη Ισχύς και Παραγόμενη Ηλεκτρ. Ενέργεια από Α.Π.Ε. πηγή: IRENA,2016[13]

Μια μικρή αναφορά αξίζει να γίνει και στα μειονεκτήματα τα οποία έχουν οι διάφοροι τύποι των ΑΠΕ καθώς αποτελούν και τις παραμέτρους οι οποίες πρέπει να εξεταστούν και να βελτιωθούν προκειμένου να εδραιωθούν ως ενεργειακές πηγές . Αναφορικά λοιπόν:

- Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.
- Για τον παραπάνω λόγο προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.

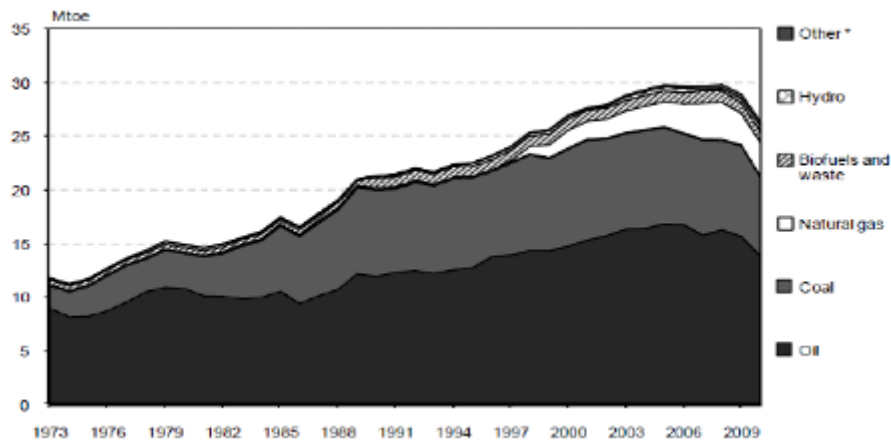
- Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Επιπλέον, τα αιολικά πάρκα πολλές φορές διαταράσσουν την ισορροπία του οικοσυστήματος όταν απαιτούν την αποψίλωση μεγάλων εκτάσεων ή την εκχώρηση βοσκοτοπιών προκειμένου να γίνει η εγκατάστασή τους με αποτέλεσμα να προκαλούνται και κοινωνικές αντιδράσεις. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας των Α/Γ και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν.
- Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω από το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

2.3 Η ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα

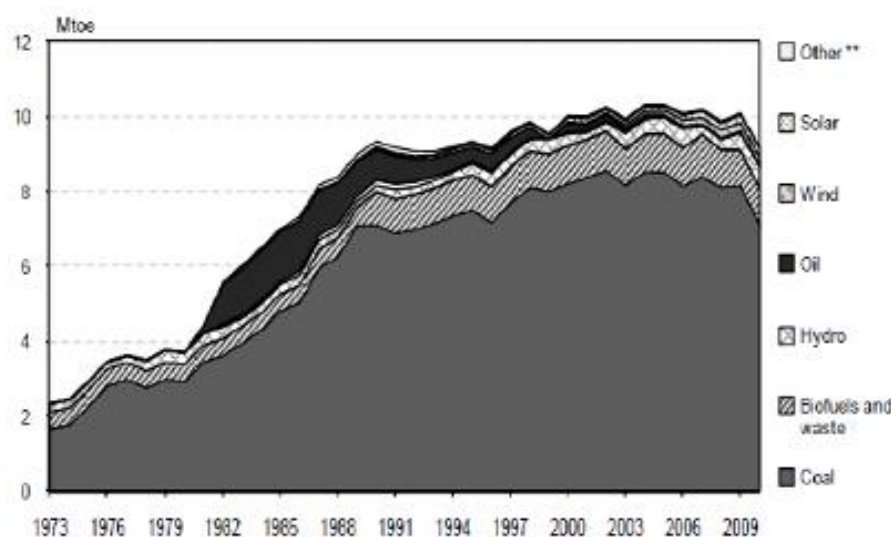
Σύμφωνα με μελέτη του Διεθνή Οργανισμού Ενέργειας για την Ελλάδα (IEA,2011), οι εγχώριες πηγές - κυρίως ο λιγνίτης αλλά και οι ΑΠΕ - καλύπτουν μόλις το ένα τρίτο των ενεργειακών αναγκών της χώρας μας. Τα υπόλοιπα δυο τρίτα της Συνολικής Παροχής Πρωτογενούς Ενέργειας (ΣΠΠΕ), καλύπτονται από το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο τα οποία είναι κατά βάση εισαγόμενα.

Το πετρέλαιο, εξακολουθεί επομένως να αποτελεί την πιο σημαντική πηγή ενέργειας στον Ελλαδικό χώρο, παρόλο που η συμμετοχή του στη ΣΠΠΕ μειώθηκε σταδιακά από 77% το 1973 σε 52% το 2010. Με τα χρόνια, το πετρέλαιο υποκαταστάθηκε αρχικά από τον λιγνίτη και πιο πρόσφατα από το φυσικό αέριο, σε μια στιγμή που η Ευρώπη απομακρύνεται από την χρήση πυρηνικής ενέργειας – εξαιτίας του συμβάντος στη Φουκουσίμα- και αναζητάει και αυτή φιλικότερες του πετρελαίου μορφές ενέργειας όπως το φυσικό αέριο. Η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή ενέργειας αλλά και η μεγαλύτερη πηγή ηλεκτρισμού της Ελλάδας φαίνεται να είναι ο λιγνίτης, ο οποίος αντιπροσωπεύει το 27% της συνολικής παροχής πρωτογενούς ενέργειας για το 2010 ενώ, το φυσικό αέριο συμμετέχει με 12% στην ΣΠΠΕ. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες (1990-2000), η κατανάλωση του λιγνίτη κυμάνθηκε 28 από 8 μέχρι 9 Mtoe, (βλ. εικόνα 2.4), αλλά το 2010 έπεσε στους 7,3 Mtoe. Αντίθετα, το φυσικό αέριο καταλαμβάνει την θέση της ταχύτερα αναπτυσσόμενης πηγής ενέργειας τα τελευταία χρόνια.

Συνολικά όμως, τα ορυκτά καύσιμα εξακολουθούν το 2010 να καλύπτουν το 91% της ΣΠΠΕ, συγκαταλέγοντας της Ελλάδα στις χώρες-μέλη του Διεθνή Οργανισμού Ενέργειας με τη μεγαλύτερη εξάρτηση σε ορυκτά καύσιμα (IEA,2011) (βλ. εικόνα 2.3). Σε σύγκριση με τα παραπάνω, η παροχή ενέργειας μέσω ΑΠΕ είναι σχετικά χαμηλή. Οι κυριότερες πηγές ενέργειας είναι: (α) τα βιοκαύσιμα και η ενέργεια από τα απόβλητα, οι οποίες παρέχουν 1 Mtoeh ή το 4% της ΣΠΠΕ, (β) η υδροηλεκτρική ενέργεια με 0,6 Mtoe ή 0,2% της ΣΠΠΕ , και (γ) η ηλιακή και αιολική ενεργεία με 0,2 Mtoe έκαστη, με συμμετοχή μικρότερη του 1% στη ΣΠΠΕ για το 2010. (βλ. εικόνα 2.4). Σημαντικό είναι να τονίσουμε ότι η Ελλάδα βρίσκεται στις πρώτες θέσεις κατανάλωσης πετρελαίου (συγκεκριμένα στη πρώτη θέση βρίσκεται το Λουξεμβούργο και στη δεύτερη θέση η Ελλάδα με την Πορτογαλία, με ελάχιστη διαφορά μεταξύ τους), ενώ αντίθετα στις πρώτες θέσεις κατανάλωσης ενέργειας μέσω πυρηνικής ενέργειας βρίσκονται οι Σκανδιναβικές χώρες, ενώ «πρωταθλήτρια» στην κατανάλωση ενέργειας μέσω ΑΠΕ είναι η Νέα Ζηλανδία. [9]



Εικόνα (2.3) : Συνολική παροχή πρωτογενούς ενέργειας 1973-2010 (other – άλλο: περιλαμβάνει την αιολική, ηλιακή και γεωθερμική ενέργεια/θερμότητα του περιβάλλοντος που χρησιμοποιούνται σε αντλίες θερμότητας), πηγή: IEA,2011



Εικόνα (2.4) : Παραγωγή ενέργειας ανά πηγή 1973-2010 (other – άλλο: περιλαμβάνει το φυσικό αέριο και τη γεωθερμική ενέργεια/θερμότητα του περιβάλλοντος που χρησιμοποιούνται σε αντλίες θερμότητας), πηγή: IEA,2011

2.4 Υβριδικά συστήματα ενέργειας [33]

Ως Υβριδικό Σύστημα Ενέργειας (ΥΣΕ) ορίζεται οποιοδήποτε αυτόνομο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής, στο οποίο ενσωματώνονται περισσότερες από μία πηγές ενέργειας που λειτουργούν μαζί με τον απαραίτητο υποστηρικτικό εξοπλισμό, περιλαμβανομένης της αποθήκευσης της ενέργειας, με στόχο την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο ή στο σημείο εγκατάστασής του. Τα βασικά μέρη που συνιστούν ένα ΥΣΕ είναι:

- οι μονάδες παραγωγής της ενέργειας
- η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας
- η μονάδα ελέγχου της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και συντονισμού των διάφορων διαθέσιμων επιλογών για βέλτιστη κάλυψη των αναγκών.

Πιο συγκεκριμένα, ένα ΥΣΕ μπορεί να περιλαμβάνει μία συμβατική μονάδα παραγωγής σε συνδυασμό με μία τουλάχιστον μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, διατάξεις αποθήκευσης, συστήματα εποπτείας και ελέγχου, καθώς και σύστημα διαχείρισης φορτίου. Σύμφωνα με το νόμο 3468/2006, ως υβριδικό σύστημα ή αλλιώς υβριδικός σταθμός ορίζεται κάθε σταθμός παραγωγής

ηλεκτρικής ενέργειας που 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 καθώς επίσης 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 (energy diversification), αποφεύγοντας έτσι την εξάρτηση από συγκεκριμένες ενεργειακές πηγές.
- Επιτυγχάνουν την οικονομικότερη λειτουργία των συμβατικών μονάδων, καθώς αυτές φορτίζονται με σταθερότερο φορτίο και πλησίον της χαμηλότερης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

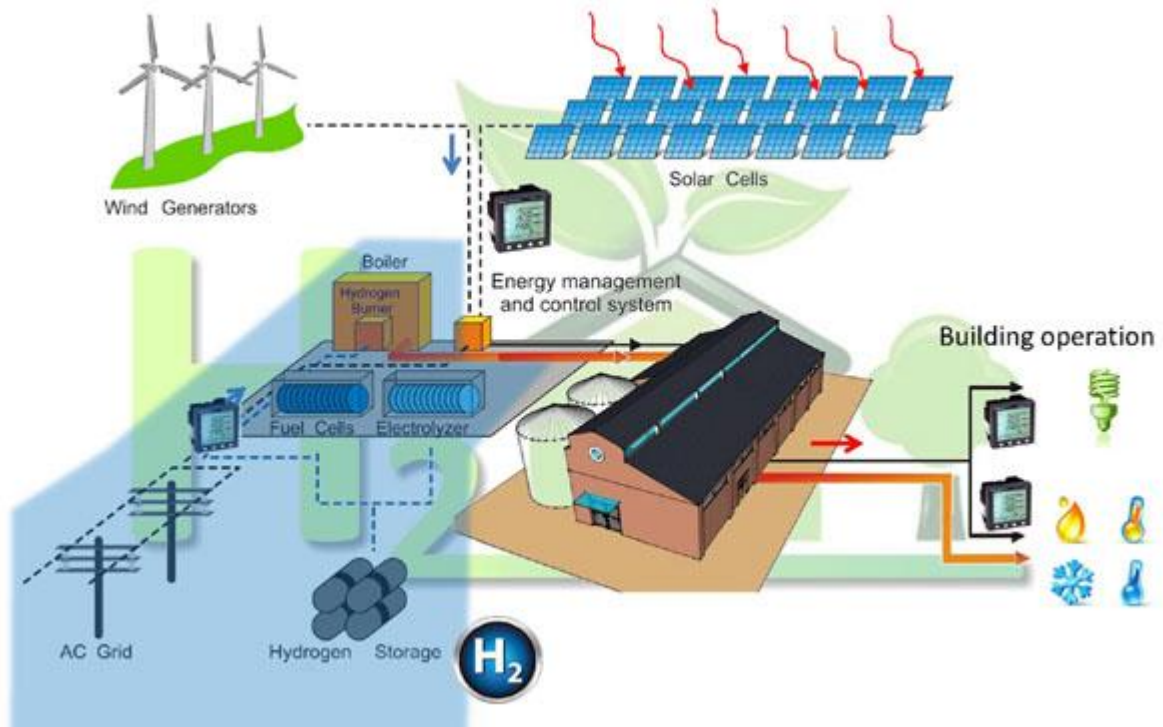
Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες υβριδικών συστημάτων, τα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο και τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα.

2.4.1 Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής σε κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

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.

2.4.2 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.



Εικόνα (2.5): Παράδειγμα υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Κεφάλαιο 3ο – Αιολική ενέργεια και αιολικές μηχανές

3.1 Αιολική ενέργεια

Ένα από τα είδη των ΑΠΕ που γνωρίζουν τη μεγαλύτερη άνθιση, είναι η αιολική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια του ανέμου που προέρχεται από τη μετακίνηση αερίων μαζών της ατμόσφαιρας. Οι μετακινήσεις του αέρα, οι άνεμοι, προέρχονται από τις μεταβολές και τις διαφορετικές από τόπο σε τόπο τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι διαφορετικές αυτές τιμές της πίεσης οφείλονται στη διαφορετική θέρμανση (απορρόφηση ενέργειας) της ατμόσφαιρας κάθε τόπου από τον Ήλιο.

Ο άνθρωπος από πολύ παλιά κατάλαβε πόσο σημαντική μπορεί να αποδειχθεί η ενέργεια που μας δίνει ο άνεμος όταν φυσάει και αξιοποίησε τη δύναμη των ανέμων σε διάφορες χρήσεις. Τα ιστιοφόρα πλοία μετέφεραν ανθρώπους και εμπορεύματα διασχίζοντας τις θάλασσες και πάνω τους στήριζαν την ακμή και την οικονομική τους ευρωστία μεγάλες πόλεις που κυριάρχησαν στην ιστορία. Οι ανεμόμυλοι πάλι, που άφθονους βλέπει κανείς κυρίως στα νησιά μας, ήταν πολύτιμοι βοηθοί στην παραγωγή του αλευριού, βασικού παράγοντα διατροφής σε όλες τις ανθρώπινες κοινωνίες.



Αυτή η ενέργεια, η αιολική, αξιοποιείται στις μέρες μας ολοένα και περισσότερο, σε περιοχές όπου συχνά φυσούν ισχυροί άνεμοι. Για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούνται σήμερα οι ανεμογεννήτριες, με τις οποίες μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του ανέμου σε άλλες πιο χρήσιμες μορφές ενέργειας, όπως θερμική, ηλεκτρική και φυσικά μηχανική. Ο άνεμος, όμως, είναι μια ανεξέλεγκτη και χρονικά μεταβαλλόμενη σε όλες της τις παραμέτρους πηγή ενέργειας. Η δέσμευση και χρησιμοποίηση της ενέργειας αυτής, είναι ως εκ τούτου μια πολύ δαπανηρή διαδικασία. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες, χρησιμοποιώντας τα πρόσφατα επιτεύγματα στην τεχνολογία των υλικών, στη μηχανολογία, στην ηλεκτρονική και στην αεροδυναμική, έχουν ανεβάσει σε υψηλά επίπεδα την απόδοσή τους, μειώνοντας συνεχώς το κόστος της παραγόμενης ενέργειας.

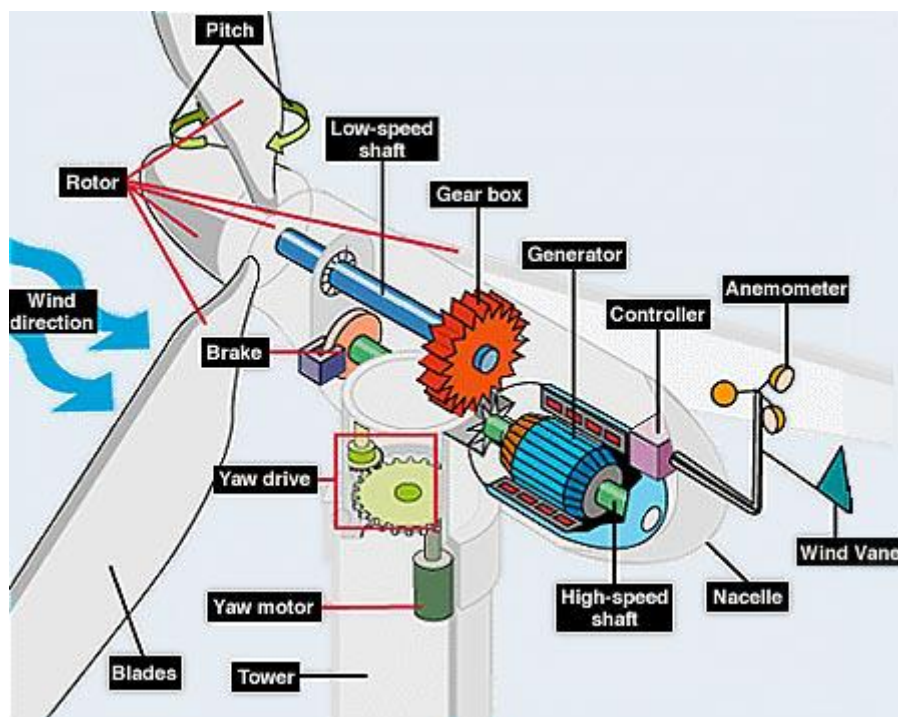
Η μελέτη ενός συστήματος ανεμογεννήτριας (Α/Γ), περιλαμβάνει την αεροδυναμική σχεδίαση και τη μελέτη εφαρμογής, στην οποία περιλαμβάνονται η μηχανολογική μελέτη και σχεδίαση, η μελέτη του ηλεκτρολογικού συστήματος και τα ηλεκτρολογικά συστήματα ελέγχου και ασφαλείας. Η αεροδυναμική σχεδίαση αποτελεί προϋπόθεση για τον σχεδιασμό ενός συστήματος δέσμευσης και μετατροπής της ενέργειας του ανέμου, ενώ η ηλεκτρομηχανολογική μελέτη είναι το αμέσως επόμενο και αναγκαίο στάδιο για την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος, κατά τον αποδοτικότερο και πλέον συμφέροντα τεχνοοικονομικό τρόπο .

3.2 Συστήματα και τύποι ανεμογεννητριών [2][3]

Παρόλο που η αρχή λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας είναι απλή, το σύστημά της παραμένει να είναι σύνθετο και να απαιτεί συνδυασμό γνώσεων από πολλούς τομείς. Ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των πτερυγίων απαιτεί σύνθετες γνώσεις αεροδυναμικής, η δομή του άξονα οδήγησης καθώς και του πύργου της ανεμογεννήτριας απαιτεί γνώσεις μηχανολογικές και δομικές ενώ το τμήμα των ελεγκτών και το σύστημα προστασίας απαιτεί γνώσεις τόσο ηλεκτρολογικές όσο και των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμογεννητριών ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου.

Οι πλέον διαδεδομένοι τύποι είναι οι **A/Γ οριζοντίου άξονα**, των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους και οι **A/Γ κατακόρυφου άξονα**, ο δρομέας των οποίων παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους. Παρ' όλα αυτά έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά η ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα γιατί παρουσιάζει καλύτερο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με τη μηχανή κατακόρυφου άξονα. Υπάρχει επιπλέον διαχωρισμός των ανεμογεννητριών ανά κατηγορία. Έτσι, οι A/Γ οριζοντίου άξονα διαχωρίζονται με βάση **τον αριθμό των πτερυγίων** (μονόπτερυγες, δίπτερυγες, τρίπτερυγες, πολύπτερυγες), **το είδος των πτερυγίων** (stall-controlled, pitch-controlled), **τη φορά των πτερυγίων σε σχέση με τη φορά του ανέμου** (down-stream, up-stream) κτλ. Μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα αποτελείται από τα εξής μέρη :

- Το **δρομέα**, που αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια (Blades) από ενισχυμένο πολυεστέρα . Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα .
- Το **σύστημα μετάδοσης της κίνησης**, αποτελούμενο από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών (gear box), το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας για το οποίο υπάρχει η δυνατότητα να μην συμπεριληφθεί. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.
- Την **ηλεκτρική γεννήτρια**, σύγχρονη ή επαγωγική με κάποιο αριθμό πόλων, η οποία συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Υπάρχει και το **σύστημα πέδης** (brakes) το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.
- Το **σύστημα προσανατολισμού** (yaw mechanism), που αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.
- Τον **πύργο**, ο οποίος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Ο πύργος είναι συνήθως σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Τον **ηλεκτρονικό πίνακα** και τον **πίνακα ελέγχου**, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.



Εικόνα (3.1): Τα μέρη της ανεμογεννήτριας

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα κατέχουν το συντριπτικό μερίδιο της αγοράς και έχει επικρατήσει η χρήση τους σε μεγάλες αιολικές εγκαταστάσεις. Πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα που τις κάνουν τόσο δημοφιλείς, είναι ότι:

1. Δεν χρειάζονται πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου για να ξεκινήσουν να περιστρέφονται και έτσι αρχίζουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και με πολύ μικρές ταχύτητες ανέμου.
2. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα εμφανίζουν ψηλό αεροδυναμικό συντελεστή.

Ωστόσο σημαντικό μειονέκτημα των γεννητριών αυτών είναι ότι η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων πρέπει να είναι τοποθετημένα πάνω στο πύργο, γεγονός που δυσκολεύει την πρόσβαση και συντήρησή τους και καθιστά την κατασκευή τους πιο ακριβή και δύσκολη.

Σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, στις οριζόντιου άξονα χρειάζεται ένας ενεργός μηχανισμός περιστροφής ο οποίος προσανατολίζει την ανεμογεννήτρια προς την κατεύθυνση του ανέμου, ώστε κάθε φορά ο άνεμος να προσπίπτει κάθετα στα πτερύγια της έλικας και έτσι να μεγιστοποιείται η ενεργειακή απολαβή.

Παρόλο που οι μονοπτέρυγες και διπτέρυγες Α/Γ είναι πιο φθηνές, δεν μπόρεσαν να επικρατήσουν στην αγορά λόγω κυρίως των προβλημάτων που αντιμετωπίζουν στην εξισορρόπηση δυνάμεων της όλης κατασκευής κατά την περιστροφή τους. Οι τριπτέρυγες είναι αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο καθώς είναι πιο σταθερές μιας και το αεροδυναμικό τους φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα και το μηχανικό φορτίο τους εξισορροπείται, επιπλέον έχει αποδειχθεί ότι έχουν μεγαλύτερο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος από τις πολυπτέρυγες. Η χρήση των

πολυπτερυγων ανεμογεννητριών περιορίζεται σε ελάχιστες εφαρμογές, μια από αυτές είναι η άντληση υδάτων στις οποίες προτιμώνται εξαιτίας της μεγάλης ροπής εκκίνησης που διαθέτουν.



Εικόνα (3.2): Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα και ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα.

Ένας παράγοντας που κατηγοριοποιεί τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, είναι ο **τύπος των πτερυγίων** που διαθέτουν για τον έλεγχο και περιορισμό της αεροδυναμικής ισχύος και ροπής. Οι δύο βασικοί τύποι πτερυγίων είναι:

- Τα **πτερύγια με έλεγχο του βήματος (pitch controlled)** που μπορούν να περιστραφούν κατά τον διαμήκη άξονά τους, ελέγχοντας με αυτό τον τρόπο τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και κατά συνέπεια την προσπίπτουσα σε αυτά αεροδυναμική ισχύ. Η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος ελέγχου της γωνίας των πτερυγίων καθώς επίσης η χρήση υδραυλικών και ηλεκτρομηχανολογικών μέσων για την περιστροφή των πτερυγίων, αποτελούν τα βασικά μειονεκτήματα αυτής της διάταξης.
- Τα **πτερύγια με ενεργό έλεγχο του βήματός τους (active stall)** στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Στη διάταξη αυτή όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή η γωνία pitch μεταβάλλεται αντίθετα, μεγαλώνει δηλαδή η γωνία με τον άνεμο, αποκόπτοντας με αυτό τον τρόπο την περίσσεια της αεροδυναμικής ισχύος. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι ελέγχεται γρηγορότερα η ισχύς εξόδου με αποτέλεσμα να μην καταπονούνται τα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας σε ριπές ανέμου. Αυτός ο έλεγχος χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες μεγαλύτερες του 1MW.

3.3 Ανεμογεννήτριες σταθερής – μεταβλητής ταχύτητας

Με βάση την περιστροφική ταχύτητα οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε ανεμογεννήτριες **σταθερής ταχύτητας** και σε ανεμογεννήτριες **μεταβλητής ταχύτητας**. Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας συνδέονται απευθείας στο δίκτυο μέσω μετασχηματιστή προσαρμογής της τάσης εξόδου της ανεμογεννήτριας στην τάση εξόδου του δικτύου. Εφόσον η συχνότητα του δικτύου (f) είναι σταθερή και η μηχανή έχει συγκεκριμένο αριθμό ζευγών πόλων (p), η ταχύτητα (n) της

ανεμογεννήτριας είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την ταχύτητα του ανέμου και σταθερή όταν πρόκειται για σύγχρονη μηχανή και δίνεται από τη σχέση[3]:

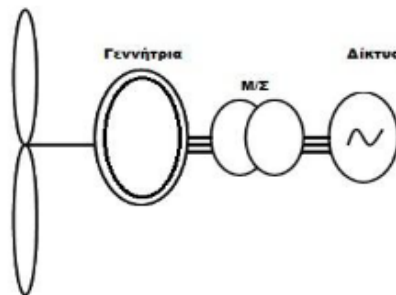
$$n = 60fp \text{ rpm} \quad (1)$$

ή σχεδόν σταθερή όταν πρόκειται για επαγωγική μηχανή και δίνεται από τη σχέση:

$$n = (1 - s)60fp \text{ rpm}, \text{ όπου } s \text{ η ολίσθηση.} \quad (2)$$

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα συστήματα αυτά είναι η στιβαρή και απλή κατασκευή τους, η απλότητα του συστήματος ελέγχου και κυρίως το χαμηλό κόστος συντήρησης. Παρόλα αυτά, σημαντικά είναι και τα μειονεκτήματα των συστημάτων αυτών στα οποία συγκαταλέγονται η υποβέλτιστη εκμετάλλευση της ανεμογεννήτριας για τις περισσότερες ταχύτητες ανέμου και οι μεγάλες μηχανικές ταλαντώσεις στις οποίες υπόκεινται οι μηχανές λόγω των έντονων μεταβολών της ροπής οι οποίες προκαλούνται από τις απότομες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου.

Συνήθως, οι ανεμογεννήτριες **σταθερής ταχύτητας** αποτελούνται από μια επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού. Ένας από τους λόγους που επιλέγεται η επαγωγική μηχανή είναι ότι είναι αξιόπιστη και συγκριτικά με άλλες πιο φθηνή, όμως σημαντικό της μειονέκτημα είναι ότι καταναλώνει άεργο ισχύ η οποία γίνεται τόσο μεγαλύτερη, όσο αυξάνεται η παραγωγή της ενεργού ισχύος. Για να ισοσταθμίζεται η κατανάλωση άεργου ισχύος της επαγωγικής γεννήτριας έτσι ώστε να παίρνουμε συντελεστή ισχύος κοντά στη μονάδα, στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο χρησιμοποιείται συστοιχία παράλληλων πυκνωτών. Στη περίπτωση που χρησιμοποιείται σύγχρονη γεννήτρια το σημαντικότερο πρόβλημα που εμφανίζεται είναι οι διακυμάνσεις στην τάση του δικτύου εξαιτίας των απότομων διαταραχών ισχύος προς το δίκτυο που προκαλούνται από τις απότομες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου. Συμπερασματικά λοιπόν, προκύπτει ότι τα συστήματα σταθερής ταχύτητας είναι άπια και πιο οικονομικά, αλλά λόγω των σημαντικών προβλημάτων που παρουσιάζουν η χρήση τους τείνει να εγκαταλειφθεί.



Εικόνα (3.3): Σύστημα σταθερής ταχύτητας

Οι ανεμογεννήτριες **μεταβλητής ταχύτητας** έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την προσαρμογή της ταχύτητας περιστροφής τους, στην ταχύτητα του ανέμου με σκοπό τη μεγιστοποίηση του ποσοστού της αιολικής ενέργειας που μετατρέπεται σε μηχανική, το οποίο μεταφράζεται στη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο γίνεται μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος ο οποίος απεμπλέκει την ταχύτητα

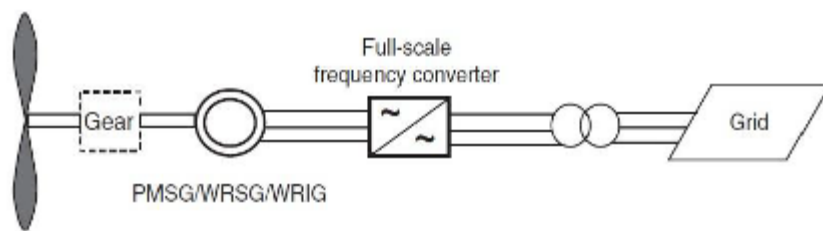
περιστροφής της ανεμογεννήτριας από την συχνότητα του δικτύου και επιτρέπει έτσι τη λειτουργία της σε διάφορες ταχύτητες. Όπως αναφέραμε, κύριος σκοπός των συστημάτων αυτών είναι η μέγιστη απομάστευση ισχύος από την ανεμογεννήτρια το οποίο επιτυγχάνεται με την κατάλληλη μεταβολή της γωνιακής της ταχύτητας μέσω του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος.

Συμπερασματικά λοιπόν, ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας είναι η βέλτιστη ενεργειακή της απόδοση. Επιπλέον, στα συστήματα μεταβλητής ταχύτητας η ύπαρξη των ηλεκτρονικών μετατροπέων επιτρέπει τον έλεγχο της άεργου ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας της συνολικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Επίσης, λόγω της μεταβλητότητας των στροφών της ανεμογεννήτριας, εξαιτίας διακυμάνσεων της ταχύτητας του ανέμου, δεν εμφανίζονται απότομες μεταβολές στη μηχανική ροπή με αποτέλεσμα την μειωμένη μηχανική καταπόνηση του άξονα της μηχανής και παράλληλα την αύξηση της αναμενόμενης διάρκειας ζωής της μηχανής.

Ωστόσο τα συστήματα αυτά συνοδεύονται και από κάποια μειονεκτήματα, όπως η υψηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης που τα χαρακτηρίζει και το υψηλό κόστος της αρχικής εγκατάστασης. Επιπρόσθετα, η χρήση μετατροπέων συνοδεύεται από έγχυση ανώτερων αρμονικών στο δίκτυο, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη χρήση φίλτρων τα οποία περιορίζουν το ποσοστό του συνολικού αρμονικού περιεχομένου που εγχέεται στο δίκτυο. Επιπλέον, λόγω της υψηλής διακοπτικής συχνότητας λειτουργίας του μετατροπέα ισχύος αυξάνονται και οι διακοπτικές απώλειες πάνω στα ημιαγωγικά στοιχεία, και έτσι αυξάνεται συνολικά το ποσοστό των απωλειών του συστήματος.

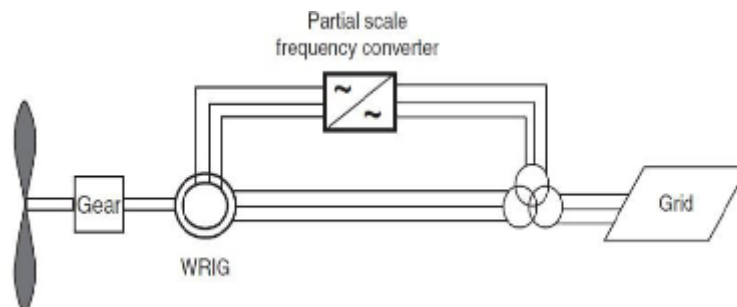
Η χρήση ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας αυξάνει το βαθμό ελευθερίας επιλογής τύπου γεννήτριας και μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος. Επιγραμματικά, οι τύποι αυτοί είναι:

- **Γεννήτρια με πλήρη μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος:** Στον τύπο αυτό, που είναι και ο τύπος που πραγματεύεται η διπλωματική αυτή, χρησιμοποιούνται οι εξής τύποι γεννητριών σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (PMSG), σύγχρονες γεννήτριες με τύλιγμα διέγερσης (WRSG) και επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG) ή βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG). Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο επιτυγχάνεται μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος διαστασιοποιημένο στην ονομαστική ισχύ της γεννήτριας, ο οποίος τοποθετείται μεταξύ του στάτη και του δικτύου. Μέσω του ελέγχου που εφαρμόζεται στο μετατροπέα στη μεριά της γεννήτριας ρυθμίζεται κατάλληλα η ταχύτητα της γεννήτριας ώστε να αντιστοιχεί σε αυτήν όπου η ενεργειακή απολαβή από τον άνεμο είναι μέγιστη. Το μέρος του μετατροπέα στη μεριά του δικτύου προσφέρει την δυνατότητα του πλήρους ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο και της ρύθμισης της τάσης εξόδου επιδρώντας έτσι θετικά στην ευστάθεια του δικτύου. Μειονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι το υψηλό κόστος του μετατροπέα και η έγχυση υψίσυχνων αρμονικών στο δίκτυο.



Εικόνα (3.4): Σύστημα με πλήρη μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος

- **Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG):** Σε αυτόν το τύπο ως γεννήτρια χρησιμοποιούνται επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG). Το τύλιγμα του στάτη της μηχανής συνδέεται απευθείας στο δίκτυο ενώ το τύλιγμα του δρομέα τροφοδοτείται μέσω δύο τριφασικών μετατροπέων πηγής τάσης με ονομαστική ισχύ 30-40% της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας. Μέσω των μετατροπέων, η γεννήτρια μπορεί να λειτουργήσει σε υποσύγχρονη και υπερσύγχρονη ταχύτητα (από -40% έως +30% της σύγχρονης ταχύτητας) και μας επιτρέπεται ο ακριβής έλεγχος της άεργου ισχύος. Ο τύπος αυτός πλεονεκτεί κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, ενώ στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται το υψηλό κόστος συντήρησης των γεννητριών αυτών και η ανάγκη υψηλής προστασίας τους σε περίπτωση σφάλματος του δικτύου.



Εικόνα (3.5): Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας

3.4 Ασύγχρονες Γεννήτριες

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες στον κόσμο χρησιμοποιούν τριφασικές ασύγχρονες γεννήτριες με κλωβό. Αυτός ο τύπος γεννήτριας παρόλο που δεν χρησιμοποιείται ευρέως, είναι πολύ διαδεδομένος εκτός από την βιομηχανία των ανεμογεννητριών, και στα μικρά υδροηλεκτρικά. Το περίεργο με αυτού του είδους τη γεννήτρια είναι ότι αρχικά είχε σχεδιαστεί ως ηλεκτρικός κινητήρας. Για την ακρίβεια το ένα τρίτο της παγκόσμιας ηλεκτρικής κατανάλωσης χρησιμοποιείται για τη λειτουργία ασύγχρονων κινητήρων μέσα σε εργοστάσια, αντλίες, ανελκυστήρες, και άλλες εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική.

Ένας λόγος επιλογής του κινητήρα αυτού είναι η αξιοπιστία του και ότι είναι σχετικά φθηνός. Η γεννήτρια έχει ακόμα κάποια χαρακτηριστικά που είναι χρήσιμα για τις ανεμογεννήτριες. Έχει αυξημένη δυνατότητα ολίσθησης, και μια ικανότητα υπερφόρτωσης. Η ασύγχρονη γεννήτρια με κλωβό έχει ένα δρομέα ο οποίος τη διαφοροποιεί από τη σύγχρονη γεννήτρια. Ο δρομέας αποτελείται από μεταλλικές ράβδους (συνήθως αλουμινίου) που ενώνονται ηλεκτρικά με αλουμινένιους δακτυλίους. Ένα ισχυρό πλεονέκτημα αυτού του τύπου δρομέα είναι ότι προσαρμόζεται αυτόματα στα ζεύγη πόλων του στάτη. Αν ο δρομέας περιστρέφεται ακριβώς στην σύγχρονη ταχύτητα τότε το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με ακριβώς την ίδια ταχύτητα, δεν υπάρχουν φαινόμενα επαγωγής, και δεν αλληλοεπιδρά με το στάτη. Αν η ταχύτητα υπερβεί την σύγχρονη ταχύτητα τότε ο δρομέας περιστρέφεται γρηγορότερα από το μαγνητικό πεδίο με συνέπεια να παρέχεται στο δίκτυο ηλεκτρικό ρεύμα.

Η ταχύτητα της ασύγχρονης γεννήτριας μεταβάλλεται με την εφαρμοζόμενη περιστροφική δύναμη. Στην πράξη, η διαφορά μεταξύ της περιστροφικής ταχύτητας στη μέγιστη ισχύ και στη χαμηλή είναι πολύ μικρή, της τάξης του 1%. Η διαφορά αυτή σε ποσοστό της σύγχρονης ταχύτητας καλείται ολίσθηση της γεννήτριας. Γι' αυτό μια γεννήτρια με δυο ζεύγη πόλων θα περιστρέφεται αργά στις 1500 *rpm* όταν είναι συνδεδεμένη με δίκτυο συχνότητας 50 *Hz*. Αν η γεννήτρια παράγει τη μέγιστη ισχύ της θα λειτουργεί στις 1515 *rpm*.

Η παρακάτω σχέση είναι ο ορισμός της ολίσθησης μιας ασύγχρονης μηχανής. Το μέγεθος s εκφράζει την ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από την σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

$$s = ns - \frac{n}{ns} \quad (3)$$

Στην κατάσταση ηρεμίας $n = 0$ και επομένως $s = 1$, ενώ για $n = ns$ η ολίσθηση ισούται με $s = 0$. Αν ο δρομέας στραφεί γρηγορότερα από το στρεφόμενο πεδίο ($n > ns$), τότε η ολίσθηση γίνεται αρνητική και είναι η περίπτωση της λειτουργίας της μηχανής ως γεννήτρια.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι η γεννήτρια θα αυξάνει ή θα μειώνει ελαφρώς τις στροφές όταν η περιστροφική δύναμη μεταβάλλεται. Αυτό έχει ως συνέπεια μικρότερη καταπόνηση στο κιβώτιο ταχυτήτων, και αυτός είναι ένας από τους σοβαρότερους λόγους για τη χρήση ασύγχρονης γεννήτριας παρά σύγχρονης σε ανεμογεννήτριες που είναι άμεσα συνδεδεμένες με το δίκτυο.

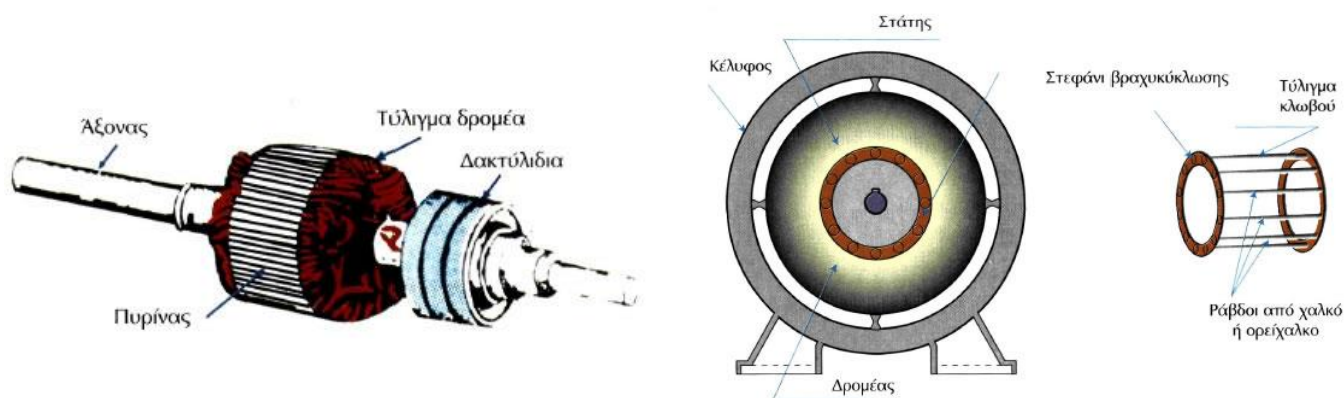
Στην ασύγχρονη γεννήτρια, ο στάτης πρέπει πριν λειτουργήσει να μαγνητιστεί από το δίκτυο. Υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργήσει η ασύγχρονη γεννήτρια σε αυτόνομο δίκτυο, όμως, πρέπει να παρέχονται πυκνωτές που να δίνουν το απαραίτητο ρεύμα μαγνήτισης. Επίσης είναι απαραίτητο ο δρομέας να έχει έναν εναπομείναν μαγνητισμό όταν εκκινήσει η γεννήτρια. Σε άλλη περίπτωση θα χρειαστεί μπαταρία και ηλεκτρονικά ισχύος, ή μια μικρή ντιζελογεννήτρια για να εκκινήσει το σύστημα.

Μια ασύγχρονη μηχανή με δακτυλιοφόρο δρομέα (*wound rotor*) έχει ένα στάτη παρόμοιο με την ασύγχρονη μηχανή με κλωβό αλλά ένα δρομέα ο οποίος φέρει αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τύλιγμα όμοιο με το τύλιγμα του στάτη. Το τύλιγμα του δρομέα συνδέεται ηλεκτρικά με το περιβάλλον (π.χ. αντιστάσεις) διαμέσου “slip rings” (δακτυλίους) και “brushes” (ψήκτρες). Έτσι γίνεται δυνατός ο εξωτερικός έλεγχος των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του

ρότορα και με τον τρόπο αυτό επηρεάζεται η τάση του. Στο δρομέα σχεδόν πάντα οι τρεις φάσεις συνδέονται σε αστέρα και τα τρία άκρα τους συνδέονται με τους τρεις δακτυλίους. Οι δακτύλιοι μέσω των ψηκτρών συνδέονται με ένα εξωτερικό κύκλωμα, π.χ. με τρεις ωμικές αντιστάσεις συνδεδεμένες σε αστέρα, ή είναι βραχυκυκλωμένοι.

Εντούτοις δε δίνεται ισχύς στους δακτυλίους. Ο μοναδικός τους στόχος είναι να επιτρέψουν στην αντίσταση να τοποθετηθεί σε σειρά με τα τυλίγματα του δρομέα κατά την εκκίνηση. Τέτοια διάταξη ομαλής εκκίνησης υπάρχει στις γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (optislip). Τοποθετώντας την αντίσταση σε σειρά με τα τυλίγματα του δρομέα όχι μόνο μειώνεται το ρεύμα εκκίνησης, αλλά αυξάνεται και η ροπή εκκίνησης. Η ολίσθηση του δρομέα αλλάζει τροποποιώντας τη συνολική αντίσταση του ρότορα μέσω ενός μετατροπέα που συνδέεται στον άξονα του ρότορα. Ο στάτης της γεννήτριας συνδέεται κατευθείαν στο δίκτυο. Αυτή η αντίσταση αποκόβεται όταν η μηχανή έχει ξεκινήσει, ώστε να μοιάζει ο δρομέας ηλεκτρικά με το δρομέα σε μηχανή κλωβού.

Το βασικό πλεονέκτημα είναι η ελαχιστοποίηση του φορτίου στις ανεμογεννήτριες κατά τη διάρκεια των ριπών του ανέμου. Μέσω αυτού του συστήματος η γεννήτρια έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει την ολίσθησή της (σε ένα μικρό εύρος τιμών) και να οδηγηθεί στη βέλτιστη ολίσθηση, εξασφαλίζοντας μικρότερες ταλαντώσεις στη ροπή εισόδου και στην ισχύ εξόδου. Τα κύρια μειονεκτήματα της γεννήτριας με δακτυλιοφόρο δρομέα είναι ότι είναι πιο ακριβή και όχι τόσο στιβαρή όσο η γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού, το εύρος στο οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα περιορίζεται στο 0 – 10% καθώς εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης του στάτη, ο έλεγχος της πραγματικής και αέργου ισχύος που επιτυγχάνεται δεν είναι αρκετά ικανοποιητικός, ένα ποσοστό ισχύος καταναλώνεται στη μεταβλητή αντίσταση του δρομέα[3].



Εικόνα (3.6): Αριστερά : Ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα, Δεξιά: Ασύγχρονη γεννήτρια με κλωβό

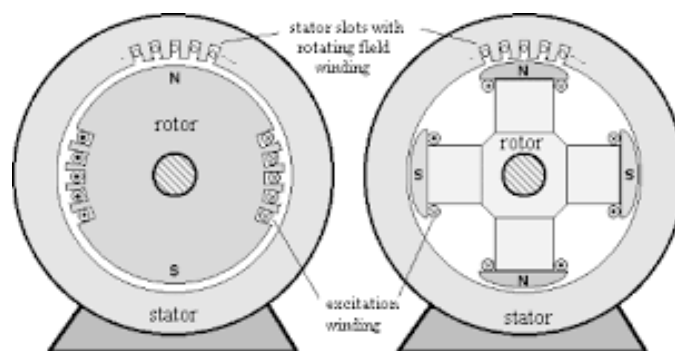
3.5 Σύγχρονες Γεννήτριες

Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι γνωστό ότι πήραν το όνομά τους από το γεγονός ότι ο δρομέας τους περιστρέφεται σύγχρονα με την ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι μηχανολογικά πολύ πιο πολύπλοκες και πολύ πιο ακριβές από αντίστοιχες επαγωγικές γεννήτριες ανάλογου μεγέθους. Παρόλα αυτά έχουν ένα βασικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις επαγωγικές γεννήτριες, ότι το ρεύμα μαγνήτισης δεν δημιουργείται από το κύκλωμα του στάτη. Το απαραίτητο μαγνητικό πεδίο για τη λειτουργία της μηχανής μπορεί να δημιουργηθεί μέσω συμβατικού τυλίγματος διέγερσης στο δρομέα (περίπτωση WRSG) ή με τη χρήση μόνιμων μαγνητών (περίπτωση PMSG). Αξίζει να αναφερθεί ότι αν η σύγχρονη γεννήτρια έχει ένα κατάλληλο, μεγάλο αριθμό πόλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων.

Η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη λοιπόν, είναι αυτοδιεγείρομενη λόγω της ύπαρξης μόνιμων μαγνητών στο δρομέα οι οποίοι δημιουργούν το μαγνητικό πεδίο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην απαιτείται επιπλέον παροχή ηλεκτρικού ρεύματος για την διέγερση της μηχανής οπότε δεν υπάρχουν και οι απώλειες στο τύλιγμα διέγερσης, με συνέπεια ο βαθμός απόδοσής της να είναι υψηλότερος από τον αντίστοιχο της επαγωγικής γεννήτριας. Επιπρόσθετα, η ύπαρξη μόνιμου μαγνήτη και συνεπώς η απουσία του τυλίγματος διέγερσης, σημαίνει και την απουσία ψηκτρών και συλλέκτη με άμεση συνέπεια την αυξημένη αξιοπιστία και την ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων για συντήρηση. Επίσης, με την χρήση μαγνητών επιτυγχάνεται υψηλή πυκνότητα ροής με αποτέλεσμα να προκύπτει μικρότερο βάρος και όγκος για μια μηχανή δεδομένης ισχύος.

Ωστόσο, πρέπει να αναφερθούν και τα μειονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου μηχανής τα οποία έχουν λειτουργήσει ως ανασταλτικός παράγοντας στη διεύρυσή της σε μεγαλύτερο βαθμό στην αγορά. Κυριότερος παράγοντας είναι ότι τα υλικά με τα οποία κατασκευάζονται οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν ιδιαίτερα υψηλό κόστος, καθώς προέρχονται από σπάνιες γαίες και επιπρόσθετα δεν είναι καθόλου εύκολα στην επεξεργασία. Επιπλέον, τα μαγνητικά υλικά είναι αρκετά ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες πράγμα το οποίο καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη κάποιου συστήματος ψύξης.

Πρόσθετο κόστος για ένα σύστημα με χρήση διέγερσης με μόνιμο μαγνήτη αποτελεί η απαραίτητη χρήση ενός μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας προκειμένου να προσαρμόσει την τάση και τη συχνότητα της γεννήτριας στην τάση και στη συχνότητα του δικτύου αντίστοιχα, το πλεονέκτημα όμως στη περίπτωση αυτή είναι ότι μπορεί να παραχθεί ενέργεια σε κάθε ταχύτητα ανέμου. Αρνητικό είναι επίσης το γεγονός ότι η σύγχρονη φύση των σύγχρονων γεννητριών με μόνιμο μαγνήτη μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα κατά την εκκίνηση, τον συγχρονισμό και τη ρύθμιση της τάσης, ενώ προκαλεί και δύσκαμπτη συμπεριφορά σε περίπτωση που η ταχύτητα του αέρα δεν είναι σταθερή.



Εικόνα (3.7): Διατομή μιας σύγχρονης γεννήτριας

3.6 Κατηγοριοποίηση Σύγχρονων Μηχανών Μόνιμου Μαγνήτη

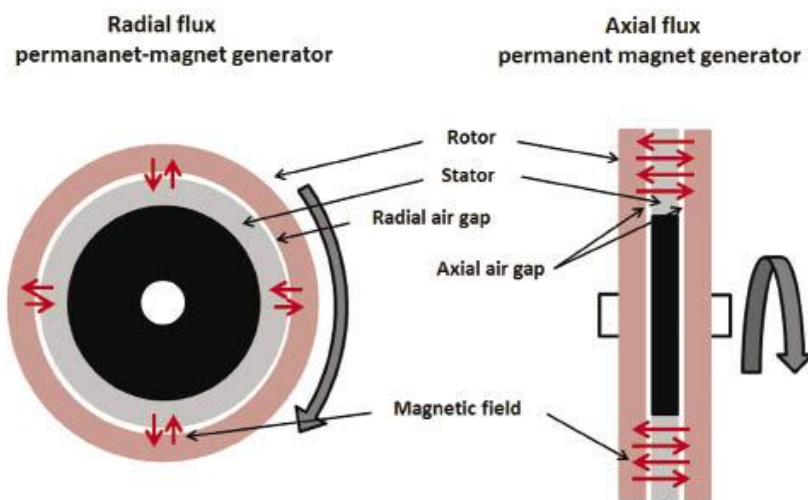
Η κατηγοριοποίηση των σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη γίνεται κατά κύριο λόγο με βάση την **κατανομή του μαγνητικού πεδίου** στο εσωτερικό της μηχανής και σε δεύτερο βαθμό είτε με **βάση τη μορφή της επαγόμενης τάσης στο στάτη** είτε με **βάση την τοποθέτηση των μόνιμων μαγνητών στο δρομέα**. Τις δύο τελευταίες θα μπορούσαμε να τις χαρακτηρίσουμε ως υποκατηγορίες της πρώτης.

Με βάση λοιπόν την κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής οι μηχανές κατατάσσονται σε, μηχανές ακτινικής ροής, μηχανές αξονικής ροής και σε μηχανές εγκάρσιας ροής.

Η σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη **ακτινικής ροής (radial flux permanent magnet, RFPM)** είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος μηχανής μόνιμου μαγνήτη και χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές άμεσης οδήγησης. Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις μηχανών μόνιμου μαγνήτη είναι η πιο εύκολη στην κατασκευή της και συγχρόνως και η πιο φθηνή. Μεγάλο πλεονέκτημα, επίσης, αυτού του τύπου είναι το γεγονός ότι λόγω της δομής της μηχανής η θερμότητα που αναπτύσσεται απομακρύνεται εύκολα και σχετικά γρήγορα από το πλαίσιο του στάτη. Ωστόσο, οι μηχανές αυτές είναι αρκετά πιο ογκώδεις σε σύγκριση με τις μηχανές αξονικής και εγκάρσιας ροής πράγμα το οποίο μεταφράζεται τόσο σε όρους ενεργού βάρους της μηχανής όσο και στο μήκος του άξονά της.

Η μηχανή μόνιμου μαγνήτη **αξονικής ροής (axial flux permanent magnet, AFPM)** χαρακτηρίζεται από τη μεγάλη της διάμετρο και το σχετικά μικρό μήκος της, ενώ η μαγνητική ροή που παράγεται κατευθύνεται κατά μήκος του άξονα της μηχανής. Συγκρινόμενες με τις ακτινικής ροής μηχανές παρουσιάζουν κάποια σαφή πλεονεκτήματα, όπως το ότι εμφανίζουν υψηλότερο λόγο ισχύος προς συνολικό βάρος μηχανής με αποτέλεσμα την χρησιμοποίηση λιγότερου υλικού για την κατασκευή της μηχανής. Επιπλέον, λόγω της δομής τους οι μηχανές αξονικής ροής παρουσιάζουν επίπεδο και εύκολα ρυθμιζόμενο διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα. Θετικό θεωρείται και το γεγονός της εμφάνισης χαμηλότερων επιπέδων θορύβου και δονήσεων συγκριτικά με τις μηχανές ακτινικής ροής.

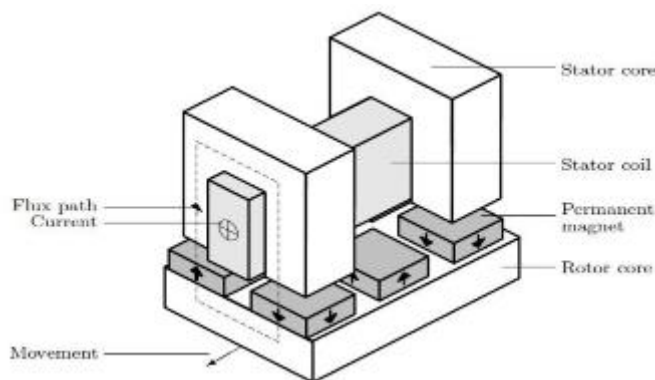
Ως μειονέκτημα μπορεί να θεωρηθεί ότι λόγω της μεγαλύτερης διαμέτρου της μηχανής γίνεται απαραίτητη και χρησιμοποίηση περισσότερων μόνιμων μαγνητών.



Εικόνα (3.8): Τοπολογία γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη ακτινικής ροής αριστερά και αξονικής ροής δεξιά

Στην **εγκάρσιας ροής μηχανή (transverse flux permanent magnet, TFPM)** η κατεύθυνση της μαγνητικής ροής είναι κάθε στιγμή κάθετη στην κατεύθυνση της περιστροφής του δρομέα. Αυτού του τύπου οι μηχανές είναι κατάλληλες για εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων και άμεσης οδήγησης, παρόλα αυτά η χρήση τους είναι ακόμα αρκετά περιορισμένη.

Η κυριότερη διαφορά αυτού του τύπου μηχανής με τους προηγούμενους δύο τύπους είναι ότι σε αυτήν επιτρέπεται η αύξηση του χώρου για τα τυλίγματα χωρίς να μειώνεται ο διαθέσιμος χώρος για την ανάπτυξη του κύριου μαγνητικού πεδίου. Επίσης, τα τυλίγματα χαλκού της μηχανής εγκάρσιας ροής είναι πιο απλά από τα τυλίγματα των άλλων δύο τύπων μηχανών, πράγμα το οποίο οδηγεί και σε λιγότερες απώλειες χαλκού και επιπλέον έτσι η ενεργώς μάζα για μηχανή συγκεκριμένης ισχύος είναι αισθητά μικρότερη από αντίστοιχη μηχανή άλλου τύπου.



Εικόνα (3.9): Τοπολογία τμήματος TFPM μηχανής με κατευθύνσεις μαγνητικής ροής και ρεύματος

Τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα της μηχανής εγκάρσιας ροής είναι ο χαμηλός συντελεστής ισχύος που παρουσιάζει για υψηλές ροπές και η ιδιαίτερα περίπλοκη δομή της η οποία και οδηγεί σε υψηλό κόστος κατασκευής. Η τοπολογία ενός μέρους μιας μηχανής μόνιμου μαγνήτη εγκάρσιας ροής φαίνεται στην εικόνα 3.9, όπου βλέπουμε ότι η διεύθυνση της μαγνητικής ροής είναι κάθετη στην κίνηση του δρομέα, ενώ το ρεύμα ρέει κυκλικά κατά μήκος των τυλιγμάτων του στάτη.

Με βάση τώρα τη μορφή της επαγόμενης τάσης στο στάτη έχουμε δύο κατηγορίες σύγχρονων μηχανών, τις **τραπεζοειδείς μηχανές μόνιμου μαγνήτη (trapezoidal PMSM)** και τις **ημιτονοειδείς σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη (sinusoidal PMSM)**. Στις πρώτες, η τάση εξ' επαγωγής του στάτη είναι τραπεζοειδούς μορφής και τα φασικά ρεύματα του στάτη έχουν τετραγωνική μορφή. Στις δεύτερες αντίστοιχα, τόσο η επαγόμενη τάση όσο και τα φασικά ρεύματα στο στάτη έχουν ημιτονοειδή μορφή.

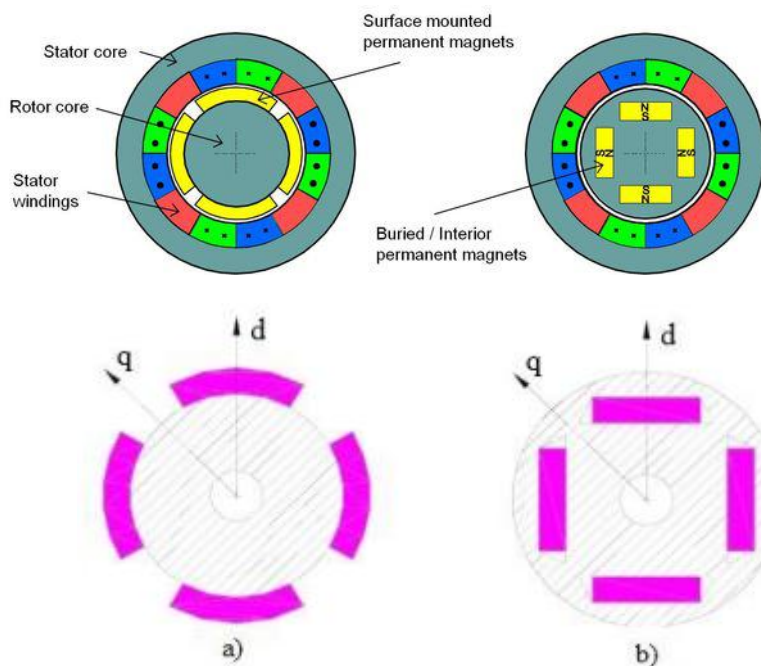
Ανάλογα με την τοποθέτηση των μόνιμων μαγνητών στο δρομέα της μηχανής διακρίνουμε τις περιπτώσεις της επιφανειακής τοποθέτησης των μαγνητών στο δρομέα (Surface-mounted magnets) και της τοποθέτησης των μαγνητών στο εσωτερικό του δρομέα (Buried magnets).

Στην περίπτωση των **επιφανειακών μαγνητών (Surface-mounted magnets)** οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην εξωτερική επιφάνεια του δρομέα όπως φαίνεται και στην εικόνα (3.10a). Αυτές οι δομές των μηχανών μόνιμων μαγνητών κατασκευάζονται και συναρμολογούνται σχετικά εύκολα. Σε περίπτωση που οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι με κόλλα στην επιφάνεια του δρομέα, η περιστροφική ταχύτητα της μηχανής θα πρέπει να περιορίζεται έτσι ώστε να μην διασπαστεί η συγκόλληση λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων που αναπτύσσονται. Η ακαμψία του δρομέα είναι δυνατόν να ενισχυθεί με την επιπλέον τοποθέτηση ενός ενισχυτικού ιμάντα γύρω από αυτόν, ο ιμάντας μπορεί να είναι φτιαγμένος ή από ανθρακονήματα ή από ίνες γυαλιού εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κύλινδρος από ανοξείδωτο χάλυβα.

Λόγω του ότι οι μαγνήτες έχουν μαγνητική διαπερατότητα σχεδόν ίση με την μονάδα θεωρούνται σαν αέρας για τα μαγνητικά κυκλώματα, έτσι παρόλο που είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα το διάκενο της μηχανής όπου αναπτύσσονται τα πεδία παραμένει μεγάλο. Επίσης, στις μηχανές αυτού του είδους συνηθίζεται να μην υπάρχει ανομοιογένεια στο μαγνητικό πεδίο και οι επαγωγές των κάθετων αξόνων d και q να είναι ίσες.

Στον τύπο των **εσωτερικών μαγνητών (Buried magnets)** οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στο εσωτερικό του δρομέα της μηχανής όπως φαίνεται και στην εικόνα (3.10b). Παρόλο όμως που, σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, η κατασκευή του δρομέα μαζί με τους μόνιμους μαγνήτες είναι αρκετά πιο πολύπλοκη ο τύπος αυτός έχει μερικά πλεονεκτήματα έναντι των επιφανειακών μαγνητών. Δεν υπάρχει αυστηρός περιορισμός της περιστροφικής ταχύτητας της μηχανής υπό το φόβο αποκόλλησης των μαγνητών ούτε είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση ενισχυτικού ιμάντα. Επιπλέον, ο κίνδυνος απομαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών είναι αισθητά μειωμένος καθώς αυτοί περιβάλλονται από το σιδηρομαγνητικό υλικό του δρομέα και βρίσκονται σε μια σχετική απόσταση από το διάκενο. Επιπρόσθετα, το υλικό που περιβάλλει τους μαγνήτες τους παρέχει μια σχετική προστασία έναντι της φθοράς και της διάβρωσης. Ωστόσο, οι μηχανές αυτού του τύπου εμφανίζουν αυξημένα ποσοστά διαρροής της μαγνητικής ροής στα άκρα των μαγνητών εξαιτίας του υλικού του δρομέα που τους περιβάλλει. Το ποσοστό αυτό μπορεί να μειωθεί με διάφορους τρόπους όμως σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να φτάσει στο επίπεδο των

επιφανειακών μαγνητών. Άλλο αρνητικό αυτής της κατηγορίας είναι ότι υπάρχει μεγάλη δυσκολία στην ανακύκλωση των υλικών καθώς, οι μαγνήτες πολύ δύσκολα μπορούν να αφαιρεθούν από το δρομέα. Συνήθως στην περίπτωση των εσωτερικών μαγνητών το μαγνητικό πεδίο παρουσιάζει ανομοιογένεια, με την επαγωγή του d άξονα να είναι μικρότερη από αυτήν του q άξονα.



Εικόνα (3.10): Δρομέας και d - q άξονες με *a*) επιφανειακούς μαγνήτες και *b*) εσωτερικούς μαγνήτες

3.7 Υλικά μόνιμων μαγνητών

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η χρησιμοποίηση των μόνιμων μαγνητών στις ηλεκτρικές μηχανές γίνεται για την δημιουργία του μαγνητικού πεδίου διεγέρσεως. Στοιχεία που χαρακτηρίζουν έναν καλό μόνιμο μαγνήτη είναι η ικανότητά του να παράγει ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο με όσο το δυνατόν μικρότερη μάζα και ικανότητά του να αντιστέκεται σε παράγοντες που προκαλούν την απομαγνήτισή του. Οι κυριότερες κατηγορίες μαγνητικών υλικών που έχουν κατά καιρούς βρει εφαρμογή σε ηλεκτρικές μηχανές είναι τα κράματα AlNiCo, κράματα σπάνιων γαιών και οι κεραμικοί μαγνήτες ή αλλιώς σκληροί φερρίτες.

Το πρώτο κράμα AlNiCo αναπτύχθηκε το 1931 από τον T.Mishima, και αποτελείται από ένωση των στοιχείων αργίλιο (Al), νικέλιο (Ni) και κοβάλτιο (Co). Οι εξαιρετικές για την εποχή ιδιότητές του, όπως ο μεγάλος παραμένων μαγνητισμός και η αντοχή του σε υψηλές θερμοκρασίες βοήθησαν στην γρήγορη διάδοσή του και την χρήση του σε εφαρμογές αντί μαγνητών χάλυβα. Την δεκαετία του '50 και μέσω της εξέλιξης της επιστήμης των υλικών μια άλλη οικογένεια μόνιμων μαγνητών έκανε την εμφάνισή της, γνωστή ως φερρίτες, η οποία και αντικατέστησε τους AlNiCo

μαγνήτες σε αρκετές εφαρμογές. Βασικότερα στοιχεία που τους χαρακτηρίζουν είναι οι καλές ιδιότητες του υλικού τους που τους οδηγεί να εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε εξωτερικά πεδία απομαγνήτισης και το ιδιαίτερα χαμηλό κόστος τους, πράγμα που τους κάνει να παραμένουν μέχρι και σήμερα ένας από τους σημαντικότερους εμπορικά μόνιμους μαγνήτες.

Οι μόνιμοι μαγνήτες σπανίων γαιών αποτέλεσε την πιο επαναστατική εξέλιξη στο χώρο των μόνιμων μαγνητών και η οποία ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του '60 με την ανακάλυψη κραμάτων Σαμάριου-Κοβάλτιου (Sm-Co). Η υψηλή αντίστασή τους στις επιρροές απομαγνήτισης και η άριστη θερμική σταθερότητά τους, έχει καταστήσει τους μαγνήτες Sm-Co ως μια από τις πρώτες επιλογές για τις πιο απαιτητικές εφαρμογές μηχανών. Ωστόσο λόγω της χρήση κοβάλτιου σε υψηλό ποσοστό το Sm-Co αποτελεί το ακριβότερο υλικό μόνιμων μαγνητών. Το ιδιαίτερα υψηλό κόστος λοιπόν των μαγνητών Sm-Co, οδήγησε το 1984 στην ανακάλυψη ενός άλλου μόνιμου μαγνήτη σπάνιων γαιών, του μόνιμου μαγνήτη Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου (Nd-Fe-B). Συγκρινόμενοι με τους μόνιμους μαγνήτες Sm-Co, οι μόνιμοι μαγνήτες Nd-Fe-B παρουσιάζουν παρόμοιες μαγνητικές ιδιότητες έχοντας όμως το σημαντικό πλεονέκτημα του πολύ μικρότερου κόστους. Λόγω των άριστων μαγνητικών χαρακτηριστικών και της εξέλιξης των μόνιμων μαγνητών Nd-Fe-B ξεκίνησε μια τάση προς τη χρήση μηχανών μόνιμων μαγνητών σε μεγάλης κλίμακας βιομηχανικές εφαρμογές. Έτσι λοιπόν, τα τελευταία χρόνια έχει επικρατήσει η χρησιμοποίηση μόνιμων μαγνητών Nd-Fe-B και σε σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη που βρίσκουν εφαρμογές σε ανεμογεννήτριες αιολικών συστημάτων, όπως η περίπτωση που εξετάζουμε.

3.8 Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος [8]

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος από μια μορφή σε μια άλλη και για το σκοπό αυτό περιλαμβάνουν ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος, τα οποία ελέγχονται από αναλογικά ή ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα χαμηλής ισχύος. Με τους μετατροπείς αυτούς μπορούμε να ελέγξουμε και να ρυθμίσουμε τη ροή ενέργειας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων. Σε σχέση με τις ηλεκτρομηχανικές διατάξεις που χρησιμοποιούνταν παλιότερα, οι σύγχρονοι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος :

- έχουν μικρότερο όγκο και βάρος
- προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτερη απόκριση στη ρύθμιση των μεγεθών εξόδου
- έχουν υψηλότερο συντελεστή απόδοσης
- έχουν ελάχιστες ανάγκες συντήρησης και παρουσιάζουν αθόρυβη λειτουργία
- μοναδικό, ίσως, μειονέκτημα είναι η εμφάνιση ανώτερων αρμονικών στην πλευρά της τροφοδοσίας τους αλλά και στην πλευρά του φορτίου

Οι μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας (ισχύος) που χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε διατάξεις ανεμογεννητριών είναι:

1. **Μετατροπείς ac-dc ή Ανορθωτές (Rectifiers).** Ανορθωτές ονομάζονται οι διατάξεις ισχύος, οι οποίες μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Ανάλογα με τη μορφή της εναλλασσόμενης εισόδου οι ανορθωτές διακρίνονται σε μονοφασικούς και πολυφασικούς (διφασικούς, τριφασικούς, εξαφασικούς). Ακόμη διακρίνονται σε ελεγχόμενους και μη ελεγχόμενους, ανάλογα με το αν η τάση εξόδου είναι μεταβαλλόμενη ή σταθερή.

2. **Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (dc-dc converters, choppers).** Οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος μετατρέπουν τη συνεχή τάση με ορισμένο πλάτος και πολικότητα σε συνεχή τάση με διαφορετικό πλάτος ή/και πολικότητα. Διακρίνονται σε μετατροπείς υποβιβασμού (step-down/buck) και ανύψωσης (step-up/boost) της τάσης, ανάλογα με το αν η τάση εξόδου είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της τάσης εισόδου. Υπάρχει και ο μικτός μετατροπέας (step-up/step-down converter) όπου η τάση εξόδου μπορεί να είναι υψηλότερη ή χαμηλότερη της τάσης εισόδου. Ακόμη, διακρίνονται σε μετατροπείς με απομόνωση και χωρίς απομόνωση της εξόδου από την είσοδό τους.
3. **Μετατροπείς dc-ac ή Αντιστροφείς (Inverters).** Οι αντιστροφείς μετατρέπουν την ενέργεια συνεχούς μορφής σε εναλλασσόμενη. Η λειτουργία τους είναι δηλαδή αντίθετη από εκείνη των ανορθωτών. Η έξοδος των αντιστροφέων είναι μονοφασική είτε πολυφασική (συνήθως τριφασική). Επίσης, η συχνότητα και το πλάτος της τάσης ή του ρεύματος εξόδου είναι ελεγχόμενα.

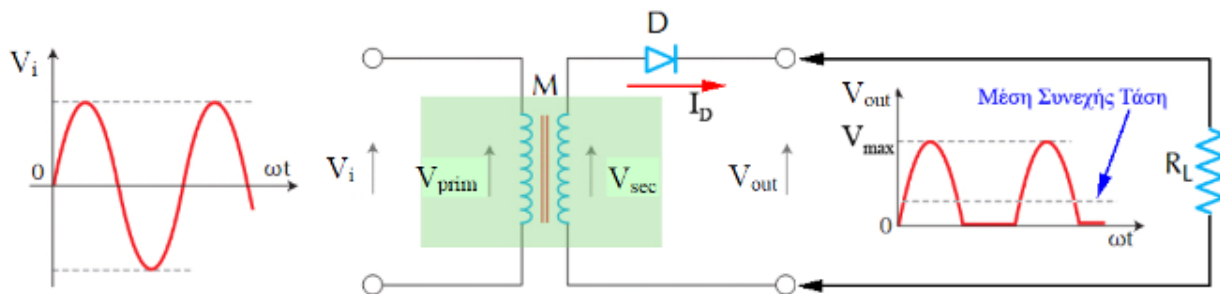
3.9 Μετατροπείς ac-dc ή Ανορθωτές (Rectifiers)

Οι βασικοί τύποι ανορθωτικών διατάξεων είναι τρεις[16]:

1. Ανορθωτική Διάταξη Μισού Κύματος (με μια δίοδο) που κάνει απλή ανόρθωση (ημιανόρθωση)
2. Ανορθωτική Διάταξη Πλήρους Κύματος (με δυο διόδους) που χρησιμοποιεί μετασχηματιστή με μεσαία λήψη και κάνει διπλή (ή πλήρη) ανόρθωση.
3. Ανορθωτική Διάταξη Γέφυρας (με τέσσερις διόδους) που κάνει διπλή (ή πλήρη) ανόρθωση.

3.9.1 Ανορθωτική Διάταξη Μισού Κύματος (Απλή Ανόρθωση)

Το βασικό κύκλωμα της απλής ανόρθωσης (ή ημιανόρθωσης) φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα (3.11): Κύκλωμα απλής ανόρθωσης ή ημιανόρθωσης

Η ημιανόρθωση είναι η απλούστερη ανορθωτική διάταξη (μια δίοδος) με την οποία μπορεί να παραχθεί DC τάση από AC είσοδο. Η λειτουργία της είναι η εξής:

Στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση πλάτους V_i και στο δευτερεύον τύλιγμα του επάγεται τάση V_{sec} . Συνήθως η εφαρμοζόμενη εναλλασσόμενη τάση εισόδου προέρχεται από το δίκτυο της ΔΕΗ οπότε το πλάτος της είναι $V_i = V_{rms} \sqrt{2} = 230\sqrt{2}$ και η

συχνότητα της είναι $f = 50\text{Hz}$. Για τον μετασχηματιστή είναι γνωστό ότι ο λόγος των τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του είναι ίσος με τον λόγο των σπειρών του, δηλαδή:

$$\frac{V_{prim}}{V_{sec}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4)$$

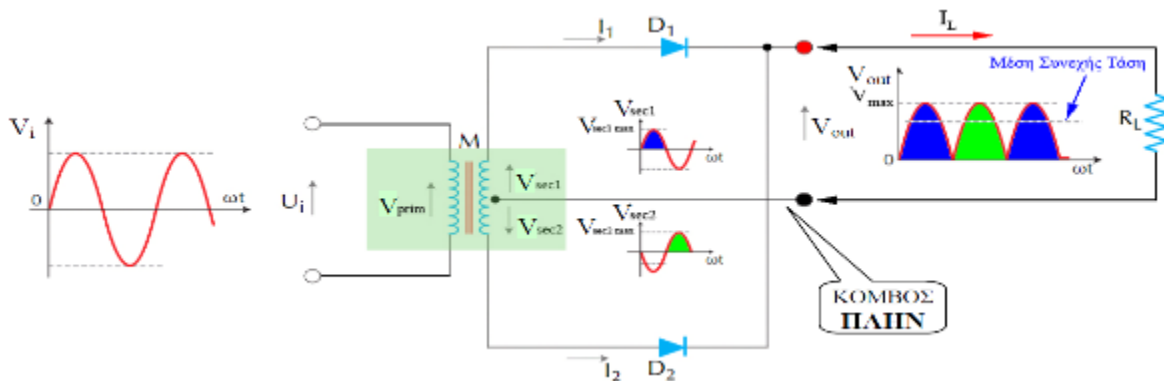
όπου N_1, N_2 είναι ο αριθμός σπειρών του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, αντίστοιχα.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της ημιανορθωτικής διάταξης είναι το χαμηλό κόστος και η απλότητα της κατασκευής. Στα μειονεκτήματα είναι η σχετικά μικρή τιμή της DC τάσης εξόδου και η μεγάλη κυμάτωση αυτής, που στην πλειοψηφία των περιπτώσεων απαιτεί καλό φιλτράρισμα (πιο δαπανηρό φίλτρο).

3.9.2 Ανορθωτική Διάταξη Πλήρους Κύματος

Α. Ανόρθωση με διόδους και μετασχηματιστή με μεσαία λήψη (Διπλή Ανόρθωση)

Όπως προαναφέρθηκε ένα από τα μειονεκτήματα της ημιανόρθωσης είναι η σχετικά μικρή τιμή της DC τάσης εξόδου. Γι' αυτό σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιείται ανορθωτική διάταξη όχι ημιανόρθωσης αλλά πλήρους ανόρθωσης. Η πλήρης ανόρθωση μπορεί να υλοποιηθεί με δύο βασικά κυκλώματα. Ή χρησιμοποιώντας μετασχηματιστή με μεσαία λήψη και δυο διόδους, ή χρησιμοποιώντας απλό μετασχηματιστή και ανορθωτική διάταξη γέφυρας (τέσσερις διόδους). Το κύκλωμα της εικόνας 3.12 κάνει πλήρη ανόρθωση χρησιμοποιώντας μετασχηματιστή με μεσαία λήψη και δυο διόδους. Η χρήση μετασχηματιστή M με δύο όμοια δευτερεύοντα ($U_{sec1} = U_{sec2}$) και η προσθήκη μιας επιπλέον διόδου (σε σχέση με την απλή ανόρθωση) επιτρέπει την διέλευση ρεύματος προς το φορτίο και κατά τις δύο ημιπεριόδους του σήματος εισόδου. Λόγω δηλαδή της μεσαίας λήψης οι είσοδοι στις δύο διόδους έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 180° (ως προς τον κόμβο του πην). Έτσι κατά την μια ημιπερίοδο το ρεύμα προς το φορτίο R_L διέρχεται μέσω του ενός δευτερεύοντος και της διόδου D_1 ενώ κατά την άλλη ημιπερίοδο το ρεύμα διέρχεται μέσω του άλλου δευτερεύοντος και της διόδου D_2 . Δηλαδή το ολικό ρεύμα του φορτίου I_L είναι το διανυσματικό άθροισμα των δύο ρευμάτων I_1 και I_2 .



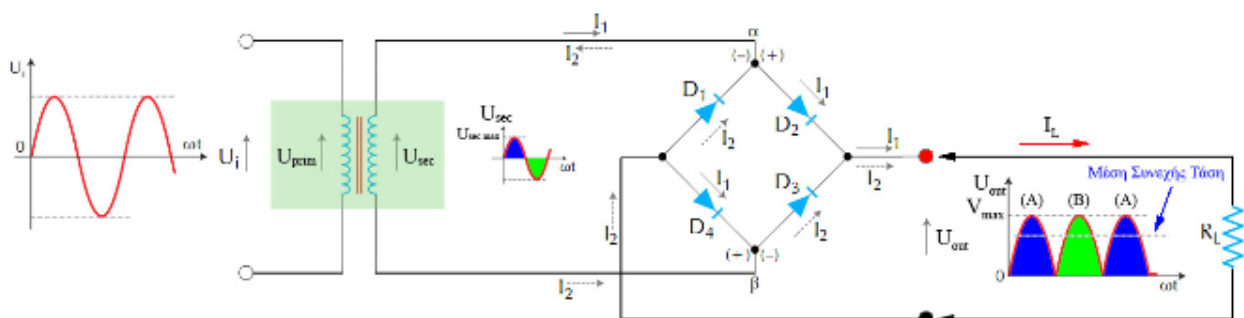
Εικόνα (3.12): Κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης με χρήση μετασχηματιστή μεσαίας λήψης και δύο διόδους (διπλή ανόρθωση)

Τα κύρια πλεονεκτήματα της Διπλής Ανόρθωσης είναι η ικανοποιητική τιμή της DC τάσης εξόδου και η σχετικά καλή Απόδοση. Η συχνότητα κυμάτωσης είναι διπλάσια απ' ό τι στην απλή ανόρθωση και έτσι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων αρκεί ένα μέτριο φίλτρο. Στα μειονεκτήματα είναι το μεγαλύτερο κόστος που απαιτείται για τον μετασχηματιστή με μεσαία λήψη και η διπλάσια ανάστροφη τάση που πρέπει να αντέχουν οι δύο δίοδοι (σε σχέση με την απλή ανόρθωση).

B. Ανόρθωση με Γέφυρα

Η λειτουργία της έχει ως εξής: Όταν η τάση στο κόμβο α είναι θετική ως προς τον κόμβο β, δηλαδή κατά την πρώτη ημιπερίοδο του σήματος εισόδου, άγουν οι δίοδοι D_2 και D_4 , αφού οι άνοδοι τους είναι θετικά πολωμένες ως προς την κάθοδο τους και το ρεύμα I_1 ακολουθεί το δρόμο που δείχνεται στο σχήμα 3.13 (δηλαδή από το δευτερεύον του μετασχηματιστή μέσω του κόμβου α, της διόδου D_2 , του φορτίου R_L , της διόδου D_4 και τέλος του κόμβου β, ξαναγυρνά στον μετασχηματιστή). Η κυματομορφή της τάσης εξόδου κατά αυτή την διαδρομή του ρεύματος απεικονίζεται στο σχήμα 3.6 σαν (Α) – μπλε χρώμα.

Κατά την δεύτερη ημιπερίοδο του σήματος εισόδου, όπως αυτό αναπτύσσεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, ο κόμβος α γίνεται αρνητικός ως προς τον κόμβο β οπότε άγουν τώρα οι δίοδοι D_1 και D_3 , αφού οι άνοδοί τους είναι τώρα πιο θετικές από τις αντίστοιχες καθόδους. Το ρεύμα I_2 ακολουθεί το δρόμο από το δευτερεύον του μετασχηματιστή στον κόμβο β, μέσω της διόδου D_3 στο φορτίο R_L , και στη συνέχεια μέσω της διόδου D_1 και του κόμβου α επιστρέφει στο μετασχηματιστή. Η κυματομορφή της τάσης εξόδου κατά αυτή την διαδρομή του ρεύματος απεικονίζεται στο σχήμα 3.6 σαν (Β) – πράσινο χρώμα. Το ολικό ρεύμα εξόδου I_L είναι το διανυσματικό άθροισμα των δύο ρευμάτων I_1 και I_2 .

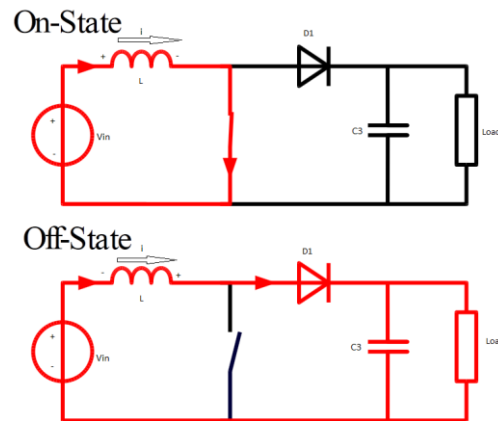
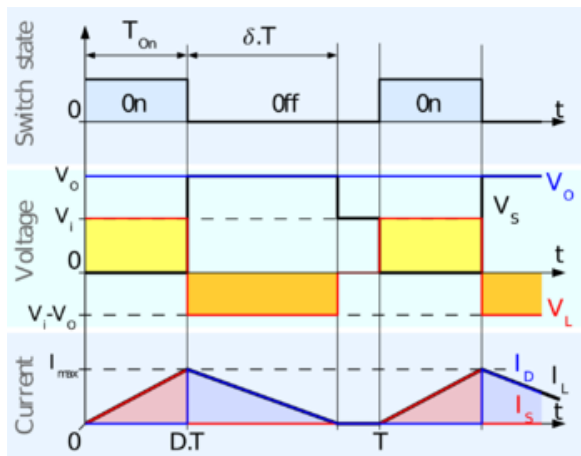


Εικόνα (3.13): Κύκλωμα ανόρθωσης με γέφυρα

Το κύριο πλεονέκτημα της ανόρθωσης με γέφυρα είναι ότι επιτυγχάνεται πλήρης ανόρθωση χρησιμοποιώντας απλό μετασχηματιστή. Το μειονέκτημα της, που είναι και αρκετά ασήμαντο, είναι ότι χρησιμοποιούνται τέσσερις δίοδοι αντί για δυο και αυξάνεται λίγο το κόστος και η πολυπλοκότητα του κυκλώματος.

3.10 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης συνεχούς ρεύματος (Boost DC-DC Converter)[8][21]

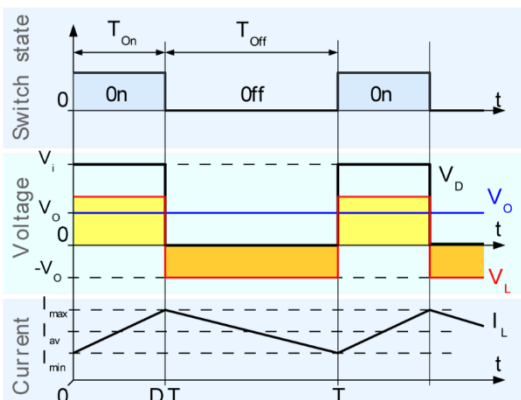
Ο ρόλος αυτού του μετατροπέα είναι η ανύψωση της συνεχούς τάσης εισόδου με ελεγχόμενο τρόπο. Η τάση εξόδου είναι και αυτή συνεχής. Το κύκλωμα αποτελείται από ένα IGBT, μία δίοδο, ένα πηνίο και ένα πυκνωτή συνδεδεμένο στην έξοδο. Όταν το IGBT στοιχείο άγει, η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη, απομονώνοντας την έξοδο, οπότε η ενέργεια που έρχεται από την είσοδο του μετατροπέα αποθηκεύεται στο πηνίο. Μόλις το στοιχείο σταματήσει να άγει, τότε η δίοδος πολώνεται θετικά με αποτέλεσμα η αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου να περνά προς την έξοδο. Στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, ο πυκνωτής εξομάλυνσης θεωρείται πολύ μεγάλος, ώστε να εξασφαλίζεται μία σταθερή τάση εξόδου. Το ρεύμα του μετατροπέα μπορεί να είναι συνεχές ή διακοπτόμενο ανάλογα με τις παραμέτρους του μετατροπέα και τον συχνότητα αγωγής του IGBT.



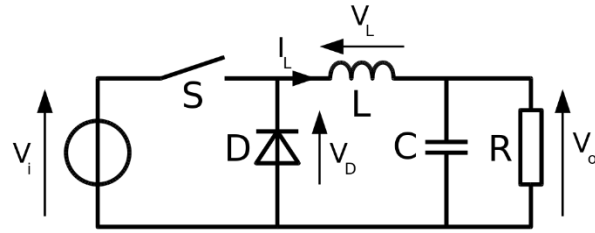
Εικόνα (3.14): Οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης ενός boost converter που βρίσκεται υπό συνεχή λειτουργία και το κύκλωμά του.

3.10.1 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης συνεχούς ρεύματος (Step - Down/Buck DC - DC Converter)[8][22]

Ο ρόλος αυτού του μετατροπέα είναι ο υποβιβασμός της συνεχούς τάσης εισόδου σε μία επίσης συνεχή τάση μικρότερης τιμής. Το κύκλωμα του μετατροπέα υποβιβασμού έχει τα ίδια δομικά στοιχεία με το κύκλωμα του μετατροπέα ανύψωσης τάσης.



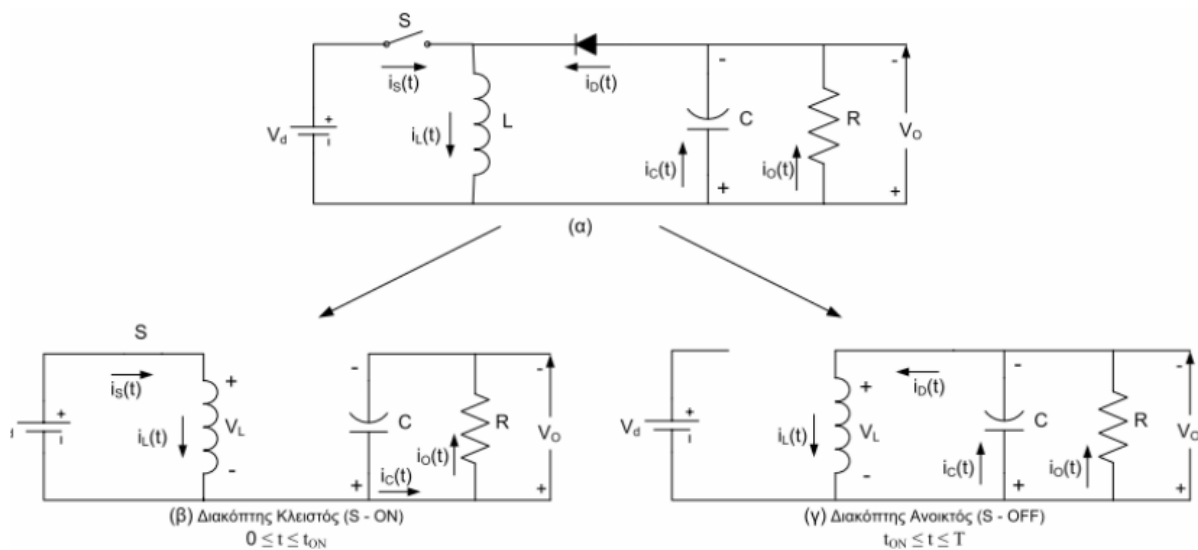
Εικόνα (3.15): Οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης ενός ιδανικού step down dc-dc converter που βρίσκεται υπό συνεχή λειτουργία, όπως αυτές διαμορφώνονται στο χρόνο.



Εικόνα (3.16): Το κύκλωμα ενός ιδανικού step down/buck dc-dc converter

3.10.2 Αμφίδρομος μικτός μετατροπέας συνεχούς ρεύματος (Bidirectional Buck – Boost DC – DC Converter)[8]

Εκτός από τους δύο προηγούμενους βασικούς μετατροπείς DC-DC υπάρχει και ο μικτός DC-DC μετατροπέας. Ο μικτός DC - DC μετατροπέας χαρακτηρίζεται και ως έμμεσος μετατροπέας, καθώς η τάση πηγής ποτέ δε συνδέεται άμεσα με το φορτίο. Το πηνίο στο κύκλωμα του μικτού DC - DC μετατροπέα είναι αυτό που ελέγχει τη ροή ενέργειας από την πλευρά της εισόδου στην πλευρά της εξόδου. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το κύκλωμα του μικτού DC - DC μετατροπέα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις φορές των ρευμάτων που ρέουν στον πυκνωτή και στην αντίσταση φορτίου, καθώς και στην πολικότητα της τάσης εξόδου.

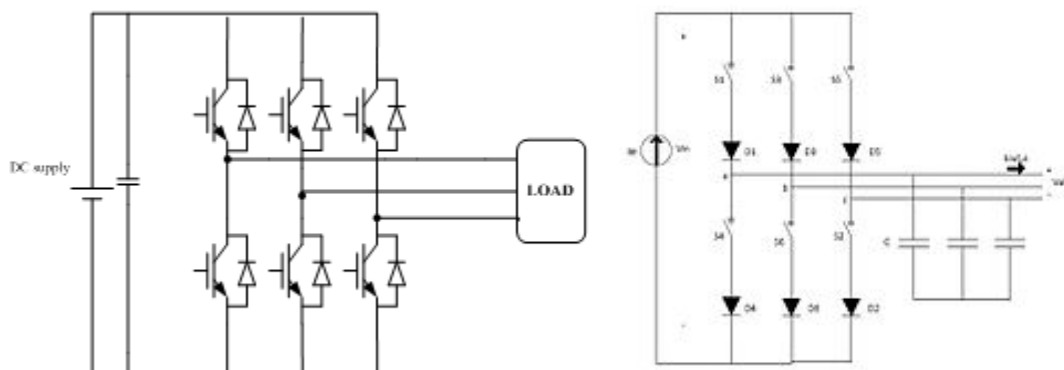


Εικόνα (3.16): Κύκλωμα μικτού DC – DC μετατροπέα

3.11 Αντιστροφέας Συστήματος (Inverter) [8]

Ο αντιστροφέας είναι μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος που έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει στην είσοδό του συνεχή τάση και να τη μετατρέπει σε εναλλασσόμενη τάση μεταβλητού πλάτους και συχνότητας. Χρησιμοποιείται σε όλο και περισσότερες εφαρμογές ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως λόγω της ευελιξίας που παρέχει στον έλεγχο των παραμέτρων της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου.

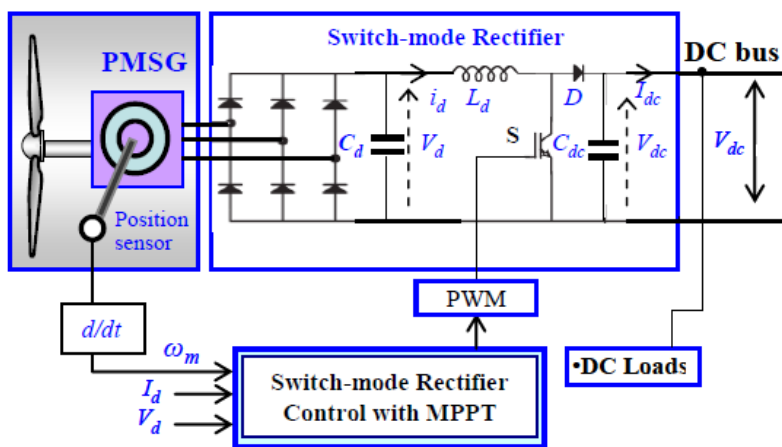
Οι αντιστροφείς χωρίζονται, σε αυτούς που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης και έχουν ως φίλτρο εισόδου πυκνωτή (Voltage Source Inverters - VSI) και σε αυτούς που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος και ως φίλτρο εισόδου χρησιμοποιούν πηνίο (Current Source Inverters - CSI). Ο αντιστροφέας μετατρέπει την συνεχή τάση εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης σε εναλλασσόμενη της οποίας τα χαρακτηριστικά συμφωνούν με αυτά του δικτύου.



Εικόνα (3.17): Κυκλωματικό διάγραμμα Voltage Source Inverter στα αριστερά και Current Source Inverter στα δεξιά.

Κεφάλαιο 4^ο - Σχεδιασμός και προσομοίωση ανεμογεννήτριας μόνιμων μαγνητών - μεταβλητών στροφών

Στην παρούσα διπλωματική έγινε μελέτη και μοντελοποίηση μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG), ενός ανορθωτή (rectifier) κι ενός μετατροπέα DC-DC Boost Converter, προκειμένου να συνδεθούν σε ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο υλοποιήθηκε σε προηγούμενη διπλωματική εργασία, με σκοπό την περαιτέρω επέκτασή της. Γι' αυτόν τον λόγο θα γίνει μια αναλυτική περιγραφή όλων των συστημάτων της Α/Γ τόσο σε θεωρητικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο μοντελοποίησης στο περιβάλλον του Matlab/Simulink.



Εικόνα (4.1): Τοπολογία του προς μελέτη συστήματος

4.1 Αεροδυναμικές Παράμετροι [4]

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μια ανεμογεννήτρια εξαρτάται από την ισχύ του ανέμου που προσπίπτει σε αυτή. Για τον υπολογισμό της ισχύος του ανέμου, θεωρούμε μια αέρια μάζα m η οποία όταν έχει ταχύτητα V_w , η κινητική ενέργεια του ανέμου ισούται με:

$$K = \frac{1}{2} m u V_w^3 \quad (5)$$

Αν η πυκνότητα του αέρα είναι ρ και μεταβάλλεται κυρίως ανάλογα με τις διακυμάνσεις του ύψους και της θερμοκρασίας, A η επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, όπου :

$$A = \pi R^2, \text{ όπου } R \text{ το μήκος των πτερυγίων} \quad (6)$$

τότε η αέρια μάζα που διαπερνά αυτή την επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου είναι:

$$m = \rho A V_w \quad (7)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις συνεπάγεται πως η στιγμιαία ισχύς του ανέμου (κινητική ενέργεια στη μονάδα του χρόνου) που διαπερνά την επιφάνεια σάρωσης και αξιοποιείται από την ανεμογεννήτρια είναι:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \quad (8)$$

Λόγω του ότι αφενός ο αέρας απομακρύνεται με κάποια ταχύτητα από την ανεμογεννήτρια και αφετέρου τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας προκαλούν εκτροπή μέρους του αέρα το οποίο παρακάμπτει την ανεμογεννήτρια χωρίς να την διαπερνά, ένα μέρος μόνο της διαθέσιμης ισχύος του ανέμου (P_m) εν τέλει δεσμεύεται από την ανεμογεννήτρια. Έτσι, ως αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p μιας ανεμογεννήτριας ορίζεται ο λόγος της μηχανικής ισχύος που παράγεται (P_m) προς την ισχύ του ανέμου που διαπερνά την επιφάνεια σάρωσης (P_w):

$$C_p = \frac{P_m}{P_w} \quad (9)$$

Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p , εκφράζει το ποσοστό της προσπίπτουσας ισχύος του ανέμου που μετρέπεται σε μηχανική από την ανεμογεννήτρια. Επί της ουσίας εκφράζει την αποτελεσματικότητα μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική μιας ανεμογεννήτριας. Η μέγιστη θεωρητική τιμή που μπορεί να λάβει ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p είναι 0,593 και ονομάζεται όριο του Betz. Στην πράξη όμως λόγω μηχανικών τριβών, στροβίλων και αεροδυναμικών ατελειών, η τιμή του C_p δεν ξεπερνά το 0,5. Επιπλέον, καθώς εξαρτάται και από τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες της ανεμογεννήτριας καθώς επίσης και από τις συνθήκες λειτουργίας της, η τιμή του C_p δεν παραμένει σταθερή. Πιο συγκεκριμένα, εξαρτάται από το λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου λ και την γωνία βήματος πτερυγίου β και η τιμή του υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον προσεγγιστικό τύπο[25]:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (10)$$

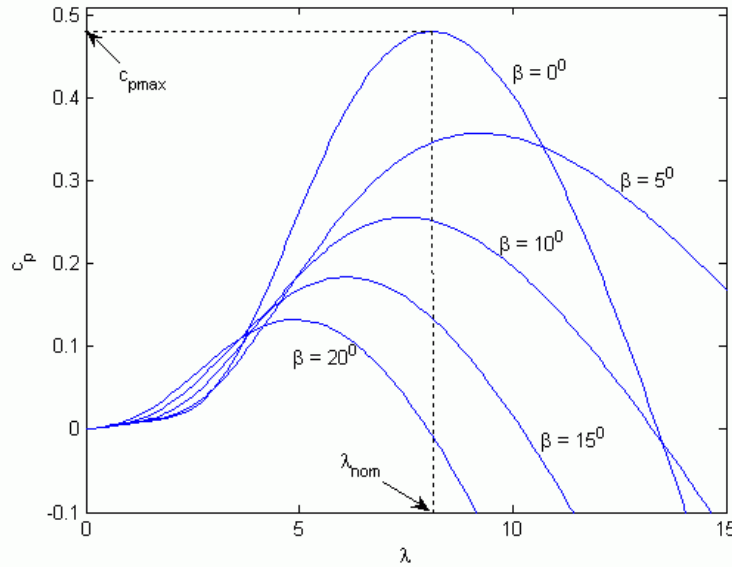
όπου $c_1=0.5176$, $c_2=116$, $c_3=0.4$, $c_4=5$, $c_5=21$, $c_6=0.0068$ και $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda+0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3+1}$

Ο λόγος ταχύτητας ακροπερυγίου λ (tip speed ratio – TSR) είναι ο λόγος της γραμμικής ταχύτητας λόγω περιστροφής των ακροπερυγίων προς την ταχύτητα του ανέμου, πρόκειται για αδιάστατο μέγεθος και δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_w} \quad (11)$$

όπου ω_r η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας σε rad/sec και R το μήκος των ακροπερυγίων σε m .

Η μεταβολή του C_p συναρτήσει του λ και της γωνίας βήματος β συμβαίνει ως εξής:



Εικόνα (4.2): Καμπύλες $C_p - \lambda$ με βάση τη γωνία βήματος

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται πως ο συντελεστής C_p για μηδενική γωνία βήματος ($\beta = 0$), παίρνει τη μέγιστη δυνατή τιμή του, C_{pmax} , για μια συγκεκριμένη τιμή του λ η οποία συμβολίζεται ως λ_{opt} . Για διαφορετικές τιμές της γωνίας βήματος β , υπάρχει μια βέλτιστη τιμή του λ για την οποία ο συντελεστής C_p παίρνει τη μέγιστη τιμή του γι' αυτή τη γωνία βήματος. Η βέλτιστη τιμή του λ , λ_{opt} , ορίζει και μια βέλτιστη τιμή για την γωνιακή ταχύτητα ακροπερυγίου, $\omega_{r,opt}$, η οποία πλέον θα εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα του ανέμου και ορίζεται από τη σχέση:

$$\omega_{r,opt} = \lambda_{opt} \frac{V_w}{R} \quad (12)$$

Συμπερασματικά λοιπόν, για μια συγκεκριμένη κλίση των ακροπερυγίων β και για κάθε ταχύτητα ανέμου V_w , υπάρχει μια γωνιακή ταχύτητα ακροπερυγίων τέτοια ώστε η ανεμογεννήτρια να απομαστεύει τη μέγιστη δυνατή ισχύ από τον άνεμο, για τη συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου.

Τελικά, η μηχανική ισχύς που προκύπτει στον ανεμοκινητήρα από τον άνεμο ισούται με:

$$P_m = \frac{1}{2} \pi \rho C_p R^2 V_w^3 \quad (13)$$

και η αντίστοιχη μηχανική ροπή προκύπτει από την σχέση:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} \quad (14)$$

Συνοψίζοντας, προκειμένου να επιτυγχάνεται η μέγιστη απομάστευση ισχύος για μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου, και ως εκ τούτου βέλτιστη παραγωγή μηχανικής ισχύος από τον

ανεμοκινητήρα $P_{m,opt}$ θα πρέπει η ανεμογεννήτρια να λειτουργεί υπό τη βέλτιστη γωνιακή ταχύτητα $\omega_{r,opt}$ για αυτή την ταχύτητα ανέμου.

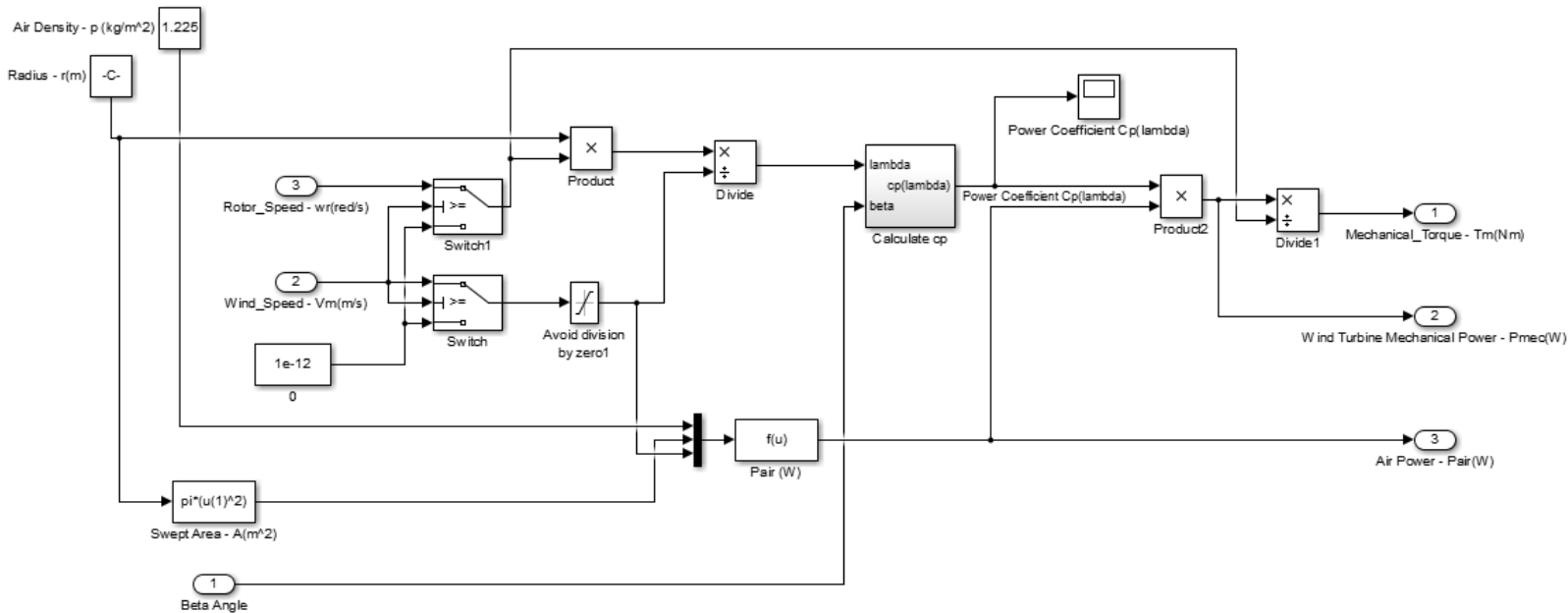
4.1.1 Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους

Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας που μοντελοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπως αναλύθηκαν παραπάνω, έχουν ως εξής:

- Επιφάνεια σάρωσης $A = 1,92 \text{ m}^2$
- Πυκνότητα αέρα $\rho = 1,225 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
- Η γωνία βήματος των πτερυγίων παραμένει σταθερή και ίση με $\beta = 0^\circ$
- Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος ρυθμίστηκε να παίρνει πάντα τη μέγιστη τιμή $C_{p,max} = 0,48$ και λαμβάνεται για $\lambda_{opt} = 8,1$

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται και η ταχύτητα περιστροφής ω_r , η οποία ρυθμίστηκε να παίρνει πάντα τη βέλτιστη τιμή, κάτι το οποίο συνεπάγεται ένα $P_{m,opt}$ και ένα $T_{m,opt}$ μέσω ενός αλγορίθμου ελέγχου ο οποίος θα περιγραφεί παρακάτω.

Το μοντέλο του αεροδυναμικού μέρους της ανεμογεννήτριας στο περιβάλλον του Matlab/Simulink βασίστηκε στις παραπάνω εξισώσεις και παρουσιάζεται στην εικόνα (4.3):



Εικόνα (4.3): Αεροδυναμικό μέρος

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, είσοδοι για το αεροδυναμικό κομμάτι της ανεμογεννήτριας αποτελούν η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα και η μεταβλητή ταχύτητα του ανέμου. Το μήκος των ακροπτερυγίων, η πυκνότητα του αέρα και η γωνία βήματος των πτερυγίων

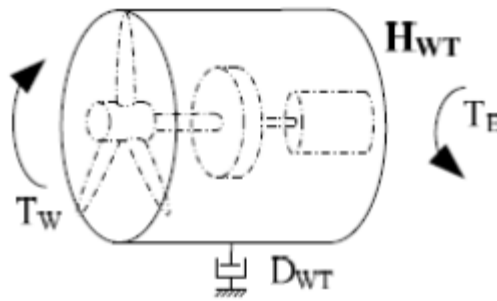
εισάγονται ως σταθερές και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της επιφάνειας σάρωσης. Στο συγκεκριμένο μοντέλο η γωνία βήματος ισούται με 0° καθώς δεν υπάρχει ελεγκτής γωνίας βήματος (pitch controller) κάτι το οποίο συνηθίζεται σε ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος. Λόγω του ότι η ανεμογεννήτρια τίθεται σε λειτουργία όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη ή ίση των $3,5 \text{ m/s}$ ($V_w \geq 3,5 \text{ m/s}$) και σταματά να επιταχύνεται όταν φτάσει τα 12 m/s ($V_w > 12 \text{ m/s}$), γίνεται χρήση ενός διακόπτη προκειμένου να πραγματοποιείται αυτός ο έλεγχος. Στη συνέχεια, με την κατάλληλη επιλογή του αεροδυναμικού συντελεστή C_p γίνεται ο υπολογισμός της μηχανικής ροπής (T_m), της μηχανικής ισχύος της Α/Γ (P_{mec}) και της αεροδυναμικής ισχύος (P_{air}), που αποτελούν και τις εξόδους του παραπάνω συστήματος, με χρήση των εξισώσεων που περιγράφηκαν προηγουμένως.

4.2 Σύστημα μετάδοσης κίνησης [11]

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της Α/Γ της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι μίας μάζας (One Mass Drive Train). Στο one mass drive train όλα τα δομικά στοιχεία του συστήματος μετάδοσης κίνησης είναι “συγκεντρωμένα” και λειτουργούν σαν μια ενιαία περιστρεφόμενη μάζα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 4.4. Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω διαφορική εξίσωση:

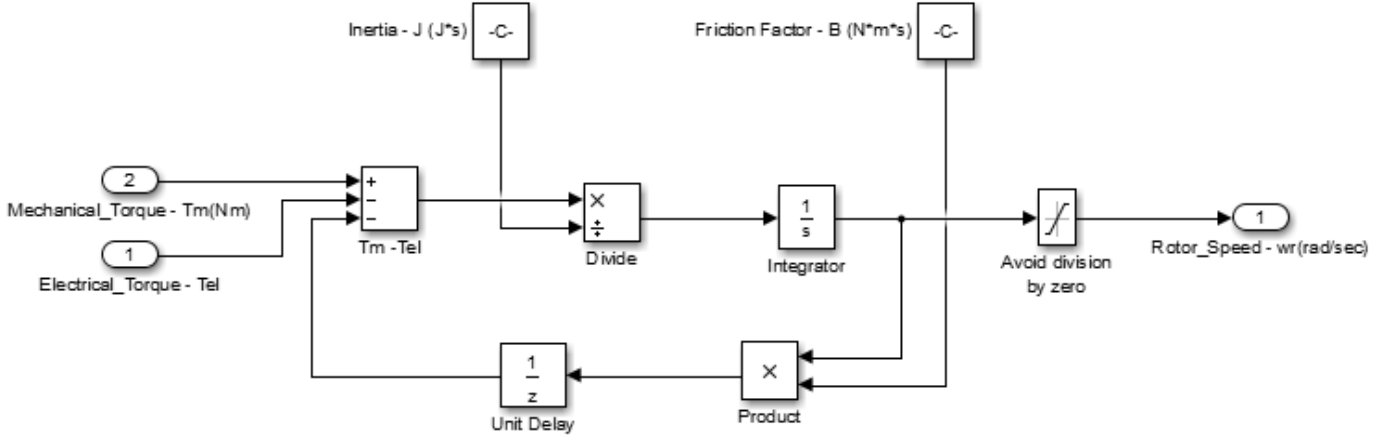
$$T_{el} = T_m - J \frac{d\omega_r}{dt} - B\omega_r \quad (15)$$

όπου ω_r είναι η γωνιακή ταχύτητα του ρότοτρα, B ο συντελεστής απόσβεσης (Nm.s), J η αδράνεια (kgm^2), T_{el} η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας και T_m η μηχανική ροπή που εφαρμόζεται στην ανεμογεννήτρια.



Εικόνα (4.4): Μοντέλο του One mass drive train συστήματος μετάδοσης κίνησης

Παρακάτω δίνεται το σχήμα του συστήματος μετάδοσης κίνησης όπως αυτό μοντελοποιήθηκε στο Matlab/Simulink:



Εικόνα (4.5): Σύστημα μετάδοσης κίνησης – one mass drive train

Εισόδους του συστήματος αποτελούν η μηχανική ροπή T_m όπως αυτή υπολογίστηκε από το αεροδυναμικό μέρος και η ηλεκτρομαγνητική ροπή της Α/Γ, T_{el} , η οποία επιστρέφει αναδρομικά από την PMSG, το μοντέλο της οποίας θα εξεταστεί αμέσως μετά. Μετά την εφαρμογή του τύπου (15), ως έξοδο του συστήματος λαμβάνουμε την γωνιακή ταχύτητα του ρότορα.

4.3 Σύγχρονη Γεννήτρια Μόνιμου Μαγνήτη – Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Η δημιουργία ενός ακριβούς μοντέλου που να περιγράφει ηλεκτρικά μια μηχανή μονίμων μαγνητών είναι μια αρκετά απαιτητική διαδικασία, καθώς τα μη γραμμικά φαινόμενα που παρουσιάζουν τα μαγνητικά υλικά σε συνδυασμό με τα αρμονικά φαινόμενα που σχετίζονται με την κατασκευή της γεννήτριας, χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής.

Αρχικά, χρειάζεται να εκφραστούν οι ηλεκτρικές εξισώσεις της PMSG στο (d, q) πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα, οι οποίες συνδέονται με τις μαγνητικές ροές του στάτη της γεννήτριας. Πρόκειται για τη μορφή μοντελοποίησης η οποία χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στις AC μηχανές κι αυτή εφαρμόστηκε στην προσομοίωση της λειτουργίας της γεννήτριας της παρούσας διπλωματικής. Οι εξισώσεις αυτές διαμορφώθηκαν ως εξής[5]:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} + W_r \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} \quad (16)$$

Για μια ημιτονοειδή κατανομή της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης, οι φάσορες του ρεύματος και της μαγνητικής ροής συνδέονται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_r \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad \text{όπου } \varphi_r \text{ είναι η μαγνητική ροή του ρότορα.} \quad (17)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (17) στην εξίσωση (16), παίρνουμε το παρακάτω σύστημα μέσω του μετασχηματισμού Laplace[1]:

$$\begin{cases} v_d = (r_s + L_d \cdot p) i_d - e_d \\ v_q = (r_s + L_q \cdot p) i_q - e_q \end{cases} \quad (18)$$

Όπου οι τιμές της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης στους άξονες d, q εκφράζονται από τις σχέσεις:

$$\begin{cases} e_d = \omega_r L_q i_q \\ e_q = \omega_r L_d i_d + \omega_r \varphi_r \end{cases} \quad (19)$$

Τα ρεύματα στους άξονες d και q της PMSG, δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{cases} i_d = \frac{-V_d - \omega \lambda_q + p \lambda_q}{R_s} \\ i_q = \frac{-V_q + \omega \lambda_d + p \lambda_d}{R_s} \end{cases} \quad (20)$$

όπου, λ_d και λ_q είναι οι μαγνητικές ροές του στάτη στους d, q άξονες αντίστοιχα και δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{cases} \lambda_d = -L_d i_d + \lambda_M \\ \lambda_q = -L_q i_q \end{cases} \quad (21)$$

Η εξίσωση της ροπής μιας σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη με εσωτερικούς μαγνήτες, δίνεται από την εξίσωση:

$$T_{el} = -\frac{3}{2} P (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) = -\frac{3}{2} P [\lambda_M i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (22)$$

Για μια σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη με επιφανειακούς μαγνήτες, που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία, ισχύει ότι $L_d = L_q$, κι έτσι η εξίσωση της ροπής γίνεται:

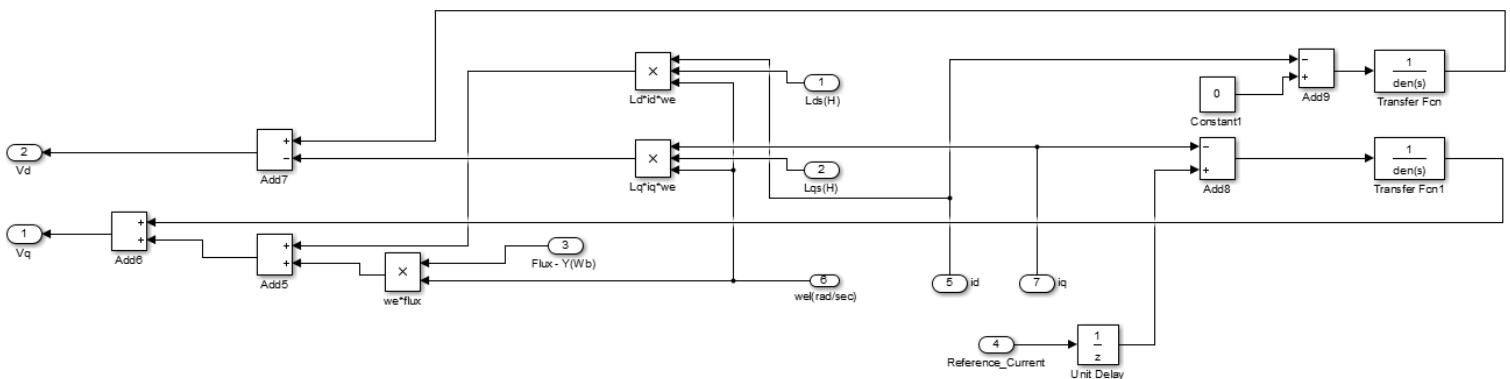
$$T_{el} = -\frac{3}{2} P \lambda_M i_q \quad (23)$$

Στις εξισώσεις 18-23, τα μεγέθη $v_d, v_q, i_d, i_q, L_d, L_q$ είναι οι τάσεις, τα ρεύματα και αυτεπαγωγές του στάτη στους d, q άξονες αντίστοιχα, R_s είναι η αντίσταση στο στάτη, λ_M είναι το πλάτος της μαγνητικής ροής (Wb) στο στάτη λόγω του μόνιμου μαγνήτη στο ρότορα, ω είναι η

4.3.1 Field Oriented Control (FOC)

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος ελέγχου που χρησιμοποιείται προκειμένου οι Σύγχρονες Γεννήτριες Μόνιμου Μαγνήτη να λειτουργούν στη μέγιστη απόδοσή τους, είναι ο έλεγχος Field Oriented Control (FOC). Ο FOC είναι ένας κλειστού βρόγχου έλεγχος όπου αυτό που επιτυγχάνεται είναι η αναπαράσταση της δυναμικής συμπεριφοράς μιας μηχανής μόνιμου μαγνήτη με χαρακτηριστικά DC μηχανής, δηλαδή ελέγχοντας το ρεύμα στο στάτη της γεννήτριας εμμέσως να ελέγχεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας.

Η FOC είναι μια τεχνική ελέγχου, όπου η μαγνητική ροή του ρότορα και η μαγνητική ροή του στάτη χωρίζονται κατά 90° με απώτερο στόχο την επίτευξη μέγιστης ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Αυτό που επί της ουσίας πραγματοποιεί αυτή η τεχνική, είναι η απόζευξη των ρευμάτων του στάτη σε ρεύμα παραγωγής ροπής και σε ρεύμα μαγνητισμού. Αποζευγώνοντας αυτά τα δυο ρεύματα, αυτό που επιτυγχάνεται είναι το ρεύμα παραγωγής ροπής να ανεξαρτητοποιείται από το ρεύμα μαγνητισμού καθιστώντας έτσι τον έλεγχο της ροπής της γεννήτριας πιο εύκολα διαχειρίσιμο, κάτι το οποίο συνεπάγεται την άμεση συσχέτιση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής που παράγεται μόνο με το ρεύμα παραγωγής ροπής. Αυτή η τεχνική ελέγχου αποτυπώνεται στο υποσύστημα Vector control, το μοντέλο του οποίου όπως αυτό διαμορφώθηκε στο περιβάλλον Matlab/Simulink, δίνεται στην εικόνα 4.7[7].

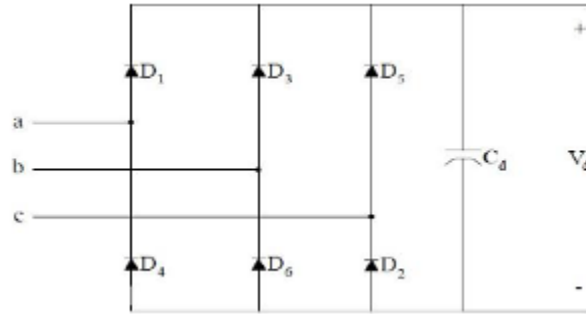


Εικόνα (4.7): Υποσύστημα Vector control

4.4 Ηλεκτρονικός μετατροπέας AC-DC (Ανορθωτής/Rectifier) [1]

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένας ανορθωτής αναλαμβάνει το ρόλο της μετατροπής του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές, προκειμένου αυτό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας για κάποιο φορτίο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία όπου υλοποιείται μια PMSG μεταβλητής ταχύτητας, η έξοδός της δεν είναι κατάλληλη για κατανάλωση καθώς ποικίλει σε πλάτος και συχνότητα λόγω των διακυμάνσεων της ταχύτητας του αέρα. Έτσι απαιτείται μια σταθερή τάση DC για άμεση χρήση ή αποθήκευση. Γι' αυτό το σκοπό λοιπόν υλοποιήθηκε μια τριφασική

ανορθωτική γέφυρα διόδων που λειτουργεί με διακόπτη η οποία συνδυάζεται με έναν μετατροπέα DC-DC Boost Converter, η λειτουργία του οποίου θα περιγραφεί σε επόμενο υποκεφάλαιο, προκειμένου να μετατρέψουν την AC έξοδο της γεννήτριας σε μια σταθερή DC τάση. Αυτού του είδους ο ανορθωτής χρησιμοποιείται κυρίως σε αυτόνομα αιολικά συστήματα ή σε μικρής ισχύος ανεμογεννήτριες καθώς έχει πολύ απλή τοπολογία και πάνω από όλα αποτελεί μια αρκετά χαμηλού κόστους λύση.



Εικόνα (4.8): Μη ελεγχόμενη τριφασική ανορθωτική γέφυρα διόδων και πυκνωτής εξομάλυνσης

Στην εικόνα 4.8 απεικονίζεται η ανορθωτική γέφυρα διόδων. Οι διόδοι του κυκλώματος έχουν αριθμηθεί σύμφωνα με τη σειρά αγωγής τους. Στην έξοδο της ανορθωτικής γέφυρας συνδέεται ένας πυκνωτής εξομάλυνσης C_d για τον περιορισμό της κυμάτωσης της συνεχούς τάσης εξόδου.

Η μέση τάση εξόδου του ανορθωτή, με δεδομένα την αντίσταση του στάτη και τη ροή αυτεπαγωγής της γεννήτριας, δίνεται από τη σχέση:

$$V_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_g - \frac{3}{\pi} \omega L_s I_d - 2I_d R_s \quad (26)$$

όπου ω = συχνότητα, R_s = αντίσταση του στάτη, L_s = ροή αυτεπαγωγής, I_d = μέσο ρεύμα εξόδου του ανορθωτή, V_g = φασική RMS τάση στην έξοδο της γεννήτριας.

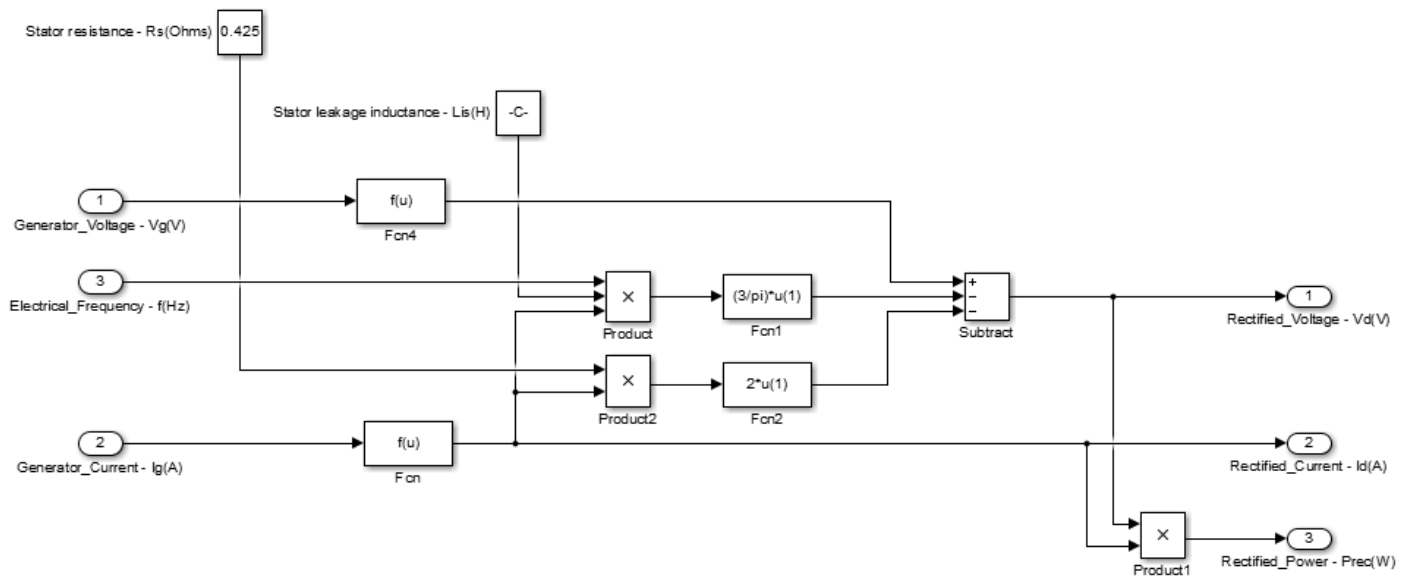
Η σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου της γεννήτριας και τάσης στο DC ζυγό μπορεί να προκύψει από την ισορροπία της ισχύος. Λόγω της διατήρησης της ενέργειας, η ισχύς στην AC πλευρά πρέπει να ισούται με την ισχύ στην DC πλευρά. Υποθέτοντας πως ο ανορθωτής βρίσκεται σε λειτουργία συνεχούς αγωγής, ο συντελεστής ισχύος στην έξοδο της γεννήτριας παραμένει ίσος με τη μονάδα και οι απώλειες ισχύος είναι αμελητέες, η σχέση που εκφράζει τη διατήρηση της ισχύος είναι:

$$3V_g I_g = V_d I_d \quad (27)$$

Από τις εξισώσεις (26) και (27), προκύπτει ότι η σύνδεση μεταξύ της ενεργούς τιμής (*rms*) του AC ρεύματος της γεννήτριας (I_g) και της τιμής του DC ρεύματος του ζυγού δίνεται από τη σχέση:

$$I_d = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_g \quad (28)$$

Το μοντέλο του ανορθωτή όπως αυτό διαμορφώθηκε στο περιβάλλον του Matlab/Simulink με χρήση των εξισώσεων που περιγράφηκαν προηγουμένως, δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



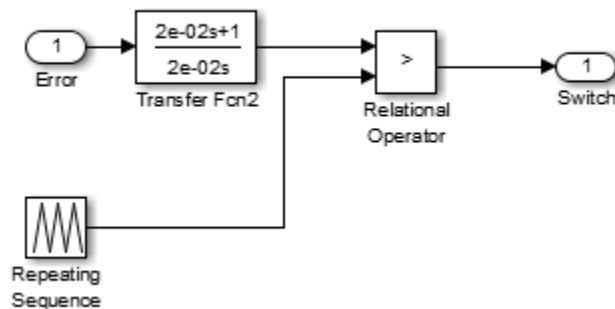
Εικόνα (4.9): Ηλεκτρονικός μετατροπέας AC-DC (Ανορθωτής/Rectifier)

4.5 Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης – DC-DC Boost Converter

Στο υπό μελέτη σύστημα, μετά την τριφασική γέφυρα διόδων και την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου της γεννήτριας, ακολουθεί ένας dc-dc μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost converter). Ο μετατροπέας αυτός λαμβάνει στην είσοδό του την συνεχή τάση από την έξοδο του ανορθωτή και ο ρόλος του είναι να δώσει στην έξοδό του επίσης συνεχή τάση υψηλότερης όμως τιμής.

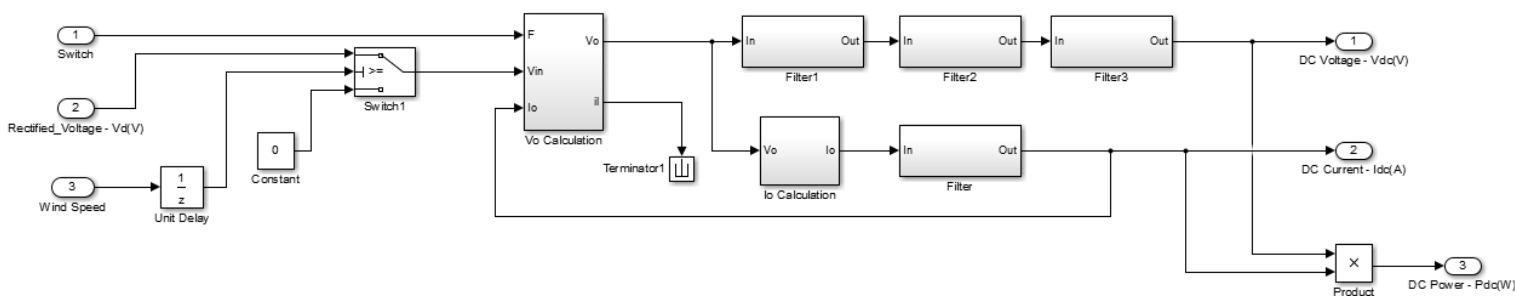
Τα βασικά πλεονεκτήματα του μετατροπέα boost, τα οποία τον καθιστούν τον πλέον κατάλληλο μετατροπέα για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι το χαμηλό κόστος του, η απλή σχεδιάσή του και το γεγονός ότι το ημιαγωγικό διακοπτικό στοιχείο που περιέχει είναι γειωμένο στην πηγή (Source) του, το οποίο συνεπάγεται την εύκολη οδήγησή του.

Το κυκλωματικό διάγραμμα και ο γενικός τρόπος λειτουργίας ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης (boost converter) έχει περιγραφεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Στο υπό μελέτη σύστημα μέσω του μετατροπέα ανύψωσης τάσης ελέγχεται η λειτουργία της γεννήτριας του συστήματος μέσω του ελέγχου της διαφοράς του ρεύματος ανόρθωσης από ένα ρεύμα αναφοράς.



Εικόνα (4.10): Υποσύστημα Switch control

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.10, η διαφορά αυτή των ρευμάτων αποτελεί ένα σφάλμα, το οποίο μέσω ενός PI ελεγκτή αποτελεί είσοδο σε έναν συγκριτή μαζί με μια τριγωνική κυματομορφή, σύστημα το οποίο υλοποιεί τεχνική Pulse Width Modulation (PWM). Αυτό που επί της ουσίας ρυθμίζει η τεχνική αυτή είναι το πότε θα ανοίγει και πότε θα κλείνει ο διακόπτης, ελέγχοντας έτσι την ισχύ η οποία μεταφέρεται στο φορτίο[19][24].



Εικόνα (4.11): Ματατροπέας ανύψωσης τάσης – Boost Converter

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.11, στο τμήμα αυτό του σχεδίου της ανεμογεννήτριας, υπολογίζεται τόσο η τάση εξόδου και η ισχύς που δίνεται στο φορτίο, όσο και το DC ρεύμα εξόδου, το οποίο αποτελεί εκ νέου είσοδο στο υποσύστημα Vector Control της PMSG, η λειτουργία του οποίου περιγράφηκε προηγουμένως.

4.6 Έλεγχος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος - Maximum Power Point Tracking Control (MPPT)

Η ανεμογεννήτρια, προκειμένου να αποδώσει τη μέγιστη δυνατή ισχύ, πρέπει να λειτουργεί για κάθε ταχύτητα ανέμου με το μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή ($C_{p,opt}$) με τιμή κοντά στο 0,5 όπως έχει προαναφερθεί. Έτσι καθίσταται σαφές, ότι πρέπει να διατηρείται η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα σε μια βέλτιστη τιμή για την οποία λαμβάνεται και ο μέγιστος λόγος ακροπερυγίου, λ_{opt} , ο οποίος για το παρόν σύστημα μετρήθηκε στο 8,1. Λόγω του ότι η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται, προκύπτει το συμπέρασμα πως η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα πρέπει κάθε φορά να προσαρμόζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να ακολουθήσει αυτή την αλλαγή του αέρα. Προκειμένου να επιτευχθεί η παραπάνω διαδικασία, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη ενός ελεγκτή που θα ρυθμίζει και θα ελέγχει αυτές τις παραμέτρους. Τέτοιοι ελεγκτές ονομάζονται MPPT ελεγκτές και η διαδικασία Maximum Power Tracking Control[1][2][17].

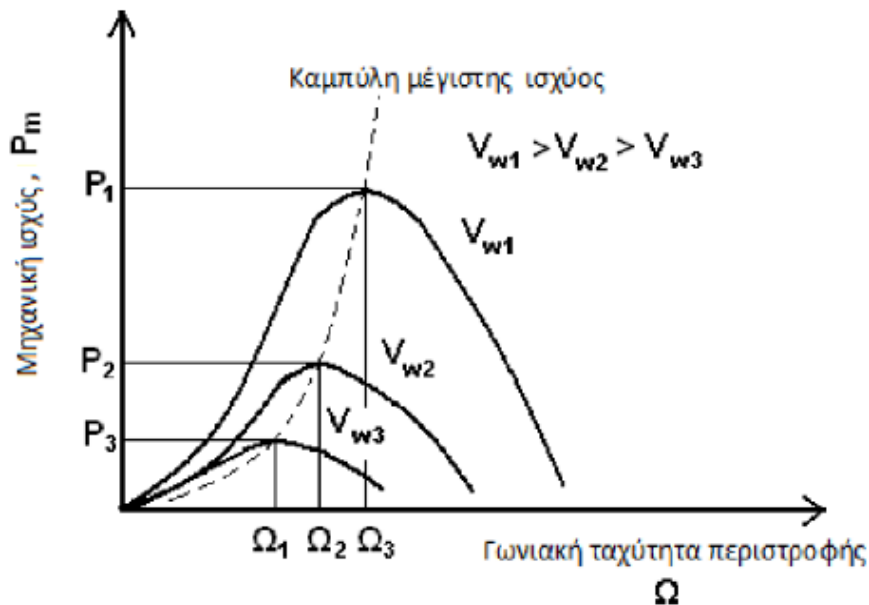
Η επιθυμητή βέλτιστη ισχύς προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_{m,opt} = 0,5 \rho A C_{p,opt} \left(\frac{\omega_{m,opt} R}{\lambda_{opt}} \right)^3 = K_{opt} \omega_{m,opt}^3 \quad (29)$$

$$\text{Όπου } K_{opt} = 0,5 \rho A C_{p,opt} \left(\frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \quad (30) \quad \text{και} \quad \omega_{m,opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} V_w = K_w V_w \quad (31)$$

έτσι η επιθυμητή βέλτιστη ροπή της ανεμογεννήτριας δίνεται από τη σχέση:

$$T_{m,opt} = K_{opt} \omega_{m,opt}^2 \quad (32)$$

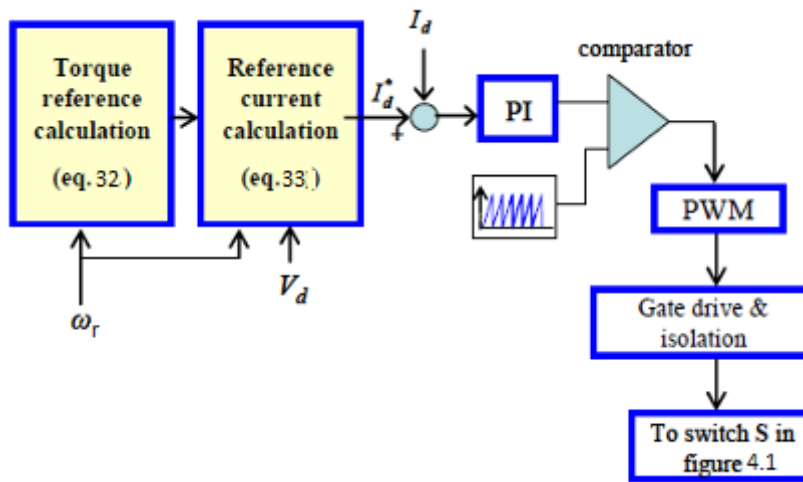


Εικόνα (4.12): Καμπύλες ισχύος - γωνιακής ταχύτητας περιστροφής για διάφορες ταχύτητες ανέμου και καμπύλη μέγιστης ισχύος

Η μηχανική ροπή του ρότορα που δημιουργείται από τη γεννήτρια ως συνάρτηση της ταχύτητας του ρότορα για διαφορετικές τιμές της ταχύτητας του ανέμου, αναπαρίσταται στην εικόνα 4.12. Στην ίδια εικόνα φαίνεται και η βέλτιστη ισχύς για κάθε μια από αυτές τις τιμές. Η καμπύλη της βέλτιστης ισχύος (P_{opt}), δείχνει πως μπορεί να απομαστευτεί η μέγιστη ενέργεια από τις διάφορες διακυμάνσεις του αέρα.

Η λειτουργία του ελεγκτή είναι να φροντίζει τη διατήρηση της λειτουργίας της γεννήτριας πάνω σε αυτή την καμπύλη καθώς η ταχύτητα του ανέμου αλλάζει. Κάτι το οποίο εύκολα παρατηρείται από το σχήμα, είναι πως υπάρχει μια γωνιακή ταχύτητα ρότορα για κάθε ταχύτητα ανέμου από την οποία λαμβάνεται η μέγιστη ισχύς. Αν ο ελεγκτής καταφέρει να κινείται πάνω στη βέλτιστη αυτή καμπύλη, τότε η γεννήτρια θα μπορεί να αποματεύσει τη μέγιστη ισχύ για κάθε ταχύτητα η οποία βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια. Έτσι, η βέλτιστη ροπή μπορεί να υπολογιστεί μέσω της βέλτιστης ισχύος η οποία δίνεται από την εξίσωση (32).

Για ταχύτητες της γεννήτριας κάτω από την υπολογισμένη μέγιστη ταχύτητα, η γεννήτρια ακολουθεί αυτή την εξίσωση. Σε περιπτώσεις όπου η ταχύτητα υπερβαίνει τη μέγιστη, η ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να απομαστευτεί είναι η μέγιστη δυνατή χωρίς δυνατότητα περαιτέρω αύξησής της, ενώ σε συστήματα που συμπεριλαμβάνεται stall ή pitch control, τότε αυτά ενεργοποιούνται, κάτι το οποίο δεν έχει υλοποιηθεί στο παρόν σύστημα.



Εικόνα (4.13): Στρατηγική ελέγχου του ανορθωτή διακοπτικής λειτουργίας.

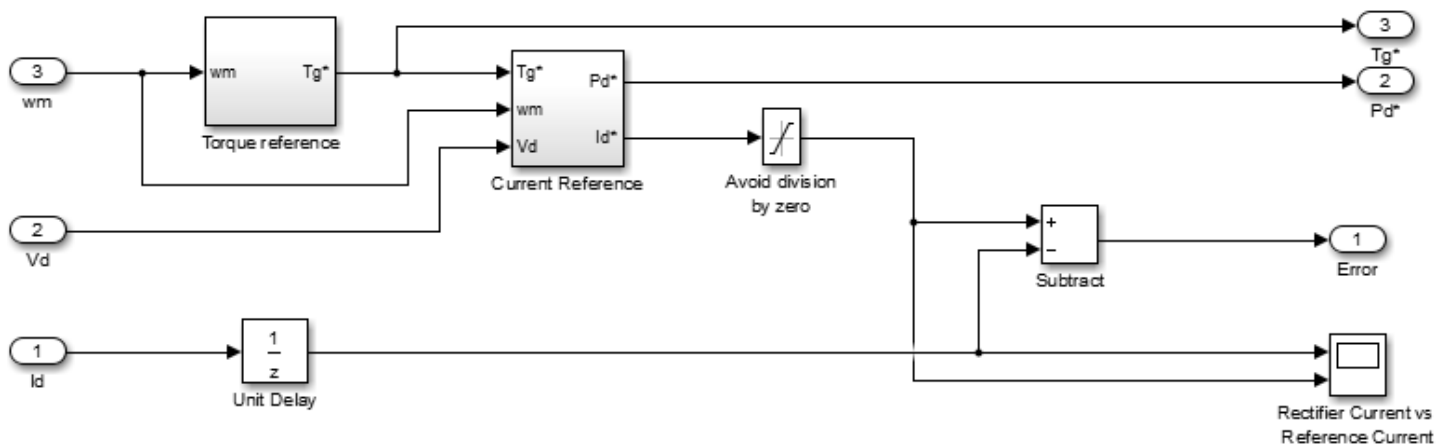
Η δομή της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου δίνεται στο σχήμα 4.13. Στόχο της στρατηγικής αυτής αποτελεί ο έλεγχος του duty cycle του διακόπτη S όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.1 προκειμένου να εξαχθεί μέγιστη ισχύς από την ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας και να αποδοθεί στο φορτίο. Τα βήματα τα οποία ακολουθούνται από τον αλγόριθμο ελέγχου είναι τα εξής[1]:

- Μέτρηση της ταχύτητας της γεννήτριας ω_g . Καθορισμός της ροπής αναφοράς με χρήση της εξίσωσης $T_g^* = K_{opt}\omega_g^2$. (33)

- Αυτή η ροπή αναφοράς στη συνέχεια χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το DC ρεύμα αναφοράς μέσω της τάσης εξόδου V_d του ανορθωτή όπως αυτή δίνεται από τη σχέση:

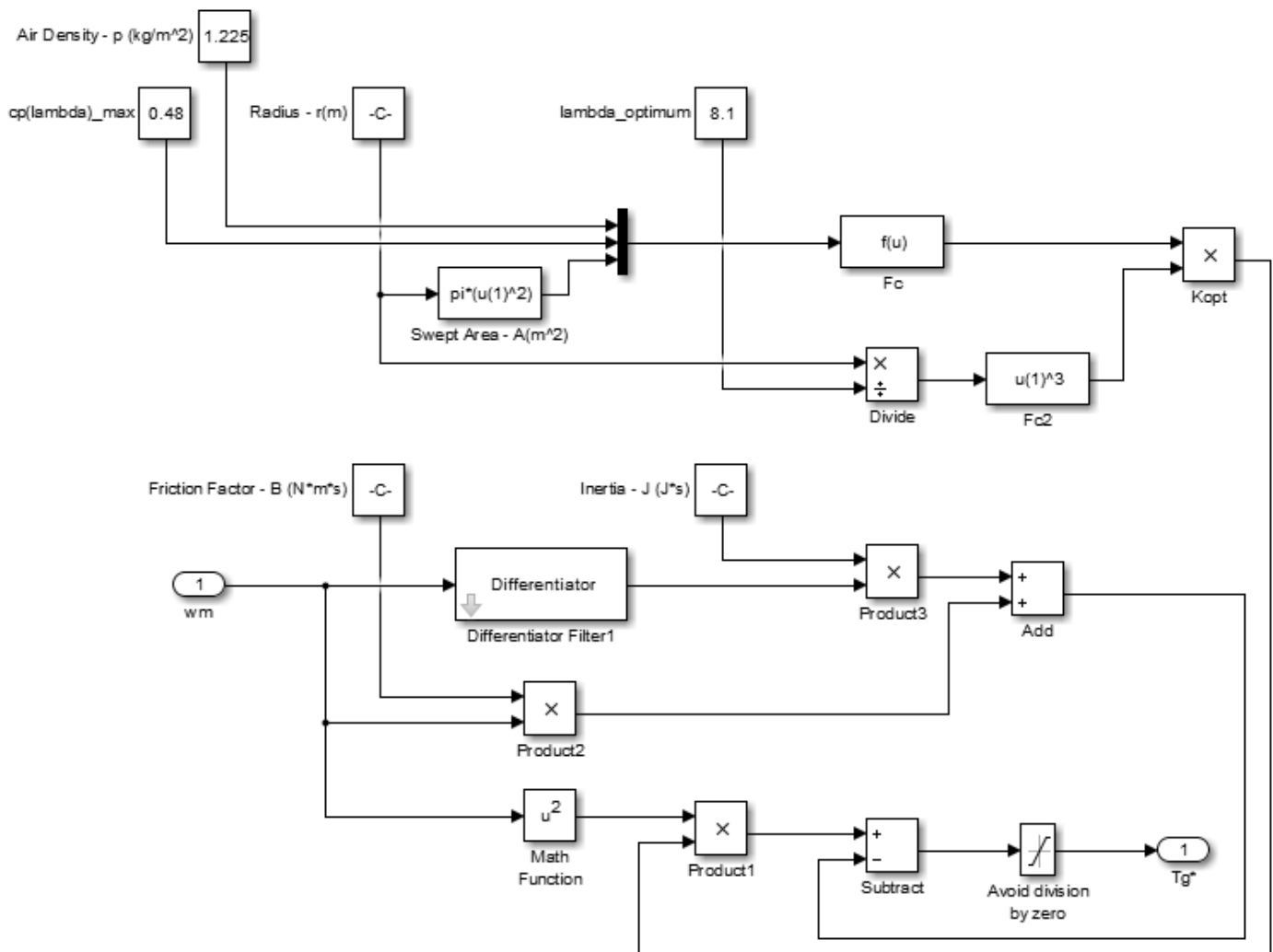
$$I_d^* = \frac{(T_g^* \times \omega_g)}{V_d}. \quad (34)$$
- Το σφάλμα μεταξύ του DC ρεύματος αναφοράς και του μετρούμενου DC ρεύματος, χρησιμοποιείται προκειμένου να τροποποιηθεί το duty cycle του διακόπτη και έτσι να ρυθμιστεί η έξοδος του συνεργαζόμενου συστήματος MPPT Controller – Boost Converter.

Το μοντέλο του υποσυστήματος MPPT Controller όπως αυτό διαμορφώθηκε στο Matlab/Simulink δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



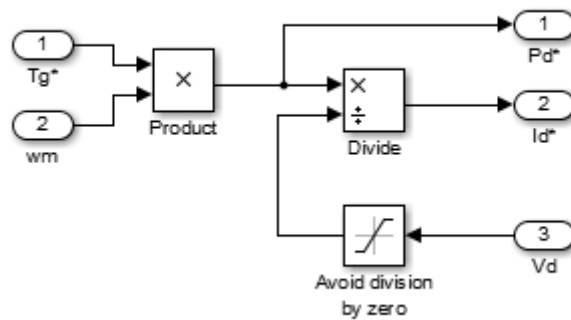
Εικόνα (4.14): Maximum Power Point Tracking Controller

Εισόδους του συστήματος αποτελούν η ταχύτητα της γεννήτριας καθώς επίσης η τάση εξόδου και το ρεύμα εξόδου του ανορθωτή. Μετά τον υπολογισμό και του ρεύματος αναφοράς, λαμβάνονται ως έξοδοι του υποσυστήματος η ροπή αναφοράς, η ισχύς αναφοράς και το σφάλμα των ρευμάτων, τα υποσυστήματα των οποίων θα δοθούν και θα περιγραφούν αμέσως μετά.



Εικόνα (4.15): Υποσύστημα υπολογισμού ροπής αναφοράς

Στο παραπάνω σχήμα δίνεται το μοντέλο του υποσυστήματος υπολογισμού της ροπής αναφοράς με τις εξισώσεις που δόθηκαν προηγουμένως. Αρχικά υπολογίζεται το K_{opt} , το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μοναδικής εξόδου αυτού του υποσυστήματος, της ροπής αναφοράς, μέγεθος απαραίτητο για τον υπολογισμό του ρεύματος αναφοράς όπως φαίνεται στο αμέσως επόμενο σχήμα:



Εικόνα (4.16): Υποσύστημα υπολογισμού ρεύματος αναφοράς

Όπως παρατηρείται, επιπλέον είσοδος αυτού του υποσυστήματος αποτελεί η τάση εξόδου από τον ανορθωτή με τη βοήθεια της οποίας υπολογίζεται το ρεύμα αναφοράς.

4.7 Συνολική στρατηγική ελέγχου της ανεμογεννήτριας

Για την περαιτέρω διευκόλυνση στην κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος της ανεμογεννήτριας, κρίθηκε απαραίτητο να περιγραφούν αυτοτελώς και στο σύνολο τους όλα τα βήματα τα οποία ακολουθούνται προκειμένου η ανεμογεννήτρια να δώσει την έξοδό της στο φορτίο.

Αρχικά λοιπόν, στο υποσύστημα Wind Turbine, έχοντας ως εισόδους την ταχύτητα του αέρα και την γωνιακή ταχύτητα του ρότορα που επιστρέφει αναδρομικά από το υποσύστημα του One Mass Drive Train, υπολογίζεται ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p και στη συνέχεια η μηχανική ισχύς και η μηχανική ροπή της Α/Γ καθώς επίσης η αεροδυναμική ισχύς.

Στη συνέχεια, στο υποσύστημα One Mass Drive Train, με την ηλεκτρομαγνητική ροπή να έρχεται ως είσοδος αναδρομικά από το υποσύστημα της PMSG, υπολογίζεται η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα η οποία αποτελεί είσοδο σε πολλά από τα υπόλοιπα υποσυστήματα της Α/Γ όπως έχει ήδη περιγραφεί.

Στο υποσύστημα PMSG, από τις εξισώσεις που αναλύουν το d, q σύστημα αναφοράς με τη βοήθεια του οποίου περιγράφεται η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη, υπολογίζονται τα ρεύματα I_d, I_q καθώς επίσης και οι τάσεις V_d, V_q . Εξόδους του παρόντος συστήματος αποτελούν η ηλεκτρομαγνητική ροπή η οποία επιστρέφει ως είσοδος στο υποσύστημα One Mass Drive Train για τον υπολογισμό εκ νέου της γωνιακής ταχύτητας του ρότορα, η ηλεκτρική συχνότητα, το ρεύμα και η τάση της γεννήτριας που αποτελούν εισόδους στο υποσύστημα του ανορθωτή, καθώς επίσης η ισχύς της γεννήτριας.

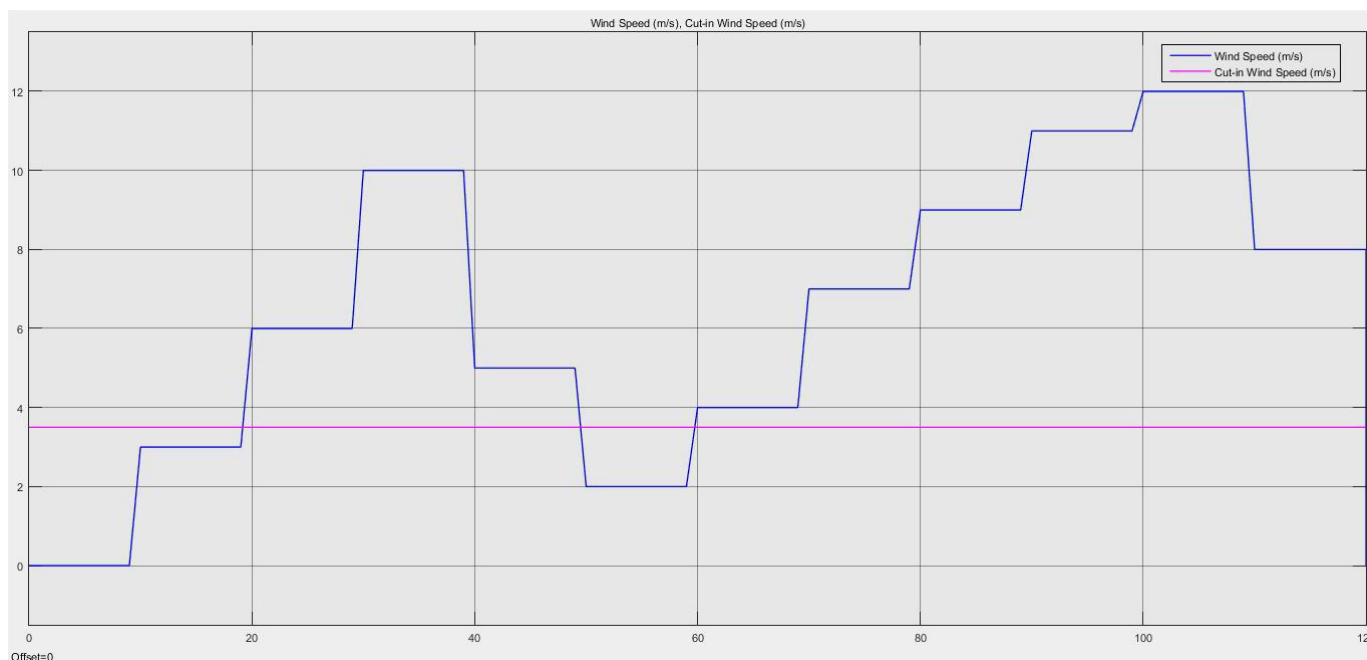
Στο υποσύστημα του ανορθωτή υπολογίζονται το ανορθωμένο ρεύμα και η ανορθωμένη τάση της γεννήτριας, τα οποία στη συνέχεια αποτελούν εισόδους τόσο του υποσυστήματος του Boost Converter όσο και του υποσυστήματος του MPPT Control, καθώς επίσης και η ανορθωμένη ισχύς της γεννήτριας.

Μέσα στο υποσύστημα του MPPT Control, υπολογίζονται το ρεύμα, η ροπή και η ισχύς αναφοράς καθώς επίσης, η διαφορά μεταξύ του ρεύματος αναφοράς και του ανορθωμένου ρεύματος, μέγεθος το οποίο αποτελεί ένα σφάλμα το οποίο στη συνέχεια δίνεται ως είσοδος στο υποσύστημα του Boost Converter. Αυτά τα δύο υποσυστήματα είναι άμεσα συνεργαζόμενα.

Στο υποσύστημα του Boost Converter τώρα, ένας διακόπτης ρυθμίζει την παροχή ισχύος στο φορτίο μέσω του ελέγχου διατήρησης της ενέργειας. Έτσι με τη σύμπραξη μιας μεταβλητής αντίστασης ρυθμίζονται η τάση και το ρεύμα στο ζυγό με μοναδική προϋπόθεση να μη χάνεται μέρος της ενέργειας που έχει παραχθεί αλλά ταυτόχρονα, η Α/Γ να μπορεί να απομαστεύει το μέγιστο της ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται επιστρέφοντας αναδρομικά το ρεύμα το οποίο βγαίνει από τον Boost Converter στο υποσύστημα της PMSG, όπου μέσα από το υποσύστημα Vector Control και με τη βοήθεια ενός PI ελεγκτή, υπολογίζονται εκ νέου οι τάσεις V_d , V_q κι έτσι βήμα το βήμα το σφάλμα των ρευμάτων εξαλείφεται, επιτυγχάνοντας σταδιακά την ταύτιση των εξόδων της ανεμογεννήτριας με αυτές που θεωρήθηκαν οι βέλτιστες,

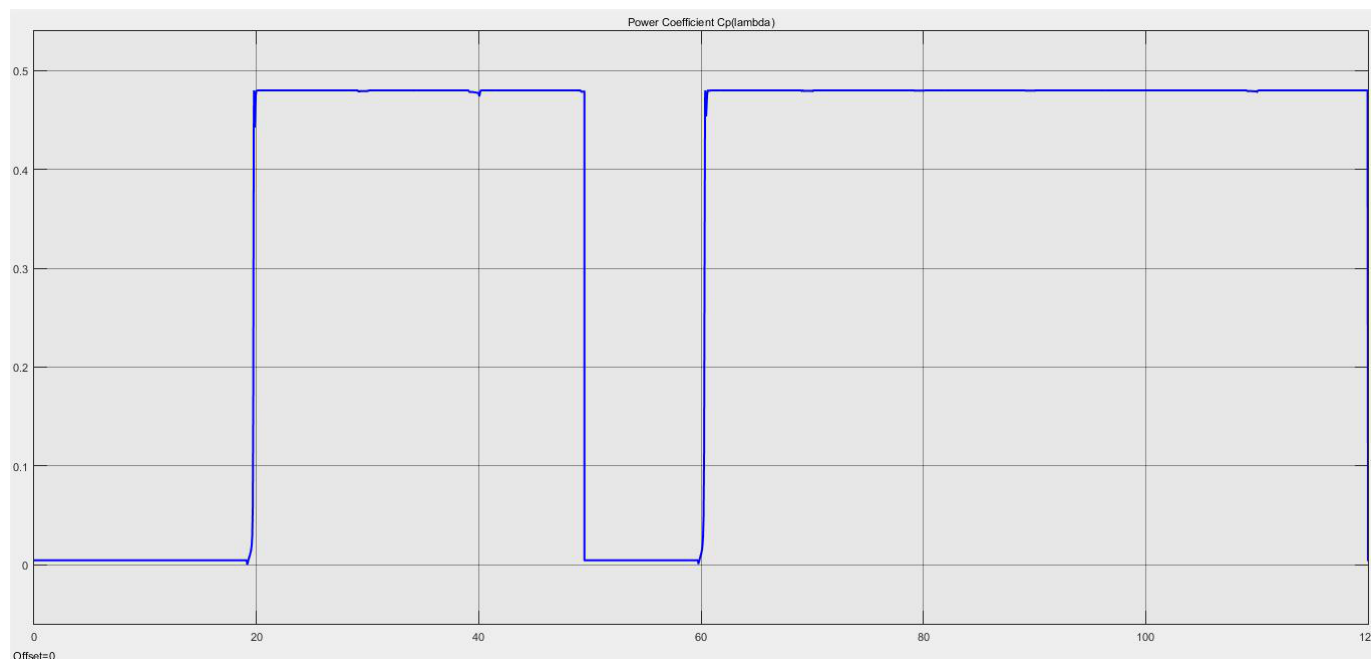
4.8 Έλεγχος λειτουργίας της ανεμογεννήτριας

Προκειμένου να ελεγχθεί ο σωστός σχεδιασμός του μοντέλου της ανεμογεννήτριας που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του Matlab/Simulink, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας για ένα εικοσιτετράωρο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται παρακάτω.



Εικόνα (4.17)

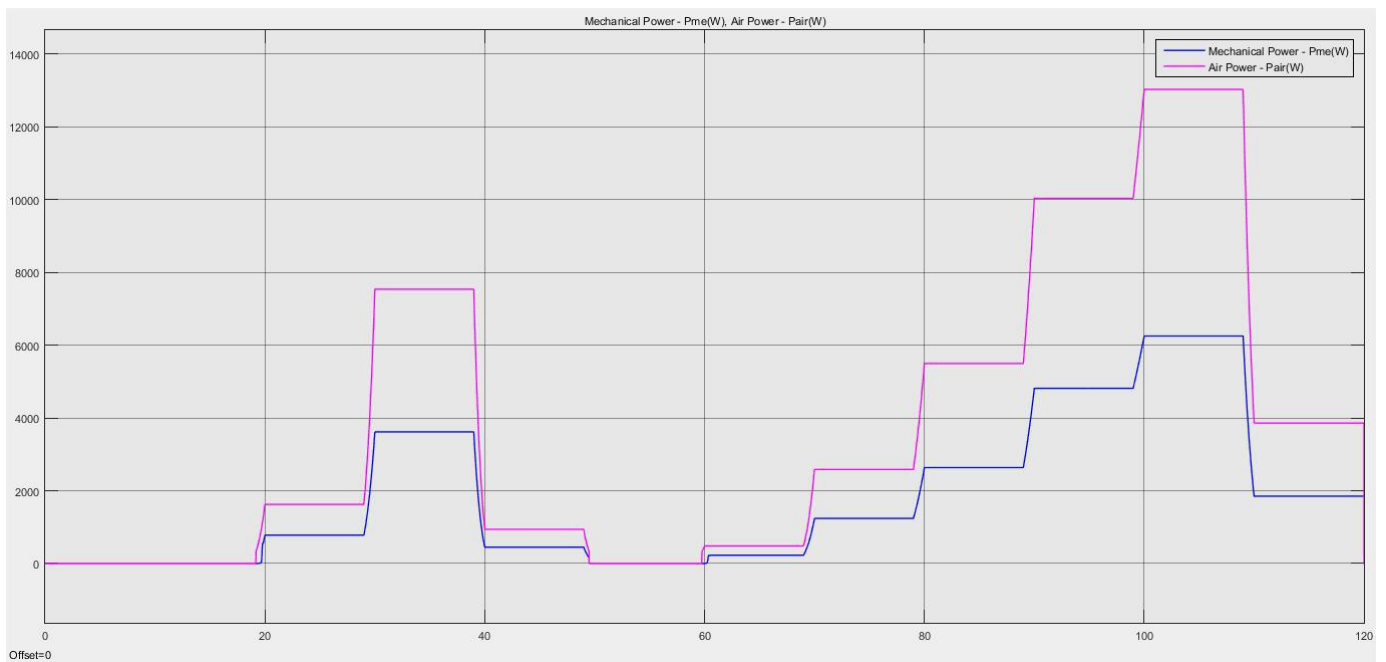
Στο σχήμα 4.17 απεικονίζεται η ανεμοσειρά η οποία χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος για τον έλεγχο της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, η οποία επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να εξετάζονται οι διάφορες μεταβολές του ανέμου και η ανταπόκριση του συστήματος σε αυτές. Με μωβ χρώμα αναπαρίσταται η ταχύτητα εκκίνησης της ανεμογεννήτριας η οποία τέθηκε στα $3,5 \text{ m/s}$.



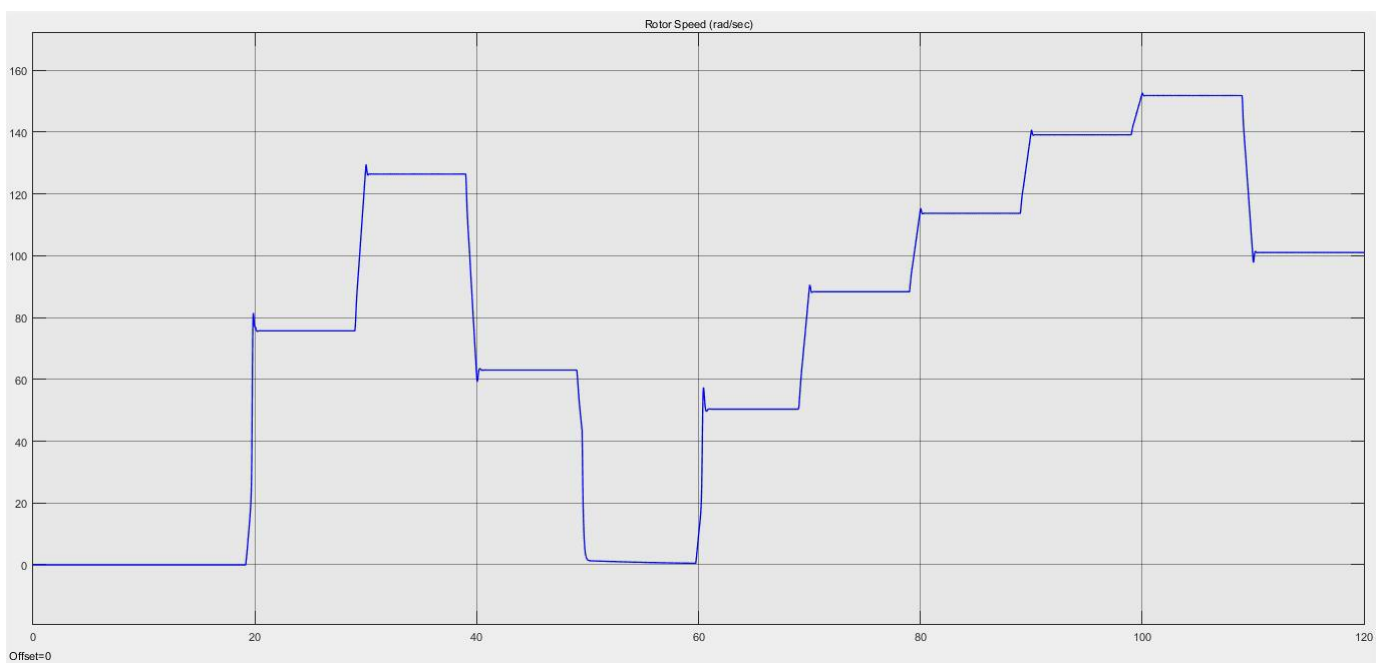
Εικόνα (4.18)

Στο σχήμα 4.18 απεικονίζεται ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p και όπως παρατηρείται, λειτουργεί πάντα στο μέγιστο της τιμής του που τέθηκε στο 0,48, ενώ μηδενίζεται μόνο όταν δεν υπάρχει επαρκής άνεμος για να θέσει σε λειτουργία την ανεμογεννήτρια. Συμπεραίνεται έτσι, πως ο σχεδιασμός της ανεμογεννήτριας ώστε να λειτουργεί στη μέγιστη απόδοσή της, είναι επιτυχής.

Παρακάτω, στο σχήμα 4.19, απεικονίζεται με μωβ γραμμή η αεροδυναμική ισχύς και με μπλε γραμμή η μηχανική ισχύς της γεννήτριας. Η απόκλιση μεταξύ αυτών δείχνει το πως μόνο ένα μέρος της ισχύος του ανέμου μπορεί να απομαστευτεί από μια ανεμογεννήτρια.

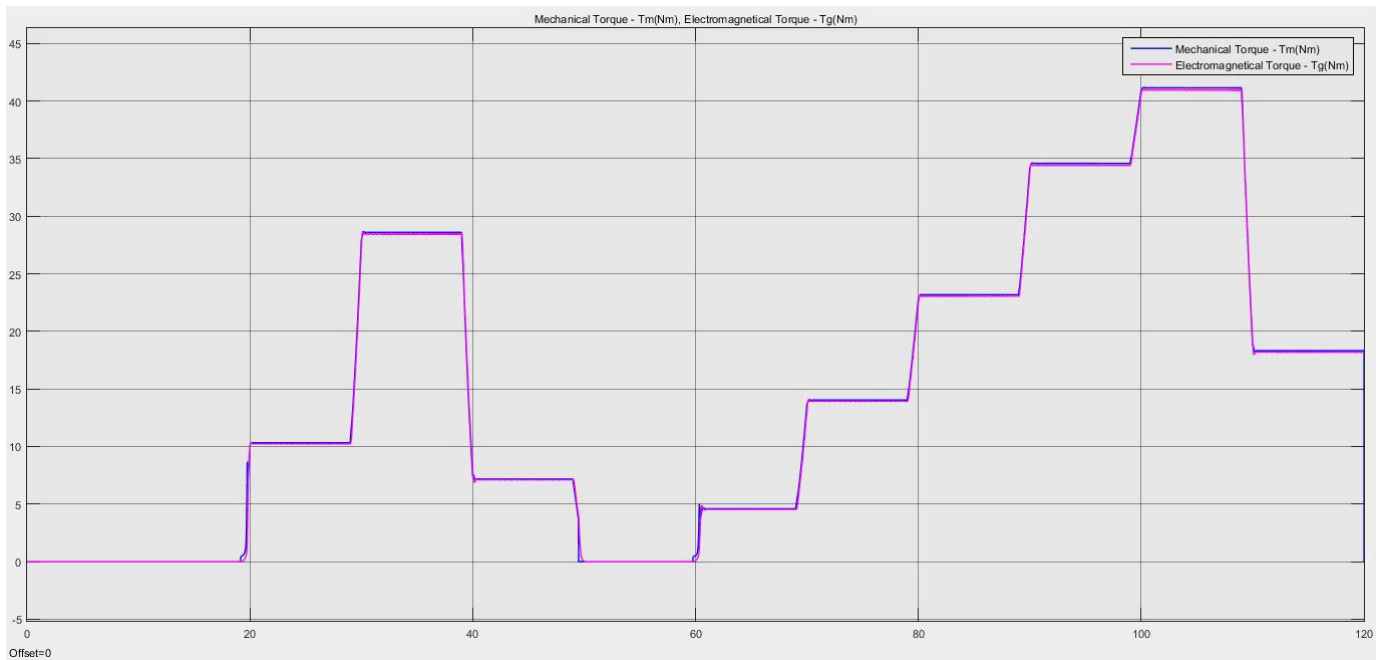


Εικόνα (4.19)

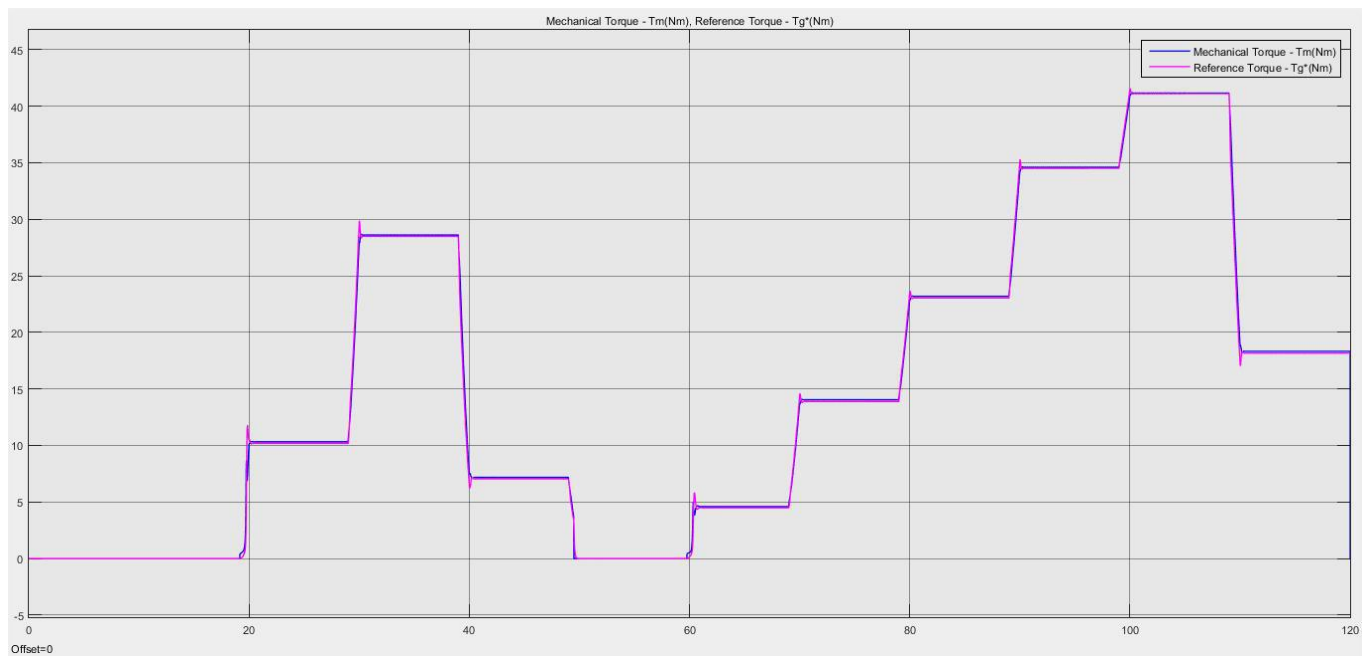


Εικόνα (4.20)

Στο σχήμα 4.20 αναπαρίσταται η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα όπως αυτή διαμορφώνεται μέσα στη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών.

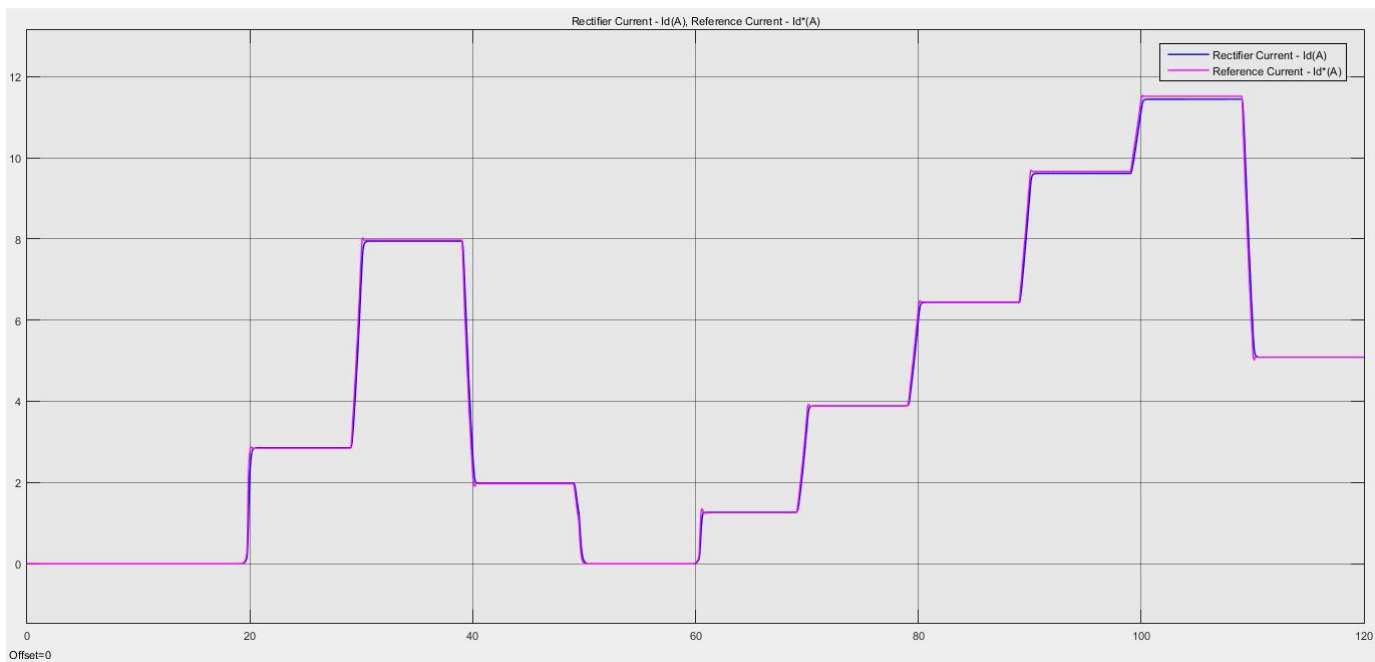


Εικόνα (4.21)



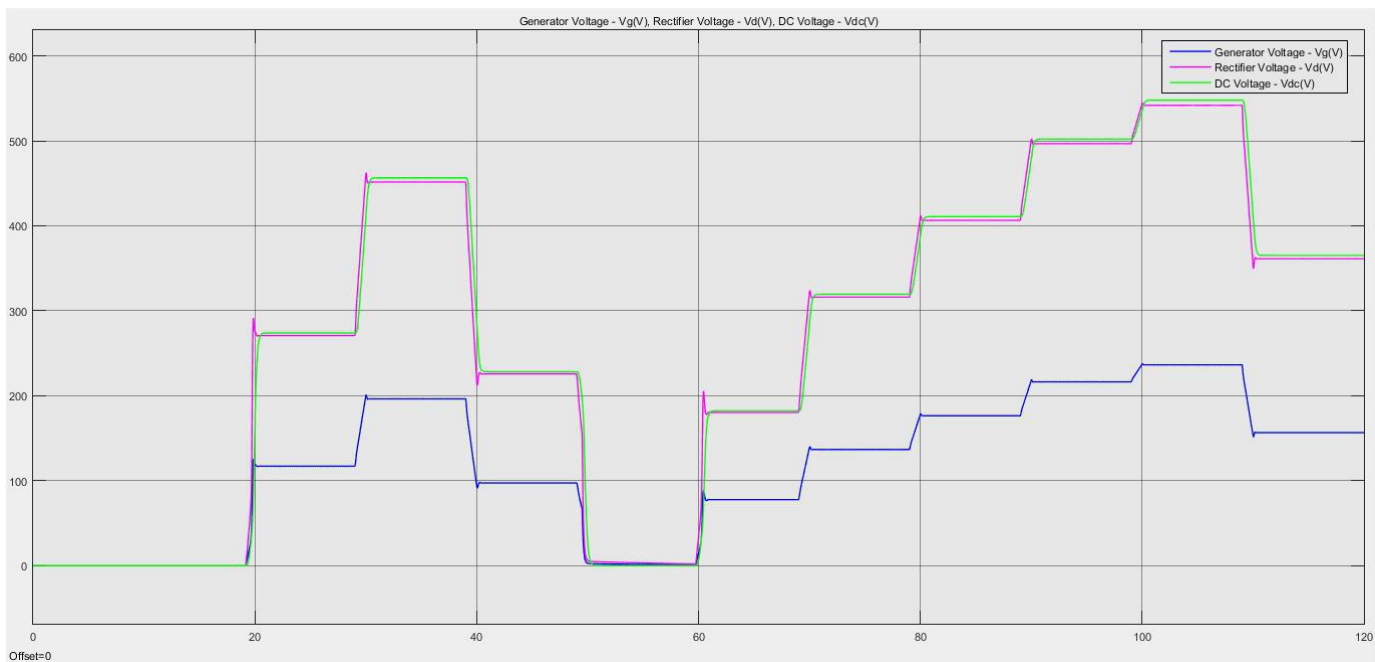
Εικόνα (4.22)

Στα παραπάνω συνδυαστικά γραφήματα, απεικονίζεται με μπλε χρώμα η μηχανική ροπή της γεννήτριας ενώ με μωβ χρώμα η ηλεκτρομαγνητική ροπή και η ροπή αναφοράς αντίστοιχα. Η σχεδόν πλήρης ταύτισή τους, υποδεικνύει ότι ο έλεγχος MPPT κατορθώνει να ρυθμίσει τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η απομάστευση της μέγιστης ισχύος.



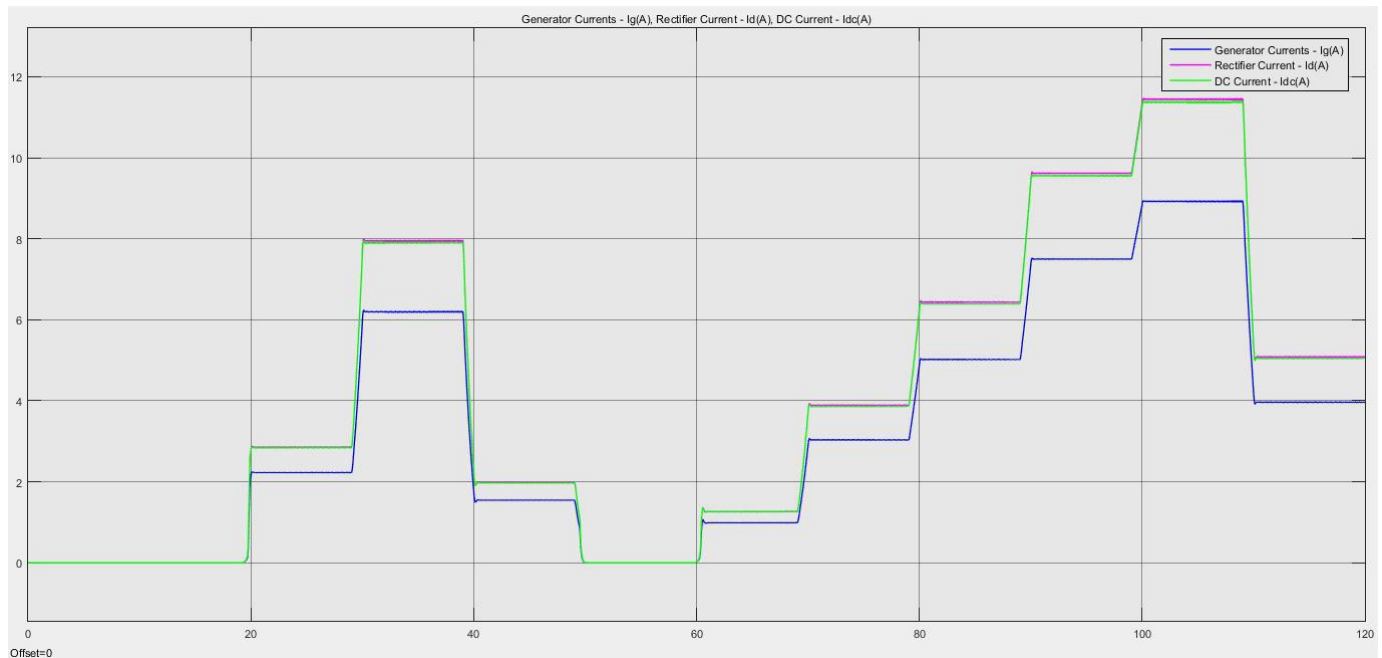
Εικόνα (4.23)

Στην ίδια λογική της βέλτιστης λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, είναι και το παραπάνω σχήμα 4.23, όπου απεικονίζεται με μπλε χρώμα το ρεύμα που βγαίνει από τον ανορθωτή και με μωβ το ρεύμα αναφοράς, όπου είναι εμφανής η ταύτισή τους.



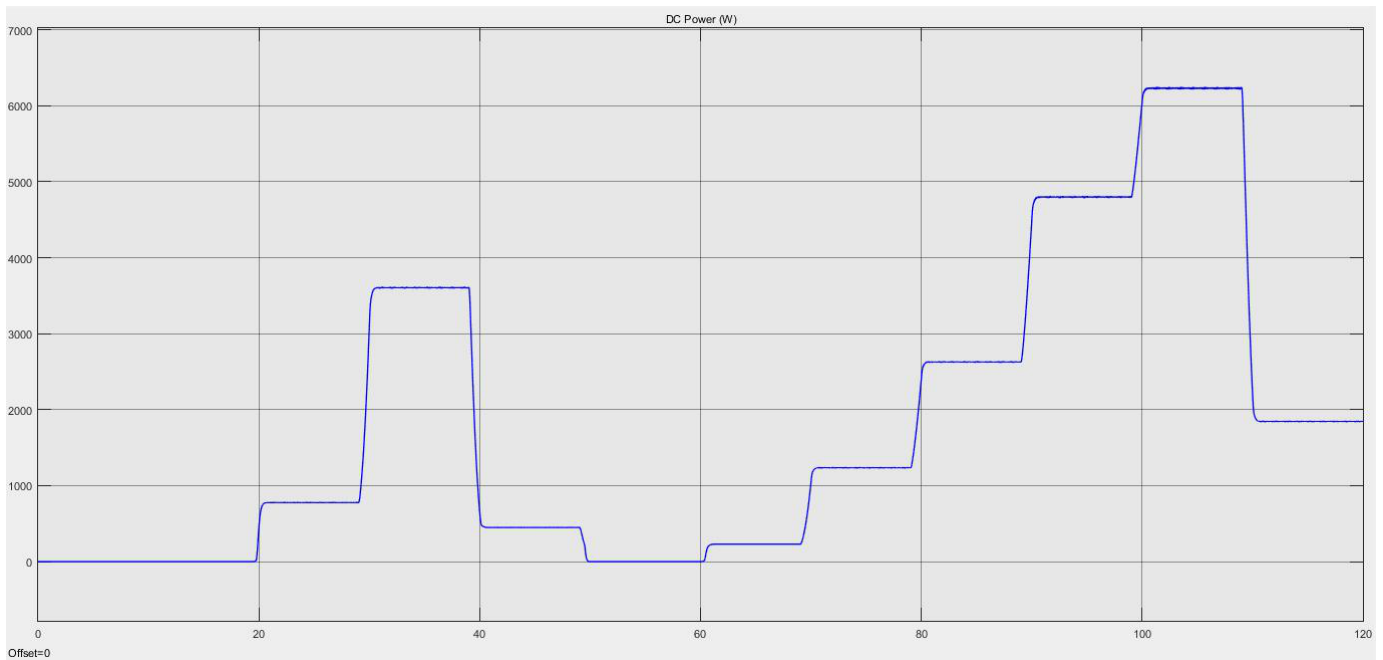
Εικόνα (4.24)

Η τάση εξόδου της ανεμογεννήτριας (μπλε γραμμή), όπως έχει ήδη περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια, πρέπει να ανορθωθεί προκειμένου να μπορέσει να κινηθεί δια μέσου του υπόλοιπου συστήματος και να αποδοθεί εν τέλει στο ζυγό. Η τάση μετά τον ανορθωτή είναι ορατά αυξημένη, όπως παρατηρείται από τη μωβ γραμμή του γραφήματος, ενώ η τελική τάση που αποδίδεται στο ζυγό και αναπαρίσταται με πράσινο χρώμα είναι ελαφρώς υψηλότερη ως αποτέλεσμα της ύπαρξης του DC-DC Boost Converter.



Εικόνα (4.25)

Κατ' αντιστοιχία με τις τάσεις, η ίδια διαδικασία πρέπει να ακολουθηθεί και με τα ρεύματα, όπου προφανώς λόγω του ότι χρειάζεται ανύψωση της τάσης προκειμένου αυτή να αποδοθεί στο ζυγό, παρατηρείται μια μείωση του DC ρεύματος (πράσινη γραμμή) σε σχέση με το ρεύμα που προκύπτει στην έξοδο του ανορθωτή (μωβ γραμμή).



Εικόνα (4.26)

Στο τελευταίο γράφημα που παρατίθεται από την προσομοίωση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, αποτυπώνεται η DC ισχύς η οποία αποδίδεται εν τέλει στο φορτίο για την οποία, όπως και για όλα τα παραπάνω γραφήματα που παρατέθηκαν, καθίσταται σαφές από τη διαμόρφωση την οποία εμφανίζει, ότι ακολουθεί τις μεταβολές του ανέμου ενώ μηδενίζεται όπου η ταχύτητα του ανέμου δεν είναι επαρκής για να θέσει σε λειτουργία την ανεμογεννήτρια.

Κεφάλαιο 5ο – Αυτόνομο Υβριδικό Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Το αυτόνομο υβριδικό σύστημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πέραν της ανεμογεννήτριας όπως έχει ήδη αναφερθεί, διαθέτει και μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια, μια κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, έναν ηλεκτρολύτη μετατροπής της περίσσειας ισχύος σε υδρογόνο και μια δεξαμενή για την αποθήκευσή του. Στο παρόν κεφάλαιο, θα γίνει μια ανάλυση της λειτουργίας αυτών των συστημάτων ενώ θα δοθούν και τα αντίστοιχα μοντέλα τους στο περιβάλλον του Matlab/Simulink.

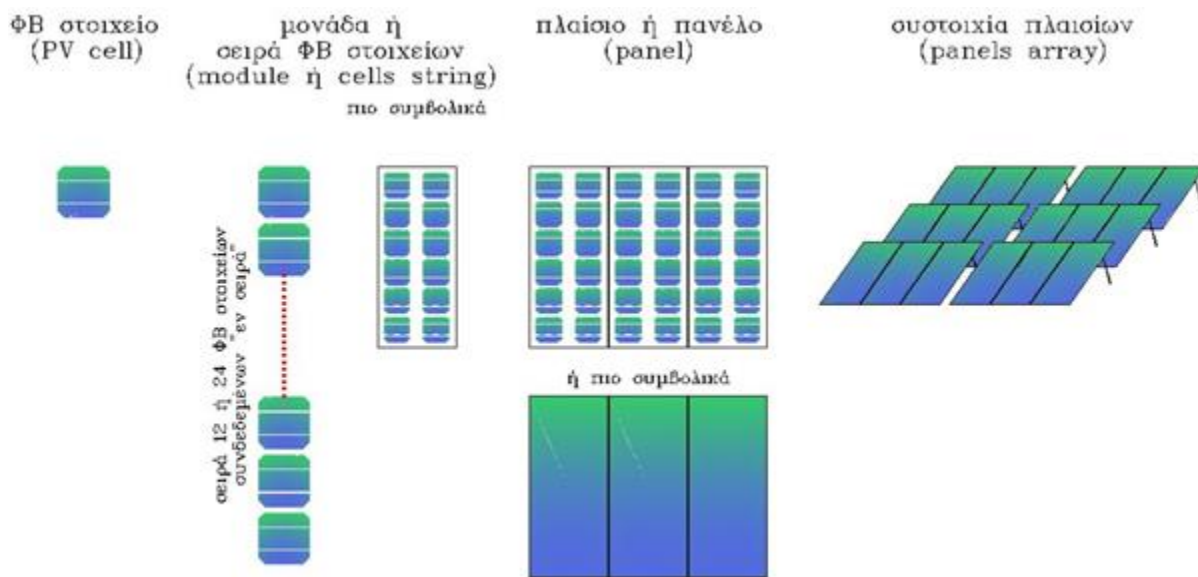
5.1 Το Φωτοβολταϊκό Στοιχείο

Τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών 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 επιφάνειά 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 *cm²* της επιφάνειάς του.

Το είδος του ημιαγωγού που επιλέγεται ως υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθορίζεται με κυριότερο κριτήριο 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 επιφάνειά 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[6].

Μια φωτοβολταϊκή (φ/β) γεννήτρια αποτελείται από τους ηλιακούς συλλέκτες με τα φ/β ηλιακά στοιχεία, δηλαδή φ/β πλαίσια (PV modules) που ενώνονται και συγκροτούν συστοιχίες (PV string/array). Η δομή των φ/β γεννητριών φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

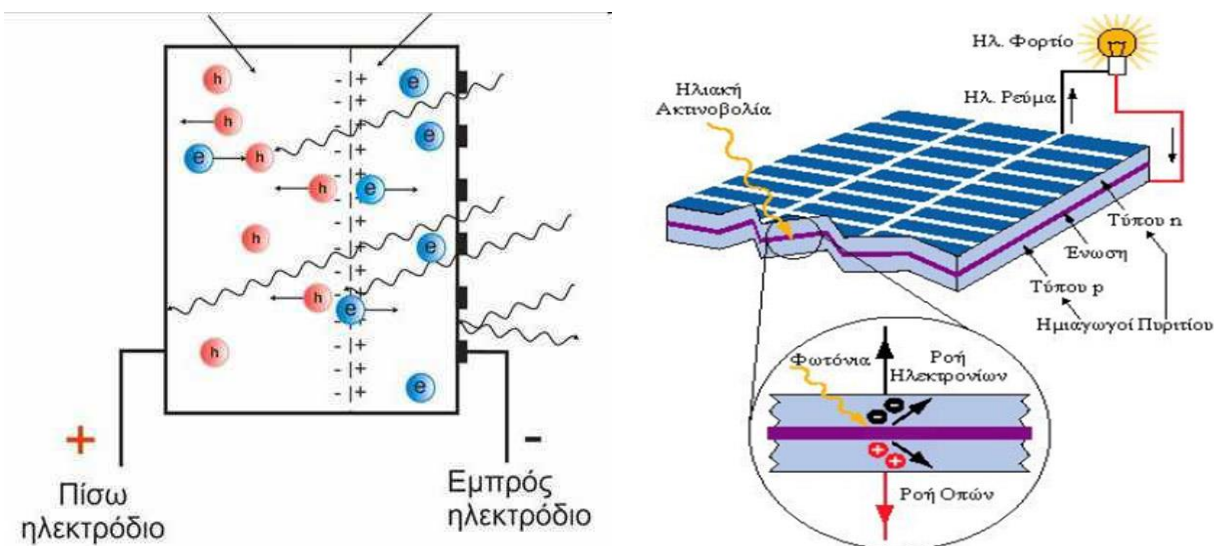


Εικόνα (5.1): Δομή φωτοβολταϊκής γεννήτριας

5.2 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.



Εικόνα (5.2): 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:

Επαφή υλικών + φως = Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

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

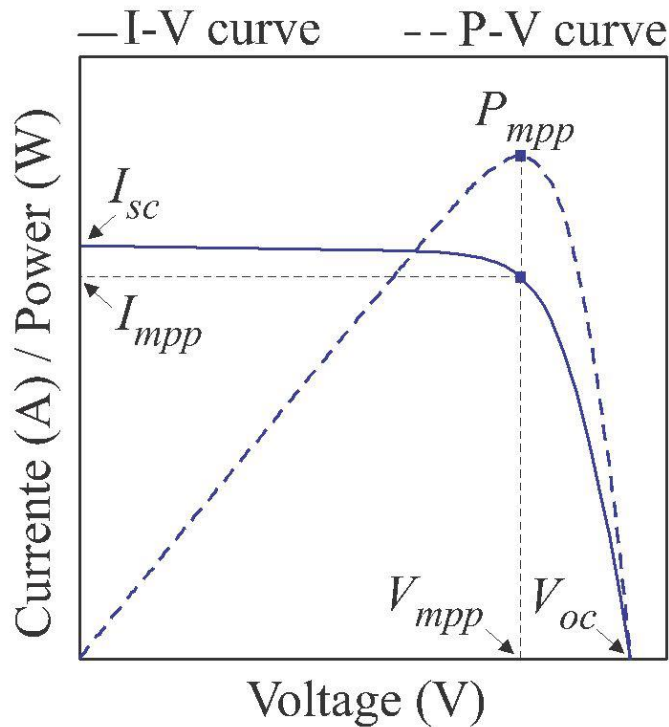
1. Τεχνολογία παραγωγής ημιαγώγιμων υλικών με κρυσταλλική δομή, την πλειοψηφία των οποίων αποτελεί το πυρίτιο.
2. Τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film), η οποία ονομάζεται έτσι επειδή το πάχος των στοιχείων είναι πολύ μικρό (μερικά μόνο μm).
3. Άλλες τεχνολογίες που σκοπό έχουν να γίνει λιγότερο ενεργοβόρα 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[6].

5.3 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_{mpp} , της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} , του ρεύματος βραχυκυκλώματος I_{sc} καθώς επίσης και οι τιμές της τάσης V_{mpp} και του ρεύματος I_{mpp} στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος.



Εικόνα (5.3): Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος- τάσης (χαρακτηριστική I-V) και ισχύος-τάσης (χαρακτηριστική P-V) ενός Φ/B πλαισίου

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_{mpp} , επιτυγχάνεται για ένα συγκεκριμένο ζεύγος τιμών τάσης V_{mpp} και ρεύματος I_{mpp} όπως αποδεικνύεται και από την P-V χαρακτηριστική.

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/B πλαισίου και μάλιστα με τρόπο που καθορίζεται από την μορφή της καμπύλης ρεύματος- τάσης (χαρακτηριστική I-V).

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:

1. 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.
2. 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 ημιαγώγιμου 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)[37][38]. 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_{mpp} για ίδια μεταβολή της θερμοκρασίας. Οι συντελεστές αυτοί παρέχονται, συνήθως, από τον κατασκευαστή μαζί με τα υπόλοιπα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Φ/Β πλαισίου.

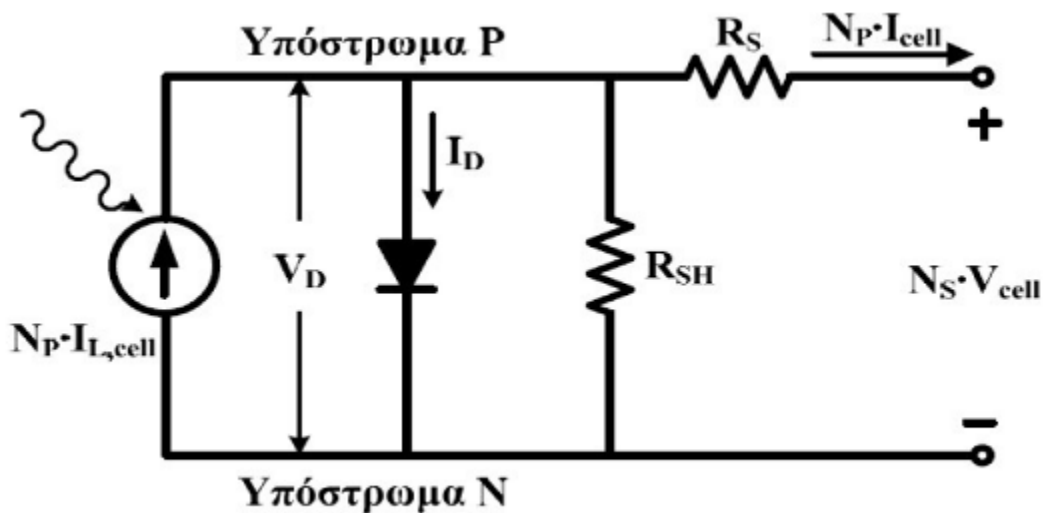
Το μαθηματικό μοντέλο το οποίο περιγράφει την ηλεκτρική συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού κύτταρου (όπως αυτή αναλύθηκε παραπάνω) δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση[37][38][39]:

$$I_{cell} = I_{l,cell} - I_{o,cell} \left[e^{\frac{V_{cell} + I_{cell} R_{s,cell}}{n_{cell} V_t}} - 1 \right] - \frac{V_{cell} + I_{cell} R_{s,cell}}{R_{sh,cell}} \quad (35)$$

όπου:

- V_t : η θερμική τάση (V), η οποία δίνεται από τη σχέση $V_t = kT/q$ όπου k η σταθερά Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Joule/Kelvin}$), T η απόλυτη θερμοκρασία του κυττάρου σε βαθμούς Kelvin ($^{\circ}K$) και q το φορτίο ηλεκτρονίου ($1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$).
- Για θερμοκρασία δωματίου ($27^{\circ}C = 300^{\circ}K$) $V_{t,27^{\circ}C} \approx 25,85mV$
- 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
- $I_{l,cell}$: το ρεύμα που παράγεται λόγω του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός επί του κυττάρου (φωτόρεύμα)
- $I_{o,cell}$: ρεύμα κόρου της διόδου με τιμές μεταξύ $10^{-4} \sim 10^{-15} A$
- $R_{s,cell}$: 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 $R_{s,cell}$ είναι συνήθως μικρότερη από 1Ω
- $R_{sh,cell}$: 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 όμοιων κυττάρων. Η αντίσταση $R_{sh,cell}$ 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 στην εικόνα:



Εικόνα (5.4): 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:

$$N_p I_{cell} = N_p I_{l,cell} - N_p I_{o,cell} e^{\left[\frac{N_s V_{cell} + N_p I_{cell} \left(\frac{N_s}{N_p} \right) R_{s,cell}}{N_s n_{cell} V_t} - 1 \right]} - \frac{N_s V_{cell} + N_p I_{cell} \left(\frac{N_s}{N_p} \right) R_{s,cell}}{\left(\frac{N_s}{N_p} \right) R_{sh,cell}} \quad (36)$$

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,
- $\left(\frac{N_s}{N_p} \right) R_{s,cell}$ και $\left(\frac{N_s}{N_p} \right) R_{sh,cell}$ η ισοδύναμη εν σειρά και παράλληλη αντίσταση του μαθηματικού μοντέλου του Φ/Β πλαισίου αντίστοιχα.

5.4 Απόδοση Φ/Β Πλαισίου και Απώλειες Ισχύος

5.4.1 Η απόδοση του Φ/Β πλαισίου και παράγοντες που την επηρεάζουν[6]

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 :

$$n_\pi = \frac{P_\pi}{H \cdot S} \frac{(W)}{\left(\frac{W}{m^2} \cdot m^2 \right)} \quad (37)$$

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:

$$n_\pi = \frac{E}{\Pi \cdot S} \frac{(KW)}{\left(\frac{KW}{m^2} \cdot m^2 \right)} \quad (38)$$

$$\text{Ισχύει ακόμα η σχέση: } n_{\pi} = n \cdot PF \quad (39)$$

όπου n : η μέση απόδοση των ηλιακών στοιχείων και PF : ο συντελεστής κάλυψης του πλαισίου

PF ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων δηλαδή, 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.

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:

$$n_{\pi} \cdot \sigma_{\theta} \quad (40)$$

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.

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 επικάθιση σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνει περιοδικός καθαρισμός της επιφάνειας των Φ/β πλαισίων με απορρυπαντικό.

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_{ρ} 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_{ρ} 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 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_{ρ} . Δηλαδή, η προηγούμενη σχέση παίρνει τη γενικότερη μορφή:

$$E = P \cdot S \cdot n_{\pi} \cdot \sigma_{\theta} \cdot \sigma_{\rho} \quad (41)$$

5.4.2 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 watt αιχμής (Wp , *Watt peak*) και kilowatt αιχμής (kWp). Από την σχέση που δίνει την απόδοση n_π είναι φανερό ότι:

$$P_a(kWp) = 1 \left(\frac{kW}{m^2} \right) \cdot S (m^2) \cdot n_\pi \quad (42)$$

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:

$$E \left(\frac{kWh}{d} \right) = \Pi \left(\frac{kWh}{m^2} \right) \cdot \frac{P_a(kW)}{1(m^2)} \cdot \sigma_\theta \cdot \sigma_\rho \quad (43)$$

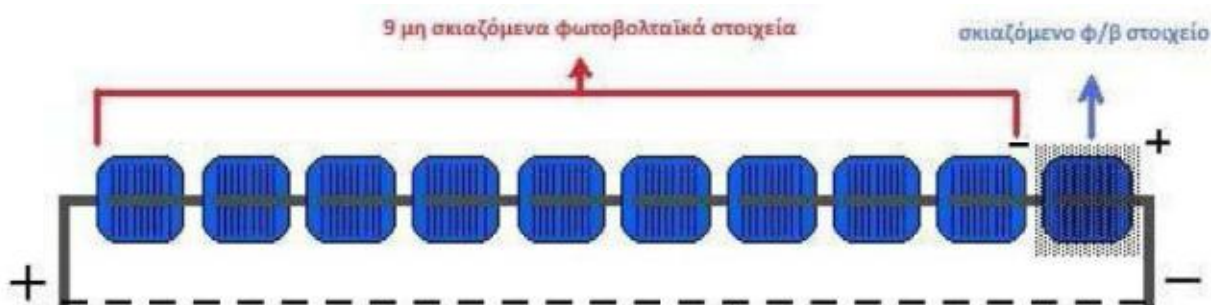
5.4.3 Απώλεια Ισχύος – Φαινόμενο HOT SPOT

Η αδυναμία των κυττάρων μιας συστοιχίας να προσαρμόσουν τα χαρακτηριστικά τους είτε υπάρχει εγγενώς μέσα τους, είτε οφείλεται σε κατασκευαστικούς λόγους κατά τη μαζική παραγωγή τους, είτε προκύπτει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα των δυο τελευταίων αιτιών, αποτελεί η μερική ή ολική σκίαση ενός ή περισσοτέρων κυττάρων και μπορεί να οφείλεται σε σύννεφα, παρακείμενα δένδρα, κτίρια, πουλιά κλπ. Άλλη αιτία είναι η θραύση ενός ή περισσοτέρων 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. 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. 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 τότε η ισχύς που παράγουν τα μη σκιαζόμενα στοιχεία καταναλώνεται δια μέσω του σκιαζόμενου φωτοβολταϊκού στοιχείου. Το σκιαζόμενο στοιχείο μειώνει το ρεύμα δια μέσω 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[10].



Εικόνα (5.5): Φ/Β στοιχεία σε σειρά με ένα σκιαζόμενο

5.5 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Παραγόμενης Ισχύος της Φ/Β γεννήτριας (M.P.P.T.)

Η ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο -ή στο ηλεκτρικό φορτίο όταν πρόκειται για αυτόνομο σύστημα- από ένα Φ/Β σύστημα, εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας της Φ/Β γεννήτριας. Συνεπώς, η μεγιστοποίηση της ενεργειακής συνεισφοράς των παραπάνω συστημάτων σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο ή σε ένα ηλεκτρικό φορτίο, έγκειται στην ικανότητα (εξαναγκασμό) της Φ/Β 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, καθίσταται σαφές πως απαιτείται δραστικός έλεγχος των Φ/Β γεννητριών, 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 του 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 αποτελεσματικότητά 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.).

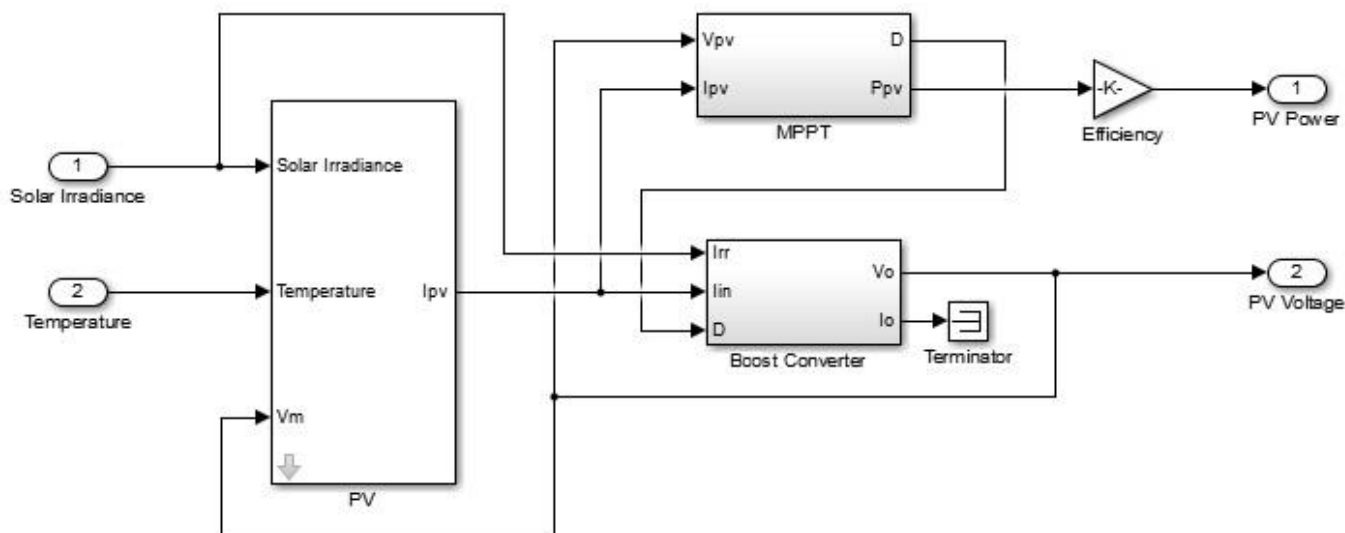
Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως το κόστος ενός M.P.P.T. καθορίζεται από τον αριθμό και το είδος των απαιτούμενων μετρητικών διατάξεων, καθώς επίσης και από την ενδεχόμενη ανάγκη χρησιμοποίησης προηγμένου μικροελεγκτή για την επεξεργασία των μετρούμενων μεγεθών. Ανάλογα με τη βαρύτητα που δίνεται στα παραπάνω κριτήρια, έχουν παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία αρκετές μέθοδοι ανίχνευσης του σημείου λειτουργίας μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος, με τις απλούστερες από αυτές να βασίζονται στη γνώση των λόγων της τάσης στο M.P.P. προς την τάση ανοικτού 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)[40-43].

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 οποιεσδήποτε 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.

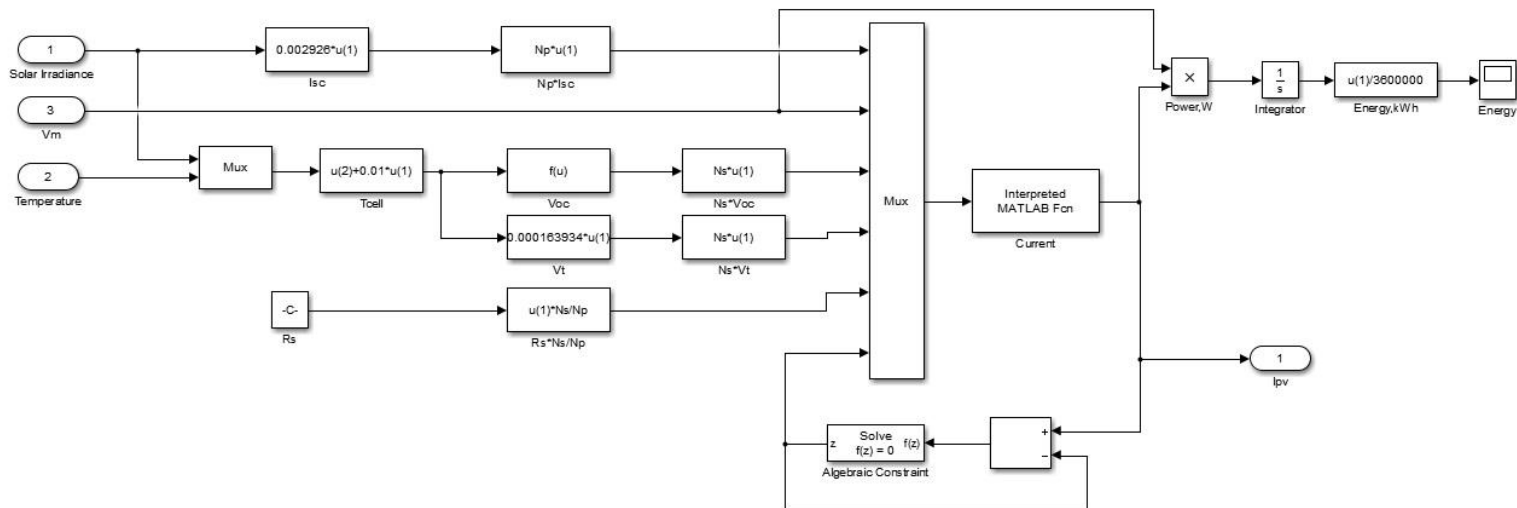
Στην πλειονότητα όμως των εφαρμογών, χρησιμοποιούνται μέθοδοι οι οποίες εντοπίζουν το σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος μέσω μικρών ηθελημένων διαταραχών των ηλεκτρικών μεγεθών εισόδου του μετατροπέα (συνήθως στην τάση). Σε αυτές τις περιπτώσεις προκαλείται μια μικρή αύξηση ή μείωση της τάσης ΔV (ή 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)[40]. Βέβαια σε αυτές τις περιπτώσεις, το σημείο λειτουργίας της Φ/Β γεννήτριας 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..

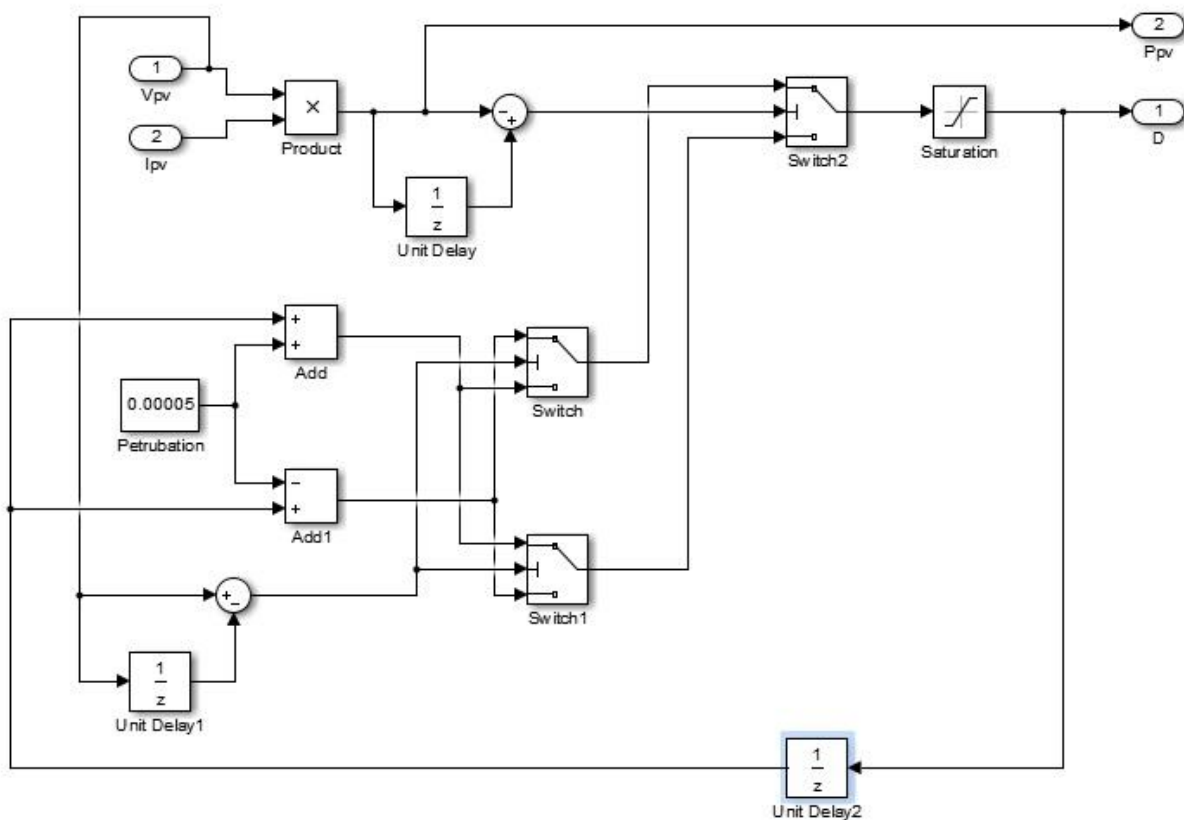
Στην περίπτωση εύρεσης του σημείου μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος, μέσω της παρατήρησης των εναλλασσόμενων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών εξόδου του μετατροπέα, εφαρμόζεται παρόμοια μεθοδολογία με αυτή που αναλύθηκε προηγουμένως. Σε αυτήν όμως την περίπτωση το ηλεκτρικό μέγεθος στο οποίο προκαλούνται οι ηθελημένες 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 χαμηλόσυχη κυμάτωση του ρεύματος εισόδου αυτού, η οποία είναι αποτέλεσμα της παραγωγής μονοφασικής εναλλασσόμενης τάσης από τη συνεχή τάση που παρέχουν οι Φ/Β γεννήτριες. 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.



Εικόνα (5.6): Σύστημα γεννήτριας, ελέγχου MPPT και Boost Converter για τη Φ/Β γεννήτρια.



Εικόνα (5.7): Μέσα στο υποσύστημα της Φ/B γεννήτριας.



Εικόνα (5.8): Μέσα στο υποσύστημα ελέγχου MPPT της Φ/B γεννήτριας.

5.6 Τεχνολογίες υδρογόνου

Η εξάρτηση των ΑΠΕ από στοχαστικά φαινόμενα, όπως ταχύτητα ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία κτλ κάνει απαραίτητη την ύπαρξη συστημάτων αποθήκευσης σε ένα υβριδικό σύστημα. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης, όπως μπαταρίες και υπερπυκνωτές, μπορούν να καλύψουν τα ελλείμματα ισχύος με αρκετά μεγάλη ενεργειακή απόδοση, χωρίς να εξασφαλίζουν, όμως, πλήρη διαθεσιμότητα. Αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με το υψηλό τους κόστος δημιουργούν την ανάγκη για μία εναλλακτική τεχνολογία, που να έχει ως βασική ενεργειακή πηγή κάποιο καύσιμο, το οποίο όμως δεν επιβαρύνει το περιβάλλον. Μία από αυτές τις τεχνολογίες είναι η πολλά υποσχόμενη τεχνολογία του υδρογόνου.

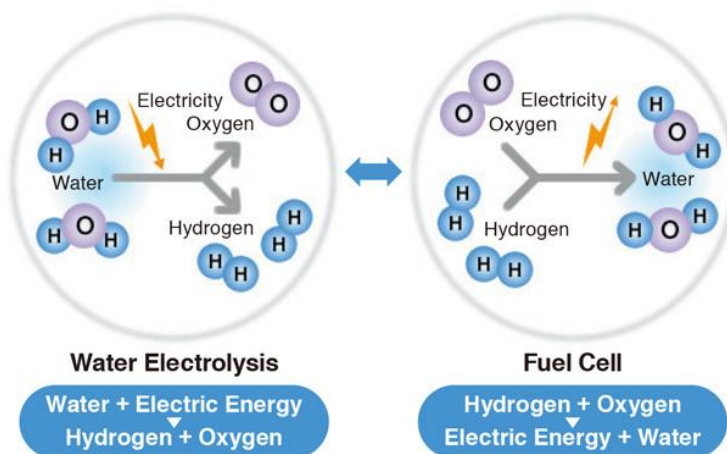
Το υδρογόνο θεωρείται από πολλούς ως το ενεργειακό μέσο του μέλλοντος που θα αντικαταστήσει τα συμβατικά υγρά και αέρια καύσιμα τόσο σε σταθερές εφαρμογές, όσο και στον τομέα των μεταφορών. Το υδρογόνο, μολονότι βρίσκεται σε αφθονία στη φύση, εμφανίζεται μόνο σε μορφή χημικών ενώσεων και μιγμάτων και 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. Έχει εκφραστεί η άποψη ότι η εισαγωγή του υδρογόνου στον ενεργειακό χάρτη θα οδηγήσει στην εγκαθίδρυση ενός καθεστώτος «ενεργειακής δημοκρατίας» ανά την υφήλιο. Τα κύρια πλεονεκτήματα του υδρογόνου έναντι των συμβατικών μορφών ενέργειας, είναι τα εξής[4]:

1. Το υδρογόνο έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο, $120,7 \text{ kJ/g}$ και περίπου τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό της συμβατικής βενζίνης.
2. Κάνει καθαρή καύση. Όταν καίγεται με οξυγόνο παράγει μόνο νερό και θερμότητα. Όταν καίγεται με τον ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος αποτελείται περίπου από 68% άζωτο, παράγονται επίσης μερικά οξείδια του αζώτου σε αμελητέο ωστόσο βαθμό. Επομένως, δε συμβάλλει στη μόλυνση του περιβάλλοντος.
3. Συμβάλλει στη μείωση του ρυθμού κατανάλωσης των περιορισμένων φυσικών καυσίμων.
4. Μπορεί να παρασκευαστεί με πάρα πολλές μεθόδους σε οποιαδήποτε χώρα και σε οποιοδήποτε μέρος κι επομένως μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη αποκεντροποιημένων συστημάτων παραγωγής ενέργειας.

Από την άλλη, τα κύρια μειονεκτήματα του υδρογόνου έναντι των συμβατικών μορφών ενέργειας είναι:

1. Προβλήματα αποθήκευσης: δεδομένου του ότι το υδρογόνο είναι πολύ ελαφρύ, η συμπίεση μεγάλης ποσότητας σε μικρού μεγέθους δεξαμενή είναι δύσκολη λόγω των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται για να επιτευχθεί η υγροποίηση.
2. Έλλειψη οργανωμένου δικτύου διανομής υδρογόνου.
3. Σχετικά υψηλή τιμή σε σύγκριση με αυτήν της βενζίνης ή του πετρελαίου.
4. Αυξημένο κόστος τεχνολογιών υδρογόνου (κυψέλες καυσίμου, ηλεκτρολύτες κτλ).

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

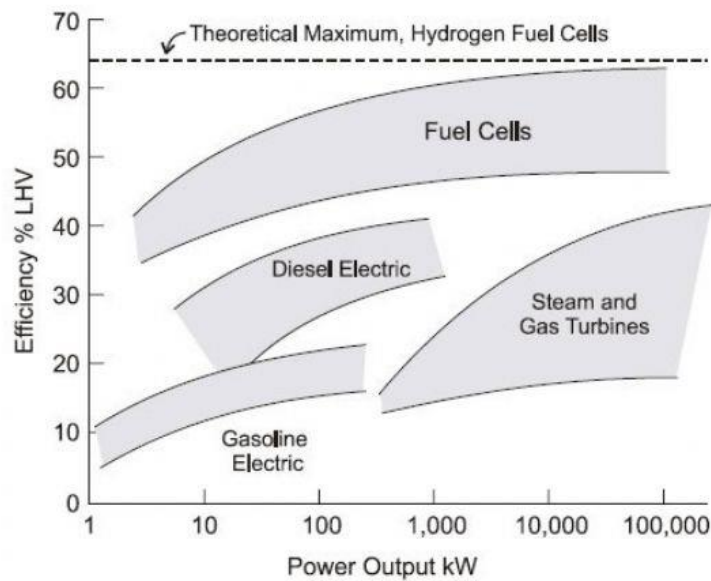


Εικόνα (5.9): Ηλεκτρόλυση – Κυψέλη καυσίμου

5.7 Κυψέλες καυσίμου (Fuel Cells)

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 των κυψελών καυσίμου έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσης είναι τα εξής[34] :

- Αποτελούν πιο καθαρή πηγή ενέργειας.
- Έχουν μεγαλύτερη απόδοση. 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. Ακόμα, τα μηχανικά μέρη που χρειάζονται, για παράδειγμα οι αντλίες, έχουν πολύ λιγότερες απώλειες από τα κινούμενα μέρη μιας μηχανής. Με συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, η απόδοση μπορεί να ξεπεράσει το 90%.
- Είναι πολύ πιο αθόρυβα, καθώς τα κινούμενα μηχανικά μέρη είναι ελάχιστα.
- Είναι πιο αξιόπιστα, για τον ίδιο λόγο.
- Η συντήρησή τους είναι ευκολότερη.
- Λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Ανταποκρίνονται πιο γρήγορα στις μεταβολές του φορτίου.
- Ευνοούν την κατανομημένη παραγωγή της ενέργειας.



Efficiency Comparison (www.micro-vett.it)

Εικόνα(5.10): Βαθμός απόδοσης διαφόρων πηγών ενέργειας

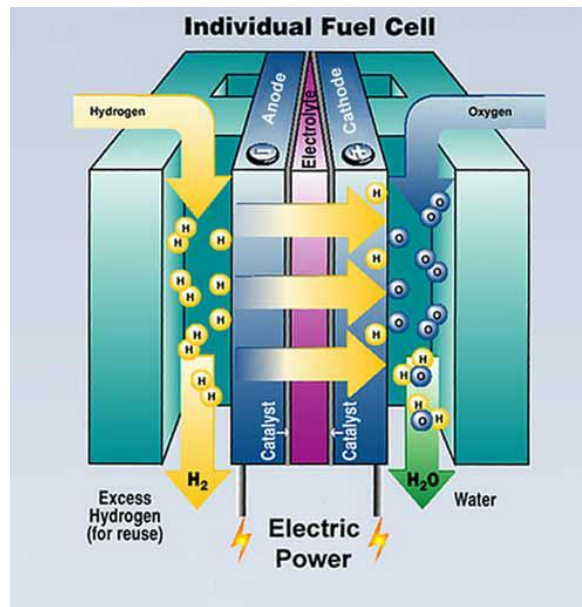
Τα κύρια πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου έναντι των μπαταριών είναι:

- Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ενέργεια όσο τροφοδοτούνται με υδρογόνο και οξυγόνο. Αντίθετα οι μπαταρίες χρειάζονται φόρτιση.
- Τα συστήματα κυψελών υδρογόνου είναι ελαφρύτερα σε σχέση με τα αντίστοιχα συστήματα με μπαταρίες.
- Οι κυψέλες υδρογόνου είναι πιο αξιόπιστες, χρειάζονται λιγότερο τακτική συντήρηση και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Από την άλλη, τα κύρια μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου είναι:

- Το κόστος των κυψελών καυσίμου είναι ακόμα πολύ μεγάλο.
- Συνυπολογίζοντας όλο τον εξοπλισμό που χρειάζονται 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.

Ως προς τη δομή, η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια – άνοδο και κάθοδο - τα οποία χωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη. Το στρώμα της ανόδου και της καθόδου αποτελείται από το στρώμα διάχυσης αερίων, που είναι υπεύθυνο για την ομοιόμορφη κατανομή των αερίων στην επιφάνεια του καταλύτη. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην κυψέλη συμβαίνουν στην επιφάνεια πριν τον ηλεκτρολύτη, η οποία είναι εμπλουτισμένη με έναν καταλύτη – συνήθως λευκόχρυσος ή παλλάδιο.



Εικόνα (5.11): Λειτουργία κυψέλης

Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την αντίδραση του οξυγόνου με το καύσιμο (υδρογόνο, μεθάνιο, μεθανόλη) μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Για την ακρίβεια η απόσπαση των ηλεκτρονίων από τα μόρια του καυσίμου οδηγούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, παράγοντας με αυτόν τον τρόπο ηλεκτρική ενέργεια. Η θεωρητική τιμή της τάσεως για κυψέλες καυσίμου υδρογόνου κυμαίνεται στα $1.23V$ για θερμοκρασία $25^{\circ}C$. Στην πράξη όμως το φάσμα των τιμών της τάσεως βρίσκεται περίπου στο $0.5-1V$. Για την επίτευξη μεγαλύτερης τάσεως συνδέονται πολλές κυψέλες μαζί, δημιουργώντας μια συστοιχία κυψελών (stack).

Οι κυριότεροι τύποι κυψελών καυσίμου και τα χαρακτηριστικά τους είναι:

- Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (Alkaline Fuel Cell-AFC).
- Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane-PEMFC).
- Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell-PAFC).
- Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cell-MCFC).
- Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell-SOFC).

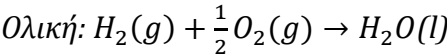
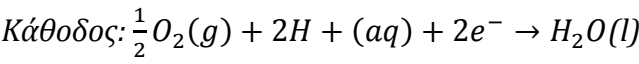
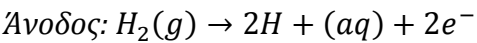
Είδος κυψέλης καυσίμου	<i>Proton Exchange Membrane (PEMFC)</i>	<i>Alkaline (AFC)</i>	<i>Phosphoric Acid (PAFC)</i>	<i>Molten Carbonate (MCFC)</i>	<i>Solid Oxide (SOFC)</i>
Ηλεκτρολύτης	πολυμερής μεμβράνη	30-50% KOH	φοσφορικό οξύ	πήγματα ανθρακικών αλάτων (Li ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃)	αργόγιο κεραμικό υλικό
Θερμοκρασία	50-80°C	60-90°C	160-220°C	620-660°C	800-1000°C
Καύσιμο	H ₂ , CH ₄ , CH ₃ OH	H ₂	H ₂ , CH ₄	CH ₄	H ₂ , CH ₄
Αντίδραση Ανόδου	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	H ₂ + 2OH ⁻ → 2H ₂ O + 2e ⁻	H ₂ → 2H ⁺ + 2e ⁻	H ₂ + CO ₃ ²⁻ → H ₂ O + CO ₂ + 2e ⁻	H ₂ + O ²⁻ → H ₂ O + 2e ⁻
Αντίδραση Καθόδου	½O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O	½O ₂ + H ₂ O + 2e ⁻ → 2OH ⁻	½O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O	½O ₂ + CO ₂ + 2e ⁻ → CO ₃ ²⁻	½O ₂ + 2e ⁻ → O ²⁻
Βαθμός απόδοσης	50-60%	50-60%	55%	60-65%	55-65%
Δυναμική απόκριση	γρήγορη	γρήγορη	αργή	αργή	γρήγορη (όταν είναι ζεστή)
Χρόνος εκκίνησης	άμεσα	άμεσα	περίπου 30 min	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, μακρύς χρόνος εκκίνησης	γρήγορη αντίδραση καθόδου λόγω υψηλής θερμοκρασίας	μεγάλος βαθμός απόδοσης (συμπ. θερμότητας)	υψηλή θερμοκρασία, επιζήμια στην επιλογή του καυσίμου	υψηλή θερμοκρασία
Μειονεκτήματα	ακριβός καταλύτης (Pt)	πολύπλοκη απομάκρυνση του CO ₂	Pt καταλύτης, μικρή ισχύς, σγκώδες και βαρύ	μικρή βιωσιμότητα	μικρή βιωσιμότητα

Πίνακας (5.12): Γενικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου

5.8 Κυψέλη Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC)

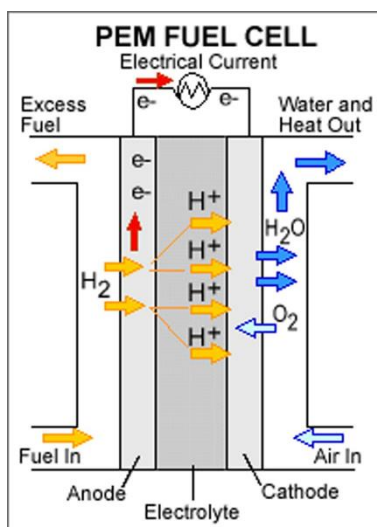
5.8.1 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Σε κάθε τύπο κυψέλης καυσίμου πραγματοποιείται μια οξειδοαναγωγή στα ηλεκτρόδιά της. Στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου PEM οξειδώνεται το υδρογόνο H₂, ενώ στην κάθοδο έχουμε αναγωγή του οξυγόνου O₂. Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μια τέτοια κυψέλη είναι οι εξής:



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,

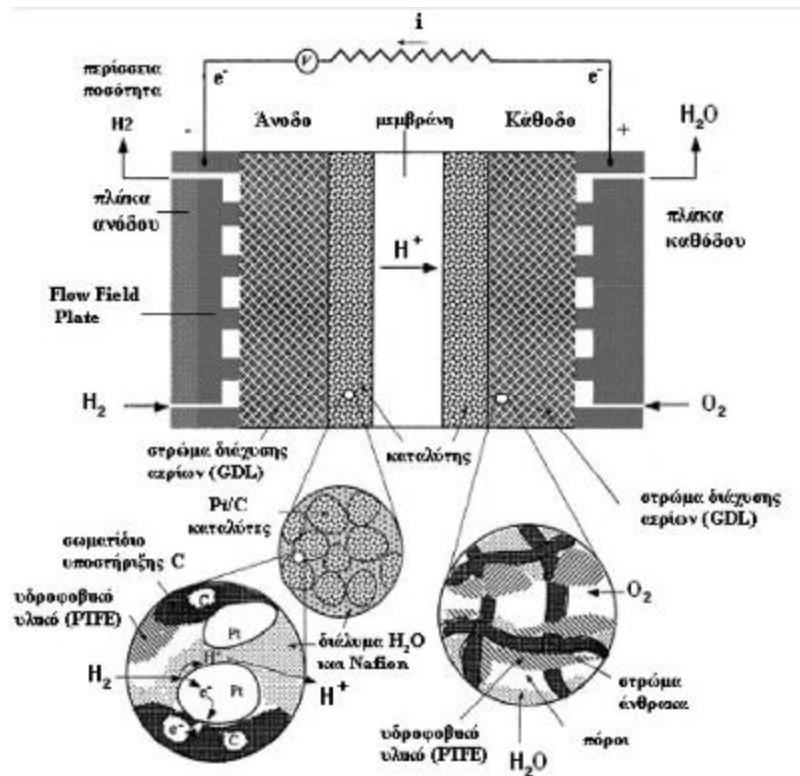
διασχίζοντας τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι αγωγίμος μόνο για πρωτόνια. Τα ηλεκτρόνια, που προκύπτουν από την οξείδωση, διασχίζουν εξωτερικό κύκλωμα, παράγοντας ηλεκτρικό έργο και καταλήγουν στην κάθοδο. Στην κάθοδο αντιδρούν με το εισερχόμενο οξυγόνο (αναγωγή) και με τα πρωτόνια που καταφθάνουν από 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[34].



Εικόνα (5.13): Κυψέλη Καυσίμου PEM

5.8.2 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.



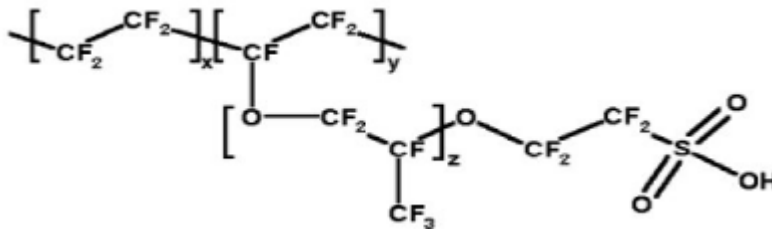
Εικόνα (5.14): Εσωτερική δομή κυψέλης καυσίμου PEM

Τα κύρια δομικά της στοιχεία είναι:

- Μεμβράνη πρωτονίων (Proton Exchange Membrane - PEM)
- Ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου
- Στρώμα διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layer - GDL)
- Πλάκα ροής αερίων (Flow Field Plate), διπολική πλάκα
- Συστοιχία κυψελών καυσίμου

5.8.3 Μεμβράνη

Η μεμβράνη της κυψέλης αποτελείται συνήθως από έναν 25-200 μm 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 που κατασκευάζεται από την εταιρεία DuPont και έχει δομικές ομοιότητες με το Teflon.



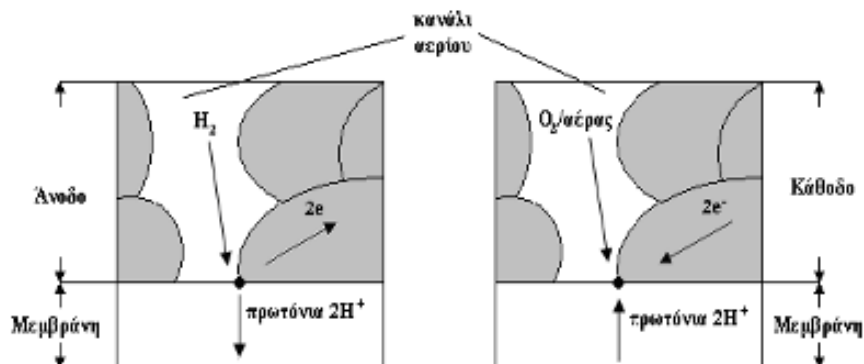
Εικόνα (5.15): Δομή του πολυμερούς Nafion

Από την εικόνα μπορούμε να διακρίνουμε τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή είναι ο κορμός των φθοροανθράκων ($-\text{CF}_2-\text{CF}-\text{CF}_2-$), η οποία επαναλαμβάνεται εκατοντάδες φορές μέσα στη μεμβράνη. Η δεύτερη περιοχή αποτελείται από την πλευρική αλυσίδα ($[\text{O}-\text{CF}_2-\text{CF}(\text{CF}_3)-\text{O}-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$ 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. 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°C , ενώ σε περιπτώσεις που λειτουργούν κυψέλες καυσίμου πάνω από τους 100°C , πρέπει να επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης ώστε το νερό να διατηρείται σε υγρή μορφή.

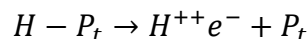
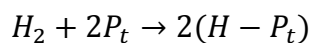
5.8.4 Ηλεκτρόδια

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.



Εικόνα (5.16): 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 οξειδωσης 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:



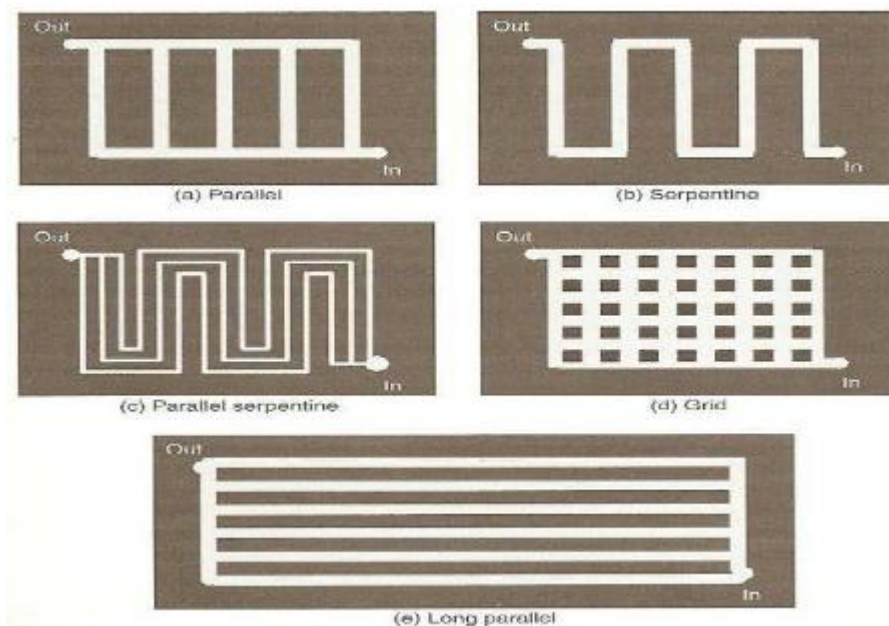
Πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι λόγω του υψηλού κόστους του λευκόχρυσου, τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται από πορώδη άνθρακα (εικόνα 5.12), στον οποίο γίνεται ομοιόμορφη διασπορά μορίων λευκόχρυσου, τα οποία προσκολλώνται στα άτομα του άνθρακα. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται το κόστος παραγωγής των ηλεκτροδίων.

5.8.5 Στρώμα διάχυσης αερίων

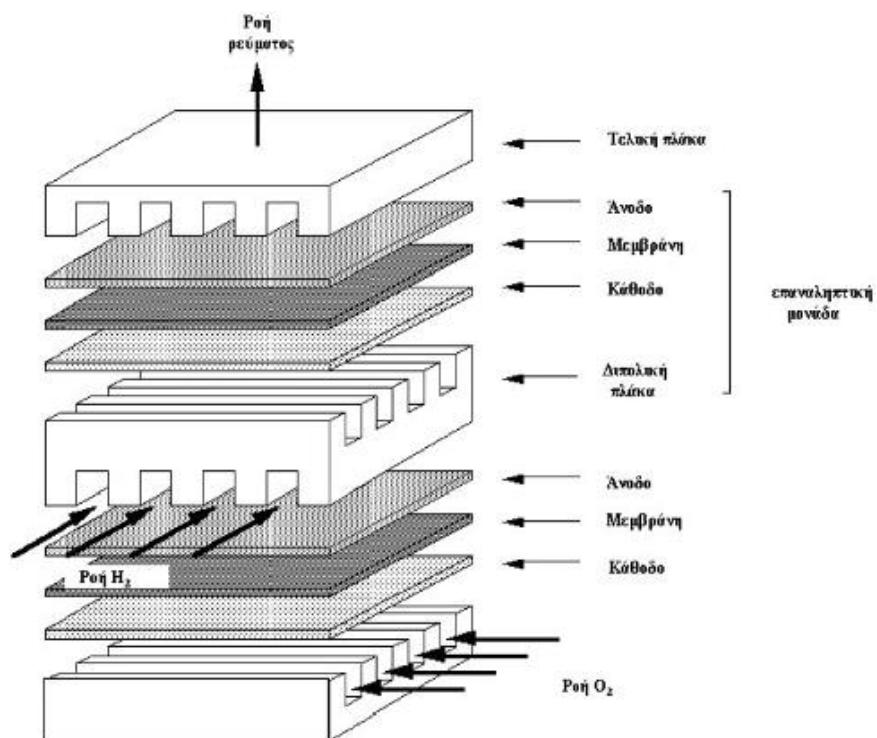
Η κύρια λειτουργία αυτού του στρώματος είναι να διαχέει ομοιόμορφα τα αέρια αντιδρώντα στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Το στρώμα διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layer) αποτελείται από υδροφοβικό χαρτί γραφίτη που επιτρέπει την εύκολη μεταφορά των αερίων καθώς και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των ηλεκτρονίων.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

5.8.6 Πλάκα ροής των 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 (εικόνα 5.17, στην πλειοψηφία επικρατούν ελικοειδή και παράλληλα κανάλια). Στην εικόνα 5.18 παρουσιάζεται η δομή μίας συστοιχίας κυψελών καυσίμου.

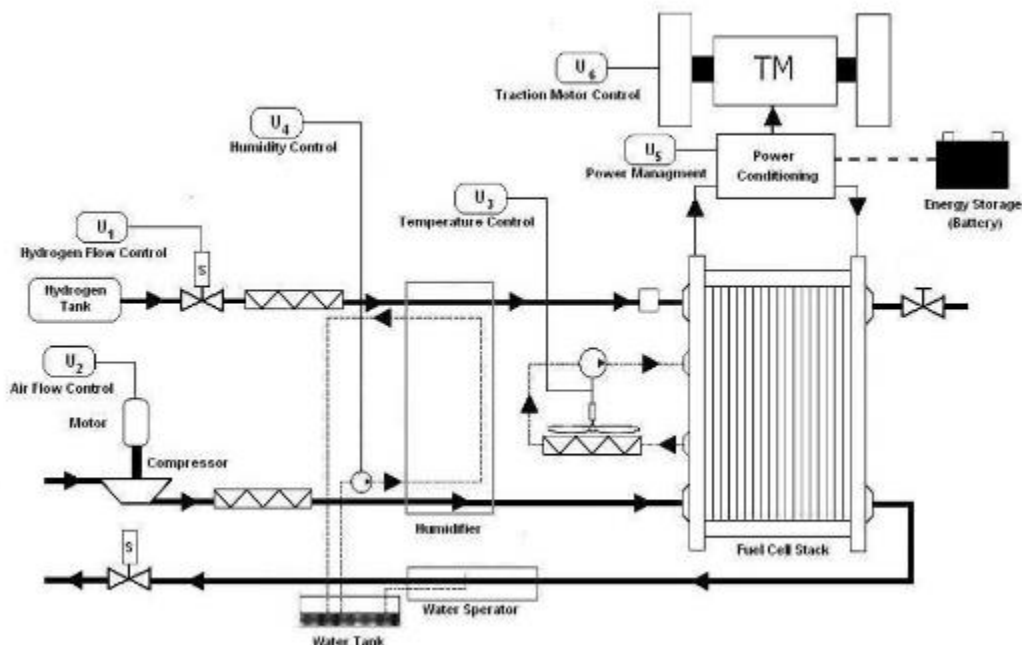


Εικόνα (5.17): Παραδείγματα διαφορετικών flow field plate



Εικόνα (5.18): Συστοιχία κυψελών καυσίμου

5.8.7 Υποσυστήματα κυψέλης καυσίμου



Εικόνα (5.19): Σχεδιάγραμμα βοηθητικών στοιχείων υποστήριξης μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου για ένα ολοκληρωμένο σύστημα ηλεκτροκίνησης

Τα αναγκαία συστήματα που απαιτούνται για τη λειτουργία μίας κυψέλης καυσίμου παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα. 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. 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 εξαχεται ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία της κυψέλης κάτω από τους 100°C. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με απιονισμένο 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[34][45]. Η κατάσταση αυτή αντιμετωπίζεται προσθέτοντας συμπληρωματικούς τύπους αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. 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

5.9 Μοντελοποίηση Κυψέλης Καυσίμου (PEMFC)

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται μια παρόμοια έκδοση του μοντέλου κυψέλης καυσίμου που περιγράφεται στις αναφορές [46,47]. Το μοντέλο αυτό φτιάχτηκε αξιοποιώντας την σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου και της μερικής πίεσης του υδρογόνου, οξυγόνου και νερού. Στην εικόνα 5.20 φαίνεται το μοντέλο της κυψέλης καυσίμου PEMFC που χρησιμοποιήθηκε και ενσωματώθηκε στο υβριδικό σύστημα που προσομοιώθηκε στο περιβάλλον Matlab/Simulink. 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_{H_2} : Μοριακή σταθερά βαλβίδας υδρογόνου [$kmol/(atm\ s)$]

K_{H_2O} : Μοριακή σταθερά βαλβίδας νερού [$kmol/(atm\ s)$]

K_{O_2} : Μοριακή σταθερά βαλβίδας οξυγόνου [$kmol/(atm\ s)$]
 K_r : Σταθερά μοντελοποίησης [$kmol/(s\ A)$]
 M_{H_2} : Γραμμομοριακή μάζα [$kg\ kmol^{-1}$]
 N_o : Αριθμός σειρών στην κυψέλη
 N_s : Αριθμός κυψελών που χρησιμοποιούνται στην κυψέλη λειτουργίας
 p_{H_2} : Μερική πίεση υδρογόνου [atm]
 p_{H_2O} : Μερική πίεση νερού [atm]
 p_{O_2} : Μερική πίεση οξυγόνου [atm]
 q_{O_2} : Μοριακή ροή εισόδου οξυγόνου [$kmol/s$]
 q_{H_2} : Μοριακή ροή εισόδου υδρογόνου [$kmol/s$]
 $q_{H_2_{in}}$: Ροή εισόδου υδρογόνου [$kmol/s$]
 $q_{H_2_{out}}$: Ροή εξόδου υδρογόνου [$kmol/s$]
 $q_{H_2_r}$: Ροή υδρογόνου που αντιδρά [$kmol/s$]
 $q_{H_2_{req}}$: 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_{H_2} : Σταθερά χρόνου υδρογόνου [s]
 τ_{O_2} : Σταθερά χρόνου οξυγόνου [s]

τ_{H_2O} : 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[4][6][10]:

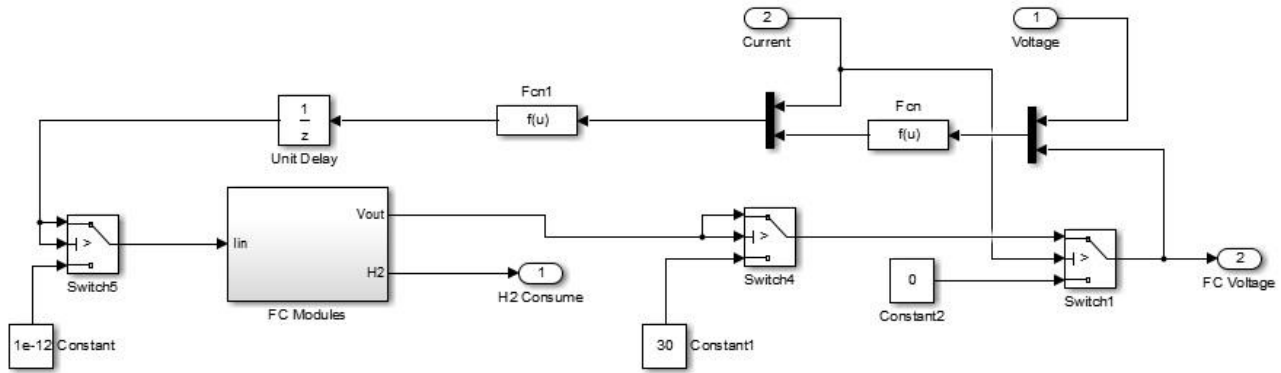
$$\frac{q_{H_2}}{p_{H_2}} = \frac{K_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = K_{H_2} \quad (44)$$

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. Η σχέση μεταξύ αυτών των τριών παραγόντων μπορεί να εκφραστεί ως:

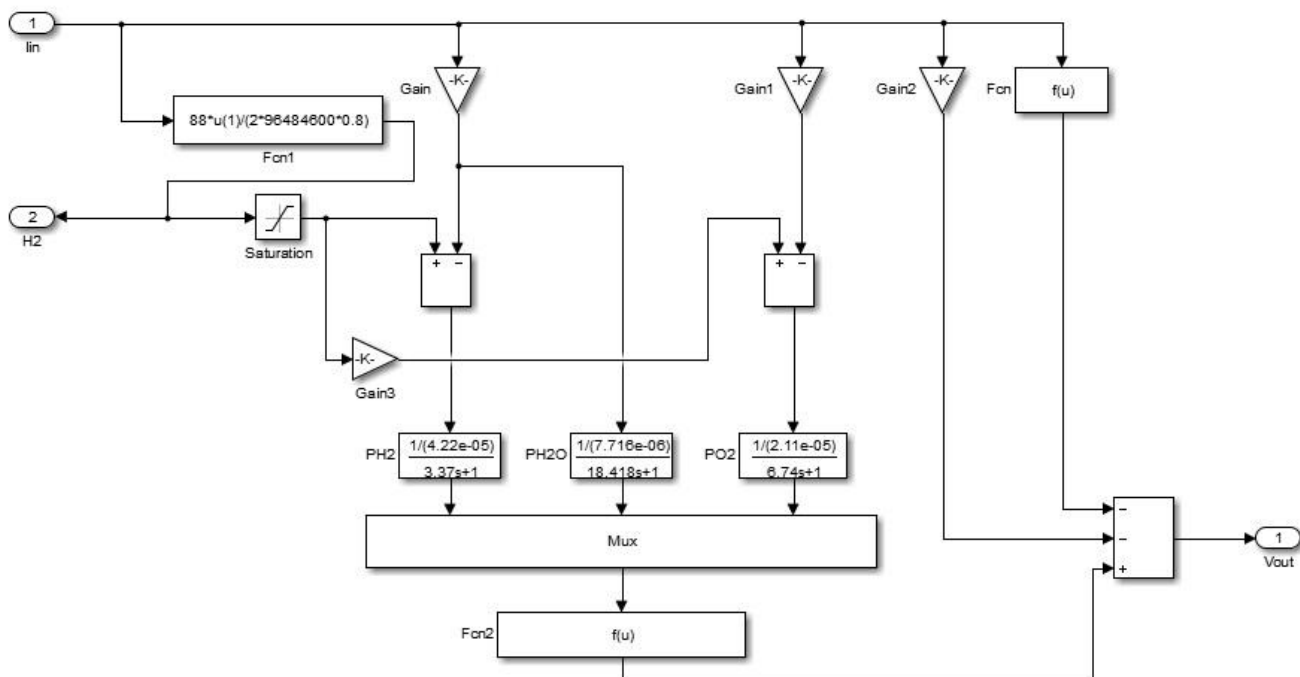
$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (45)$$

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:

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0 N_s I_{FC}}{2F} = K_r I_{FC} \quad (46)$$



Εικόνα (5.20): Σύστημα λειτουργίας/ελέγχου κυψέλης καυσίμου PEM.



Εικόνα (5.21): Μέσα στο υποσύστημα της κυψέλης καυσίμου PEM

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (44) και (46) και εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό Laplace, η μερική πίεση του υδρογόνου μπορεί να επιτευχθεί στον τομέα s ως:

$$p_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1+\tau_{H_2}s} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I_{FC}) \quad (47)$$

όπου:

$$\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{K_{H_2}RT} \quad (48)$$

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:

$$V_{cell} = E + \eta_{act} + \eta_{ohmic} \quad (49)$$

όπου:

$$\eta_{act} = -B \ln(CI_{FC}) \quad (50)$$

και

$$\eta_{ohmic} = -R_{int}I_{FC} \quad (51)$$

Η στιγμιαία τάση Nernst μπορεί να εκφραστεί ως:

$$E = N_0 \left[E_0 + \frac{RT}{2F} \log \left[\frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right] \right] \quad (52)$$

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. Η διαθέσιμη ποσότητα υδρογόνου από την δεξαμενή δίνεται από τον τύπο:

$$q_{H_2}^{req} = \frac{N_0 N_s I_{FC}}{2FU} \quad (53)$$

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. 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.

5.10 Ηλεκτρολύτες (Electrolyzers)

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 (reversible) 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%.

5.10.1 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:

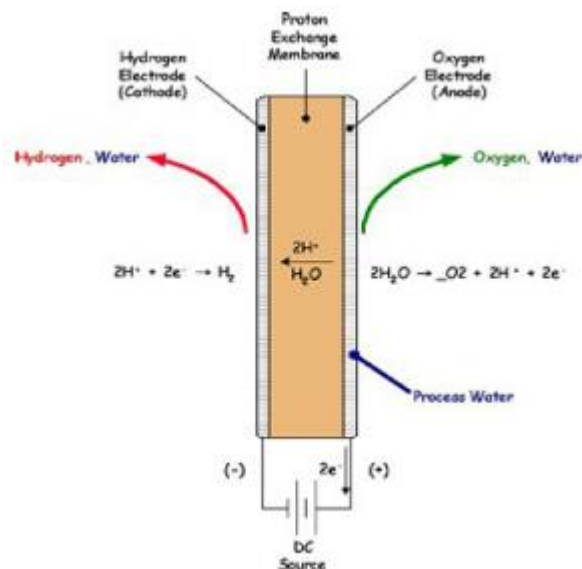
- Υψηλότερος βαθμός ασφάλειας και αξιοπιστίας δεδομένου ότι στα κελιά δεν κυκλοφορεί καυστικός ηλεκτρολύτης.
- Ελαχιστοποίηση προβλημάτων διάβρωσης και περιβαλλοντικών προβληματισμών λόγω απουσίας καυστικού ηλεκτρολύτη.
- Ευκολότερη συντήρηση.
- Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή 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.

5.10.2 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 [52]. Παρακάτω στην εικόνα 5.18

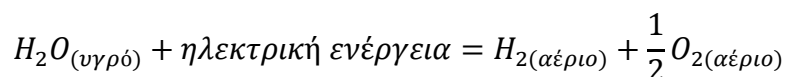
φαίνεται η αρχή λειτουργίας του κελιού ενός PEM ηλεκτρολύτη καθώς και οι εξισώσεις των αντιδράσεων.



Εικόνα (5.22): Λειτουργία κελιού PEM ηλεκτρολύτη και εξισώσεις αντιδράσεων

5.11 Μοντελοποίηση PEM Ηλεκτρολύτη

Η ηλεκτροχημική αντίδραση της ηλεκτρόλυσης του νερού δίνεται από τον τύπο[6]:



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:

$$n_{H_2} = \frac{\eta_F n_c i_e}{2F} \quad (54)$$

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,

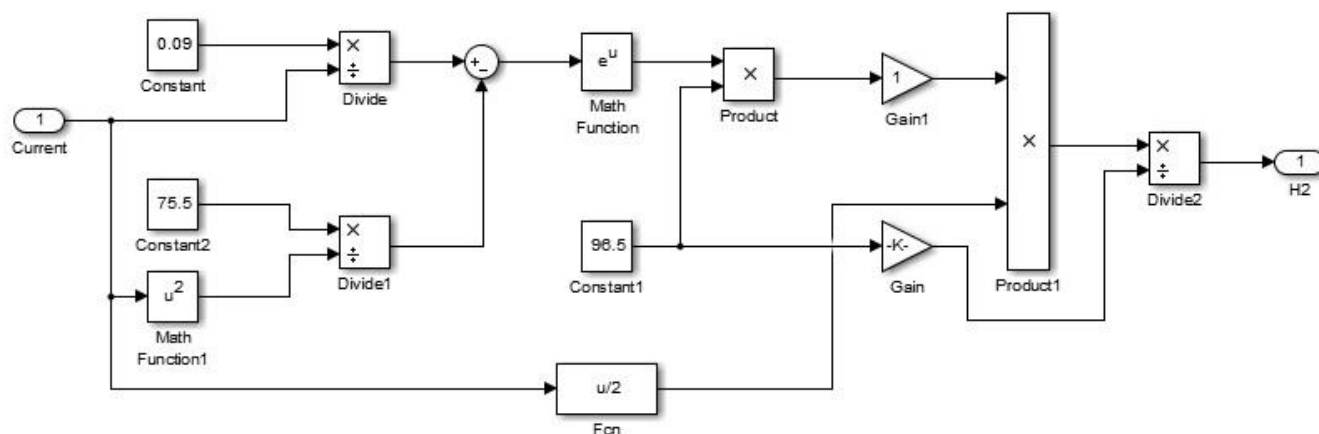
η_F είναι ο βαθμός απόδοσης Faraday,

n_{H_2} είναι το παραγόμενο 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:

$$\eta_F = 96,5e^{(0,09/i_e - 75,5/i_e^2)} \quad (55)$$

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



Εικόνα (5.23): Υποσύστημα PEM Ηλεκτρολύτη

5.12 Δεξαμενή Αποθήκευσης Υδρογόνου

5.12.1 Μέθοδοι Αποθήκευσης Υδρογόνου

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

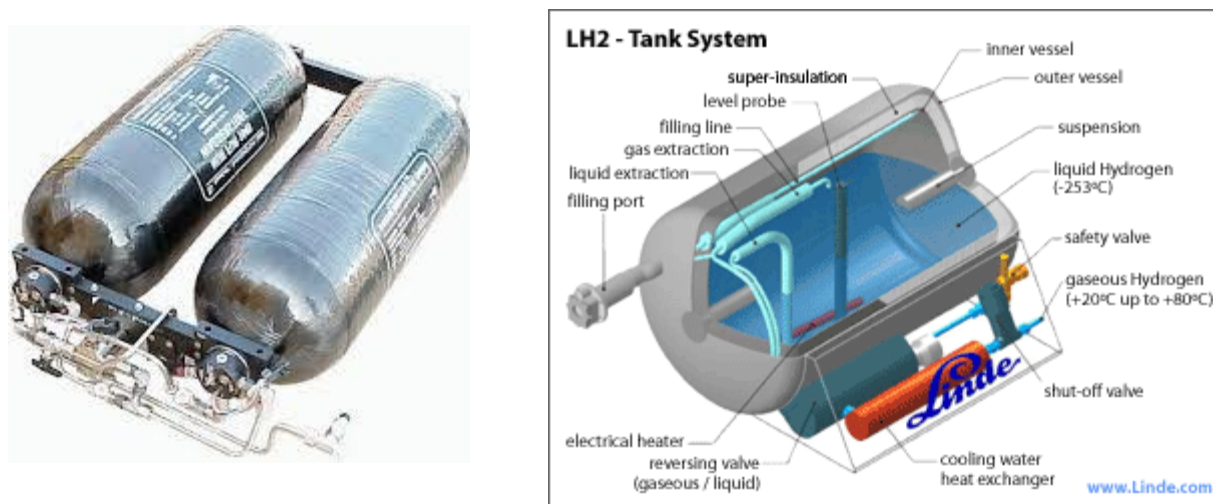
- Η απλούστερη από αυτές είναι το πεπιεσμένο αέριο υδρογόνο. Επιτυγχάνεται σε θερμοκρασία δωματίου, η ροή εισόδου και εξόδου είναι απλή. Ωστόσο, η πυκνότητα αποθήκευσης είναι χαμηλή σε σχέση με άλλες μεθόδους.
- Υπάρχει, επίσης, η επιλογή της αποθήκευσης υγρού υδρογόνου. Σε αυτή την περίπτωση, όμως, 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 [53].

5.12.2 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 .



Εικόνα (5.24): Δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέριου υδρογόνου

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 στην εικόνα 5.24, 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 [53].

5.12.3 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 [30]. 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 ανά δευτερόλεπτο που φτάνουν στην δεξαμενή [$kmol/s$]

P_b : Πίεση της δεξαμενής [$Pascal$]

P_{bi} : Αρχική πίεση της δεξαμενής [$Pascal$]

R : Παγκόσμια (*Rydberg*) σταθερά αερίων [$J/(kmol\ K)$]

T_b : Θερμοκρασία λειτουργίας [K]

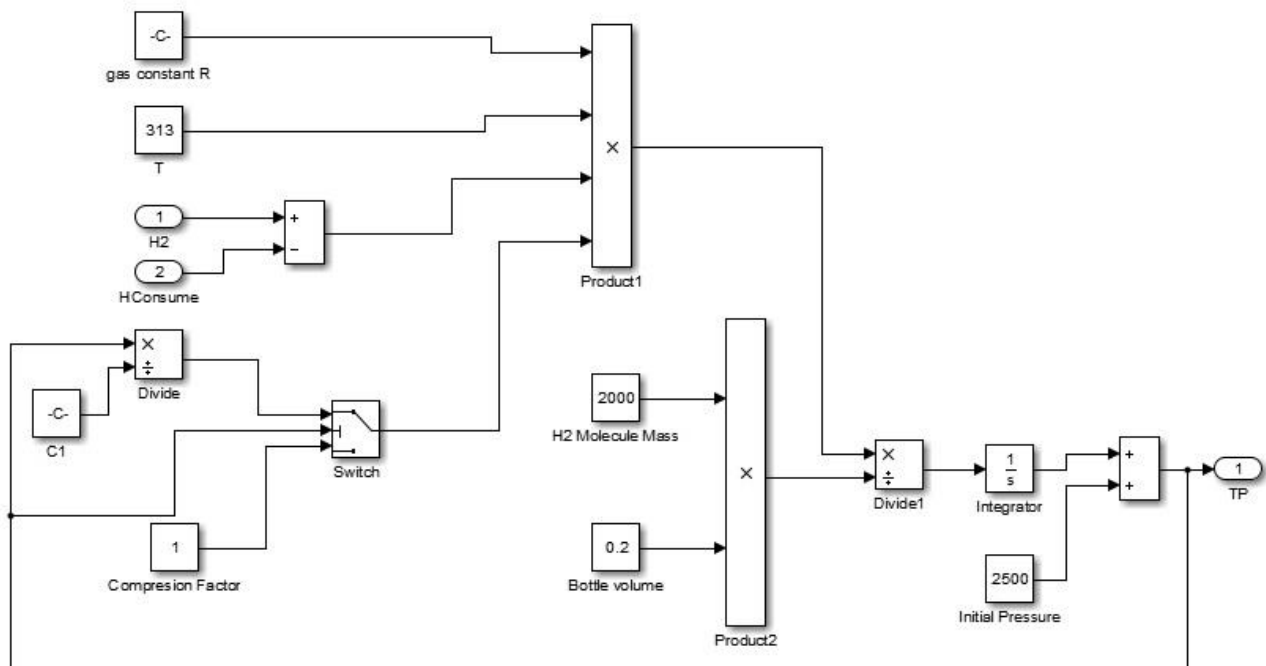
V_b : Όγκος της δεξαμενής [m^3]

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 (56) 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[30]:

$$P_b - P_{bi} = z \frac{N_{H_2} R T_b}{M_{H_2} V_b} \quad (56)$$

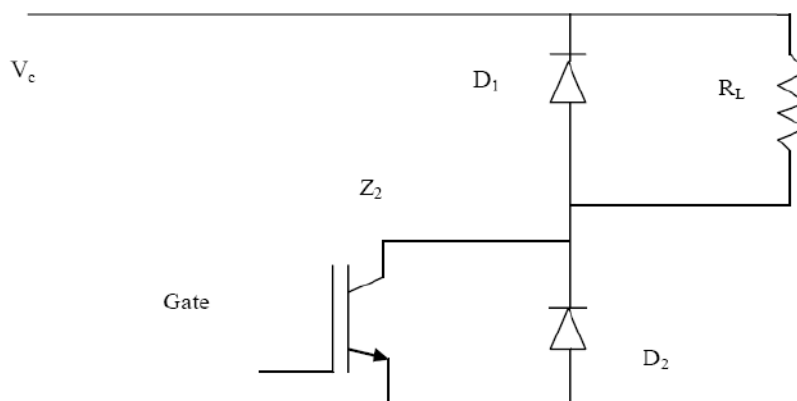
Στους υπολογισμούς μας δεν έχουν ληφθεί υπ' όψιν ούτε οι δυναμικές συμπίεσης ούτε η απαραίτητη για την συμπίεση ενέργεια. Όλες οι βοηθητικές ενεργειακές απαιτήσεις όπως αντλίες, βαλβίδες έχουν αγνοηθεί στην κατασκευή του δυναμικού μοντέλου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον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



Εικόνα (5.25): Υποσύστημα δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου

5.13 Ελεγχόμενο φορτίο (Dump Load)

Το ελεγχόμενο φορτίο χρησιμοποιείται για την ευστάθεια του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, όταν υπάρχει περίσσεια ισχύος, η οποία δε μπορεί να απορροφηθεί από τα φορτία του συστήματος, τότε για να αποφύγουμε την υπέρταση στο ζυγό, συνδέουμε το ελεγχόμενο φορτίο. Το ελεγχόμενο φορτίο είναι ωμικό και λειτουργεί με βασικό κριτήριο την σταθεροποίηση της τάσης, όποτε είναι απαραίτητες οι κατάλληλες διατάξεις ελέγχου, που θα αυξομειώνουν την αντίστασή του.

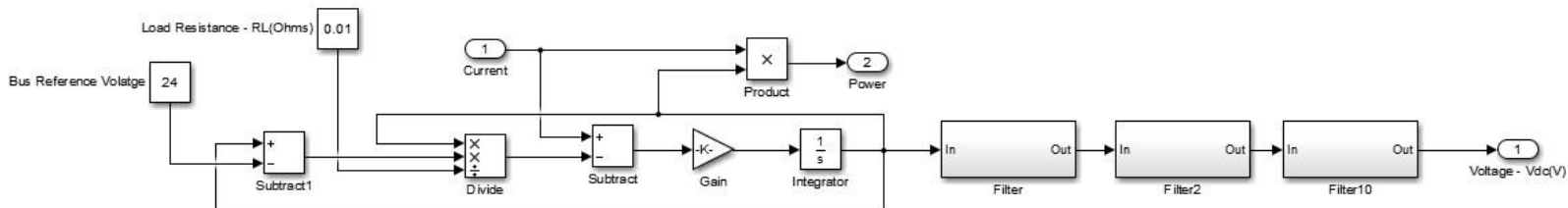


Εικόνα (5.26): Κύκλωμα ελεγχόμενου φορτίου

Όταν το IGBT Z_2 άγει, το φορτίο R_L διαρρέεται από ρεύμα. Όταν δεν άγει, η κυκλοφορία του ρεύματος μέσα από το φορτίο συνεχίζεται για λίγο μέσα από τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης D_1 . Η δίοδος D_2 , που βρίσκεται ενσωματωμένη στο Z_2 , χρησιμεύει ελάχιστα, κυρίως για την προστασία του από ανάστροφες τάσεις λόγω αυτεπαγωγών σύνδεσης. Αν D ο βαθμός χρησιμοποίησης του Z_2 , I_L το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση και V_c η τάση εισόδου, τότε ισχύει[2]:

$$I_L = \frac{V_c D}{R_L} \quad (57)$$

Το υποσύστημα Dump Load όπως αυτό αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του Matlab/Simulink, παρατίθεται παρακάτω.

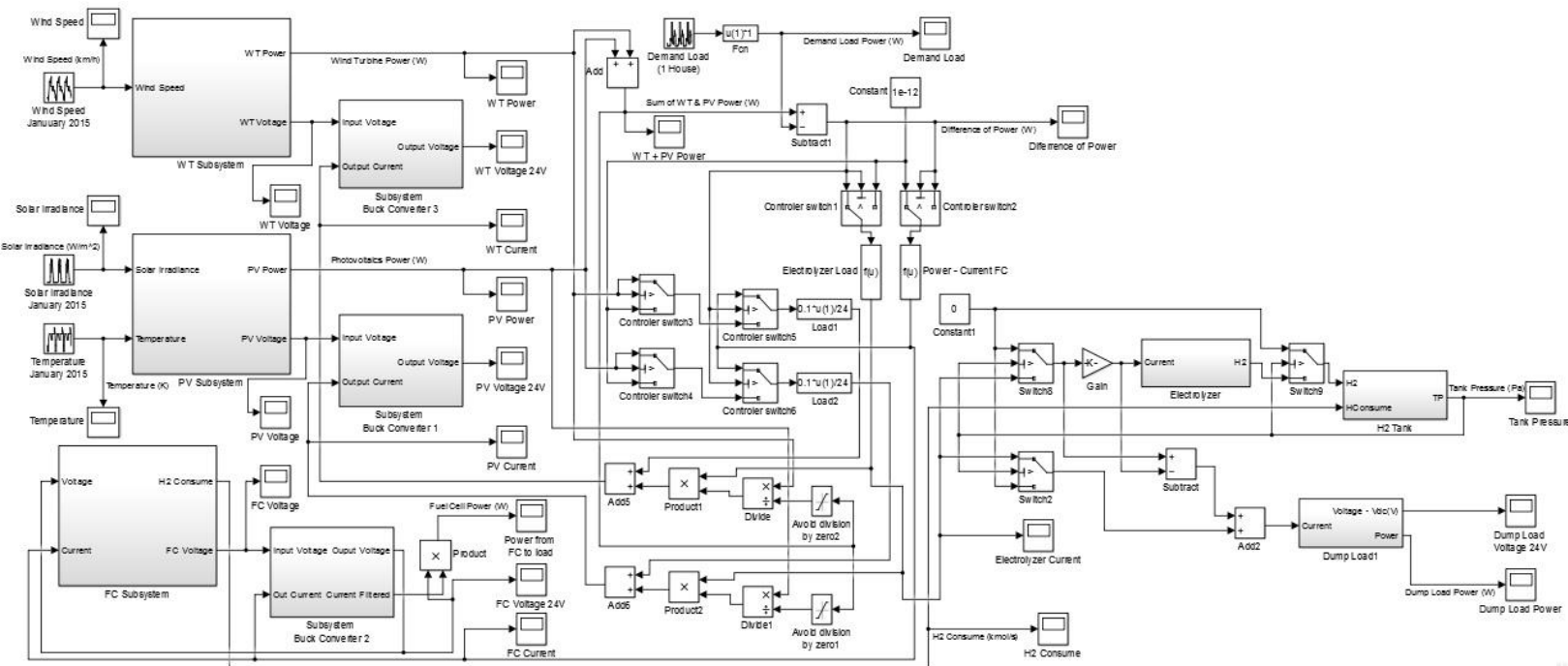


Εικόνα (5.27): Υποσύστημα ελεγχόμενου φορτίου (Dump Load)

Κεφάλαιο 6ο - Προσομοίωση και Αποτελέσματα

6.1 Διαχειριστικός έλεγχος συστήματος

Προκειμένου να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα και η σωστή λειτουργία του αυτόνομου υβριδικού συστήματος που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του Matlab/Simulink, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τέσσερις ημέρες του χρόνου, οι οποίες επιλέχθηκαν με μοναδικό κριτήριο να αντιστοιχούν στις τέσσερις εποχές του χρόνου και να μπορούν να εκφράσουν τις διαφορετικές καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Έτσι επιλέχθηκαν η 1^η Ιανουαρίου ως χειμωνιάτικη μέρα, η 1^η Απριλίου ως ανοιξιιάτικη, η 1^η Ιουλίου ως καλοκαιρινή και η 1^η Νοεμβρίου ως φθινοπωρινή. Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων αποτελούν τις ωριαίες τιμές των μεγεθών για ένα εικοσιτετράωρο (00:00 – 23:59) και προέκυψαν από διαδικτυακές πηγές όπως το <http://freemeteo.gr/> και το <http://www.realfarm.gr/>. Το συνολικό υβριδικό σύστημα το οποίο αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του Matlab/Simulink και χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων, δίνεται στην εικόνα 6.1 .



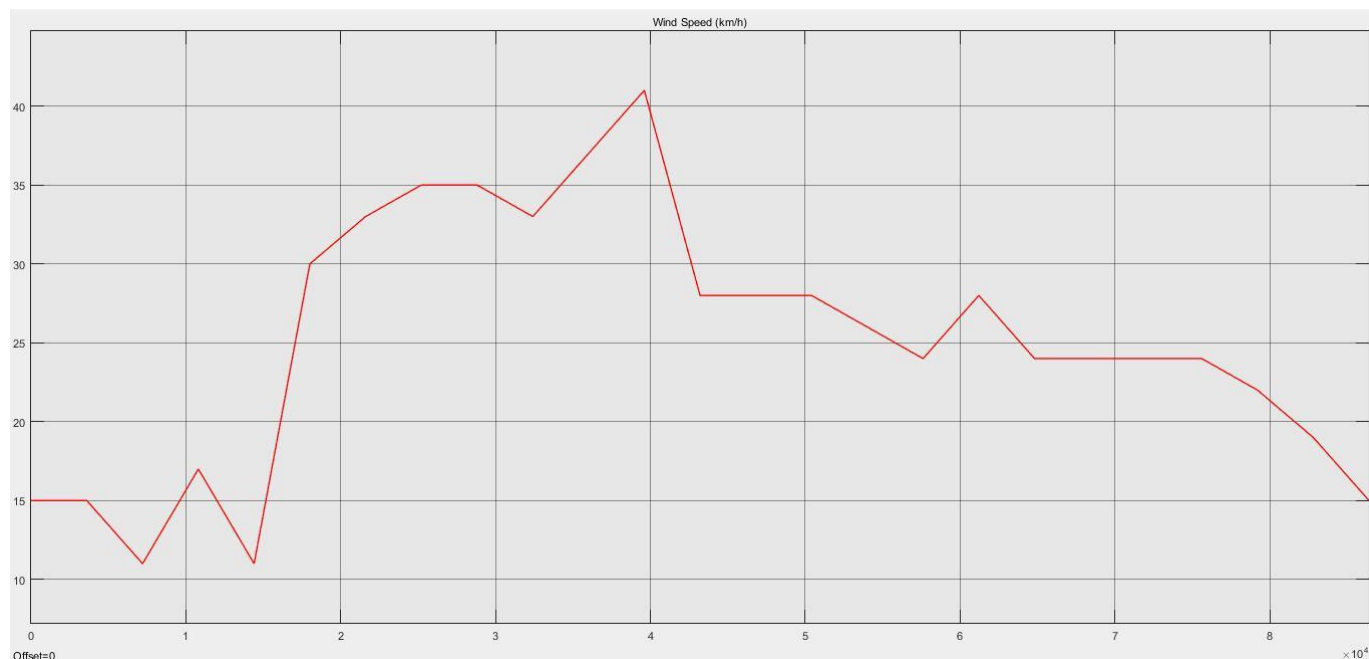
Εικόνα (6.1): Μοντέλο προσομοίωσης Υβριδικού Συστήματος

Ο διαχειριστικός έλεγχος που πραγματοποιείται στο σύστημα ακολουθεί τα εξής βήματα:

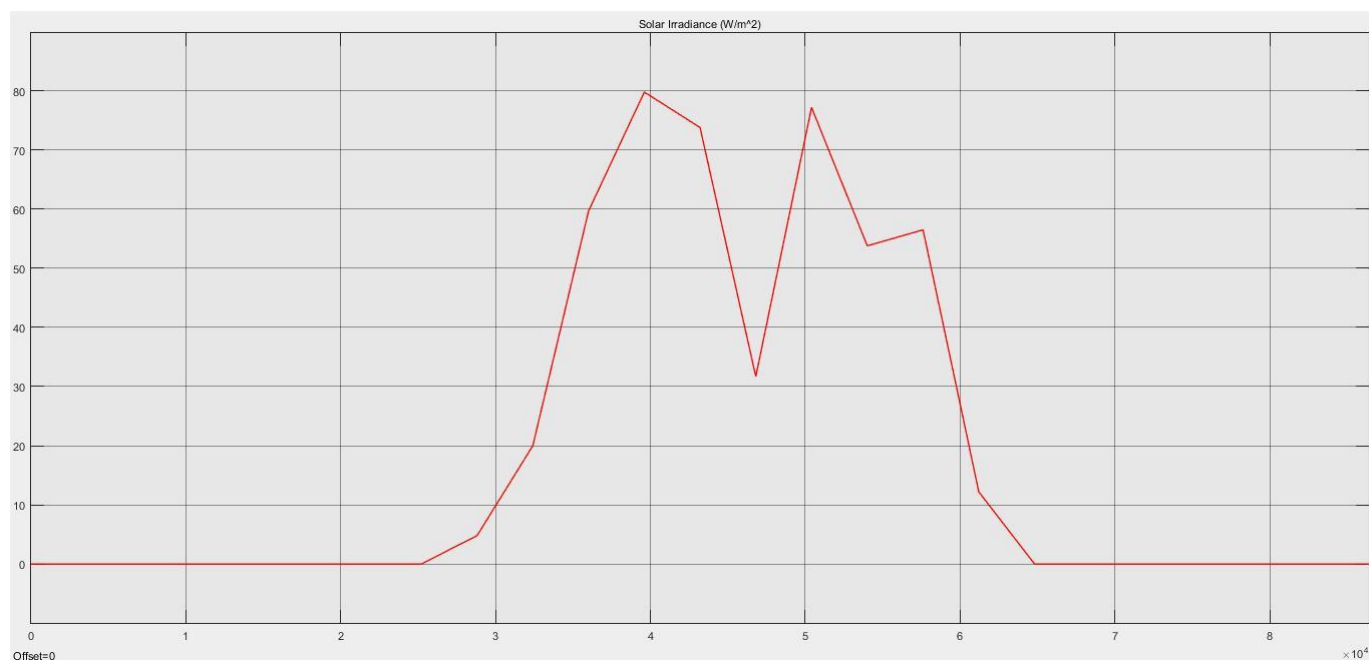
- Γίνεται πρόσθεση της παραγόμενης ισχύος της Α/Γ με την παραγόμενη ισχύ της Φ/Β γεννήτριας.
- Ακολουθεί αφαίρεση της ισχύος ζήτησης του φορτίου από το παραπάνω άθροισμα προκειμένου να υπολογιστεί αν υπάρχει έλλειμμα ή περίσσεια ισχύος.
- Αν το αποτέλεσμα είναι θετικό, δηλαδή υπάρχει περίσσεια ισχύος, τότε αυτή η ισχύς οδηγείται στον ηλεκτρολύτη όπου, αφού ελεγχθεί ότι η δεξαμενή αποθήκευσης δεν είναι πλήρης και ότι η περίσσεια ισχύος δεν είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ του ηλεκτρολύτη, μετατρέπεται σε υδρογόνο με σκοπό την αποθήκευση και μελλοντική χρήση.
- Αν το αποτέλεσμα της αφαίρεσης είναι αρνητικό, δηλαδή υπάρχει έλλειμμα, τότε αυτό αποστέλλεται στην κυψέλη καυσίμου προκειμένου να υπολογιστεί η ποσότητα της ισχύος που χρειάζεται να συνεισφέρει η κυψέλη στο σύστημα και κατ' επέκταση να μεταφερθεί η αντίστοιχη ποσότητα υδρογόνου από την δεξαμενή αποθήκευσης.
- Η λειτουργία του ηλεκτρολύτη υλοποιείται με βηματικές αυξομειώσεις της ισχύος του. Ο ηλεκτρολύτης συνεχίζει να παράγει υδρογόνο, μέχρι η πίεση της δεξαμενής να φτάσει τη μέγιστη τιμή της P_{max} (πλήρης δεξαμενή).
- Εάν η περίσσεια ισχύος δε μπορεί να απορροφηθεί από τον ηλεκτρολύτη (πληρότητα δεξαμενής ή περίσσεια ισχύος μεγαλύτερη της ονομαστικής ισχύος του ηλεκτρολύτη), τότε αυτή διοχετεύεται στο ελεγχόμενο φορτίο (Dump Load) για την αποφυγή υπερτάσεων.
- Όλα τα υποσυστήματα συνδέονται με μετατροπείς υποβιβασμού τάσης (Buck Converters) προκειμένου η τάση εξόδου τους να σταθεροποιηθεί στα 24V, η οποία τέθηκε να είναι η σταθερή τάση στο ζυγό.

6.2 Προσομοίωση χειμωνιάτικης μέρας – 1^η Ιανουαρίου 2015

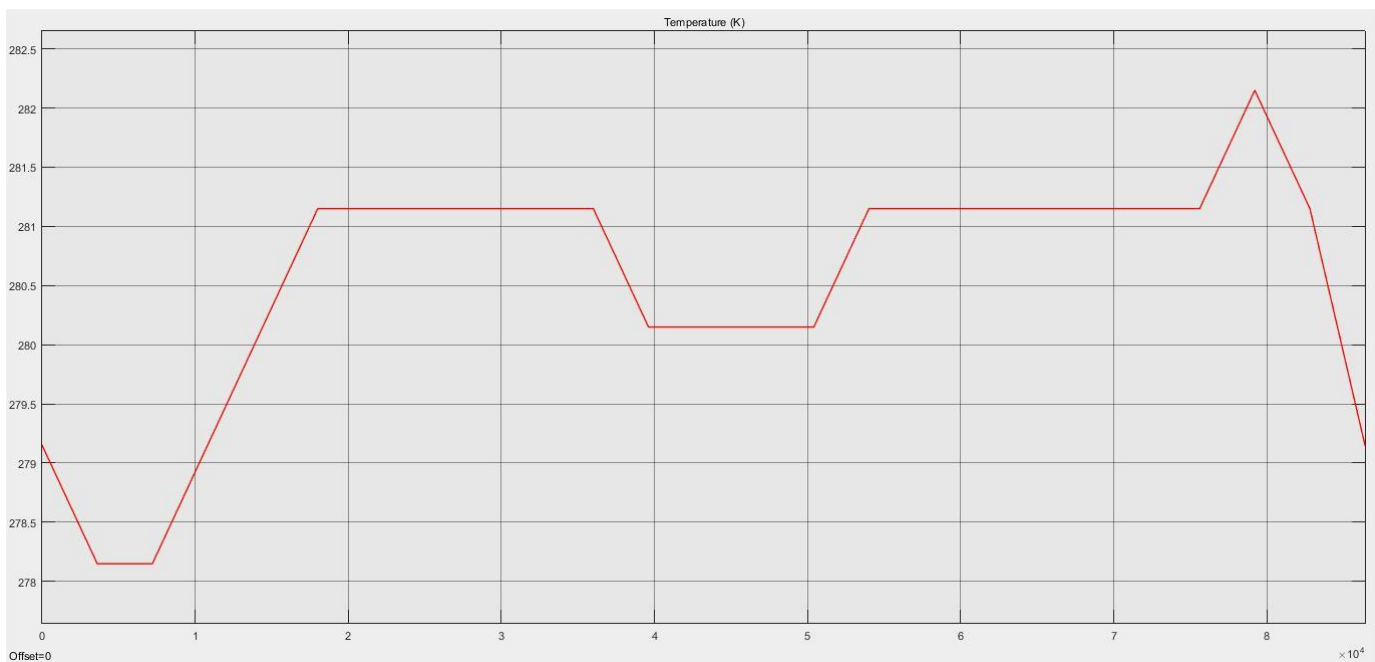
Τα δεδομένα τα οποία εισήχθησαν και τα γραφήματα τα οποία προέκυψαν παρατίθενται παρακάτω.



Εικόνα (6.2): Ταχύτητα ανέμου

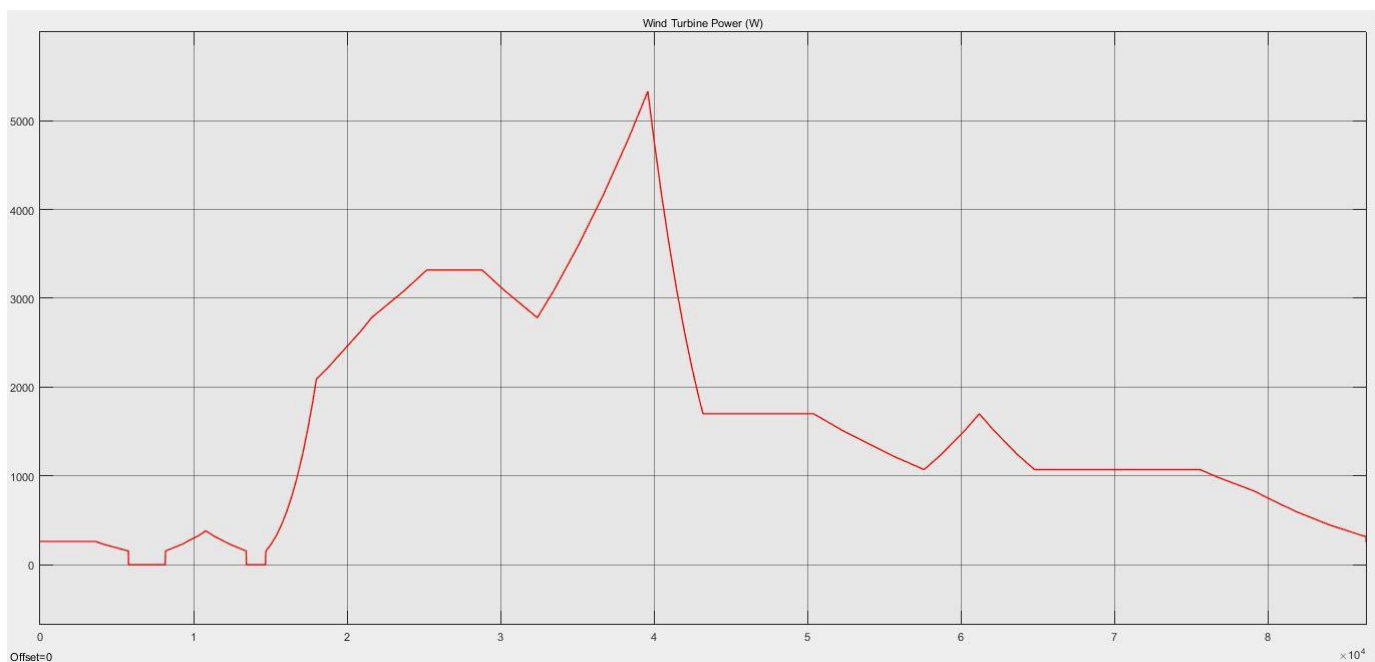


Εικόνα (6.3): Ηλιακή ακτινοβολία

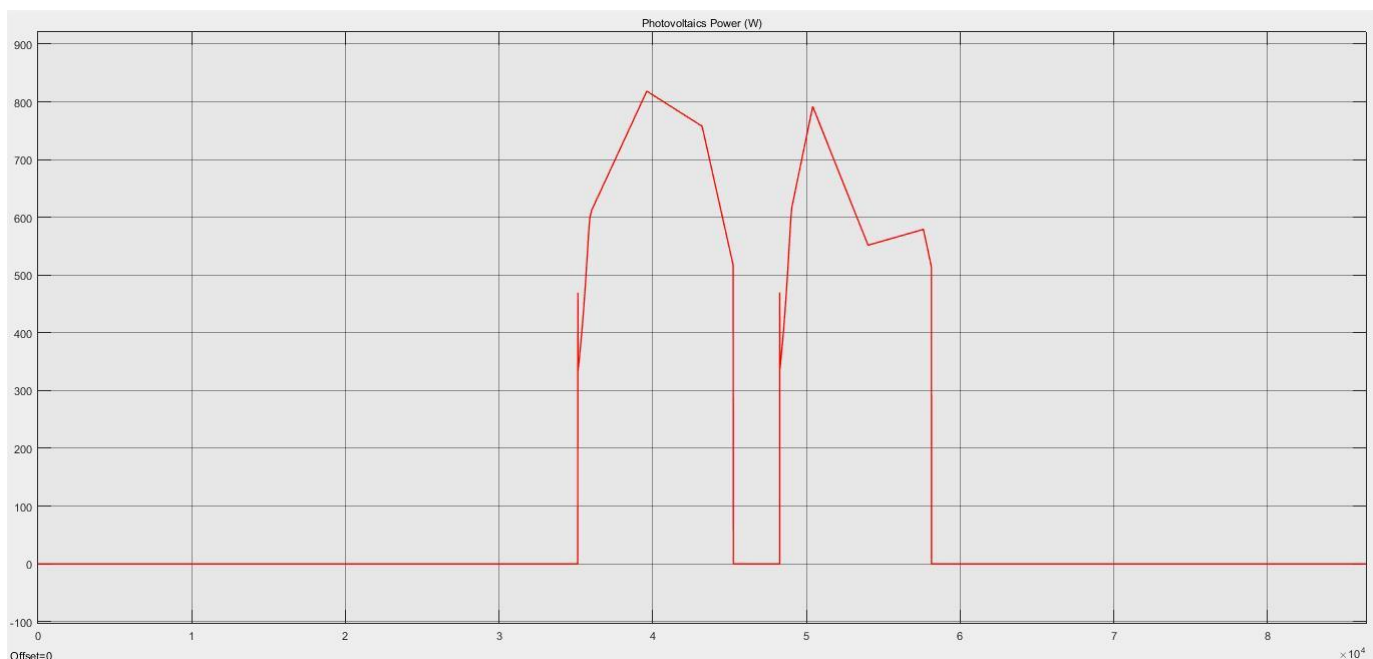


Εικόνα (6.4): Θερμοκρασία σε °K.

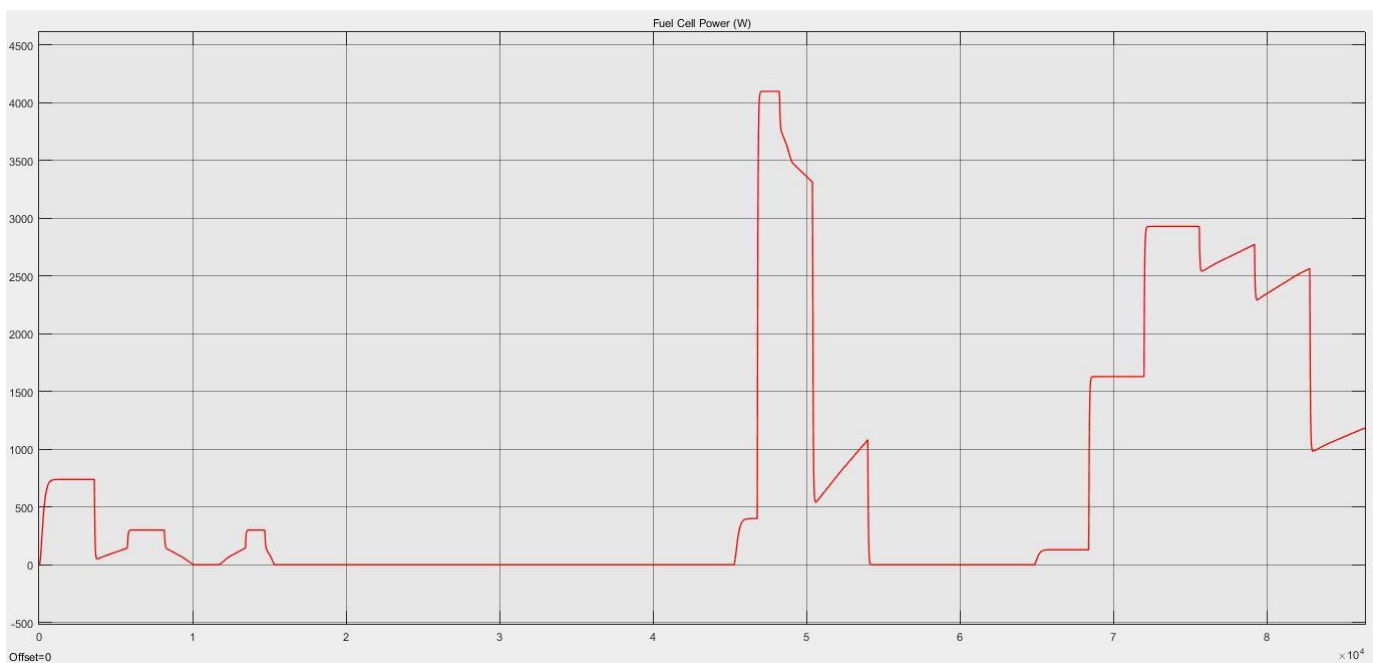
Στις παραπάνω εικόνες παρατίθενται η ταχύτητα του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία σε °K για το εικοσιτετράωρο της 1^{ης} Ιανουαρίου.



Εικόνα (6.5): Η ισχύς που παράγει η Α/Γ.



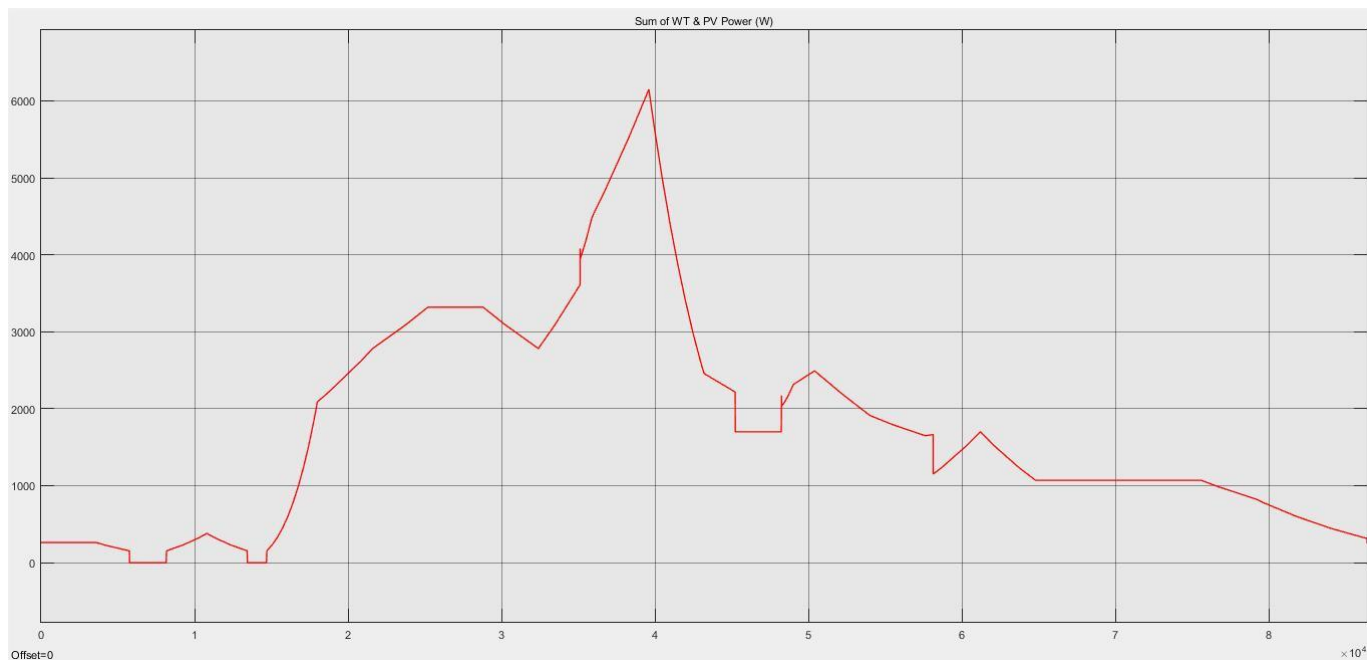
Εικόνα (6.6): Η παραγόμενη ισχύς των Φ/Β.



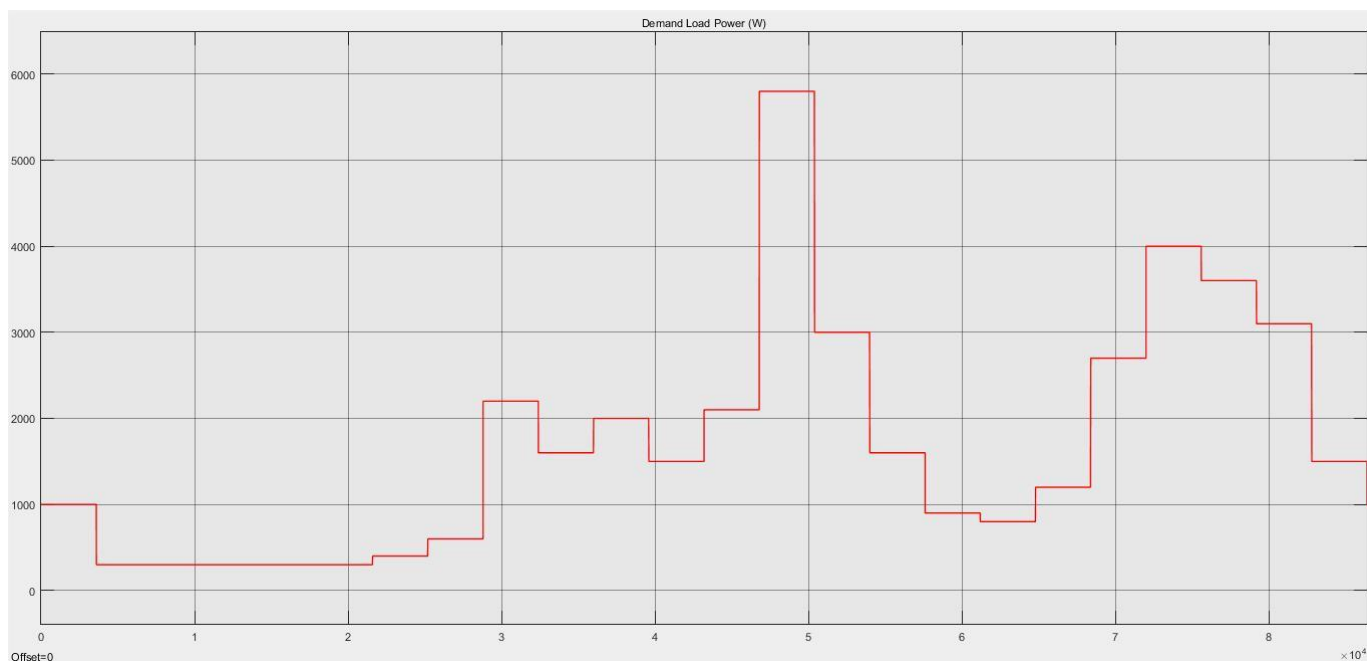
Εικόνα (6.7): Η ισχύς της κυψέλης καυσίμου

Στην εικόνα 6.4 φαίνεται η παραγωγή της ισχύος από την Α/Γ. Παρατηρείται πως ακολουθεί τις αυξομειώσεις του ανέμου ενώ σε δυο περιπτώσεις μηδενίζεται, εκεί δηλαδή που η ταχύτητα του ανέμου δεν ξεπερνά τα 3,5m/s προκειμένου να τεθεί σε λειτουργία η Α/Γ. Κατ' αντιστοιχία, η παραγωγή ισχύος από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια δίνεται μόνο τις πρωινές ώρες που υπάρχει

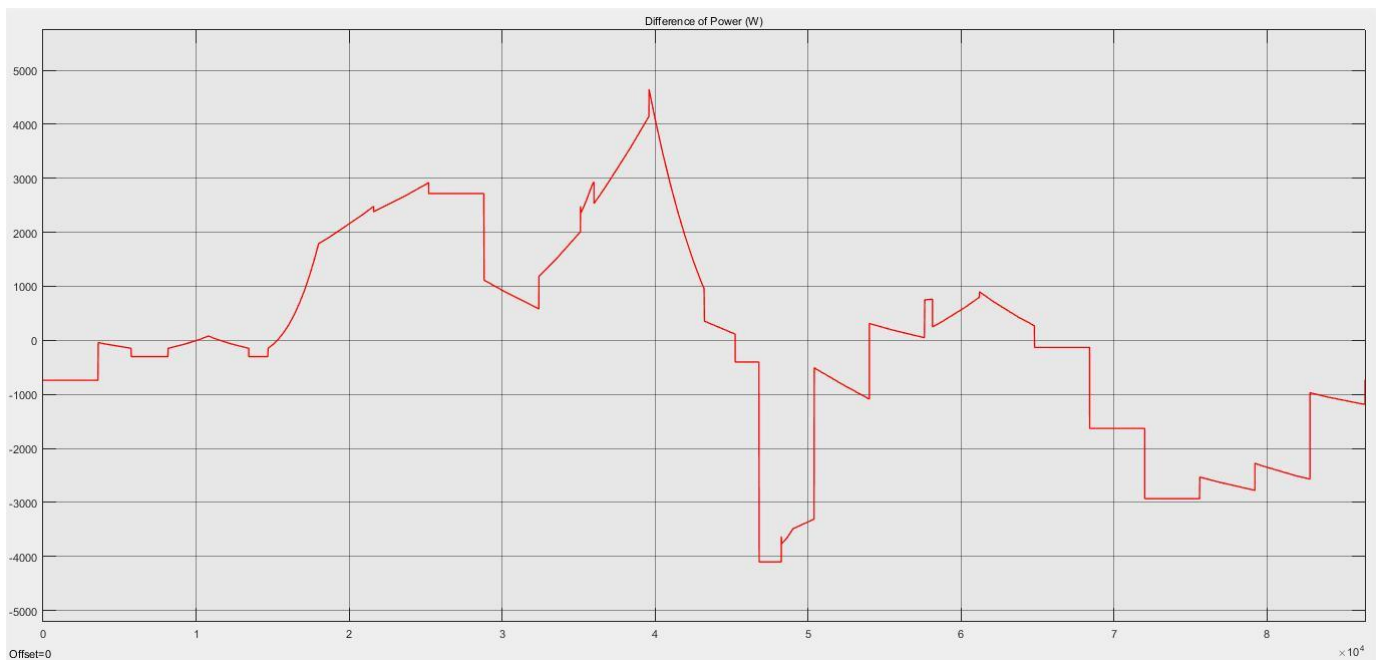
ήλιος , κι αυτή όμως παρατηρείται να μηδενίζεται σε μια περίπτωση όπου υπάρχει συννεφιά και η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι αρκετή ώστε να παραχθεί ενέργεια. Στο γράφημα της εικόνας 6.7 δίνεται η ισχύς που παρέχει η κυψέλη καυσίμου στο σύστημα. Παρατηρείται αντιστοίχιση της λειτουργίας της με τις περιπτώσεις όπου η παραγόμενη ισχύς από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια μηδενίζεται ή η ισχύς που παράγεται από την ανεμογεννήτρια κινείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα.



Εικόνα (6.8): Άθροισμα της ισχύος Α/Γ και Φ/Β.

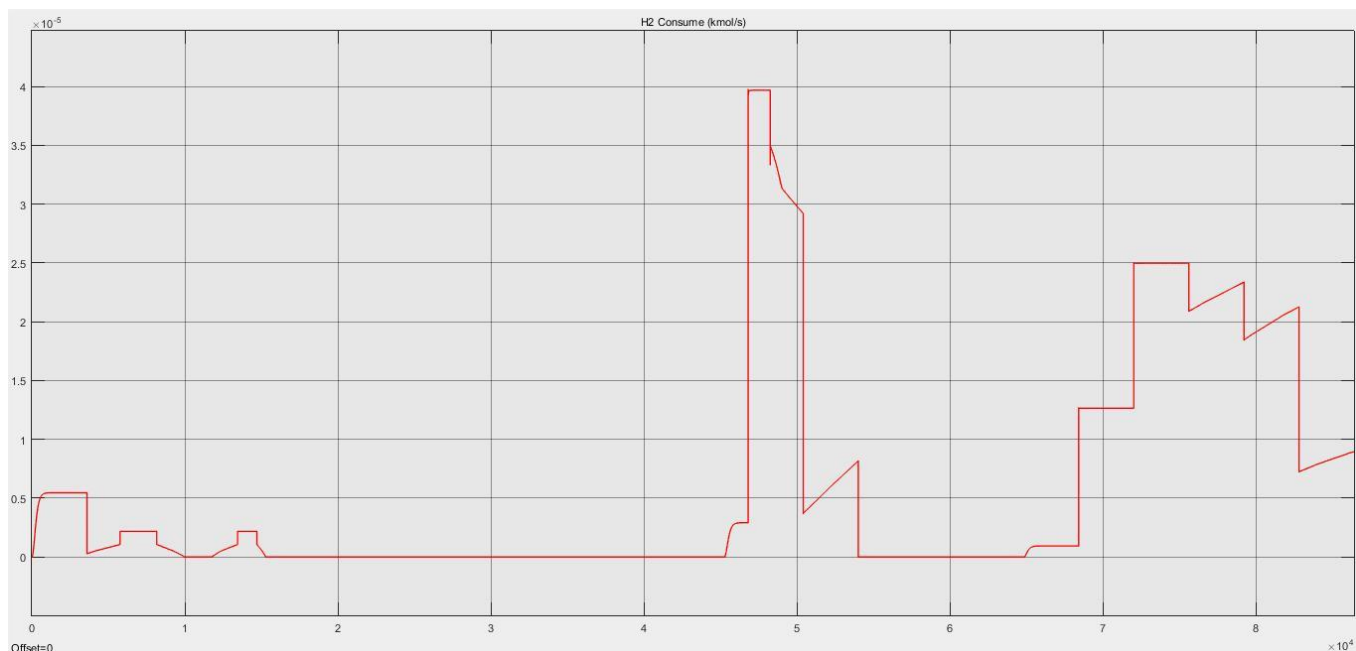


Εικόνα (6.9): Η συνολική ζήτηση του φορτίου

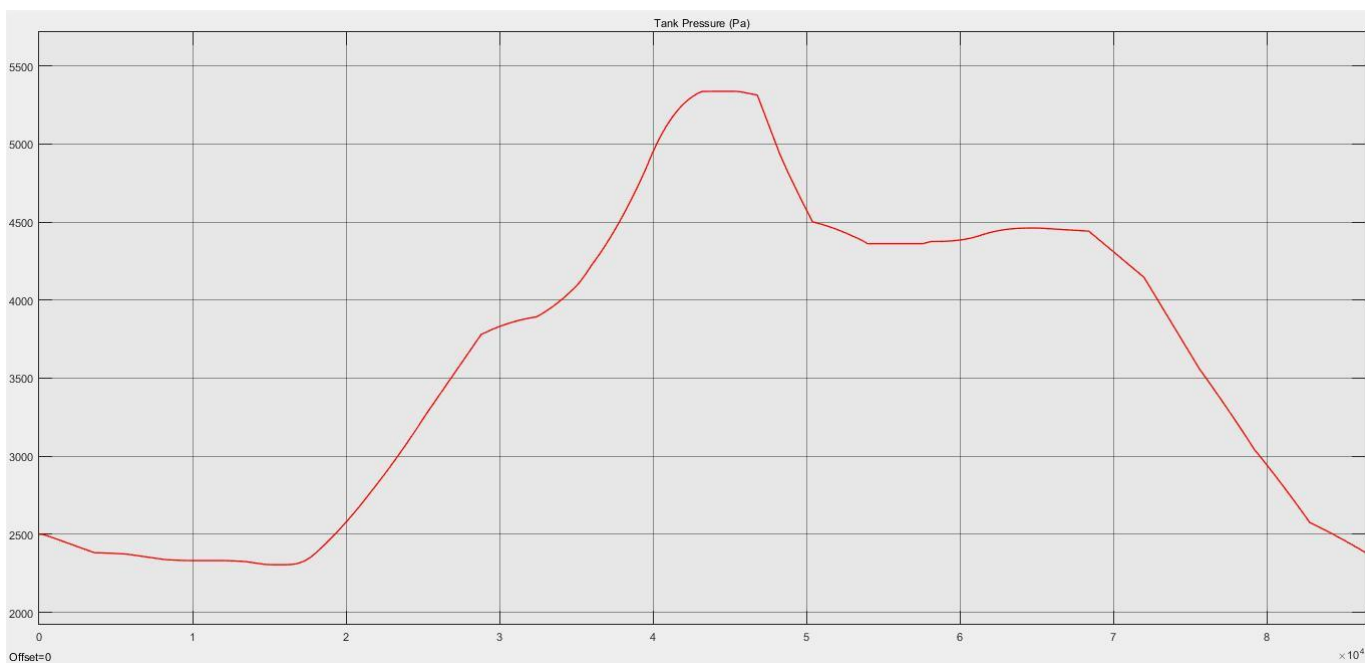


Εικόνα (6.10): Διαφορά ισχύος ζήτησης από παραγόμενη ισχύ.

Στα παραπάνω γραφήματα παρατίθενται το άθροισμα της ισχύος που παράγεται από τις δύο ενεργειακές πηγές του ΑΥΣ, η συνολική ζήτηση ισχύος του φορτίου καθώς επίσης η διαφορά αυτών των δύο μεγεθών. Παρατηρείται πως στο μεγαλύτερο μέρος της ημέρας η ισχύς η οποία παράγεται από τις ενεργειακές πηγές, επαρκεί από μόνη της για να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου, όπως άλλωστε υποδηλώνει και το θετικό αποτέλεσμα στη διαφορά των μεγεθών αυτών. Οι περιπτώσεις όπου η ισχύς δεν επαρκεί, είναι αυτές όπου η Φ/Β γεννήτρια δεν είναι σε λειτουργία και καλύπτεται από την κυψέλη καυσίμου, όπως φαίνεται σε προηγούμενη εικόνα (6.7).

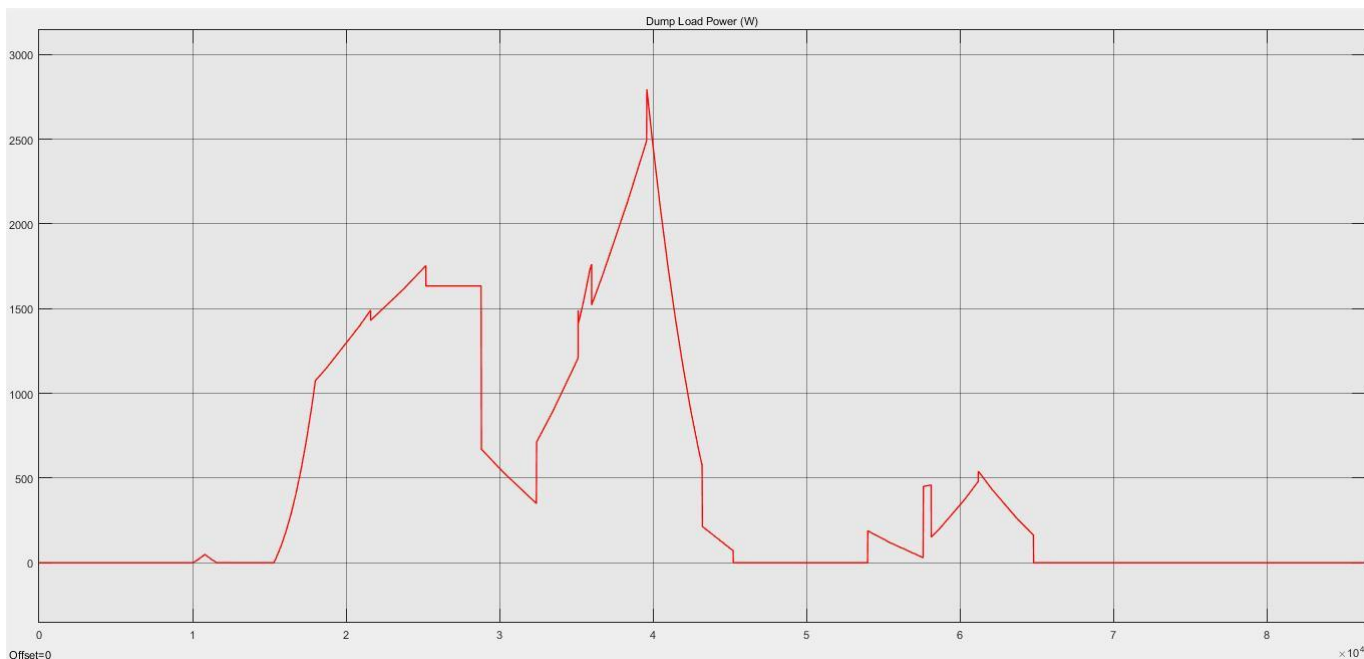


Εικόνα (6.11): Ροή υδρογόνου προς την κυψέλη καυσίμου.



Εικόνα (6.12): Πίεση της δεξαμενής υδρογόνου.

Οι παραπάνω δύο εικόνες αφορούν την λειτουργία της δεξαμενής υδρογόνου. Παρατηρείται πως η πίεση της δεξαμενής αυξάνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας όπου υπάρχει περίσσεια ισχύος ενώ στις περιπτώσεις όπου η παραγωγή ισχύος από τις δύο ενεργειακές πηγές δεν αρκεί για την κάλυψη της ζήτησης του φορτίου, παρατηρείται τόσο αύξηση της ροής του υδρογόνου προς την κυψέλη καυσίμου όσο και πτώση της πίεσης στην δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου.

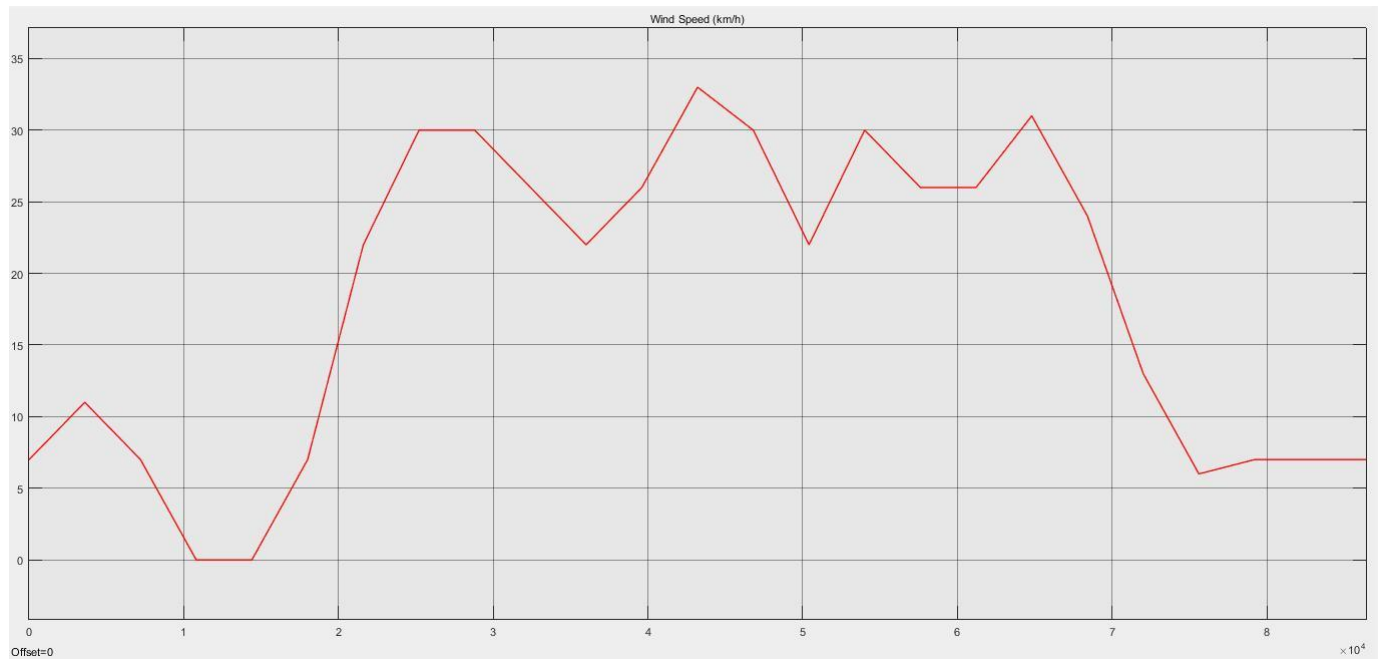


Εικόνα (6.13): Ισχύς του ελεγχόμενου φορτίου (Dump Load).

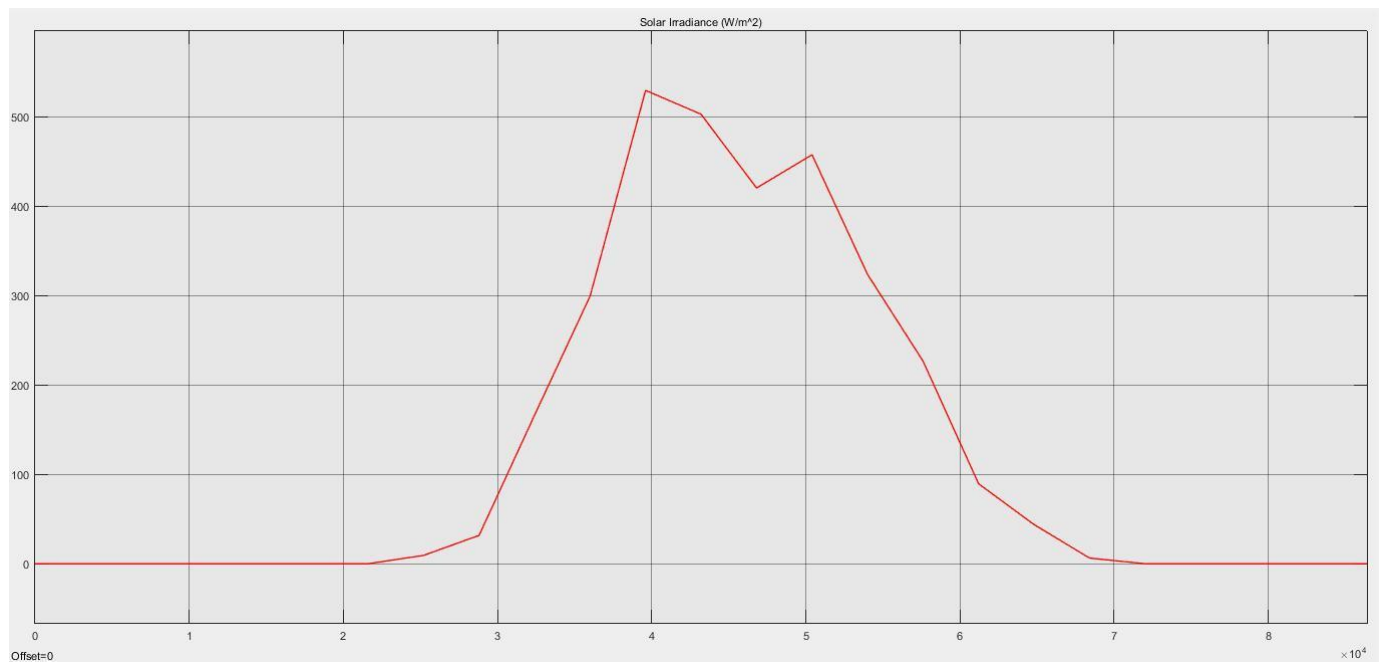
Τέλος, στην εικόνα 6.13, φαίνεται η ποσότητα της περισσευούμενης ισχύος που δεν μπορεί να ούτε να αποθηκευτεί ούτε να χρησιμοποιηθεί από το σύστημα κι έτσι οδηγείται στο Dump Load για αποφυγή υπερτάσεων. Το γεγονός ότι παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, είναι θετικό, καθώς δεν απορρίπτεται μεγάλο μέρος της παραγόμενης ισχύος.

6.3 Προσομοίωση ανοιξιάτικης μέρας – 1^η Απριλίου 2015

Στην παρακάτω εικόνα, 6.14, δίνεται η καμπύλη με τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου για το εικοσιτετράωρο της 1^{ης} Απριλίου.

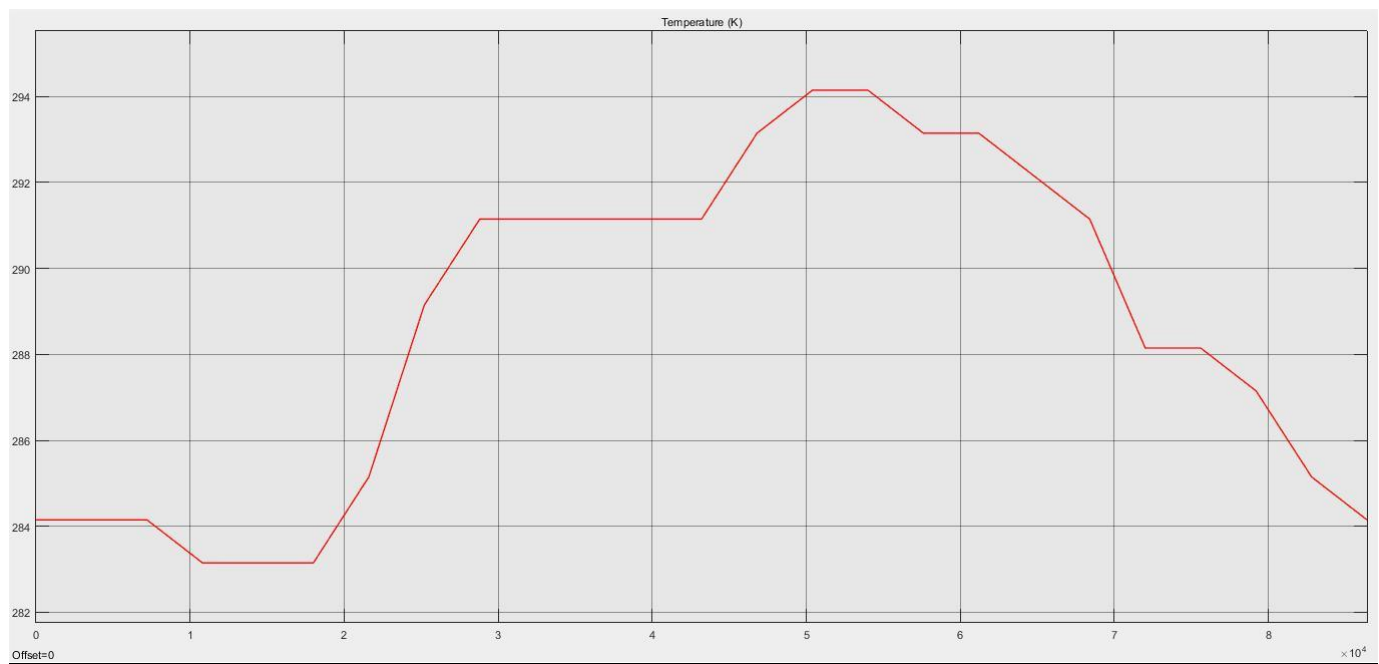


Εικόνα (6.14): Ταχύτητα ανέμου σε km/h.

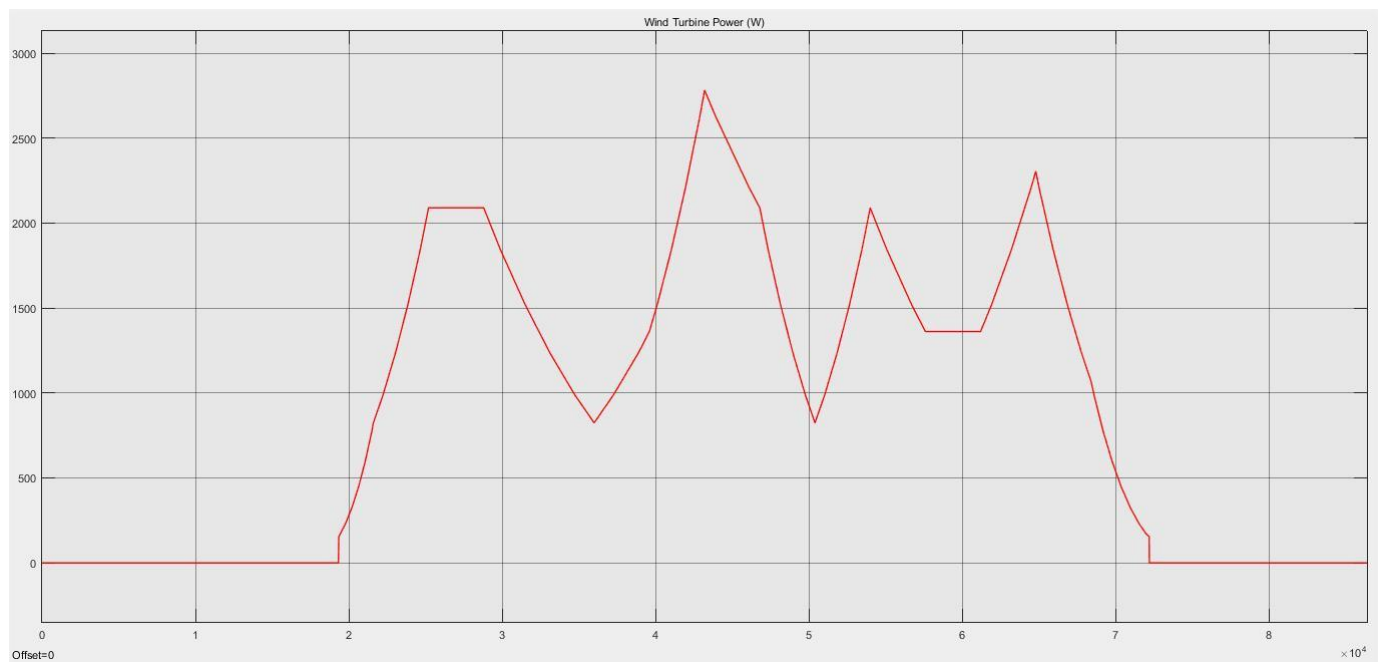


Εικόνα (6.15): Ηλιακή ακτινοβολία.

Η ηλιακή ακτινοβολία για το ίδιο εικοσιτετράωρο και παρακάτω, η θερμοκρασία καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας από τις 00:00 μέχρι τις 23:59.



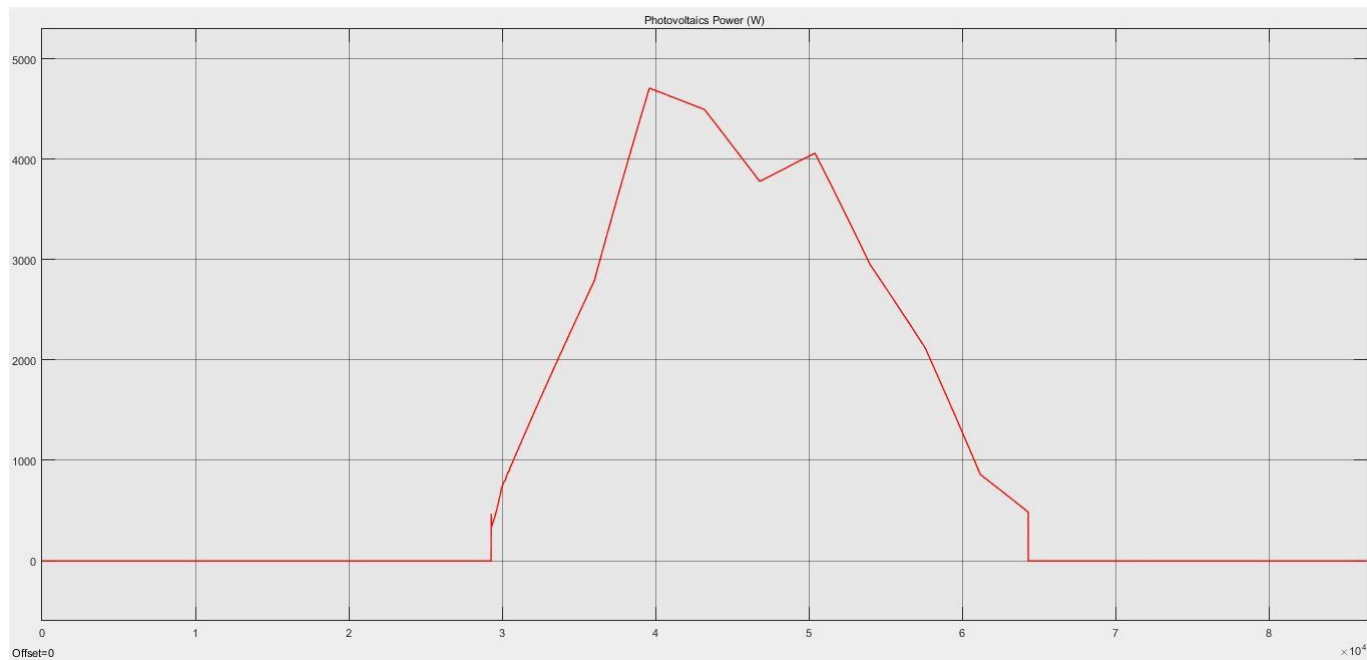
Εικόνα (6.16): Θερμοκρασία σε °K.



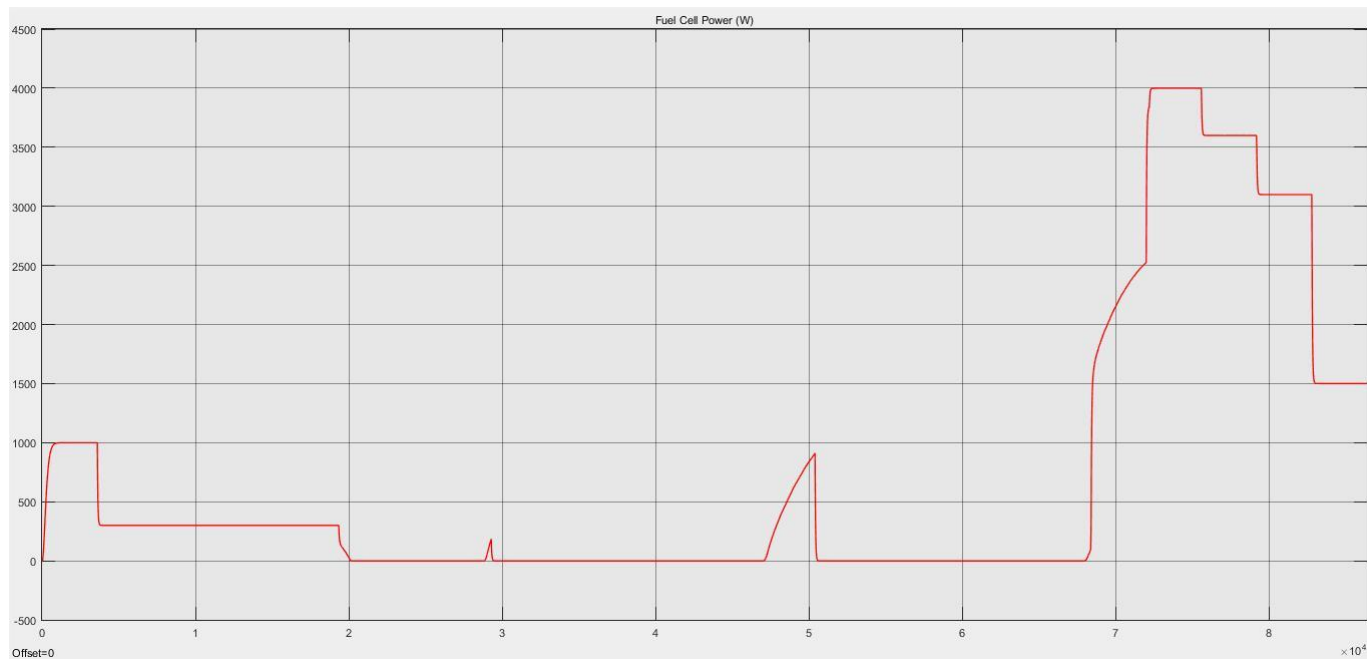
Εικόνα (6.17): Παραγόμενη ισχύς της Α/Γ.

Στην παραπάνω εικόνα αποτυπώνεται η ισχύς που παράγει η Α/Γ κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στην αρχή της ημέρας και στη λήξη της, όπου οι ταχύτητες του αέρα δεν ξεπερνούν τα

3,5m/s, η ισχύς μηδενίζεται. Κατ' αντιστοιχία, η ισχύς που παράγεται από τη Φ/Β γεννήτρια και δίνεται στο παρακάτω γράφημα, περιορίζεται στις ώρες που υπάρχει ηλιοφάνεια.

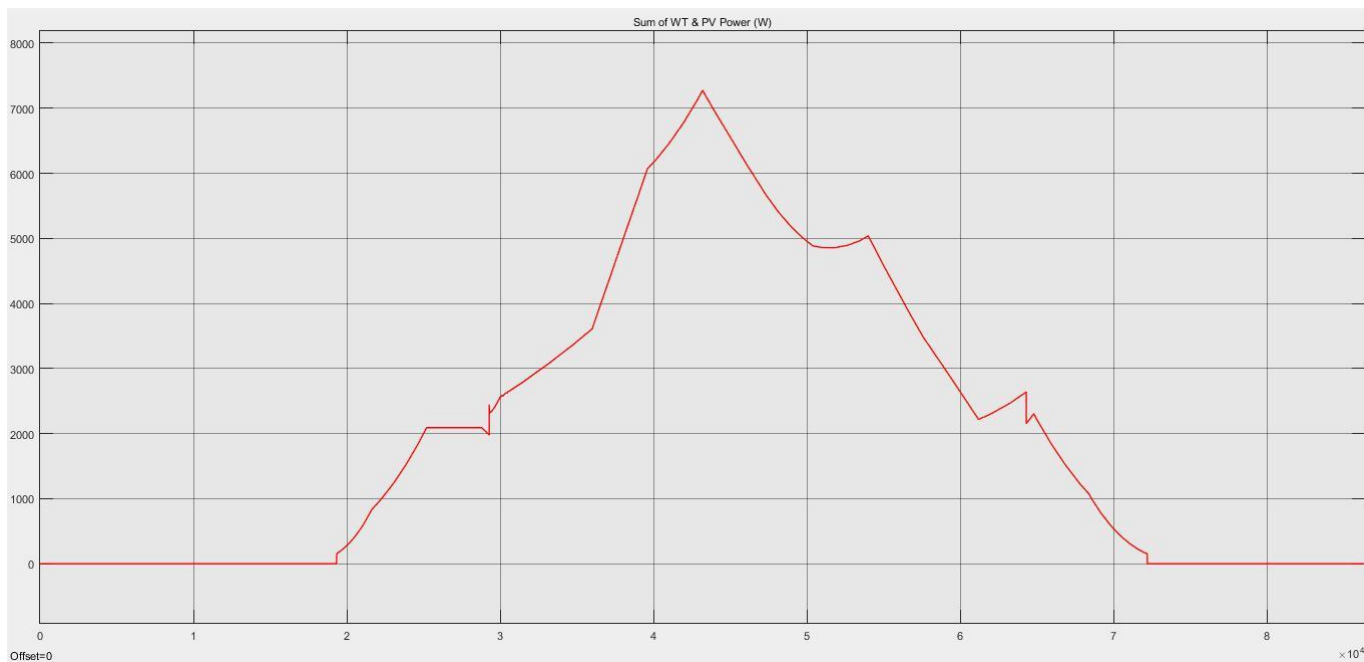


Εικόνα (6.18): Παραγόμενη ισχύς Φ/Β γεννήτριας.

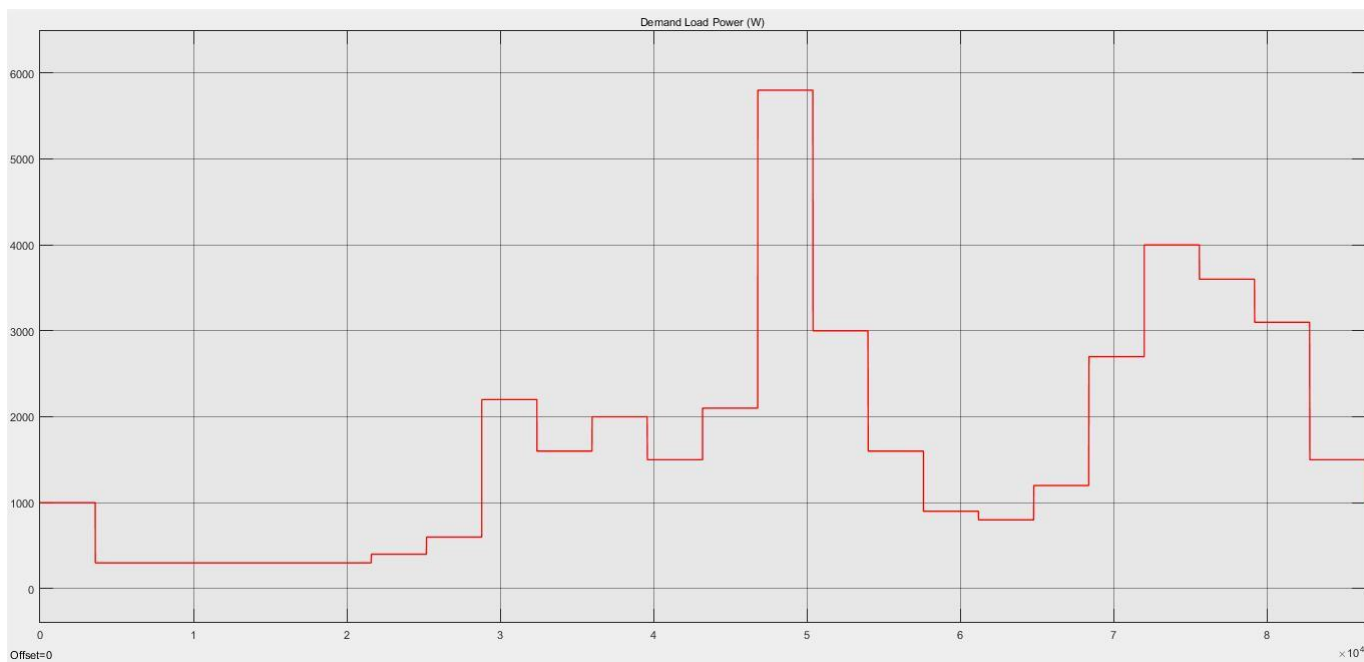


Εικόνα (6.19): Ισχύς κυψέλης καυσίμου.

Η ισχύς που παρέχεται στο σύστημα από την κυψέλη καυσίμου, δίνεται στην εικόνα 6.19 .

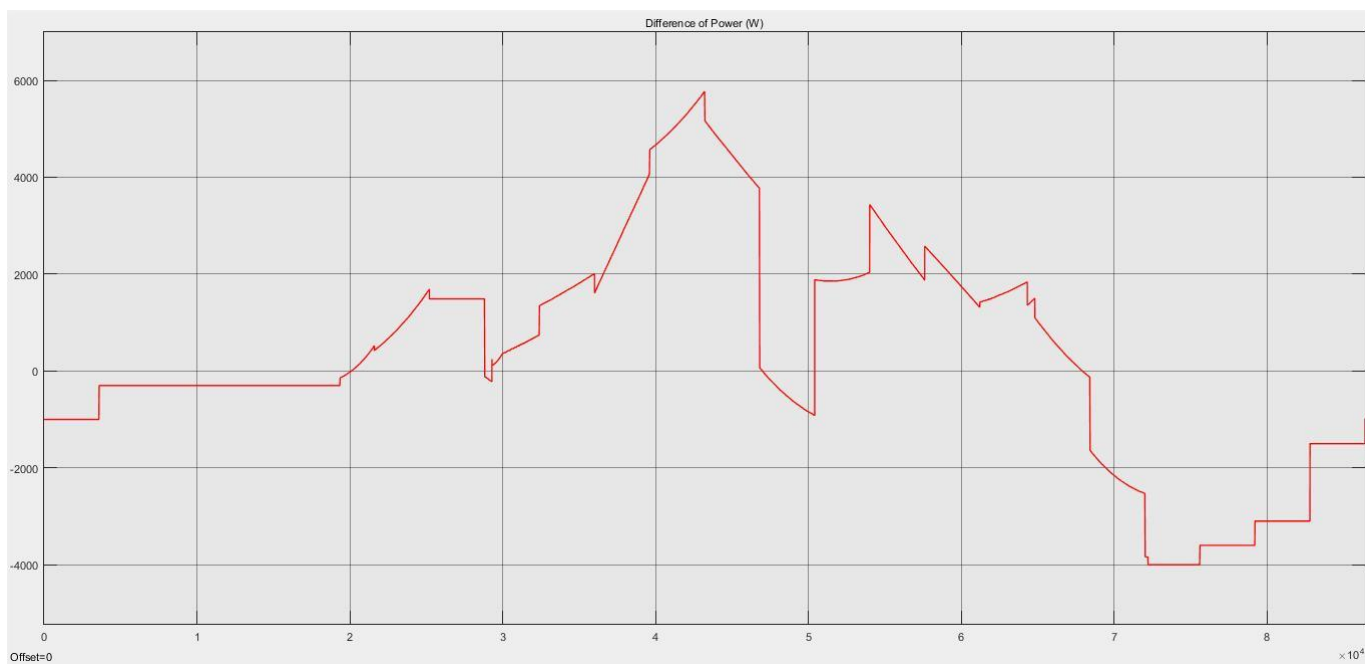


Εικόνα (6.20): Άθροισμα ισχύος Α/Γ και Φ/Β γεννήτριας.

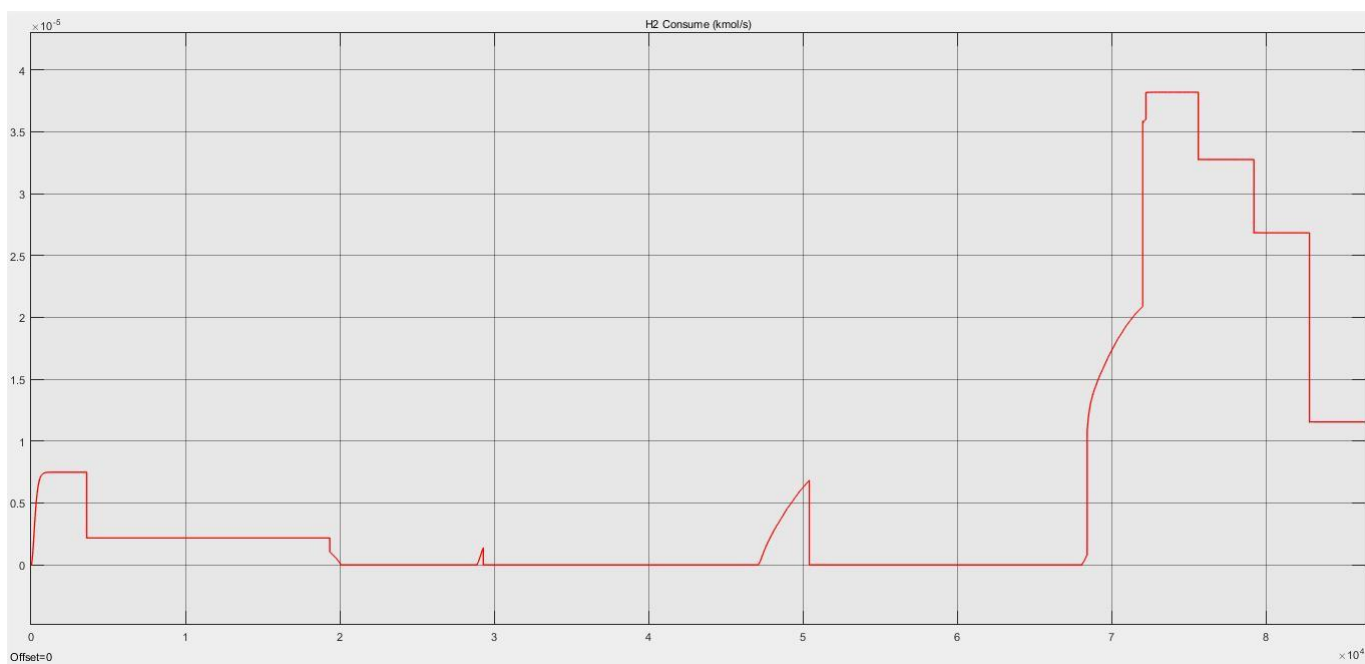


Εικόνα (6.21): Συνολική ζήτηση φορτίου.

Στα παραπάνω γραφήματα δίνεται η συνολική παραγωγή ισχύος καθώς επίσης η συνολική ζήτηση του φορτίου. Καθίσταται σαφές πως η ισχύς που παράγεται από τις ενεργειακές πηγές δεν επαρκεί καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας κι έτσι χρειάζεται η συνδρομή της κυψέλης καυσίμου, όπως φαίνεται και από την εικόνα 6.19.

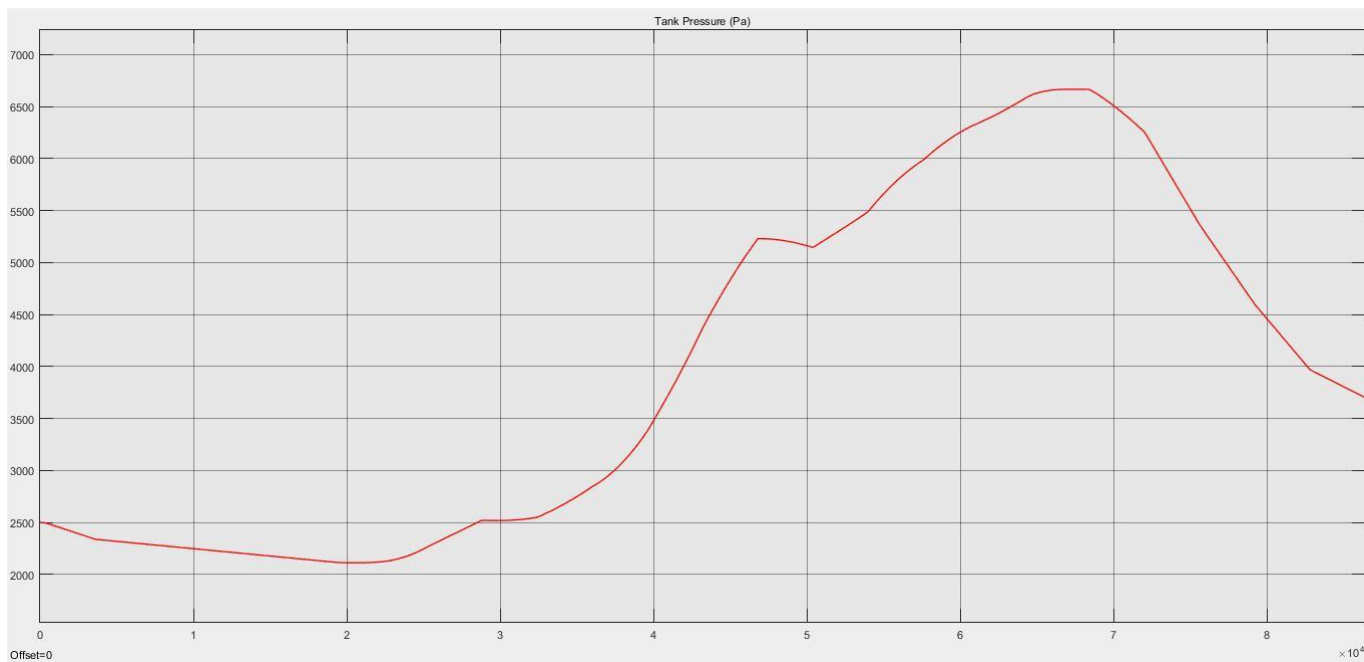


Εικόνα (6.22): Διαφορά ισχύος ζήτησης από παραγόμενη ισχύ.

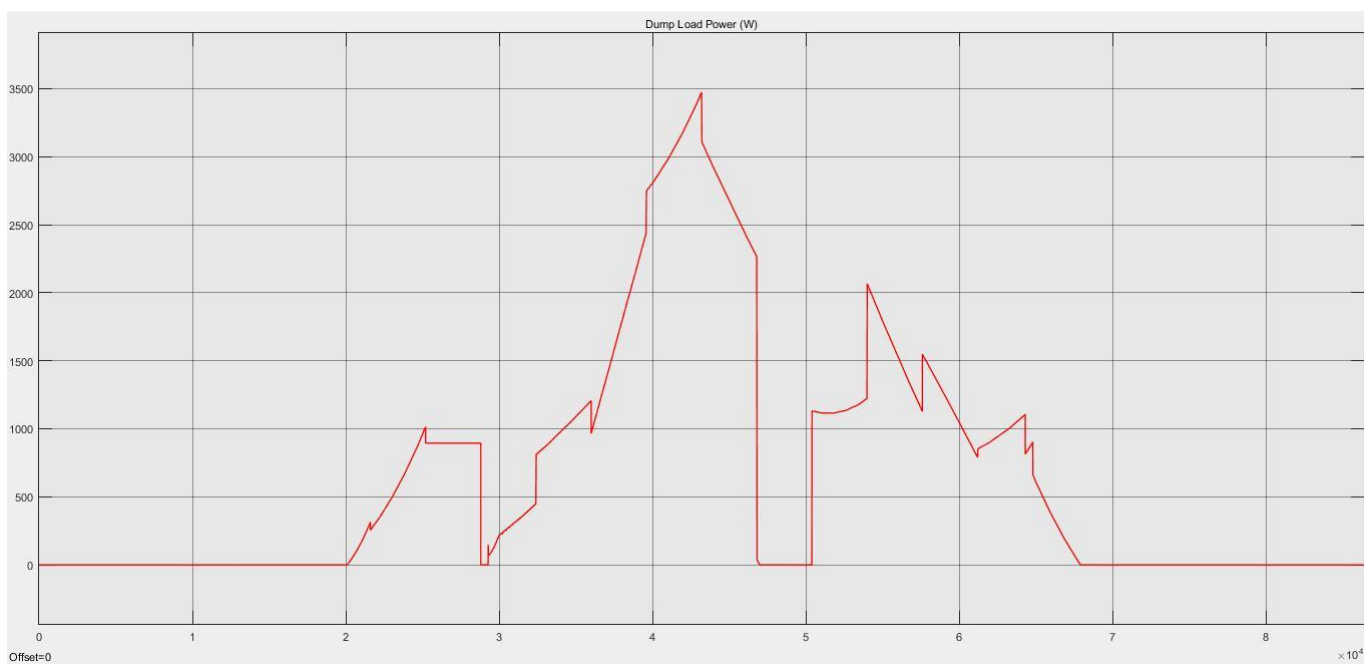


Εικόνα (6.23): Ροή υδρογόνου προς την κυψέλη καυσίμου.

Οι αρνητικές τιμές στην διαφορά της ισχύος ζήτησης από την παραγόμενη ισχύ, υποδηλώνουν την ανάγκη για συνδρομή της κυψέλης καυσίμου, όπως άλλωστε υποδηλώνει και το γράφημα της ροής του υδρογόνου προς την κυψέλη που πραγματοποιείται τις ίδιες χρονικές περιόδους. Αντίστοιχα κινείται και η πίεση της δεξαμενής αποθήκευσης του υδρογόνου, όπου εκεί που χρειάζεται η πλήρης συνδρομή της κυψέλης καυσίμου, πέφτει σημαντικά.



Εικόνα (6.24): Πίεση δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου.

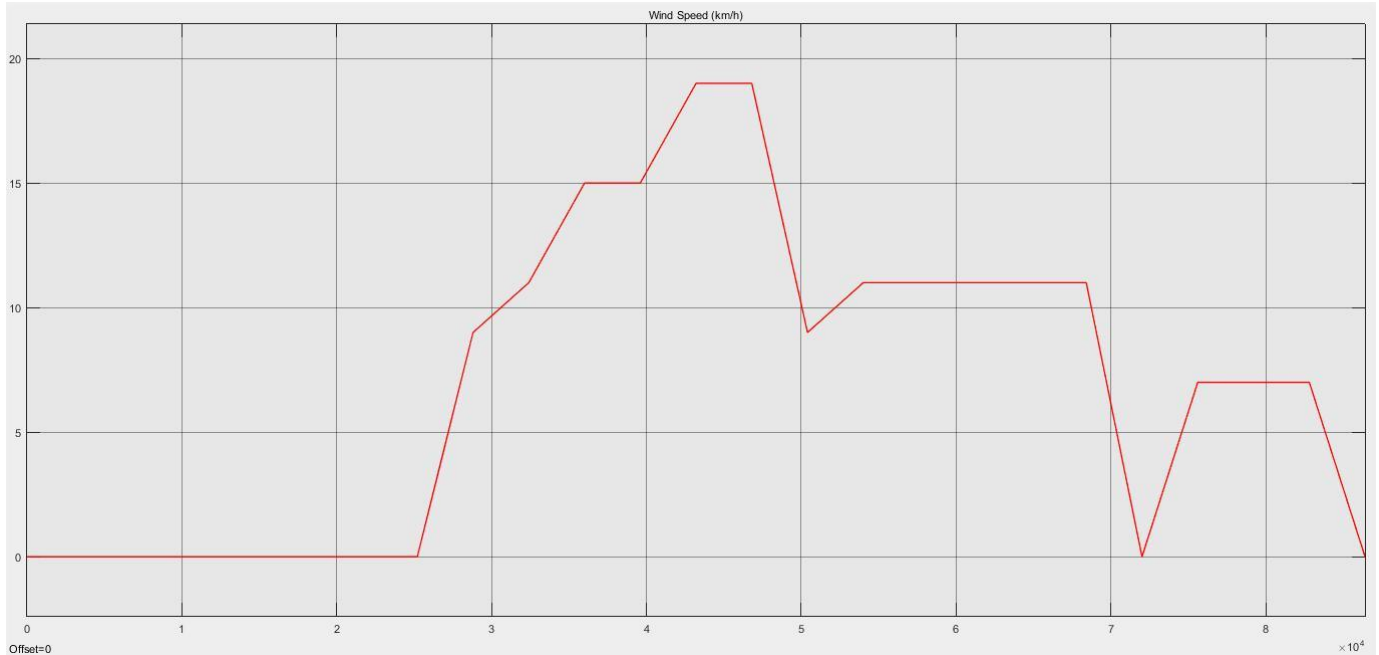


Εικόνα (6.25): Ισχύς ελεγχόμενου φορτίου.

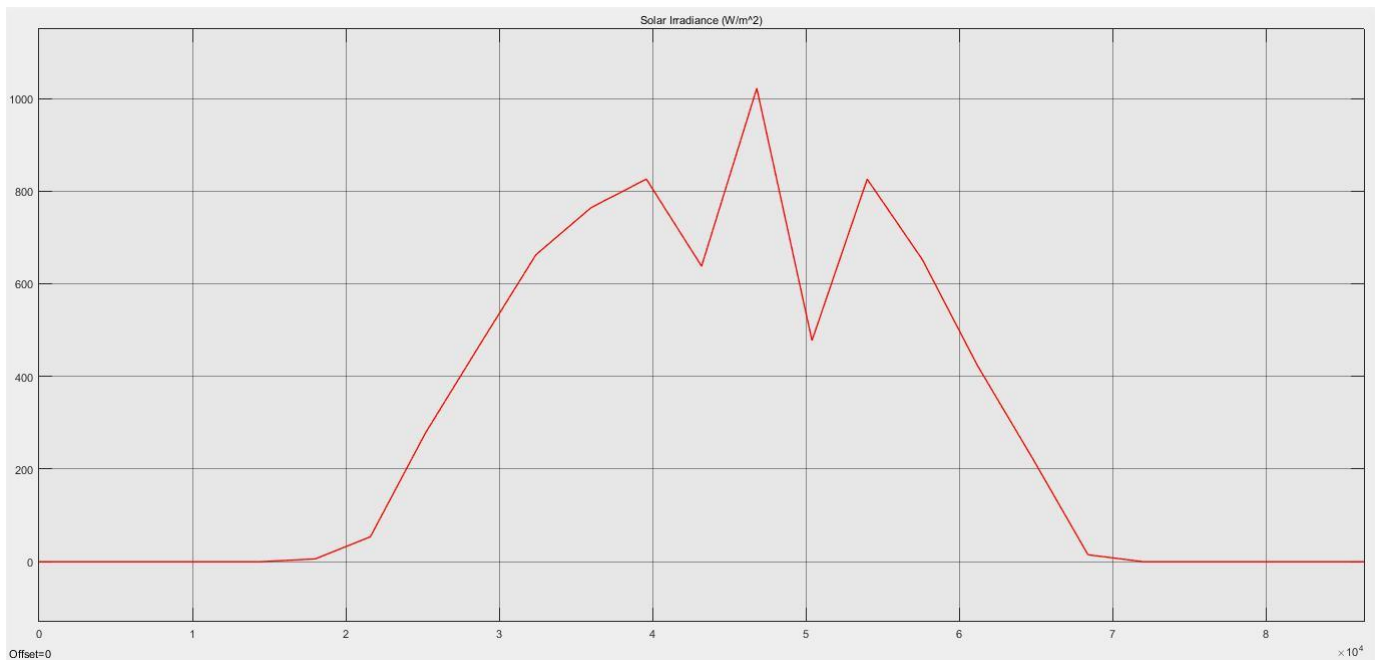
Το ελεγχόμενο φορτίο, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, ενεργοποιείται μόνο στις περιπτώσεις της μεγάλης παραγωγής ισχύος, φροντίζοντας έτσι για την ευστάθεια του συστήματος.

6.4 Προσομοίωση καλοκαιρινής μέρας – 1^η Ιουλίου 2015

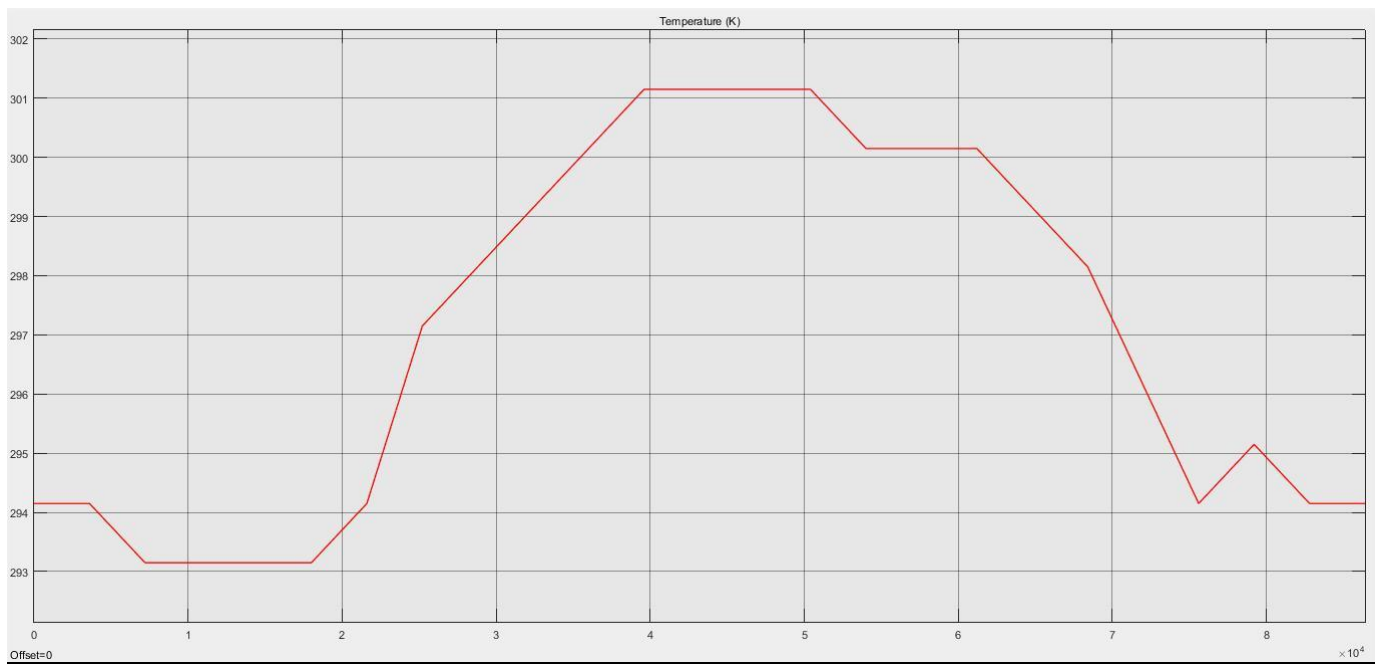
Στις παρακάτω εικόνες, 6.26, 6.27 και 6.28, δίνονται η καμπύλη με τις τιμές της ταχύτητας του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία καθώς επίσης η θερμοκρασία σε $^{\circ}K$ για το εικοσιτετράωρο της 1^{ης} Ιουλίου.



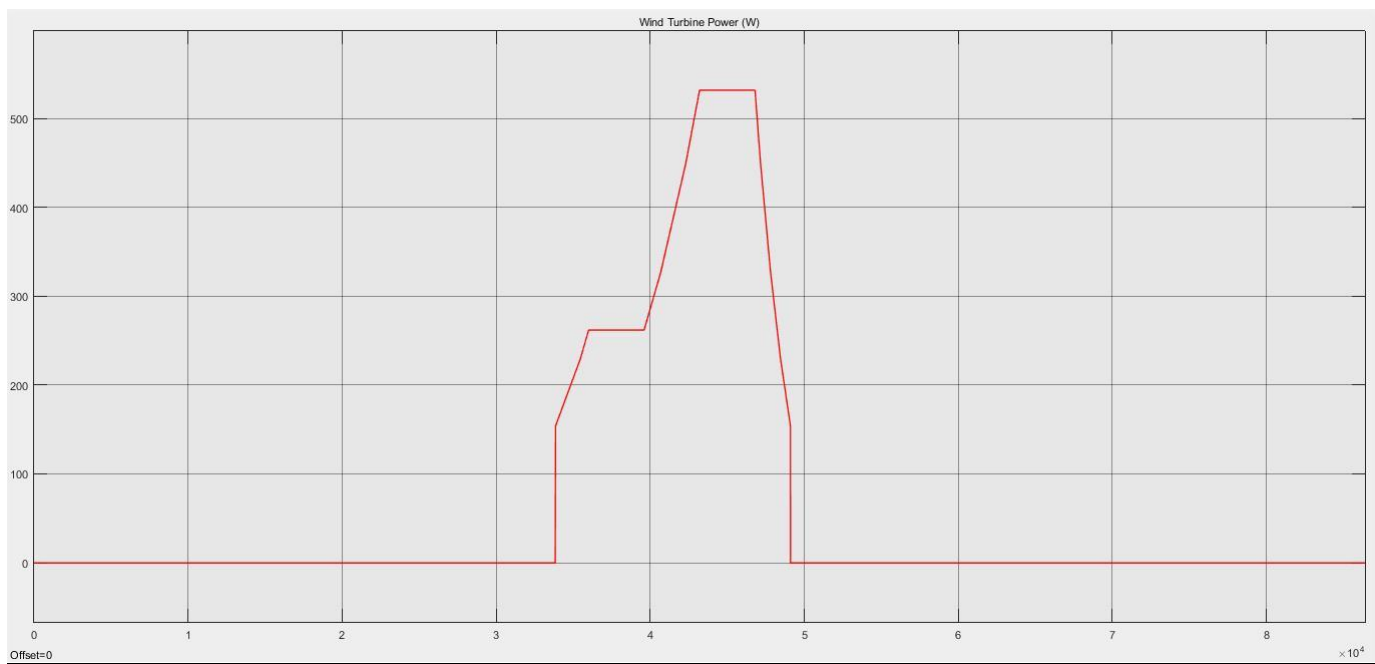
Εικόνα(6.26): Ταχύτητα ανέμου.



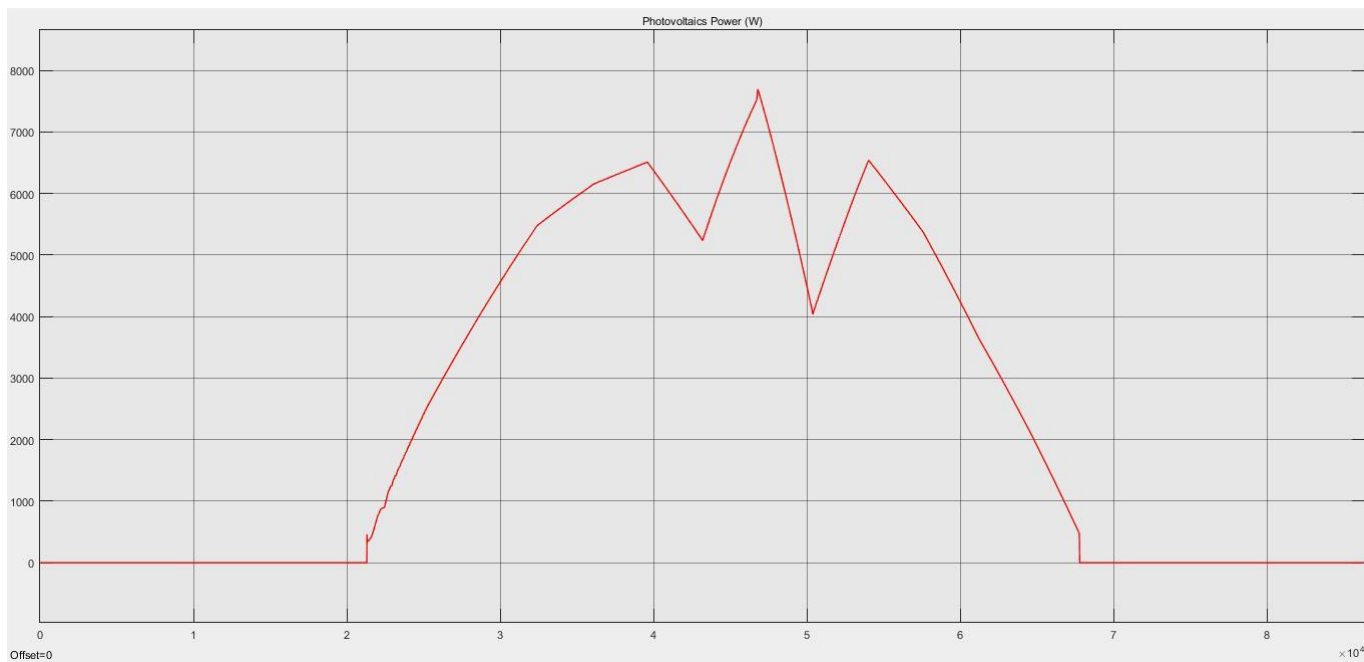
Εικόνα (6.27): Ηλιακή ακτινοβολία.



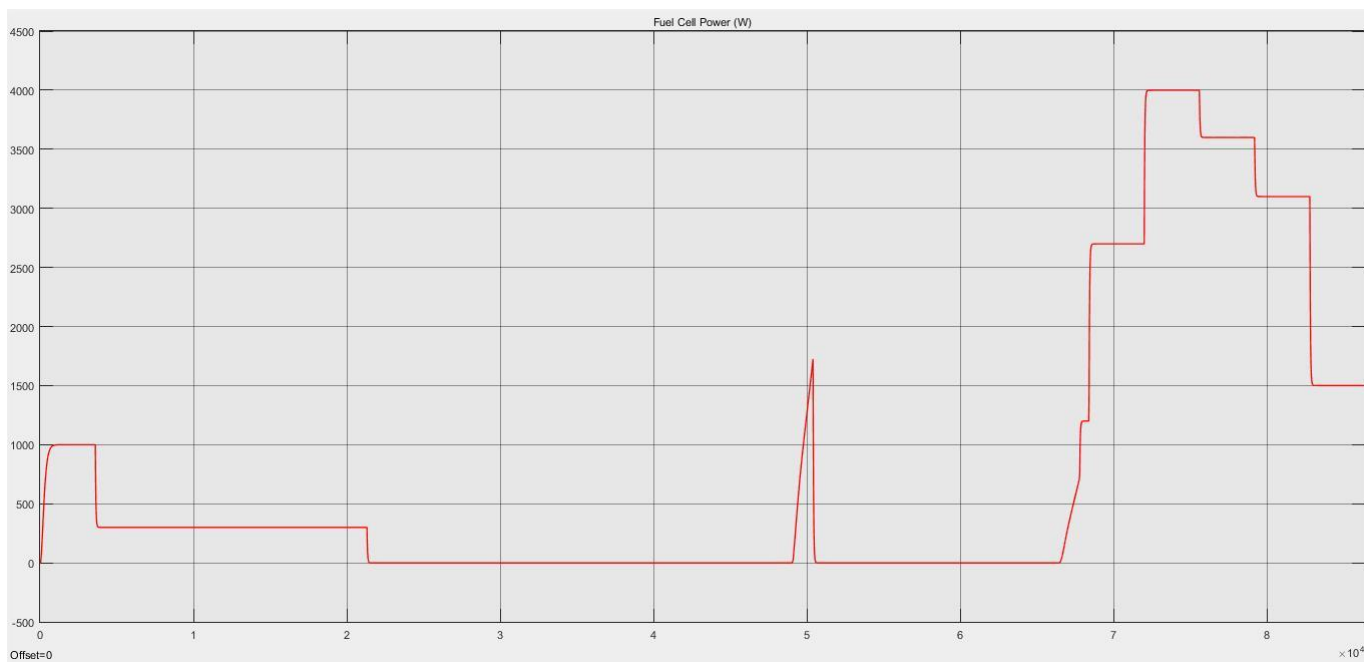
Εικόνα (6.28): Θερμοκρασία σε °K.



Εικόνα (6.29): Παραγόμενη ισχύς Α/Γ.

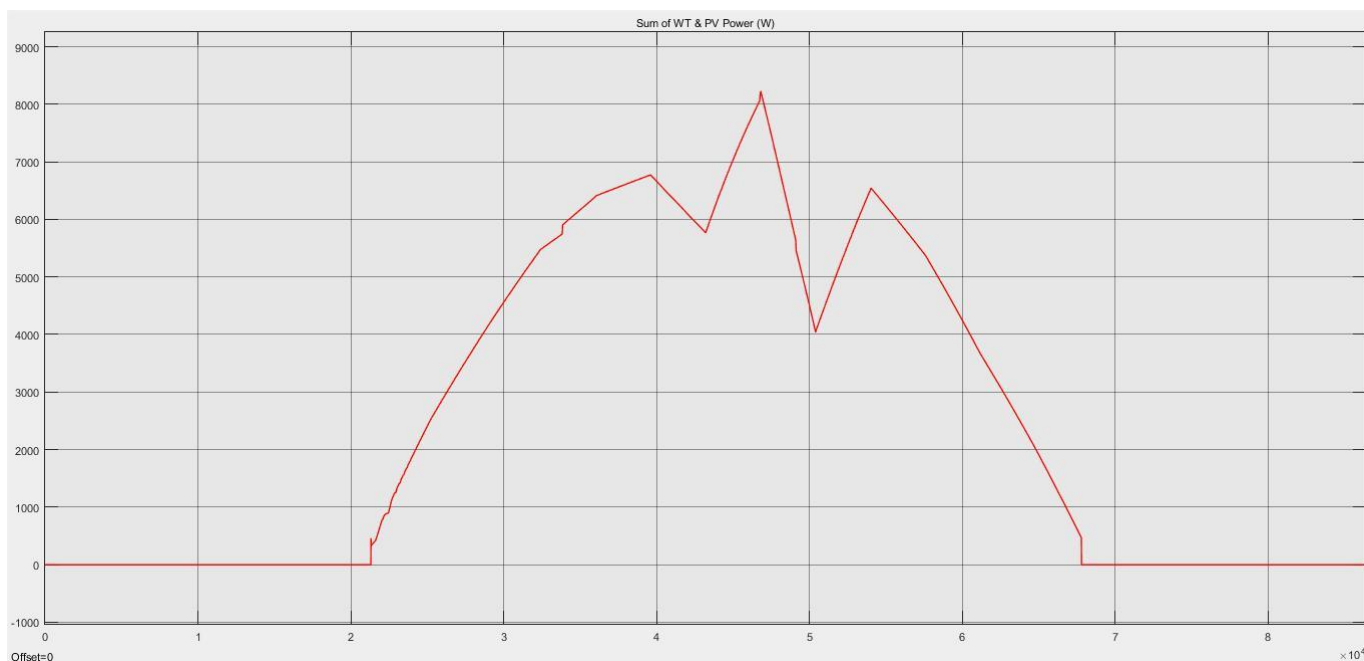


Εικόνα (6.30): Παραγόμενη ισχύς Φ/Β γεννήτριας.

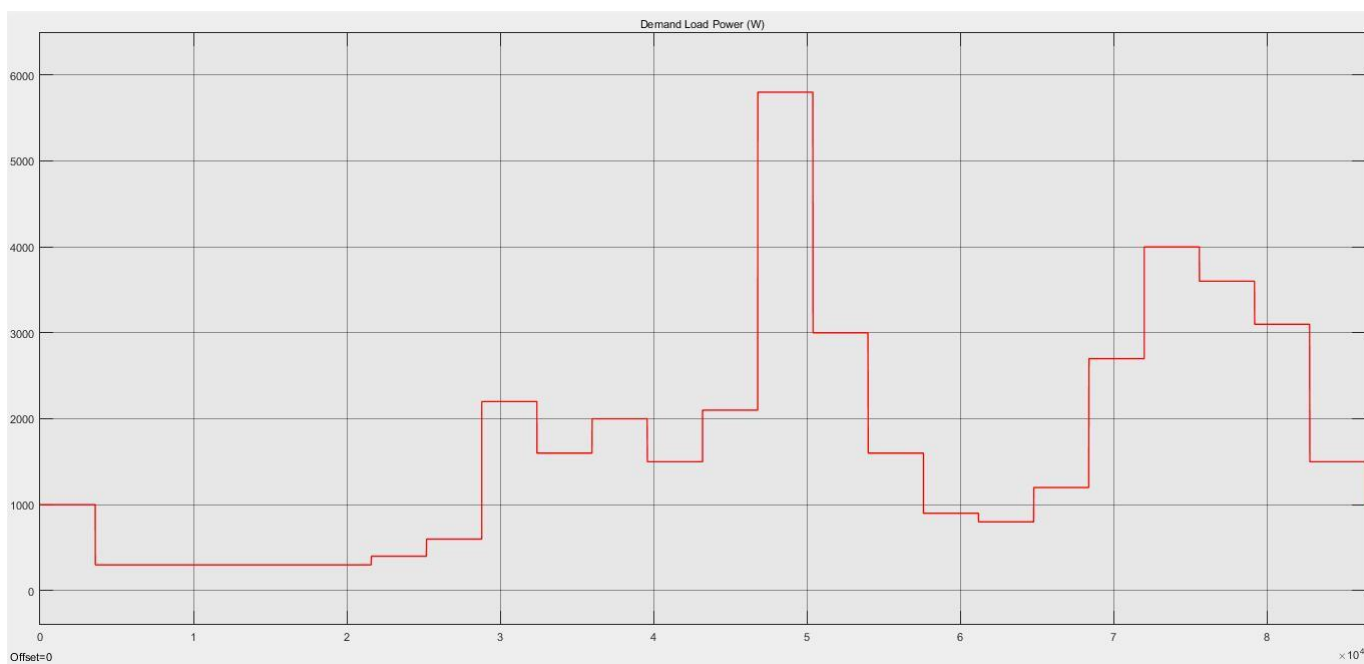


Εικόνα (6.31): Ισχύς κυψέλης καυσίμου.

Η παραγόμενη ισχύς της Α/Γ, της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και της κυψέλης καυσίμου για το ίδιο εικοσιτετράωρο, παρατίθενται στα παραπάνω γραφήματα. Είναι εμφανής η υπεροχή ισχύος των φωτοβολταϊκών έναντι της Α/Γ λόγω της ηλιοφάνειας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέσα στη μέρα, κάτι το οποίο γίνεται αντιληπτό και από την αυξημένη παροχή ισχύος από την κυψέλη καυσίμου ειδικά τις βραδινές ώρες όπου η ταχύτητα του ανέμου μένει σε χαμηλά επίπεδα.

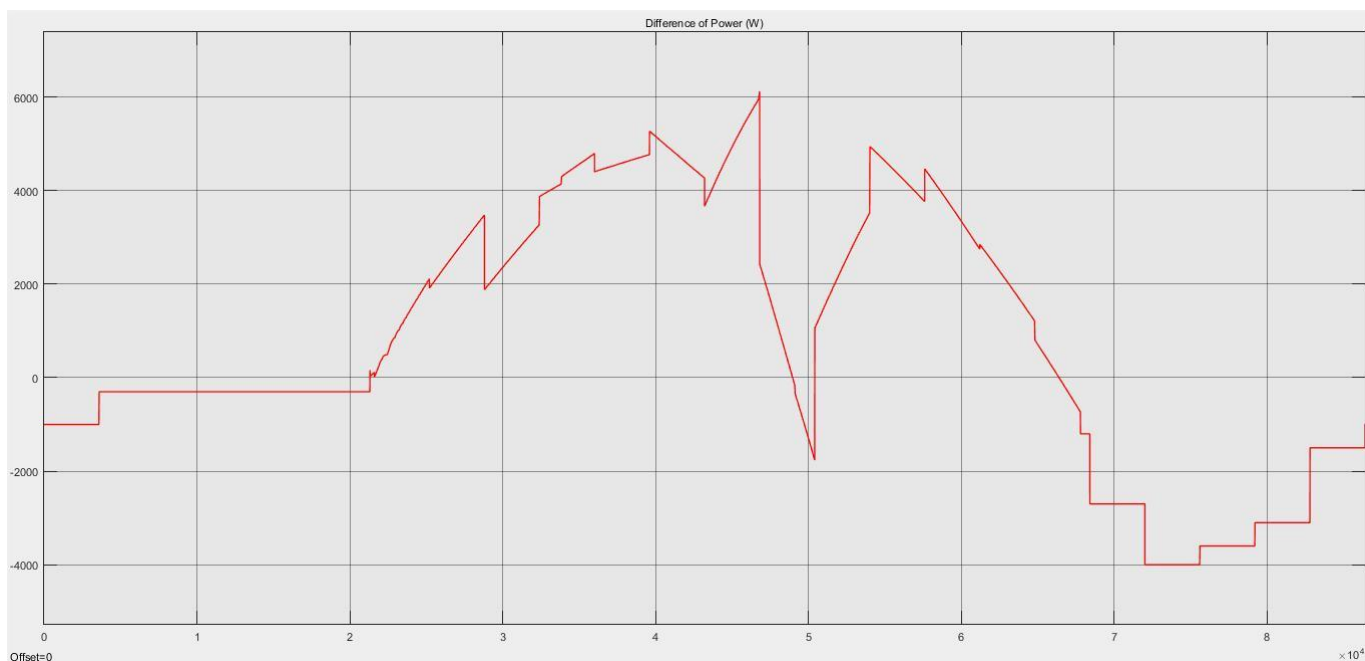


Εικόνα (6.32): Άθροισμα ισχύος Α/Γ και Φ/Β γεννήτριας.

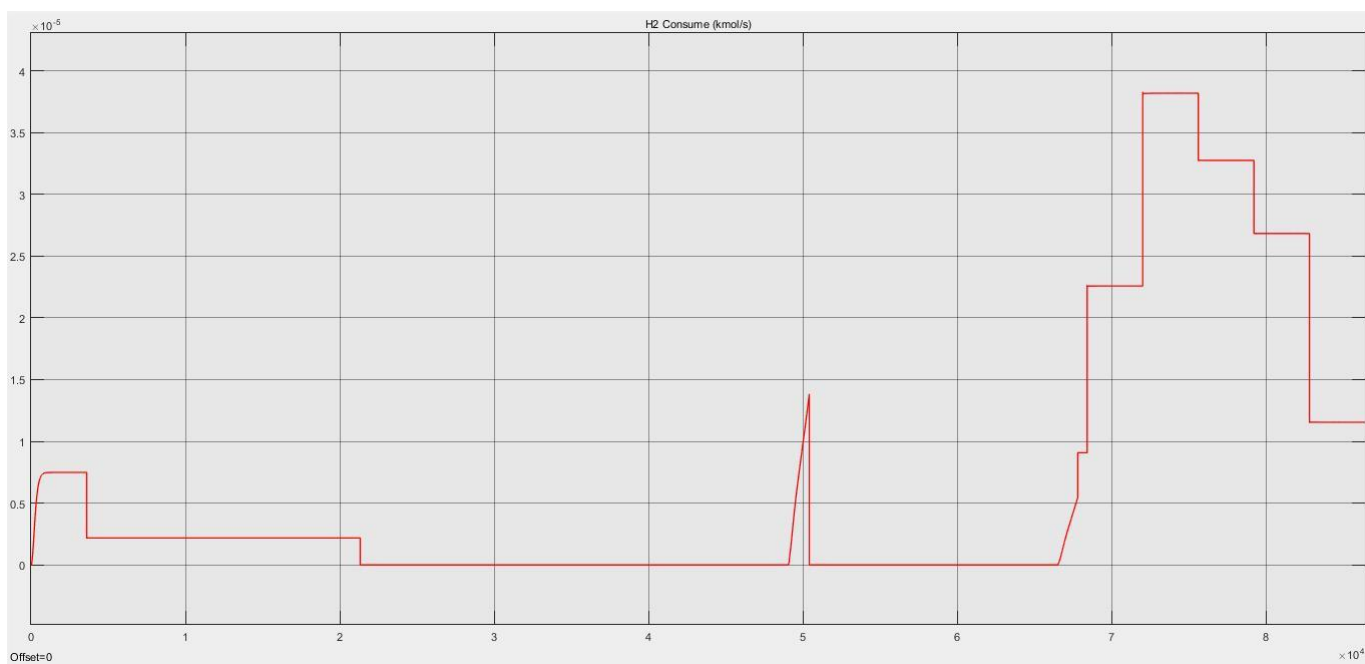


Εικόνα (6.33): Συνολική ζήτηση φορτίου.

Στις παραπάνω δύο εικόνες, παρατηρείται πως η συνολική παραγόμενη ισχύς κατά τη διάρκεια της μέρας επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες του χρήστη, ενώ τις βραδινές ώρες που δεν παρατηρείται ύπαρξη ούτε ανέμου ούτε ηλιοφάνειας, η διαφορά της ισχύος ζήτησης από την παραγόμενη παίρνει αρνητικές τιμές, όπως φαίνεται και στο επόμενο γράφημα.

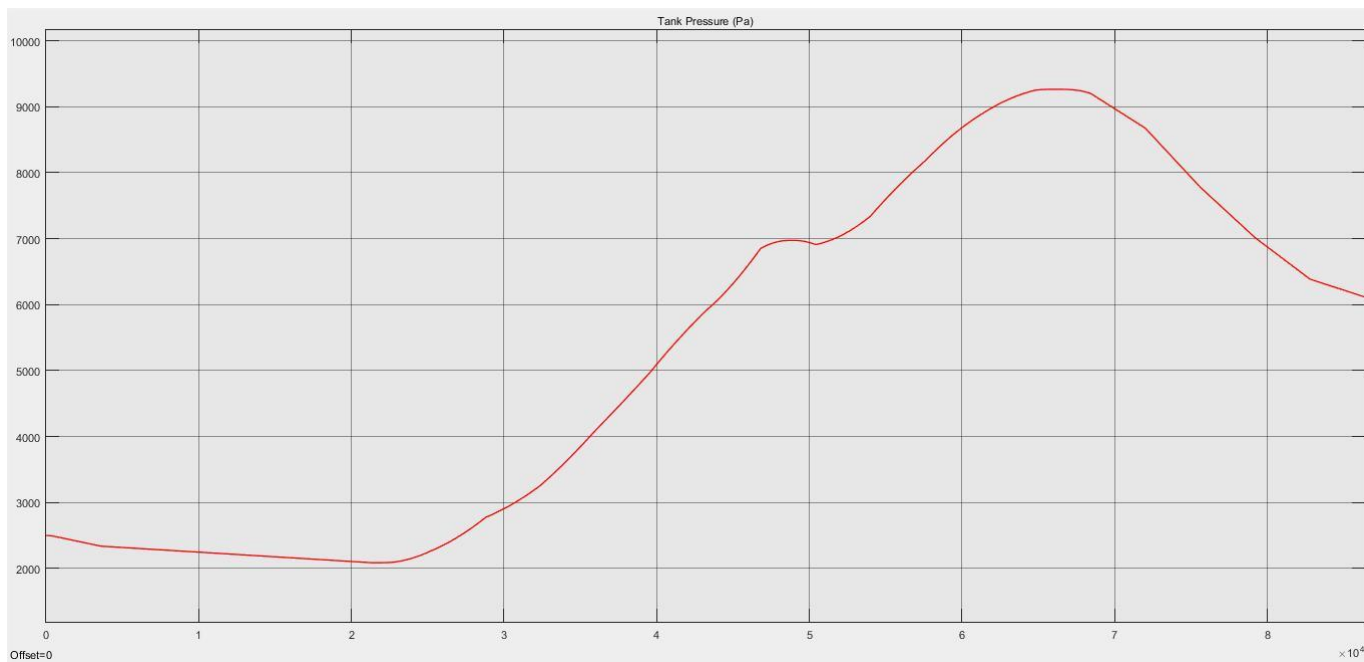


Εικόνα (6.34): Διαφορά ισχύος ζήτησης από παραγόμενη ισχύ.

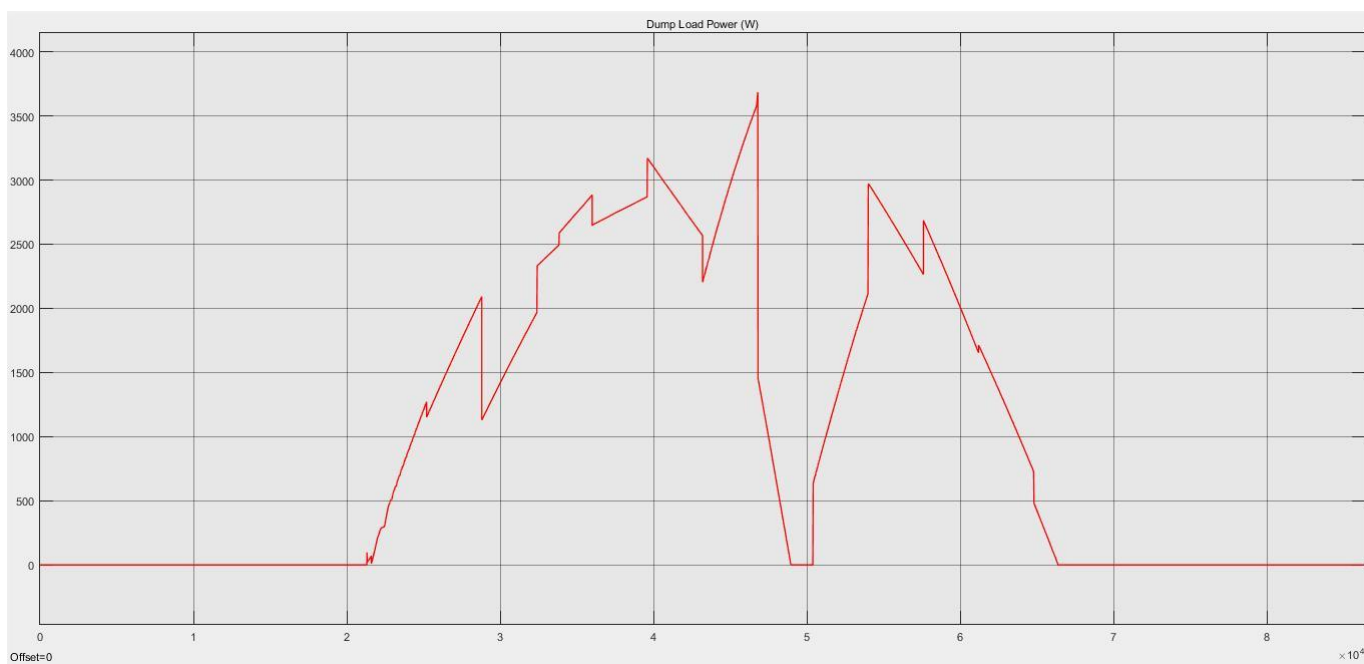


Εικόνα (6.35): Ροή υδρογόνου προς κυψέλη καυσίμου.

Αποτέλεσμα αυτού του ελλείμματος αποτελεί η αυξημένη ροή του υδρογόνου προς την κυψέλη καυσίμου γι' αυτά τα χρονικά διαστήματα με ταυτόχρονη πτώση της πίεσης της δεξαμενής αποθήκευσης του υδρογόνου, όπως φαίνεται στο επόμενο γράφημα. Οι υψηλές τιμές που η τελευταία λαμβάνει, οφείλεται στην αυξημένη παραγωγή ισχύος κατά τη διάρκεια της ημέρας που περισσεύει και οδηγείται προς αποθήκευση και μελλοντική χρήση.



Εικόνα (6.36): Πίεση δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου.

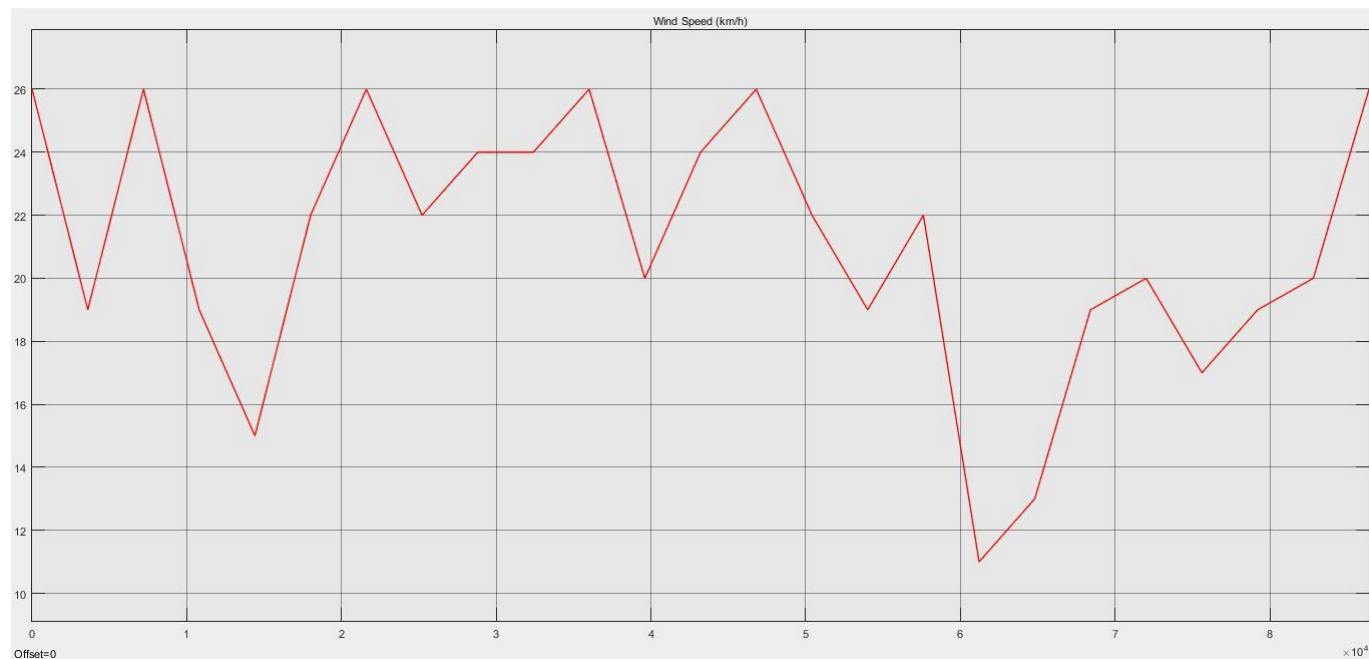


Εικόνα (6.37): Ισχύς ελεγχόμενου φορτίου.

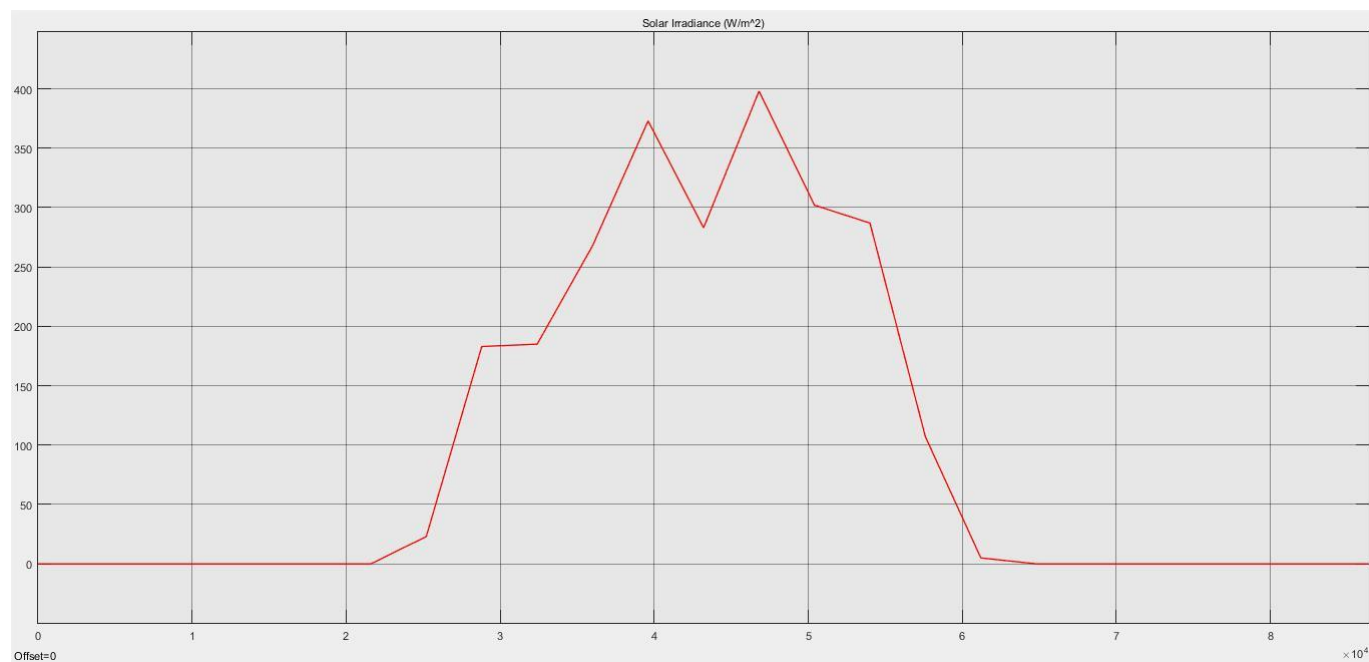
Στην εικόνα 6.37 δίνεται η καμπύλη με τις τιμές ισχύος του ελεγχόμενου φορτίου που απορρίπτεται προκειμένου να διαφυλαχτεί η ευστάθεια του συστήματος.

6.5 Προσομοίωση φθινοπωρινής μέρας – 1^η Νοεμβρίου 2015

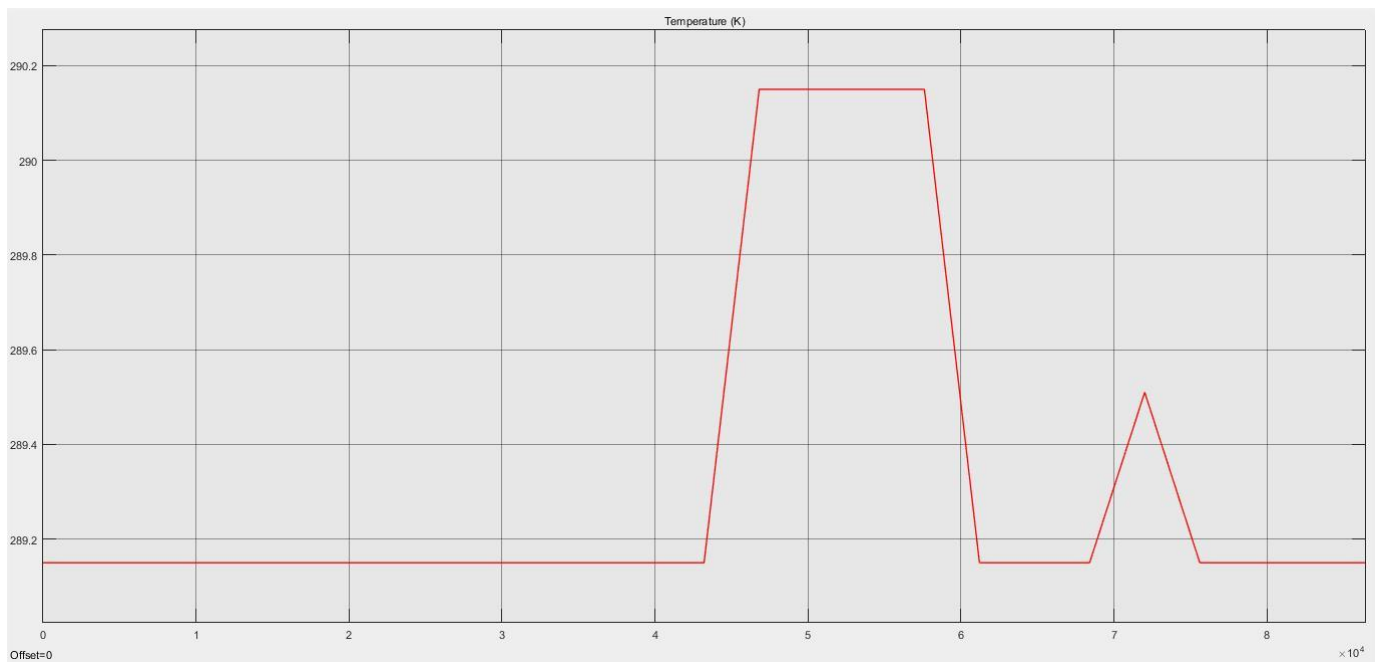
Στα παρακάτω γραφήματα δίνονται οι ωριαίες τιμές για την ταχύτητα του αέρα, την ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία σε $^{\circ}K$ για το εικοσιτετράωρο της 1^{ης} Νοεμβρίου 2015.



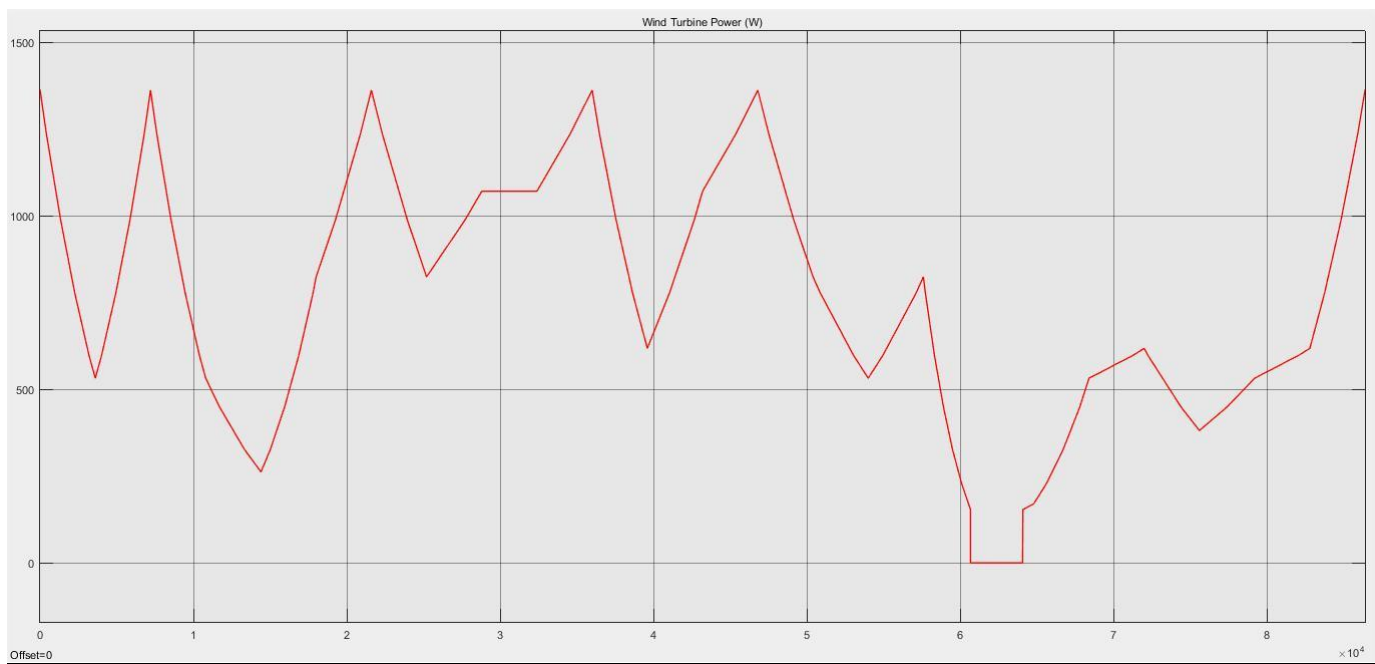
Εικόνα (6.38): Ταχύτητα αέρα



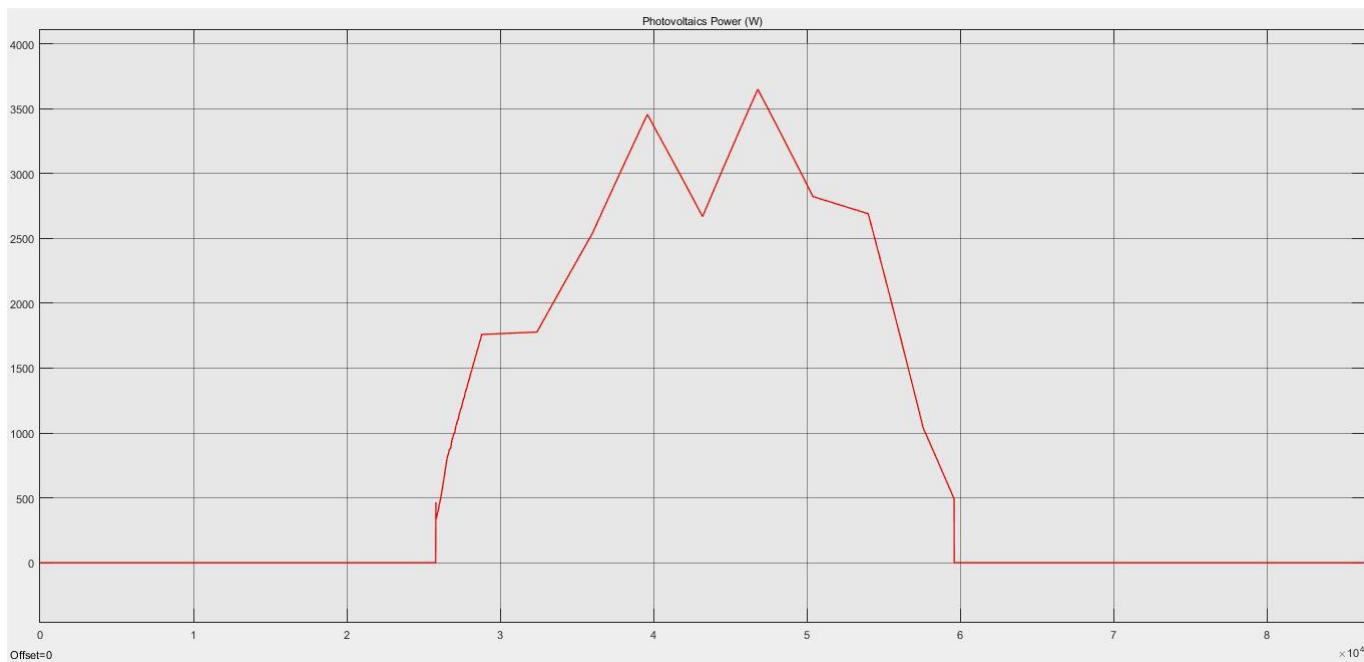
Εικόνα (6.39): Ηλιακή ακτινοβολία.



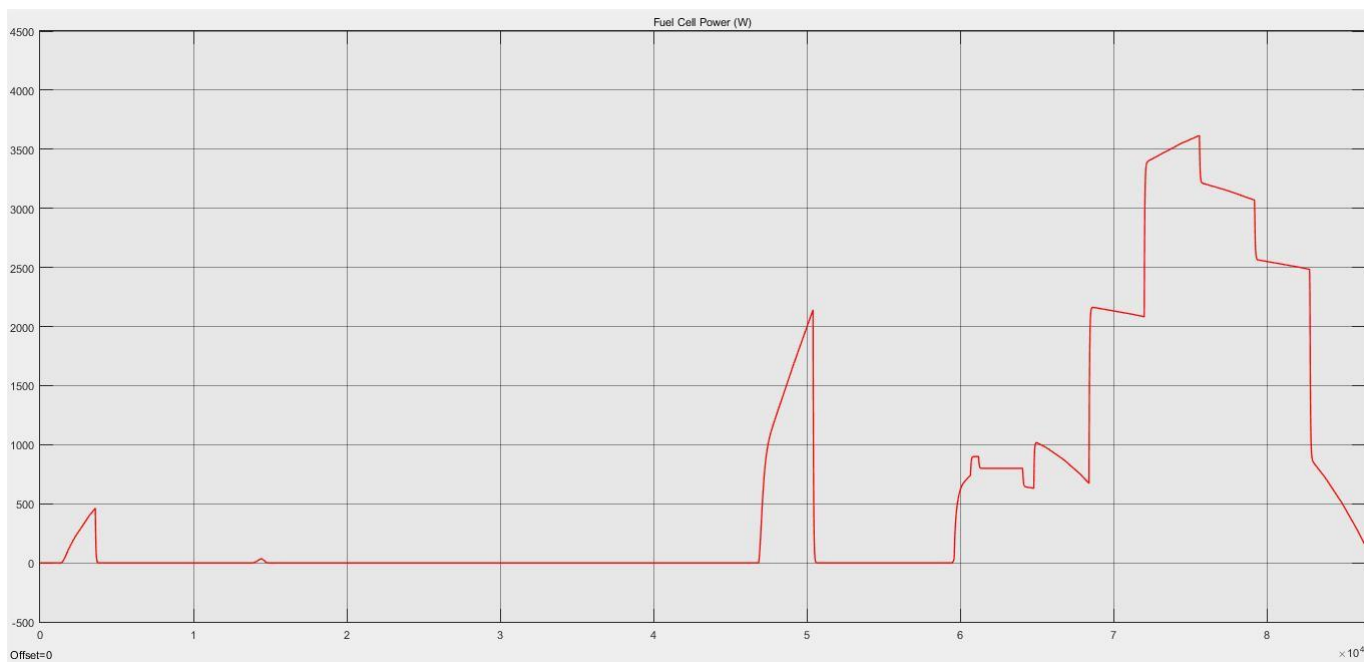
Εικόνα (6.40): Θερμοκρασία σε °K.



Εικόνα (6.41): Παραγόμενη ισχύς Α/Γ.

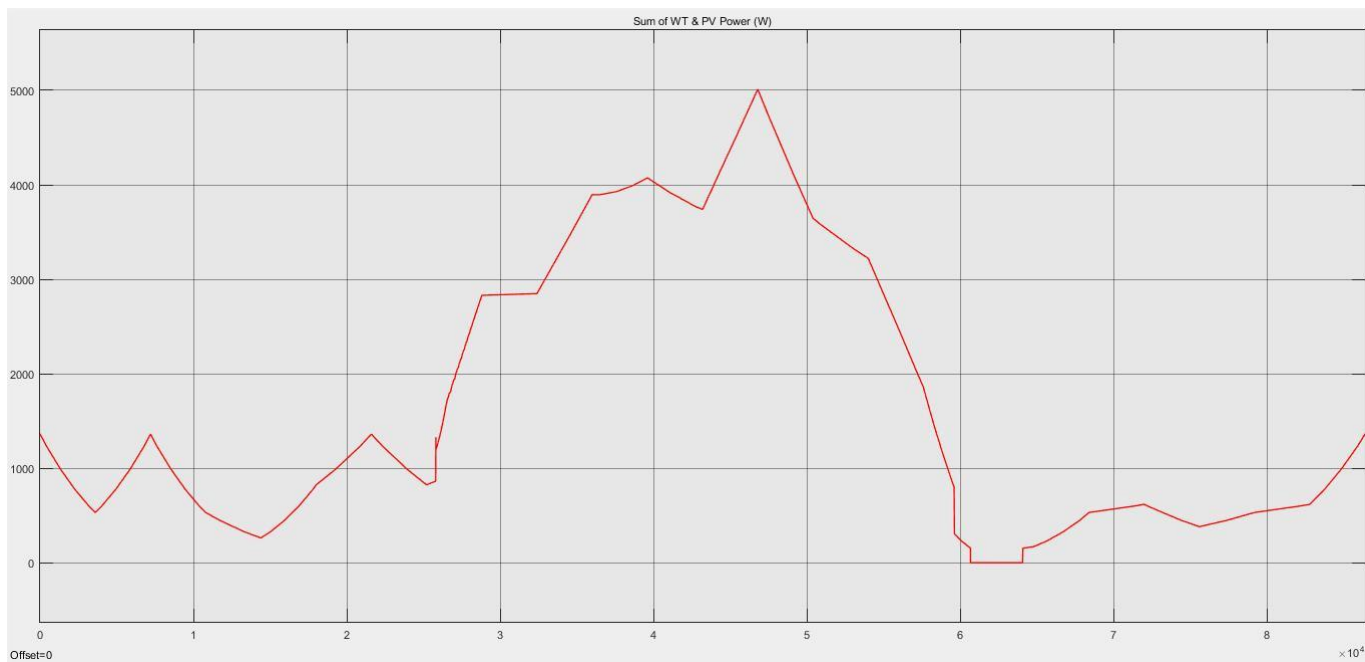


Εικόνα (6.42): Παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκής γεννήτριας.

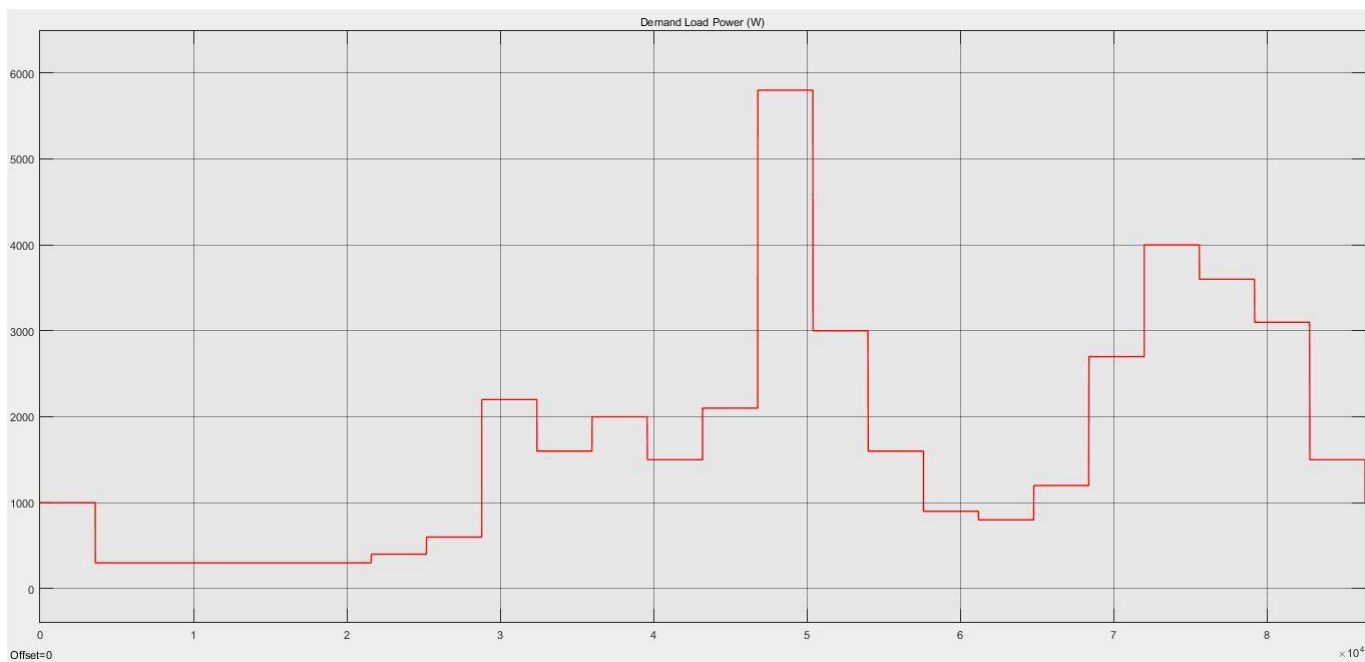


Εικόνα (6.43): Ισχύς κυψέλης καυσίμου.

Η ισχύς που παράχθηκε από την Α/Γ και την φωτοβολταϊκή γεννήτρια καθώς επίσης η ισχύς που παρείχε η κυψέλη καυσίμου στο σύστημα, δίνονται στις παραπάνω εικόνες 6.41-6.43.

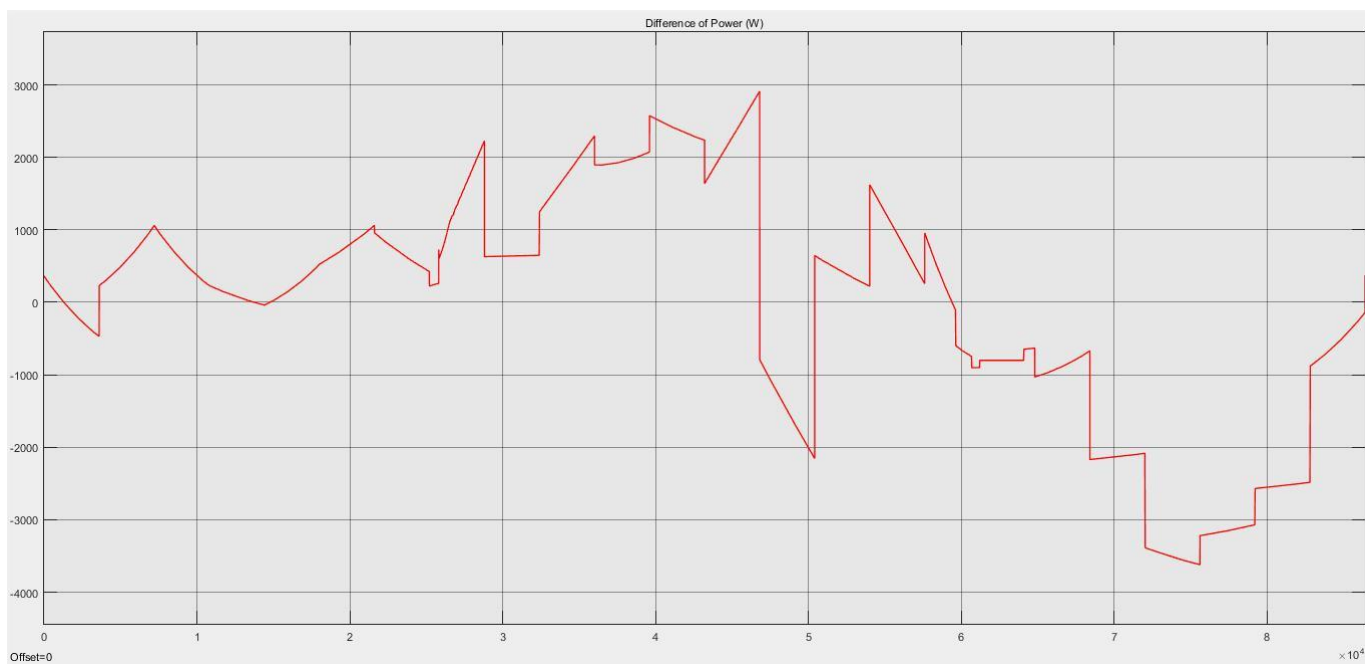


Εικόνα (6.44): Άθροισμα ισχύος Α/Γ και Φ/Β γεννήτριας.

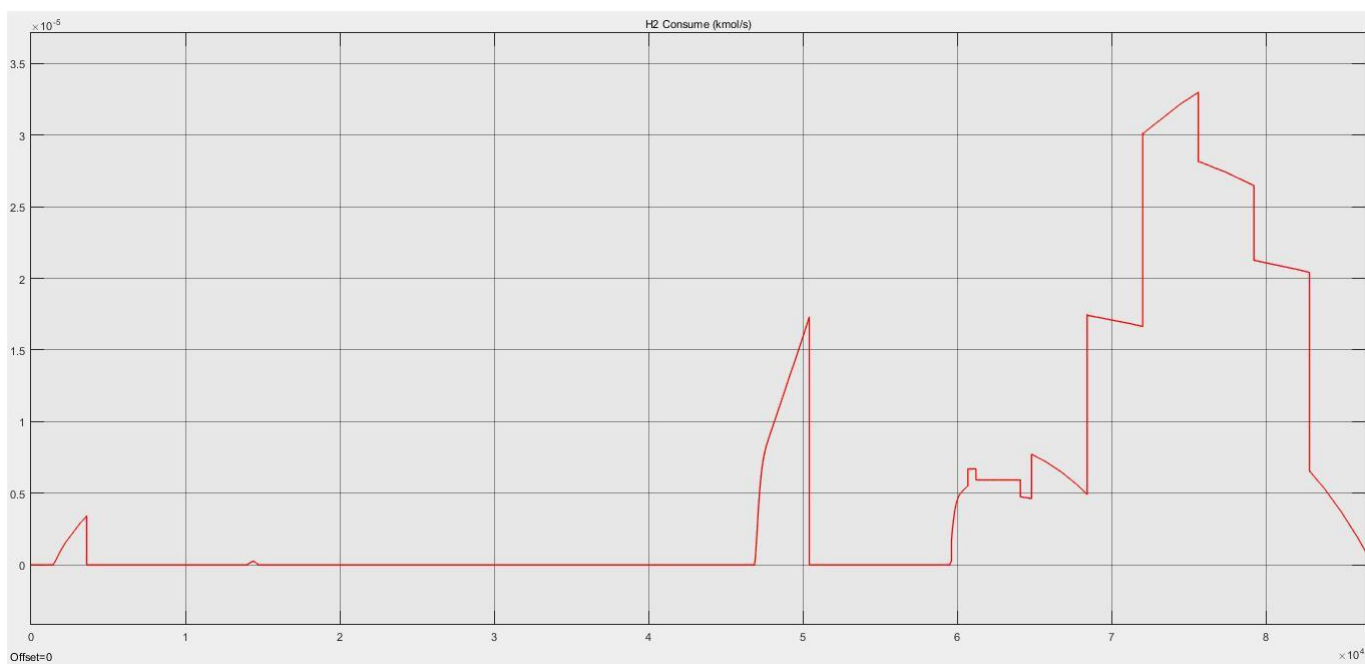


Εικόνα (6.45): Συνολική ζήτηση φορτίου.

Η ύπαρξη ανέμου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια της ημέρας έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ισχύος που δεν περιορίζεται στο να υπερτερεί τις πρωινές ώρες. Η συνολική ζήτηση του φορτίου όμως, υπερισχύει σε κάποιες περιπτώσεις της ισχύος που έχει παραχθεί, όπως παρατηρείται στις παραπάνω εικόνες 6.44 και 6.45 .

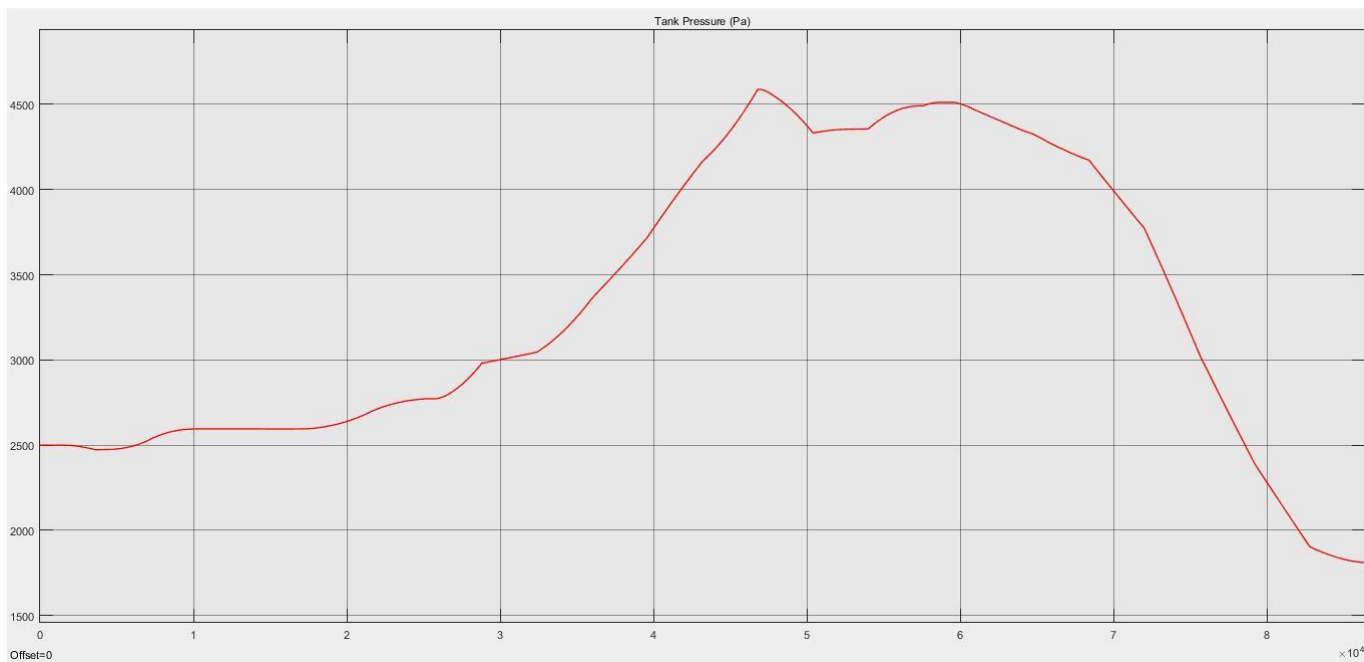


Εικόνα (6.46): Διαφορά ισχύος ζήτησης από παραγόμενη ισχύ



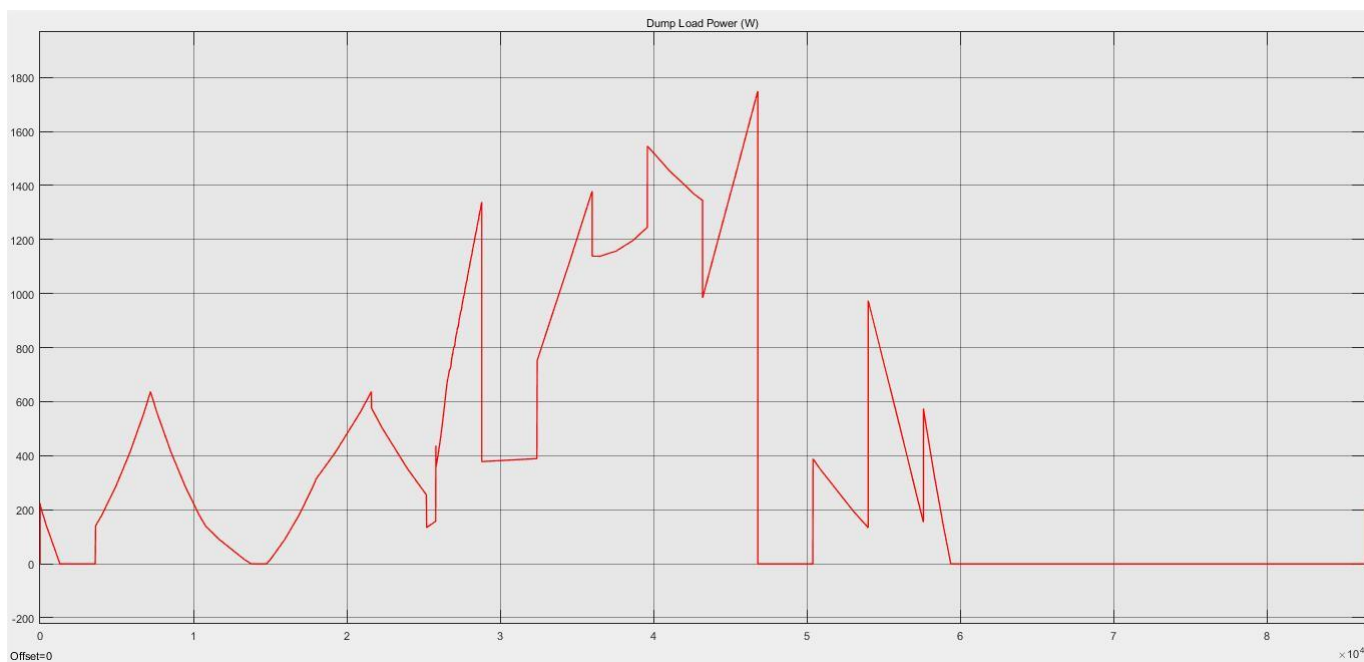
Εικόνα (6.47): Ροή υδρογόνου προς την κυψέλη καυσίμου.

Στο παράδειγμα της φθινοπωρινής μέρας, παρατηρείται μεγάλο τμήμα της καμπύλης διαφοράς των ισχυών να παίρνει αρνητικές τιμές, λόγω και των διαφορετικών αναγκών του χρήστη λόγω εποχής, με αποτέλεσμα την αυξημένη ροή υδρογόνου προς την κυψέλη καυσίμου προκειμένου να καλυφθεί αυτό το έλλειμμα.



Εικόνα (6.48): Πίεση δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου.

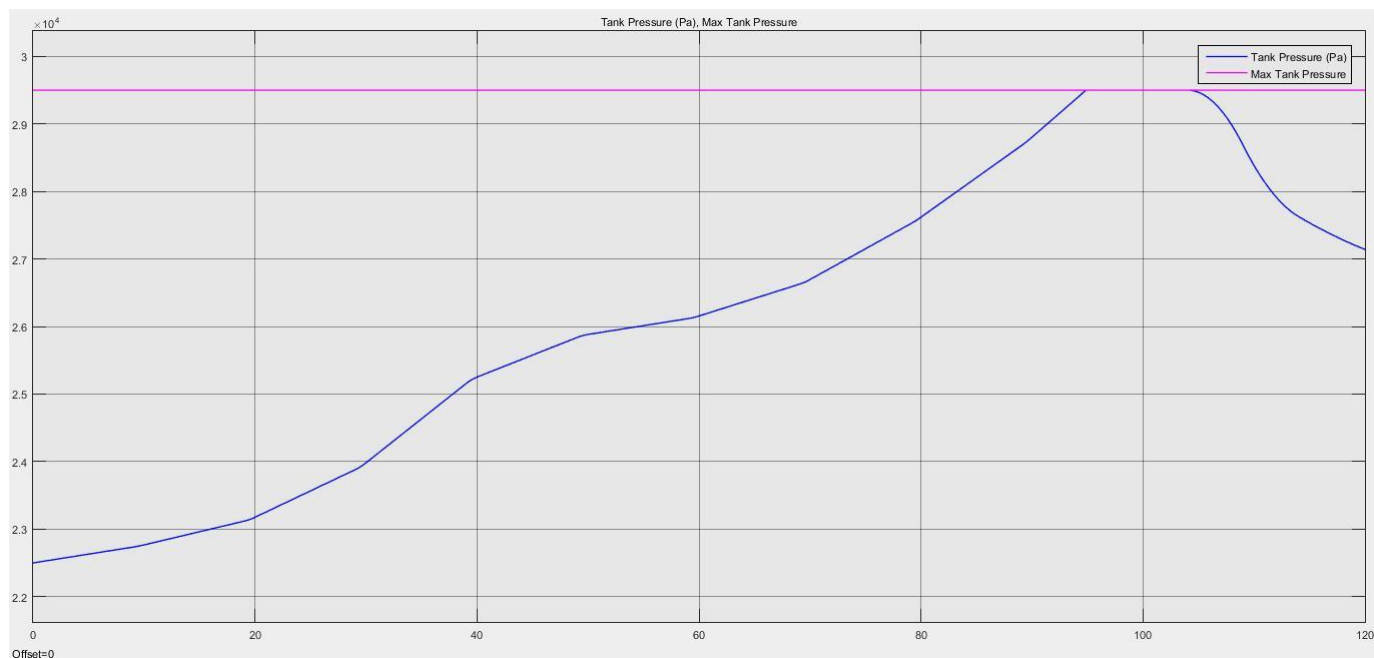
Έτσι, ενώ η δεξαμενή έχει αποθηκεύσει μεγάλη ποσότητα υδρογόνου χρειάζεται σχεδόν ολόκληρη για την κάλυψη των αναγκών του φορτίου σε ισχύ. Ακόμα κι έτσι όμως, όπως παρατηρείται στις παραπάνω τρεις εικόνες, το έλλειμα των περίπου 3500 W αναπληρώνεται από το απόθεμα, με αποτέλεσμα την κάθετη πτώση της πίεσης της δεξαμενής αποθήκευσης.



Εικόνα (6.49): Ισχύς ελεγχόμενου φορτίου.

Τέλος, η ποσότητα της ισχύος που απορρίπτεται από το ελεγχόμενο φορτίο προς τήρηση της ευστάθειας του συστήματος όπως έχει προαναφερθεί, δίνεται στο τελευταίο γράφημα της εικόνας 6.49.

Παρακάτω δίνεται η καμπύλη της πίεσης της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου για μια ειδική περίπτωση όπου η πίεση φτάνει στο ανώτατο όριό της, P_{max} . Παρατηρείται ότι παραμένει σε αυτή την τιμή χωρίς να την υπερβαίνει, δηλαδή σταματά η ροή υδρογόνου προς αυτή, επιβεβαιώνοντας την ορθή λειτουργία της δεξαμενής αποθήκευσης.



Εικόνα (6.50): Η πίεση της δεξαμενής υδρογόνου. Η ροή υδρογόνου διακόπτεται όταν η πίεση φτάσει 29500 Pa.

Κεφάλαιο 7ο Συμπεράσματα - Προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός αυτόνομου (μη συνδεδεμένου στο δίκτυο) υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ΑΠΕ – υδρογόνου μέσω ενός δυναμικού μοντέλου που υλοποιήθηκε στο περιβάλλον Matlab/Simulink. Πιο συγκεκριμένα, μία ανεμογεννήτρια και μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια χρησιμοποιήθηκαν ως κύριες ενεργειακές πηγές, ενώ μία κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιήθηκε για να καλύψει τα ελλείμματα ισχύος. Ακόμη, μία μονάδα ηλεκτρόλυσης και μία δεξαμενή αποθήκευσης χρησιμοποιήθηκαν για την αποθήκευση της περίσσειας ισχύος σε υδρογόνο. Η διασύνδεση των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος και η διαχείριση της ισχύος πραγματοποιήθηκαν μέσω ενός κοινού ζυγού ΣΡ με τη βοήθεια ειδικά σχεδιασμένων ελεγκτών.

Τα επιμέρους υποσυστήματα μοντελοποιήθηκαν αναλυτικά με μαθηματικές εξισώσεις και δόθηκε μεγάλη έμφαση στη δυναμική συμπεριφορά τους. Ο έλεγχος του συστήματος περιλαμβάνει τον έλεγχο MPPT των κύριων ενεργειακών πηγών, καθώς και το διαχειριστικό έλεγχο του συστήματος.

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τέσσερις μέρες του χρόνου με διαφορετικές συνθήκες ηλιοφάνειας και ανέμου, προκειμένου να εξεταστεί η απόδοση του συστήματος, όπου από τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Υπήρξε αδιάλειπτη παροχή ισχύος,
- Σωστή λειτουργία της ανεμογεννήτριας και του ελεγκτή MPPT, αφού όπως παρατηρήθηκε για τις διαφορετικές τιμές ταχύτητας του ανέμου επιτεύχθηκε μέγιστη απομάστευση ισχύος και τροφοδότηση του ηλεκτρολύτη για παραγωγή υδρογόνου και αποθήκευσής του για μελλοντική χρήση,
- Σωστή λειτουργία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και του ελεγκτή MPPT, με ταυτόχρονη τροφοδότηση του ηλεκτρολύτη για παραγωγή υδρογόνου και αποθήκευσής του για μελλοντική χρήση,
- Κάλυψη των αναγκών σε ισχύ από τις δύο ενεργειακές πηγές του αυτόνομου υβριδικού συστήματος για το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας, κυρίως των πρωινών ωρών που υπάρχει και έντονη ηλιοφάνεια,
- Σωστή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου με κάλυψη των αναγκών όποτε κατέστη αναγκαίο, όπως τις βραδινές ώρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια ή κατά τη διάρκεια της ημέρας όπου υπήρξαν δυσμενείς καιρικές συνθήκες για την παραγωγή ισχύος από τις ενεργειακές πηγές,
- Ακόμα και σε περιπτώσεις πολύ χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας ή πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου, δεν παρατηρήθηκε αδυναμία του συνολικού συστήματος μαζί και με τη συνδρομή της κυψέλης καυσίμου, να καλύψει τις ανάγκες του φορτίου,
- 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.

Πρόκειται για μια διπλωματική εργασία που επικεντρώνεται στην παραγωγή και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση καθαρών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τις οποίες τα τελευταία χρόνια, γίνεται ολοένα και ισχυρότερη η πεποίθηση για την αναγκαιότητα της διάδοσής τους. Η κατασπατάληση των φυσικών ενεργειακών πόρων κατέστησαν το υδρογόνο ως τον πιο πιθανό μελλοντικό αντικαταστάτη των συμβατικών καυσίμων. Η χρησιμοποίησή του υδρογόνου σε συνδυασμό με άλλες ενεργειακές πηγές, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, έχει στέψει το ενδιαφέρον της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας προς τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κι αυτό είναι που επιδιώκει να εξετάσει η παρούσα διπλωματική εργασία.

7.2 Προτάσεις για περαιτέρω επέκταση

- Πλήρης ανάλυση του σχεδιασμού και του κόστους 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 μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα π.χ. για τη διάρκεια ενός έτους.
- Προσομοίωση με χρήση διαφορετικών τεχνολογιών είτε για την φωτοβολταϊκή γεννήτρια ή την ανεμογεννήτρια είτε για την κυψέλη καυσίμου.
- Υλοποίηση διαφορετικών αλγορίθμων ελέγχου MPPT όπως π.χ. νευρωνικά δίκτυα, Fuzzy Logic κ.α.

Βιβλιογραφία

- [1] Haque, M. E., Muttaqi, K. M. & Negnevitsky, M. (2009). «A control strategy for output maximisation of a PMSG-based variable-speed wind turbine.» Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, 5 (3), 263-270.
- [2] «Συμβολή στον έλεγχο ανεμογεννητριών μονίμων μαγνητών με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα», Μάριος – Χαρίλαος Δ. Σουσούνης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.
- [3] «Ανάπτυξη Δυναμικού Μοντέλου και Έλεγχος Ανεμογεννήτριας Συνδεδεμένης στο Δίκτυο και σε Αυτόνομη Λειτουργία Εφοδιασμένη με Διάταξη Αποθήκευσης Ενέργειας», Στέφανος Γ. Δημητρακάκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2014.
- [4] «Ανάλυση Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας που συνδυάζει ΑΠΕ και Τεχνολογίες Υδρογόνου», Μιχαήλ Π. Αντωνακόπουλος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010.
- [5] «The Wind energy Conversion System Using PMSG Controlled by Vector Control and SMC Strategies», Emna Mahersi*, Adel Khedher**, M.Faouzi Mimouni***, *Research Unit ESIER, National Engineering School of Monastir ENIM, **Research Unit RELEV, National Engineering School of Sfax ENIS, National Engineering School of Sousse ENISO, *** National Engineering School Monastir ENIM, 2012.
- [6] «Προσομοίωση ενός Αυτόνομου Συστήματος Ενέργειας με χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και κυψελών Υδρογόνου», Παπαποστόλου Τάσος, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2014.
- [7] «A Study of Field-Oriented Control of a Permanent Magnet Synchronous Generator and Hysteresis Current Control for Wind Turbine Application», Surya Baktiono, Ohio State University, 2012.
- [8] «Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος DC-DC για μεταφορά Ηλεκτρικής ενέργειας Αιολικών Πάρκων», Μοσχοβίτης Φίλιππος, ΤΕΙ Πειραιά.
- [9] «Ερευνητική εργασία: Η σημασία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην περιβαλλοντική και ενεργειακή πολιτική: η περίπτωση της ηλιακής ενέργειας», Κανάρη Δόμνα, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Ανάπτυξης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2015.
- [10] «Προσομοίωση και Διαχείριση ενός Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος Ενέργειας, με χρήση Γραφικών Εργαλείων Υπολογισμού», Λεοντόπουλος Παναγιώτης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2012.
- [11] <https://faculty.mu.edu.sa/public/uploads/1338183582.05219781848003156-c1.pdf>
- [12] Middle East Technical University, Electrical And Electronics Engineering Department, «Discrete Time Control Systems Recitation 4 Report, P, PD, PI, PID CONTROLLERS», Sena Temel, Semih Yagli, Semih Goren.

- [13] International Renewable Energy Agency, IRENA, «Renewable energy highlights», 1 July 2016.
- [14] REN21, Renewable energy Policy Network for the 21st century, «Renewables 2015, Global status Report».
- [15] «Ανάπτυξη Προσομοίωση και κατασκευή συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια μονίμων μαγνητών για απομονωμένη και διασυνδεδεμένη λειτουργία», Αντώνιος Ε. Χανιώτης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2007.
- [16] <http://eclass.teipat.gr/eclass/modules/document/file.php/487188/%CE%A3%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%B9%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82%20%CE%BC%CE%B1%CE%B8%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82/%CE%9A%CE%B5%CF%86%CE%B1%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF%203%20-%20%CE%91%CE%BD%CE%BF%CF%81%CE%B8%CF%89%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CF%82%20%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CF%84%CE%B1%CE%BE%CE%B5%CE%B9%CF%82.pdf>
- [17] «Σύγκριση Κλασσικού και Ελέγχου Βασισμένου σε Ασαφή Λογική Ανεμογεννήτριας Μονίμων Μαγνητών», Μαρία Σ. Ρώτα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008.
- [18] Σημειώσεις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, ΗΡΥ 416, Δρ. Γεώργιος Σ. Σταυρακάκης, Καθηγητής Τμήματος ΗΜΜΥ, Τριανταφυλλιά Γ. Νικολάου, Φυσικός Ε.Κ.Π.Α., Μ.Sc. Εξωτερική Συνεργάτης: Διονυσία Σ. Κολοκοτσά, Επίκουρη Καθηγήτρια Α.Τ.Ε.Ι Κρήτης.
- [19] Σημειώσεις μαθήματος Θεωρία και Εφαρμογές Αυτομάτου Ελέγχου, σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [20] <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CF%8E%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B5%CF%82%CF%80%CE%B7%CE%B3%CE%AD%CF%82%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82>
- [21] https://en.wikipedia.org/wiki/Boost_converter
- [22] https://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter
- [23] https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller
- [24] https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation
- [25] <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/windturbine.html>
- [26] 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.

- [27] 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.
- [28] Santarelli M, Pellegrino D. «Mathematical optimization of a RES-H2 plant using a black box algorithm». Renewable Energy 2005;30(4):493-510.
- [29] El-Shatter TF, Eskandar MN, El-Hagry MT. «Hybrid PV/fuel cell system design and simulation.», Renewable Energy 2002;27(3):479-85.
- [30] Gorgun H. «Dynamic modeling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer.», International Journal of Hydrogen Energy 2006;31(1):29-38.
- [31] <http://www.energypress.gr/news/feature/IEA-World-Energy-Outlook-2013>
- [32] <http://allaboutenergy.gr/Paragogi327.html>
- [33] Ε. ΒΡΕΤΤΟΣ, «Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών – Υδρογόνου», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2010.
- [34] Η. ΓΚΟΥΓΚΑΣ, «Ανάλυση Λειτουργίας και Ισοδύναμων Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων για τη Μελέτη της Δυναμικής Συμπεριφοράς Κυψελών Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC)», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2009.
- [35] Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών.
- [36] <http://library.tee.gr/digital/m2483>
- [37] Antonio Luque and Steven Hegedus: “Handbook of Photovoltaic Science and Engineering”, Copyright John Wiley & Sons Ltd, England, August 2005.
- [38] Θ. Ζαχαρίας: «Ήπιες Μορφές Ενέργειας II», Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων, Αθήνα 1986.
- [39] Κ. Καγκαράκης: «Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1992.
- [40] 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.
- [41] 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. 92963-973, July 2005.
- [42] 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.

- [43] 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.
- [44] <http://www.eia.doe.gov/>
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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
- [50] 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.
- [51] 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
- [52] FRANO BARBIR, «PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources», Solar Energy, Vol. 78 (2005): 661-669.
- [53] Krishna R., Titus E., Salimian M., Okhay O. «Hydrogen Storage for Energy Application», 2012, 10.5772/51238.
- [54] 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).
- [55] 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, ISSN1414-8862.93
- [56] 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.

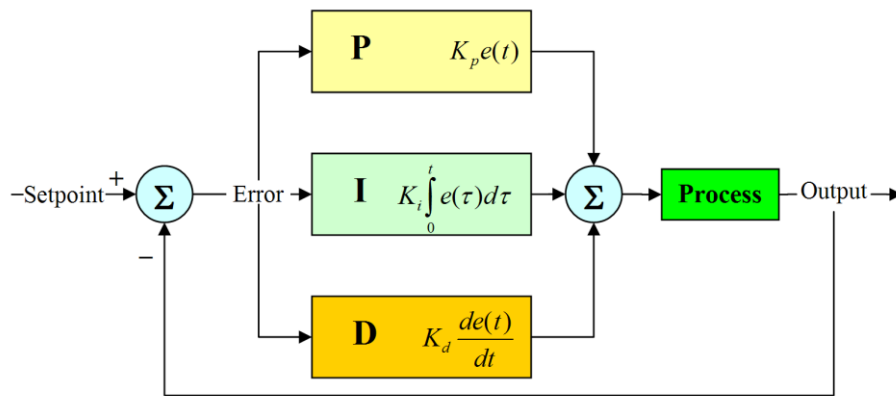
- [57] Al-Refai M. A., «Matlab/Simulink Simulation of Solar Energy Storage System», International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering Vol:8 No:2, 2014.
- [58] Batard C., Poitiers F., Millet C., Ginot N. «Simulation of Power Converters Using Matlab- Simulink», 2012, <http://dx.doi.org/10.5772/46419>.
- [59] Tucker J. «Understanding output voltage limitations of DC/DC buck converters», 2008 Texas Instruments Incorporated.

Παράρτημα Α

Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται κάποια θεωρητικά στοιχεία για διατάξεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς επίσης τα σχέδια κάποιων υποσυστημάτων του συνολικού μοντέλου του υβριδικού συστήματος που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του Matlab/Simulink και δεν συμπεριλήφθηκαν στο κυρίως κείμενο.

A.1 PID Controller [23]

Οι αναλογικοί-ολοκληρωτικοί-διαφορικοί ελεγκτές (PID controllers) είναι μηχανισμοί ανάδρασης βρόχου ελέγχου που χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα βιομηχανικού ελέγχου. Ένας ελεγκτής PID υπολογίζει συνεχώς την τιμή σφάλματος $e(t)$ ως τη διαφορά ανάμεσα σε ένα επιθυμητό σημείο και μια μετρούμενη μεταβλητή της διαδικασίας και εφαρμόζει μια διόρθωση με βάση τους αναλογικούς, ολοκληρωτικούς και διαφορικούς του όρους (μερικές φορές συμβολίζεται P, I, και D αντίστοιχα) βάσει των οποίων δίνεται και το όνομα στον τύπο του ελεγκτή.



Εικόνα (Α.1): Block diagram PID Controller

Το block diagram ενός PID ελεγκτή σε ένα βρόχο ανάδρασης όπου set point είναι η επιθυμητή τιμή της διεργασίας, error η τιμή σφάλματος $e(t)$ και output η μετρούμενη τιμή της διεργασίας, αναπαρίσταται στο παραπάνω σχήμα. K_p , K_i και K_d είναι όλοι τους μη αρνητικοί συντελεστές, που υποδηλώνουν τους αναλογικούς, ολοκληρωτικούς και διαφορικούς όρους (P, I και D αντίστοιχα) όπου:

- Ο όρος P αντιπροσωπεύει την παρούσα τιμή του σφάλματος. Για παράδειγμα, εάν το σφάλμα είναι μεγάλο και θετικό, η έξοδος ελέγχου θα είναι επίσης μεγάλη και θετική.
- Ο όρος I αντιπροσωπεύει τις παρελθοντικές τιμές του σφάλματος. Για παράδειγμα, αν το ρεύμα εξόδου δεν είναι αρκετά ισχυρό, το ολοκλήρωμα του σφάλματος θα συσσωρευτεί με τον χρόνο, και ο ελεγκτής θα ανταποκριθεί εφαρμόζοντας μια ισχυρότερη δράση.
- Ο όρος D αντιπροσωπεύει τις πιθανές μελλοντικές τάσεις του σφάλματος, με βάση τον τρέχον ρυθμό μεταβολής.

Ορισμένες εφαρμογές μπορεί να απαιτούν τη χρήση μόνο ενός ή δύο από τους όρους προκειμένου ο ελεγκτής να παράσχει τον κατάλληλο έλεγχο στο σύστημα. Αυτό επιτυγχάνεται με τον καθορισμό των άλλων παραμέτρων στην τιμή μηδέν. Ένας ελεγκτής PID ονομάζεται PI, PD, P ή ελεγκτής I απουσία των αντίστοιχων δράσεων ελέγχου. Οι ελεγκτές PI είναι αρκετά κοινοί, καθώς η διαφορική δράση είναι “ευαίσθητη” στην μέτρηση του θορύβου, ενώ η απουσία του ολοκληρωτικού όρου μπορεί να αποτρέψει το σύστημα από το να επιτύχει την τιμή που έχει ως στόχο του.

A.2 Τεχνική Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation)[24]

Η Διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM), είναι μια τεχνική διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση ενός μηνύματος σε ένα σήμα παλμικό. Αν και αυτή η τεχνική διαμόρφωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κωδικοποίηση των πληροφοριών για μετάδοση, η κύρια χρήση της είναι να επιτρέπει τον έλεγχο της ισχύος που παρέχεται στις ηλεκτρικές συσκευές, ιδίως σε αδρανειακά φορτία, όπως κινητήρες. Επιπλέον, η τεχνική PWM αποτελεί έναν από τους δύο κύριους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκούς ηλιακούς φορτιστές μπαταριών με τον δεύτερο να είναι ο έλεγχος Maximum Power Point Tracking.

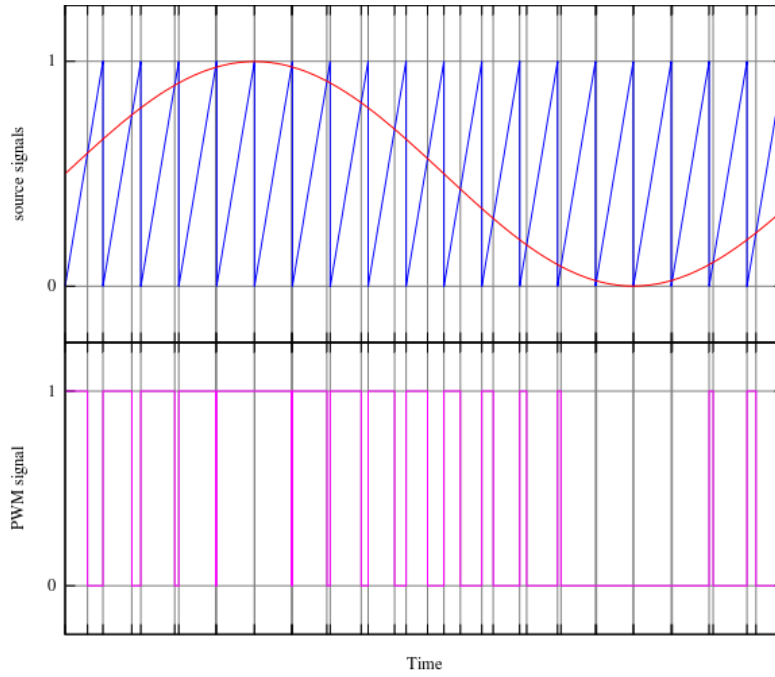
Η μέση τιμή της τάσης (και του ρεύματος) που τροφοδοτείται στο φορτίο ελέγχεται από το ανοιγοκλείσιμο του διακόπτη μεταξύ παροχής και φορτίου με γρήγορο ρυθμό. Όσο περισσότερο χρόνο είναι ο διακόπτης ανοιχτός σε σύγκριση με τις περιόδους που είναι σβηστός, τόσο υψηλότερη είναι η συνολική ισχύς που παρέχεται στο φορτίο.

Η συχνότητα μεταγωγής της PWM πρέπει να είναι πολύ υψηλότερη από ό, τι θα μπορούσε να επηρεάσει το φορτίο (τη συσκευή που χρησιμοποιεί την ισχύ), το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι η προκύπτουσα κυματομορφή που λαμβάνεται από το φορτίο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ομαλή. Ο ρυθμός (ή συχνότητα) με την οποία η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος πρέπει να εναλλάσσεται, μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με το φορτίο και την εφαρμογή.

Ο όρος duty cycle περιγράφει το ποσοστό του χρόνου όπου ο διακόπτης βρίσκεται στη θέση «on» για μια περίοδο του χρόνου. Ένα μικρό duty cycle αντιστοιχεί σε χαμηλή ισχύ, διότι η συσκευή είναι απενεργοποιημένη για το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου. Το duty cycle εκφράζεται σε ποσοστό, με το 100% να δηλώνει ότι ο διακόπτης είναι συνεχώς ανοιχτός.

Το κύριο πλεονέκτημα της PWM είναι ότι η απώλεια ισχύος στις διακοπτικές συσκευές είναι πολύ χαμηλή. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός δεν υπάρχει σχεδόν κανένα ρεύμα, και όταν είναι σε λειτουργία και η ισχύς μεταφέρεται στο φορτίο, δεν υπάρχει σχεδόν καμία πτώση τάσης στα άκρα του διακόπτη. Έτσι η απώλεια ισχύος, που είναι το προϊόν της τάσης και του ρεύματος, είναι και στις δύο περιπτώσεις κοντά στο μηδέν. Η PWM λειτουργεί επίσης καλά στους ψηφιακούς ελέγχους, οι οποίοι, λόγω της on / off φύσης τους, μπορούν εύκολα να ρυθμιστούν στο απαιτούμενο duty cycle.

Ο απλούστερος τρόπος για να παραχθεί ένα σήμα PWM είναι η μέθοδος της διασταύρωσης, η οποία απαιτεί μόνο μια πριονωτή ή μια κυματομορφή τρίγωνο (οι οποίες δημιουργούνται εύκολα χρησιμοποιώντας ένα απλό ταλαντωτή) και ένα συγκριτή. Όταν η τιμή του σήματος αναφοράς (το κόκκινο ημιτονοειδές κύμα στο παραπάνω σχήμα) είναι μεγαλύτερη από την κυματομορφή διαμόρφωσης (μπλε), το σήμα PWM (ματζέντα) είναι σε υψηλή κατάσταση, διαφορετικά είναι σε χαμηλή κατάσταση.



Εικόνα (Α.2): Παραγωγή σήματος PWM.

A.3 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (DC-DC Boost Converter)[6]

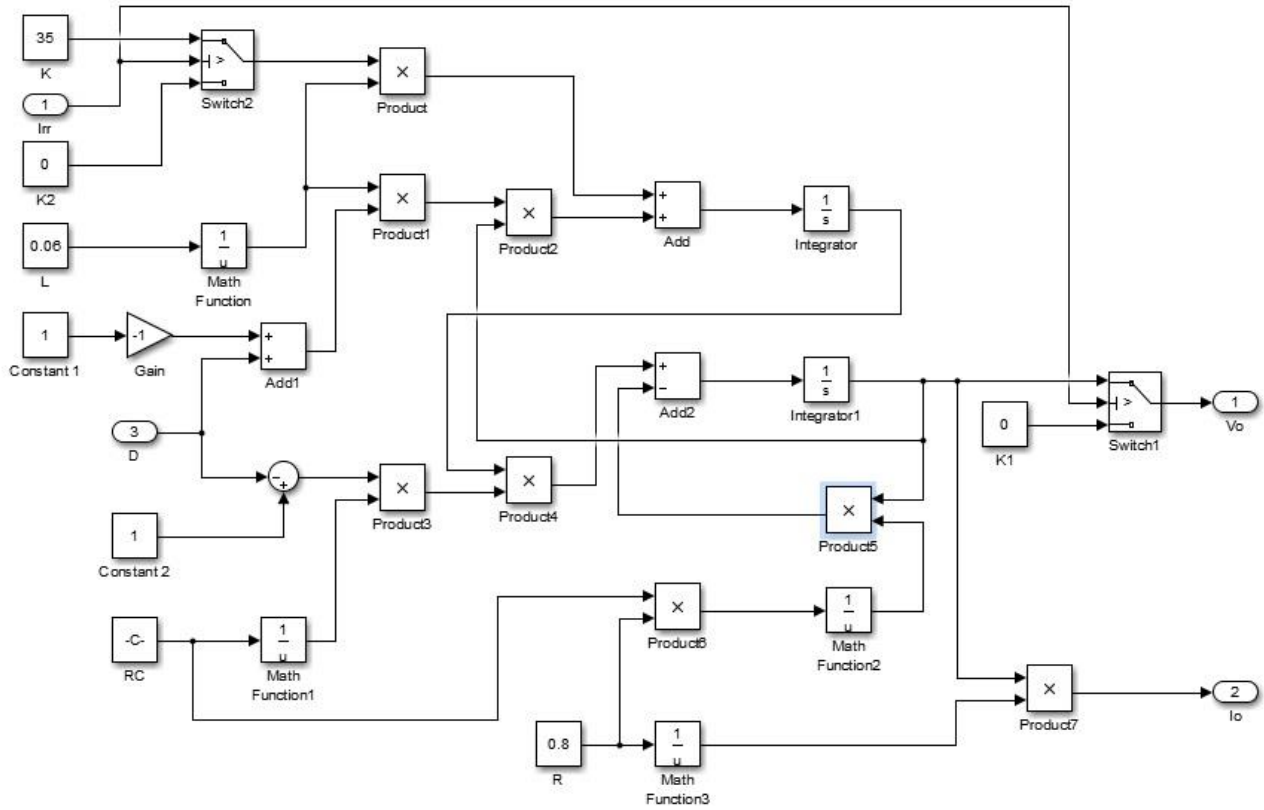
Η βασική λειτουργία καθώς επίσης και το κυκλωματικό διάγραμμα ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης (DC-DC Boost Converter), δόθηκαν στην κυρίως δομή του κειμένου. Οι εξισώσεις οι οποίες διέπουν τη λειτουργία του Boost Converter που υλοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική είναι οι εξής:

$$V_L(t) = V_i(t) * F + (V_i(t) - V_o(t)) * F * \text{sign}(i_L) \quad (A.1)$$

$$i_c(t) = -i_o(t) * F + i_L(t) * F * \text{sign}(i_L) = C \frac{dV_o}{dt} \quad (A.2)$$

$$V_o = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt = \frac{1}{C} \int (-i_o(t) \cdot F + i_L \cdot F \cdot \text{sign}(i_L)) dt \quad (A.3)$$

Το μοντέλο του υποσυστήματος του Boost Converter στο Simulink που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι το παρακάτω:



Εικόνα (Α.3): Boost Converter

A.4 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης συνεχούς ρεύματος (Step - Down/Buck DC - DC Converter)

Ο μετατροπέας Buck Converter φαίνεται στο σχήμα Α.4α. 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. Α.4b). Διακρίνονται τρεις καταστάσεις λειτουργίας όπως βλέπουμε και στο σχήμα Α.4c[6]:

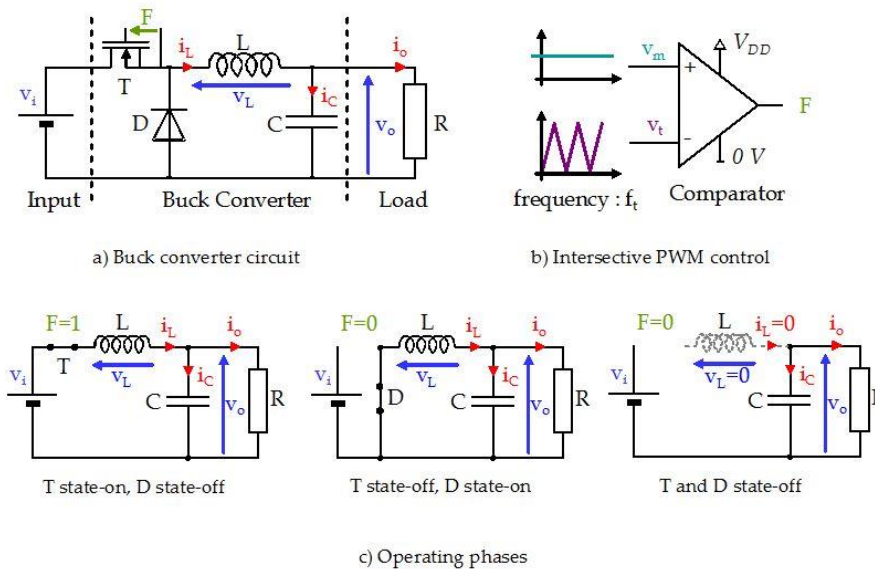
- T κατάσταση-on και D κατάσταση-off
- T κατάσταση-off και D κατάσταση- on
- T και D κατάσταση-off

$$i_c(t) = i_L(t) - i_o(t) = C \frac{dv_o}{dt} \quad (A.4)$$

$$v_o(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt = \int (i_L(t) - i_o(t)) dt \quad (A.5)$$

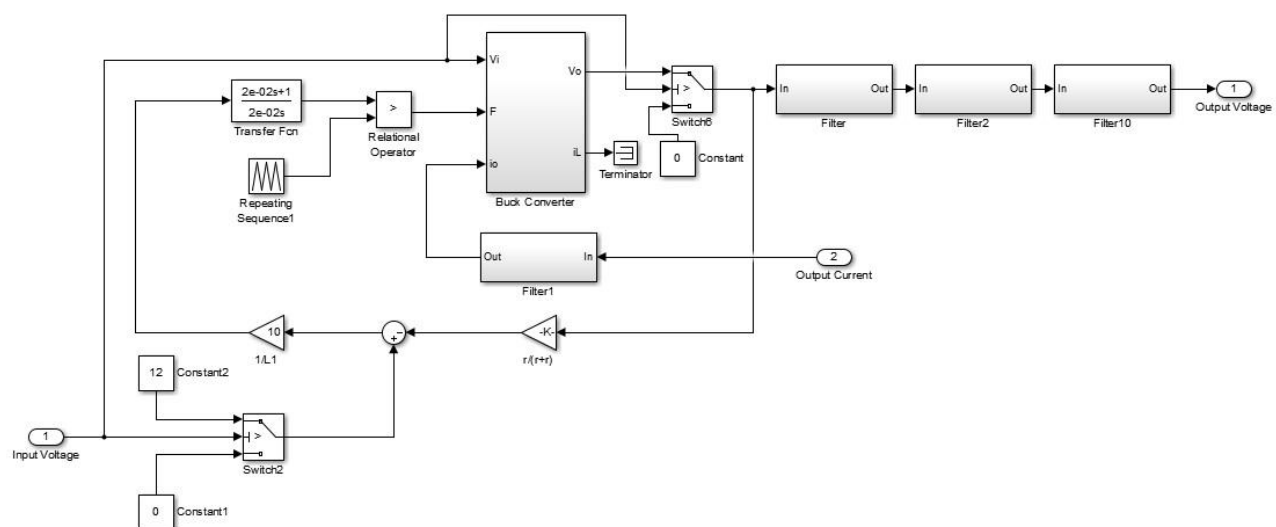
$$v_L(t) = (v_i(t) - v_o(t)) * F - v_o(t) * F * \text{sign}(i_L) \quad (A.6)$$

Η μεταβολή του ρεύματος μέσω του πυκνωτή C ορίζεται από την εξίσωση (A.4). Η μεταβολή της τάσης μέσω της χωρητικότητας δίνεται από την εξίσωση (A.5). Η εξίσωση (A.6) 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 $\text{sign}(i_L) = 0$.



Εικόνα (A.4): Κύκλωμα Buck Converter και καταστάσεις λειτουργίας

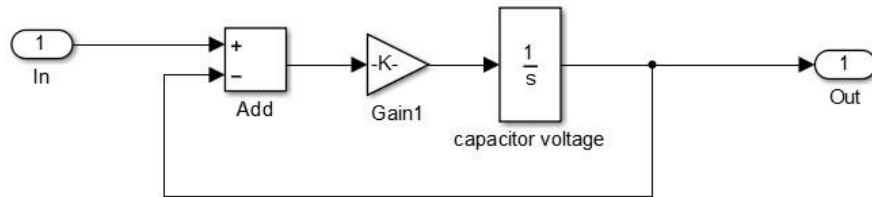
Το μοντέλο του υποσυστήματος του Buck Converter στο Simulink που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι το παρακάτω:



Εικόνα (A.5): Buck Converter

A.5 Φίλτρα

Για την διευκόλυνση της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα για εξομαλύνεται το σήμα (εικόνα A.6)[6].



Εικόνα (A.6): Το μοντέλο στο Simulink του φίλτρου που χρησιμοποιήθηκε.