



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

Ανάλυση Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας που συνδυάζει ΑΠΕ και Τεχνολογίες Υδρογόνου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΙΧΑΗΛ Π. ΑΝΤΩΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010



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

Ανάλυση Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας που συνδυάζει ΑΠΕ και Τεχνολογίες Υδρογόνου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΙΧΑΗΛ Π. ΑΝΤΩΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Α. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Παπαθανασίου
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

.....
ΜΙΧΑΗΛ Π. ΑΝΤΩΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © ΜΙΧΑΗΛ Π. ΑΝΤΩΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Το υδρογόνο θεωρείται ως το ενεργειακό μέσο του μέλλοντος που θα αντικαταστήσει τα συμβατικά υγρά και αέρια καύσιμα. Για το λόγο αυτό, τα υβριδικά συστήματα παραγωγής που συνδυάζουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με αποθήκευση υδρογόνου βρίσκονται στο επίκεντρο της επιστημονικής έρευνας. Βασική επιδίωξη αυτών των συστημάτων αποτελεί η βέλτιστη διαχείριση της παραγόμενης και αποθηκευμένης ενέργειας, καθώς και η αποδοτική και ασφαλής χρήση των διατάξεων υδρογόνου.

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. Μια συστοιχία υπερπυκνωτών λειτουργεί επικουρικά, για να καλύψει τις ταχείες μεταβολές τόσο του φορτίου όσο και της παραγωγής που μπορεί να οφείλονται σε πιθανές διακυμάνσεις της ταχύτητας ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας. 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 ΣΡ με τη βοήθεια ειδικά σχεδιασμένων ελεγκτών.

Τα υποσυστήματα μοντελοποιούνται αναλυτικά με μαθηματικές εξισώσεις και δίνεται μεγάλη έμφαση στη δυναμική συμπεριφορά τους. Ακόμη, αναπτύσσεται μία αναλυτική μέθοδος για τη διαστασιολόγηση του συστήματος με χρήση πραγματικών δεδομένων για τις χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου – ηλιακής ακτινοβολίας και την ημερήσια καμπύλη φορτίου. Ο έλεγχος του συστήματος δε βασίζεται μόνο στο ισοζύγιο παραγωγής και ζήτησης, αλλά εξασφαλίζει, παράλληλα, την αποδοτική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής της. Ακόμη, λαμβάνει υπόψη θέματα ενεργειακής απόδοσης, καθώς και περιορισμούς ασφαλείας στη λειτουργία του ηλεκτρολύτη, ενώ δίνεται έμφαση στην ποιότητα της παραγόμενης ισχύος. Η συμπεριφορά του συστήματος μελετάται τόσο σε φαινόμενα μεγάλης χρονικής διάρκειας (24ωρο) όσο και σε μεταβατικές καταστάσεις. Προτείνεται μια συγκεκριμένη τεχνική έλεγχου της ροής ισχύος, η οποία εξασφαλίζει ευσταθή λειτουργία και αδιάλειπτη παροχή ισχύος στο φορτίο και αξιολογείται ο ρόλος των υπερπυκνωτών στο ισοζύγιο ισχύος, στην αποδοτική χρήση της κυψέλης καυσίμου και στην ποιότητα ισχύος του ζυγού ΣΡ.

Λέξεις Κλειδιά

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

Abstract

Hydrogen is considered to be the most likely substitute of conventional fuels in the future. For this reason, recent scientific research focuses on hybrid power systems which combine renewable energy sources and hydrogen storage. The main goal of these systems is the optimal management of produced and stored energy and the efficient and safe use of hydrogen technologies.

The scope of this thesis is the development of a dynamic model that simulates the operation of an autonomous hybrid renewable energy-based power system. The system employs a wind generator and photovoltaic arrays as main energy sources, while a fuel cell is included for supplying excess power demand. An ultra-capacitor bank is also implemented in order to cover rapid changes of both load demand and power supply due to changes in wind speed or solar radiation. Furthermore, an electrolyzer and a hydrogen storage tank are used in order to convert excess power generation into hydrogen. The system components are connected with a common DC bus and power flow is controlled by specially designed controllers.

The subsystems are modeled with mathematical equations and their sizing is determined by an analytic methodology, which uses actual time data regarding wind speed, solar radiation and the daily load curve. The control system is based not only on the supply-demand equilibrium, but also includes concerns of fuel cell long-term durability as well as actual constraints regarding electrolyzer operation and considerations of energy efficiency. The system performance is evaluated on both long duration phenomena (24 hours) and transient conditions. A particular control technique is proposed for power flow regulation ensuring both firm system performance and uninterrupted supply of load demand. Moreover, the contribution of the ultra-capacitor bank is evaluated regarding issues, such as the supply-demand equilibrium, fuel cell efficiency and DC bus power quality.

Key Words

Energy management, energy storage, hydrogen storage, fuel cell, ultra-capacitors, wind energy, solar energy, power generation

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Αντώνιο Κλαδά, Καθηγητή Ε.Μ.Π. για τη ευκαιρία που μου πρόσφερε να ασχοληθώ με την παρούσα εργασία. Η καθοδήγηση του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της ήταν για μένα πολύτιμη. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον Υπ. Δρ. Χαράλαμπο Πάτσιο για τη συνεχή υποστήριξη και βοήθειά του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στο Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ) και συγκεκριμένα στον ερευνητή κ. Γεώργιο Τζαμαλή, χημικό μηχανικό και στον προϊστάμενο του Τμήματος Τεχνολογιών ΑΠΕ και Υδρογόνου κ. Εμμανουήλ Ζούλια, χημικό μηχανικό για την άψογη συνεργασία και υποστήριξή τους κατά τη διενέργεια των πειραματικών μετρήσεων στις εγκαταστάσεις του ΚΑΠΕ. Τέλος, καθοριστική ήταν η συμβολή του Δρ. Αντωνίου Χανιώτη σε θέματα μοντελοποίησης.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή	11
1.1	Αντικείμενο της παρούσας εργασίας	11
1.2	Δομή διπλωματικής εργασίας	12
1.3	Συνεισφορά της εργασίας	13
1.4	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	14
1.5	Υβριδικά συστήματα ενέργειας	17
1.5.1	Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής σε κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας...	18
1.5.2	Αυτόνομα υβριδικά συστήματα	18
1.6	Τεχνολογίες υδρογόνου	19
1.6.1	Το υδρογόνο ως φορέας ενέργειας	19
1.6.2	Κυψέλες καυσίμου (Fuel Cells)	20
1.6.3	Ηλεκτρολύτες (Electrolyzers)	24
1.6.4	Εφαρμογές τεχνολογιών υδρογόνου στα υβριδικά συστήματα	25
2	Μοντελοποίηση του υβριδικού συστήματος	29
2.1	Ανεμογεννήτρια μονίμων μαγνητών - μεταβλητών στροφών	29
2.1.1	Αεροδυναμικό μέρος	29
2.1.2	Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών	31
2.2	Φωτοβολταϊκή γεννήτρια	35
2.2.1	Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκής γεννήτριας	36
2.3	Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC)	40
2.3.1	Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου	40
2.3.2	Δομή της κυψέλης	41
2.3.3	Υποσυστήματα κυψέλης καυσίμου	46
2.3.4	Μοντελοποίηση κυψέλης καυσίμου PEM	47
2.4	Ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Electrolyzer – PEM Electrolyzer) και δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου	64
2.4.1	Κατασκευαστικά στοιχεία ηλεκτρολύτη	64
2.4.2	Αρχή λειτουργίας του ηλεκτρολύτη	64
2.4.3	Βοηθητικά υποσυστήματα ηλεκτρολύτη και δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου ...	65
2.4.4	Μοντελοποίηση ηλεκτρολύτη PEM	67
2.4.5	Μοντελοποίηση δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου	69
2.5	Υπερπυκνωτής (Ultracapacitor - UC)	71
2.5.1	Μοντελοποίηση υπερπυκνωτή	72
2.6	Ελεγχόμενο φορτίο (Dump Load)	76
2.6.1	Μοντελοποίηση ελεγχόμενου φορτίου	76
2.7	Ηλεκτρονικά ισχύος	77
2.7.1	Μετατροπέας ανύψωσης τάσης συνεχούς ρεύματος (Boost DC- DC Converter) ...	77
2.7.2	Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης συνεχούς ρεύματος (Step – Down DC – DC Converter)	79
2.7.3	Αμφίδρομος μικτός μετατροπέας συνεχούς ρεύματος (Bidirectional Buck – Boost DC – DC Converter)	80
2.7.4	Τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης (Three – Phase Voltage Source DC – AC Inverter)	82

3	<i>Διαστασιολόγηση και ανάλυση κόστους του υβριδικού συστήματος.</i>	84
3.1	Εισαγωγή	84
3.2	Διαστασιολόγηση του συστήματος με τη μέθοδο LPSP	84
3.2.1	Η μέθοδος LPSP	86
3.2.2	Αποτελέσματα μεθόδου LPSP	87
3.3	Διαστασιολόγηση κυψέλης καυσίμου και ηλεκτρολύτη	89
3.3.1	Διαστασιολόγηση κυψέλης καυσίμου	90
3.3.2	Διαστασιολόγηση ηλεκτρολύτη	91
3.4	Διαστασιολόγηση υπερπυκνωτή	93
3.5	Ανάλυση κόστους	94
3.5.1	Βασικά στοιχεία ανάλυσης κόστους	94
3.5.2	Αποτελέσματα	95
3.5.3	Συμπεράσματα	97
3.6	Διαστασιολόγηση του συστήματος με το λογισμικό HOMER	98
3.6.1	Δομή του συστήματος και δεδομένα προσομοίωσης	99
3.6.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης	102
4	<i>Λειτουργικοί περιορισμοί τεχνολογιών υδρογόνου</i>	108
4.1	Εισαγωγή	108
4.2	Λειτουργικοί περιορισμοί κυψέλης καυσίμου PEM	108
4.2.1	Διάρκεια ζωής και υποβάθμιση της απόδοσης με το χρόνο (degradation)	108
4.2.2	Δυναμική απόκριση σε μεταβατικά φορτία	113
4.3	Λειτουργικοί περιορισμοί ηλεκτρολύτη PEM	121
4.3.1	Διακοπτόμενη λειτουργία (intermittent operation) και κυμάτωση ισχύος	121
4.3.2	Πίεση υδρογόνου	122
4.3.3	Παραγωγή οξυγόνου	122
4.3.4	Κατανάλωση νερού	122
4.3.5	Απόδοση	123
4.3.6	Διάρκεια ζωής και υποβάθμιση απόδοσης με το χρόνο (degradation)	124
5	<i>Περιγραφή και έλεγχος του υβριδικού συστήματος</i>	126
5.1	Εισαγωγή	126
5.2	Περιγραφή του συστήματος	126
5.3	Έλεγχος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT)	128
5.3.1	Έλεγχος MPPT ανεμογεννήτριας με ελεγκτή ασαφούς λογικής	132
5.3.2	Έλεγχος MPPT Φ/Β γεννήτριας μέσω μικρών μεταβολών	134
5.4	Διαχειριστικός έλεγχος του συστήματος	135
6	<i>Προσομοίωση λειτουργίας του υβριδικού συστήματος</i>	139
6.1	Εισαγωγή	139
6.2	Προσομοίωση λειτουργίας του συστήματος σε φαινόμενα μεγάλης χρονικής διάρκειας	139
6.3	Προσομοίωση λειτουργίας του συστήματος σε μεταβατικά φαινόμενα	150
7	<i>Πειραματική επιβεβαίωση μοντέλου κυψέλης καυσίμου</i>	154
7.1	Εισαγωγή	154
7.2	Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας	154
7.2.1	Επίδραση της θερμοκρασίας	156

7.3	Μεταβατική κατάσταση λειτουργίας.....	159
7.4	Πειραματική μελέτη συστήματος κυψέλης καυσίμου – μπαταριών	163
8	<i>Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα</i>	<i>170</i>
8.1	Κυριότερα συμπεράσματα εργασίας	170
8.2	Σημεία προαγωγής της επιστήμης.....	171
8.3	Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση	172

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας

Αυτή η διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την ανάλυση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο συνδυάζει διάφορες ενεργειακές πηγές και συστήματα αποθήκευσης. Η ανάλυση αυτού του συστήματος κινείται σε πέντε βασικούς άξονες:

- Μοντελοποίηση των επιμέρους υποσυστημάτων.
- Διαστασιολόγηση και ανάλυση κόστους του συστήματος.
- Σχεδιασμός ελεγκτών για τη βέλτιστη λειτουργία και διαχείριση του συστήματος (MPPT, energy management).
- Προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος σε διάφορα σενάρια:
 - ✓ Φαινόμενα μεγάλης χρονικής διάρκειας.
 - ✓ Φαινόμενα μικρής χρονικής διάρκειας (μεταβατικά φαινόμενα).
- Πειραματική επιβεβαίωση της μοντελοποίησης της κυψέλης καυσίμου.

Πιο συγκεκριμένα, το υπό μελέτη σύστημα περιλαμβάνει μία ανεμογεννήτρια (Α/Γ) και μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια (Φ/Β), οι οποίες αποτελούν τις κύριες ενεργειακές πηγές, ενώ μία κυψέλη καυσίμου (fuel cell) χρησιμοποιείται για να τροφοδοτεί την ισχύ του φορτίου που υπερβαίνει την ισχύ της παραγωγής. Μία συστοιχία υπερπυκνωτών (ultra-capacitor bank) λειτουργεί επικουρικά για να καλύψει ταχεία μεταβατικά φαινόμενα τόσο του φορτίου όσο και της παραγωγής, που μπορεί να οφείλονται σε πιθανές διακυμάνσεις της ταχύτητας ανέμου ή της ηλιακής ακτινοβολίας. Ακόμη, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός ηλεκτρολύτη (electrolyzer), ο οποίος χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου, όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας και ενός συστήματος αποθήκευσης (δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου) με ροή εισόδου από τον ηλεκτρολύτη και ροή εξόδου προς την κυψέλη καυσίμου. Για την αυτόνομη λειτουργία του συστήματος είναι επιθυμητό η ποσότητα του καυσίμου που καταναλώνεται από την κυψέλη καυσίμου να αναπληρώνεται από τον ηλεκτρολύτη για μία περίοδο λειτουργίας (π.χ. 24ωρο), αν αυτό είναι εφικτό. Επίσης, χρησιμοποιείται ένα ελεγχόμενο φορτίο (dump load) για να καταναλώνει την περίσσεια ισχύος που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το σύστημα αποθήκευσης λόγω πληρότητας της δεξαμενής. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα επιμέρους υποσυστήματα συνδέονται μεταξύ τους σε ένα κοινό ζυγό ΣΡ (DC bus) με την αξιοποίηση των απαραίτητων ηλεκτρονικών ισχύος, όπως ανορθωτικές διατάξεις, διακοπτικοί μετατροπείς ΣΡ (dc/dc converters) και αντιστροφείς (dc/ac inverters). Περισσότερες λεπτομέρειες για τη δομή και τις διατάξεις ελέγχου του συστήματος θα δοθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Η λειτουργία του συστήματος δεν βασίζεται μόνο στο ισοζύγιο παραγωγής και ζήτησης, αλλά εξασφαλίζει, παράλληλα, την σωστή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, αυξάνοντας την διάρκεια ζωής της. Ακόμη, λαμβάνει υπόψη θέματα ενεργειακής απόδοσης, καθώς και περιορισμούς ασφάλειας στην λειτουργία του

ηλεκτρολύτη. Τέλος, δίνεται μεγάλη έμφαση στην ποιότητα της παραγόμενης ισχύος, η οποία επηρεάζει άμεσα την λειτουργία των διασυνδεδεμένων φορτίων.

Το μοντέλο που προτείνεται σχεδιάστηκε στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB και χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει τη λειτουργία του υβριδικού συστήματος παραγωγής, το οποίο περιγράφηκε παραπάνω.

1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία ανάλυση για τη συμβολή των υβριδικών συστημάτων ενέργειας στην προώθηση των ΑΠΕ και της διεσπαρμένης παραγωγής, καθώς και στην διαφοροποίηση των ενεργειακών πηγών. Στη συνέχεια, γίνεται μία επισκόπηση των επικρατέστερων τεχνολογιών υδρογόνου και των εφαρμογών τους στα υβριδικά συστήματα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αναλυτική μοντελοποίηση των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος με τη χρήση μαθηματικών εξισώσεων. Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν περιλαμβάνουν μία ανεμογεννήτρια μονίμων μαγνητών – μεταβλητών στροφών, μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια, μία συστοιχία κυψελών καυσίμου, μία μονάδα ηλεκτρόλυσης, μία δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου, μία συστοιχία υπερπυκνωτών, ένα ελεγχόμενο φορτίο και τα απαραίτητα ηλεκτρονικά ισχύος.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η διαστασιολόγηση του συστήματος με τη μέθοδο μη τροφοδοτούμενης ενέργειας (μέθοδος LPSP) και εκτιμάται το μέγεθος των υπερπυκνωτών με βάση την ισχύ που δε μπορεί να τροφοδοτήσει η κυψέλη καυσίμου λόγω καθυστερήσεων. Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση κόστους του συστήματος και μελετάται το πως επηρεάζεται το κόστος από την διαστασιολόγηση που επιλέχθηκε, καθώς και από το κόστος της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας. Τέλος, γίνεται επαλήθευση της επιλεγείσας διαστασιολόγησης με την προσομοίωση του συστήματος σε ετήσια βάση με το λογισμικό HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables).

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται οι λειτουργικοί περιορισμοί των τεχνολογιών υδρογόνου, οι οποίοι θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του συστήματος. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε μία εκτενής βιβλιογραφική έρευνα για τον προσδιορισμό των λειτουργικών περιορισμών των κυψελών καυσίμου και των ηλεκτρολυτών. Εξετάζονται θέματα, όπως η διάρκεια ζωής των συσκευών, η υποβάθμιση της απόδοσης τους με το χρόνο, οι επιπτώσεις της διακοπτικής λειτουργίας τους, η ενεργειακή τους απόδοση σε σχέση με την εκάστοτε φόρτιση, η δυναμική απόκριση της κυψέλης καυσίμου σε μεταβατικά φορτία κτλ.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η δομή και η μεθοδολογία έλεγχου του υπό μελέτη υβριδικού συστήματος. Ο έλεγχος περιλαμβάνει τον έλεγχο ανίχνευσης του μέγιστου σημείου ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT) των κύριων ενεργειακών πηγών και τον αλγόριθμο διαχείρισης του συστήματος.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος στο λογισμικό SIMULINK/MATLAB. Η λειτουργία του συστήματος

μελετάται τόσο σε φαινόμενα μεγάλης χρονικής διάρκειας όσο και σε μεταβατικά φαινόμενα.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθενται οι πειραματικές μετρήσεις των χαρακτηριστικών μίας εργαστηριακής συστοιχίας κυψελών καυσίμου στη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, ενώ επιβεβαιώνεται πειραματικά η δυναμική απόκριση ενός μοντέλου κυψέλης καυσίμου – μπαταριών σε απότομες αλλαγές του φορτίου.

Στο όγδοο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας και επισημαίνονται τα στοιχεία καινοτομίας της. Επίσης, αναφέρονται θέματα με τα οποία δεν ασχολείται η παρούσα διπλωματική εργασία και θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενα μελλοντικής ερευνητικής μελέτης.

1.3 Συνεισφορά της εργασίας

Τα καινοτομικά στοιχεία που περιλαμβάνει η παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα εξής:

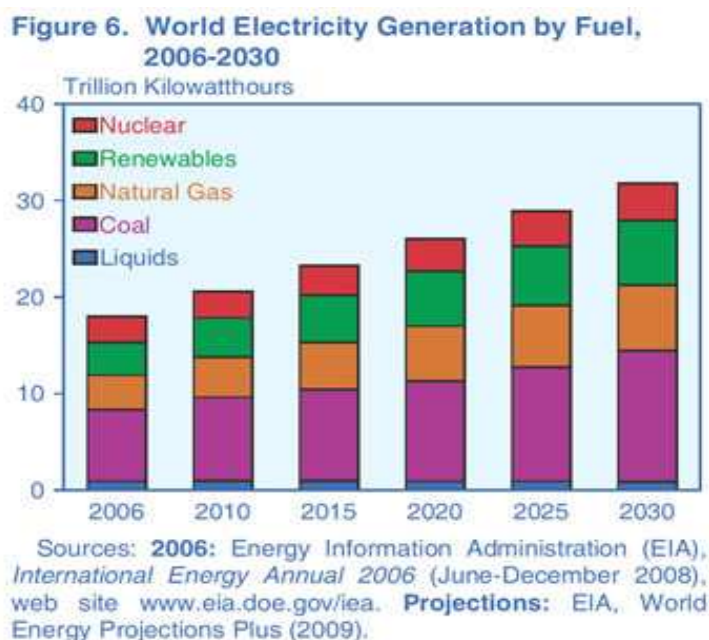
- Ανάπτυξη ενός μοντέλου που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός ολοκληρωμένου σταθμού παραγωγής ΑΠΕ – υδρογόνου και των απαραίτητων ελεγκτών για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος.
- Διαστασιολόγηση του συστήματος με χρήση του αλγορίθμου LPSP και του λογισμικού HOMER.
- Δημιουργία αλγορίθμου διαχείρισης με στόχους την αξιοπιστία του συστήματος και την ασφαλή και αποδοτική χρήση των τεχνολογιών υδρογόνου.
- Χρήση υπερπυκνωτών και αξιολόγηση της συμβολής τους στο ισοζύγιο ισχύος, στη μείωση της καταπόνησης της κυψέλης καυσίμου και στην ποιότητα ισχύος του ζυγού ΣΡ.
- Πειραματική επιβεβαίωση του δυναμικού μοντέλου της κυψέλης καυσίμου.

1.4 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

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

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

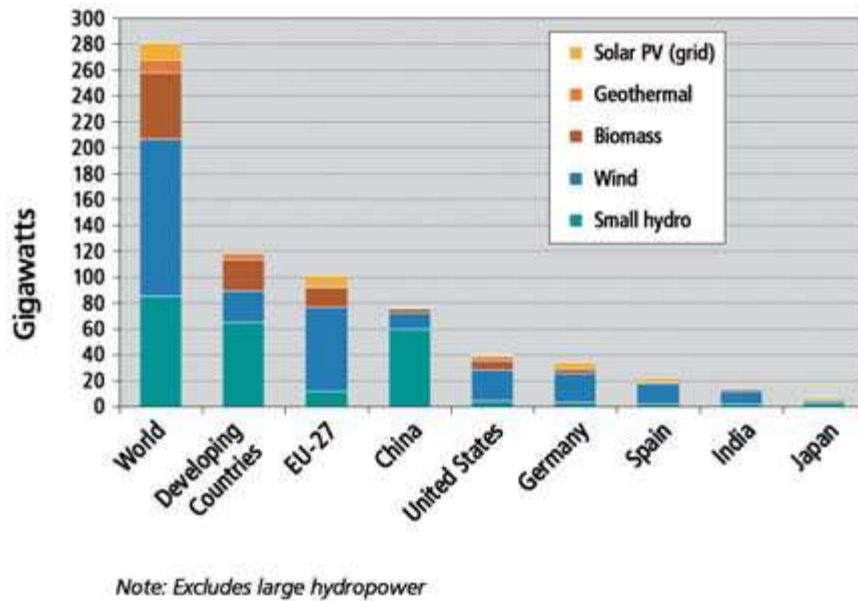
Ενδεικτικά, παρατίθενται κάποια στατιστικά στοιχεία για το παρόν και το μέλλον των ΑΠΕ σε παγκόσμιο επίπεδο [2]. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η υπάρχουσα κατάσταση, αλλά και μια ενδεχόμενη μελλοντική εξέλιξη της παγκόσμιας ηλεκτροπαραγωγής, ταξινομημένη με βάση τη μορφή της ενέργειας ή του καυσίμου από το οποίο προέρχεται. Στο σχήμα 1.2 φαίνεται η αξιοποίηση των διαφόρων μορφών ΑΠΕ το έτος 2008 σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς και πιο συγκεκριμένα η εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρωπαϊκή Ένωση, στις αναπτυσσόμενες χώρες και στις 6 μεγαλύτερες χώρες.



Σχήμα 1.1

Παγκόσμια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά καύσιμο

Figure 4.
**Renewable Power Capacities, Developing World,
 EU and Top Six Countries, 2008**

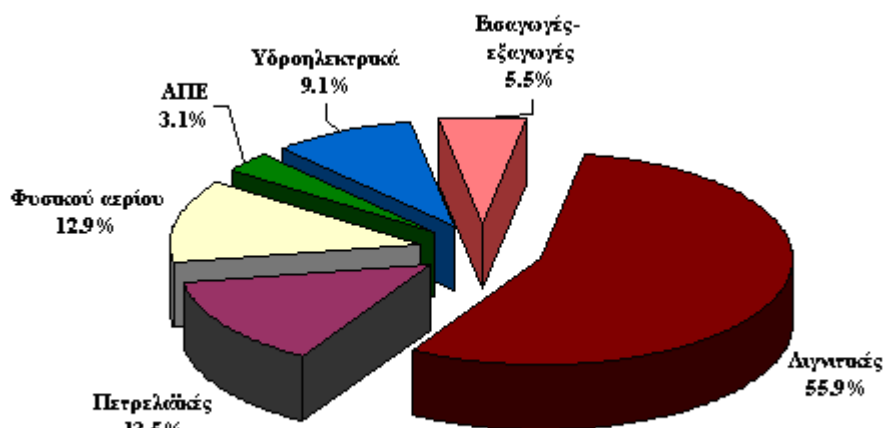


Σχήμα 1.2

Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ το έτος 2008

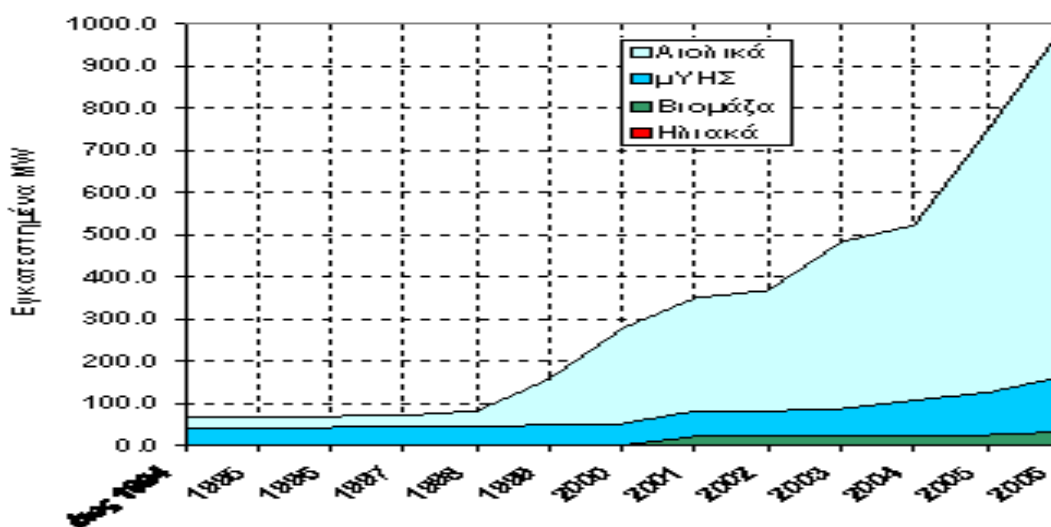
Η Ελλάδα είναι μια χώρα με αξιοποιήσιμο αιολικό και ηλιακό δυναμικό, πράγμα που ευνοεί την ανάπτυξη των ΑΠΕ σε πολλά μέρη της ηπειρωτικής και νησιωτικής χώρας. Στη συνέχεια, παρατίθενται κάποια στατιστικά στοιχεία, που αντικατοπτρίζουν την διείσδυση των ΑΠΕ στην χώρα μας [3]. Στο σχήμα 1.3 φαίνεται η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

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



Σχήμα 1.3

Συμμετοχή μονάδων ηλεκτροπαραγωγής στην ετήσια κατανάλωση το 2005 στην Ελλάδα



Σχήμα 1.4

Εγκατεστημένη ισχύς διαφόρων μορφών ΑΠΕ τα έτη 1984-2007 στην Ελλάδα

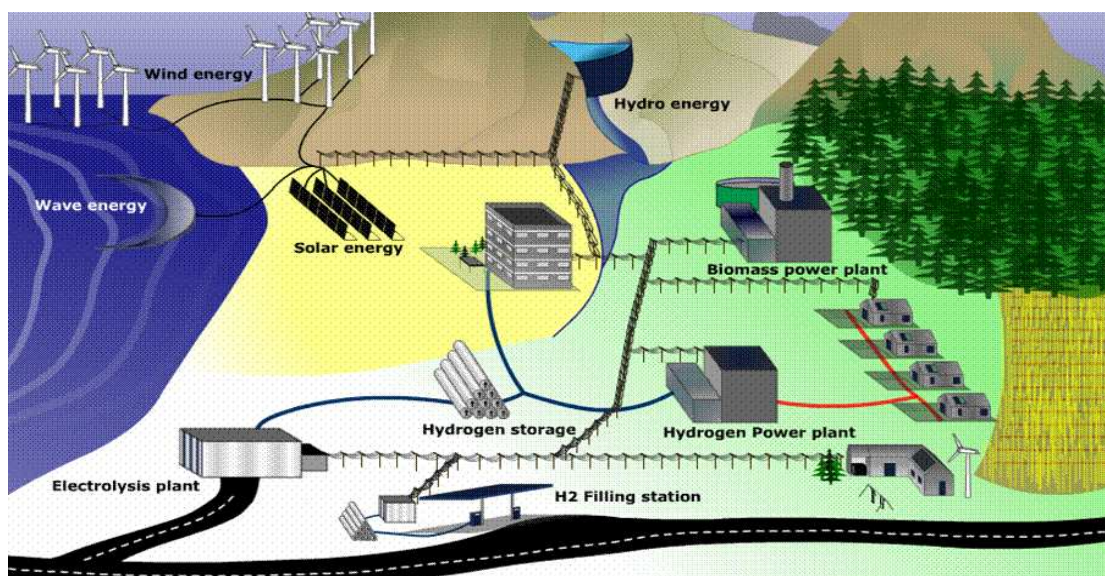
1.5 Υβριδικά συστήματα ενέργειας

Ως Υβριδικό Σύστημα Ενέργειας (ΥΣΕ) ορίζεται οποιοδήποτε αυτόνομο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής, στο οποίο ενσωματώνονται περισσότερες από μία πηγές ενέργειας που λειτουργούν μαζί με τον απαραίτητο υποστηρικτικό εξοπλισμό, περιλαμβανομένης της αποθήκευσης της ενέργειας, με στόχο την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο ή στο σημείο εγκατάστασής του. Τα βασικά μέρη που συνιστούν ένα ΥΣΕ είναι: α) οι μονάδες παραγωγής της ενέργειας, β) η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας, γ) η μονάδα ελέγχου της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και συντονισμού των διάφορων διαθέσιμων επιλογών για βέλτιστη κάλυψη των

αναγκών. Πιο συγκεκριμένα, ένα ΥΣΕ μπορεί να περιλαμβάνει μία συμβατική μονάδα παραγωγής σε συνδυασμό με μία τουλάχιστον μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, διατάξεις αποθήκευσης, συστήματα εποπτείας και ελέγχου, καθώς και σύστημα διαχείρισης φορτίου. Σύμφωνα με το νόμο 3468/2006, ως υβριδικό σύστημα ή αλλιώς υβριδικός σταθμός ορίζεται κάθε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που [4]:

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

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



Σχήμα 1.5

Υβριδικό Σύστημα Ενέργειας

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

- Διασφαλίζουν την αξιοπιστία του συστήματος, καθώς οι ΑΠΕ εξαρτώνται από καιρικές συνθήκες, οι οποίες εμφανίζουν μεγάλες διακυμάνσεις, όπως η ταχύτητα ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία.
- Συμβάλλουν στην διαφοροποίηση των ενεργειακών πηγών (energy diversification), αποφεύγοντας έτσι την εξάρτηση από συγκεκριμένες ενεργειακές πηγές.

- Επιτυγχάνουν την οικονομικότερη λειτουργία των συμβατικών μονάδων, καθώς αυτές φορτίζονται με σταθερότερο φορτίο και πλησίον της χαμηλότερης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

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

1.5.1 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 [4].

1.5.2 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 [4].

1.6 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.

1.6.1 Το υδρογόνο ως φορέας ενέργειας

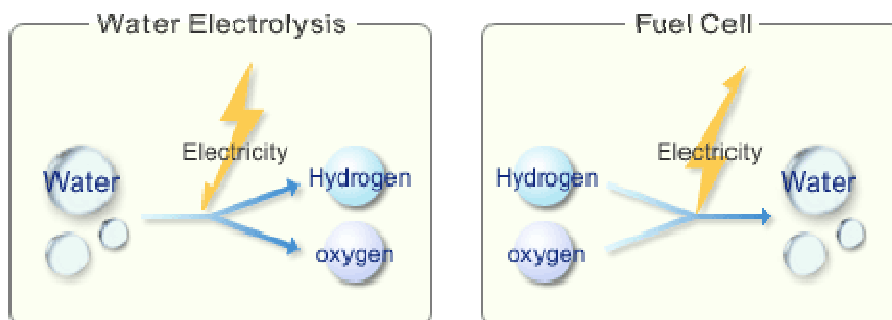
Το υδρογόνο θεωρείται από πολλούς ως το ενεργειακό μέσο του μέλλοντος που θα αντικαταστήσει τα συμβατικά υγρά και αέρια καύσιμα τόσο σε σταθερές εφαρμογές, όσο και στον τομέα των μεταφορών. Το υδρογόνο, μολονότι βρίσκεται σε αφθονία στη φύση, εμφανίζεται μόνο σε μορφή χημικών ενώσεων και μιγμάτων και 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:

- Το υδρογόνο έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο, 120,7 kJ/g και περίπου τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό της συμβατικής βενζίνης.
- 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.
- Συμβάλλει στη μείωση του ρυθμού κατανάλωσης των περιορισμένων φυσικών καυσίμων.
- 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:

- 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.
- Έλλειψη οργανωμένου δικτύου διανομής υδρογόνου.
- Σχετικά υψηλή τιμή σε σύγκριση με αυτήν της βενζίνης ή του πετρελαίου.
- 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 σχήμα 1.6



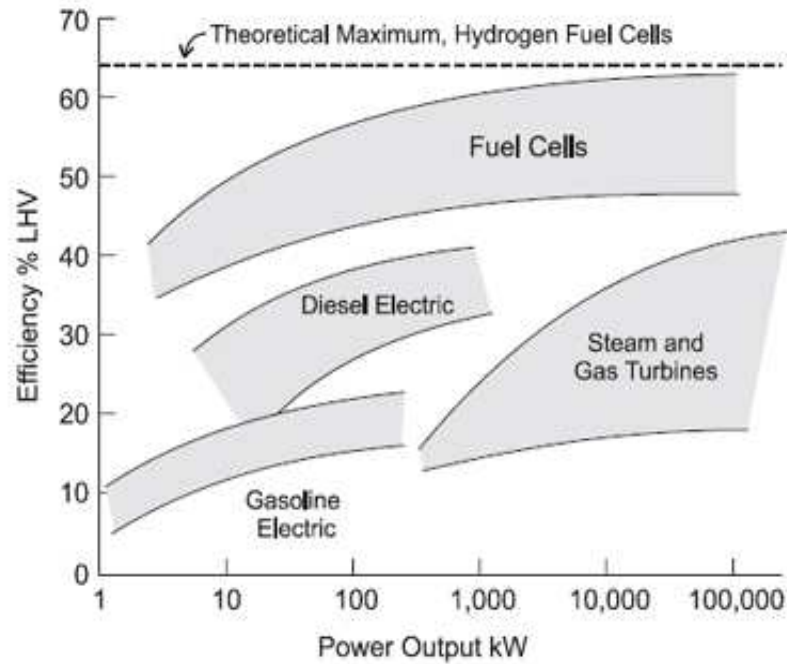
Σχήμα 1.6

Ηλεκτρόλυση – Κυψέλη καυσίμου

1.6.2 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 [5]:

- Αποτελούν πιο καθαρή πηγή ενέργειας.
- Έχουν μεγαλύτερη απόδοση (σχήμα 1.7). 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 καταναεμημένη παραγωγή της ενέργειας.



Σχήμα 1.7

Βαθμός απόδοσης διαφόρων πηγών ενέργειας

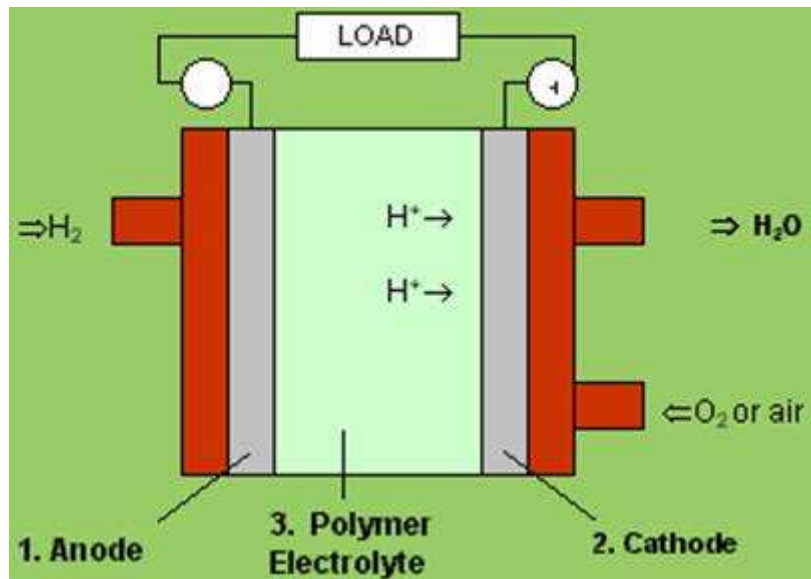
Τα κύρια πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου έναντι των μπαταριών είναι [5]:

- 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 τακτικά συντήρηση και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Από την άλλη, τα κύρια μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου είναι [5]:

- 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 (σχήμα 1.8). 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.



Σχήμα 1.8

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°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 [6]:

- 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	φωσφορικό οξύ	τήγματα ανθρακικών αλάτων (Li ₂ CO ₃ , K ₂ CO ₃)	αγώγιμο κεραμικό υλικό
Θερμοκρασία	50-80°C	60-90°C	160-220°C	620-660°C	800-1000°C
Καύσιμο	H ₂ , CH ₄ , CH ₃ OH	H ₂	H ₂ , CH ₄	CH ₄	H ₂ , CH ₄
Αντίδραση Ανόδου	H ₂ → 2H ⁺ +2e ⁻	H ₂ +2OH ⁻ → 2H ₂ O+2e ⁻	H ₂ → 2H ⁺ +2e ⁻	H ₂ +CO ₃ ²⁻ → H ₂ O+CO ₂ +2e ⁻	H ₂ +O ²⁻ → H ₂ O +2e ⁻
Αντίδραση Καθόδου	½O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O	½O ₂ + H ₂ O+2e ⁻ → 2OH ⁻	½ O ₂ + 2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂ O	½ O ₂ + CO ₂ +2e ⁻ → CO ₃ ²⁻	½ O 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, μικρός χρόνος εκκίνησης	γρήγορη αντίδραση καθόδου λόγω υψηλής θερμοκρασίας	μεγάλος βαθμός απόδοσης (συμπ. θερμότητας)	υψηλή θερμοκρασία, ευελιξία στην επιλογή του καυσίμου	υψηλή θερμοκρασία
Μειονεκτήματα	ακριβός καταλύτης (Pt)	πολύπλοκη απομάκρυνση του CO ₂	Pt καταλύτης, μικρή ισχύς, ογκώδες και βαρύ	μικρή βιωσιμότητα	μικρή βιωσιμότητα

Πίνακας 1.1

Γενικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου

1.6.3 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%.

Οι κυριότεροι τύποι μονάδων ηλεκτρόλυσης και τα χαρακτηριστικά τους είναι:

- Αλκαλικός ηλεκτρολύτης (Alkaline Electrolyzer).
- Ηλεκτρολύτης μεμβράνης εναλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Electrolyzer).

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

Πίνακας 1.2

Γενικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων μονάδων ηλεκτρόλυσης

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

- Υψηλότερος βαθμός ασφάλειας και αξιοπιστίας δεδομένου ότι στα κελιά δεν κυκλοφορεί καυστικός ηλεκτρολύτης.

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

1.6.4 Εφαρμογές τεχνολογιών υδρογόνου στα υβριδικά συστήματα

Το υδρογόνο αναμένεται να έχει καθοριστική συμβολή στην πορεία προς την αειφόρο ανάπτυξη λόγω του μεγάλου βαθμού συνέργειας που εμφανίζει με τις ΑΠΕ, δεδομένου ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο αποθήκευσης διακοπτόμενων ΑΠΕ. Ο αλγόριθμος λειτουργίας ενός υβριδικού συστήματος ΑΠΕ – υδρογόνου είναι απλός: Όταν υπάρχει περίσσεια ισχύος, αυτή διοχετεύεται στον ηλεκτρολύτη για την παραγωγή υδρογόνου, το οποίο αποθηκεύεται σε μία δεξαμενή για να είναι διαθέσιμο για την κυψέλη καυσίμου, όταν χρειαστεί. Όταν υπάρχει έλλειμμα ισχύος, τότε συνδέεται η κυψέλη καυσίμου, για να ισοσκελίσει τη ζήτηση, καταναλώνοντας το υδρογόνο της δεξαμενής. Ουσιαστικά, υλοποιείται ένας κύκλος παραγωγής – κατανάλωσης υδρογόνου. Αυτός ο κύκλος λειτουργίας είναι αναμφίβολα λιγότερο αποδοτικός από την αποθήκευση σε μπαταρίες ή υπερπυκνωτές, αλλά έχει χαμηλότερο κόστος και μεγαλύτερη αξιοπιστία: Η λειτουργία των μπαταριών/υπερπυκνωτών προϋποθέτει τη φόρτιση τους σε τακτά χρονικά διαστήματα, ενώ η λειτουργία των κυψελών καυσίμου βασίζεται στο υδρογόνο, το οποίο μπορεί να είναι διαθέσιμο είτε από τον ηλεκτρολύτη είτε από εξωτερική παροχή. Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός υβριδικού συστήματος οι τεχνολογίες υδρογόνου μπορούν να συνδυαστούν με άλλα συστήματα αποθήκευσης (π.χ. μπαταρίες, υπερπυκνωτές), καθώς και με συμβατικούς σταθμούς παραγωγής (π.χ. μηχανές εσωτερικής καύσης).

Τα υβριδικά συστήματα που βασίζονται στις τεχνολογίες υδρογόνου βρίσκουν πολλές εφαρμογές τόσο στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, όσο και στον τομέα της ηλεκτροκίνησης (ηλεκτρικά οχήματα). Παρακάτω, παρατίθενται κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα υβριδικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που χρησιμοποιούν την τεχνολογία του υδρογόνου [4], [7]:

A. Νησί Utsira

Το νησί Utsira βρίσκεται 20 km από τις δυτικές ακτές της Νορβηγίας, έχει έκταση 6.2 km² και με βάση την απογραφή του 2008 έχει πληθυσμό 235 κατοίκους. Η περιοχή έχει εξαιρετικές αιολικές συνθήκες και το φορτίο του νησιού είναι μικρό, αλλά εμφανίζει σημαντική διακύμανση. Κατά τη διάρκεια του έτους 2006 η αιχμή του φορτίου ήταν 900 kW και η συνολική ζήτηση ενέργειας 3.5 GWh. Το νησί διασυνδέεται με την ενδοχώρα μέσω ενός υποθαλάσσιου καλωδίου 1 MW, στοιχείο

που εξασφαλίζει εφεδρεία. Ο βασικός στόχος του υβριδικού συστήματος που κατασκευάστηκε στην περιοχή είναι να εξεταστεί εάν η αιολική ισχύς σε συνδυασμό με το υδρογόνο μπορούν να αποτελέσουν μια αξιόπιστη ενεργειακή λύση για απομακρυσμένες περιοχές. Το υβριδικό σύστημα απαρτίζεται από τα ακόλουθα:

Στοιχεία Συστήματος	Χαρακτηριστικά Μεγέθη	Κατασκευαστής
2 Ανεμογεννήτριες	2*600 kW	Enercon
Συστοιχία Μπαταριών	35 kWh	Enercon
1 Σφόνδυλος	5 kWh, 200 kW _{max}	Enercon
1 Σύγχρονη Μηχανή	100 kVA	Enercon
1 Ηλεκτρολύτης	10 Nm ³ /h – 48 kW	Hydro Electrolyser
1 Συμπιεστής	11 Nm ³ /h – 5.5 kW	Andreas Hofer
1 Μονάδα Αποθήκευσης Υδρογόνου	12 m ³ υπό πίεση 200 bar → 2400 Nm ³	Martin Larsson
1 Μηχανή Εσωτερικής Καύσης	55 kW	Continental
1 Κυψέλη Καυσίμου	10 kW	IRD

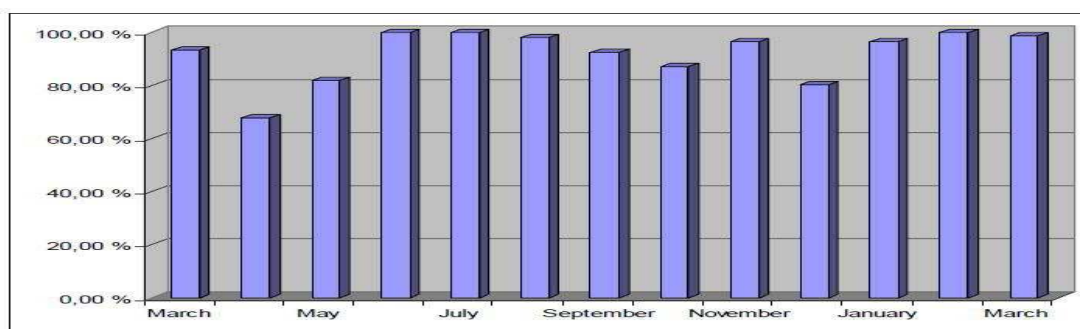
Πίνακας 1.3

Στοιχεία υβριδικού συστήματος νησιού Utsira

Τα σημαντικότερα επιτεύγματα κατά το πρώτο έτος της λειτουργίας (2004 - 2005) είναι:

- Πάνω από έξι μήνες σε αυτόνομη λειτουργία.
- Διαθεσιμότητα κοντά στο 100% (σχήμα 1.9).
- Πολύ καλή λειτουργικότητα.
- Πολύ καλή ποιότητα ισχύος.
- Κανένα ατύχημα.
- Συνεισφορά στις τοπικές δραστηριότητες και στον τουρισμό

Η διαθεσιμότητα του συστήματος κατά την περίοδο Μάρτιος 2005 – Μάρτιος 2006 φαίνεται στο σχήμα 1.9. Η απόκλιση από το 100% οφείλεται σε σφάλματα του συστήματος και σε αυτές τις περιπτώσεις οι καταναλωτές συνδέονταν στο ηπειρωτικό δίκτυο.

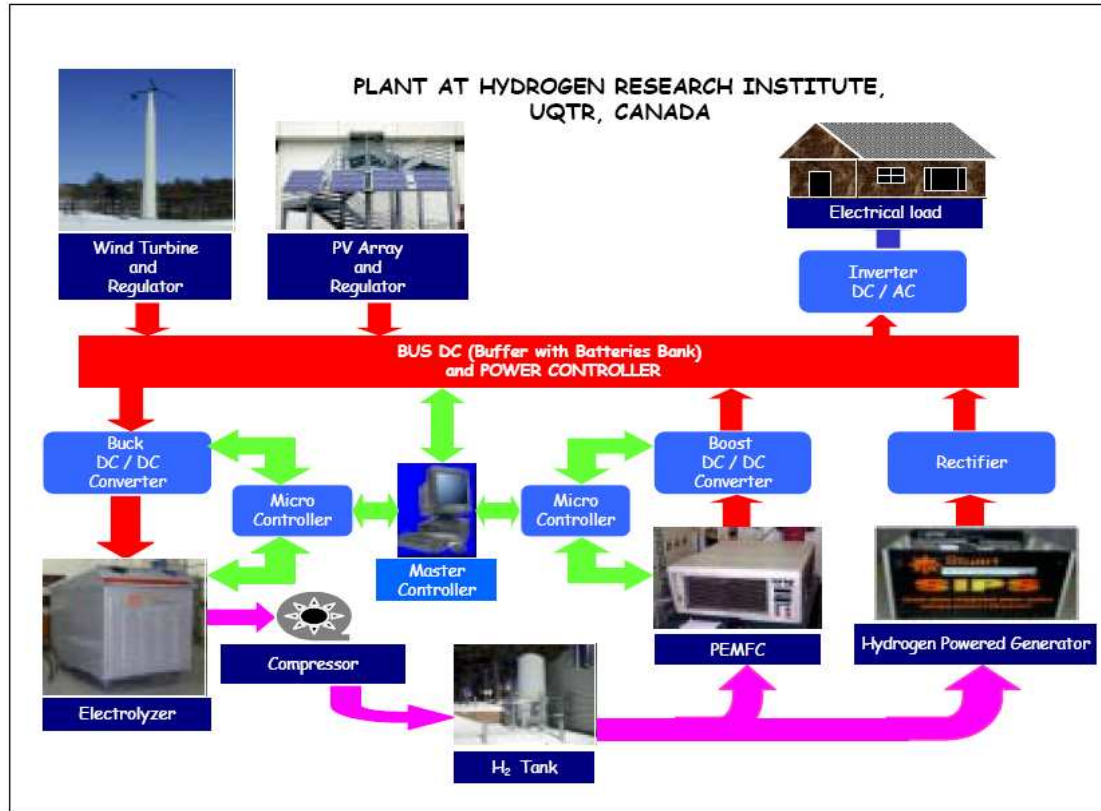


Σχήμα 1.9

Διαθεσιμότητα υβριδικού συστήματος νησιού Utsira την περίοδο Μάρτιος 2005 – Μάρτιος 2006

B. *Ινστιτούτο Έρευνας Υδρογόνου (Hydrogen Research Institute - HRI), Καναδάς*

Το Ινστιτούτο Έρευνας Υδρογόνου του Καναδά εγκατέστησε ένα υβριδικό σύστημα ΑΠΕ – Υδρογόνου με βασικό στόχο την επίτευξη αυτόνομης λειτουργίας με μακροπρόθεσμη αποθήκευση υδρογόνου. Η δομή του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.10

Δομή υβριδικού συστήματος HRI

Συγκεκριμένα, το σύστημα περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

Στοιχεία Συστήματος	Χαρακτηριστικά
Ανεμογεννήτρια	10 kW, 3φ PMSG, VCS-10 – 48 V DC, Bergey – BWC Excel
Φωτοβολταϊκή γεννήτρια	1 kW, Golden Genesis GP 64 PV Modules (4S*4P) with Charge Controller
Ηλεκτρολύτης	5 kW, alkaline, Stuart Energy System
Κυψέλη καυσίμου	5 kW, PEM MK5-E, 19-35 V, Ballard Power System
Συστοιχία μπαταριών	42.240 kWh
Δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου	10 bar, 3.8 m ³ , 125 kWh

Πίνακας 1.4

Στοιχεία υβριδικού συστήματος HRI

Οι αισθητήρες του συστήματος πραγματοποίησαν μετρήσεις, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα του συστήματος. Τα κύρια επιτεύγματα από τη λειτουργία του συστήματος είναι τα εξής:

- Αυτόνομη λειτουργία.
- Επιτυχής διασύνδεση των συσκευών στο ζυγό ΣΡ με χρήση ηλεκτρονικών ισχύος.
- Βέλτιστη διαχείριση ενέργειας με τη βοήθεια του διαχειριστικού αλγόριθμου.
- Μείωση της κυμάτωσης ισχύος του ηλεκτρολύτη και αντιμετώπιση μεταβατικών φαινομένων της παραγωγής και του φορτίου από τις μπαταρίες.
- Αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος σε διάφορους τύπους φορτίων.

2 Μοντελοποίηση του υβριδικού συστήματος

2.1 Ανεμογεννήτρια μονίμων μαγνητών - μεταβλητών στροφών

Οι πρώτες κατασκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική αποτελούνταν από ασύγχρονες γεννήτριες σταθερών στροφών με κατάλληλο μηχανικό κιβώτιο πολλαπλασιασμού. Οι στροφές του ανεμοκινητήρα για το λόγο αυτό κινούνταν σε πολύ στενά πλαίσια, οπότε η παραγωγή ισχύος ήταν χαμηλότερη σε σχέση αυτή των μεταβλητών στροφών, ενώ οι διακυμάνσεις του ανέμου προκαλούσαν καταπονήσεις στα μηχανικά μέρη και υποβάθμιση της ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος προς το δίκτυο. Η τάση στις εφαρμογές μικρής ισχύος είναι η εξάλειψη του κιβωτίου ταχυτήτων, ώστε να περιοριστούν οι μηχανικές καταπονήσεις και βλάβες, με την κατασκευή γεννητριών πολλών πόλων, και η χρήση μονίμων μαγνητών, ώστε να είναι δυνατή η χρήση της γεννήτριας μακριά από το δίκτυο. Τα υλικά των μονίμων μαγνητών παλαιότερα εμφάνιζαν προβλήματα απομαγνήτισης με το χρόνο και σε έντονες πεδιακές μεταβολές. Όμως, τα κράματα με σπάνιες γαίες όπως το νεοδύμιο, που χρησιμοποιούνται σήμερα, εμφανίζουν μεγάλη σταθερότητα στα χαρακτηριστικά τους και είναι κατάλληλα για τη χρήση σε ανεμογεννήτριες, αν και εμφανίζουν σχετικά αυξημένο κόστος [8].

2.1.1 Αεροδυναμικό μέρος

Η αεροδυναμική ισχύς του ανέμου που μετατρέπεται σε μηχανική από τον ανεμοκινητήρα υπολογίζεται από την πολύ γνωστή εξίσωση.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) V_w^3 \quad (2.1)$$

Όπου ρ πυκνότητα του αέρα, λαμβάνεται στη παρούσα εργασία 1.25 kg/m^3 .

Η πυκνότητα του αέρα συνδέεται με την μάζα του κινούμενου αέρα, m από τη σχέση:

$$m = \rho A V_w \quad (2.2)$$

Όπου A η επιφάνεια που διαπερνά κάθετα ο άνεμος και συγκεκριμένα $A = \pi R^2$, β η γωνία pitch της έλικας και $C_p(\lambda, \beta)$ ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος, ο οποίος είναι συνάρτηση του λόγου ταχυτήτων:

$$\lambda = \frac{\omega_R R}{V_w} \quad (2.3)$$

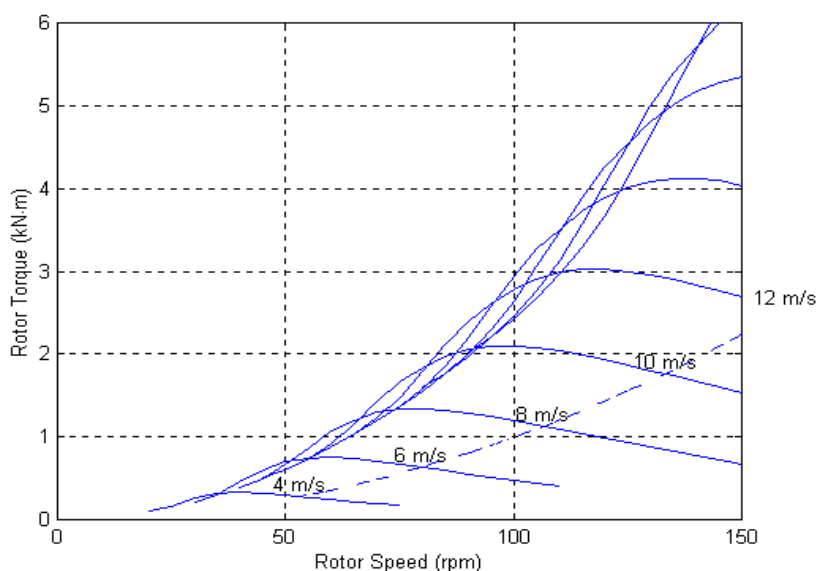
Όπου R η ακτίνα και ω_R η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της έλικας του ανεμοκινητήρα.

Η μέγιστη τιμή του $C_p(\lambda, \beta)$ σύμφωνα με την απόδειξη του A. Betz είναι 0.593, εξαιτίας όμως του γεγονότος ότι υπάρχουν πάντα αεροδυναμικές απώλειες οι συνήθειες

τιμές που συναντά κανείς στην πράξη είναι από 0.3 έως 0.5. Για κάθε ταχύτητα ανέμου υπάρχει ένα αντίστοιχο λ , για το οποίο ο αεροδυναμικός συντελεστής λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του, μεγιστοποιώντας την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Έτσι, για βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή και διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής σχηματίζονται χαρακτηριστικές ισχύος – στροφών. Αντίστοιχες χαρακτηριστικές συσχετίζουν και τη ροπή με τις στροφές και προκύπτουν από τη σχέση:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_R} \quad (2.4)$$

Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ροπής – στροφών του ανεμοκινητήρα για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Η μέγιστη ισχύς στις καμπύλες αυτές εμφανίζεται σε σημεία που το γινόμενο της ροπής επί των στροφών μεγιστοποιείται. Συνδυάζοντας αυτά τα σημεία εξάγουμε τη βέλτιστη χαρακτηριστική ροπής – στροφών. Η χαρακτηριστική αυτή καμπύλη αποτελεί το ίχνος πάνω στο οποίο θα πρέπει να λειτουργήσει το σύστημα, ώστε να λαμβάνεται στην έξοδο η μέγιστη ισχύς που μπορεί να απορροφηθεί από τον άνεμο.

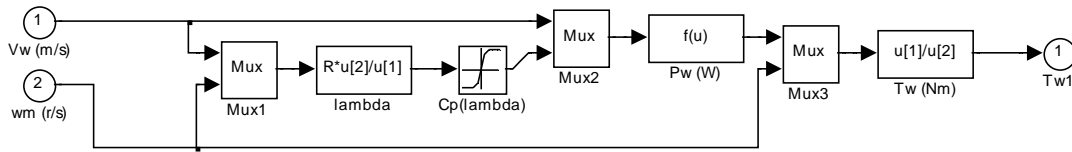


Σχήμα 2.1

Χαρακτηριστική Ροπής-Στροφών

2.1.1.1 Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους

Βάσει των εξισώσεων που περιγράφουν το αεροδυναμικό μέρος της Α/Γ κατασκευάστηκε και το αντίστοιχο μοντέλο στο περιβάλλον του SIMULINK/MATLAB.



Σχήμα 2.2

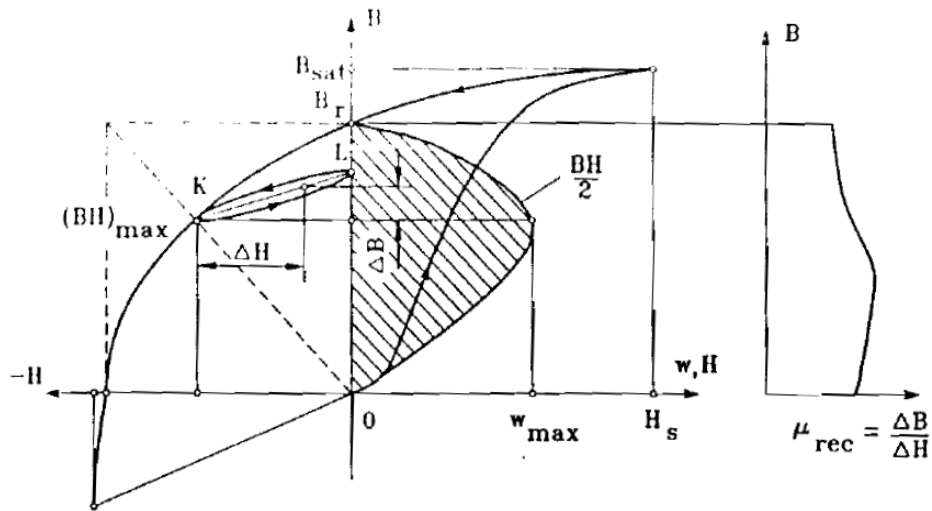
Μοντέλο αεροδυναμικού μέρους

Η ταχύτητα ανέμου και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής αποτελούν τις εισόδους του μοντέλου. Με βάση τις στιγμιαίες τιμές αυτών των μεγεθών υπολογίζεται από τη σχέση 2.3 ο στιγμιαίος λόγος ταχυτήτων. Στη συνέχεια, από το στιγμιαίο λόγο ταχυτήτων με την βοήθεια ενός πίνακα αναφοράς (lookup table) αντιστοιχείται η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή. Με δεδομένα λοιπόν τα μεγέθη αυτά σε κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται η αεροδυναμική ροπή που ασκείται στον άξονα της γεννήτριας από τις σχέσεις 2.1 και 2.4.

2.1.2 Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών

Η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) μπορεί να παράγει μαγνητική ροή στο διάκενο χωρίς κανένα σύστημα διέγερσης ούτε ηλεκτρομαγνητική μετατροπή. Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι της είναι: Καλύτερη απόδοση δεδομένου ότι δεν υπάρχει ηλεκτρική σύνδεση στο δρομέα με αποτέλεσμα μειωμένες απώλειες, ανάπτυξη μεγαλύτερης ροπής ή μεγαλύτερης ισχύος εξόδου ανά μονάδα. Ακόμη, η δυναμική συμπεριφορά είναι καλύτερη στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο. Όπως κάθε άλλο φερομαγνητικό υλικό, η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών περιγράφεται από ένα $B - H$ βρόγχο υστέρησης. Συγκεκριμένα, ο βρόχος αυτός στις μηχανές αυτού του τύπου είναι πεπλατυσμένος όπως δείχνει και το ακόλουθο σχήμα. Η αρχή λειτουργίας των μηχανών μόνιμων μαγνητών περιγράφεται από το τμήμα της καμπύλης μαγνητίσεως που βρίσκεται στο δεύτερο τεταρτημόριο, γνωστή και ως απομαγνητίζουσα καμπύλη. Στη περίπτωση που μια ανάστροφη πυκνότητα μαγνητικής ροής εφαρμόζεται στην ήδη υπάρχουσα, η συνολική πυκνότητα μαγνητικής ροής πέφτει ώσπου τελικά φτάνει στο σημείο K , σχήμα 2.3. Εν συνεχεία, όταν η ανάστροφη αυτή ροή αφαιρεθεί τότε, η πυκνότητα μαγνητικής ροής επιστρέφει στο σημείο που ήταν αρχικά (σημείο L) κατά μήκος ενός μικρού βρόγχου υστέρησης. Με τον τρόπο αυτό βλέπουμε ότι η εφαρμογή ενός ανάστροφου πεδίου έχει ως συνέπεια την μείωση του παραμένοντα μαγνητισμού. Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία εκ νέου παρατηρούμε ότι θα έχουμε ξανά μείωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής σε σημείο αρκετά κοντά στο K όπως και πριν. Ο μικρός αυτός βρόχος υστέρησης μπορεί να αντικατασταθεί από μια γραμμή την οποία ονομάζουμε χαρακτηριστική απομαγνήτισης και έχει μια κλίση που ονομάζεται διαφορική διαπερατότητα. Όσο το πλάτος του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου H δεν ξεπερνά την μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο K , ο μόνιμος μαγνήτης θεωρείται ότι παραμένει ικανοποιητικά «μόνιμος» ως προς το μαγνητικό πεδίο του. Σε περίπτωση που ένα μεγαλύτερο πεδίο H εφαρμοστεί, τότε η

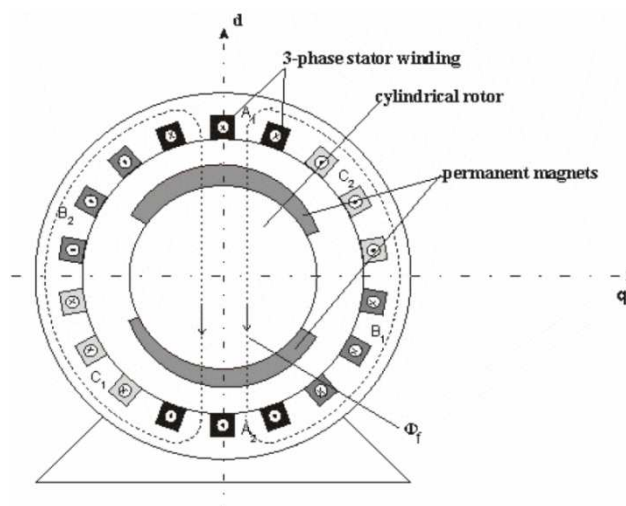
μείωση της συνολικής πυκνότητας μαγνητικής ροής θα είναι μικρότερη του σημείου K.



Σχήμα 2.3

Τυπική μορφή βρόγχου υστέρησης μηχανής μόνιμων μαγνητών

Οι δύο συνηθέστεροι τύποι μηχανών μόνιμων μαγνητών είναι αυτές με ομοιόμορφο στρεφόμενο, ημιτονοειδές κατανομημένο πεδίο στάτη και οι διακοπτικοί, τραπεζοειδής (με πεδίο στο στάτη το οποίο εναλλάσσεται διακοπτικά σε διακριτά βήματα). Κατασκευαστικά, ο δρομέας του αποτελείται από ένα σιδηροπυρήνα, ο οποίος μπορεί να είναι συμπαγής είτε να αποτελείται από φύλλα σιδήρου. Λεπτοί μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του πυρήνα. Εναλλασσόμενοι μαγνήτες αντίθετης μαγνητικής φοράς παράγουν πυκνότητα ροής ακτινικής κατεύθυνσης διαμέσου του διακένου. Στο σχήμα 2.4 φαίνεται η τοπολογία της μηχανής μόνιμων μαγνητών.

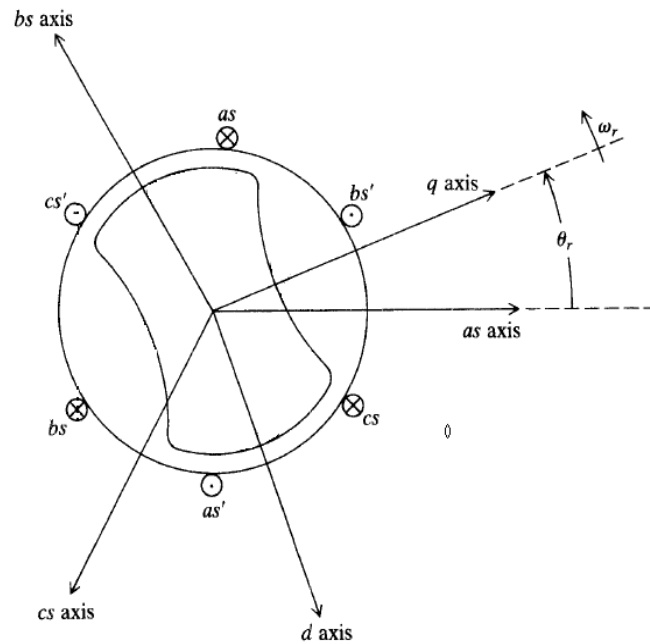


Σχήμα 2.4

Τοπολογία της μηχανής μόνιμων μαγνητών

2.1.2.1 Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών

Το μοντέλο προσομοιώνει την λειτουργία της γεννήτριας χρησιμοποιώντας ένα d-q πλαίσιο που περιστρέφεται με την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5. Οι εξισώσεις γενικευμένης θεωρίας που περιγράφουν το μοντέλο της γεννήτριας [8], [9], [10], [11] είναι ακόλουθες.



Σχήμα 2.5

Στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς στο οποίο περιγράφονται οι εξισώσεις γενικευμένης θεωρίας της μηχανής μονίμων μαγνητών

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s i_{sd} - \frac{d\lambda_{sd}}{dt} + \omega_r \lambda_{sq} \\ V_{sq} = -R_s i_{sq} - \frac{d\lambda_{sq}}{dt} + \omega_r \lambda_{sd} \end{cases} \quad (2.5)$$

Όπου λ_{sd} , λ_{sq} είναι οι d και q πυκνότητες της μαγνητικής ροής στο διάκενο και δίνονται από τις σχέσεις

$$\begin{cases} \lambda_{sd} = L_s i_s + \psi_{PM} \\ \lambda_{sq} = L_s i_{sq} \end{cases} \quad (2.6)$$

Όπου ψ_{PM} είναι η μαγνητική ροή του μόνιμου μαγνήτη.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$T_e = \frac{m_s n_p}{2} (\lambda_{sq} i_{sd} - \lambda_{sd} i_{sq}) \quad (2.7)$$

Όπου m_s είναι ο αριθμός των φάσεων και n_p ο αριθμός των ζευγών πόλων. Από την 2.6 και τις 2.7 παίρνουμε την τελική εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής.

$$T_e = -\frac{m_s m_p}{2} \psi_{PM} i_{sq} = -K_c i_{sq} = K_c \sqrt{2} I_s \sin(\delta) \quad (2.8)$$

Όπου K_c είναι η σταθερά της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, δ είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του ρεύματος τυμπάνου (I_s) και του d άξονα.

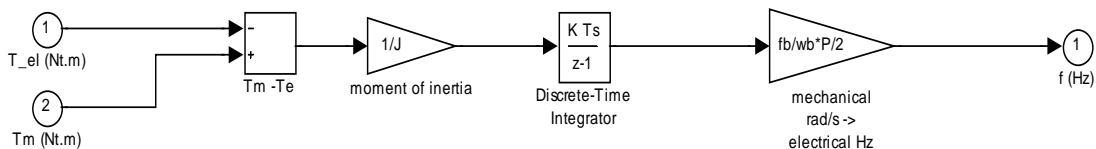
$$\left\{ \begin{array}{l} i_{sd} = \frac{-V_{sd} + \omega_r L_s i_{sq}}{L_s s + R_s} \\ i_{sq} = \frac{-V_{sq} + \omega_r L_s i_{sd} - \omega_r \psi_{PM}}{L_s s + R_s} \\ T_e = -K_c i_{sq} \\ \omega_r = \frac{n_p}{J s + B} (T_T - T_e) \\ \theta_r = \frac{\omega_r}{s} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Τέλος, η στοιχειώδης εξίσωση των ροπών χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ταχύτητας του δρομέα.

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.10)$$

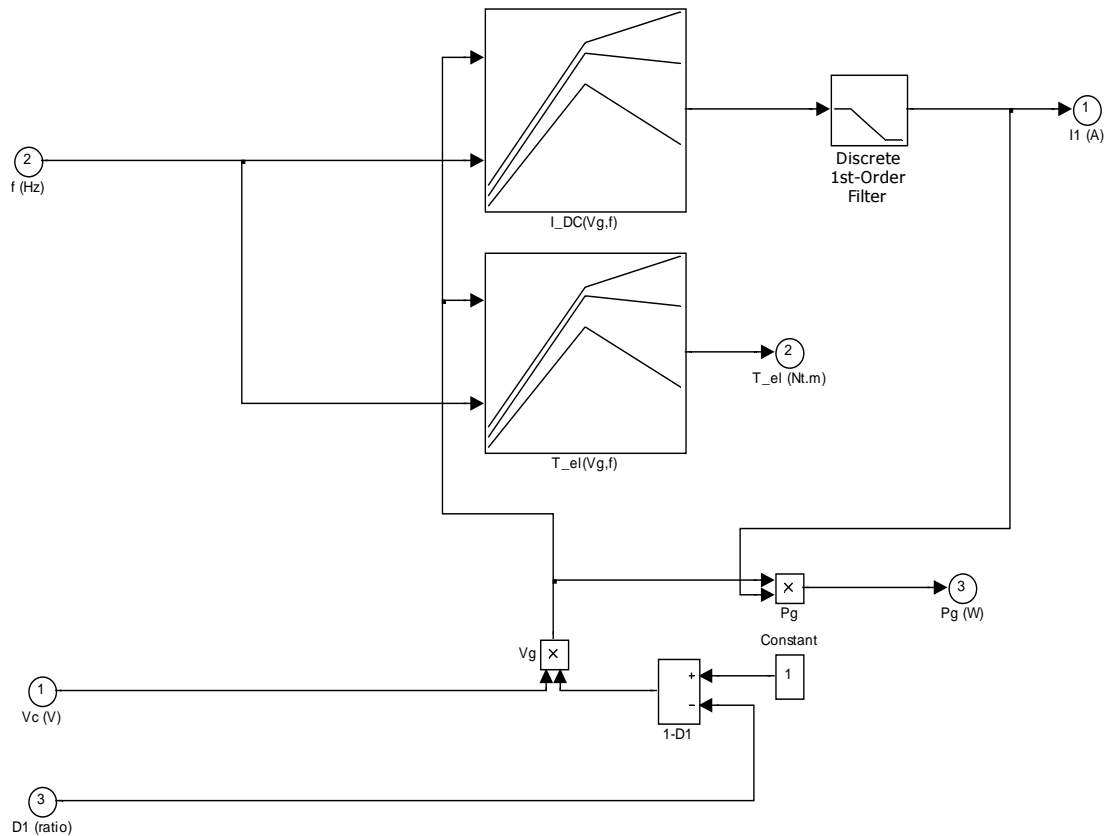
Όπου J η ροπή αδράνειας του δρομέα και $\frac{d\omega}{dt}$ η γωνιακή επιτάχυνσή του.

Στην πράξη, χρησιμοποιήθηκαν πίνακες αναφοράς (lookup tables) για την προσομοίωση των χαρακτηριστικών της γεννήτριας. Τα επιμέρους υποσυστήματα φαίνονται παρακάτω.



Σχήμα 2.6

Υποσύστημα Machine 1



Σχήμα 2.7

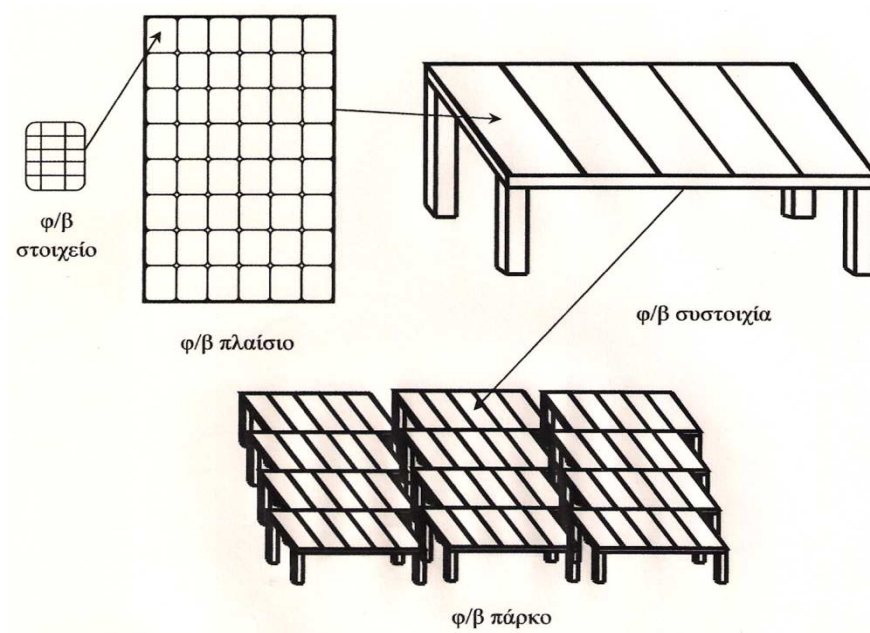
Υποσύστημα Machine 2

2.2 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια

Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια (φ/β γεννήτρια) εκμεταλλεύεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την εμφάνιση διαφοράς δυναμικού στα άκρα μίας διόδου που ακτινοβολείται από τον ήλιο, για την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φ/β στοιχείων είναι οι εξής [12]:

- Τεχνολογία παραγωγής ημιαγώγιμων υλικών με κρυσταλλική δομή, την πλειοψηφία των οποίων αποτελεί το πυρίτιο.
- Τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film), η οποία ονομάζεται έτσι επειδή το πάχος των στοιχείων είναι πολύ μικρό (μερικά μόνο μm).
- 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).

Η 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 στο σχήμα 2.8 [12].

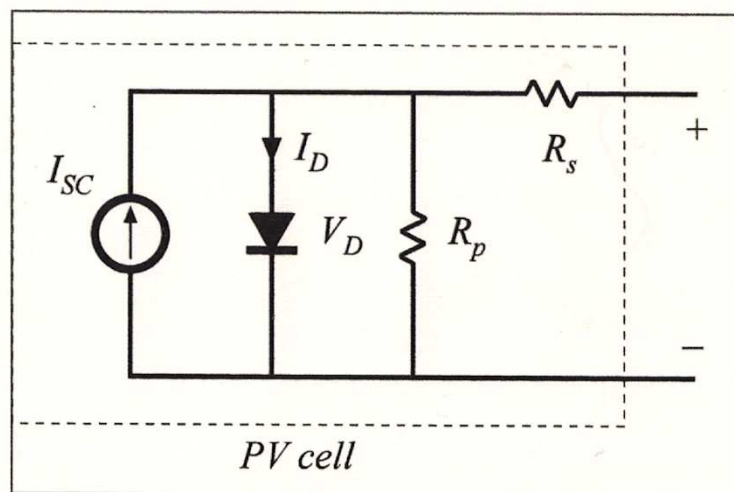


Σχήμα 2.8

Δομή φ/β συστημάτων

2.2.1 Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι η μοντελοποίηση ενός φ/β πλαισίου και η αξιοποίηση αυτού ως δομικό συστατικό για την κατασκευή της φ/β γεννήτριας. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φ/β στοιχείου είναι το εξής:



Σχήμα 2.9

Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φ/β στοιχείου

Παρατηρούμε ότι το φ/β στοιχείο αποτελεί μια πηγή ρεύματος, που ελέγχεται από μία δίοδο. Το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει ακόμα την αντίσταση σειράς R_s , η οποία εμποδίζει την κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και την παράλληλη αντίσταση R_p , η οποία εμφανίζεται λόγω διαρροών ρεύματος.

Η χαρακτηριστική εξίσωση της διόδου είναι:

$$I_D = I_0 \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right) \quad (2.11)$$

Όπου I_D το ρεύμα της διόδου, I_0 το ανάστροφο ρεύμα κόρου, V_D η τάση στα άκρα της διόδου και V_T η θερμική τάση (25.7 mV σε θερμοκρασία δωματίου 298 K), η οποία ορίζεται ως εξής:

$$V_T = kT/q \quad (2.12)$$

Όπου q το φορτίο ενός ηλεκτρονίου, k η σταθερά του Boltzmann και T η απόλυτη θερμοκρασία της επαφής p-n.

Η τάση στα άκρα της διόδου V_D υπολογίζεται από την επίλυση της εξίσωσης:

$$I_{SC} - I_D - \frac{V_D}{R_p} - I_{PV} = 0 \quad (2.13)$$

Όπου I_{PV} το ρεύμα εξόδου του φ/β στοιχείου.

Τέλος, η τάση στα άκρα του φ/β στοιχείου V_{PVcell} υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$V_{PVcell} = V_D - R_s I_{PV} \quad (2.14)$$

Οι παράμετροι βάσει των οποίων μοντελοποιήθηκε το φ/β στοιχείο είναι:

Παράμετροι	Τιμές
Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC}	5.45 A
Τάση ανοικτοκύκλωσης V_{OC}	22.2 V
Ονομαστικό ρεύμα στο MPP I_R	4.95 A
Ονομαστική τάση στο MPP V_R	17.2 V

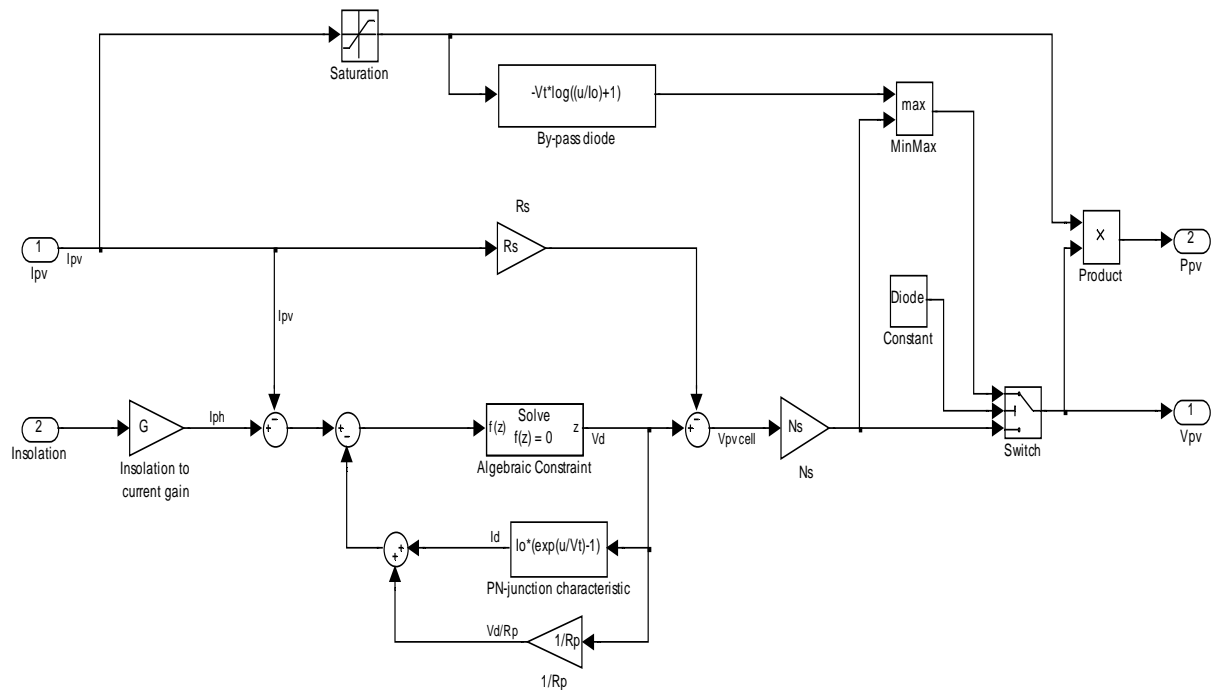
Πίνακας 2.1

Παράμετροι φ/β στοιχείου

Επομένως, έχουμε συντελεστή πλήρωσης (fill factor):

$$FF = I_R V_R / I_{SC} V_{OC} = 70.37\% \quad (2.15)$$

Η μοντελοποίηση του φ/β στοιχείου βασίζεται στις ανωτέρω εξισώσεις. Συνδέοντας εν σειρά τα φ/β στοιχεία, κατασκευάστηκε το μοντέλο ενός φ/β πλαισίου στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB.

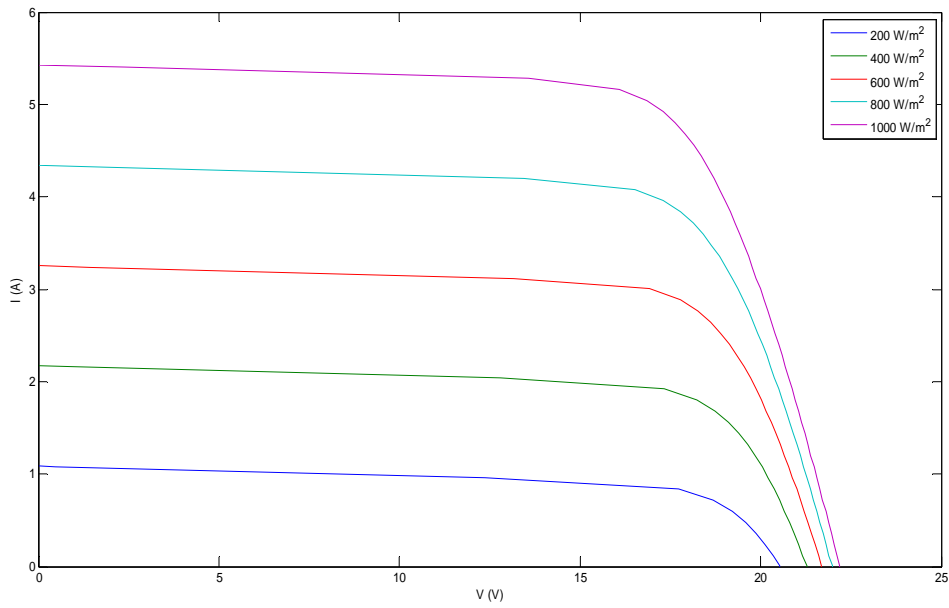


Σχήμα 2.10

Μοντέλο φ/β πλαισίου

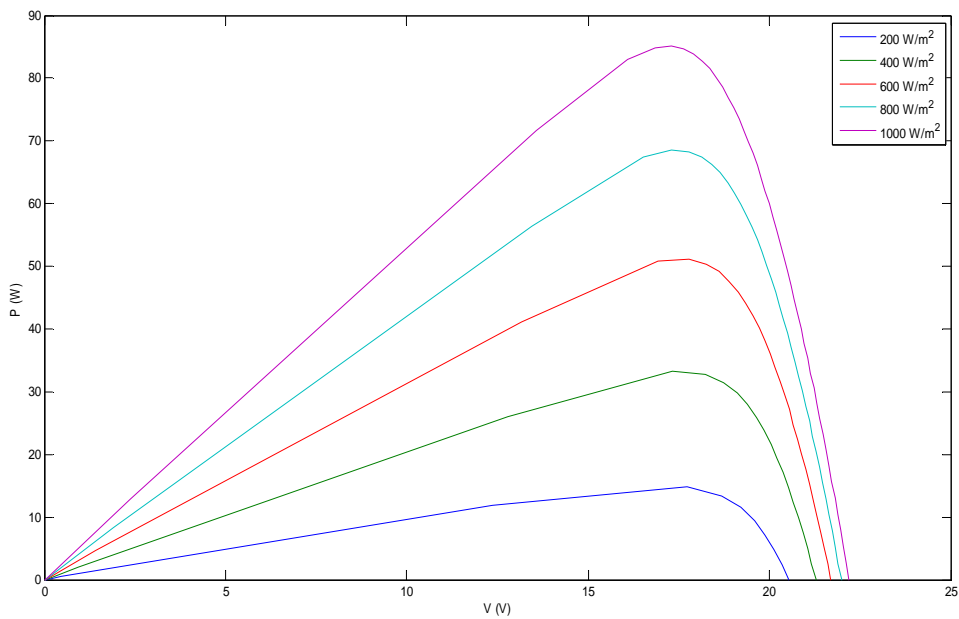
Το μοντέλο έχει ως εισόδους την ηλιακή ακτινοβολία (σε W/m^2) και το ρεύμα του φορτίου (σε A) και ως εξόδους την τάση στα άκρα του φ/β πλαισίου (σε V) και την ισχύ εξόδου (σε W). Η ηλιακή ακτινοβολία μέσω κατάλληλου κέρδους μετατρέπεται σε ένταση ρεύματος (I_{SC}). Το υποσύστημα Algebraic Constraint λύνει την εξίσωση 2.13 ως προς V_D , ενώ το υποσύστημα PN-junction characteristic υλοποιεί την χαρακτηριστική εξίσωση της διόδου (εξίσωση 2.11). Ο αθροιστής $V_{pv,cell}$ υλοποιεί την εξ. 2.14. Η μεταβλητή N_s συμβολίζει το αριθμό των εν σειρά συνδεδεμένων φ/β στοιχείων, τα οποία δομούν το φ/β πλαίσιο, ενώ το υποσύστημα By-pass diode μοντελοποιεί μία δίοδο ελεύθερης διέλευσης στα άκρα της εξόδου, ανάλογα με το αν η ένδειξη Diode είναι ενεργοποιημένη.

Χρησιμοποιώντας το παραπάνω μοντέλο, εξάγαμε τις καμπύλες $I - V$ και $P - V$ του φωτοβολταϊκού για διάφορες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα $P - V$, το σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point), δηλαδή το μέγιστο της καμπύλης, μετατοπίζεται με την αλλαγή της ηλιακής ακτινοβολίας. Για αυτό το λόγο, όπως θα αναπτυχθεί και παρακάτω, το φ/β θα πρέπει να λειτουργεί σε αυτό το ζεύγος τάσης - ρεύματος, για το οποίο μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου του.



Σχήμα 2.11

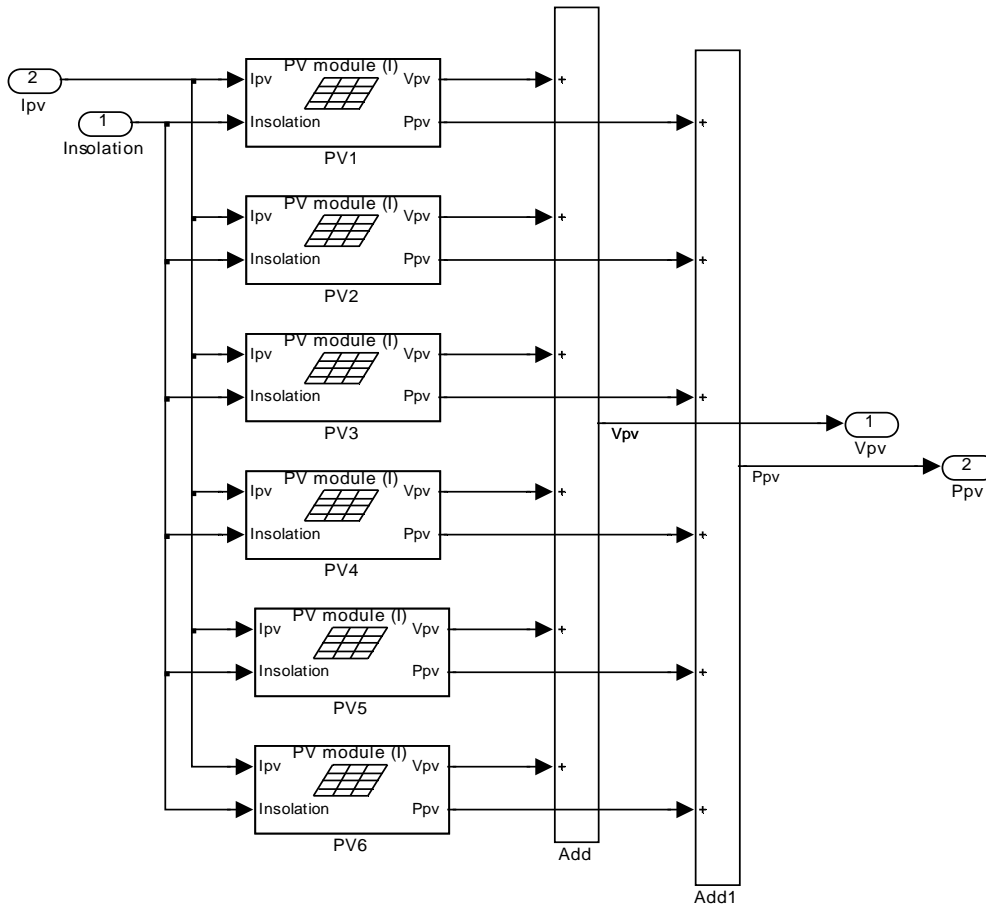
I-V καμπύλες φ/β πλαισίου



Σχήμα 2.12

P-V καμπύλες φ/β πλαισίου

Διασυνδέοντας τα φ/β πλαίσια σε σειρά ή παράλληλα, κατασκευάζουμε την φ/β γεννήτρια. Στο σχήμα 2.14 φαίνεται η σε σειρά συνδεσμολογία 6 φ/β πλαισίων για την κατασκευή μιας φ/β συστοιχίας (pv array/string).



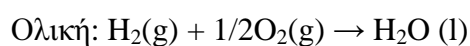
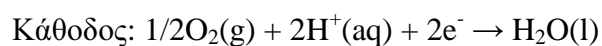
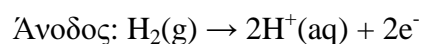
Σχήμα 2.13

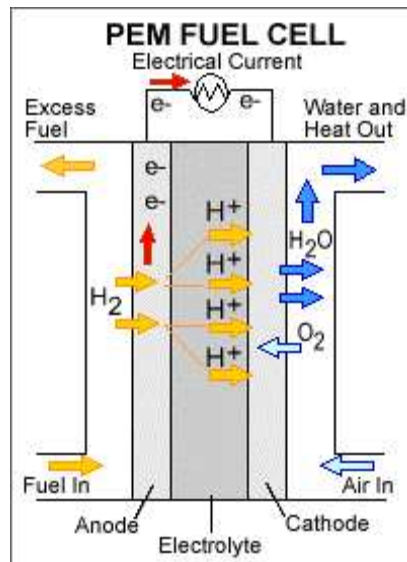
Μοντέλο φ/β συστοιχίας αποτελούμενης από 6 φ/β πλαίσια σε σειρά

2.3 Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC)

2.3.1 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Σε κάθε τύπο κυψέλης καυσίμου πραγματοποιείται μια οξειδοαναγωγή στα ηλεκτρόδιά της. Στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου PEM (σχήμα 2.14) οξειδώνεται το υδρογόνο H_2 , ενώ στην κάθοδο έχουμε αναγωγή του οξυγόνου O_2 . Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μια τέτοια κυψέλη είναι οι εξής:





Σχήμα 2.14

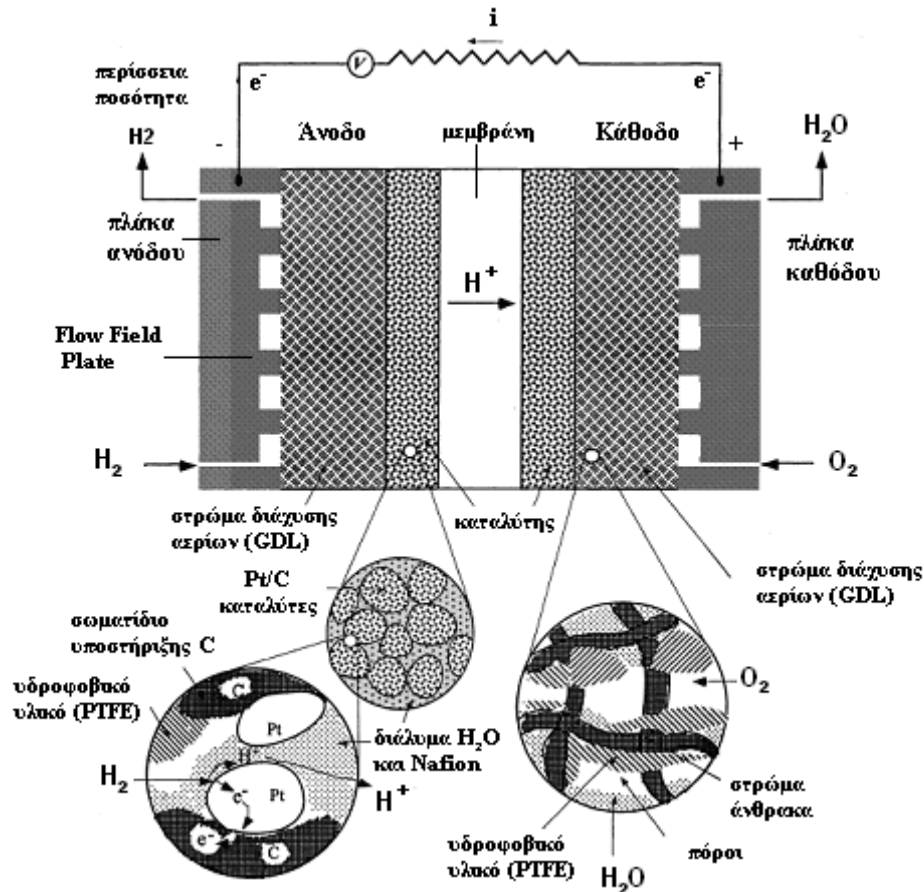
Κυψέλη Καυσίμου PEM

Στην άνοδο το εισερχόμενο υδρογόνο υπό την επίδραση ενός καταλύτη (λευκόχρυσος Pt) οξειδώνεται και διασπάται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Το μεταφερόμενο ιόν, που στην περίπτωση της κυψέλης καυσίμου PEM είναι το κατιόν H^+ , μεταφέρεται από την άνοδο στην κάθοδο, διασχίζοντας τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι αγωγός 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 [5].

2.3.2 Δομή της κυψέλης

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

Στο σχήμα 2.15 παρουσιάζεται η εσωτερική δομή της κυψέλης:



Σχήμα 2.15

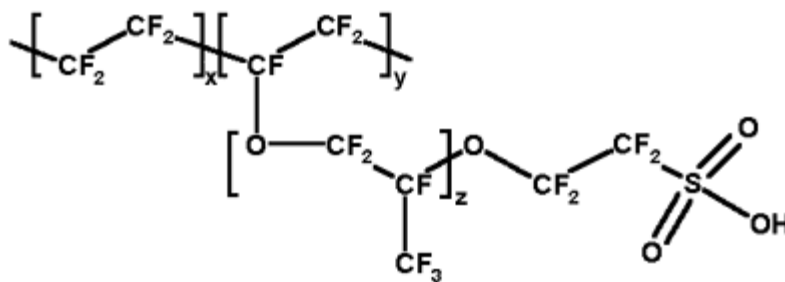
Εσωτερική δομή κυψέλης καυσίμου PEM

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

2.3.2.1 Μεμβράνη

Η μεμβράνη της κυψέλης αποτελείται συνήθως από έναν 25-200μm λεπτό ηλεκτρολύτη που είναι αγωγίμος για τα πρωτόνια. Η μεμβράνη αυτή πρέπει να είναι επίσης αεροστεγής, να είναι μονωτής για τα ηλεκτρόνια και να έχει μεγάλη μηχανική και θερμική αντοχή σε περίπτωση μεταβολής της πίεσης. Οι ηλεκτρολύτες των κυψελών καυσίμου PEMFC αποτελούνται από μία πολυμερή μεμβράνη σε στερεά μορφή. Το πιο συνηθισμένο πολυμερές που χρησιμοποιείται σήμερα είναι το Nafion που κατασκευάζεται από την εταιρεία DuPont (σχήμα 2.16) και έχει δομικές ομοιότητες με το Teflon.



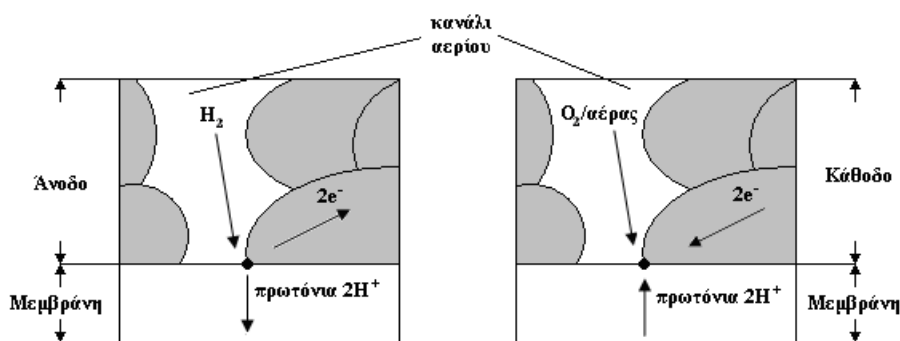
Σχήμα 2.16

Δομή του πολυμερούς Nafion ($C_7HF_{13}O_5S C_2F_4$)

Από το σχήμα μπορούμε να διακρίνουμε τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή είναι ο κορμός των φθοροανθράκων ($-CF_2-CF-CF_2-$), η οποία επαναλαμβάνεται εκατοντάδες φορές μέσα στη μεμβράνη. Η δεύτερη περιοχή αποτελείται από την πλευρική αλυσίδα ($O-CF_2-CF-CF_3-O-CF_2-CF_2-$ και συνδέει τον κορμό με την τρίτη περιοχή που αποτελείται από ιόντα θεικού 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 [2]. Για να επιτευχθεί αυτό, η μεμβράνη πρέπει να είναι ενυδατωμένη για να είναι αγώγιμη για τα H^+ . Για το λόγο αυτό η θερμοκρασία λειτουργίας πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Όλη αυτή η λειτουργία επιδεικνύει πόσο απαραίτητη και σημαντική είναι η διαχείριση του νερού μέσα στην κυψέλη καυσίμου. Στην πράξη η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί κάτω από τους $100^\circ C$, ενώ σε περιπτώσεις που λειτουργούν κυψέλες καυσίμου πάνω από τους $100^\circ C$, πρέπει να επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης ώστε το νερό να διατηρείται σε υγρή μορφή.

2.3.2.2 Ηλεκτρόδια

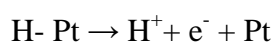
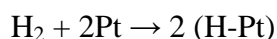
Τα ηλεκτρόδια μαζί με τη μεμβράνη αποτελούν την MEA (Membran Electrode Assembly). Περιέχουν σωματίδια λευκόχρυσου (Pt) ως καταλύτη και παρουσιάζουν καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, μεγάλη επιφάνεια σύνδεσης με τον ηλεκτρολύτη και καλές ιδιότητες μεταφοράς αερίων και ιόντων. Η πορώδης μορφή των ηλεκτροδίων επιτρέπει την εύκολη πρόσβαση των αερίων αντιδρώντων στην επιφάνεια αντίδρασης, όπου πραγματοποιείται η οξείδωση και η αναγωγή (σχήμα 2.17).



Σχήμα 2.17

Σημεία χημικών αντιδράσεων

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



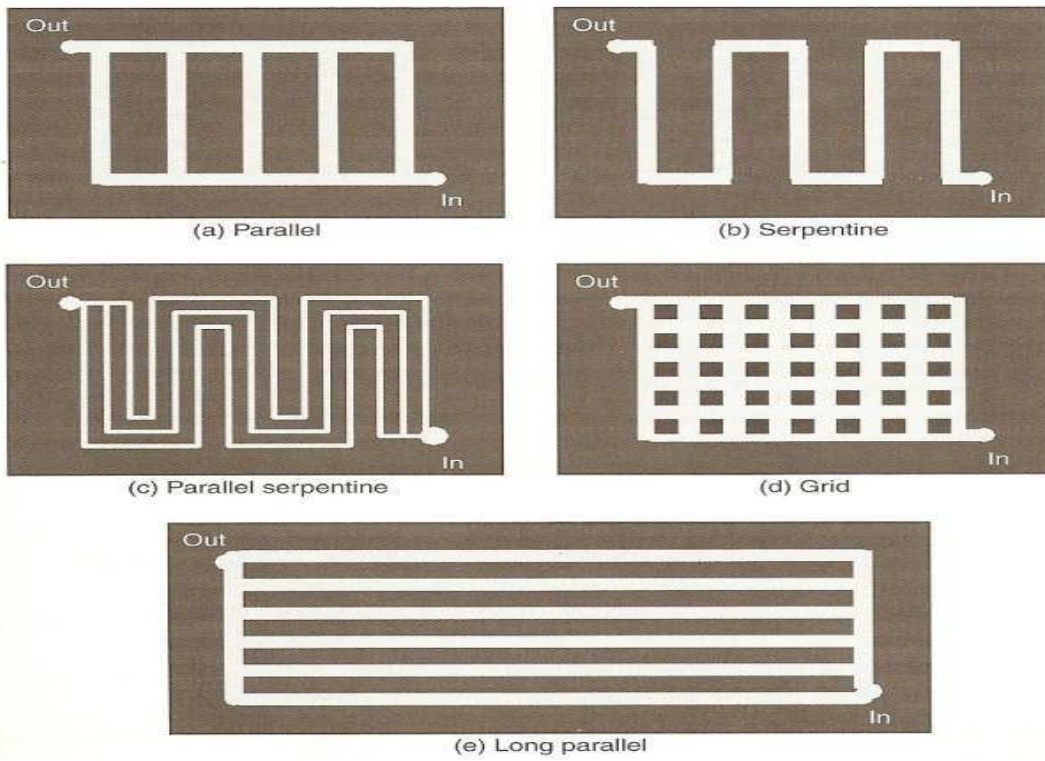
Πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι λόγω του υψηλού κόστους του λευκόχρυσου, τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται από πορώδη άνθρακα (σχήμα 2.15), στον οποίο γίνεται ομοιόμορφη διασπορά μορίων λευκόχρυσου, τα οποία προσκολλώνται στα άτομα του άνθρακα. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιείται το κόστος παραγωγής των ηλεκτροδίων.

2.3.2.3 Στρώμα διάχυσης αερίων

Η κύρια λειτουργία αυτού του στρώματος είναι να διαχέει ομοιόμορφα τα αέρια αντιδρώντα στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Το στρώμα διάχυσης αερίων (Gas Diffusion Layer) αποτελείται από υδροφοβικό χαρτί γραφίτη που επιτρέπει την εύκολη μεταφορά των αερίων καθώς και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των ηλεκτρονίων. Το νερό (προϊόν της αντίδρασης) που συγκεντρώνεται στο στρώμα διάχυσης πρέπει να εξάγεται για να μην οδηγήσει την κυψέλη σε πλημμύρισμα, όμως παράλληλα πρέπει να αφήνεται μια ισορροπημένη ποσότητα νερού να διαπερνάται ώστε να καταφθάνει στα ηλεκτρόδια και στη μεμβράνη.

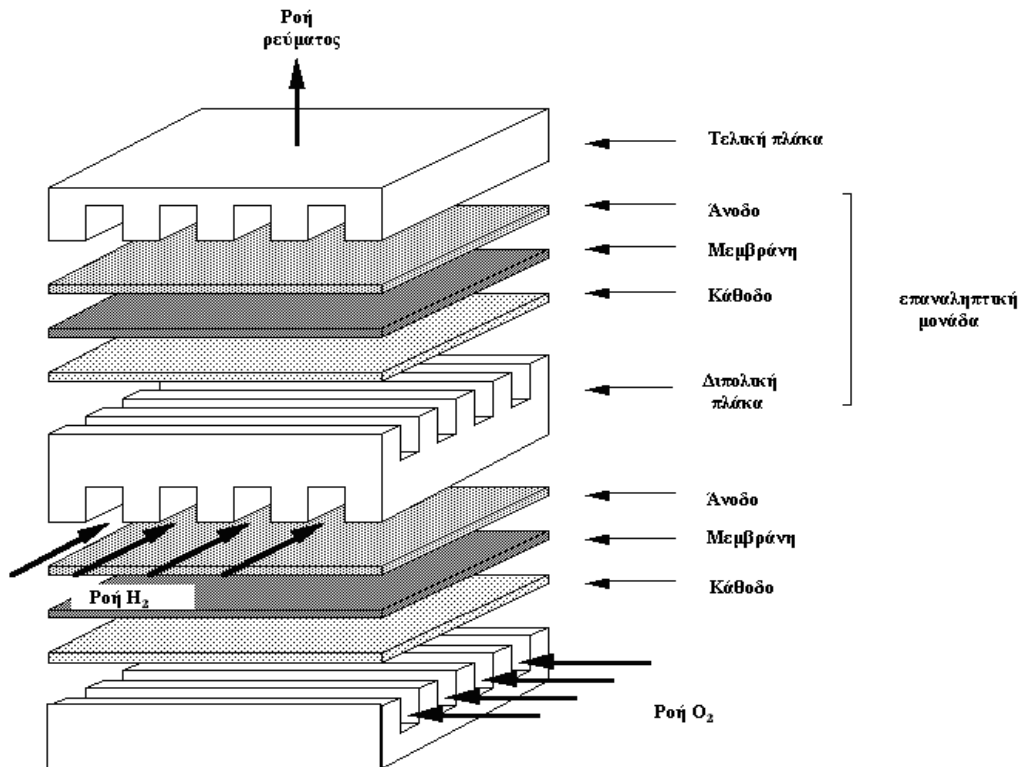
2.3.2.4 Πλάκα ροής των αερίων και διπολική πλάκα

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 (σχήμα 2.18, στην πλειοψηφία επικρατούν ελικοειδή και παράλληλα κανάλια). Στο σχήμα 2.19 παρουσιάζεται η δομή μίας συστοιχίας κυψελών καυσίμου.



Σχήμα 2.18

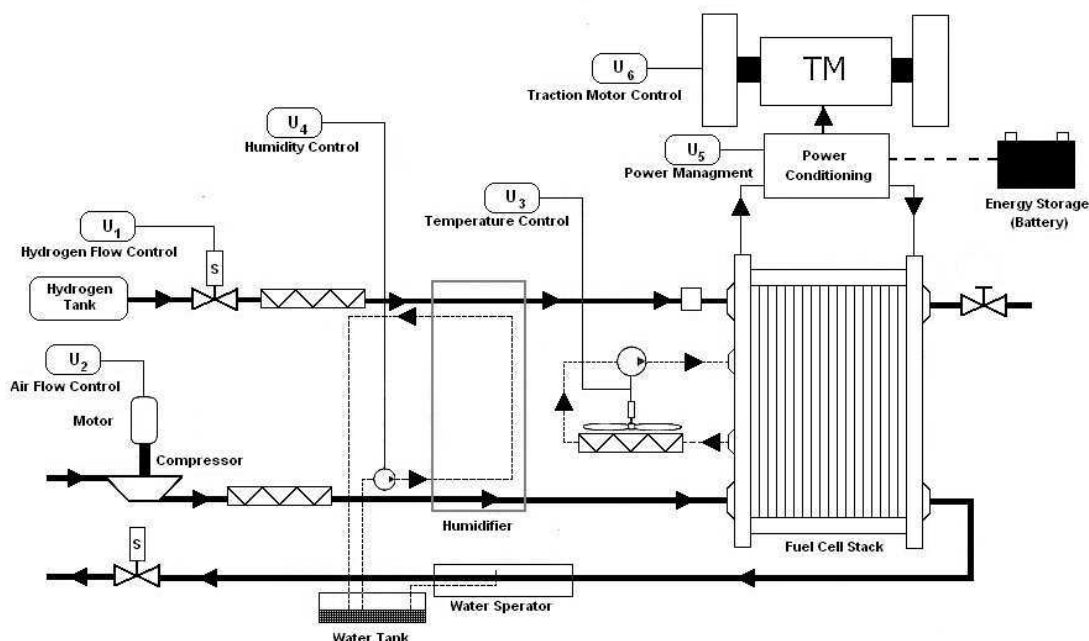
Παραδείγματα διαφορετικών flow field plate



Σχήμα 2.19

Συστοιχία κυψελών καυσίμου

2.3.3 Υποσυστήματα κυψέλης καυσίμου



Σχήμα 2.20

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 σχήμα 2.20. 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 εκλύομενη αυτή θερμότητα πρέπει να εξάγεται ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία της κυψέλης κάτω από τους 100°C. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με αποϊονισμένο νερό που απάγει τη θερμότητα της κυψέλης και στη συνέχεια ψύχεται, είτε με κατάλληλο σχεδιασμό της κυψέλης που να επιτρέπει την εκ φύσεως απαγωγή της θερμότητας.

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

Στις εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, όπως είναι φυσικό παρουσιάζονται διαφορετικά επίπεδα φορτίου και ακαριαίες μεταβολές του φορτίου. Για να πραγματοποιηθεί η ομαλή και επιτυχημένη εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου σε τέτοιου είδους εφαρμογές απαραίτητη είναι η αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων με όσο το δυνατόν καλύτερο και αποδοτικότερο τρόπο. Για αυτόν το λόγο, κατά τη μεταβατική λειτουργία του συστήματος το σύστημα ελέγχου πρέπει να διατηρεί τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία, υγρασία μεμβράνης, μερικές πιέσεις των αντιδρώντων), ώστε να αποφευχθεί μείωση της τάσεως και συνεπώς μείωση του βαθμού απόδοσης και της ανθεκτικότητας της συσκευής [5], [13]. Η κατάσταση αυτή αντιμετωπίζεται προσθέτοντας, όπως θα δούμε παρακάτω, 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

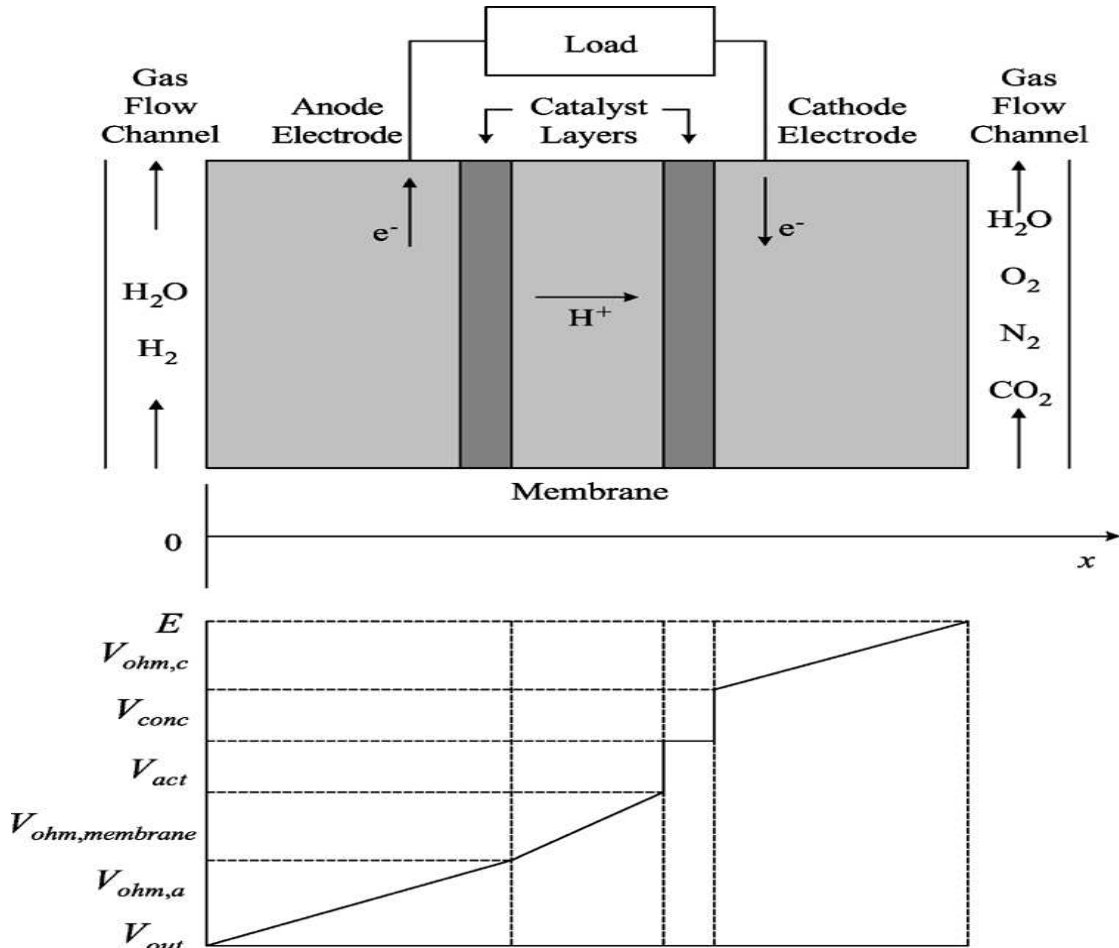
2.3.4 Μοντελοποίηση κυψέλης καυσίμου PEM

Σκοπός αυτή της ενότητας είναι η ανάπτυξη ενός δυναμικού μοντέλου που προσομοιώνει την λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου PEM, η οποία βασίστηκε στην αναφορά [14]. Για την απλοποίηση της ανάλυσης έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Ιδανικά και ομοιόμορφα διανεμημένα αέρια
- Σταθερές πιέσεις στα κανάλια ροής των αερίων
- Το καύσιμο είναι υγρό υδρογόνο και το οξειδωτικό είναι υγροποιημένος αέρας. Η ενεργός πίεση του ατμοποιημένου νερού στην άνοδο είναι το 50% της πίεσης του κορεσμένου ατμού, ενώ η ενεργός πίεση του νερού στην κάθοδο είναι 100%.
- Η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί σε θερμοκρασίες κατώτερες των 100°C και το προϊόν της αντίδρασης είναι σε υγρή μορφή.
- Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες υπολογίζονται στη μέση θερμοκρασία της συστοιχίας, ενώ τυχόν διακυμάνσεις της θερμοκρασίας αγνοούνται. Η συνολική ειδική θερμοχωρητικότητα της συστοιχίας θεωρείται σταθερή.

- Οι παράμετροι της κάθε κυψέλης συνυπολογίζονται για να περιγράψουν την λειτουργία της συστοιχίας κυψελών καυσίμου.

Ένα σχηματικό διάγραμμα της κυψέλης καυσίμου PEM και των πτώσεων τάσης που λαμβάνουν χώρα σε αυτήν φαίνεται στο σχήμα 2.21 και στη συνέχεια ακολουθούν οι εξισώσεις πάνω στις οποίες βασίστηκε η μοντελοποίηση της κυψέλης.



Σχήμα 2.21

Σχηματικό διάγραμμα κυψέλης καυσίμου PEM και πτώσεων τάσης σε αυτήν

A. Διάχυση των αερίων στα ηλεκτρόδια

Για τον υπολογισμό της τάσης μιας κυψέλης καυσίμου απαιτείται η γνώση των μερικών πιέσεων του οξυγόνου και του υδρογόνου. Στην περίπτωση των αερίων που διαχέονται διαμέσου της πλάκας διάχυσης, το φαινόμενο μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση Stefan – Maxwell:

$$\nabla x_i = \frac{RT}{P} \sum_{j=1}^N \frac{x_i N_j - x_j N_i}{D_{i,j}} \quad (2.16)$$

Όπου N ο μοριακός ρυθμός (molar flux), x το μοριακό κλάσμα (mole fraction), $D_{i,j}$ ο συντελεστής διάχυσης μάζας (mass diffusivity), R η σταθερά των αερίων, T η θερμοκρασία και P η πίεση.

Στην άνοδο το αέριο που διαχέεται, το υδρογόνο, είναι αναμειγμένο με ατμοποιημένο νερό και η εξίσωση 2.16 γράφεται

$$\frac{dx_{H_2O}}{dx} = \frac{RT}{P_a} \left(\frac{x_{H_2O}N_{H_2} - x_{H_2}N_{H_2O}}{D_{H_2O,H_2}} \right) \quad (2.17)$$

Αν υποθεθεί ότι ο μοριακός ρυθμός N_{H_2O} (σε αέρια μορφή) ισούται με μηδέν, τότε θα έχουμε

$$\frac{dx_{H_2O}}{dx} = \frac{RT}{P_a} \left(\frac{x_{H_2O}N_{H_2}}{D_{H_2O,H_2}} \right) \quad (2.18)$$

Ο μοριακός ρυθμός N_{H_2} μπορεί να υπολογιστεί με το νόμο του Faraday

$$N_{H_2} = \frac{I_{dssn}}{2F} \quad (2.19)$$

Όπου I_{dssn} η πυκνότητα ρεύματος και F η σταθερά του Faraday (96487 C/mol).

Ολοκληρώνοντας τη σχέση 2.18 και συνδυάζοντας την με τη σχέση 2.19, από την περιοχή του καναλιού εισόδου έως την επιφάνεια του ηλεκτρολύτη (απόσταση l_a), παίρνουμε

$$x_{H_2O}^* = x_{H_2O}^{channel} \exp\left(\frac{RTI_{dssn}l_a}{2FP_aD_{H_2O,H_2}}\right) \quad (2.20)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση που συνδέει την ολική πίεση P_a με τη μερική πίεση

$$p_a = x_a P_a \quad (2.21)$$

και τη σχέση

$$x_{H_2O}^* + x_{H_2}^* = 1 \quad (2.22)$$

η μερική ενεργός πίεση του υδρογόνου υπολογίζεται

$$p_{H_2}^* = 0.5p_{H_2O}^{sat} \left(\frac{1}{x_{H_2O}^{channel} \exp\left(\frac{RTI_{dssn}l_a}{2FP_aD_{H_2O,H_2}}\right)} - 1 \right) \quad (2.23)$$

Τα αέρια που διαχέονται στη κάθοδο είναι: O_2 , N_2 , $H_2O_{(g)}$ και CO_2 . Η εξίσωση διάχυσης στην κάθοδο δίνει

$$\frac{dx_{H_2O}}{dx} = \frac{RT}{P_c} \left(\frac{x_{O_2}N_{H_2O} - x_{H_2O}N_{O_2}}{D_{H_2O,O_2}} \right) = \frac{RT}{P_c} \left(\frac{-x_{H_2O}N_{O_2}}{D_{H_2O,O_2}} \right) \quad (2.24)$$

και το μοριακό κλάσμα του νερού στην ενεργή επιφάνεια του καταλύτη στην κάθοδο ισούται με

$$x_{H_2O}^* = x_{H_2O}^{channel} \exp\left(\frac{RTl_{den}l_c}{4FP_c D_{H_2O,O_2}}\right) \quad (2.25)$$

Ομοίως για το N₂ και το CO₂

$$x_{N_2}^* = x_{N_2}^{channel} \exp\left(\frac{RTl_{den}l_c}{4FP_c D_{N_2,O_2}}\right) \quad (2.26)$$

$$x_{CO_2}^* = x_{CO_2}^{channel} \exp\left(\frac{RTl_{den}l_c}{4FP_c D_{CO_2,O_2}}\right) \quad (2.27)$$

Συνεπώς, το μοριακό κλάσμα του οξυγόνου O₂ είναι

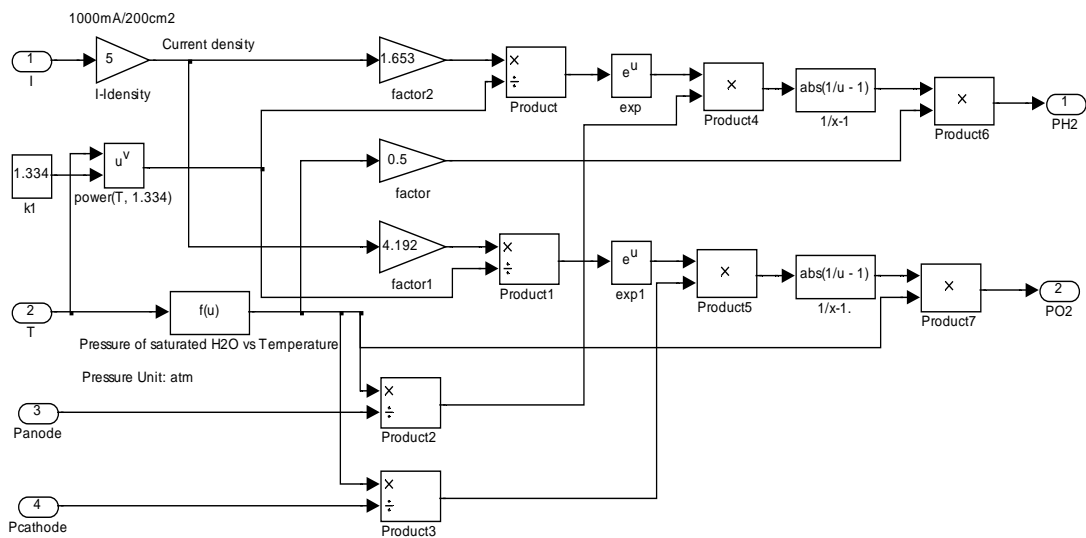
$$x_{O_2}^* = 1 - x_{H_2O}^* - x_{N_2}^* - x_{CO_2}^* \quad (2.28)$$

Η μερική ενεργός πίεση του οξυγόνου υπολογίζεται ως εξής

$$p_{O_2}^* = \frac{p_{H_2O}^*}{x_{H_2O}^*} x_{O_2}^* = \frac{p_{H_2O}^*}{x_{H_2O}^*} (1 - x_{H_2O}^* - x_{N_2}^* - x_{CO_2}^*) \quad (2.29)$$

$$p_{O_2}^* = p_{H_2O}^{sat} \left(\frac{1 - x_{N_2}^* - x_{CO_2}^*}{x_{H_2O}^*} - 1 \right) \quad (2.30)$$

Οι σχέσεις 2.23 και 2.30 υπολογίζουν τις μερικές πιέσεις του υδρογόνου και του οξυγόνου, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στην εξίσωση του Nernst για τον καθορισμό της τάσης εξόδου της κυψέλης. Στο σχήμα 2.22 φαίνεται το υποσύστημα που υλοποιεί τις ανωτέρω εξισώσεις.



Σχήμα 2.22

Υποσύστημα Active Pressures

B. Μηχανικές καθυστερήσεις

Η στιγμιαία μεταβολή των μερικών ενεργών πιέσεων του υδρογόνου και του οξυγόνου περιγράφονται από την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων ως εξής

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dp_{H_2}^*}{dt} = M_{H_2,in} - M_{H_2,out} - \frac{i}{2F} = M_{H_2,net} - \frac{i}{2F} \quad (2.31)$$

$$\frac{V_c}{RT} \frac{dp_{O_2}^*}{dt} = M_{O_2,in} - M_{O_2,out} - \frac{i}{4F} = M_{O_2,net} - \frac{i}{4F} \quad (2.32)$$

Όπου $M_{H_2,in}$, $M_{H_2,out}$, $M_{O_2,in}$, $M_{O_2,out}$ οι μοριακές ροές εισόδου και εξόδου του υδρογόνου και του οξυγόνου σε mol/s και i το ρεύμα φόρτισης της κυψέλης.

Στην μόνιμη κατάσταση όλες οι μερικές πιέσεις θεωρούνται σταθερές, δηλαδή

$$\frac{dp_{H_2}^*}{dt} = \frac{dp_{O_2}^*}{dt} = 0 \quad (2.33)$$

και, επομένως, οι μοριακές ροές των αντιδρώντων H_2 και O_2 είναι

$$M_{H_2,net} = 2M_{O_2,net} = \frac{i}{2F} \quad (2.34)$$

Στη μεταβατική κατάσταση υπάρχουν καθυστερήσεις μεταξύ των μεταβολών του φορτίου και της ροής του καυσίμου και του οξειδωτικού. Οι επόμενες εξισώσεις χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιήσουν αυτές τις καθυστερήσεις

$$\tau_a \frac{dM_{H_2,net}}{dt} = \frac{i}{2F} - M_{H_2,net} \quad (2.35)$$

$$\tau_c \frac{dM_{O_2,net}}{dt} = \frac{i}{4F} - M_{O_2,net} \quad (2.36)$$

Όπου τ_a και τ_c οι σταθερές χρόνου της μοριακής ροής του υδρογόνου και του οξυγόνου σε s, οι οποίες ορίζονται ως εξής

$$\tau_a = \frac{V_a}{K_{H_2} RT} \quad (2.37)$$

$$\tau_c = \frac{V_c}{K_{O_2} RT} \quad (2.38)$$

Όπου K_{H_2} και K_{O_2} οι μοριακές σταθερές βαλβίδας υδρογόνου και οξυγόνου σε mol/(atm*s).

C. Τάση εξόδου κυψέλης καυσίμου

Η εξίσωση Nernst δίνει την τάση της κυψέλης συναρτήσει των μερικών πιέσεων των στοιχείων

$$E_{cell} = E_{0,cell} + \frac{RT}{2F} \ln \left(p_{H_2}^s \cdot (p_{O_2}^s)^{0.5} \right) \quad (2.39)$$

Όπου $E_{0,cell}$ είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και ορίζεται ως εξής

$$E_{0,cell} = E_{0,cell}^o - k_E(T - 298) \quad (2.40)$$

Όπου $E_{0,cell}^o$ το δυναμικό αναφοράς σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (298 K, 1atm) και k_E μια εμπειρική σταθερά.

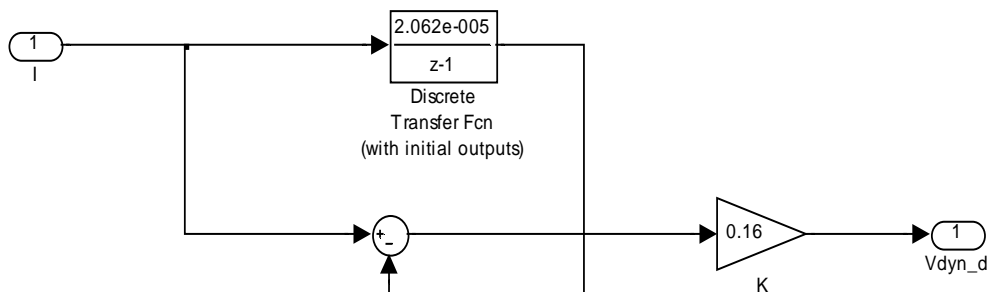
Για την απλοποίηση της ανάλυσης, η πτώση τάσης $E_{d,cell}$ χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει την ολική καθυστέρηση λόγω της ροής του καυσίμου και του οξειδωτικού, που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Στη μόνιμη κατάσταση η τιμή της $E_{d,cell}$ είναι μηδέν, αλλά στα μεταβατικά φορτία χαρακτηρίζεται από την εξίσωση

$$E_{d,cell} = \lambda_e \left[i(t) - i(t) * \exp \left(-\frac{t}{\tau_e} \right) \right] \quad (2.41)$$

Όπου λ_e μια εμπειρική σταθερά και τ_e η συνολική σταθερά χρόνου των μηχανικών καθυστερήσεων σε s. Μετασχηματίζοντας στο πεδίο της συχνότητας η σχέση 2.41 γίνεται

$$E_{d,cell}(s) = \lambda_e I(s) \frac{\tau_e s}{\tau_e s + 1} \quad (2.42)$$

Στο σχήμα 2.23 φαίνεται το υποσύστημα που μοντελοποιεί τις μηχανικές καθυστερήσεις.



Σχήμα 2.23

Υποσύστημα Drop delay block

Επομένως, η εξίσωση 2.39 γίνεται

$$E_{cell} = E_{0,cell} + \frac{RT}{2F} \ln \left(p_{H_2}^* \cdot (p_{O_2}^*)^{0.5} \right) - E_{d,cell} \quad (2.43)$$

Το δυναμικό E_{cell} είναι στην πραγματικότητα η τάση ανοικτοκύκλωσης της κυψέλης καυσίμου. Παρόλα αυτά, σε συνθήκες φόρτισης η τάση είναι μικρότερη. Αυτό οφείλεται στους εξής παράγοντες:

- Απώλειες ενεργοποίησης (Activation loss)
- Ωμικές απώλειες (Ohmic loss)
- Μείωση στη συγκέντρωση των αντιδρώντων (Concentration loss)

Άρα, η τερματική τάση ενός κελιού υπολογίζεται ως εξής

$$V_{cell} = E_{cell} - V_{act,cell} - V_{ohm,cell} - V_{conc,cell} \quad (2.44)$$

και η συνολική τάση εξόδου της συστοιχίας είναι

$$V_{out} = N_{cell} V_{cell} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (2.45)$$

Όπου N_{cell} ο αριθμός των κυψελών.

Αναλύοντας τις επιμέρους απώλειες, έχουμε:

a. *Απώλειες ενεργοποίησης*

Οι απώλειες ενεργοποίησης προκύπτουν από την ανάγκη να κινηθούν ηλεκτρόνια και από τη διάσπαση και ένωση χημικών δεσμών στην άνοδο και στην κάθοδο της κυψέλης καυσίμου. Ένα μέρος της διαθέσιμης ενέργειας χάνεται ώστε να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες χημικές αντιδράσεις που θα μεταφέρουν τα ηλεκτρόνια. Οι απώλειες ενεργοποίησης συμβαίνουν, σύμφωνα με τα παραπάνω, όχι μόνο στην άνοδο αλλά και στην κάθοδο. Οι αντίδραση της οξειδωσης του υδρογόνου στην άνοδο είναι πολύ γρήγορη, ενώ η αναγωγή του οξυγόνου στην κάθοδο ολοκληρώνεται με πολύ αργούς ρυθμούς [5]. Οι απώλειες ενεργοποίησης εκφράζονται μαθηματικά με μια εμπειρική εξίσωση, που βασίζεται σε ηλεκτροχημικές παρατηρήσεις, γνωστή ως εξίσωση Tafel:

$$V_{act} = \frac{RT}{\alpha z F} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) = T \cdot [a + b \cdot \ln(I)] \quad (2.46)$$

Όπου α ο συντελεστής μεταφοράς (coefficient transfer), z ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται ανά αντίδραση και I_0 το ρεύμα ανταλλαγής (exchange current).

Μια άλλη εμπειρική εξίσωση είναι η εξής

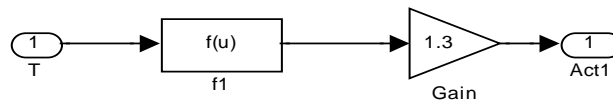
$$V_{act} = \eta_0 + (T - 298) \cdot a + T \cdot b \cdot \ln(I) = V_{act1} + V_{act2} \quad (2.47)$$

Όπου $V_{act1} = \eta_0 + (T - 298) \cdot a$ η πτώση τάσης ενεργοποίησης συναρτήσει της εσωτερικής θερμοκρασίας της κυψέλης και $V_{act2} = T \cdot b \cdot \ln(I)$ συναρτήσει της θερμοκρασίας και της έντασης ρεύματος.

Η ισοδύναμη αντίσταση ενεργοποίησης, που οφείλεται στην V_{act2} , είναι

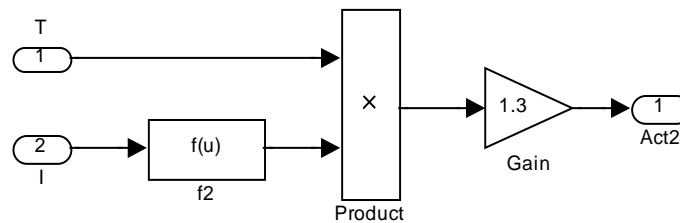
$$R_{act} = \frac{V_{act2}}{I} = \frac{T \cdot b \cdot \ln(I)}{I} \quad (2.48)$$

Στα σχήματα 2.24 και 2.25 φαίνονται τα υποσυστήματα που μοντελοποιούν τις απώλειες ενεργοποίησης:



Σχήμα 2.24

Υποσύστημα Activation 1



Σχήμα 2.25

Υποσύστημα Activation 2

b. Ωμικές απώλειες

Η ωμική αντίσταση της κυψέλης αποτελείται από την αντίσταση της μεμβράνης, την αγωγιμότητα μεταξύ μεμβράνης και ηλεκτροδίων και την αντίσταση των ηλεκτροδίων. Επομένως, η πτώση τάσης λόγω ωμικών απωλειών είναι

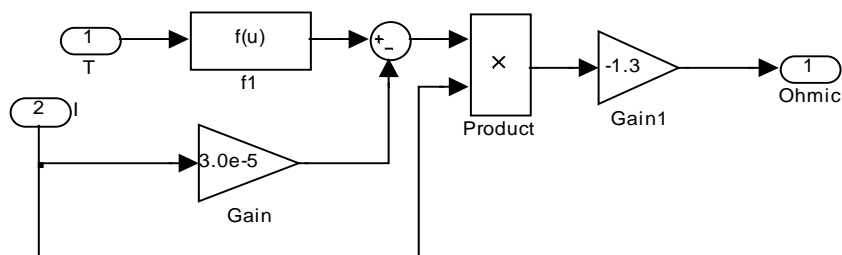
$$V_{ohm} = V_{ohm,a} + V_{ohm,membrane} + V_{ohm,c} = IR_{ohm} \quad (2.49)$$

Όπου R_{ohm} η συνολική ωμική αντίσταση της κυψέλης, που είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και του ρεύματος

$$R_{ohm} = R_{ohm0} + k_{RI}I - k_{RT}T \quad (2.50)$$

Όπου R_{ohm0} η σταθερή ωμική αντίσταση και k_{RI} , k_{RT} εμπειρικές σταθερές.

Το σχήμα 2.26 δείχνει το υποσύστημα μοντελοποίησης των ωμικών απωλειών:



Σχήμα 2.26

Υποσύστημα Ohmic

γ. Απώλειες μειωμένης συγκέντρωσης αντιδρώντων

Η πτώση τάσεως λόγω μείωσης της συγκέντρωσης των αντιδρώντων εμφανίζεται σε όλο το φάσμα της πυκνότητας ρεύματος, όμως σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος γίνεται πολύ πιο αισθητή. Οι χημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται στην περιοχή ακριβώς μεταξύ μεμβράνης και ηλεκτροδίου. Το υδρογόνο, όπως και το οξυγόνο, πρέπει μέσω της διαδικασίας της διάχυσης να βρεθεί στο συγκεκριμένο αυτό σημείο. Στην κυψέλη καυσίμου όμως το υδρογόνο και το οξυγόνο διέρχονται μέσα από το στρώμα διάχυσης των αερίων (gas diffusion layer). Όταν δεν υπάρχει φορτίο, συνεπώς ούτε και ρεύμα, η συγκέντρωση των αντιδρώντων είναι ίδια με αυτή που εμφανίζεται και στην περιοχή του συλλέκτη (flow field pattern). Όταν όμως ρέει ρεύμα, η διάχυση των στοιχείων στην περιοχή που πραγματοποιούνται οι χημικές αντιδράσεις επιβραδύνεται και εμποδίζεται από τη ροή του ρεύματος. Το πρόβλημα αυτό είναι ακόμη πιο έντονο στην κάθοδο, όπου το οξυγόνο συναντά αντίσταση που οφείλεται στην παραγόμενη ποσότητα του νερού που κλείνει τις λεπτές διαδρομές του στρώματος διάχυσης. Η μαθηματική έκφραση της απώλειας είναι η ακόλουθη:

$$V_{conc} = -\frac{RT}{zF} \ln \frac{C_S}{C_B} \quad (2.51)$$

Όπου C_S η επιφανειακή συγκέντρωση και C_B η χωρική συγκέντρωση.

Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο του Fick και το νόμο του Faraday, η εξίσωση 2.49 ξαναγράφεται

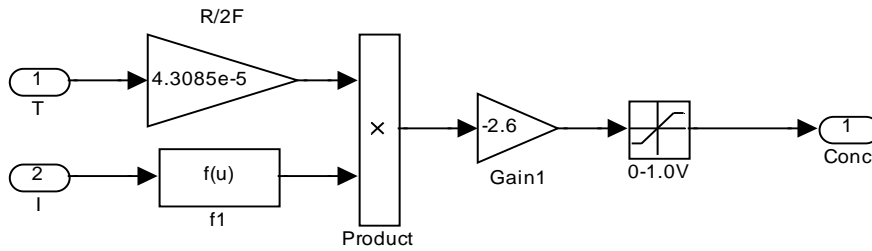
$$V_{conc} = -\frac{RT}{zF} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{limit}} \right) \quad (2.52)$$

Όπου I_{limit} η μέγιστη τιμή του ρεύματος και αντιστοιχεί στο μέγιστο ρυθμό παροχής καυσίμου στην κυψέλη.

Η ισοδύναμη ωμική αντίσταση, που μοντελοποιεί τις απώλειες συγκέντρωσης, υπολογίζεται ως εξής

$$R_{conc} = \frac{V_{conc}}{I} = -\frac{RT}{zFI} \ln \left(1 - \frac{I}{I_{limit}} \right) \quad (2.53)$$

Στο σχήμα 2.27 φαίνεται το υποσύστημα, που μοντελοποιεί τις απώλειες συγκέντρωσης.

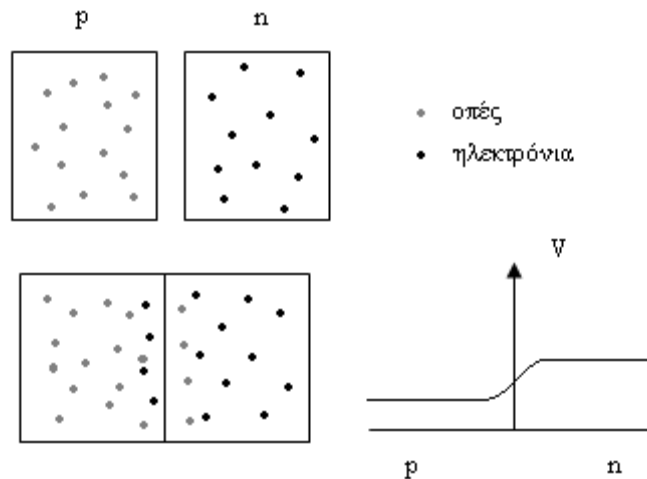


Σχήμα 2.27

Υποσύστημα Concentration

D. Φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστιβάδας (Double-layer charging effect)

Το φαινόμενο της ηλεκτρικής διπλοστιβάδας προκύπτει καθώς δύο διαφορετικά υλικά έρχονται σε επαφή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η δίοδος επαφής p-n. Καθώς έρχονται σε επαφή τα δύο αυτά υλικά παρουσιάζεται διάχυση των οπών από τη μία πλευρά στην άλλη και ροή των ηλεκτρονίων από την αντίθετη πλευρά (βλ. σχήμα 2.28). Από την παραπάνω ροή των φορτίων δημιουργείται μία επιφάνεια, ένα στρώμα διπλής στρώσης αρνητικού και θετικού φορτίου, γεγονός που δημιουργεί μία διαφορά δυναμικού στην περιοχή μετάβασης των δύο περιοχών. Στη θέση ισορροπίας, η διαφορά δυναμικού αποτρέπει τη ροή άλλων φορτίων. Αυτό το φαινόμενο χαρακτηρίζει τη δυναμική συμπεριφορά ημιαγωγών και παρουσιάζει μη γραμμική συμπεριφορά [5].

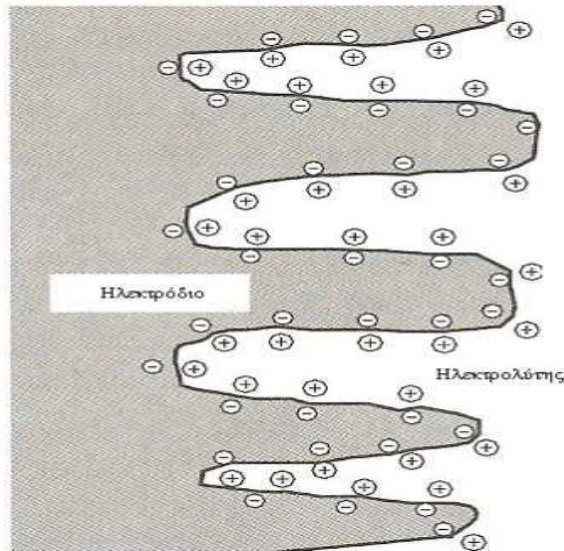


Σχήμα 2.28

Φαινόμενο διπλού στρώματος σε ένωση p-n

Το φαινόμενο του διπλού στρώματος παρουσιάζεται και στα ηλεκτροχημικά συστήματα, στην επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη. Στη μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων συγκεντρώνονται στην επιφάνεια της καθόδου τα ηλεκτρόνια, που προέρχονται από το εξωτερικό κύκλωμα, και τα ιόντα H^+ , που έχουν

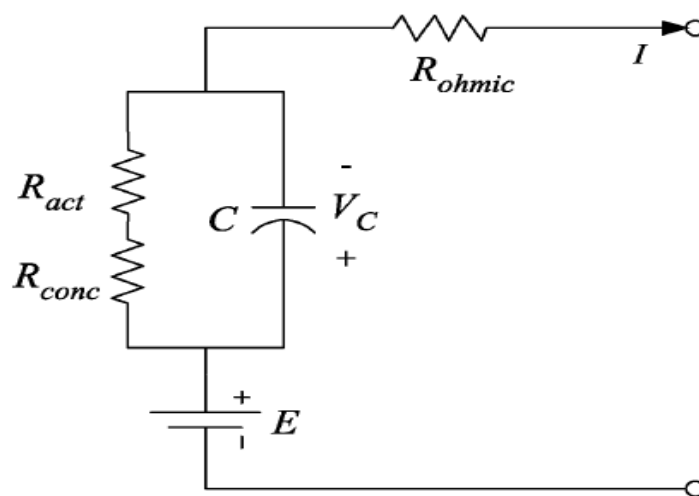
διαπεράσει τον ηλεκτρολύτη (σχήμα 2.29). Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων και των κατιόντων σε αυτή την περιοχή έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό δύο στρωμάτων αντίθετης πολικότητας (διπλό ηλεκτροχημικό στρώμα) που αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια και συνεπώς συμπεριφέρονται σαν πυκνωτές. Η διαφορά δυναμικού που επάγεται ταυτίζεται με την πτώση τάσεως ενεργοποίησης V_{act} . Το ηλεκτροχημικό αυτό φαινόμενο επιδρά στη δυναμική συμπεριφορά της κυψέλης, προκαλώντας μία χρονική καθυστέρηση. Η μοντελοποίηση του στο αντίστοιχο ηλεκτρικό ισοδύναμο της κυψέλης επιτυγχάνεται με έναν πυκνωτή (σχήμα 2.31). Στο σχήμα 2.30 απεικονίζεται το φαινόμενο αυτό.



Σχήμα 2.29

Διπλό ηλεκτροχημικό στρώμα

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της κυψέλης είναι:



Σχήμα 2.30

Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κυψέλης καυσίμου

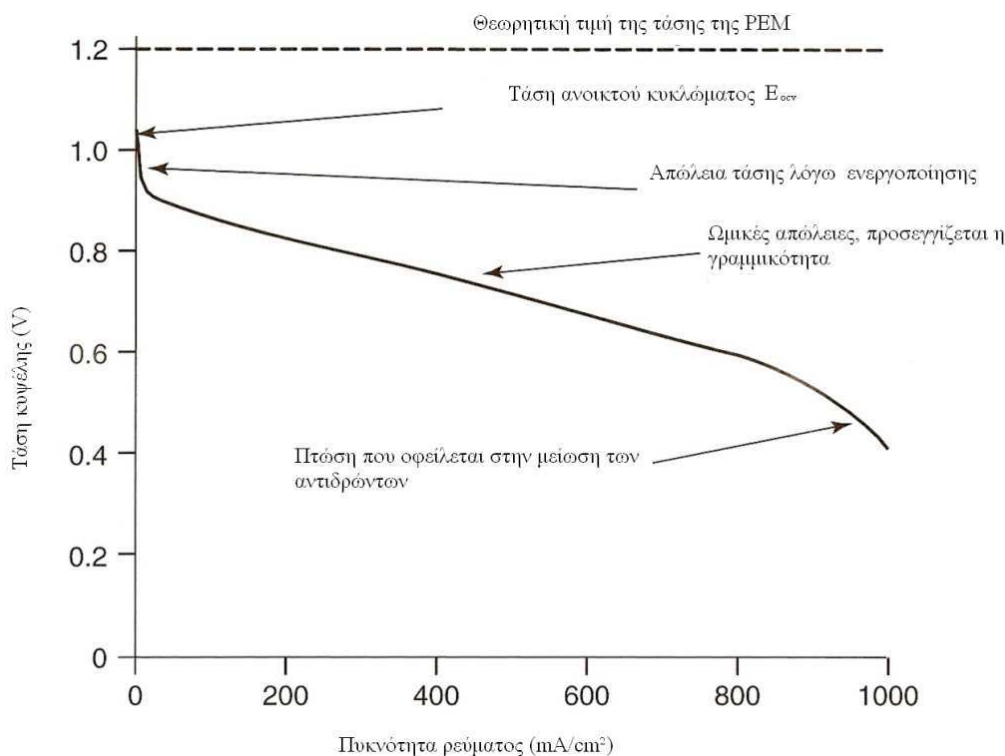
Η τάση στα άκρα του πυκνωτή, που μοντελοποιεί το φαινόμενο της διπλοστοιβάδας, υπολογίζεται ως εξής

$$V_C = \left(1 - C \frac{dV_C}{dt}\right) (R_{act} + R_{conc}) \quad (2.54)$$

Επομένως, χρησιμοποιείται η τάση V_C αντί των τάσεων V_{act2} και V_{conc} για τον υπολογισμό της τάσης εξόδου ως εξής

$$V_{out} = E - V_C - V_{act1} - V_{ohm} \quad (2.55)$$

Συνυπολογίζοντας όλες τις απώλειες της κυψέλης, η χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος μίας κυψέλης είναι η εξής



Σχήμα 2.31

Χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος μίας κυψέλης

Ε. Θερμοδυναμική προσέγγιση

Έχουν ήδη αναφερθεί οι χημικές αντιδράσεις, που λαμβάνουν χώρα σε μια κυψέλη καυσίμου. Το προϊόν αυτών των αντιδράσεων είναι το νερό με παράλληλη έκλυση θερμότητας. Η κυψέλη καυσίμου μετατρέπει τη χημική ενέργεια των αερίων αντιδρώντων σε ηλεκτρική. Συνεπώς, για να αναλύσουμε τη λειτουργία μίας κυψέλης καυσίμου πρέπει να παρατηρήσουμε τα θερμοδυναμικά φαινόμενα που παρουσιάζονται. Η μελέτη των θερμοδυναμικών φαινομένων είναι αναγκαία, διότι παρουσιάζει τη μεταβολή της ενέργειας από τη μία μορφή στην άλλη. Επιπρόσθετα, επιτρέπει τον θεωρητικό υπολογισμό της τάσεως που δημιουργείται σε μία κυψέλη

και επιδεικνύει την εξάρτηση της από την πίεση των αντιδρώντων και τη θερμοκρασία λειτουργίας της.

Η ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας χαρακτηρίζει την άμεση μετατροπή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs ΔG , που συνοδεύει μία χημική αντίδραση, σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια Gibbs αποτελεί το μέγιστο μέτρο της ηλεκτρικής ενέργειας, που ένα σύστημα υπό σταθερή θερμοκρασία και πίεση μπορεί να παράγει. Το ηλεκτρικό αυτό έργο W_{el} δίνεται από την αρνητική μεταβολή της ενέργειας Gibbs σύμφωνα με τη σχέση:

$$W_{el} = -\Delta G \quad (2.56)$$

Η καθαρή θερμότητα που παράγεται από την χημική αντίδραση, η οποία λαμβάνει χώρα στην κυψέλη καυσίμου, και προκαλεί τις αυξομειώσεις της θερμοκρασίας υπολογίζεται ως εξής:

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_{chem} - \dot{q}_{elec} - \dot{q}_{sens+latent} - \dot{q}_{loss} \quad (2.57)$$

Όπου \dot{q}_{chem} , \dot{q}_{elec} , \dot{q}_{loss} και $\dot{q}_{sens+latent}$ οι παράγωγοι της χημικής και ηλεκτρικής θερμότητας, της θερμότητας απωλειών και της αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας αντίστοιχα.

Η διαθέσιμη ισχύ που απελευθερώνεται από την χημική αντίδραση είναι

$$\dot{q}_{chem} = \dot{n}_{H_2,consumed} \cdot \Delta G \quad (2.58)$$

Όπου $\dot{n}_{H_2,consumed}$ η μοριακή ροή του καταναλισκόμενου υδρογόνου και ΔG η ενέργεια Gibbs, η οποία μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας ως εξής:

$$\Delta G = \Delta G_0 - RT \cdot \ln \left(p_{H_2}^* \cdot (p_{O_2}^*)^{0.5} \right) \quad (2.59)$$

Όπου ΔG_0 η ενέργεια Gibbs σε κανονικές συνθήκες.

Η ηλεκτρική ισχύς εξόδου μπορεί να υπολογιστεί ως εξής

$$\dot{q}_{elec} = V_{out} \cdot I \quad (2.60)$$

Η αισθητή και η λανθάνουσα θερμότητα που απορροφάται από τη διαδικασία είναι

$$\begin{aligned} \dot{q}_{sens+latent} = & (\dot{n}_{H_2,out} \cdot T - \dot{n}_{H_2,in} \cdot T_{room}) \cdot C_{H_2} + (\dot{n}_{O_2,out} \cdot T - \dot{n}_{O_2,in} \cdot T_{room}) \\ & \cdot C_{O_2} + \dot{n}_{H_2O,generated} \cdot (T - T_{room}) \cdot C_{H_2O,l} + \dot{n}_{H_2O,generated} \cdot H_V \end{aligned} \quad (2.61)$$

Όπου C_{H_2} , C_{O_2} , $C_{H_2O,l}$ οι ειδικές θερμοχωρητικότητες του υδρογόνου, του οξυγόνου και του νερού, T_{room} η θερμοκρασία δωματίου και H_V η θερμότητα εξατμίσεως του νερού.

Οι απώλειες θερμότητας, που οφείλονται κατά κύριο λόγο στην μεταγωγή του αέρα, μπορούν να υπολογιστούν από την εξίσωση

$$\dot{q}_{loss} = h_{cell}(T - T_{room})N_{cell}A_{cell} \quad (2.62)$$

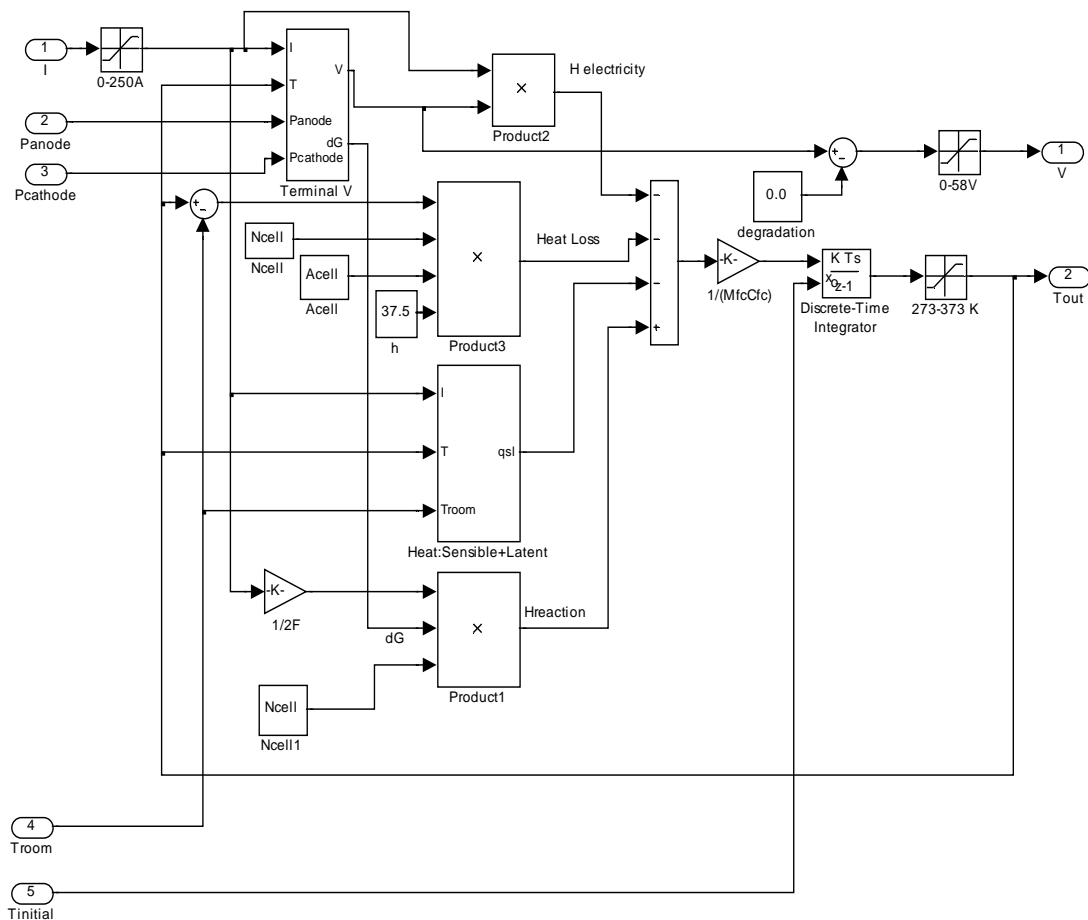
Όπου h_{cell} ο συντελεστής θερμοπερατότητας μιας κυψέλης και A_{cell} η επιφάνεια μιας κυψέλης.

Στη μόνιμη κατάσταση ισχύει $\dot{q}_{net} = 0$ και η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί υπό σταθερή θερμοκρασία. Όμως, κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων, η θερμοκρασία της κυψέλης αυξομειώνεται ως εξής

$$M_{FC} C_{FC} \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{net} \quad (2.63)$$

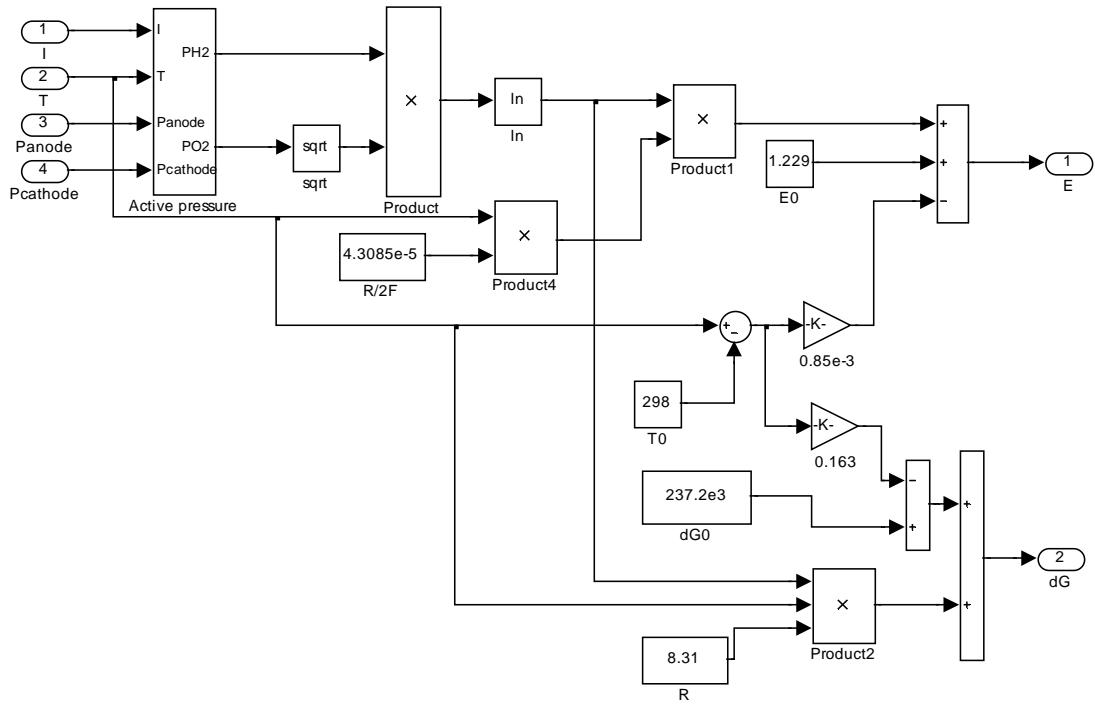
Όπου M_{FC} η συνολική μάζα της συστοιχίας και C_{FC} η συνολική ειδική θερμοχωρητικότητα της συστοιχίας.

Οι ανωτέρω εξισώσεις περιγράφουν πλήρως τα ηλεκτροχημικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου. Στο σχήμα 2.32 παρατίθεται το μοντέλο της κυψέλης καυσίμου που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB.



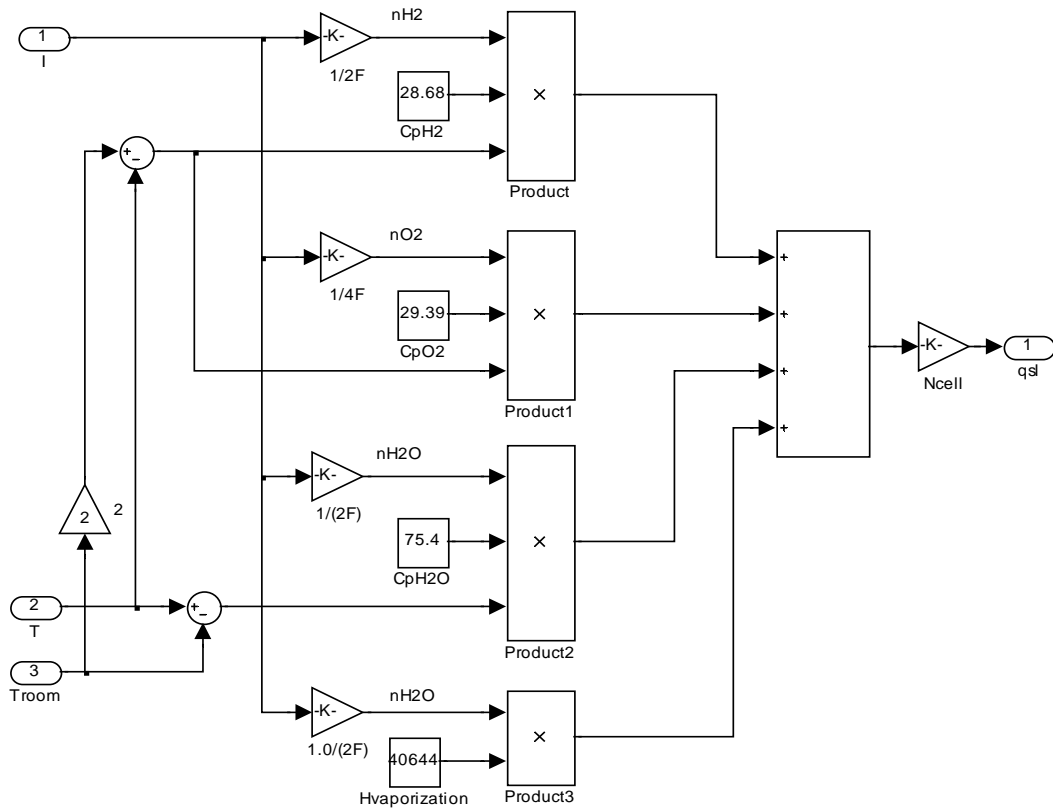
Σχήμα 2.32

Μοντέλο κυψέλης καυσίμου PEM



Σχήμα 2.34

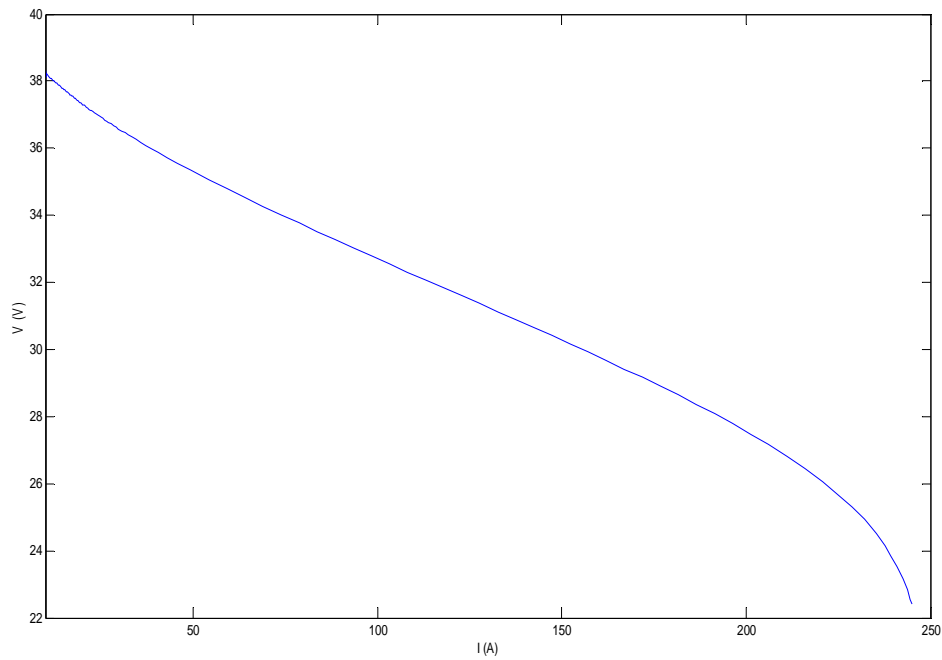
Υποσύστημα Potential E



Σχήμα 2.35

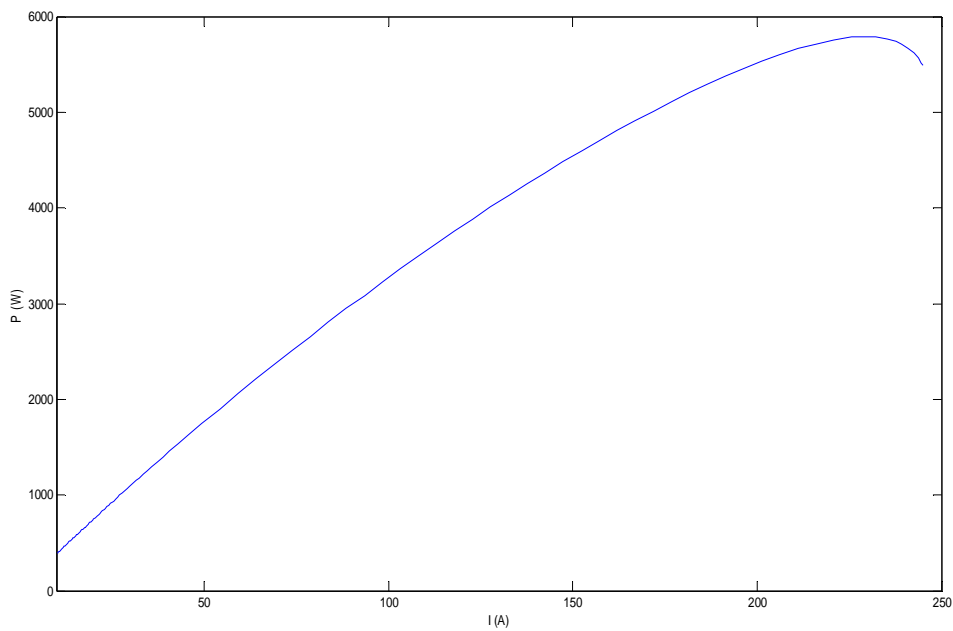
Υποσύστημα Sensible+Latent Heat

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης – ρεύματος και ισχύος – ρεύματος του μοντέλου είναι οι εξής:



Σχήμα 2.36

Χαρακτηριστική V-I κυψέλης καυσίμου



Σχήμα 2.37

Χαρακτηριστική P-I κυψέλης καυσίμου

Όπως παρατηρούμε, επαληθεύεται η θεωρητική χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – ρεύματος (σχήμα 2.31).

2.4 Ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Electrolyzer – PEM Electrolyzer) και δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου

2.4.1 Κατασκευαστικά στοιχεία ηλεκτρολύτη

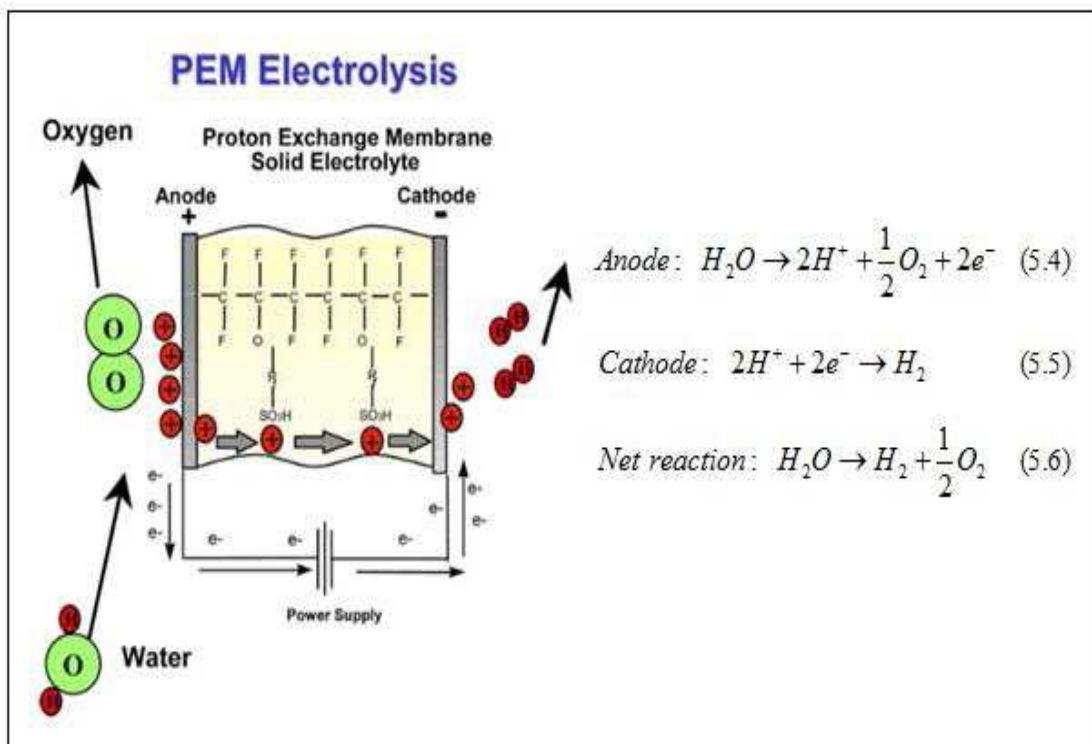
Οι μονάδες ηλεκτρόλυσης PEM βασίζονται στη χρήση μιας πολυμερούς μεμβράνης εναλλαγής πρωτονίων, που παίζει το ρόλο του στερεού ηλεκτρολύτη. Μολονότι η αρχή λειτουργίας τους είναι αντίστροφη από αυτήν των κυψελών καυσίμου, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους είναι διαφορετικά από αυτά των κυψελών καυσίμου PEM λόγω προβλημάτων διάβρωσης.

Πιο συγκεκριμένα, 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, ίδιο υλικό με αυτό που χρησιμοποιείται στις κυψέλες καυσίμου (βλ. ενότητα 2.3.2.1). Η κάθοδος αποτελείται από συλλέκτη ρεύματος κατασκευασμένο από πορώδη γραφίτη με λευκόχρυσο (πλατίνα - Pt), ή σε πιο πρόσφατους σχεδιασμούς, με μικτό οξείδιο ως ηλεκτροκαταλύτη.

Τα επιμέρους κελιά στοιχίζονται σε διπολική διάταξη με διαχωριστές γραφίτη, παρέχοντας τους απαραίτητους πολλαπλούς αγωγούς (manifolds) 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 τελευταία επιλογή να εφαρμόζεται στους περισσότερους εμπορικούς ηλεκτρολύτες. Επιπλέον, οι PEM ηλεκτρολύτες απαιτούν τροφοδοσία νερού υψηλότερης καθαρότητας σε σχέση με τους αλκαλικούς (1μSiemens αντί για 5μSiemens). Τυπικές τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας PEM ηλεκτρολυτών κυμαίνονται στο εύρος 70-80 °C [4].

2.4.2 Αρχή λειτουργίας του ηλεκτρολύτη

Η PEM ηλεκτρόλυση είναι στην ουσία η αντίστροφη διαδικασία από αυτή που πραγματοποιείται σε μία 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 (thermoneutral) 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. Η αρχή λειτουργίας του κελιού σε έναν PEM ηλεκτρολύτη παρουσιάζεται στο σχήμα 2.38, όπου δίνονται και οι εξισώσεις των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται.



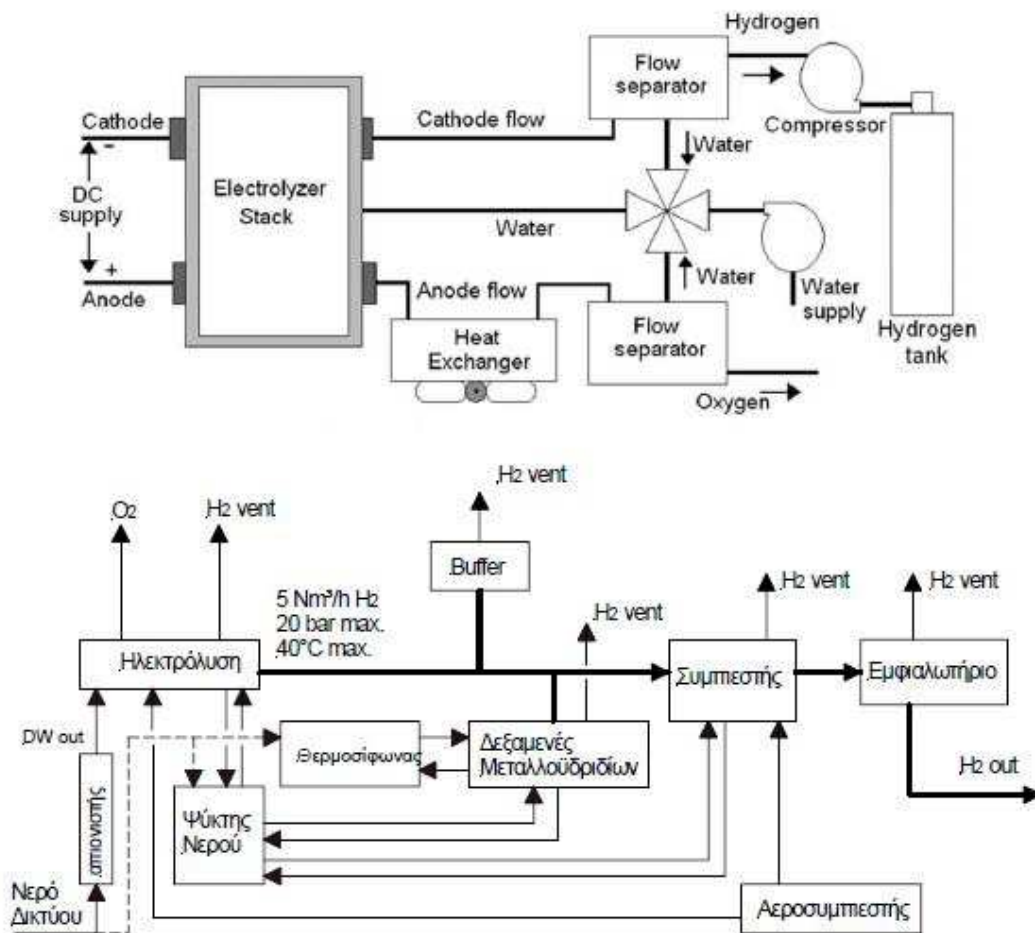
Σχήμα 2.38

Αρχή λειτουργίας PEM ηλεκτρολύτη και ηλεκτροχημικές αντιδράσεις

2.4.3 Βοηθητικά υποσυστήματα ηλεκτρολύτη και δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου

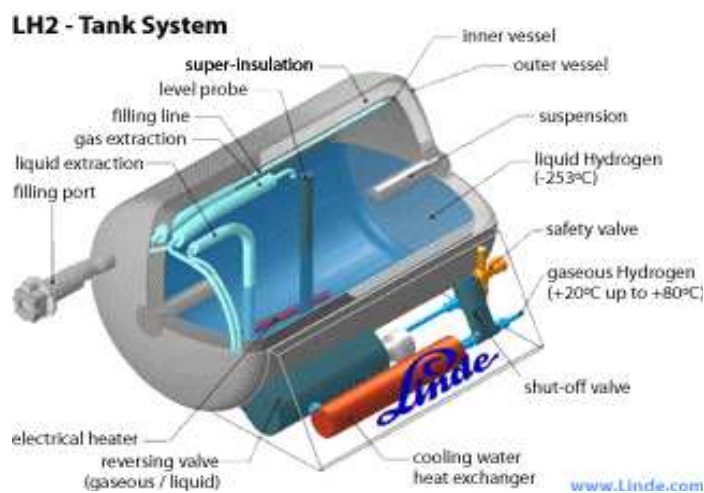
Εκτός από τον ηλεκτρολύτη, έναν σύστημα υδρογόνου περιλαμβάνει διατάξεις διαχώρισης του νερού από τα αέρια παράγωγα, εναλλάκτες θερμότητας, τη διάταξη αποθήκευσης, έναν συμπιεστή, σύστημα παροχής νερού με δυνατότητα θέρμανσης και ψύξης, σύστημα πεπιεσμένου αέρα, καθώς και συστήματα ελέγχου και ασφαλείας. Τυπικά διαγράμματα συστήματος υδρογόνου φαίνονται στο σχήμα 2.39 [15]. Η αποθήκευση του υδρογόνου μπορεί να γίνει είτε σε συμβατικές δεξαμενές υπό πίεση είτε σε δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων. Κατά τη διάρκεια της εξωθερμικής προσρόφησης υδρογόνου, οι δεξαμενές ψύχονται από κρύο νερό. Για να μπορέσουν να εκροφήσουν το υδρογόνο, χρειάζεται θέρμανση με ζεστό νερό σε θερμοκρασία της περίπου 75 °C, από έναν απλό θερμοσίφωνα. Επιπλέον, οι δεξαμενές χρειάζονται 5 - 15 λεπτά προθέρμανσης πριν αρχίσουν να αποδίδουν το υδρογόνο. Στο σχήμα 2.40 φαίνεται η δομή μιας δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου και τα επιμέρους υποσυστήματα της.

Τα βοηθητικά συστήματα, εξαιτίας της σημαντικής κατανάλωσης ενέργειας που απαιτούν, επηρεάζουν σημαντικά το συνολικό βαθμό απόδοσης της μονάδας παραγωγής υδρογόνου: καταναλώνουν περίπου το 50% της ισχύος που απορροφά η μονάδα ηλεκτρόλυσης.



Σχήμα 2.39

Τυπικά διαγράμματα συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου με τη μονάδα ηλεκτρόλυσης και τα περιφερειακά βοηθητικά κυκλώματα



Σχήμα 2.40

Παρουσίαση εξαρτημάτων δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου

2.4.4 Μοντελοποίηση ηλεκτρολύτη PEM

Α. Ηλεκτρικό Μοντέλο

Η χαρακτηριστική ρεύματος τάσης για κάθε κελί του ηλεκτρολύτη περιγράφεται μαθηματικά από τη μη γραμμική σχέση:

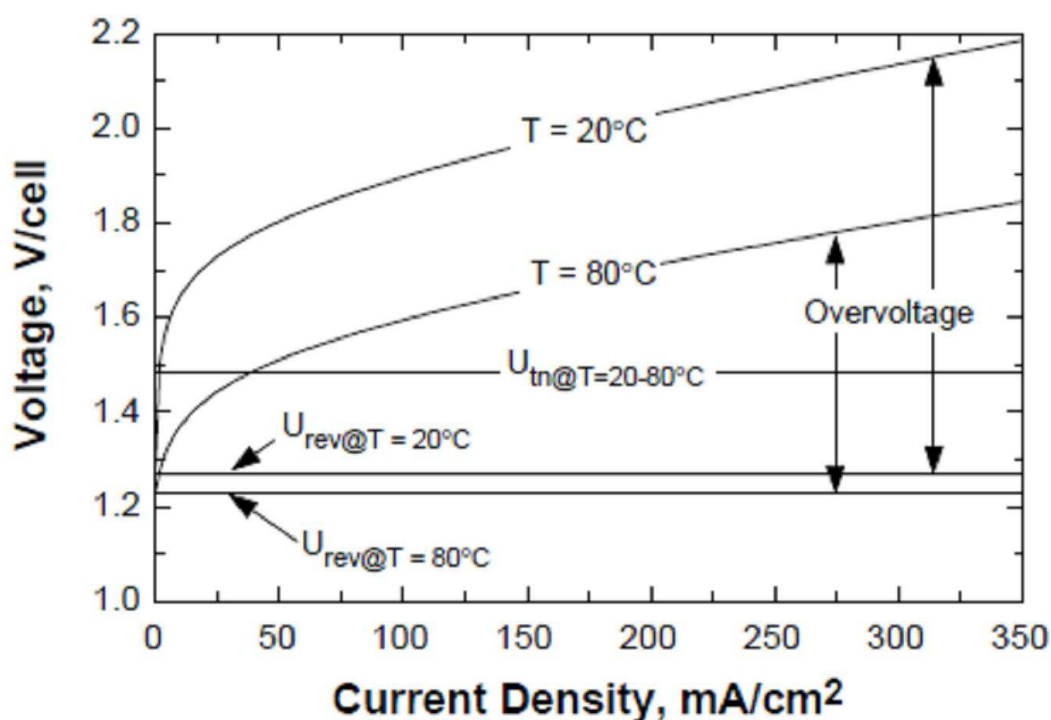
$$U_{cell} = U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 \cdot T_{el}}{A} \cdot I_{el} + (s_1 + s_2 \cdot T_{el} + s_3 \cdot T_{el}^2) \cdot \log \left(\frac{t_1 + \frac{t_2}{T_{el}} + \frac{t_3}{T_{el}^2}}{A} \cdot I_{el} + 1 \right) \quad (2.64)$$

Όπου U_{cell} η τάση στα άκρα καθενός από τα εν σειρά κελιά, U_{rev} η αντιστρέψιμη τάση, I_{el} το ρεύμα που διαρρέει τα κελιά του ηλεκτρολύτη, T_{el} η θερμοκρασία λειτουργίας του ηλεκτρολύτη, A η επιφάνεια των ηλεκτροδίων της ανόδου και της καθόδου, r_i οι παράμετροι ωμικής αντίστασης του ηλεκτρολύτη και s_i , t_i οι παράμετροι υπερδυναμικού (overvoltage) στα ηλεκτρόδια.

Επομένως, τάση στα άκρα του ηλεκτρολύτη U_{el} υπολογίζεται ως εξής:

$$U_{el} = n_c \cdot U_{cell} \quad (2.65)$$

Όπου n_c το πλήθος των εν σειρά συνδεδεμένων κελιών.



Σχήμα 2.41

Καμπύλες $U - I$ για ένα κελί ηλεκτρολύτη σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εξισώσεις, ο ηλεκτρολύτης μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μεταβλητός, μη γραμμικός αντιστάτης. Η επίδραση της θερμοκρασίας στον τρόπο λειτουργίας του σχετίζεται με τη μεταβολή των υπερδυναμικών στα ηλεκτρόδια. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει ελάττωση των υπερδυναμικών και συνεπώς της τάσης λειτουργίας του κελιού. Αν θεωρήσουμε ότι η ισχύς εισόδου διατηρείται σταθερή, η ελάττωση της τάσης συνεπάγεται αύξηση του ρεύματος λειτουργίας και κατ' επέκταση του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου. Επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας βελτιώνει τη λειτουργική συμπεριφορά του ηλεκτρολύτη. Στο σχήμα 2.41 δίνεται η τάση κελιού ως συνάρτηση της πυκνότητας ρεύματος για χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας [16].

B. Ηλεκτροχημικό Μοντέλο

Ο ρυθμός παραγωγής υδρογόνου είναι ευθέως ανάλογος της έντασης του ρεύματος λειτουργίας του ηλεκτρολύτη. Ο βαθμός απόδοσης Faraday ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της πραγματικής προς τη θεωρητική μέγιστη ποσότητα υδρογόνου που παράγεται στη μονάδα του χρόνου από τον ηλεκτρολύτη. Η μείωση της απόδοσης που περιγράφεται από το βαθμό απόδοσης Faraday οφείλεται σε απώλειες λόγω παρασιτικών ρευμάτων κατά μήκος των αγωγών των αερίων και για αυτό συχνά αναφέρεται ως βαθμός απόδοσης ρεύματος. Τα παρασιτικά ρεύματα αυξάνονται με τη μείωση της πυκνότητας ρεύματος που διαρρέει τον ηλεκτρολύτη λόγω της αύξησης της ενεργούς επιφάνειας του αγώγιμου διαλύματος και άρα ελάττωση της ηλεκτρικής του αντίστασης. Επιπρόσθετα, το μέγεθος των παρασιτικών ρευμάτων σε κάθε κελί είναι ανάλογο της τάσης του κελιού και επομένως το κλάσμα των παρασιτικών ρευμάτων προς το συνολικό ρεύμα του ηλεκτρολύτη αυξάνεται όσο μικρότερη είναι η πυκνότητα ρεύματος. Παράλληλα, αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει ελάττωση της αντίστασης του διαλύματος, που μεταφράζεται σε υψηλότερες απώλειες παρασιτικών ρευμάτων και συνεπώς μικρότερο βαθμό απόδοσης Faraday.

Ο βαθμός απόδοσης Faraday δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [16]:

$$n_F = \frac{\left(\frac{I_{el}}{A}\right)^2}{f_1 + \left(\frac{I_{el}}{A}\right)^2} \cdot f_2 \quad (2.66)$$

Όπου f_1 , f_2 παράμετροι που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και προσεγγίζονται από γραμμικές συναρτήσεις:

$$f_1 = 2.5 \cdot T_{el} + 50 \quad f_2 = -0.00075 \cdot T_{el} + 1 \quad (2.67)$$

Εναλλακτικά, η απόδοση Faraday μπορεί να προσεγγιστεί από μία σύνθετη εκθετική συνάρτηση:

$$n_F = a_1 \cdot \exp\left[\frac{a_2 + a_3 \cdot T_{el}}{(I_{el}/A)} + \frac{a_4 + a_5 \cdot T_{el}}{(I_{el}/A)^2}\right] \quad (2.68)$$

Όπου a_i παράμετροι που υπολογίζονται πειραματικά.

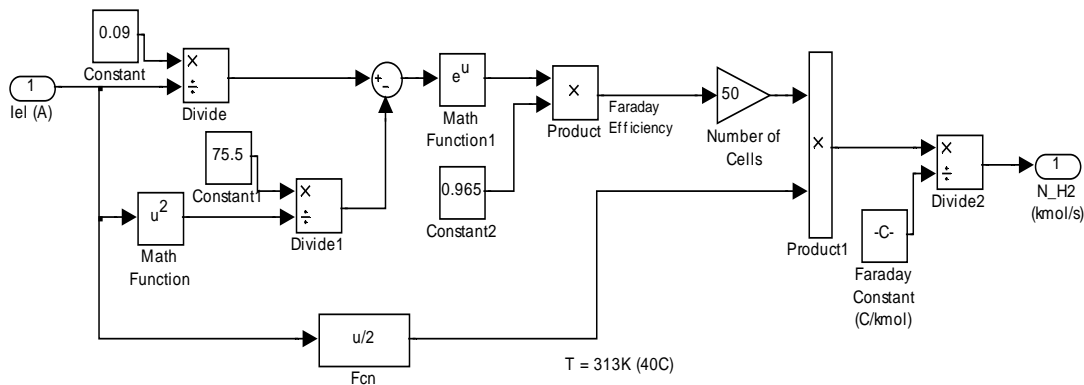
Πιο συγκεκριμένα, η απόδοση Faraday του μοντέλου υπολογίζεται από τη συνάρτηση (για θερμοκρασία λειτουργίας 40 °C) [17]:

$$n_F = 96.5 \cdot \exp\left(\frac{0.09}{I_{e1}} - \frac{75.5}{I_{e1}^2}\right) (\%) \quad (2.69)$$

Έχοντας ορίσει το βαθμό απόδοσης Faraday, ο ρυθμός παραγωγής υδρογόνου σύμφωνα με τον νόμο του Faraday είναι ευθέως ανάλογος του ρυθμού μεταφοράς ηλεκτρονίων στα ηλεκτρόδια, δηλαδή του ρεύματος που ρέει από το εξωτερικό κύκλωμα. Ο ρυθμός παραγωγής υδρογόνου σε mol/s υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$n_{H_2} = \frac{n_F n_C I_{e1}}{2F} \quad (2.70)$$

Το μοντέλο προσομοίωσης του ηλεκτρολύτη φαίνεται στο σχήμα 2.42.



Σχήμα 2.42

Μοντέλο Ηλεκτρολύτη PEM

2.4.5 Μοντελοποίηση δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου

Εάν ο μοριακός ρυθμός εισροής υδρογόνου στη δεξαμενή από τον ηλεκτρολύτη είναι \dot{n}_{H_2} (mol/s) και ο μοριακός ρυθμός εκροής υδρογόνου από τη δεξαμενή προς την κυψέλη καυσίμου είναι \dot{q}_{H_2} (mol/s), τότε η ποσότητα του υδρογόνου που είναι αποθηκευμένη στη δεξαμενή ανά πάσα στιγμή N_{H_2} (mol) μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$N_{H_2} = N_0 + \int \dot{n}_{H_2} dt - \int \dot{q}_{H_2} dt \quad (2.71)$$

Όπου N_0 η αρχική ποσότητα υδρογόνου σε mol.

Η πίεση της δεξαμενής P_{tank} υπολογίζεται από την εξίσωση [18]:

$$P_{\text{tank}} = z \frac{N_{\text{H}_2} RT_{\text{tank}}}{M_{\text{H}_2} V_{\text{tank}}} \quad (2.72)$$

Όπου V_{tank} , T_{tank} ο όγκος και η θερμοκρασία λειτουργίας της δεξαμενής, M_{H_2} η σχετική μοριακή μάζα του υδρογόνου (2.01588 kg/kmol) και z ο παράγοντας συμπίεστικότητας, ο οποίος είναι συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας:

$$z = \frac{P_{\text{tank}} \bar{V}}{RT} \quad (2.73)$$

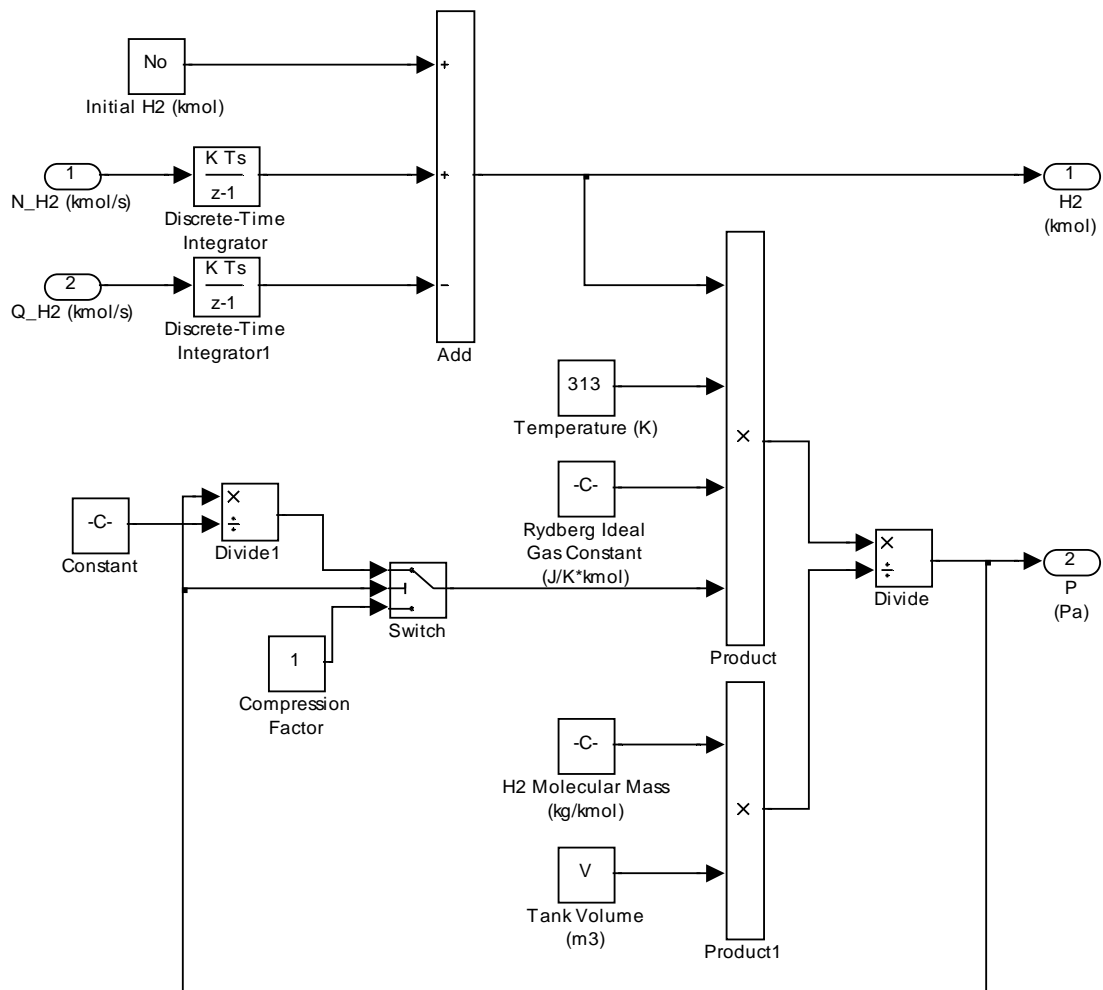
Όπου \bar{V} ο μοριακός όγκος του υδρογόνου, ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\bar{V} = \frac{M}{\rho} \quad (2.74)$$

Όπου M η μάζα συγκεκριμένης ποσότητας του αερίου και ρ η πυκνότητά του.

Στην πράξη, ο παράγοντας συμπίεστικότητας μπορεί να θεωρηθεί ίσος με 1 για πίεση μικρότερη από 2000 psi (σε θερμοκρασία δωματίου) και μεγαλύτερος του 1 για πίεση μεγαλύτερη από 2000 psi. Γίνεται η παραδοχή ότι η θερμοκρασία της δεξαμενής διατηρείται σταθερή (40 °C), καθώς η διαδικασία αποθήκευσης είναι σχετικά αργή [18].

Το σχήμα 2.43 δείχνει το μοντέλο προσομοίωσης της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου, που βασίστηκε στις ανωτέρω εξισώσεις.



Σχήμα 2.43

Μοντέλο δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου

2.5 Υπερπυκνωτής (Ultracapacitor - UC)

Ο πιο άμεσος τρόπος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι στο ηλεκτρικό πεδίο ενός πυκνωτή. Οι πυκνωτές μπορούν να φορτιστούν σημαντικά ταχύτερα από τις συμβατικές μπαταρίες και να υποστούν δεκάδες χιλιάδες κύκλους φόρτισης - εκφόρτισης με υψηλό βαθμό απόδοσης. Συμβατικοί πυκνωτές έχουν αναπτυχθεί για κάλυψη αιχμιακού φορτίου της τάξης μεγέθους των λίγων kW για διάστημα μικρότερο της μίας ώρας. Ωστόσο, το κυριότερο πρόβλημα των πυκνωτών είναι η μικρή τιμή πυκνότητας ενέργειας, με συνέπεια μεγάλες χωρητικότητες να απαιτούν εξαιρετικά μεγάλη επιφάνεια διηλεκτρικού υλικού, κατάσταση που είναι εντελώς μη οικονομική. Η πρόσφατη πρόοδος των ηλεκτροχημικών πυκνωτών ή υπερπυκνωτών (ultracapacitors) έχει οδηγήσει σε πολύ μεγαλύτερες τιμές πυκνότητας ενέργειας και χωρητικότητας σε σχέση με τους συμβατικούς πυκνωτές, που κατά προσέγγιση διαφέρουν κατά δύο τάξεις μεγέθους (10-100 s kW). Οι υπερπυκνωτές, αντί για στερεό διηλεκτρικό, χρησιμοποιούν ως διαχωριστικό μεταξύ των οπλισμών ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη. Μειονέκτημα και των πυκνωτών και των υπερπυκνωτών

αποτελούν οι μικρές διάρκειες εκφόρτισης, καθώς και οι υψηλές απώλειες ενέργειας λόγω αυτοεκφόρτισης. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές ποιότητας ισχύος, όπως ride-through και power bridging, καθώς και εφαρμογές ανάκτησης ενέργειας σε εκτεταμένα συστήματα διαμετακόμισης (transit systems). Τέλος, μολονότι οι μικροί υπερπυκνωτές αποτελούν ώριμη τεχνολογία, υπερπυκνωτές με πυκνότητες ενέργειας άνω των 20 kWh/m³ είναι ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης. Επιγραμματικά, τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης των υπερπυκνωτών είναι [19]:

➤ *Πλεονεκτήματα*

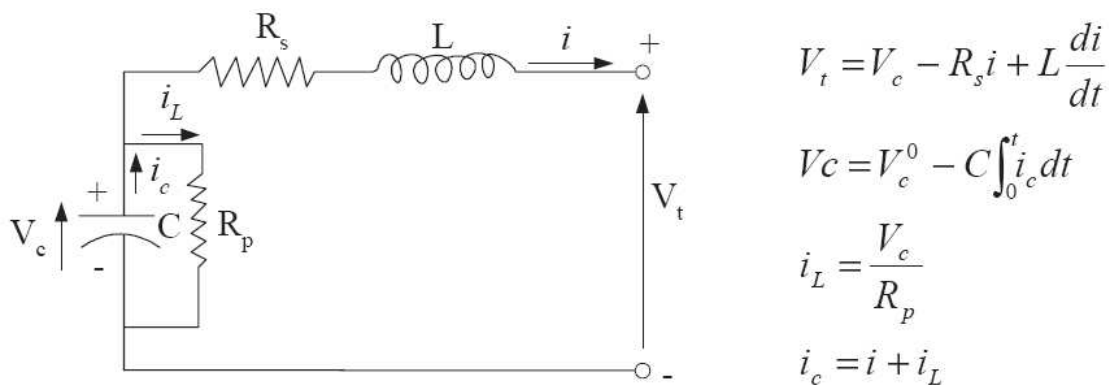
- Πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος από τις μπαταρίες (Η αιχμή μπορεί να φτάσει από 1000W/kg έως 1500W/kg).
- Υψηλή απόδοση (95%), μικρή εσωτερική αντίσταση.
- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις μπαταρίες.
- Χαμηλό κόστος ανά κύκλο.
- Ταχεία φόρτιση/εκφόρτιση.
- Απλή μέθοδος φόρτισης (ικανότητα υπερφόρτισης χωρίς κινδύνους)

➤ *Μειονεκτήματα*

- Μικρή πυκνότητα ενέργειας (3 – 5 Wh/kg, ενώ για μπαταρίες μολύβδου – οξέως 30 – 40 Wh/kg).
- Μεγάλη διακύμανση της θερμοκρασιακής τάσης, ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης (state-of-charge).
- Φαινόμενο αυτοεκφόρτισης.
- Μικρή τιμή θερμοκρασιακής τάσης (απαιτούνται συστοιχίες υπερπυκνωτών για την επίτευξη υψηλότερων τάσεων).

2.5.1 Μοντελοποίηση υπερπυκνωτή

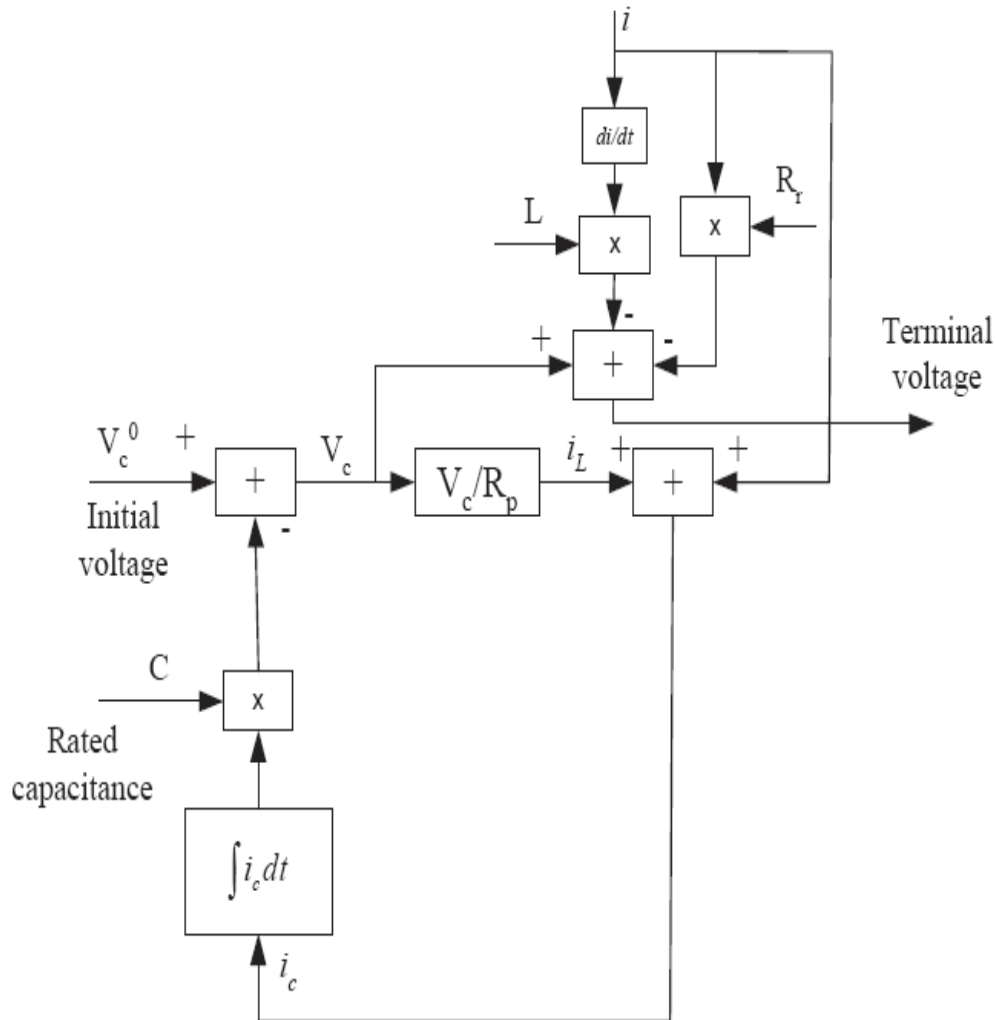
Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του υπερπυκνωτή, καθώς και οι εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο ακολουθούν στο σχήμα 2.44 [20].



Σχήμα 2.44

Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα υπερπυκνωτή και εξισώσεις μοντέλου

Το κύκλωμα περιλαμβάνει μία χωρητικότητα C , μία αυτεπαγωγή L , μία ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά R_s που μοντελοποιεί την αντίσταση φόρτισης και εκφόρτισης και μία ισοδύναμη αντίσταση παράλληλα που μοντελοποιεί τις απώλειες αυτοεκφόρτισης. Το σχήμα 2.45 δείχνει το μπλοκ διάγραμμα του μοντέλου του υπερπυκνωτή.



Σχήμα 2.45

Μπλοκ διάγραμμα μοντέλου υπερπυκνωτή

Το επίπεδο φόρτισης του υπερπυκνωτή (State Of Charge - SOC) υπολογίζεται ως εξής:

$$SOC = \frac{V_c}{V_{c,max}} \cdot 100\% \quad (2.75)$$

Όπου V_c η τάση του πυκνωτή και $V_{c,max}$ η μέγιστη τάση του πυκνωτή (βλέπε πίνακα 2.2).

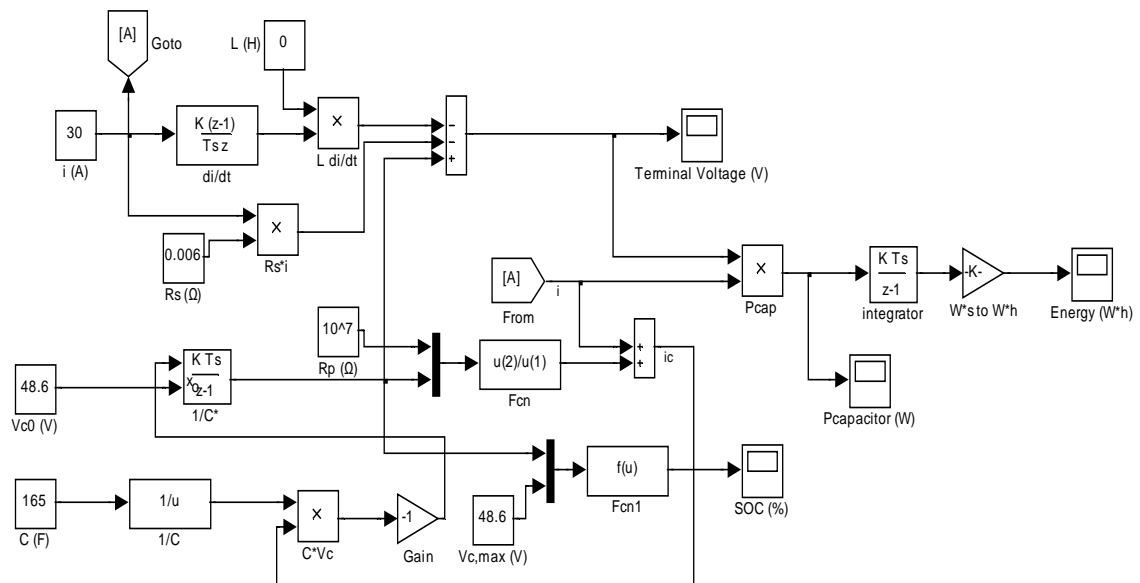
Η μοντελοποίηση του υπερπυκνωτή βασίστηκε στις παραμέτρους του μοντέλου Maxwell Boostcap BMOD0165 – 48.6 V [21]:

Παράμετροι	Τιμή
Χωρητικότητα (F)	165
Εσωτερική αντίσταση σε σειρά (mΩ)	6.1
Ρεύμα διαρροής (A)	0.0052, 72h, 25°C
Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	-40 – 65
Τάση (V)	48.6
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)	4800
Πυκνότητα ισχύος (W/kg)	7900
Πυκνότητα ενέργειας (Wh/kg)	3.81
Όγκος (l)	12.6
Βάρος (kg)	14.2

Πίνακας 2.2

Παράμετροι υπερπυκνωτή

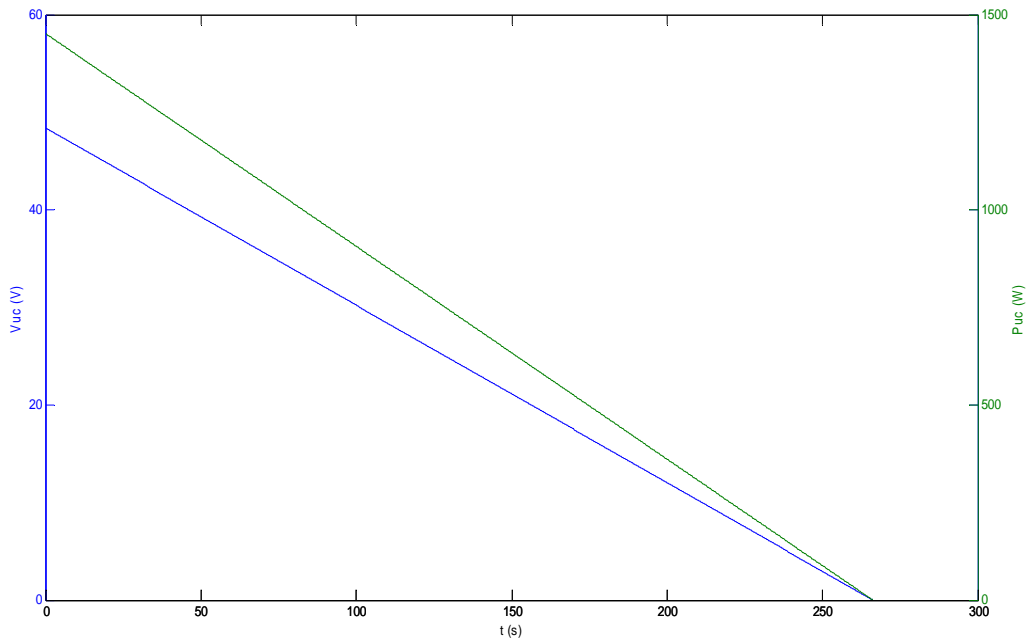
Βάσει των ανωτέρω εξισώσεων και παραμέτρων, αναπτύχθηκε το μοντέλο του υπερπυκνωτή στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB (σχήμα 2.46).



Σχήμα 2.46

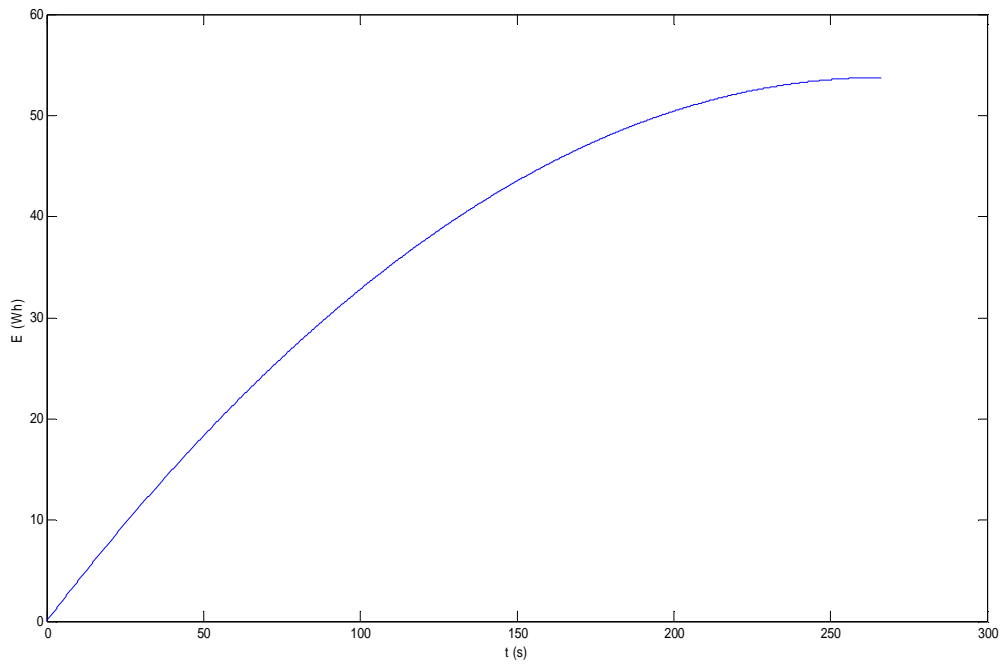
Μοντέλο υπερπυκνωτή

Αξιοποιώντας το μοντέλο, εξήχθησαν οι καμπύλες εκφόρτισης $V - t$ και $P - t$ για ρεύμα 30 A, καθώς η ενέργεια του υπερπυκνωτή, ολοκληρώνοντας την ισχύ.



Σχήμα 2.47

Καμπύλες εκφόρτισης υπερπυκνωτή $V - t$ και $P - t$ για ρεύμα 30 A



Σχήμα 2.48

Ενέργεια που αποδόθηκε από τον υπερπυκνωτή (54 Wh)

Για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερη τερματική τάση ή χωρητικότητα, δημιουργούνται συστοιχίες υπερπυκνωτών (UC bank), οι οποίοι διασυνδέονται σε σειρά ή παράλληλα, όπως δείχνει το σχήμα 2.49 [17].

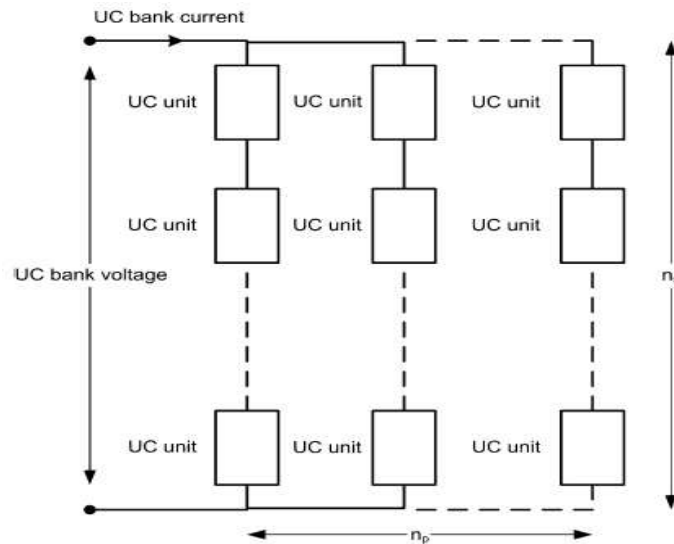


Fig. 7. The arrangement of capacitors in an UC bank.

Σχήμα 2.49

Συστοιχία υπερπυκνωτών (UC bank)

Σε αυτήν την περίπτωση η ισοδύναμη αντίσταση σειράς και η ισοδύναμη χωρητικότητα υπολογίζονται ως εξής:

$$R_{s,total} = n_s \frac{R_s}{n_p} \quad (2.76)$$

$$C_{total} = n_p \frac{C}{n_s} \quad (2.77)$$

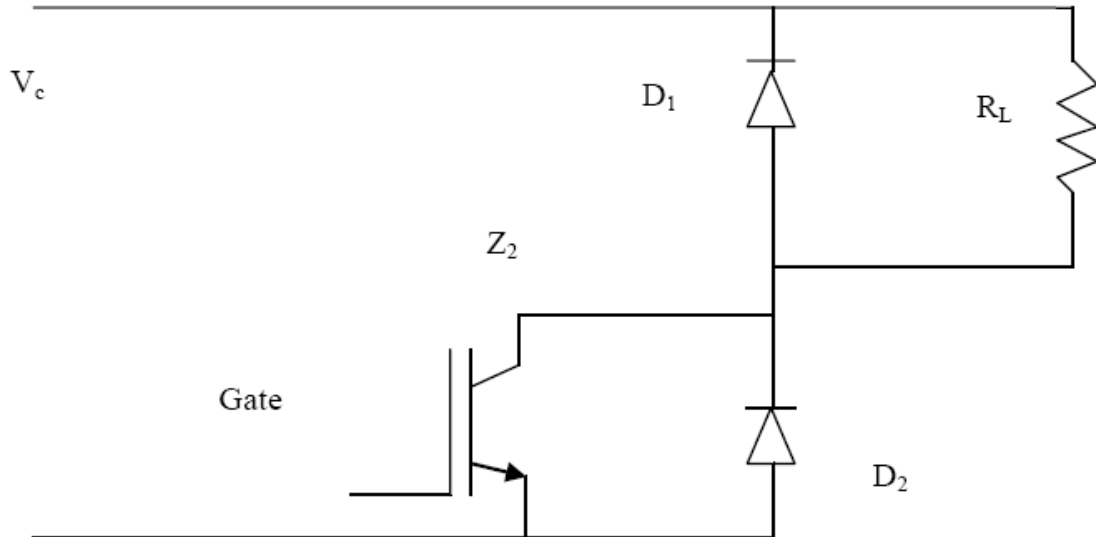
Όπου n_s και n_p ο αριθμός των εν σειρά και παράλληλα συνδεδεμένων υπερπυκνωτών της συστοιχίας.

2.6 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.

2.6.1 Μοντελοποίηση ελεγχόμενου φορτίου

Στο σχήμα 2.50 φαίνεται το κύκλωμα υλοποίησης του ελεγχόμενου φορτίου, το οποίο περιέχει μία αντίσταση και τα κατάλληλα ηλεκτρονικά ισχύος [22].



Σχήμα 2.50

Κύκλωμα ελεγχόμενου φορτίου

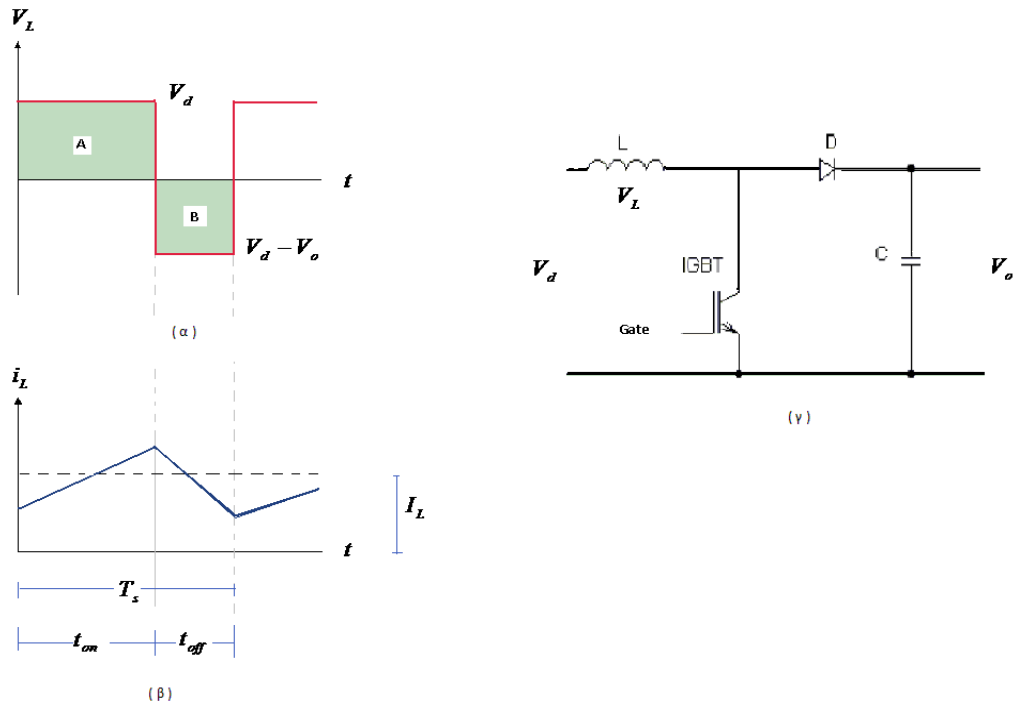
Όταν το IGBT Z_2 άγει, το φορτίο R_L διαρρέεται από ρεύμα. Όταν δεν άγει, η κυκλοφορία του ρεύματος μέσα από το φορτίο συνεχίζεται για λίγο μέσα από τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης D_1 . Η δίοδος D_2 , που βρίσκεται ενσωματωμένη στο Z_2 , χρησιμεύει ελάχιστα, κυρίως για την προστασία του από ανάστροφες 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:

$$I_L = \frac{V_C \cdot D}{R_L} \quad (2.78)$$

2.7 Ηλεκτρονικά ισχύος

2.7.1 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης συνεχούς ρεύματος (Boost DC-DC Converter)

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 (σχήμα 2.51). 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 (σχήμα 2.51) ή διακοπτόμενο ανάλογα με τις παραμέτρους του μετατροπέα και τον συχνότητα αγωγής του IGBT [23].



Σχήμα 2.51

(α) Μορφή της τάσης πηνίου, (β) Μορφή ρεύμα πηνίου, (γ) Κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης τάσης

Η τάση του πηνίου δίνεται από τη γνωστή σχέση:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2.79)$$

Αν ολοκληρώσουμε και τα δύο μέλη της σε μια περίοδο T_s , προκύπτει η μέση τιμή της τάσης στα άκρα του πηνίου του μετατροπέα ανύψωσης (εξίσωση 2.80). Δεδομένου ότι η ενέργεια δεν χάνεται αλλά ούτε και καταναλώνεται, το ρεύμα στην αρχή της περιόδου θα είναι ίσο με εκείνο στο τέλος της περιόδου (σχήμα 2.51.β) και η μέση τιμή της τάσης του πηνίου κατά την διάρκεια μιας περιόδου θα είναι μηδέν.

$$\int_0^{T_s} V_L dt = L \int_0^{T_s} di_L = L[i_L(T_s) - i_L(0)] = 0 \quad (2.80)$$

Από το σχήμα 2.51.β ισχύει:

$$T_s = t_{on} + t_{off} \quad (2.81)$$

Θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν απώλειες στο μετατροπέα, η σχέση 2.80 υπονοεί ότι το χωρίο A (σχήμα 2.51.α) ισούται με το χωρίο B και έτσι προκύπτει η σχέση:

$$V_d t_{on} + (V_d - V_o) t_{off} = 0 \quad (2.82)$$

Όπου V_d η τάση εισόδου, V_0 η τάση εξόδου, t_{on} το χρονικό διάστημα αγωγής και t_{off} το διάστημα μη αγωγής.

Αν διαιρέσουμε την (2.82) ως προς την περίοδο T_s παίρνουμε την σχέση που συνδέει την τάση εισόδου και εξόδου.

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad (2.83)$$

Δεδομένου ότι η ισχύς εισόδου θεωρείται ίση με την ισχύ εξόδου τότε

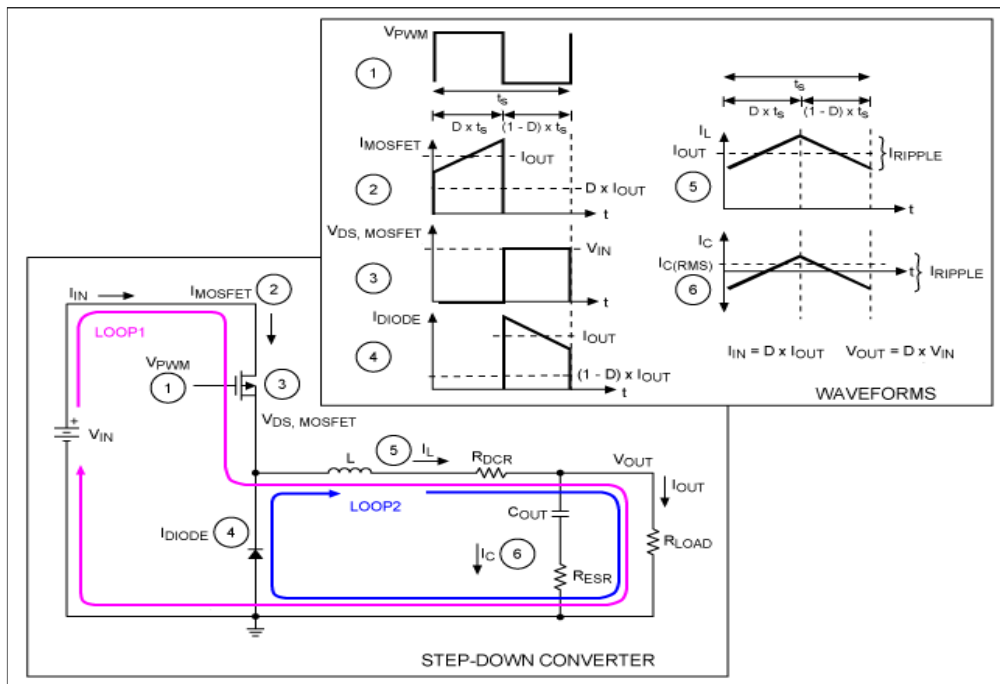
$$V_d I_d = V_0 I_0 \quad (2.84)$$

Από τις σχέσεις 2.83 και 2.84 προκύπτει

$$\frac{I_0}{I_d} = 1 - D \quad (2.85)$$

2.7.2 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης συνεχούς ρεύματος (Step – Down DC – DC Converter)

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 και η συνδεσμολογία του φαίνεται στο σχήμα 2.52.



Σχήμα 2.52

Κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων

Θεωρώντας συνεχή αγωγή ρεύματος η λειτουργία του μετατροπέα είναι εξής: Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, για ένα χρονικό διάστημα t_{on} , αυτός άγει το ρεύμα του πηνίου και η διόδος πολώνεται ανάστροφα (Loop 1, σχήμα 2.52). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας θετικής τάσης $V_L = V_d - V_0$ στα άκρα του πηνίου, αν συμβολίσουμε με V_d την τάση εισόδου και V_0 την τάση εξόδου. Η τάση αυτή προκαλεί μια γραμμική αύξηση στο ρεύμα του πηνίου i_L . Όταν ο διακόπτης ανοίξει, εξαιτίας της αποθηκευμένης ενέργειας στο πηνίο, το i_L συνεχίζει να ρέει (Loop 2, σχήμα 2.52). Το ρεύμα αυτό ρέει τώρα μέσω της διόδου και η τάση του πηνίου γίνεται $V_L = -V_0$. Ομοίως με το μετατροπέα ανύψωσης, το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου V_L στο διάστημα μιας περιόδου πρέπει να είναι μηδέν [24]:

$$\int_0^{T_s} V_L dt = \int_0^{t_{on}} V_L dt + \int_{t_{on}}^{T_s} V_L dt = 0 \quad (2.86)$$

$$(V_d - V_0)t_{on} = V_0(T_s - t_{on}) \quad (2.87)$$

Επομένως, η σχέση που συνδέει την τάση εξόδου με την τάση εισόδου είναι:

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{t_{on}}{T_s} = D \quad (2.88)$$

Αγνοώντας τις απώλειες ισχύος που σχετίζονται με όλα τα στοιχεία του κυκλώματος, ισχύς εισόδου ισούται με την ισχύ εξόδου:

$$V_d I_d = V_0 I_0 \quad (2.89)$$

Επομένως, η σχέση που συνδέει το ρεύμα εξόδου με το ρεύμα εισόδου είναι:

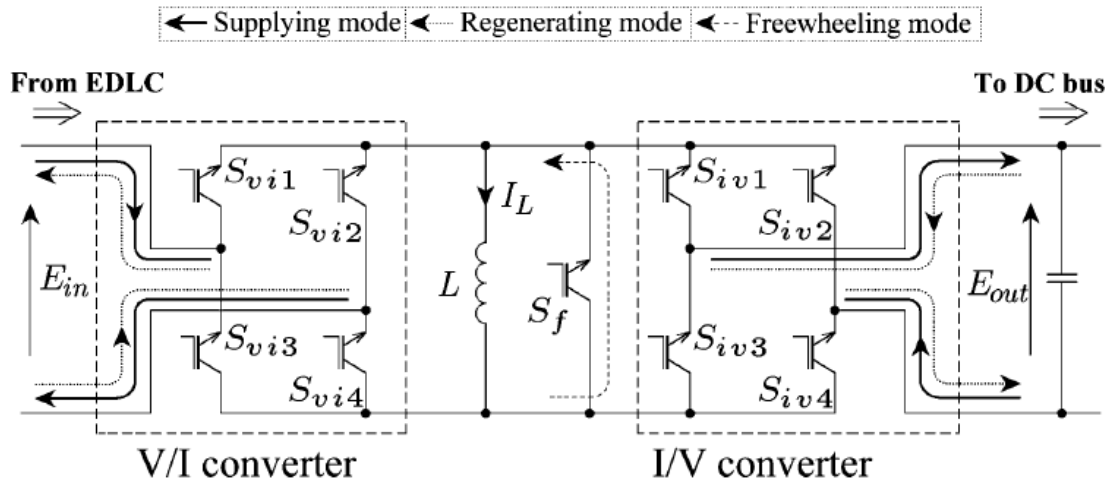
$$\frac{I_0}{I_d} = \frac{1}{D} \quad (2.90)$$

2.7.3 Αμφίδρομος μικτός μετατροπέας συνεχούς ρεύματος (Bidirectional Buck – Boost DC – DC Converter)

Αυτός ο μετατροπέας ανυψώνει ή υποβιβάζει την τάση εισόδου και δίνει τη δυνατότητα αμφίδρομης ροής της ισχύος από την είσοδο στην έξοδο και αντίστροφα, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του. Εξαιτίας αυτής της δυνατότητας του, είναι ο πλέον κατάλληλος μετατροπέας για τη διασύνδεση των υπερπυκνωτών με το ζυγό ΣΡ, καθώς απαιτείται η συνεχής φόρτιση και εκφόρτιση τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η διάταξη που προτείνεται στην αναφορά [25]. Ο εν λόγω μετατροπέας λειτουργεί σε τρεις καταστάσεις:

- Supplying mode – Εκφόρτιση υπερπυκνωτών.
- Regenerating mode – Φόρτιση υπερπυκνωτών.
- Freewheeling mode.

Το κύκλωμα του μετατροπέα, καθώς και οι διάφοροι τρόποι λειτουργίας του ακολουθούν στα σχήματα 2.53 και 2.54.



Σχήμα 2.53

Κύκλωμα αμφίδρομου μετατροπέα

SWITCHING PATTERN OF DC/DC BI-DIRECTIONAL CONVERTER

mode	$S_{vi1,vi4}$	$S_{vi2,vi3}$	$S_{iv1,iv4}$	$S_{iv2,iv3}$	S_f
supplying	ON	OFF	OFF		OFF
	OFF		OFF	ON	OFF
regenerating	OFF	ON	OFF		OFF
	OFF		ON	OFF	OFF
freewheeling	OFF				ON

Σχήμα 2.54

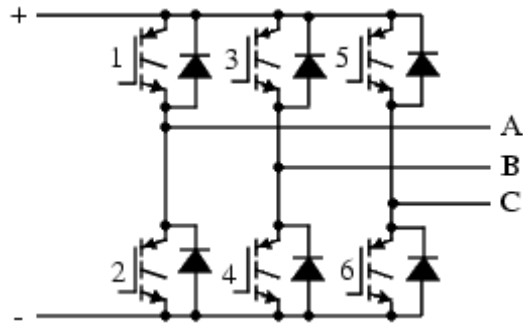
Μέθοδοι αγωγής διακοπών για κάθε λειτουργία

Ο πρωταρχικός σκοπός του μετατροπέα I/V είναι να κρατάει την τάση του ζυγού E_{out} σταθερή. Όταν η τιμή της τάσης E_{out} είναι ανώτερη/κατώτερη της επιθυμητής, αναπροσαρμόζοντας την αγωγή των IGBTs (σχήμα 2.54), αναγκάζουμε το ρεύμα του πηνίου I_L να κινηθεί όπως δείχνουν τα βέλη της λειτουργίας regenerating/supplying (μετασχηματισμός I/V). Από την άλλη, ο σκοπός του μετατροπέα V/I είναι να κρατάει το ρεύμα I_L σταθερό. Όταν η τιμή του ρεύματος I_L είναι ανώτερη/κατώτερη της επιθυμητής, αλλάζουμε την αγωγή των IGBTs, ώστε να συνδεθεί η τάση E_{in} με το πηνίο σύμφωνα με τη λειτουργία regenerating/supplying (μετασχηματισμός V/I). Τέλος, όταν τα μεγέθη E_{out} και I_L είναι εντός των επιθυμητών ορίων, το ρεύμα του πηνίου κινείται ελεύθερα μέσω του διακόπτη S_f (freewheeling mode). Ο αμφίδρομος μετατροπέας λειτουργεί σαν μικτός μετατροπέας μετά από επαναλαμβανόμενους μετασχηματισμούς I/V και V/I με την εξής σχέση εισόδου – εξόδου:

$$D = \frac{E_{out}}{E_{in} + E_{out}} \quad (2.91)$$

2.7.4 Τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης (Three – Phase Voltage Source DC – AC Inverter)

Ο τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης μετατρέπει τη συνεχή τάση εισόδου σε τριφασική εναλλασσόμενη μεταβλητής ενεργής τιμής και μεταβλητής συχνότητας. Το κύκλωμα ενός τυπικού τριφασικού αντιστροφέα με IGBTs φαίνεται στο σχήμα 2.55.



Σχήμα 2.55

Κυκλωματικό διάγραμμα τριφασικού αντιστροφέα

Οι δίοδοι στα άκρα των διακοπών χρειάζονται για επαγωγικά φορτία, διότι εξασφαλίζουν την κυκλοφορία άεργου ισχύος, καθώς και σε περιπτώσεις πέδησης, όπου έχουμε ροή ρεύματος αντίθετης φοράς από εκείνη των ελεγχόμενων διακοπτικών στοιχείων.

Η λειτουργία του αντιστροφέα βασίζεται στους θετικούς παλμούς έναυσης που δίνονται στις πύλες 2 εκ των 6 διακοπτικών στοιχείων, με αποτέλεσμα αυτά να μεταβαίνουν σε κατάσταση αγωγής. Συνεπώς, συνδέουν τη συνεχή τάση εισόδου στα άκρα του φορτίου, έτσι ώστε να δημιουργείται ένας θετικός παλμός τάσης και εύρους ίσο με τη χρονική διάρκεια αγωγής των αντίστοιχων διακοπτικών στοιχείων. Στη συνέχεια, αφαιρούμε του παλμούς οδήγησης και τους εφαρμόζουμε στα επόμενα 2 διακοπτικά στοιχεία και ούτω καθεξής.

Η τάση εξόδου του αντιστροφέα αποτελείται από τη βασική αρμονική συνιστώσα και από τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες, οι οποίες πρέπει να εξαλειφθούν ή να μειωθούν. Αυτό, βέβαια, μπορεί να γίνει με τη χρησιμοποίηση ενός φίλτρου στην έξοδο. Για να μειώσουμε το μέγεθος του φίλτρου, χρησιμοποιούμε μια τεχνική, η οποία ονομάζεται Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (SPWM). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, χρησιμοποιούνται τρεις όμοιες ημιτονοειδείς κυματομορφές αναφοράς (μία για κάθε ημιγέφυρα) και μια τριγωνική κυματομορφή φορέα συγχρονισμένες μεταξύ τους. Οι ημιτονοειδείς κυματομορφές παρουσιάζουν διαφορά φάσης 120° η καθεμία από τις άλλες, όπως συμβαίνει σε ένα τυπικό τριφασικό σύστημα. Τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και της κυματομορφής του φορέα ορίζουν τους παλμούς έναυσης των IGBTs. Αυτό που επιτυγχάνεται με την τεχνική SPWM είναι η μετατόπιση της κυρίαρχης ανώτερης αρμονικής συνιστώσας σε συχνότητα πολύ υψηλότερη από αυτήν της βασικής αρμονικής συνιστώσας [26]. Η κυρίαρχη ανώτερη αρμονική συνιστώσα είναι η αρμονική που έχει το μέγιστο συντελεστή παραμόρφωσης (Distortion Factor):

$$D_n(\%) = 100 \left(\frac{V_{AB,n}}{n^2} \right) \quad (2.92)$$

Όπου $V_{AB,n}$ το πλάτος της n-οστής αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου.

Το πλάτος και η τάξη της κυρίαρχης ανώτερης αρμονικής συνιστώσας μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$V_{(AB,d)max} = 0.27V_{in} \quad (2.93)$$

$$d = F_{nc} - 2 \quad (2.94)$$

$$F_{nc} = \frac{F_c}{F_r} \quad (2.95)$$

Όπου F_{nc} η ανηγμένη συχνότητα του φορέα και V_{in} η τάση εισόδου του αντιστροφέα.

Ο συντελεστής διαμόρφωσης (modulation factor), ο οποίος παίρνει τιμές από 0 έως 1, είναι ο λόγος του πλάτους της κυματομορφής αναφοράς A_r (ημιτόνου) προς το πλάτος της κυματομορφής φορέα A_c (τριγωνικού παλμού):

$$M_f = \frac{A_r}{A_c} \quad (2.96)$$

Το πλάτος της κυματομορφής του φορέα παραμένει σταθερό, με αποτέλεσμα αυξομειώνοντας το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς να αυξομειώνονται τα εύρη των παλμών έναυσης και κατά συνέπεια να αυξομειώνεται η ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας. Το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα είναι:

$$V_{AB,1} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{in} M_f \quad (2.97)$$

Είναι προφανές από τα παραπάνω ότι μεταβάλλοντας το συντελεστή διαμόρφωσης είναι δυνατή η ρύθμιση της τάσης εξόδου του αντιστροφέα στην επιθυμητή τιμή.

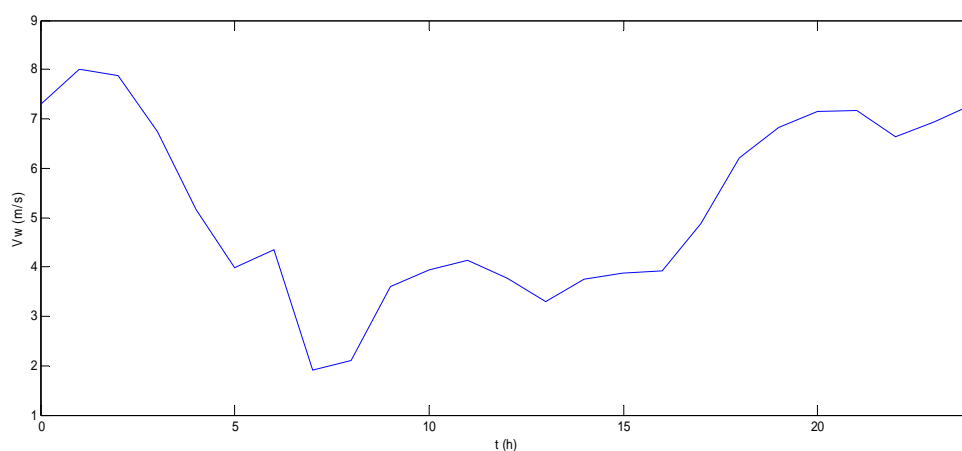
3 Διαστασιολόγηση και ανάλυση κόστους του υβριδικού συστήματος

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια βασική διαστασιολόγηση του συστήματος, με κριτήριο την πιθανότητα μη τροφοδοτούμενης ενέργειας για διάφορες περιπτώσεις. Ακόμη, διαστασιολογείται το μέγεθος του υπερπυκνωτή, με βάση τις αιχμές ισχύος της ημερήσιας καμπύλης του φορτίου που δε μπορεί να τροφοδοτήσει η κυψέλη. Τέλος, γίνεται μία βασική ανάλυση κόστους του συστήματος και μελετάται το πως επηρεάζεται το κόστος από την διαστασιολόγηση που επιλέχθηκε, καθώς και από το κόστος της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας.

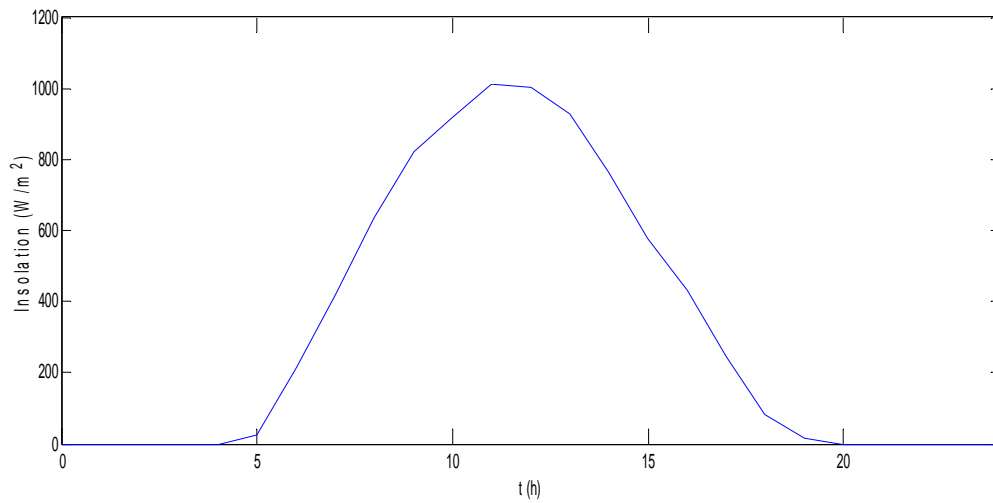
3.2 Διαστασιολόγηση του συστήματος με τη μέθοδο LPSP

Η βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζεται σε ΑΠΕ είναι ένα δυσεπίλυτο πρόβλημα, καθώς απαιτεί μακροχρόνιες μελέτες της συμπεριφοράς του αιολικού και ηλιακού δυναμικού στη θέση εγκατάστασης. Η σωστή επιλογή των κατάλληλων μεγεθών δυσκολεύει ακόμη πιο πολύ, όταν το σύστημα σχεδιάζεται για να λειτουργήσει αυτόνομα. Χρειάζεται, ίσως, η υπερδιαστασιολόγηση κάποιων παραμέτρων, οι οποίες θα εγγραστούν υψηλή αξιοπιστία. Γι' αυτό το λόγο, θα αναπτυχθούν τρία διαφορετικά σενάρια με γνώμονα την αξιοπιστία του συστήματος. Ο δείκτης αξιοπιστίας βάσει του οποίου θα αξιολογηθούν οι τρεις περιπτώσεις θα είναι η πιθανότητα μη τροφοδοτούμενης ενέργειας (Loss of Power Supply Probability - LPSP). Η ανάλυση του συστήματος θα γίνει σε 24ωρη βάση και τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι ημερήσιες χρονοσειρές ανέμου (σχήμα 3.1) και ηλιακής ακτινοβολίας (σχήμα 3.2) στη θέση εγκατάστασης, καθώς και η ημερήσια καμπύλη φορτίου οικιακού καταναλωτή (σχήμα 3.3). Το φορτίο προέκυψε από 15λεπτή δειγματοληψία της ζήτησης ενός οικιακού καταναλωτή και στη συνέχεια προστέθηκαν αιχμιακά φορτία, που μοντελοποιούν μεταβατικές καταστάσεις, όπως εκκινήσεις κινητήρων.



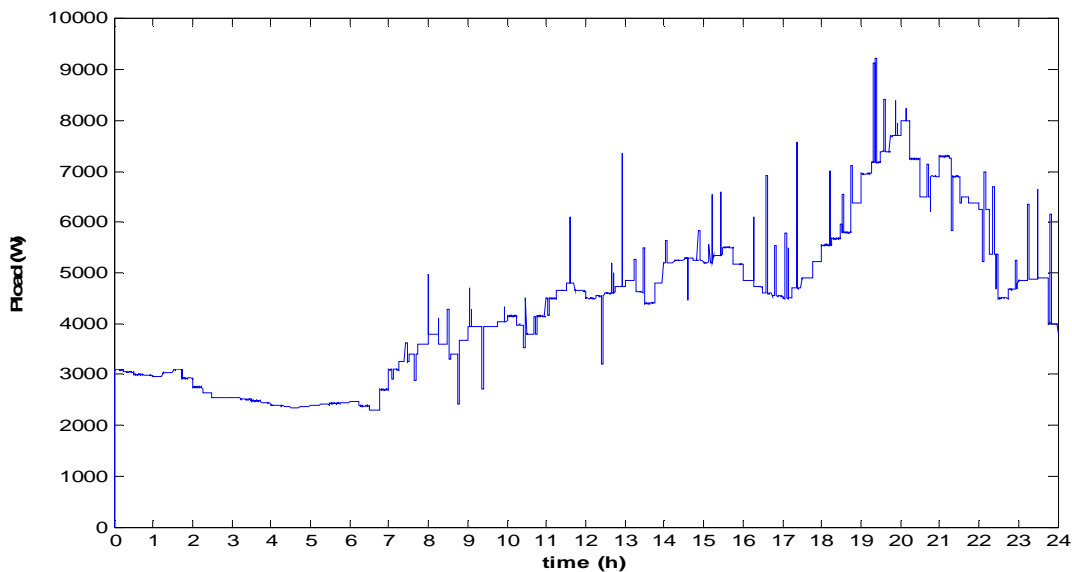
Σχήμα 3.1

Ημερήσια χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου



Σχήμα 3.2

Ημερήσια χρονοσειρά ηλιακής ακτινοβολίας



Σχήμα 3.3

Ημερήσια καμπύλη φορτίου

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε ένα υβριδικό σύστημα οι Α/Γ είναι η λιγότερο ελαστική παράμετρος σχεδιασμού, καθώς τα μεγέθη τους είναι έντονα κβαντισμένα [4]. Δεδομένου ότι η ανεμογεννήτρια έχει χαμηλότερο κόστος από τα φ/β, θα επιλεγεί αυθαίρετα το μέγεθός της στα 20 kW (ονομαστική ταχύτητα ανέμου 11 m/s). Παρατηρούμε από τη ημερήσια χρονοσειρά ανέμου ότι η μέση ταχύτητα ανέμου είναι κατώτερη της ονομαστικής ταχύτητας της Α/Γ. Παρόλα αυτά, το αιολικό δυναμικό εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις και ενδέχεται να υπάρξουν ημέρες με σαφώς υψηλότερη ταχύτητα ανέμου. Έτσι κι αλλιώς, οι Α/Γ είναι μηχανές που λειτουργούν με χαμηλό συντελεστή δυναμικότητας (capacity factor).

Με δεδομένο το μέγεθος της Α/Γ, έγιναν αναλύσεις ευαισθησίας με παραμέτρους το μέγεθος του φ/β και της αποθήκευσης υδρογόνου. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιήθηκαν στοιχειώδεις μονάδες διαστασιολόγησης (units). Για το φ/β μία μονάδα αποτελείται από μία φ/β συστοιχία 1 kW_p, ενώ για τη δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου μονάδα μέτρησης θεωρήθηκε η 1 kWh, που αντιστοιχεί σε όγκο 0.0304 m³. Ο αλγόριθμος επίλυσης της μεθόδου LPSP περιγράφεται στην αναφορά [27] και αποτελεί τροποποίηση του αλγορίθμου που περιγράφεται στην αναφορά [28].

3.2.1 Η μέθοδος LPSP

Πιο συγκεκριμένα, η παραγόμενη ισχύς από την Α/Γ και το φ/β υπολογίζονται βάσει των εξισώσεων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η συνολική παραγόμενη ισχύς ανά πάσα στιγμή $P_{gen}(t)$ δίνεται από τον τύπο:

$$P_{gen}(t) = P_{wt}(t) + N_{pv} \cdot P_{pv}(t) \quad (3.1)$$

Όπου $P_{wt}(t)$ η συνολική ισχύς εξόδου της Α/Γ, N_{pv} ο αριθμός των μονάδων φ/β και $P_{pv}(t)$ η ισχύς μίας μονάδας φ/β.

Αν η παραγωγή των βασικών ενεργειακών πηγών ξεπερνά τη ζήτηση του φορτίου (περίσσεια ισχύος), τότε τίθεται σε λειτουργία ο ηλεκτρολύτης για την παραγωγή υδρογόνου. Η ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου σε kWh μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$E_{stor}(t) = E_{stor}(t-1) + \left(E_{gen}(t) - \frac{E_{load}(t)}{Eff_{inv}} \right) \cdot Eff_{elect} \quad (3.2)$$

Όπου $E_{stor}(t)$ και $E_{stor}(t-1)$ η αποθηκευμένη ενέργεια σε υδρογόνο τις ώρες t και t-1 αντίστοιχα, $E_{gen}(t)$ η ενέργεια που παράγεται από τις κύριες ενεργειακές πηγές την ώρα t, $E_{load}(t)$ η ζήτηση ενέργειας την ώρα t, Eff_{inv} η απόδοση του αντιστροφέα που τροφοδοτεί το φορτίο (95%) και Eff_{elect} η απόδοση του ηλεκτρολύτη (74%).

Αν η ζήτηση ξεπερνά την παραγωγή των βασικών ενεργειακών πηγών (έλλειμμα ισχύος), τότε τίθεται σε λειτουργία η κυψέλη καυσίμου και η ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου σε kWh την ώρα t δίνεται από τον τύπο:

$$E_{stor}(t) = E_{stor}(t-1) - \frac{\frac{E_{load}(t)}{Eff_{inv}} - E_{gen}(t)}{Eff_{fuel_cell}} \quad (3.3)$$

Όπου Eff_{fuel_cell} η απόδοση της κυψέλης καυσίμου (50%).

Αν η ζήτηση ξεπερνά και την παραγωγή από τις κύριες ενεργειακές πηγές και την αποθηκευμένη ενέργεια, τότε η μη τροφοδοτούμενη ισχύς (Loss of Power Supply - LPS) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$LPS(t) = E_{load}(t) - (E_{gen}(t) + E_{stor}(t-1) \cdot Eff_{fuel_cell}) \cdot Eff_{inv} \quad (3.4)$$

Επομένως, η πιθανότητα μη τροφοδοτούμενης ενέργειας (LPSP) ορίζεται ως ο λόγος της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας σε μία περίοδο λειτουργίας T προς την αντίστοιχη ενέργεια του φορτίου σ' αυτό το χρονικό διάστημα:

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS(t)}{\sum_{t=1}^T E_{load}(t)} \quad (3.5)$$

3.2.2 Αποτελέσματα μεθόδου LPSP

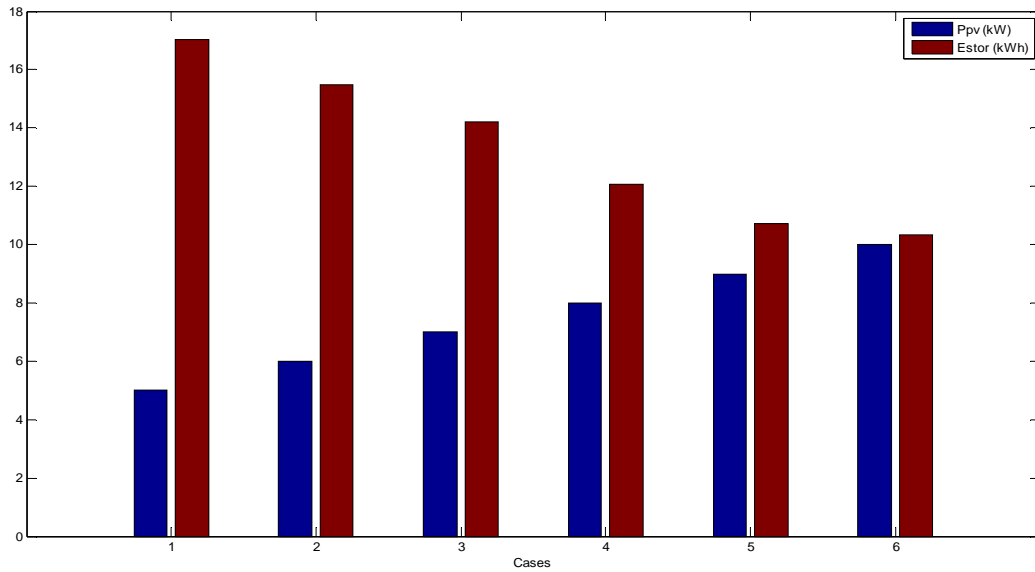
Ο παραπάνω αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε για να προσδιορίσει το μέγεθος του φ/β και της αποθήκευσης υδρογόνου σε περιπτώσεις υψηλής, μέσης και χαμηλής αξιοπιστίας. Η αρχική ποσότητα υδρογόνου στη δεξαμενή θεωρήθηκε μηδενική, επομένως ο αλγόριθμος έδωσε τόσες μονάδες αποθήκευσης, όσες μπορούσαν να καλυφθούν από την περίσσεια ενέργειας σε κάθε περίπτωση. Άρα, λήφθηκε υπόψη ο εξής περιορισμός της μέγιστης αποθήκευσης σε υδρογόνο:

$$0 \leq E_{stor} \leq E_{stor_max} \quad (3.6)$$

Όπου E_{stor_max} η περίσσεια ισχύος ενός κύκλου λειτουργίας.

3.2.2.1 Σενάριο 1: Υψηλή αξιοπιστία (LPSP = 0.0003)

Το πρώτο σενάριο μελετά την περίπτωση υψηλής αξιοπιστίας με LPSP = 0.0003, το οποίο αντιστοιχεί σε μη τροφοδοτούμενη ενέργεια για μία ημέρα στα δέκα χρόνια ή αλλιώς για 25.92 δευτερόλεπτα ανά ημέρα. Όπως είναι φυσικό, προέκυψαν πολλά ζευγάρια λύσεων. Οι κυριότερες περιπτώσεις φαίνονται στο σχήμα 3.4. Όπως παρατηρούμε, η χαμηλότερη ισχύς του φ/β, για την οποία επιτυγχάνεται το συγκεκριμένο LPSP είναι τα 5 kW. Για μικρότερες τιμές ισχύος φ/β απαιτείται περισσότερη αποθήκευση σε υδρογόνο, η οποία, όμως, δεν μπορεί να καλυφθεί από την περίσσεια ισχύος, οπότε το σύστημα δε θα μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα. Όπως βλέπουμε, με την αύξηση της ισχύος του φ/β, μειώνεται η απαιτούμενη ποσότητα αποθηκευμένου υδρογόνου. Παρόλα αυτά, επειδή τα φ/β συστήματα έχουν πολύ υψηλό κόστος [27], η βέλτιστη λύση είναι να επιλέξουμε 5 kW φ/β και 17.036 kWh αποθηκευμένου υδρογόνου, το οποίο αντιστοιχεί σε όγκο δεξαμενής 0.518 m³. Επειδή τα μεγέθη των δεξαμενών είναι κβαντισμένα, πρέπει να επιλεγεί μία τιμή, η οποία να προσεγγίζει αυτόν τον όγκο.

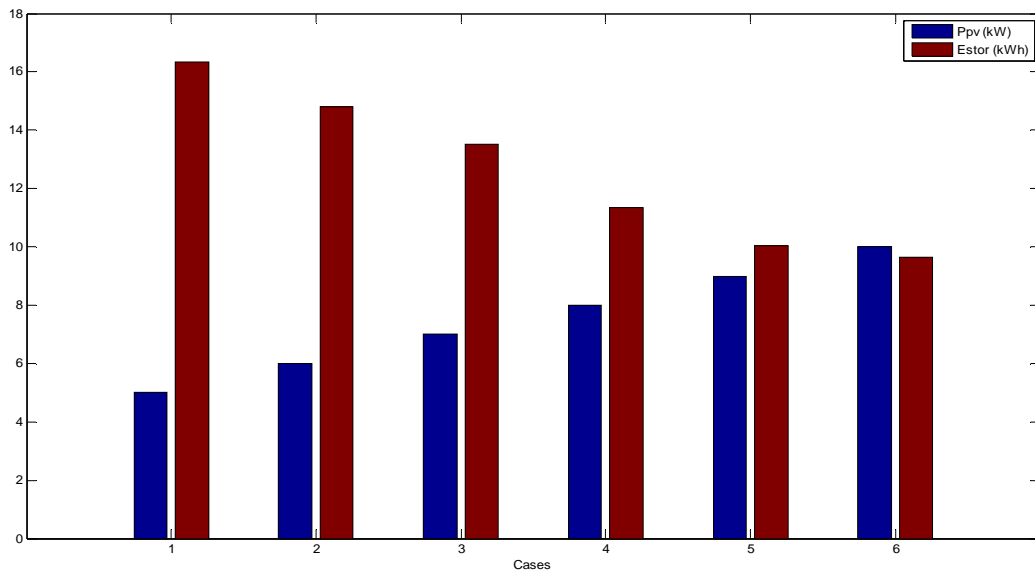


Σχήμα 3.4

Αποτελέσματα μεθόδου LPSP για τα μεγέθη του φ/β (μπλε) και της αποθήκευσης υδρογόνου (κόκκινο) – Υψηλή αξιοπιστία

3.2.2.2 Σενάριο 2: Μέση αξιοπιστία (LPSP = 0.00694)

Το συγκεκριμένο LPSP αντιστοιχεί σε 10 λεπτά μη τροφοδοτούμενης ενέργειας ανά ημέρα. Τα κυριότερα ζευγάρια λύσεων είναι τα εξής:



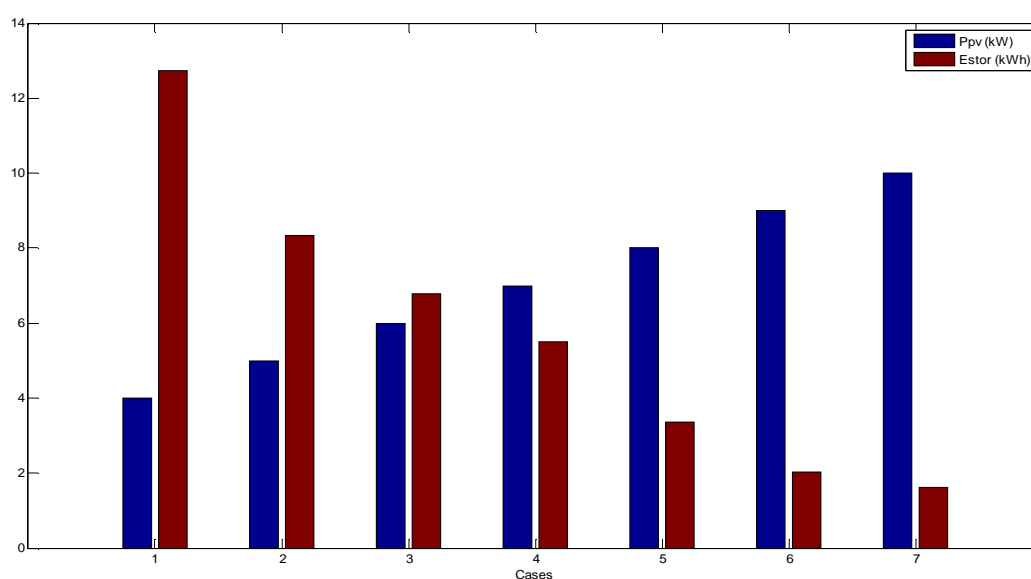
Σχήμα 3.5

Αποτελέσματα μεθόδου LPSP για τα μεγέθη του φ/β (μπλε) και της αποθήκευσης υδρογόνου (κόκκινο) – Μέση αξιοπιστία

Όπως παρατηρούμε, η ελάχιστη ισχύς φ/β στην οποία επιτυγχάνεται το συγκεκριμένο LPSP είναι πάλι 5 kW. Η αποθήκευση υδρογόνου μειώνεται σε σχέση με το πρώτο σενάριο, καθώς έχουμε μειωμένη αξιοπιστία, άρα και περισσότερη μη τροφοδοτούμενη ενέργεια. Το ζευγάρι λύσεων που επιλέγουμε από αυτό το σενάριο είναι 5 kW φ/β και 16.339 kWh αποθηκευμένου υδρογόνου, το οποίο αντιστοιχεί σε όγκο δεξαμενής 0.4967 m³.

3.2.2.3 Σενάριο 3: Χαμηλή αξιοπιστία (LPSP = 0.0833)

Το συγκεκριμένο LPSP αντιστοιχεί σε 2 ώρες μη τροφοδοτούμενης ενέργειας ανά ημέρα. Τα κυριότερα ζευγάρια λύσεων είναι τα εξής:



Σχήμα 3.6

Αποτελέσματα μεθόδου LPSP για τα μεγέθη του φ/β (μπλε) και της αποθήκευσης υδρογόνου (κόκκινο) – Χαμηλή αξιοπιστία

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6, η ελάχιστη ισχύς φ/β που επιτυγχάνει το συγκεκριμένο LPSP είναι 4 kW, ενώ η απαιτήσεις σε αποθηκευμένο υδρογόνο μειώνονται ακόμη πιο πολύ, καθώς μειώνεται ο δείκτης αξιοπιστίας. Το ζευγάρι λύσεων που επιλέγουμε σε αυτό το σενάριο είναι 4 kW φ/β και 12.737 kWh αποθηκευμένου υδρογόνου, που αντιστοιχεί σε όγκο δεξαμενής 0.3872 m³.

3.3 Διαστασιολόγηση κυψέλης καυσίμου και ηλεκτρολύτη

Η διαστασιολόγηση της κυψέλης καυσίμου γίνεται με βάση το μέγιστο έλλειμμα ισχύος, το οποίο η κυψέλη πρέπει να είναι σε θέση να το τροφοδοτήσει. Αντίστοιχα, η διαστασιολόγηση του ηλεκτρολύτη γίνεται με βάση τη μέγιστη αιχμή της περίσσειας ισχύος, ώστε ο ηλεκτρολύτης να είναι σε θέση να την απορροφήσει για την παραγωγή υδρογόνου.

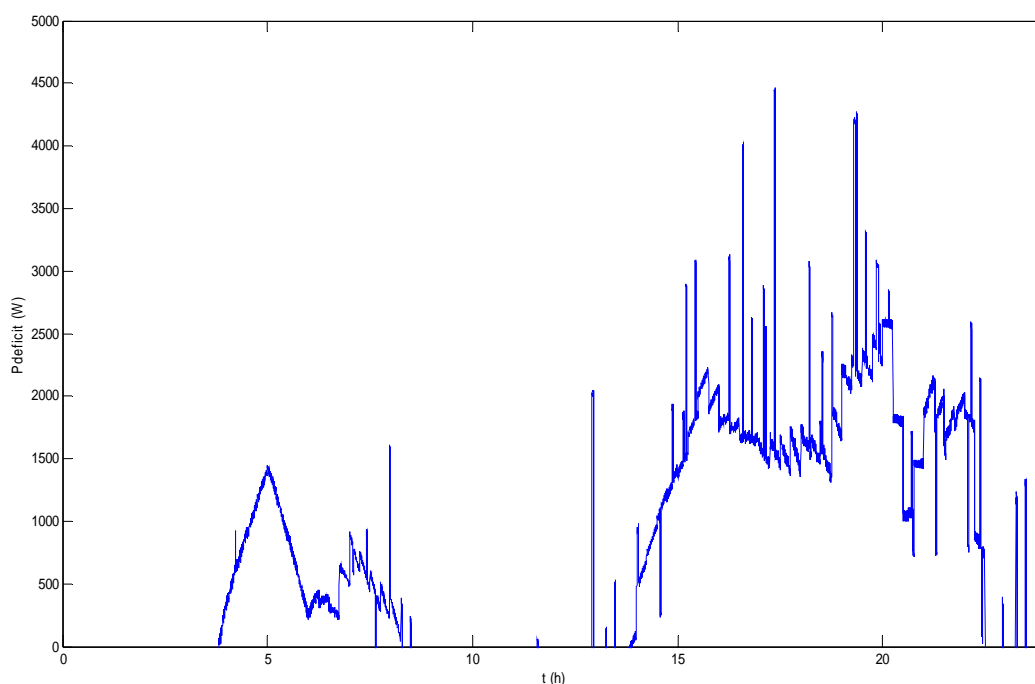
3.3.1 Διαστασιολόγηση κυψέλης καυσίμου

Το έλλειμμα ισχύος P_d υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P_d = P_{load} - P_{wt} - P_{pv} \text{ για } P_d \geq 0 \quad (3.7)$$

Όπου P_{load} η ισχύς του φορτίου, P_{wt} η ισχύς εξόδου της Α/Γ και P_{pv} η ισχύς εξόδου της φ/β γεννήτριας.

Στις περιπτώσεις των σεναρίων 1 και 2, όπου έχει επιλεγεί φ/β γεννήτρια 5 kW, το έλλειμμα ισχύος κατά τη διάρκεια του 24ωρου φαίνεται στο σχήμα 3.7.

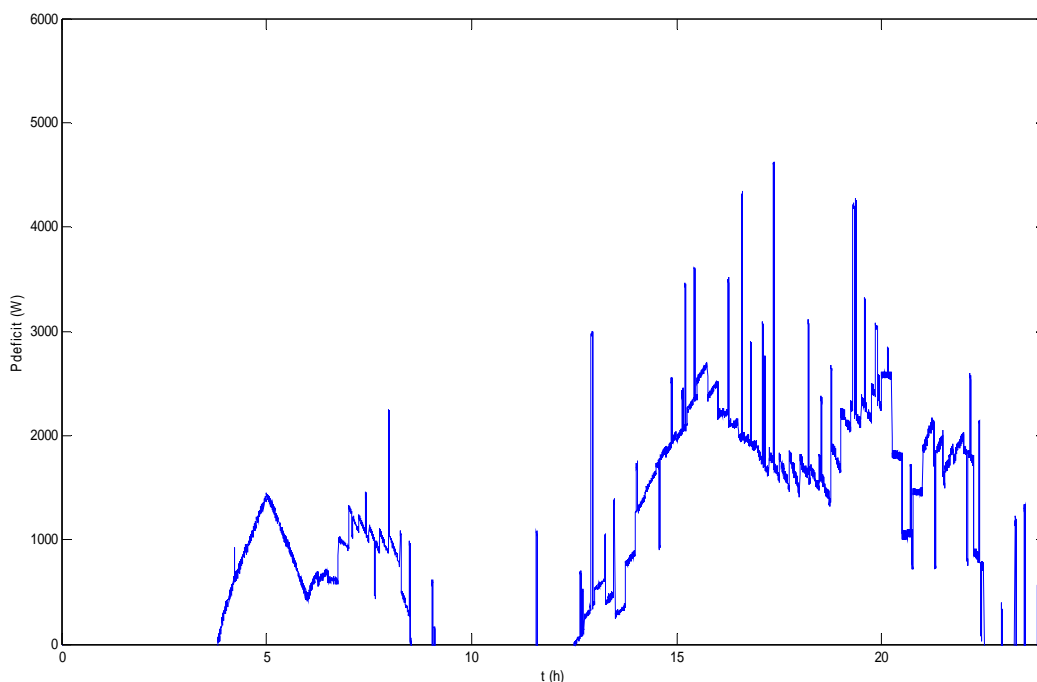


Σχήμα 3.7

Έλλειμμα ισχύος (5kW φ/β)

Όπως παρατηρούμε, το έλλειμμα δεν ξεπερνά τα 5 kW, οπότε επιλέγουμε κυψέλη καυσίμου ισχύος 5 kW.

Στην περίπτωση του σεναρίου 3, όπου έχει επιλεγεί φ/β γεννήτρια ισχύος 4 kW, το έλλειμμα ισχύος κατά τη διάρκεια του 24ωρου φαίνεται στο σχήμα 3.8. Όπως βλέπουμε, το έλλειμμα δεν ξεπερνά τα 5 kW, οπότε επιλέγουμε και σε αυτήν την περίπτωση κυψέλη καυσίμου ονομαστικής ισχύος 5kW.



Σχήμα 3.8

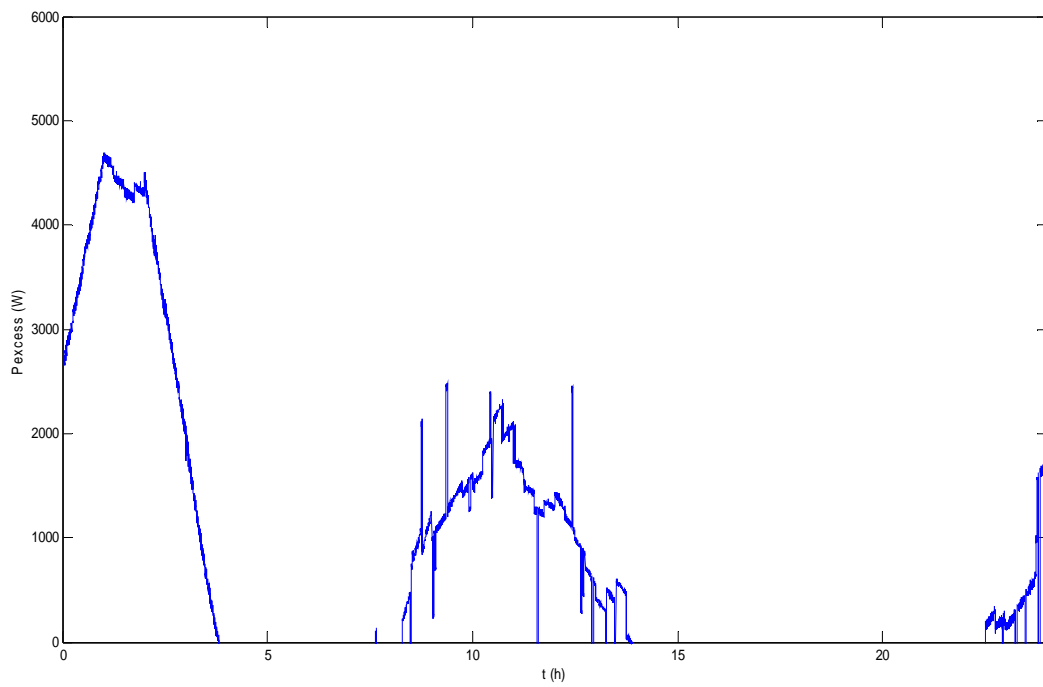
Έλλειμμα ισχύος (4kW φ/β)

3.3.2 Διαστασιολόγηση ηλεκτρολύτη

Ο ηλεκτρολύτης μπορεί να διαστασιολογηθεί στην ονομαστική ισχύ των κύριων ενεργειακών πηγών, για να απορροφά όλη την ισχύ από ΑΠΕ. Παρόλα αυτά, λόγω των διακυμάνσεων του αιολικού και ηλιακού δυναμικού, θα λειτουργεί σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης (low capacity factor). Αυτό είναι ανεπιθύμητο λόγω της μειωμένης απόδοσης, αλλά και προβλημάτων στην καθαρότητα του υδρογόνου (περισσότερες λεπτομέρειες στο Κεφάλαιο 4). Για αυτό το λόγο, υπολογίστηκε η περίσσεια ισχύος P_e από τις ημερήσιες καμπύλες παραγωγής και φορτίου με τον εξής τύπο:

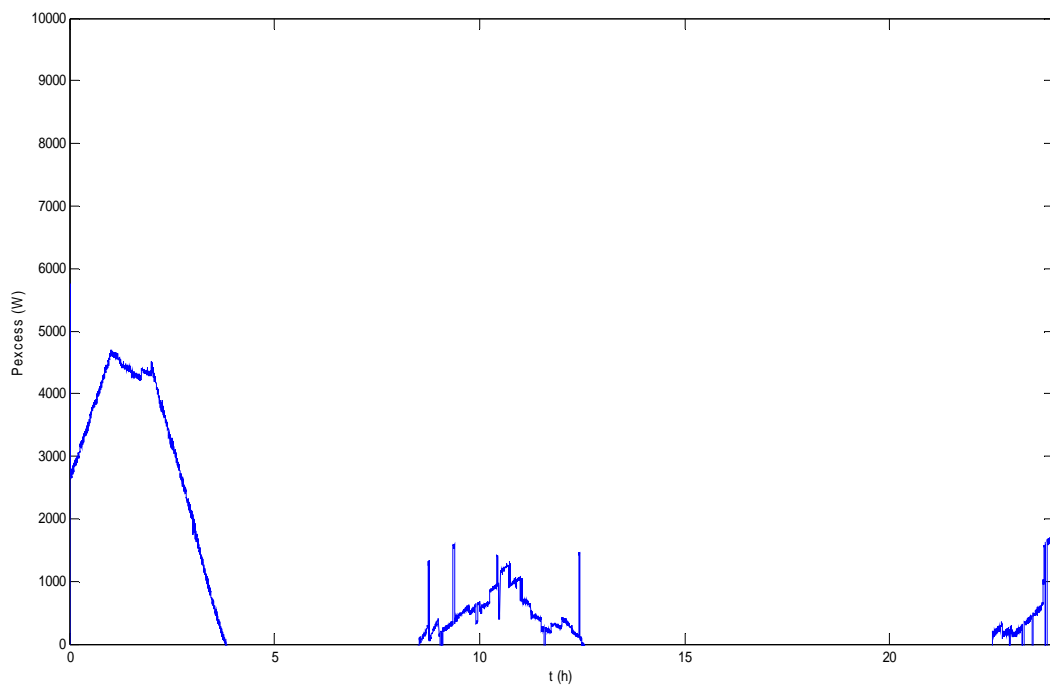
$$P_e = P_{wt} + P_{pv} - P_{load} \text{ για } P_e \geq 0 \quad (3.8)$$

Για τις περιπτώσεις των σεναρίων 1 και 2, όπου έχει επιλεγεί φ/β γεννήτρια 5 kW, η περίσσεια ισχύος φαίνεται στο σχήμα 3.9. Παρατηρούμε πως η περίσσεια ισχύος δεν ξεπερνά τα 5 kW, οπότε επιλέγουμε ηλεκτρολύτη ονομαστικής ισχύος 5 kW για τα δύο πρώτα σενάρια. Αντίστοιχα, στο σχήμα 3.10 φαίνεται η ημερήσια περίσσεια ισχύος για την περίπτωση του σεναρίου 3, όπου έχει επιλεγεί φ/β γεννήτρια 4 kW. Παρατηρούμε πως και σε αυτήν την περίπτωση, η περίσσεια ισχύος δεν ξεπερνά τα 5 kW, αλλά αν επιλέγαμε έναν ηλεκτρολύτη 5 kW, τότε αυτός θα λειτουργούσε κατά το μεγαλύτερο μέρος του 24ωρου σε επίπεδα φόρτισης μικρότερα του 10%. Για αυτό το λόγο, επιλέγουμε ηλεκτρολύτη ονομαστικής ισχύος 4 kW.



Σχήμα 3.9

Περίσσεια ισχύος (5 kW φ/β)

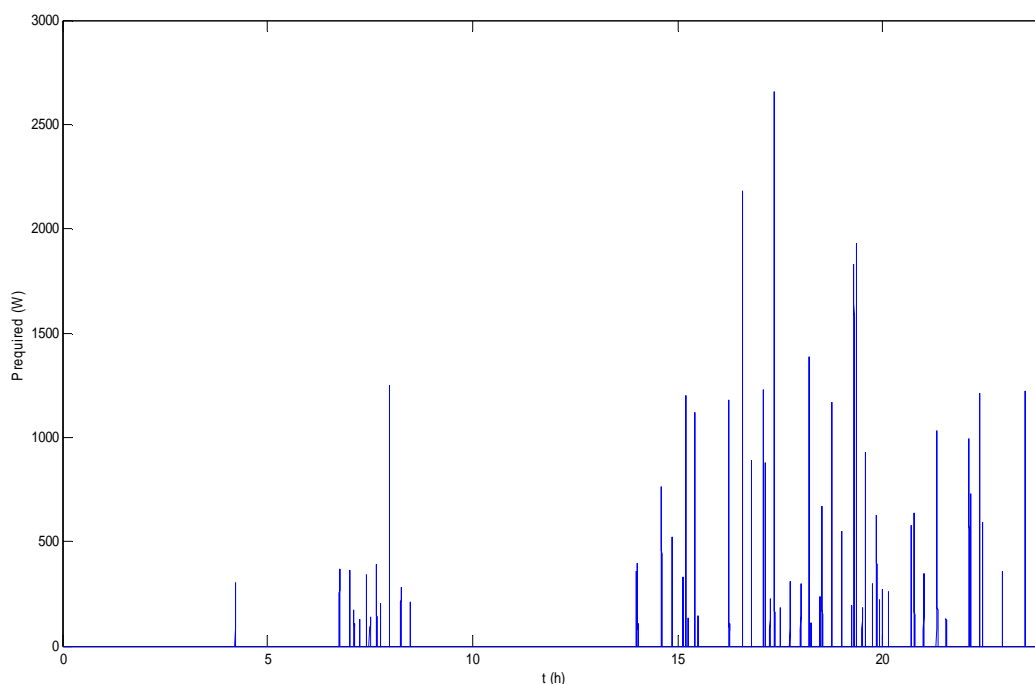


Σχήμα 3.10

Περίσσεια ισχύος (4 kW φ/β)

3.4 Διαστασιολόγηση υπερπυκνωτή

Ο ρόλος του υπερπυκνωτή σε ένα υβριδικό σύστημα υδρογόνου είναι να τροφοδοτεί τα αιχμιακά φορτία, τα οποία δε μπορεί να τροφοδοτήσει η κυψέλη καυσίμου λόγω ηλεκτροχημικών ή μηχανικών καθυστερήσεων. Όπως θα αναλυθεί και στο Κεφάλαιο 4, οι μηχανικές καθυστερήσεις υπερκαλύπτουν τις ηλεκτροχημικές σε μεγάλες κλίμακες χρόνου και οφείλονται κυρίως στα μηχανικά υποσυστήματα της κυψέλης, όπως π.χ. ο επεξεργαστής καυσίμου, οι συμπιεστές, οι αντλίες τροφοδοσίας κτλ. Χρησιμοποιώντας μοντέλο προσομοίωσης που λαμβάνει υπόψη αυτές τις μηχανικές καθυστερήσεις, υπολογίστηκε η ισχύς η οποία δε μπορεί να τροφοδοτηθεί από την κυψέλη (σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.11

Απαιτούμενη ισχύς υπερπυκνωτή

Ολοκληρώνοντας το έλλειμμα ισχύος, το οποίο καλείται να καλύψει ο υπερπυκνωτής, βρέθηκε ότι η ελάχιστη χωρητικότητα του υπερπυκνωτή πρέπει να είναι 113 Wh. Όπως θα αναλυθεί και στο επόμενο κεφάλαιο, ο αλγόριθμος διαχείρισης του συστήματος δίνει προτεραιότητα στον υπερπυκνωτή, για να αποφύγει η άσκοπη χρήση της κυψέλης καυσίμου. Για τις ανάγκες του αλγορίθμου επιλέχθηκε συστοιχία υπερπυκνωτών συνολικής χωρητικότητας 216.52 Wh.

3.5 Ανάλυση κόστους

Εκτός από το δείκτη αξιοπιστίας, το κόστος του συστήματος είναι ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας για τη σωστή διαστασιολόγηση, καθώς και για τη βιωσιμότητα μιας επένδυσης σε αυτό. Η ανάλυση κόστους περιλαμβάνει το ετήσιο επενδυτικό κόστος των συσκευών, το κόστος της τροφοδοτούμενης ενέργειας και το κόστος της μη τροφοδοτούμενη ενέργειας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε ανάλυση κόστους για τα τρία προαναφερθέντα σενάρια και επιλέχθηκε η βέλτιστη λύση.

3.5.1 Βασικά στοιχεία ανάλυσης κόστους

3.5.1.1 Ετήσιο επενδυτικό κόστος

Η διάρκεια ζωής του συστήματος εκτιμήθηκε στα 20 έτη. Με την παραδοχή ότι οι συσκευές δε χρειάζονται αλλαγή νωρίτερα του αναμενόμενου, το ετήσιο κόστος του υπολογίστηκε με τη βοήθεια του συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου (Capital Recovery Factor - CRF) [27]:

$$CRF = \frac{i_r(1+i_r)^{ny}}{(1+i_r)^{ny} - 1} \quad (3.9)$$

Όπου i_r το επιτόκιο αναγωγής (5% σε αυτήν τη μελέτη) και ny ο αναμενόμενος χρόνος ζωής της εκάστοτε συσκευής.

Επομένως, το ετήσιο επενδυτικό κόστος (Annual Capital Cost - ACC) της κάθε συσκευής υπολογίζεται ως εξής:

$$ACC = C \cdot CRF \quad (3.10)$$

Όπου C το κόστος της εκάστοτε συσκευής.

3.5.1.2 Κόστος τροφοδοτούμενης ενέργειας

Το πρώτο βήμα είναι ο καθορισμός της ετήσιας τροφοδοτούμενης ενέργειας (Annual Supplied Energy - ASE), η οποία υπολογίζεται από την ετήσια ενέργεια που καταναλώνεται από το φορτίο. Στην πράξη, η ενέργεια που παράγεται από το σύστημα είναι μεγαλύτερη από αυτήν που καταναλώνεται εξαιτίας των απωλειών του συστήματος και της ενέργειας που καταναλώνεται από το ελεγχόμενο φορτίο. Παρόλα αυτά, το σφάλμα από τη χρήση της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας για τον υπολογισμό του δείκτη ASE θεωρείται αμελητέο. Εάν το συνολικό ετήσιο επενδυτικό κόστος των συσκευών είναι ACC_{total} , το ετήσιο κόστος της τροφοδοτούμενης ενέργειας (Cost Of Electricity - COE) υπολογίζεται ως εξής [27]:

$$COE = \frac{ACC_{total}}{ASE} \quad (3.11)$$

3.5.1.3 Κόστος μη τροφοδοτούμενης ενέργειας

Ο δείκτης του κόστους της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας (Cost Of Energy Not Supplied - COENS) εκφράζει το όφελος / ζημία που αναμένεται από την αύξηση / μείωση της στάθμης αξιοπιστίας της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος στους καταναλωτές. Έχουν αναφερθεί πολλές μέθοδοι υπολογισμού αυτού του κόστους, όμως, η μέθοδος που έχει αποδειχθεί ότι δίνει τα καλύτερα και ακριβέστερα αποτελέσματα είναι η μέθοδος που στηρίζεται στη δημοσκοπική έρευνα (έρευνα αγοράς) της εκτίμησης των επιπτώσεων που προκαλούν οι διακοπές της ηλεκτρικής ισχύος στους καταναλωτές. Το κόστος αξιοπιστίας είναι στενά συνδεδεμένο με τον τρόπο που οι παραγωγικές διαδικασίες κάθε καταναλωτή εξαρτώνται από τη συνέχεια της παροχής ηλεκτρικής ισχύος. Αυτή η εξάρτηση είναι μια συνάρτηση των χαρακτηριστικών των καταναλωτών (τύπος καταναλωτή, διακοπείσες παραγωγικές διαδικασίες, απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος και ενέργειας, εξάρτηση της ζήτησης σύμφωνα με τη χρονική περίοδο της ημέρας και της εποχής του έτους) και των χαρακτηριστικών των εμφανιζομένων διακοπών (χρονική διάρκεια, συχνότητα εμφάνισης, χρονική στιγμή που συμβαίνουν, μερική ή ολική απώλεια της παροχής). Σύμφωνα με την αναφορά [29], μία τυπική τιμή για το κόστος της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας για την περίπτωση ενός οικιακού καταναλωτή είναι 1.60 \$/kWh. Αυτή η τιμή χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της ανάλυσης κόστους στην παρούσα εργασία.

3.5.1.4 Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση κόστους αφορούν το μοναδιαίο επενδυτικό κόστος και τη διάρκεια ζωής των συσκευών του συστήματος (πίνακας 3.1) και βασίστηκαν στις αναφορές [4], [27], [29], [30] και [31]. Η διάρκεια ζωής της Α/Γ, του Φ/Β και της δεξαμενής θεωρήθηκε 20 έτη, δηλαδή όσο είναι η διάρκεια της επένδυσης.

Παράμετρος	Τιμή	Διάρκεια ζωής	Κόστος αντικατάστασης
Α/Γ	1500 \$/kW	-	-
Φ/Β	5000 \$/kW	-	-
Κυψέλη καυσίμου	7000 \$/kW	5 έτη	500 \$/kW
Ηλεκτρολύτης	7000 \$/kW	5 έτη	500 \$/kW
Δεξαμενή αποθήκευσης	45 \$/kWh	-	-
Υπερπυκνωτές	10 \$/Wh	10 έτη	10 \$/Wh

Πίνακας 3.1

Δεδομένα ανάλυσης κόστους

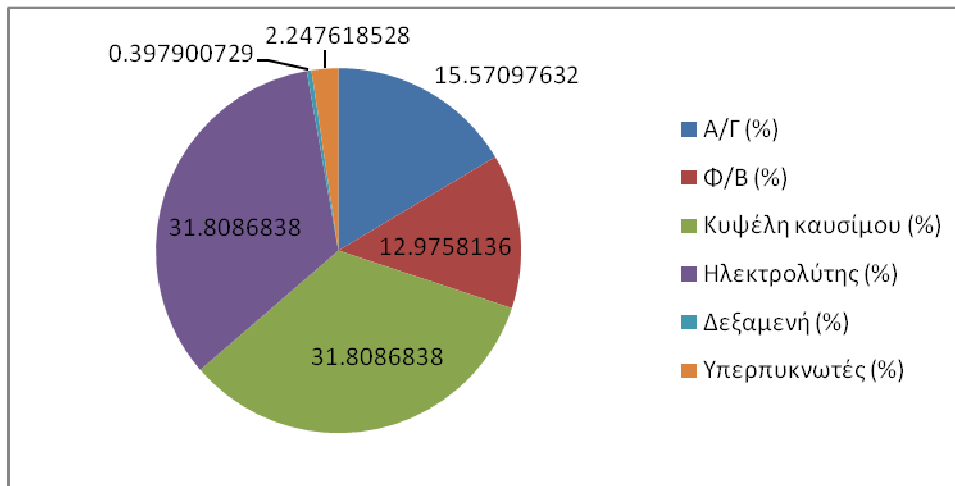
3.5.2 Αποτελέσματα

Τα παραπάνω στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση κόστους των τριών προαναφερθέντων σεναρίων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 3.2 και στα σχήματα 3.12, 3.13 και 3.14.

Παράμετρος	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
ACC _{WT} (\$)	2407.278	2407.278	2407.278
ACC _{PV} (\$)	2006.065	2006.065	1604.852
ACC _{FC} (\$)	4917.632	4917.632	4917.632
ACC _{EL} (\$)	4917.632	4917.632	3934.106
ACC _{TANK} (\$)	61.51557	58.99876	45.99224
ACC _{UC} (\$)	347.4825	347.4825	347.4825
ACC _{SUM} (\$)	14657.6	14655.09	13257.34
COENS (\$)	18.36096	424.568	5100.072
ACC _{TOTAL} (\$)	14675.97	15079.66	18357.41
COE (\$/kWh)	0.3833	0.385799	0.378085

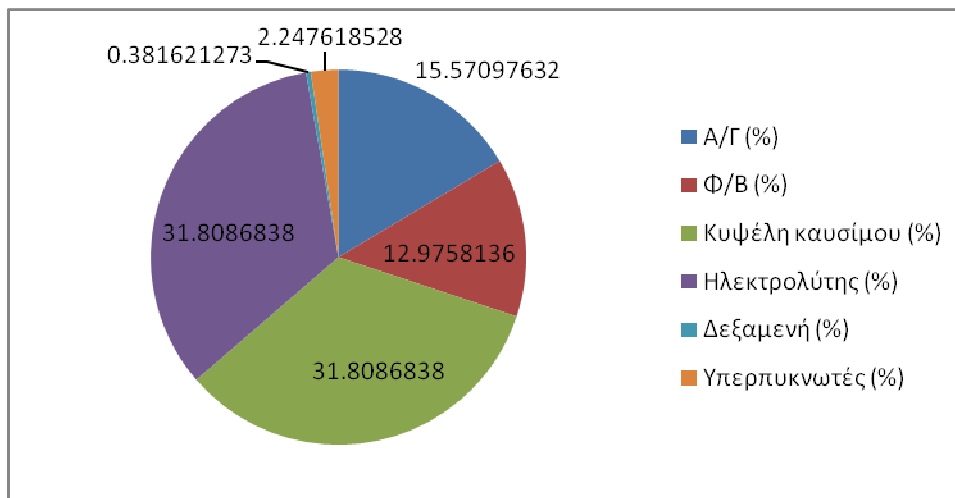
Πίνακας 3.2

Αποτελέσματα ανάλυσης κόστους



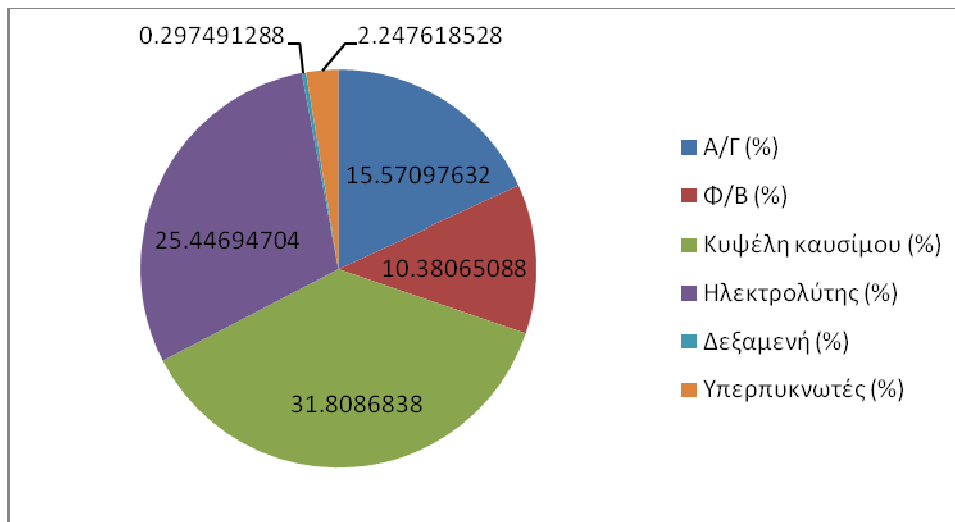
Σχήμα 3.12

Επίδραση υποσυστημάτων στο κόστος του συστήματος – Σενάριο 1



Σχήμα 3.13

Επίδραση υποσυστημάτων στο κόστος του συστήματος – Σενάριο 2



Σχήμα 3.14

Επίδραση υποσυστημάτων στο κόστος του συστήματος – Σενάριο 3

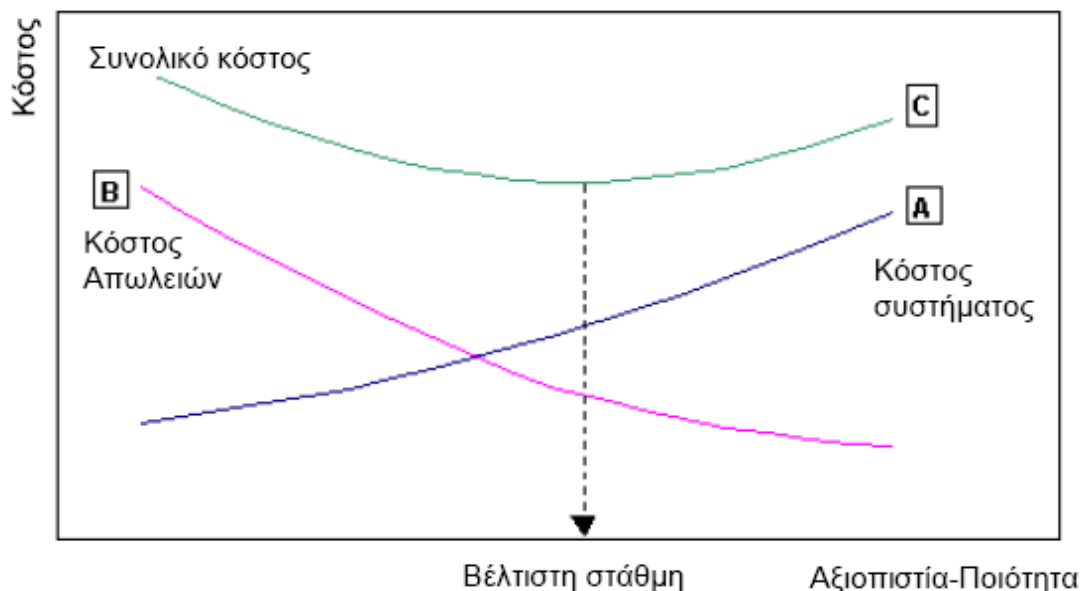
Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 3.2, το σενάριο 3 έχει το χαμηλότερο ετήσιο επενδυτικό κόστος, ενώ το σενάριο 1 έχει το χαμηλότερο κόστος μη τροφοδοτούμενης ενέργειας, καθώς παρέχει υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας. Συνυπολογίζοντας, λοιπόν, το επενδυτικό κόστος και το κόστος μη τροφοδοτούμενης ενέργειας, καταλήγουμε στο συμπέρασμα το κόστος ελαχιστοποιείται στην περίπτωση του σεναρίου 1. Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος της τροφοδοτούμενης ενέργειας ελαχιστοποιείται στο σενάριο 3, χωρίς όμως να διαφοροποιείται πολύ από τα υπόλοιπα σενάρια.

Από τα σχήματα 3.12, 3.13 και 3.14 συμπεραίνουμε ότι η επίδραση του κόστους της δεξαμενής αποθήκευσης στο συνολικό κόστος του συστήματος είναι αμελητέα. Για αυτό το λόγο, το ετήσιο επενδυτικό κόστος του σεναρίου 2 δε διαφέρει πολύ από αυτό του σεναρίου 1. Επομένως, αν λάβουμε υπόψη ότι η μη τροφοδοτούμενη ενέργεια του σεναρίου 2 είναι σαφώς μεγαλύτερη από εκείνη του σεναρίου 1, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η επιλογή του σεναρίου 1 είναι συμφέρουσα. Ακόμη, παρατηρούμε ότι η κυψέλη καυσίμου και ο ηλεκτρολύτης έχουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στο επενδυτικό κόστος, λόγω του αυξημένου κόστους και της μικρής διάρκειας ζωής τους. Η κατάλληλη διαστασιολόγηση της ανεμογεννήτριας και του φωτοβολταϊκού είχε σαν αποτέλεσμα να έχουν παρόμοια επίδραση στο κόστος, ενώ η επιλογή υπερπυκνωτών μικρής χωρητικότητας, καθώς και η σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής τους, μείωσε σημαντικά τη συνεισφορά τους στο κόστος.

3.5.3 Συμπεράσματα

Το κόστος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από το επενδυτικό κόστος των συνιστωσών του συστήματος και από το κόστος αξιοπιστίας, δηλαδή το κόστος της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας. Η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους επιτυγχάνεται με το συμβιβασμό μεταξύ αυτών των δύο κοστών. Οι δύο καμπύλες του σχήματος 3.15 αναπαριστούν αντίστοιχα το κόστος επενδύσεων και λειτουργίας του συστήματος και το κόστος απωλειών από τις διακοπές παροχής ηλεκτρικής ισχύος ως συνάρτηση της στάθμης αξιοπιστίας των καταναλωτών του

συστήματος. Το συνολικό κόστος εκφράζεται από άθροισμα των δύο καμπυλών και παρουσιάζει μία ελάχιστη τιμή. Η τιμή αυτή υποδεικνύει τη βέλτιστη στάθμη αξιοπιστίας του συστήματος που πρέπει να επιτευχθεί κατά τη φάση του σχεδιασμού και της ανάπτυξης του συστήματος [29].



Σχήμα 3.15

Κόστη συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει του της στάθμης αξιοπιστίας των καταναλωτών

Στην ανάλυση κόστους που έγινε στην παρούσα εργασία και για το κόστος μη τροφοδοτούμενης ενέργειας που επιλέχθηκε, βρέθηκε ότι το κόστος ελαχιστοποιείται στο σενάριο υψηλής αξιοπιστίας. Παρόλα αυτά, το κόστος της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας ποικίλει ανάλογα με το είδος της εφαρμογής και επομένως η λύση ενός τέτοιου προβλήματος δεν είναι μονοσήμαντη. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι στην 24ωρη προσομοίωση του συστήματος, που θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο, η αξιοπιστία του συστήματος θεωρήθηκε 100%. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκαν τα μεγέθη του σεναρίου 1 με μια μικρή υπερδιαστασιολόγηση της δεξαμενής, έτσι ώστε να επιτευχθεί 100% αξιοπιστία.

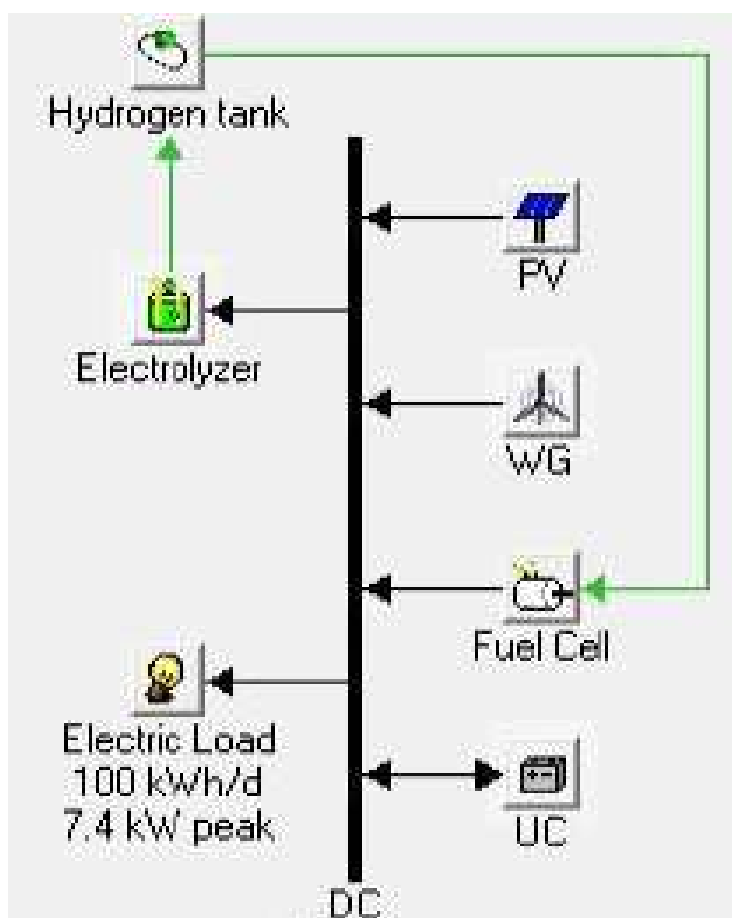
3.6 Διαστασιολόγηση του συστήματος με το λογισμικό HOMER

Το λογισμικό HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα προγράμματα για τη διαστασιολόγηση και ανάλυση υβριδικών συστημάτων [32]. Αναπτύσσεται από το National Renewable Energy Laboratory (NREL) των ΗΠΑ με σκοπό να βοηθήσει το σχεδιασμό συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και να διευκολύνει τη σύγκριση των τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής μέσα από ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Το HOMER διαμορφώνει τη φυσική συμπεριφορά ενός ηλεκτρικού συστήματος και το κόστος κύκλου ζωής του, το οποίο είναι το κόστος εγκατάστασης και το κόστος λειτουργίας. Επίσης, επιτρέπει στο χρήστη να συγκρίνει πολλές διαφορετικές επιλογές βασισμένες

στις τεχνικές και οικονομικές αξίες του προγράμματος [33]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε για να βελτιστοποιήσει τη διαστασιολόγηση του προτεινόμενου υβριδικού συστήματος με τη μελέτη της λειτουργίας του σε ετήσια βάση.

3.6.1 Δομή του συστήματος και δεδομένα προσομοίωσης

Η αρχιτεκτονική του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 3.16, όπως αυτή έχει αναλυθεί στο πρώτο κεφάλαιο. Η ροή ισχύος πραγματοποιείται μέσω ενός ζυγού ΣΡ, ενώ έχουν παραλειφθεί οι μετατροπές ισχύος για την απλοποίηση της ανάλυσης.



Σχήμα 3.16

Αρχιτεκτονική υβριδικού συστήματος

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται μία Α/Γ 20 kW και μία συστοιχία υπερπυκνωτών 220 Wh, ενώ το μέγεθος του Φ/Β, της κυψέλης καυσίμου και του ηλεκτρολύτη κυμαίνεται από 0 έως 10 kW με βήμα 1 kW και το μέγεθος της δεξαμενής κυμαίνεται από 0 έως 10 kg H₂ με βήμα 1 kg H₂. Το λογισμικό πραγματοποιεί προσομοιώσεις με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς και επιλέγει τη βέλτιστη λύση με κριτήρια την ικανοποίηση του φορτίου και την ελαχιστοποίηση του κόστους. Πιο συγκεκριμένα, τα κόστη των επιμέρους μονάδων σύμφωνα με το λογισμικό είναι:

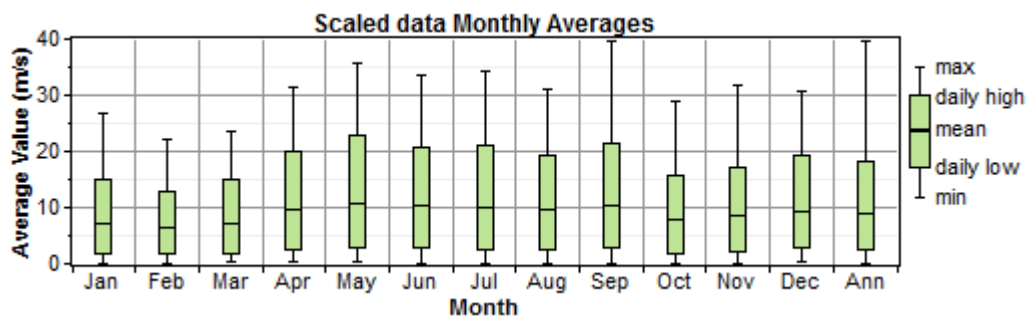
Παράμετρος	Τιμή	Διάρκεια ζωής	Κόστος αντικατάστασης
Α/Γ	1000 \$/kW	15 έτη	1000 \$/kW
Φ/Β	7000 \$/kW	20 έτη	7000 \$/kW
Κυψέλη καυσίμου	3000 \$/kW	40000 ώρες λειτ.	3000 \$/kW
Ηλεκτρολύτης	2000 \$/kW	15 έτη	2000 \$/kW
Δεξαμενή αποθήκευσης	1500 \$/kg	25 έτη	1500 \$/kg
Υπερπυκνωτές	10 \$/Wh	10 έτη	10 \$/Wh

Πίνακας 3.3

Δεδομένα κόστους μονάδων

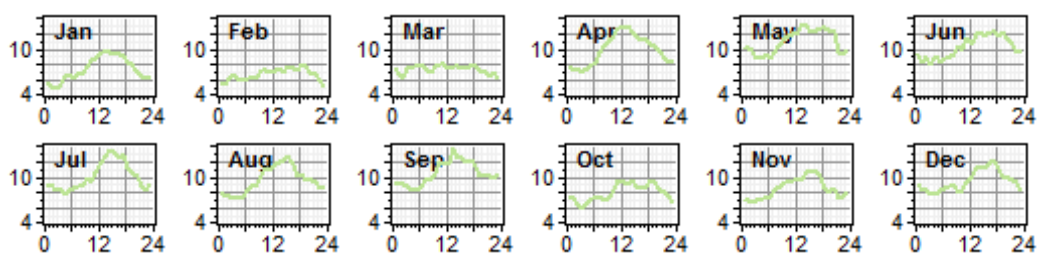
Αξίζει να σημειωθεί ότι το επιτόκιο αναγωγής τέθηκε στο 6% και η διάρκεια της επένδυσης στα 25 έτη.

Στο σχήμα 3.17 φαίνεται η ελάχιστη, η μέση και η μέγιστη ταχύτητα ανέμου σε m/s ανά μήνα και ανά έτος που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση, ενώ στο σχήμα 3.18 φαίνεται η μέση ημερήσια χρονοσειρά ανέμου ανά μήνα.



Σχήμα 3.17

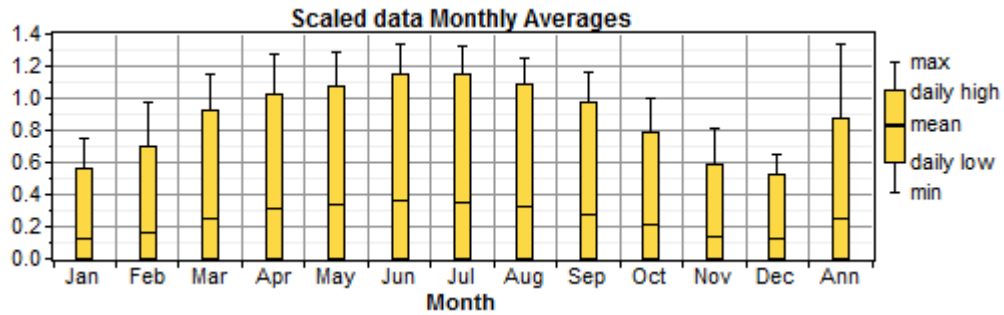
Ελάχιστη, μέση και μέγιστη ταχύτητα ανέμου ανά μήνα και ανά έτος



Σχήμα 3.18

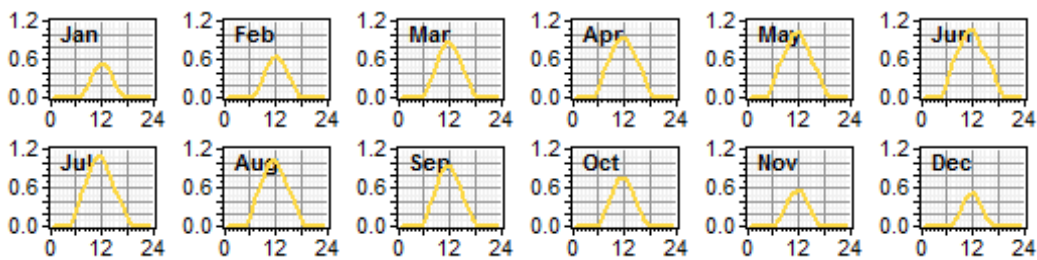
Μέση ημερήσια χρονοσειρά ανέμου ανά μήνα

Αντίστοιχα, στο σχήμα 3.19 φαίνεται η ελάχιστη, η μέση και η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία σε kW/m² ανά μήνα και ανά έτος και στο σχήμα 3.20 φαίνεται η μέση ημερήσια χρονοσειρά ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήνα.



Σχήμα 3.19

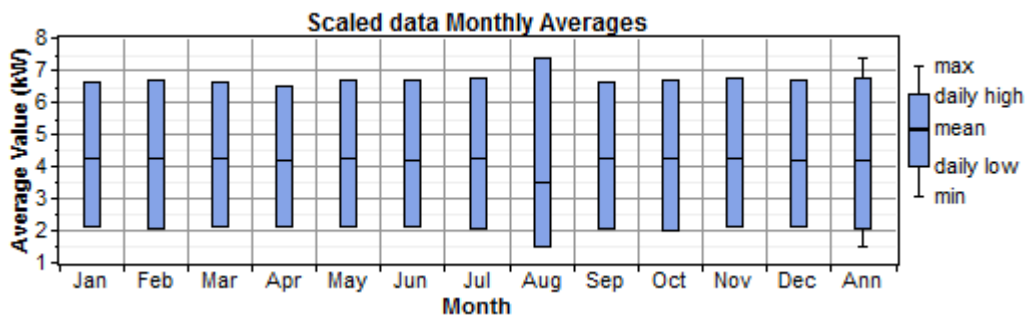
Ελάχιστη, μέση και μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία ανά μήνα και ανά έτος



Σχήμα 3.20

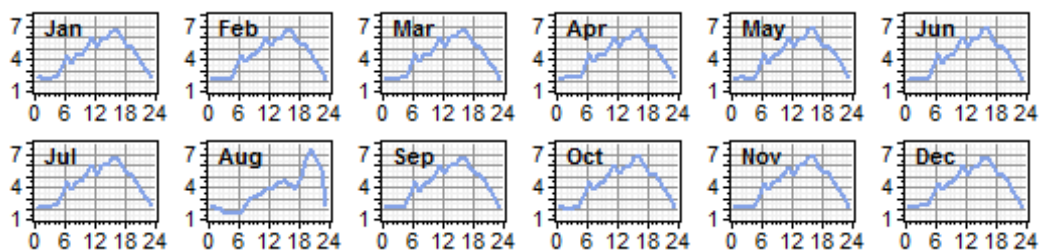
Μέση ημερήσια χρονοσειρά ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήνα

Για τον προσδιορισμό του φορτίου χρησιμοποιήθηκε η ημερήσια καμπύλη φορτίου του σχήματος 3.3 για το μήνα Αύγουστο και στη συνέχεια το λογισμικό μετέβαλλε κατάλληλα την ημερήσια καμπύλη των άλλων μηνών, όπως φαίνεται στα σχήματα 3.21 και 3.22. Αξίζει να σημειωθεί ότι το φορτίο που προέκυψε έχει αιχμή 7.4 kW και ημερήσια ζήτηση ενέργειας 100 kWh/day.



Σχήμα 3.21

Ελάχιστο, μέσο και μέγιστο φορτίο ανά μήνα και ανά έτος



Σχήμα 3.22

Ημερήσια καμπύλη φορτίου ανά μήνα

Η αρχική ποσότητα υδρογόνου στη δεξαμενή τέθηκε στο 10% και ο σχεδιασμός του συστήματος έγινε με στόχο η τελική ποσότητα υδρογόνου μετά την πάροδο ενός έτους να είναι ίση ή μεγαλύτερη από 10%. Τέλος, η μέγιστη επιτρεπόμενη μη τροφοδοτούμενη ενέργεια ανά έτος τέθηκε στο 2% της συνολικής ετήσιας ζήτησης.

3.6.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Από την προσομοίωση του συστήματος το λογισμικό HOMER υπέδειξε την εξής διαστασιολόγηση ως τη βέλτιστη λύση:

Παράμετρος	Μέγεθος
Φ/Β	5 kW
Κυψέλη καυσίμου	5 kW
Ηλεκτρολύτης	9 kW
Δεξαμενή υδρογόνου	9 kg

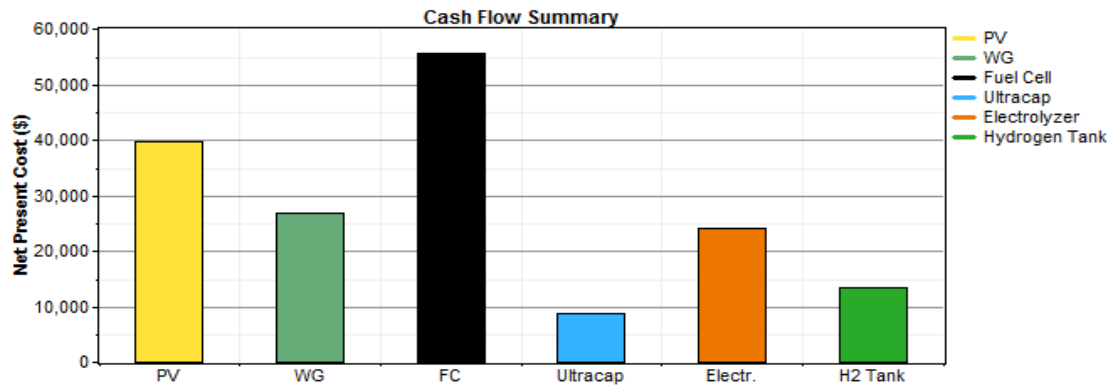
Πίνακας 3.4

Βέλτιστη διαστασιολόγηση

Όπως παρατηρείται, τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά της προηγούμενης ανάλυσης σε 24ωρη βάση. Η μόνη διαφορά είναι ότι απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς ηλεκτρολύτη και μεγαλύτερη χωρητικότητα δεξαμενής. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στη διακύμανση του αιολικού - ηλιακού δυναμικού ανάλογα με το μήνα του έτους, αλλά και την εξάρτηση της αποθηκευμένης ενέργειας μίας ημέρας από το απόθεμα της προηγούμενης. Επομένως, η ανάλυση του συστήματος σε ετήσια βάση δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς λαμβάνεται υπόψη η εξάρτηση του αιολικού - ηλιακού δυναμικού και του φορτίου από την εποχή του έτους (χειμώνας - καλοκαίρι).

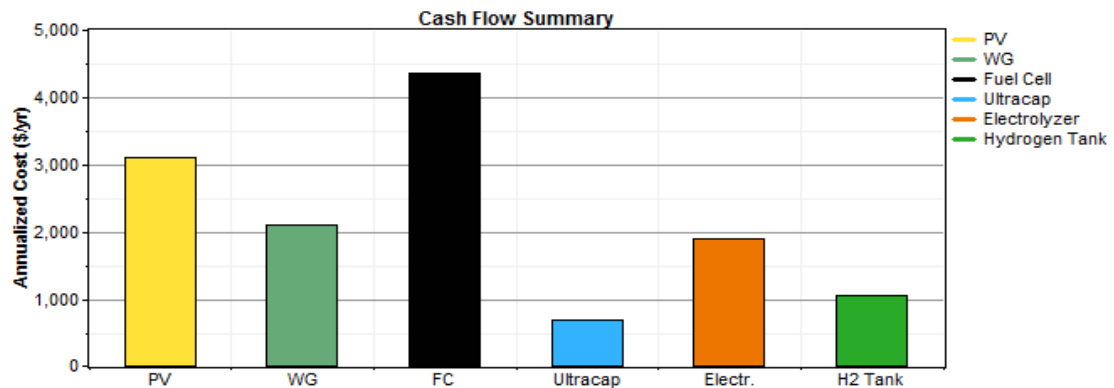
Αναλύοντας τα τεchnο - οικονομικά αποτελέσματα της προσομοίωσης, στο σχήμα 3.23 παρατίθεται το συνολικό ανηγμένο κόστος ανά υποσύστημα και στο σχήμα 3.24 το ετήσιο κόστος ανά υποσύστημα. Το συνολικό ανηγμένο κόστος της επένδυσης ανέρχεται στα 168,694 \$ και το συνολικό ετήσιο κόστος στα 13,196 \$. Όπως παρατηρείται, η κυψέλη καυσίμου έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στο κόστος του συστήματος λόγω της συχνής της αντικατάστασης, ενώ το Φ/Β είναι το δεύτερο πιο ακριβό υποσύστημα λόγω του υψηλού του κόστους. Στο σχήμα 3.25 φαίνονται οι

ταμειακές ροές της επένδυσης και συγκεκριμένα το αρχικό κόστος, οι δαπάνες αντικατάστασης, οι δαπάνες συντήρησης και η υπολειπόμενη αξία.



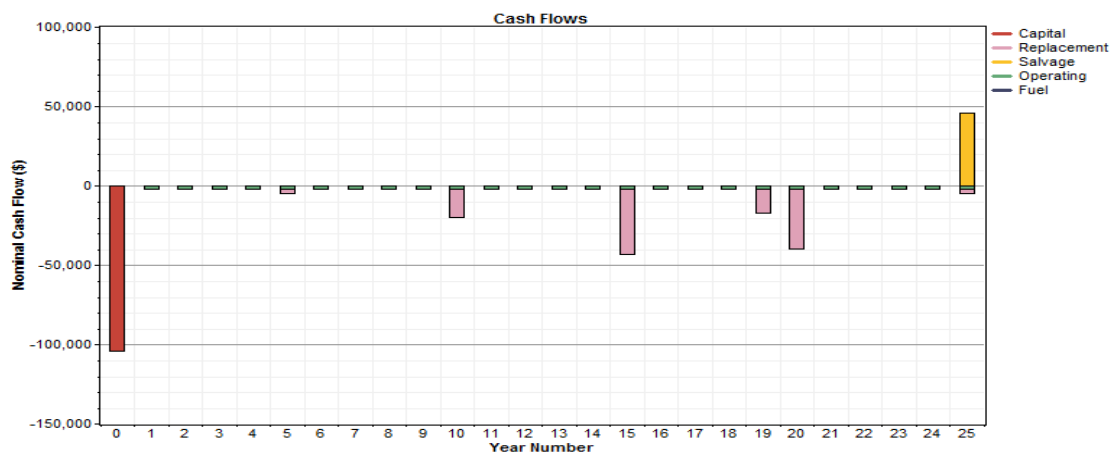
Σχήμα 3.23

Συνολικό αμειωμένο κόστος ανά υποσύστημα



Σχήμα 3.24

Ετήσιο κόστος ανά υποσύστημα

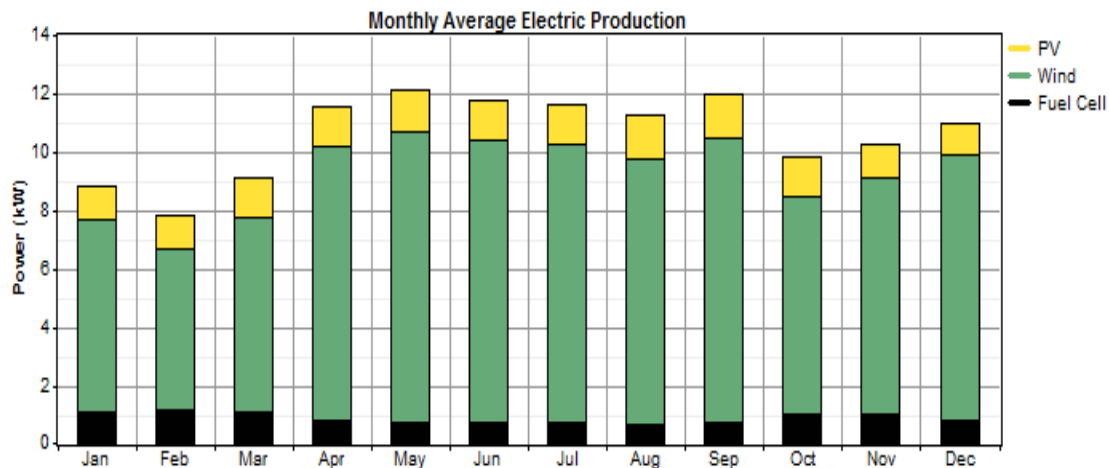


Σχήμα 3.25

Ταμειακές ροές

Η αντικατάσταση της κυψέλης καυσίμου εξαρτάται από τις ώρες λειτουργίας της και στη συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται κάθε 10 έτη, όπως και η αντικατάσταση των υπερπυκνωτών. Η αντικατάσταση του ηλεκτρολύτη και της Α/Γ έγινε στα 15 έτη, ενώ του Φ/Β στα 20 έτη. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος της παραγόμενης ενέργειας (COE) ανέρχεται στα 0.365 \$/kWh και το ετήσιο λειτουργικό κόστος στα 5,031 \$/yr.

Εξετάζοντας τα ενεργειακά αποτελέσματα της προσομοίωσης, στο σχήμα 3.26 παρατίθεται η μέση μηνιαία παραγωγή από άνεμο, ήλιο και υδρογόνο. Όπως φαίνεται από το σχήμα και τον πίνακα 3.5, η αιολική παραγωγή έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην ενεργειακή παραγωγή (79%) λόγω του υψηλού αιολικού δυναμικού και της αυξημένης εγκατεστημένης αιολικής ισχύος, ενώ η συνεισφορά της ηλιακής παραγωγής είναι 12% και της κυψέλης καυσίμου 8%. Επίσης, παρατηρείται αύξηση της αιολικής και ηλιακής παραγωγής κατά τους θερινούς μήνες λόγω των ευνοϊκών καιρικών συνθηκών, ενώ η παραγωγή της κυψέλης καυσίμου αυξάνεται τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες, όπου η παραγωγή από τις άλλες ΑΠΕ είναι μειωμένη.



Σχήμα 3.26

Μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Component	Production	Fraction
	(kWh/yr)	
PV array	11,511	12%
Wind turbine	73,880	79%
Fuel Cell	7,573	8%
Total	92,964	100%

Πίνακας 3.5

Παραγωγή ενεργειακών πηγών

Από τον πίνακα 3.6 παρατηρείται ότι το 63% της παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται από φορτίο, ενώ το υπόλοιπο 37% καταναλώνεται από τη μονάδα ηλεκτρόλυσης. Στη συνέχεια, στον πίνακα 3.7 παρατίθεται η περίσσεια και το έλλειμμα ενέργειας στο τέλος ενός έτους. Η περίσσεια ενέργειας, η οποία είναι αποθηκευμένη σε υδρογόνο, αποτελεί το 38% της συνολικής παραγωγής, ήτοι 35,365 kWh/yr. Αυτή η περίσσεια υδρογόνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη άλλων αναγκών, π.χ. η ηλεκτροκίνηση οχημάτων με κυψέλη καυσίμου, όπως προτείνεται στην αναφορά [31].

Load	Consumption	Fraction
	(kWh/yr)	
DC primary load	36,133	63%
Electrolyzer load	21,463	37%
Total	57,595	100%

Πίνακας 3.6

Καταναλώσεις

Quantity	Value	Fraction
Excess electricity	35,365 kWh/yr	38.0%
Unmet load	367 kWh/yr	1%
Capacity shortage	741 kWh/yr	2%
Renewable fraction	1.000	

Πίνακας 3.7

Περίσσεια – Έλλειμμα

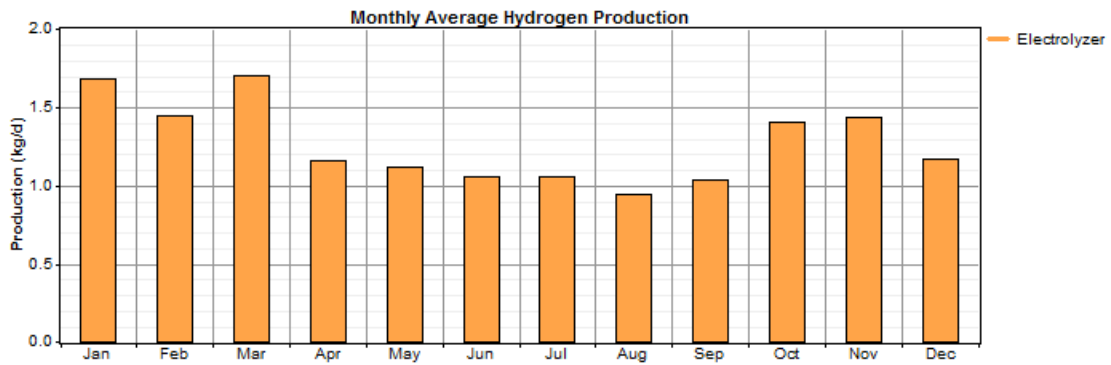
Ένας σημαντικός παράγοντας για την ανάλυση του συστήματος είναι η καταπόνηση της κυψέλης καυσίμου. Από τον πίνακα 3.8 παρατηρείται η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί 4,346 ώρες ετησίως, πραγματοποιώντας 943 εκκινήσεις. Η διάρκεια ζωής της υπολογίζεται στα 9.2 έτη και ο συντελεστής δυναμικότητας στα 17.3%.

Στη συνέχεια, στο σχήμα 3.27 φαίνεται η μέση μηνιαία παραγωγή υδρογόνου από τη μονάδα ηλεκτρόλυσης και στο σχήμα 3.28 η ελάχιστη, μέση και μέγιστη ποσότητα αποθηκευμένου υδρογόνου ανά μήνα. Όπως παρατηρείται, η παραγωγή υδρογόνου περιορίζεται κατά τους θερινούς μήνες λόγω πληρότητας της δεξαμενής (αυξημένη περίσσεια ενέργειας), ενώ αυξάνεται τους χειμερινούς μήνες λόγω των αυξημένης κατανάλωσης υδρογόνου από την κυψέλη καυσίμου.

Quantity	Value	Units
Hours of operation	4,346	hr/yr
Number of starts	943	starts/yr
Operational life	9.20	yr
Capacity factor	17.3	%
Fixed generation cost	0.875	\$/hr
Marginal generation cost	0.00	\$/kWhyr

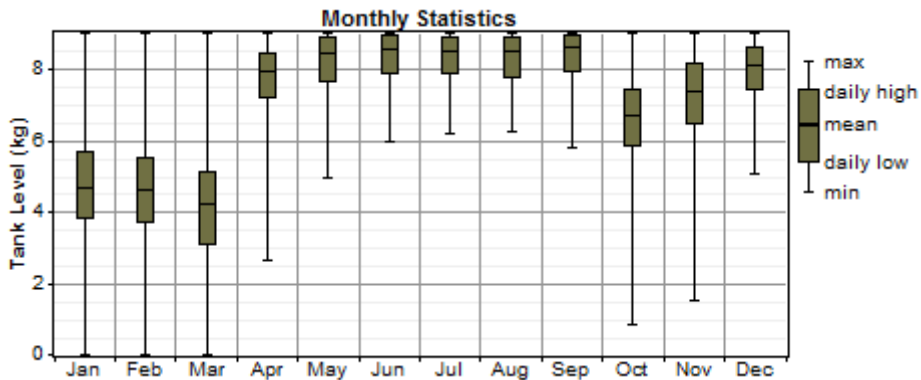
Πίνακας 3.8

Φόρτιση κυμέλης καυσίμου



Σχήμα 3.27

Μέση μηνιαία παραγωγή υδρογόνου

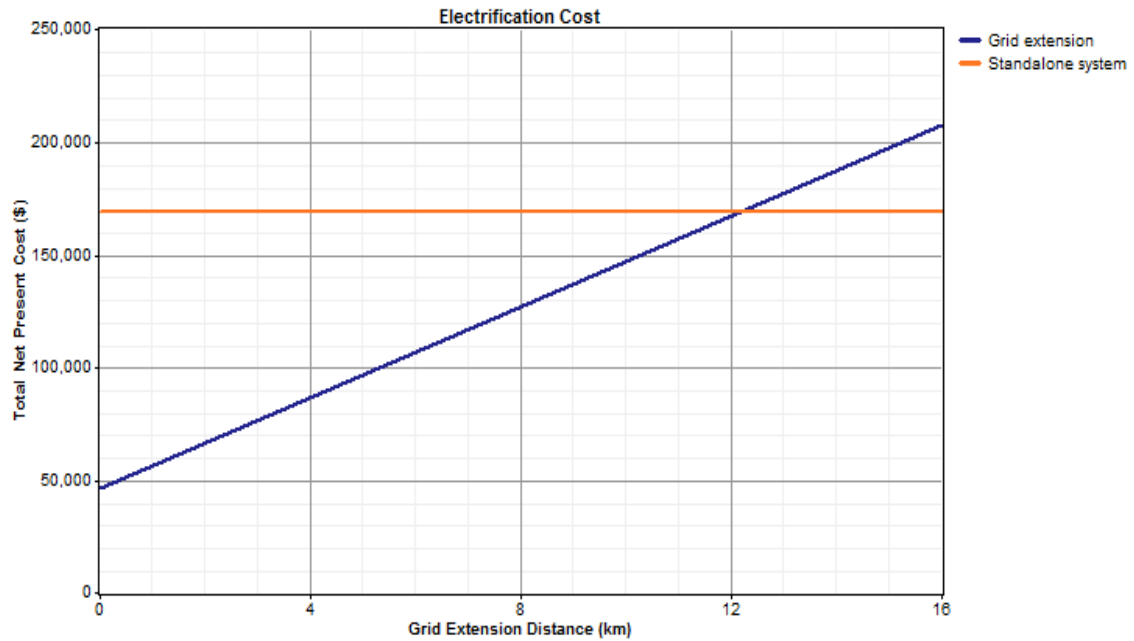


Σχήμα 3.28

Ελάχιστη, μέση και μέγιστη ποσότητα υδρογόνου ανά μήνα

Τέλος, ένας σημαντικός παράγοντας για την ανάλυση ενός αυτόνομου συστήματος είναι η σύγκριση του κόστους του με το κόστος της επέκτασης του ηλεκτρικού δικτύου για τη διασύνδεση του απομακρυσμένου φορτίου. Στο σχήμα 3.29 φαίνεται η

αντιπαράθεση του κόστους του αυτόνομου συστήματος με το κόστος της επέκτασης του υπάρχοντος δικτύου μέχρι το απομακρυσμένο φορτίο. Όπως είναι φυσικό, το κόστος επέκτασης του δικτύου εξαρτάται από την απόσταση. Το σημείο τομής των δύο ευθειών χαρακτηρίζεται ως ισοδύναμη απόσταση επέκτασης δικτύου (Breakeven Grid Extension Distance) και ανέρχεται στα 12.1 km. Αυτό σημαίνει ότι αν η απόσταση του φορτίου από το δίκτυο ξεπερνά τα 12.1 km, τότε η επένδυση σε ένα αυτόνομο σύστημα παραγωγής είναι βιώσιμη.



Σχήμα 3.29

Κόστος επέκτασης ηλεκτρικού δικτύου συναρτήσει της απόστασης – Κόστος αυτόνομης λειτουργίας

4 Λειτουργικοί περιορισμοί τεχνολογιών υδρογόνου

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται μια προσέγγιση των λειτουργικών χαρακτηριστικών των τεχνολογιών υδρογόνου και των περιορισμών που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη σωστή λειτουργία του συστήματος. Βάσει αυτών των περιορισμών θα διαμορφωθεί η στρατηγική ελέγχου του υβριδικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, θα εστιάσουμε στις δύο βασικές συνιστώσες του συστήματος υδρογόνου, την κυψέλη καυσίμου και τον ηλεκτρολύτη.

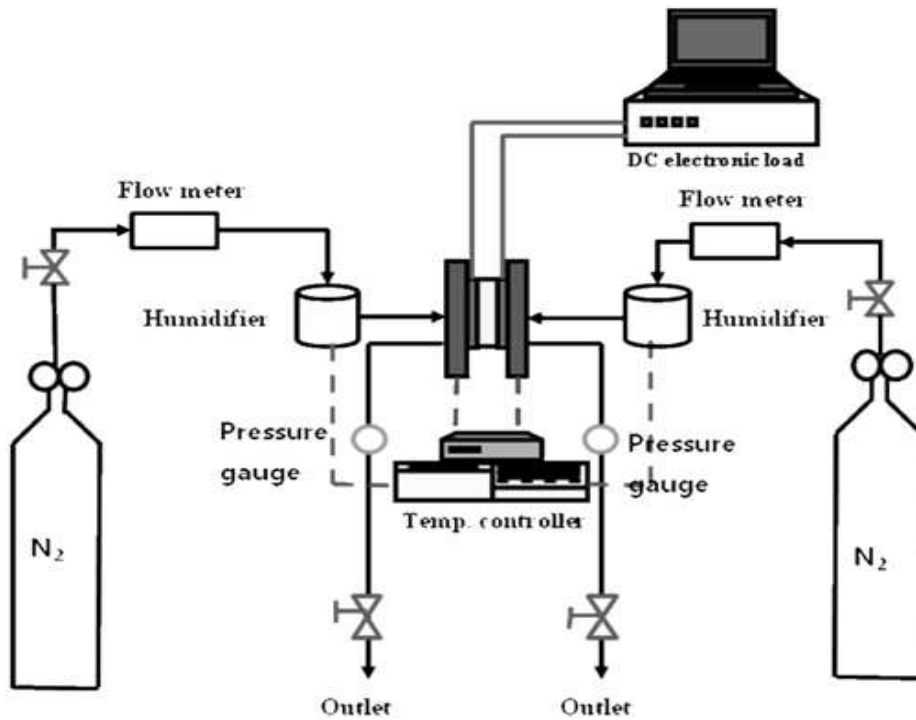
4.2 Λειτουργικοί περιορισμοί κυψέλης καυσίμου PEM

4.2.1 Διάρκεια ζωής και υποβάθμιση της απόδοσης με το χρόνο (degradation)

Τα τελευταία χρόνια, είναι πλέον αποδεκτό ότι για να γίνει δυνατή η μαζική χρησιμοποίηση κυψελών καυσίμου PEM σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής ή ηλεκτροκίνησης πρέπει να βελτιωθεί κατά πολύ η αντοχή (durability) τους σε μεταβατικά φορτία τύπου on/off (on/off cycling). Μελέτες ([34] – [37]) έχουν αποδείξει ότι η αυξομείωση του δυναμικού της κυψέλης επιταχύνει τη διάλυση του καταλύτη (πλατίνα) στα ηλεκτρόδια. Ακόμη, η έκθεση της συνδεσμολογίας μεμβράνης – ηλεκτρόδιο (Membrane Electrode Assembly - MEA) σε μίγμα υδρογόνου και αέρα υπό συνθήκες ανοικτού κύκλου (Open Circuit Voltage - OPV) συμβάλλει στη χημική υποβάθμιση της μεμβράνης. Επιπρόσθετα, η περιεκτικότητα του νερού εμφανίζει διακυμάνσεις ανάλογα με το ρεύμα φόρτισης, οδηγώντας στη μηχανική υποβάθμιση της μεμβράνης. Τέλος, η διαδικασία της διάλυσης του καταλύτη και η διαδικασία της υποβάθμισης της μεμβράνης μπορούν να ενισχύουν η μία την άλλη [5].

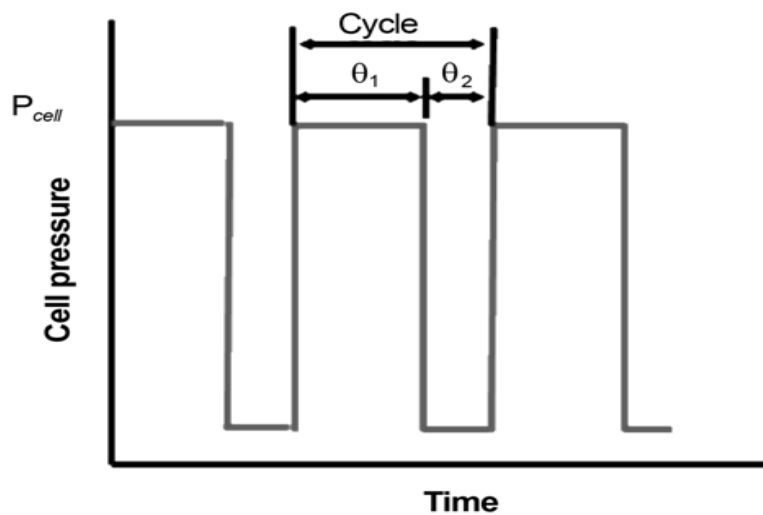
Στο πείραμα που περιγράφεται στην αναφορά [37], εξετάζεται η υποβάθμιση της λειτουργίας της κυψέλης σε περιβάλλον αζώτου (N_2) για φορτία τύπου on/off. Στο σχήμα 4.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη. Το φορτίο τύπου on/off αντικατοπτρίζεται στην πίεση της κυψέλης (σχήμα 4.2). Στο πρώτο βήμα (θ_1), παρέχεται άζωτο στην άνοδο και στην κάθοδο για 9 s και οι βαλβίδες εξόδου είναι κλειστές. Στο δεύτερο βήμα (θ_2), οι βαλβίδες εξόδου ανοίγουν για 1 s. Μετά από 100.000 τέτοιους κύκλους λειτουργίας, η υποβάθμιση της καμπύλης τάσης – ρεύματος σε συνθήκες μέσης υγρασίας 50% και 80% φαίνεται στο σχήμα 4.3. Όπως βλέπουμε, παρατηρείται σημαντική πτώση τάσης σε πυκνότητες ρεύματος ανώτερες των 0.8 A/cm^2 . Ο κύκλος λειτουργίας on/off επηρεάζει αρνητικά την MEA, συμπεριλαμβανομένου του στρώματος διάχυσης αερίων και της διεπιφανειακής δομής μεμβράνης – ηλεκτροδίου, οδηγώντας σε μείωση στην απόδοση της κυψέλης. Στο σχήμα 4.4 φαίνεται η διεύρυνση του φάσματος της σύνθετης αντίστασης της MEA, οποία εξαρτάται άμεσα από την καμπύλη τάσης - ρεύματος. Σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος, η σύνθετη αντίσταση επηρεάζεται από το μηχανικό φαινόμενο

ροής των αερίων, ενώ σε χαμηλές πυκνότητες ρεύματος επηρεάζεται από το φαινόμενο της ενεργοποίησης (ενότητα 2.3.4).



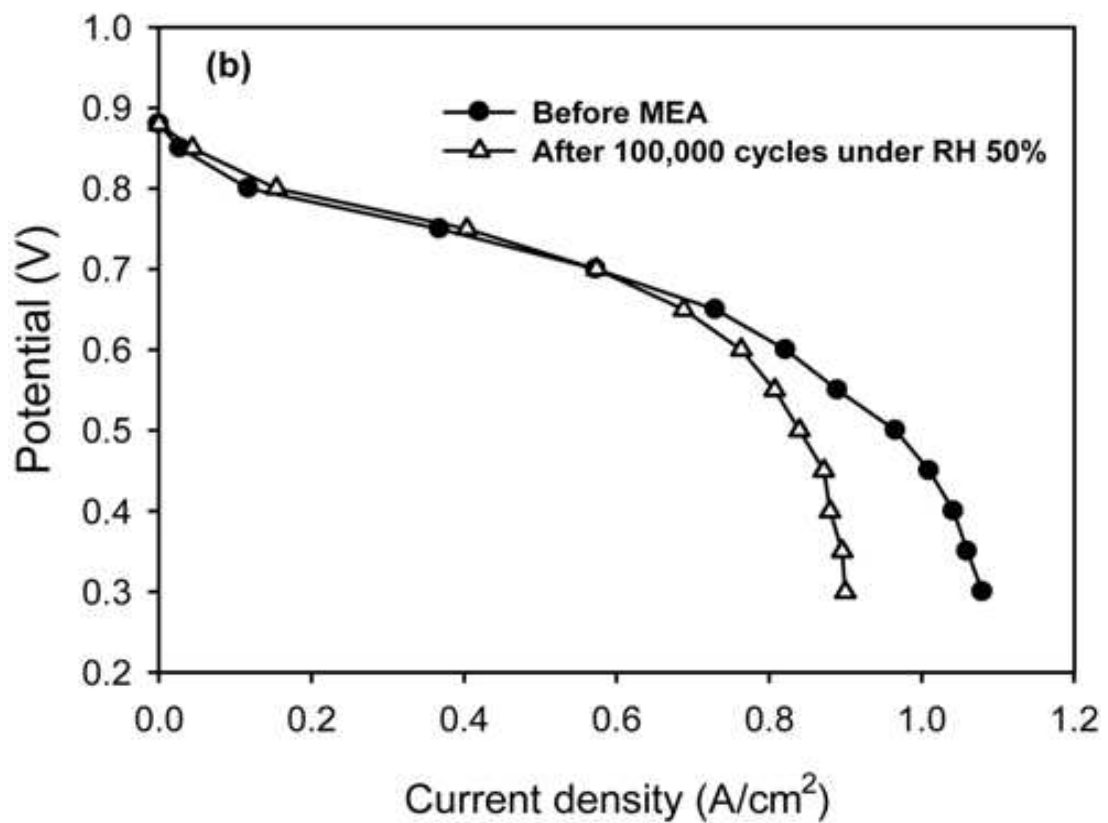
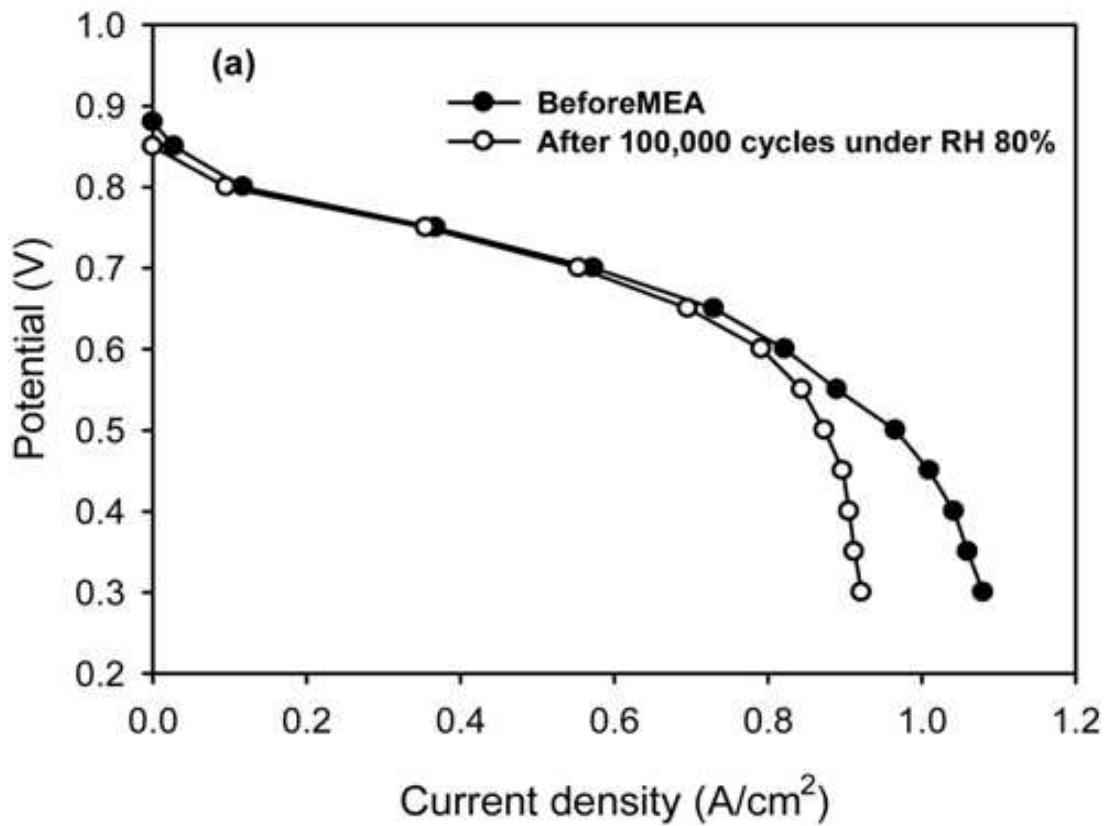
Σχήμα 4.1

Πειραματική διάταξη για τη μελέτη υποβάθμισης της κυψέλης καυσίμου



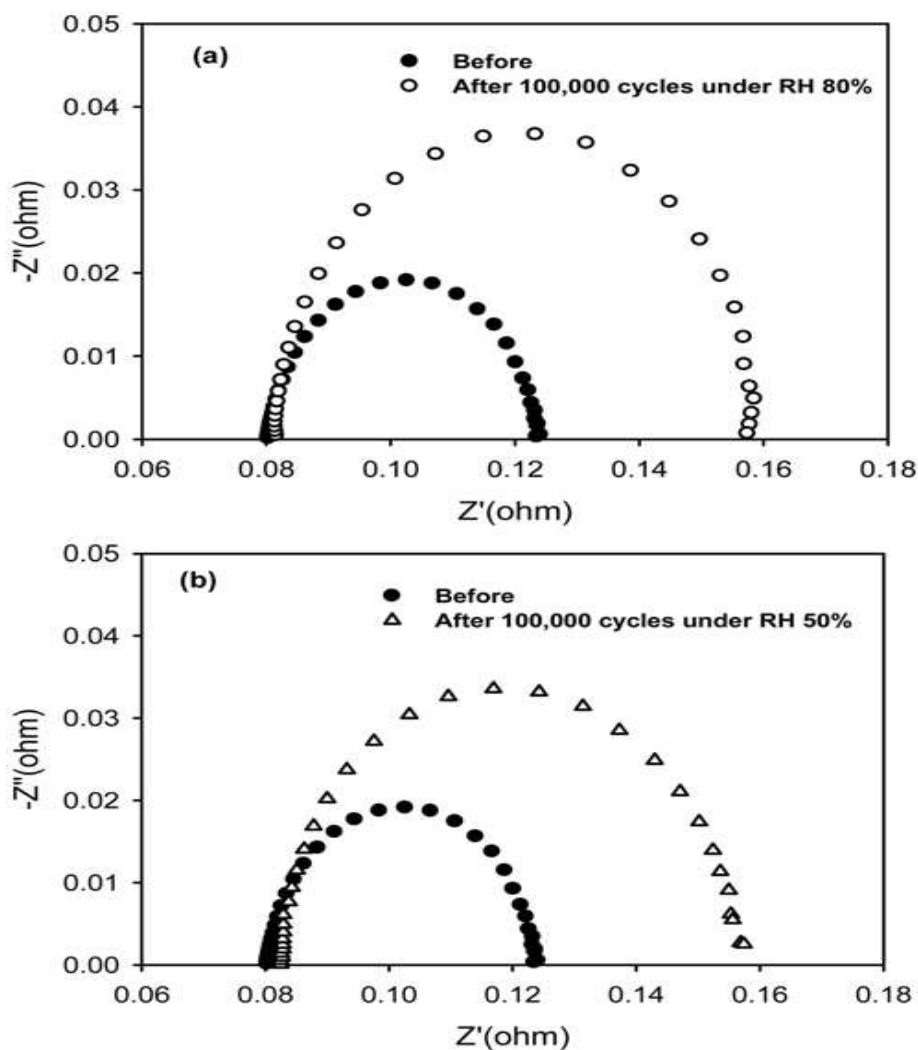
Σχήμα 4.2

Μεταβολή πίεσης της κυψέλης τύπου on/off



Σχήμα 4.3

Καμπύλες $V - I$ πριν και μετά από 100.000 κύκλους λειτουργίας σε συνθήκες υγρασίας (α) 80% και (β) 50%



Σχήμα 4.4

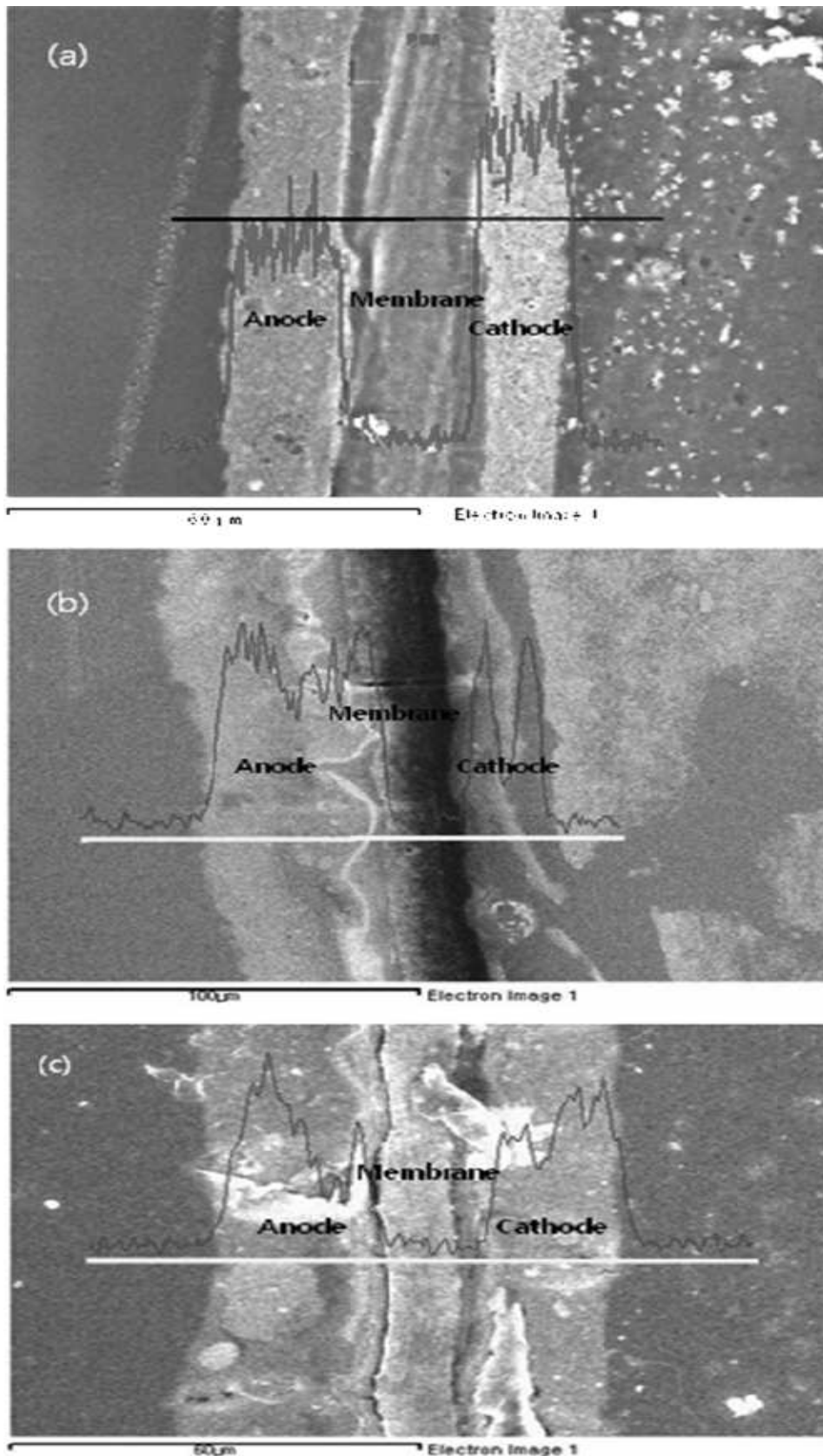
Φάσμα σύνθετης αντίστασης MEA πριν και μετά από 100.000 κύκλους λειτουργίας σε συνθήκες υγρασίας (α) 80% και (β) 50%

Η διάβρωση της μεμβράνης και το φαινόμενο διάλυσης του καταλύτη φαίνονται στο σχήμα 4.5. Στον πίνακα 4.1 φαίνεται η αύξηση του πάχους των σωματιδίων του καταλύτη, η οποία οφείλεται στη μείωση της ενεργούς επιφάνειας του καταλύτη [36].

MEAs	Anode (nm)	Cathode (nm)
Fresh	2.53	2.53
After 100,000cycles under RH 80%	3.79	3.78
After 100,000cycles under RH 50%	2.93	3.47

Πίνακας 4.1

Μέγεθος σωματιδίων καταλύτη (Pt) πριν και μετά από 100.000 κύκλους λειτουργίας σε συνθήκες υγρασίας 80% και 50%



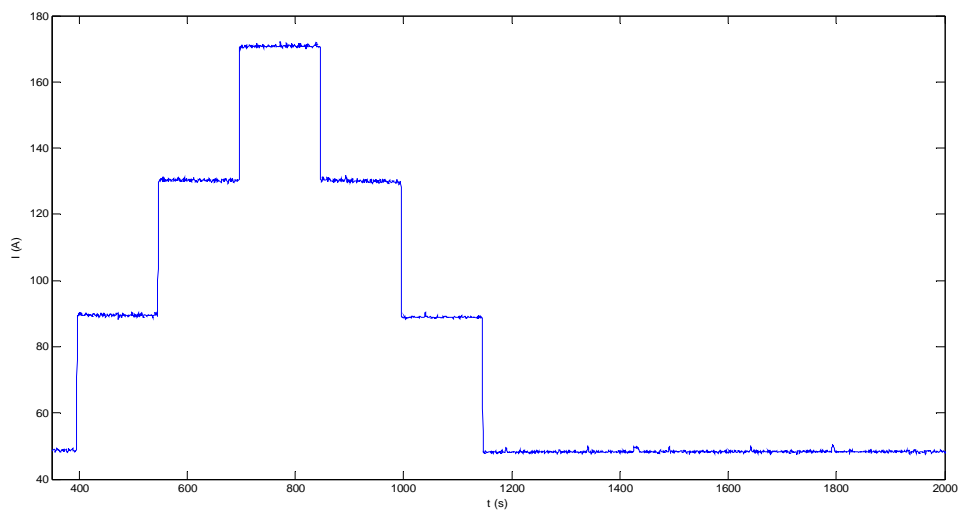
Σχήμα 4.5

Εικόνες MEA (α) πριν και μετά από 100.000 κύκλους λειτουργίας σε συνθήκες υγρασίας (β) 80% και (γ) 50%

Από τα παραπάνω, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε μεταβατικά φορτία τύπου on/off επιταχύνει την υποβάθμιση της απόδοσης της και μειώνει το χρόνο ζωής της.

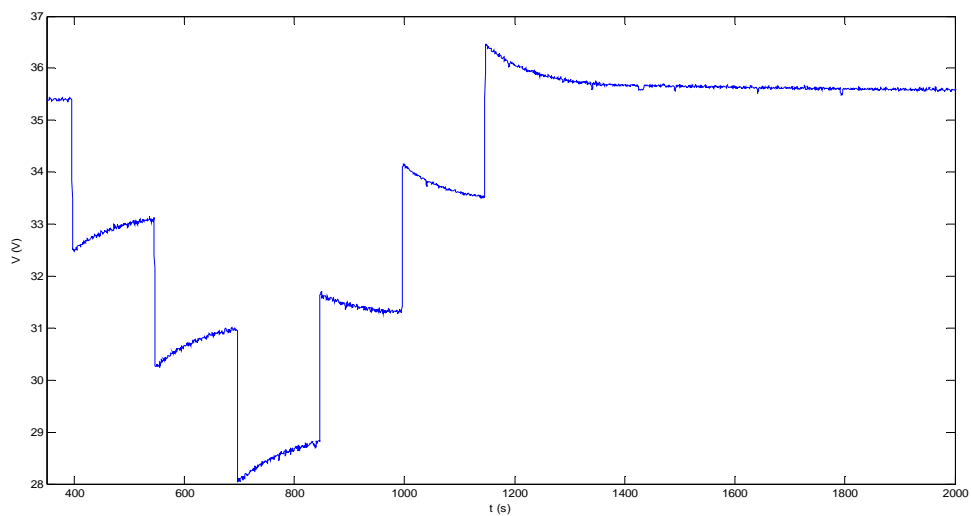
4.2.2 Δυναμική απόκριση σε μεταβατικά φορτία

Σημαντική παράμετρος για τη σωστή λειτουργία του συστήματος είναι η δυναμική απόκριση της κυψέλης σε μεταβατικά φορτία λόγω των καθυστερήσεων, που ήδη έχουν αναφερθεί στη μοντελοποίηση. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο που περιγράφηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, πραγματοποιήσαμε βηματικές αλλαγές στο φορτίο και πήραμε τα εξής αποτελέσματα:



Σχήμα 4.6

Μεταβατικό ρεύμα φόρτισης κυψέλης καυσίμου



Σχήμα 4.7

Δυναμική απόκριση της τάσης της κυψέλης καυσίμου

Η δυναμική απόκριση της κυψέλης καυσίμου PEM εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τα εξής [14]:

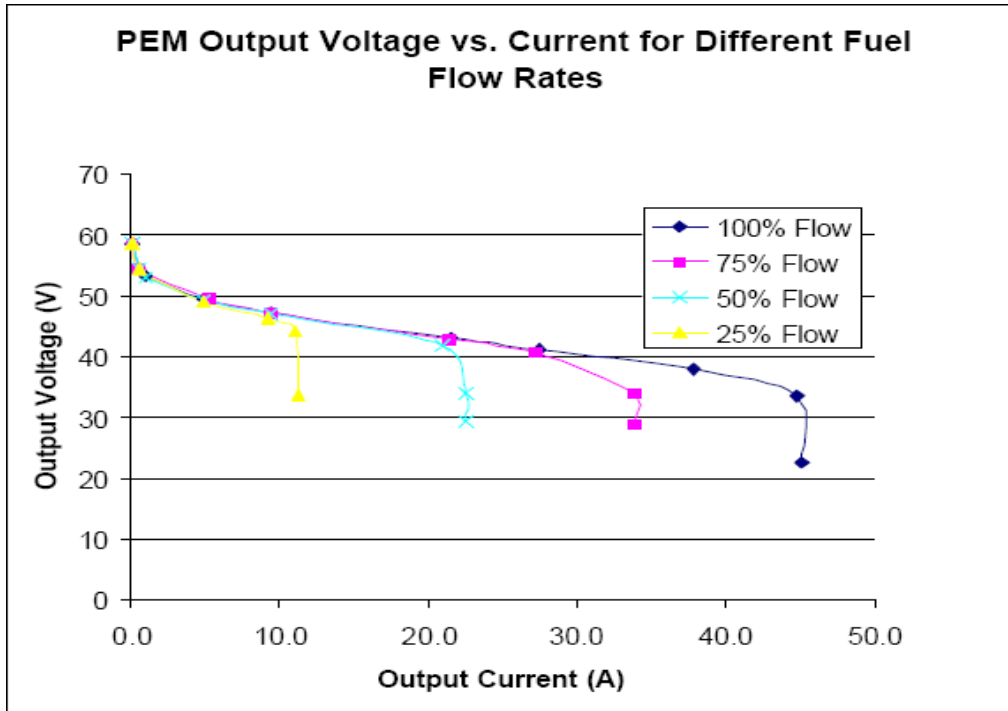
- Φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας
- Μηχανικές καθυστερήσεις ροής του καυσίμου/οξειδωτικού
- Θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά κυψέλης

Παρόλο που η χωρητικότητα C , η οποία μοντελοποιεί το φαινόμενο της διπλοστοιβάδας, είναι αρκετά μεγάλη (μερικά Farads για κάθε κυψέλη), η σταθερά χρόνου $\tau = (R_{act} + R_{conc}) \cdot C$ είναι σχετικά μικρή (λιγότερο από 1 s), καθώς η ποσότητα $(R_{act} + R_{conc})$ είναι αρκετά μικρή (λιγότερο από 0.05 Ω για κάθε κυψέλη), όταν η κυψέλη λειτουργεί στη γραμμική περιοχή. Επομένως, η χωρητικότητα C επηρεάζει τη δυναμική απόκριση σε μικρή κλίμακα χρόνου. Από την άλλη πλευρά, η ροή του καυσίμου και του οξειδωτικού δε μπορεί να ακολουθήσει τις απότομες αλλαγές του φορτίου ακαριαία, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μηχανικές καθυστερήσεις. Αυτές οι μηχανικές καθυστερήσεις κυμαίνονται από μερικά δεκάδες έως εκατοντάδες δευτερόλεπτα. Επίσης, η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης δε μπορεί να αλλάξει ακαριαία. Η θερμοδυναμική σταθερά χρόνου μιας κυψέλης καυσίμου PEM είναι της τάξης των λεπτών. Επομένως, οι μηχανικές καθυστερήσεις και τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της κυψέλης υπερκαλύπτουν το φαινόμενο της διπλοστοιβάδας σε μεγάλη κλίμακα χρόνου. Αυτό το γεγονός επιβεβαιώνεται και από την προσομοίωση (σχήμα 4.7). Όπως φαίνεται, σε απότομη αύξηση του ρεύματος του φορτίου η τάση πέφτει χαμηλότερα της τιμής μόνιμης κατάστασης και στη συνέχεια σταθεροποιείται στη μόνιμη κατάσταση με σχετικά μεγάλη καθυστέρηση (μερικά εκατοντάδες δευτερόλεπτα), λόγω των φαινομένων που περιγράφηκαν παραπάνω.

Στη συνέχεια, σύμφωνα με την αναφορά [38] θα αναλυθούν περαιτέρω τα φαινόμενα καθυστερήσεων στις μεταβολές του φορτίου που οφείλονται στα μηχανικά μέρη:

- Επεξεργαστής καυσίμου.
- Συμπιεστές.
- Αντλίες τροφοδοσίας οξυγόνου και υδρογόνου.

Για μία δεδομένη συστοιχία κυψέλων καυσίμου η ισχύς εξόδου είναι αύξουσα συνάρτηση του ρυθμού τροφοδοσίας με καύσιμο. Στο σχήμα 4.8 παρατηρούμε ότι σε κάθε επίπεδο ρυθμού παροχής υδρογόνου αντιστοιχεί και μια, διαφορετική κάθε φορά, καμπύλη V-I. Αυξάνοντας το ρυθμό αυτόν επιτυγχάνεται αύξηση του ρεύματος και της ισχύος που μπορεί να δώσει η συστοιχία. Όμως, για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να μεταβληθεί η ταχύτητα με την οποία λειτουργεί η αντλία, διαδικασία που απαιτεί μερικά δευτερόλεπτα. Κατά τη χρονική διάρκεια αυτή, το ρεύμα και η τάση θα καθυστερήσουν να φτάσουν στην τελική τους τιμή και η ισχύς εξόδου δε θα μπορέσει να ακολουθήσει τις απαιτήσεις του φορτίου, δηλαδή δε θα έχει βηματική απόκριση αλλά εκθετική. Η σταθερά χρόνου ποικίλει από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι μερικές δεκάδες δευτερόλεπτα.



Σχήμα 4.8

Καμπύλες $V - I$ κυψέλης καυσίμου για διάφορους ρυθμούς τροφοδοσίας

Οι μερικές πιέσεις των αντιδρώντων συναρτήσει των ρυθμών τροφοδοσίας δίνονται από τις σχέσεις:

$$p_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} \cdot s} (q_{H_2}^{in} - 2 \cdot K_r \cdot i) \quad (4.1)$$

$$p_{O_2} = \frac{1/K_{O_2}}{1 + \tau_{O_2} \cdot s} (q_{O_2}^{in} - K_r \cdot i) \quad (4.2)$$

$$p_{H_2O} = \frac{1/K_{H_2O}}{1 + \tau_{H_2O} \cdot s} (2 \cdot K_r \cdot i) \quad (4.3)$$

Όπου i το ρεύμα εξόδου της κυψέλης, $q_{H_2}^{in}$ και $q_{O_2}^{in}$ οι μοριακές ροές εισόδου του υδρογόνου και του οξυγόνου (mol/s), K_{H_2} , K_{O_2} , K_{H_2O} οι μοριακές σταθερές των βαλβίδων και τ_{H_2} , τ_{O_2} , τ_{H_2O} οι σταθερές χρόνου που σχετίζονται με τις ροές των αντιδρώντων:

$$\tau_{H_2} = \frac{V_a}{K_{H_2} RT} \quad (4.4)$$

$$\tau_{O_2} = \frac{V_c}{K_{O_2} RT} \quad (4.5)$$

$$\tau_{H_2O} = \frac{V_c}{K_{H_2O} RT} \quad (4.6)$$

Η σταθερά K_r υπολογίζεται ως εξής:

$$K_r = \frac{N_{cell}}{4F} \quad (4.7)$$

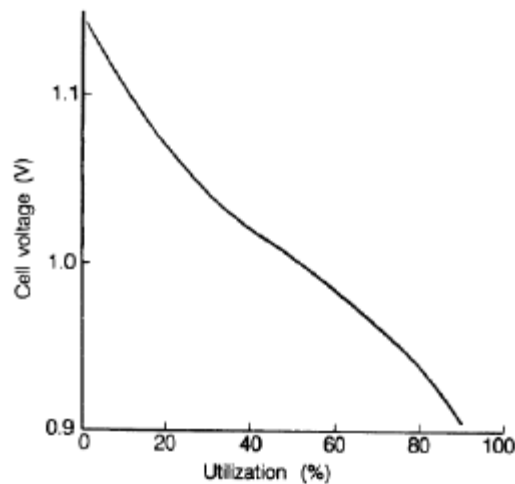
Η ροή του αντιδρώντος υδρογόνου δίνεται από τη σχέση:

$$q_{H_2}^r = 2 \cdot K_r \cdot i \quad (4.8)$$

Ο βαθμός χρησιμοποίησης του καυσίμου ορίζεται ως ο λόγος της ροής του αντιδρώντος υδρογόνου προς τη συνολική ροή:

$$U_f = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{in}} \quad (4.9)$$

Γενικά, είναι επιθυμητό ο βαθμός χρησιμοποίησης του καυσίμου να έχει υψηλή τιμή, έτσι ώστε να έχουμε το ελάχιστο δυνατό κόστος καυσίμου και να επαρκούν μικρότεροι και φθηνότεροι συμπιεστές για το σύστημα. Όμως, από κάποιο σημείο και μετά δε συμφέρει η αύξησή του, επειδή οδηγεί σε μεγάλη πτώση τάσης της εξόδου των κυψελών, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9. Ως ιδανική θεωρούμε την τιμή, $U_{f,opt} = 0.85$.



Σχήμα 4.9

Τάση ανοικτοκύκλωσης κυψέλης καυσίμου συναρτήσει του βαθμού χρησιμοποίησης καυσίμου

Επομένως, από τις σχέσεις 4.8 και 4.9 παίρνουμε την επιθυμητή ροή καυσίμου:

$$q_{H_2}^{in} = \frac{2 \cdot K_r}{0.85} \cdot i \quad (4.10)$$

Η μοριακή ροή του εισερχόμενου οξυγόνου υπολογίζεται ως ένα κλάσμα της ροής του υδρογόνου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$q_{O_2}^{in} = \frac{q_{H_2}^{in}}{r_{H-O}} \quad (4.11)$$

Όπου r_{H-O} μια σταθερά μεταξύ των τιμών 1.1 και 1.2.

Δεδομένου ότι για να γίνει η χημική αντίδραση απαιτείται η μισή ποσότητα σε mol οξυγόνου από υδρογόνο, βλέπουμε ότι στον επεξεργαστή καυσίμου εισάγεται αρκετά μεγαλύτερη ποσότητα οξυγόνου. Με αυτό τον τρόπο (αύξηση της συγκέντρωσης ενός αντιδρώντος, εδώ του οξυγόνου) εξασφαλίζεται καλύτερος βαθμός χρησιμοποίησης του υδρογόνου και μεγαλύτερη ταχύτητα στην πραγματοποίηση της αντίδρασης.

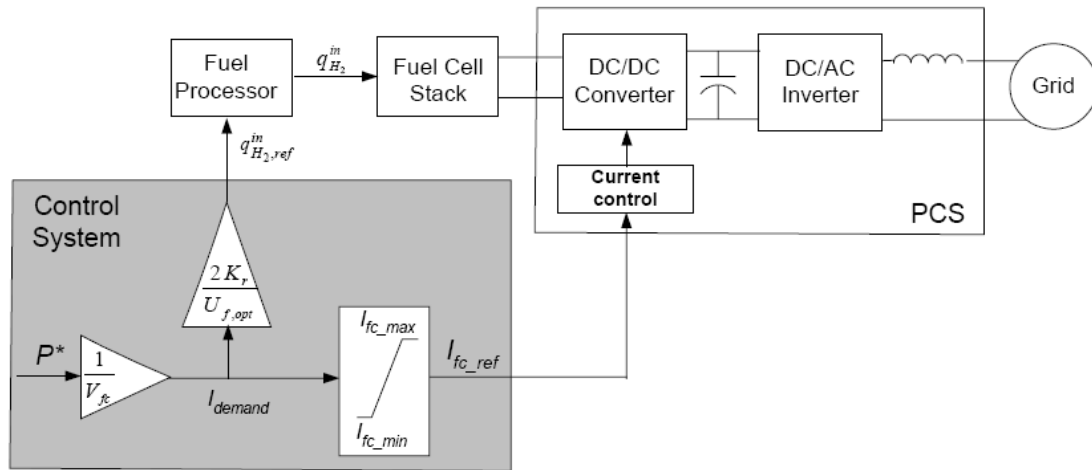
Για την προστασία της συστοιχίας, ο συντελεστής χρησιμοποίησης του καυσίμου πρέπει να περιορίζεται. Σε αντίθετη περίπτωση, θα παρατηρήσουμε τα εξής φαινόμενα [39]:

- Υποχρησιμοποίηση καυσίμου: Η τάση της κυψέλης θα αυξηθεί απότομα. Για αυτό, το ρεύμα της κυψέλης δεν επιτρέπεται να πέσει πιο κάτω από το κατώτατο ρεύμα της συστοιχίας.
- Υπερχρησιμοποίηση καυσίμου: Έλλειψη καυσίμου και μόνιμες βλάβες στις κυψέλες. Για αυτό, το ρεύμα της κυψέλης δεν επιτρέπεται να ξεπεράσει το ανώτατο ρεύμα της συστοιχίας.
- Υποτάση: Υπάρχει μια κατώτατη τιμή τάσης (0.5 V), κάτω από την οποία η τάση της κυψέλης μειώνεται απότομα με την αύξηση του ρεύματος.

Επομένως, είναι επιθυμητό ο συντελεστής χρησιμοποίησης να παίρνει τιμές από 0.8 έως 0.9. Αυτό θέτει του εξής περιορισμούς για το ρεύμα φόρτισης:

$$\begin{aligned} 0.8 \leq U_f \leq 0.9 &\Rightarrow 0.8 \leq \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{in}} \leq 0.9 \Rightarrow 0.8 \cdot q_{H_2}^{in} \leq 2 \cdot K_r \cdot I \leq 0.9 \cdot q_{H_2}^{in} \\ &\Rightarrow \frac{0.8 \cdot q_{H_2}^{in}}{2 \cdot K_r} \leq I \leq \frac{0.9 \cdot q_{H_2}^{in}}{2 \cdot K_r} \end{aligned} \quad (4.12)$$

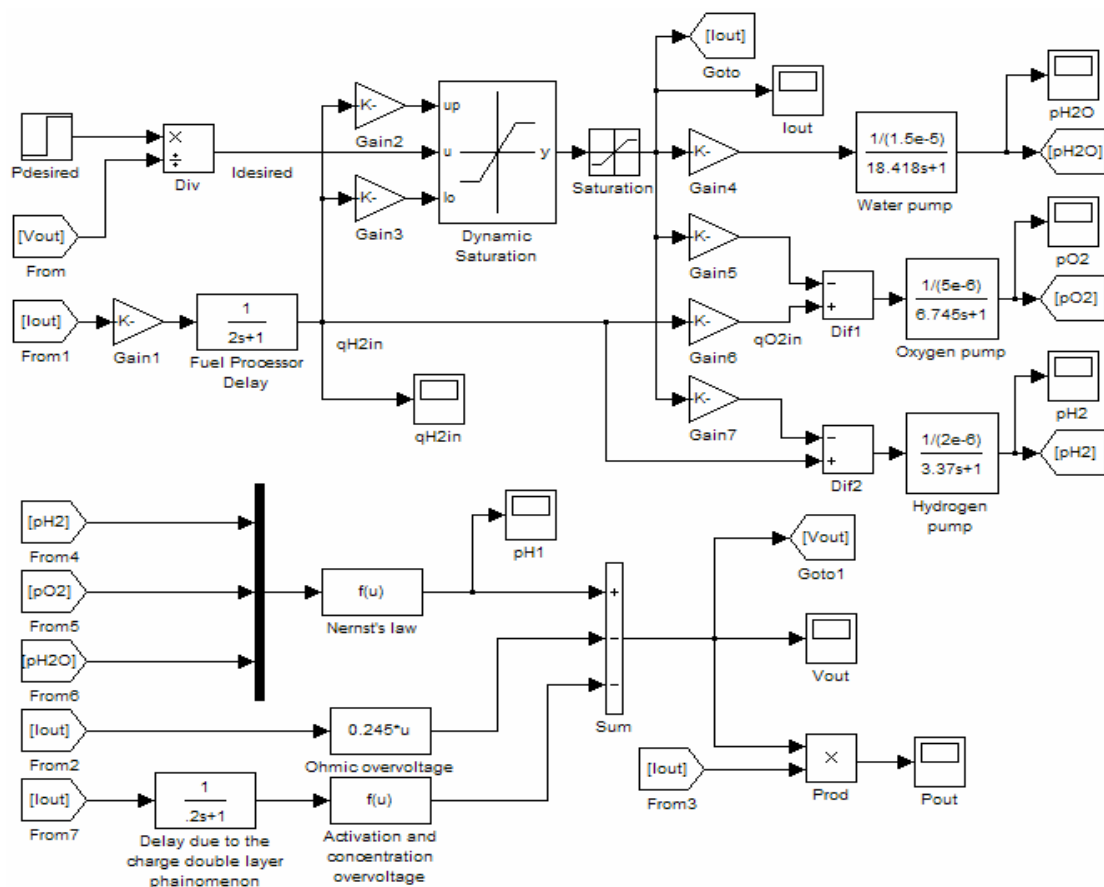
Ο έλεγχος της ροής καυσίμου ανάλογα με την ισχύ του φορτίου υλοποιείται όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10 [39]. Όπως βλέπουμε, η ισχύς του φορτίου διαιρείται με την τάση εξόδου της κυψέλης, υπολογίζοντας το ρεύμα φόρτισης I . Το ρεύμα χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η επιθυμητή ροή καυσίμου $q_{H_2}^{in,ref}$, η οποία δίνει συντελεστή χρησιμοποίησης 0.85 (εξίσωση 4.10) και χρησιμοποιείται ως αναφορά για τον έλεγχο του επεξεργαστή καυσίμου. Ακόμη, το ρεύμα φόρτισης ελέγχεται εάν βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων (εξίσωση 4.12) και λειτουργεί σαν τιμή αναφοράς για τη ρύθμιση του Duty Cycle του μετατροπέα της κυψέλης καυσίμου.



Σχήμα 4.10

Αρχιτεκτονική ελέγχου κυψέλης καυσίμου

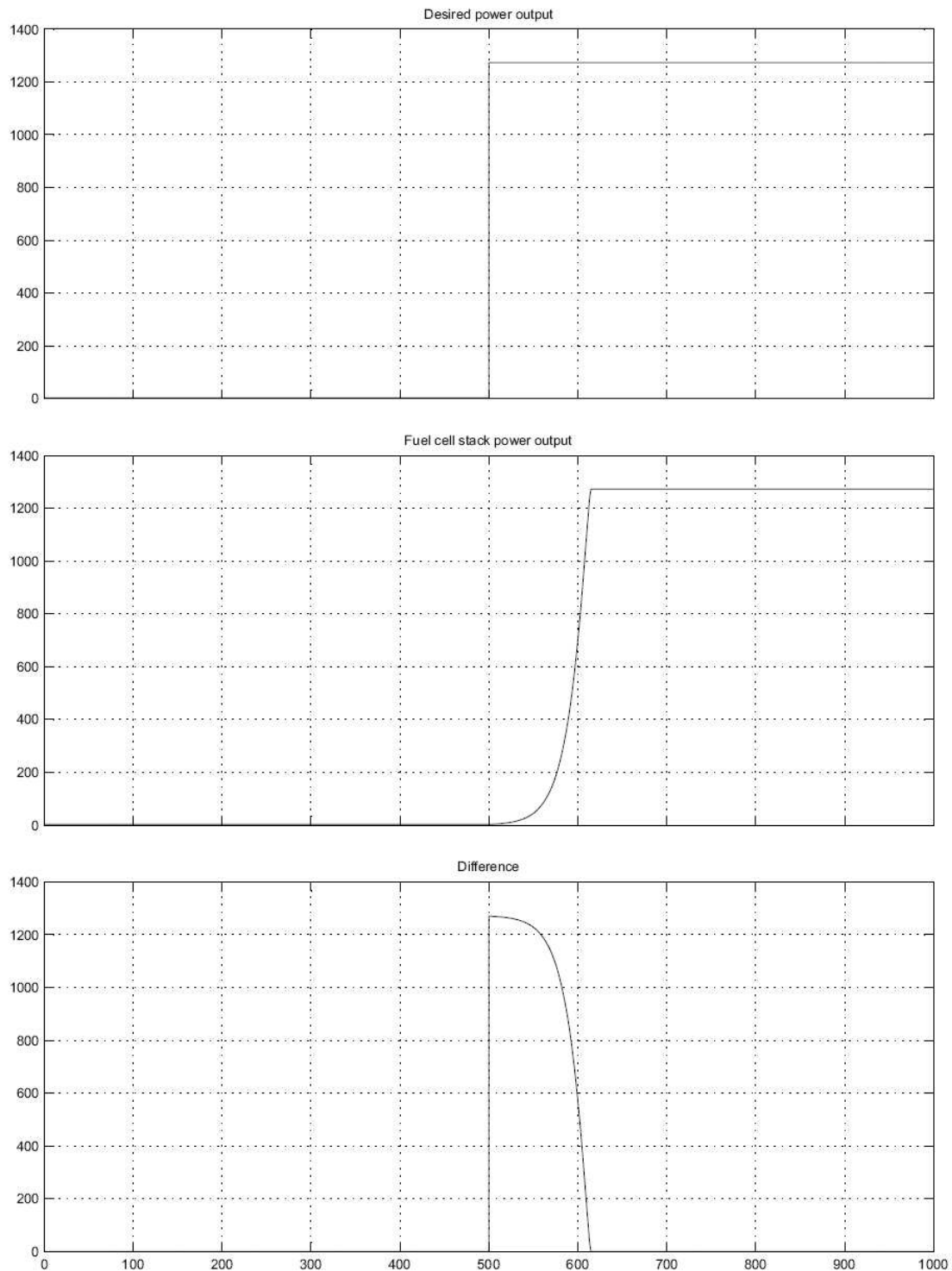
Στο μοντέλο του σχήματος 4.11 [38] ελήφθησαν υπόψη οι μηχανικές καθυστερήσεις λόγω του επεξεργαστή καυσίμου και των αντλιών υδρογόνου, οξυγόνου και νερού, καθώς και οι καθυστερήσεις που οφείλονται σε ηλεκτροχημικά φαινόμενα.



Σχήμα 4.11

Μοντέλο απόκρισης ισχύος κυψέλης καυσίμου

Αξιοποιώντας το παραπάνω μοντέλο, μελετήθηκε η απόκριση της ισχύος της κυψέλης σε μία βηματική αύξηση της ισχύος του φορτίου:

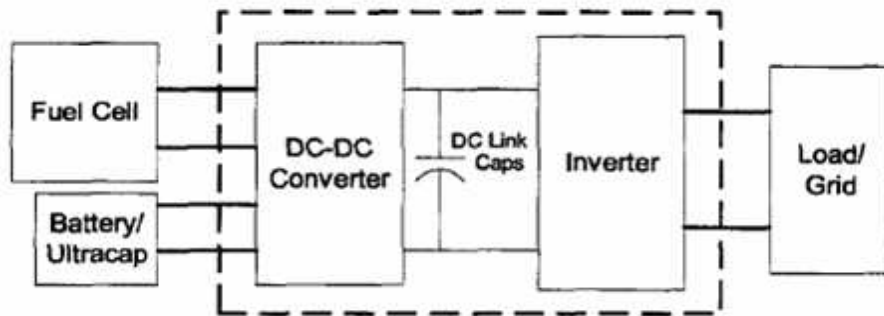


Σχήμα 4.12

Καμπύλες (α) επιθυμητής και (β) πραγματικής ισχύος εξόδου της κυψέλης και (γ) η διαφορά τους

Όπως παρατηρούμε, η πραγματική ισχύς εξόδου υπολείπεται της επιθυμητής. Αυτό το έλλειμμα ισχύος θα πρέπει να καλυφθεί από μία βοηθητική πηγή.

Από τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι η λειτουργία της κυψέλης σε μεταβατικά φορτία προκαλεί καθυστερήσεις στην απόκριση της ισχύος της, μειώνει την απόδοση της, τείνει να υποβαθμίσει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της και μειώνει το προσδόκιμο της ζωής της. Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη μιας επιπλέον ενεργειακής πηγής, η οποία θα μειώσει τη διακύμανση της τάσης της κυψέλης καυσίμου και θα ικανοποιήσει το φορτίο, σε περιπτώσεις που η ισχύ δε μπορεί να αποκριθεί άμεσα. Αυτό το ρόλο έχουν οι υπερπυκνωτές στην παρούσα διπλωματική εργασία. Στο σχήμα 4.13 παρατίθεται ενδεικτικά ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου υποβοηθούμενης από μπαταρίες/υπερπυκνωτές, ενώ στο σχήμα 4.14 φαίνεται το ισοζύγιο ισχύος κατά την υποβοηθούμενη εκκίνηση της λειτουργίας μίας κυψέλης από συστοιχία μπαταριών.



Σχήμα 4.13

Παράδειγμα κυψέλης καυσίμου υποβοηθούμενη από μπαταρίες/υπερπυκνωτές

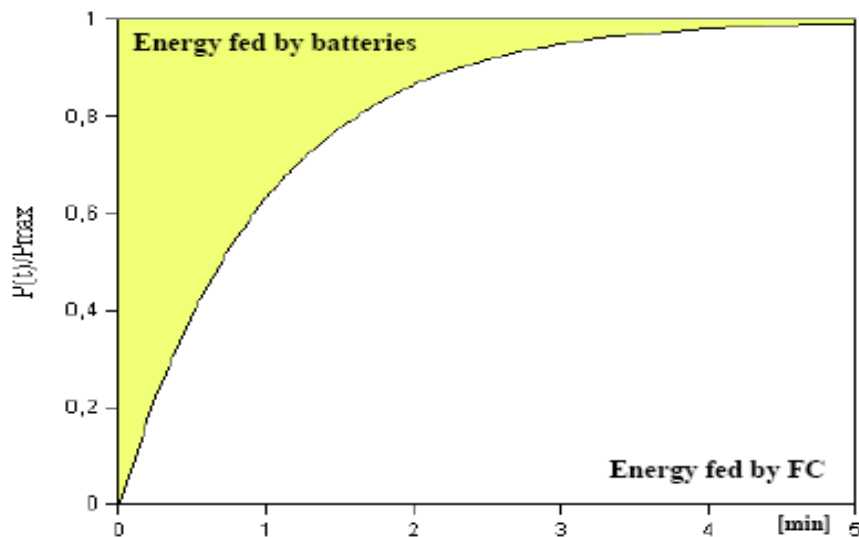


Fig. 2 – AvistaLabs FC start-up transient.

Σχήμα 4.14

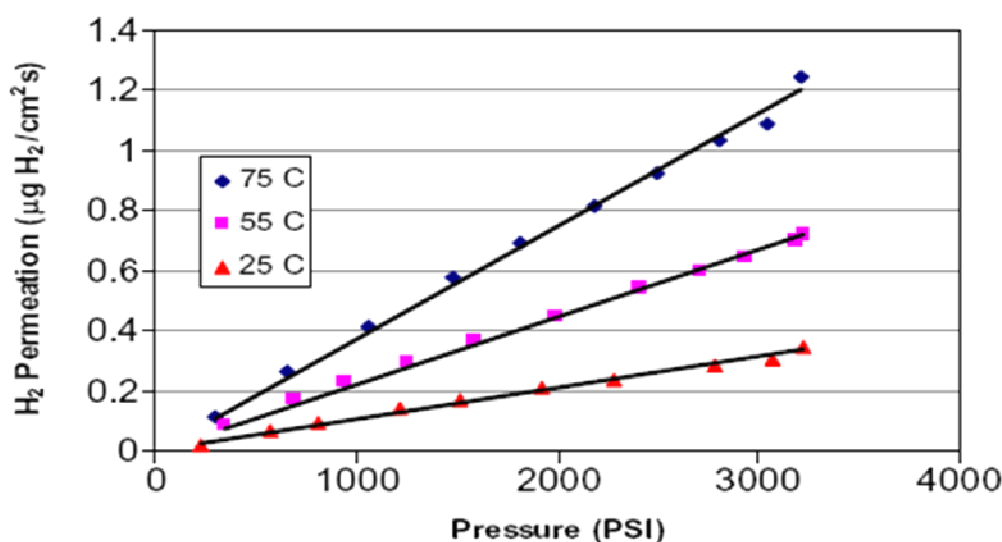
Ισοζύγιο ισχύος κατά την εκκίνηση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου με τη βοήθεια μπαταριών

4.3 Λειτουργικοί περιορισμοί ηλεκτρολύτη PEM

4.3.1 Διακοπτόμενη λειτουργία (intermittent operation) και κυμάτωση ισχύος

Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις στη βιβλιογραφία ([17], [40], [41]), όπου ο ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται σαν ελεγχόμενο φορτίο (dump load), δηλαδή τροφοδοτείται με οποιαδήποτε περίσσεια ισχύος υπάρχει στο σύστημα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να λειτουργεί διακοπτόμενα, αλλά και με μεγάλη κυμάτωση ισχύος.

Ένα πρόβλημα που θα μπορούσε να προκύψει είναι ότι, σε μεγάλη περίσσεια ισχύος, ο ρυθμός με τον οποίο παράγονται το υδρογόνο και το οξυγόνο (ο οποίος είναι ανάλογος της πυκνότητας ρεύματος) μπορεί να είναι μικρότερος του ρυθμού με τον οποίο τα αέρια διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα να αναμιγνύονται το ένα με το άλλο. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει επικίνδυνες συνθήκες στο εσωτερικό του ηλεκτρολύτη. Τα όρια ανάφλεξης του υδρογόνου αναμεμιγμένο με οξυγόνο είναι μεταξύ 4.6% και 93.9%, αλλά η αυτόματη απενεργοποίηση της συσκευής ενεργοποιείται σε πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Ο ρυθμός διείσδυσης του υδρογόνου μέσα από Nafion 117 στους 80 °C σε ένα τυπικό ηλεκτρολύτη PEM είναι λιγότερο από $1.25 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{cm}^2\text{s}$ υπό ατμοσφαιρική πίεση, που αντιστοιχεί σε πυκνότητα ρεύματος $0.002 \text{ A}/\text{cm}^2$. Αυτή η τιμή είναι μάλλον αμελητέα συγκρινόμενη με την τυπική πυκνότητα ρεύματος ενός ηλεκτρολύτη PEM σε μέγιστη ισχύ, $1 \text{ A}/\text{cm}^2$. Παρόλα αυτά, ο ρυθμός διαπερατότητας του υδρογόνου αυξάνεται γραμμικά με την πίεση, το οποίο σημαίνει ότι σε πίεση 200 bar οι απώλειες υδρογόνου θα είναι περίπου $0.4 \text{ A}/\text{cm}^2$. Το σχήμα 4.15 δείχνει τη διαπερατότητα του υδρογόνου σε συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Η διαπερατότητα του οξυγόνου είναι κατά λίγο μικρότερη [42].



Σχήμα 4.15

Διαπερατότητα υδρογόνου μέσα από Nafion 117 συναρτήσει της πίεσης και της θερμοκρασίας

Ένα άλλο πρόβλημα που σχετίζεται με την κυμάτωση της ισχύος είναι η θερμική διαχείριση. Ο ηλεκτρολύτης χρειάζεται κάποιο χρόνο για να φτάσει την κανονική θερμοκρασία λειτουργίας, αλλά εξαιτίας της διακοπτόμενης λειτουργίας, μπορεί να λειτουργεί σε θερμοκρασίες κατώτερες της ονομαστικής, με αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοση.

Τέλος, στην παραπομπή [43] αναφέρεται ότι αν οι αλλαγές της ισχύος είναι γρηγορότερες από το ρυθμό επεξεργασίας των αερίων, η πίεση δε μπορεί να ελεγχθεί, δημιουργώντας προβλήματα ασφαλείας. Επομένως, προτείνεται η αυξομείωση της ισχύος του ηλεκτρολύτη με τη χρήση περιοριστών κλίσης (rate limiters). Για παράδειγμα, ένας τυπικός ηλεκτρολύτης 20 kW μπορεί να αυξήσει την ισχύ του από το 16% έως το 100% της ονομαστικής του τιμής μέσα σε 40 s, δηλαδή με κλίση 500 W/s.

4.3.2 Πίεση υδρογόνου

Ένας ηλεκτρολύτης PEM μπορεί να σχεδιαστεί για να παράγει υδρογόνο υψηλής πίεσης. Αυτό απαιτεί την αντίστοιχη αντοχή της πολυμερούς μεμβράνης και την κατάλληλη επιλογή των υλικών. Οι ηλεκτρολύτες του εμπορίου μπορούν να παράγουν υδρογόνο υπό πίεση 14 bar (200 psi) και πειραματικά μπορούν να φτάσουν έως και 200 bar (3000 psi). Η διαδικασία της συμπίεσης κατά τη διάρκεια της ηλεκτρόλυσης αυξάνει ελαφρά την τάση των κελιών, όπως έχει προβλεφθεί από την εξίσωση του Nernst. Η μόνη απώλεια είναι η διάχυση του υδρογόνου στην πολυμερή μεμβράνη. Το υδρογόνο υψηλής πίεσης είναι απαραίτητο σε εφαρμογές αποθήκευσης σε δεξαμενές υψηλής πίεσης και σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Παρόλα αυτά, απαιτείται ο κατάλληλος έλεγχος, που θα διακόπτει την τροφοδοσία του ηλεκτρολύτη, όταν η πίεση του υδρογόνου φτάσει σε απαγορευτικές τιμές.

4.3.3 Παραγωγή οξυγόνου

Ο ηλεκτρολύτης παράγει στοιχειομετρικές ποσότητες οξυγόνου ως εξής: για κάθε 2 mol υδρογόνου παράγεται 1 mol οξυγόνου. Το παραγόμενο οξυγόνο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, εκτός εάν υπάρχει η ανάγκη αποθήκευσης του οξυγόνου για επόμενη χρήση, όπως στην περίπτωση της κυψέλης καυσίμου. Σε αυτήν την περίπτωση, η αποθήκευση οξυγόνου και μάλιστα σε υψηλή πίεση απαιτεί τη δέουσα προσοχή.

4.3.4 Κατανάλωση νερού

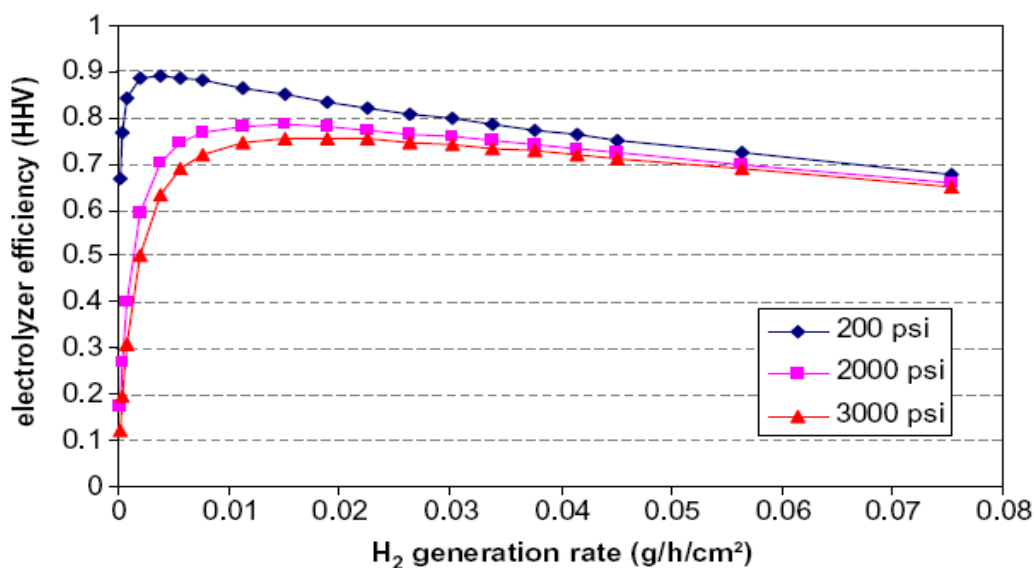
Θεωρητικά, 1 lt νερού μπορεί να παράγει 1.24 Nm³ υδρογόνου. Η πραγματική κατανάλωση νερού είναι κατά 25% αυξημένη, καθώς και τα δύο αέρια που παράγονται είναι ενυδατωμένα και κάποια ποσότητα νερού χάνεται λόγω της διαφυγής του οξυγόνου και λόγω του περιοδικού καθαρισμού του υδρογόνου. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για συστήματα ηλεκτρόλυσης που δουλεύουν σε κλειστό βρόχο με κυψέλες καυσίμου.

4.3.5 Απόδοση

Η απόδοση του ηλεκτρολύτη είναι αντιστρόφως ανάλογη της τάσης του κελιού, η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα ρεύματος, που είναι ανάλογη με το ρυθμό παραγωγής υδρογόνου ανά μονάδα ενεργού επιφάνειας του ηλεκτροδίου. Υψηλότερη τάση έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή υδρογόνου, αλλά με χαμηλότερη απόδοση. Τυπική τιμή τάσης του κελιού είναι τα 2 V, αλλά συνήθως η ονομαστική τιμή είναι μικρότερη (~ 1.6 V), ιδιαίτερα αν η απόδοση είναι σημαντικότερη του κόστους και του μεγέθους του ηλεκτρολύτη.

Μία άλλη αιτία μείωσης της απόδοσης είναι οι απώλειες διάχυσης του υδρογόνου μέσα από την πολυμερή μεμβράνη. Αυτές οι απώλειες είναι αμελητέες για χαμηλές πιέσεις, αλλά μπορεί να επηρεάσουν τη συνολική απόδοση για υψηλές πιέσεις (> 100 bar).

Επίσης, σημαντικές είναι και οι απώλειες ισχύος που οφείλονται στα βοηθητικά συστήματα που περιγράφηκαν στην ενότητα 2.4.3. Οι τυπικοί ηλεκτρολύτες του εμπορίου έχουν κατανάλωση ενέργειας από 4.5 έως 6.0 kWh/Nm³, που αντιστοιχεί σε απόδοση 65 – 80%. Το σχήμα 4.16 δείχνει της καμπύλες απόδοσης συναρτήσει της παραγωγής υδρογόνου για διάφορες πιέσεις σε ένα τυπικό ηλεκτρολύτη PEM [42].



Σχήμα 4.16

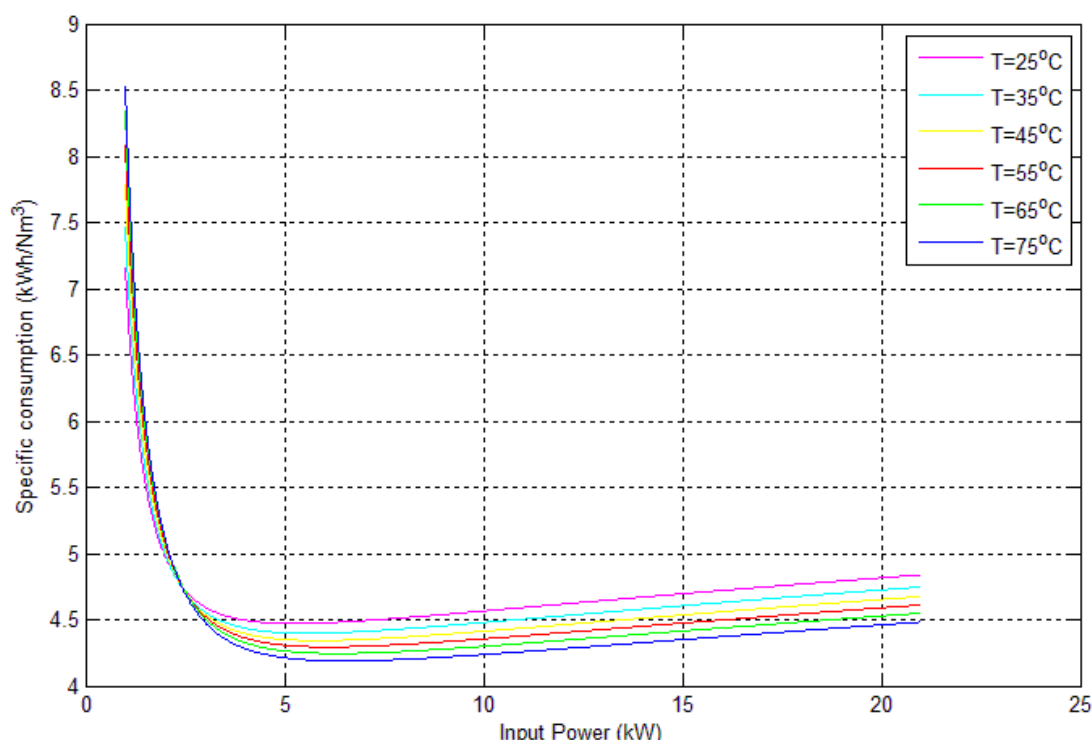
Καμπύλες απόδοσης συστοιχίας ηλεκτρολύτη για διάφορες πιέσεις

Επομένως, η συνολική απόδοση ενός ηλεκτρολύτη μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\eta_{EL} = \frac{1.482 \dot{i} - \dot{i}_{loss}}{V_{cell}} \frac{\eta_{DC}}{1 + \xi} \quad (4.13)$$

Όπου V_{cell} η τάση ενός κελιού, \dot{i} η πυκνότητα ρεύματος λειτουργίας, \dot{i}_{loss} οι απώλειες, η_{DC} η απόδοση του μετατροπέα ΣΡ και ξ ο λόγος της παρασιτικής προς την καθαρή ισχύ που καταναλώνει ο ηλεκτρολύτης.

Στο σχήμα 4.17 φαίνεται η ειδική κατανάλωση ενός ηλεκτρολύτη 26 kW χωρίς βοηθητικά υποσυστήματα συναρτήσει της καθαρής ισχύος εισόδου για διάφορες θερμοκρασίες [4]. Παρατηρούμε πως αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται ελάττωση της ειδικής κατανάλωσης και πως αν ο ηλεκτρολύτης λειτουργούσε κάτω από το 12% της ονομαστικής ισχύος του, τότε η ειδική κατανάλωση ενέργειας θα αυξάνονταν ραγδαία. Ούτως ή άλλως, δεν επιτρέπεται η λειτουργία της μονάδας σε ισχύ μικρότερη από το 20% της ονομαστικής λόγω προβλημάτων στην καθαρότητα του παραγόμενου υδρογόνου.

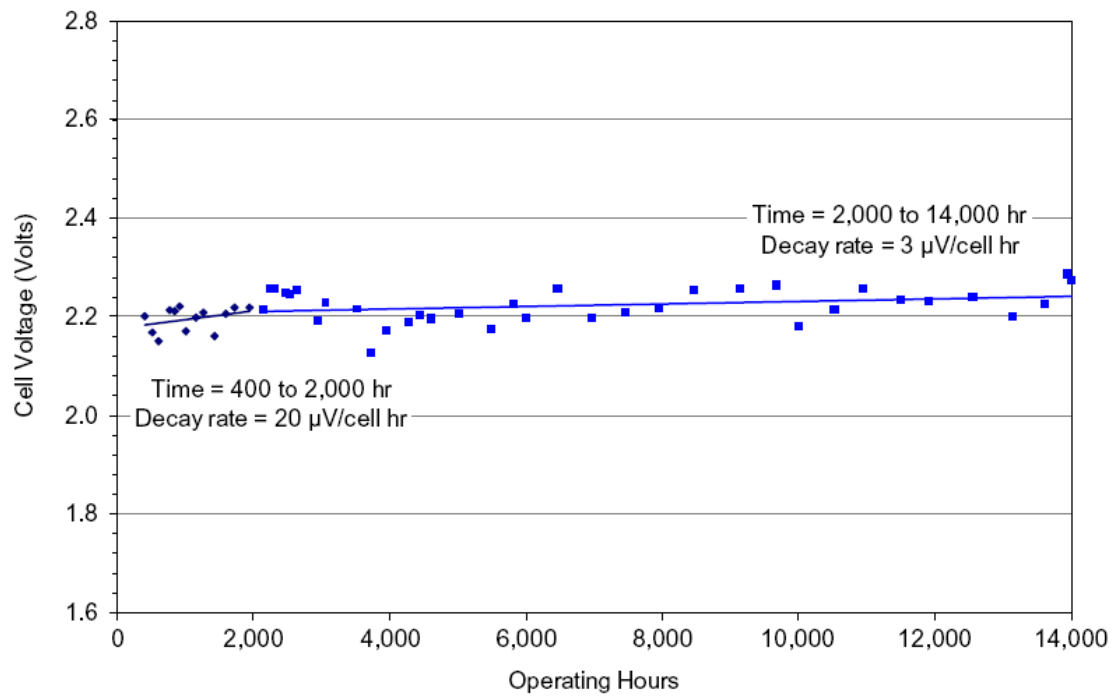


Σχήμα 4.17

Ειδική κατανάλωση ενέργειας ηλεκτρολύτη 26 kW χωρίς βοηθητικά συστήματα συναρτήσει της καθαρής ισχύος εισόδου για διάφορες θερμοκρασίες

4.3.6 Διάρκεια ζωής και υποβάθμιση απόδοσης με το χρόνο (degradation)

Σημαντική παράμετρος για την απόδοση, αλλά και για την τεχνοοικονομική ανάλυση του υβριδικού συστήματος είναι η διάρκεια ζωής ενός ηλεκτρολύτη, καθώς και η υποβάθμιση των λειτουργικών του χαρακτηριστικών με το χρόνο. Η τάση του ηλεκτρολύτη παρουσιάζει μία αύξηση ανάλογα με το χρόνο λειτουργίας του, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.18 [42]. Αυτή η αύξηση είναι απότομη τις πρώτες 2.000 ώρες λειτουργίας, 20 – 50 $\mu\text{V/h}$, αλλά στη συνέχεια ελαττώνεται ($< 3 \mu\text{V/h}$). Οι κύριοι λόγοι αυτής της αύξησης είναι η εξισορρόπηση της περιεκτικότητας του νερού στη μεμβράνη και η οξείδωση του καταλύτη και άλλων μεταλλικών μερών. Η λειτουργία της μονάδας υπό αυξημένη τάση έχει σα συνέπεια τη μείωση της απόδοσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί.



Σχήμα 4.18

Αύξηση της τάσης ενός ηλεκτρολυτικού κελιού συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας

5 Περιγραφή και έλεγχος του υβριδικού συστήματος

5.1 Εισαγωγή

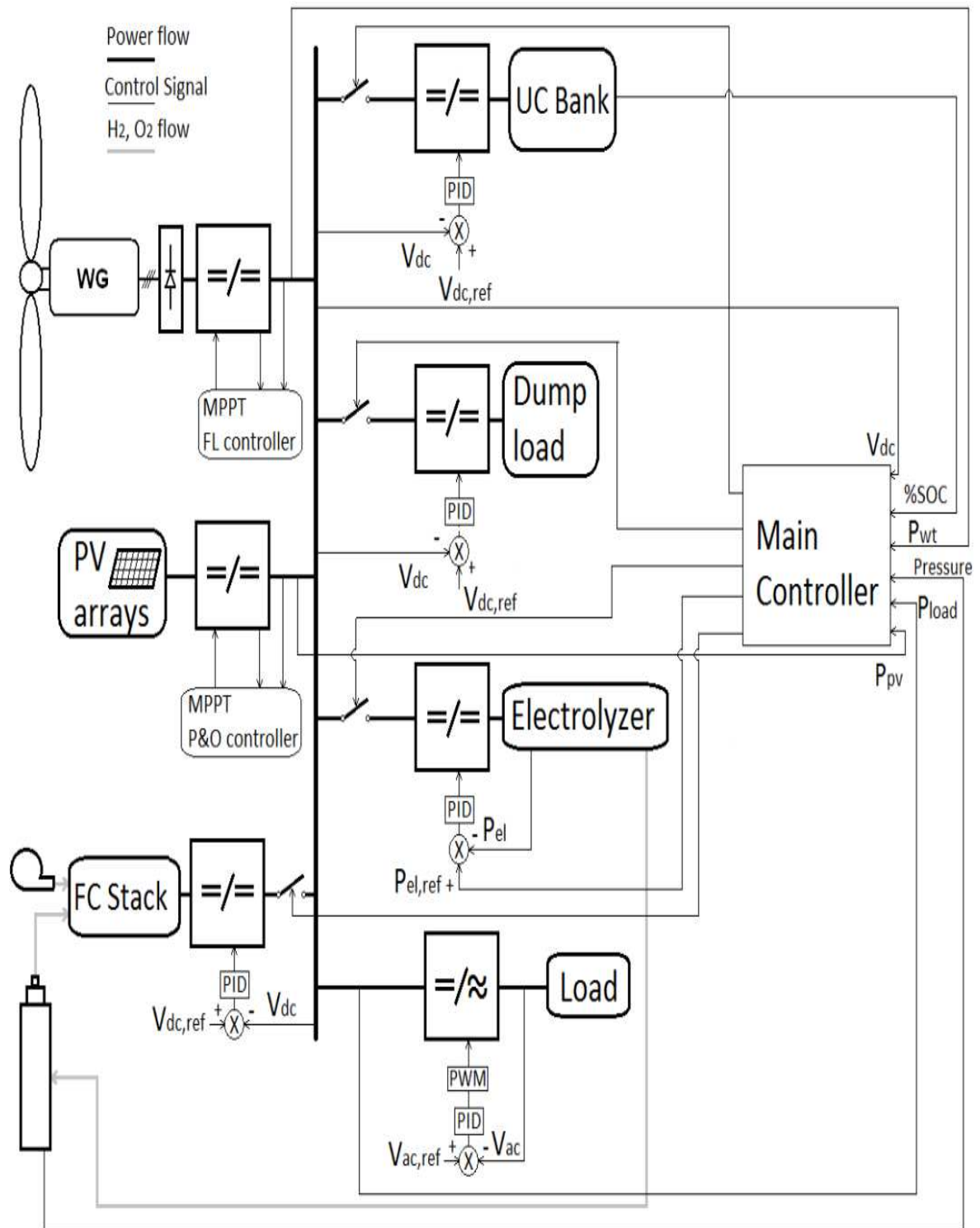
Αυτό το κεφάλαιο πραγματεύεται την υλοποίηση του υβριδικού συστήματος που περιγράφηκε στο πρώτο κεφάλαιο, καθώς και τις τεχνικές ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρυθμη λειτουργία του. Ο στόχος των συστημάτων ελέγχου είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από ΑΠΕ ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες (μέθοδος MPPT), η διαχείριση των διάφορων ενεργειακών πηγών και η ενσωμάτωση τους σε ένα ενιαίο αυτόνομο υβριδικό σύστημα ενέργειας. Βασικός στόχος του συστήματος είναι η ικανοποίηση των διασυνδεδεμένων φορτίων, αλλά και η σωστή διαχείριση των υποσυστημάτων, η οποία προϋποθέτει τη γνώση των λειτουργικών περιορισμών των συσκευών και την αποφυγή οποιονδήποτε κινδύνων κατά τη χρήση τους. Ακόμη, σημαντικά κριτήριά για την εφαρμογή του ελέγχου αποτελούν η ενεργειακή απόδοση των υποσυστημάτων και η ποιότητα της παραγόμενης ισχύος.

5.2 Περιγραφή του συστήματος

Η διάταξη του προτεινόμενου αυτόνομου υβριδικού συστήματος ενέργειας της παρούσας διπλωματικής εργασίας φαίνεται στο σχήμα 5.1. Η διακίνηση της ισχύος γίνεται μέσω του κοινού ζυγού ΣΡ, του οποίου η τάση κυμαίνεται στα 550 V. Η ανεμογεννήτρια μονίμων μαγνητών – μεταβλητών στροφών έχει ονομαστική ισχύ 20 kW και ονομαστική τάση εξόδου 400 V_{p-p}. Η τάση εξόδου της ανεμογεννήτριας ανορθώνεται μέσω μη ελεγχόμενης τριφασικής γέφυρας. Στη συνέχεια, μέσω ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης ΣΡ ανυψώνεται στα 550 V. Η διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα ελέγχεται με τη μέθοδο ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου. Η λειτουργία του ελεγκτή βασίζεται στην ασαφή λογική (Fuzzy Logic - FL), η οποία θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα. Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια έχει ισχύ 5 kW_p και συνδέεται στο ζυγό ΣΡ μέσω ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης ΣΡ, ο οποίος ελέγχεται μέσω ενός ελεγκτή ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος. Ο αλγόριθμος λειτουργίας του ελεγκτή βασίζεται στη μέθοδο συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων (Perturbation and Observation – P&O), η οποία θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα. Πιο συγκεκριμένα, η φωτοβολταϊκή γεννήτρια αποτελείται από 10 φ/β συστοιχίες, οι οποίες με τη σειρά τους αποτελούνται από 6 εν σειρά φ/β πλαίσια, η μοντελοποίηση των οποίων αναπτύχθηκε στην ενότητα 2.2.1.

Η μέση ισχύ της κυψέλης καυσίμου κυμαίνεται στα 5 kW. Τροφοδοτείται με υδρογόνο μέσω της δεξαμενής αποθήκευσης και διασυνδέεται με το ζυγό μέσω ενός μετατροπέα ανύψωσης ΣΡ, ο οποίος δουλεύει σε λογική σταθεροποίησης της τάσης του ζυγού. Ο βασικός ελεγκτής (main controller) ελέγχει τη σύνδεση και την αποσύνδεση της κυψέλης σε περιπτώσεις ελλείμματος και περίσσειας ισχύος αντίστοιχα. Παρόλα αυτά, ο αλγόριθμος ελέγχου του συστήματος περιορίζει τη συνεχή λειτουργία on/off, δίνοντας προτεραιότητα, σε κάποιο βαθμό, στη συστοιχία υπερπυκνωτών. Η κυψέλη καυσίμου τίθεται σε λειτουργία μόνο όταν το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών πέσει χαμηλότερα ενός ορίου. Έτσι, η κυψέλη

καυσίμου δεν τροφοδοτεί μεταβατικά φορτία, των οποίων η ισχύς καλύπτεται από τους υπερπυκνωτές.



Σχήμα 5.1

Σχηματικό διάγραμμα υβριδικού συστήματος ενέργειας

Η μέγιστη ισχύς λειτουργίας του ηλεκτρολύτη είναι 5 kW. Η σύνδεση του με το ζυγό ΣΡ γίνεται μέσω ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης ΣΡ, ο οποίος τον τροφοδοτεί με διάφορα επίπεδα σταθερής ισχύος, ανάλογα με την περίσσεια ισχύος. Η μετάβαση από το ένα επίπεδο στο άλλο γίνεται με τη χρήση περιοριστών κλίσης (rate limiters) για να αποφευχθούν οι κίνδυνοι που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.3. Το υδρογόνο που παράγεται από τον ηλεκτρολύτη αποθηκεύεται στη δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου, δημιουργώντας κλειστό βρόχο λειτουργίας με την κυψέλη καυσίμου. Κατάλληλος ελεγκτής ελέγχει την πίεση στη δεξαμενή, αποσυνδέοντας τη μονάδα ηλεκτρόλυσης, όταν αυτή ξεπεράσει το επιτρεπτό όριο.

Η συστοιχία υπερπυκνωτών αποτελείται από 4 παράλληλα συνδεδεμένους υπερπυκνωτές, των οποίων τα χαρακτηριστικά περιγράφονται στον πίνακα 2.2. Διασυνδέονται στο ζυγό ΣΡ μέσω ενός αμφίδρομου μετατροπέα ΣΡ, εξασφαλίζοντας έτσι την αμφίδρομη ροή της ισχύος στις διαδικασίες φόρτισης – εκφόρτισης.

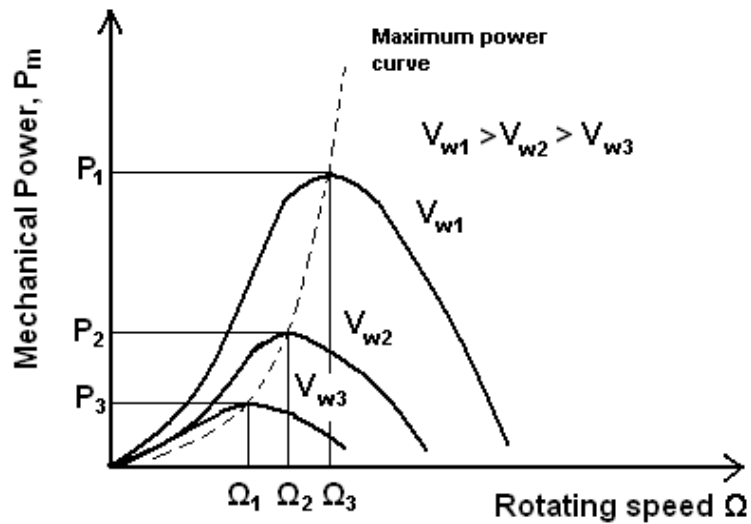
Το ελεγχόμενο φορτίο χρησιμοποιείται για την κατανάλωση της ισχύος, όταν αυτή δε μπορεί να απορροφηθεί από τις υπόλοιπες συνιστώσες του συστήματος. Είναι ωμικού τύπου και συνδεσμολογία του με το ζυγό έχει αναλυθεί στην ενότητα 2.6. Ο έλεγχος του βασίζεται στη λογική της σταθεροποίησης της τάσης του ζυγού. Το φορτίο συνδέεται με το ζυγό μέσω ενός αντιστροφέα (ενότητα 2.8.4), ο έλεγχος του οποίου βασίζεται στη σταθεροποίηση της τάσης του φορτίου.

Οι ελεγκτές του συστήματος είναι ελεγκτές τριών όρων (ελεγκτές PID) και ο έλεγχος των διακοπών γίνεται με την τεχνική PWM. Η λειτουργία του βασικού ελεγκτή θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα, η οποία θα αφορά το διαχειριστικό έλεγχο του συστήματος.

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

Η ανεμογεννήτρια (Α/Γ) απορροφά τη μέγιστη δυνατή αιολική ισχύ για δεδομένη ταχύτητα ανέμου όταν το γινόμενο ροπής επί στροφών μεγιστοποιείται. Τα σημεία αυτά διαμορφώνουν μια καμπύλη πάνω στην οποία επιδιώκεται η λειτουργία της Α/Γ για κάθε ταχύτητα ανέμου. Η διαδικασία ελέγχου ονομάζεται Maximum Power Point Tracking, MPPT και στο σχήμα 5.2 φαίνεται η καμπύλη μέγιστης ισχύος πάνω στην οποία οφείλει να λειτουργεί η Α/Γ. Ο έλεγχος πραγματοποιείται από ελεγκτές που ρυθμίζουν τις στροφές της Α/Γ ακολουθώντας συγκεκριμένες τεχνικές.

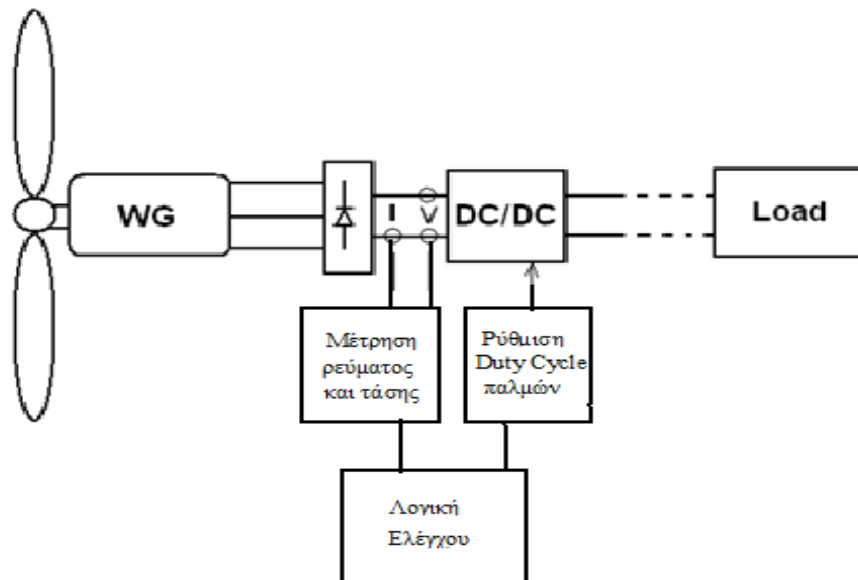
Οι ελεγκτές αυτοί ονομάζονται MPPT ελεγκτές και χρησιμοποιούν διάφορους αλγόριθμους ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος λειτουργίας. Αρχή λειτουργίας των αλγορίθμων αυτών είναι ο έλεγχος των στροφών της Α/Γ με τέτοιο τρόπο ώστε για κάθε ταχύτητα ανέμου το σύστημα να λειτουργεί με μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή $C_p(\max)$, συνήθως τιμής 0.5. Για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, ανάλογα με την λειτουργική κατάσταση που θα βρεθεί το σύστημα, δηλαδή ανάλογα με το αν βρίσκεται σε σημεία αριστερά ή δεξιά της καμπύλης μέγιστης ισχύος του σχήματος 5.2 ο ελεγκτής οφείλει εν τέλει να το οδηγήσει σε σημεία λειτουργίας που βρίσκονται πάνω στην βέλτιστη καμπύλη.



Σχήμα 5.2

Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος στροφών

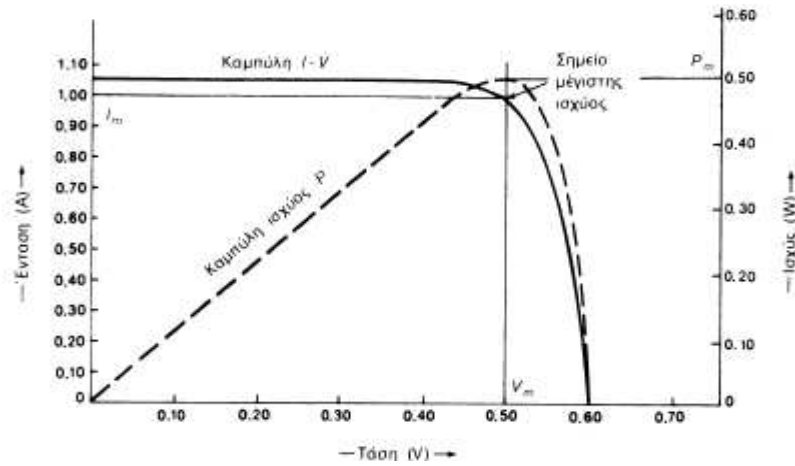
Ο έλεγχος πραγματοποιείται ελέγχοντας το ρεύμα της γεννήτριας και εν τέλει την ηλεκτρική της ροπή. Για το λόγο αυτό συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης, του οποίου την λειτουργία ελέγχει ο ελεγκτής ανεύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Ανάλογα, λοιπόν, με το duty cycle του ημιαγωγικού στοιχείου, λαμβάνεται διαφορετικό ρεύμα στην έξοδο. Η ρύθμιση αυτή στο ρεύμα σημαίνει και ρύθμιση αντίστοιχα της ηλεκτρικής ροπής της γεννήτριας. Έτσι, τελικά επιτυγχάνεται ρύθμιση των στροφών του άξονα της Α/Γ. Στο σχήμα 5.3 φαίνεται το σύστημα ελέγχου των στροφών της Α/Γ.



Σχήμα 5.3

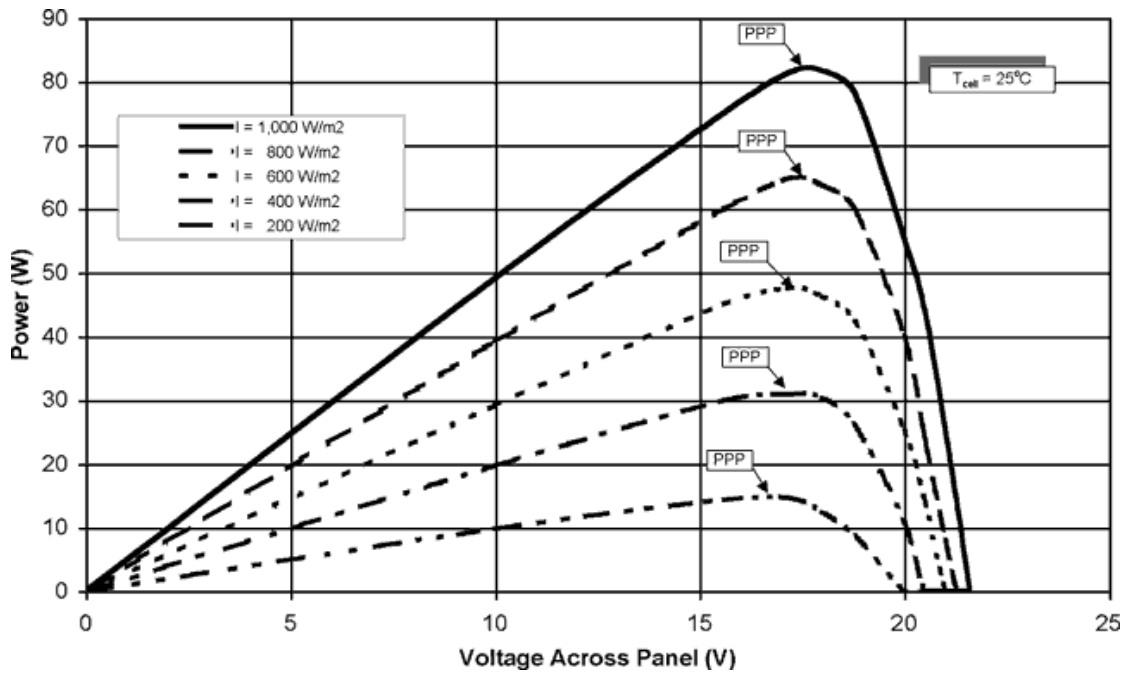
Σύστημα ελέγχου Α/Γ μεταβλητών στροφών για την ανεύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας

Αντίστοιχα με την Α/Γ, ανάλογος έλεγχος πραγματοποιείται και στην φ/β γεννήτρια. Η ένταση που παράγεται από ένα φ/β στοιχείο, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα απ' ότι μεταβάλλεται η τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης – έντασης, το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του (σχήμα 5.4). Ωστόσο, επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο φ/β δεν είναι σταθερή, ομοίως σταθερή δεν είναι και η τάση εξόδου του. Είναι, λοιπόν, επιθυμητό για κάθε στιγμή το φ/β να μην παράγει την τάση και την ένταση, όπως αυτά καθορίζονται από το φορτίο, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης – έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του (σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.4

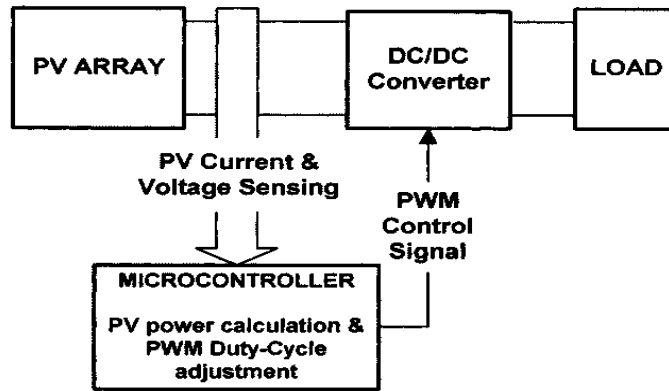
Καμπύλες $I - V$ και $P - V$ φ/β στοιχείου για συνθήκες σταθερής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας



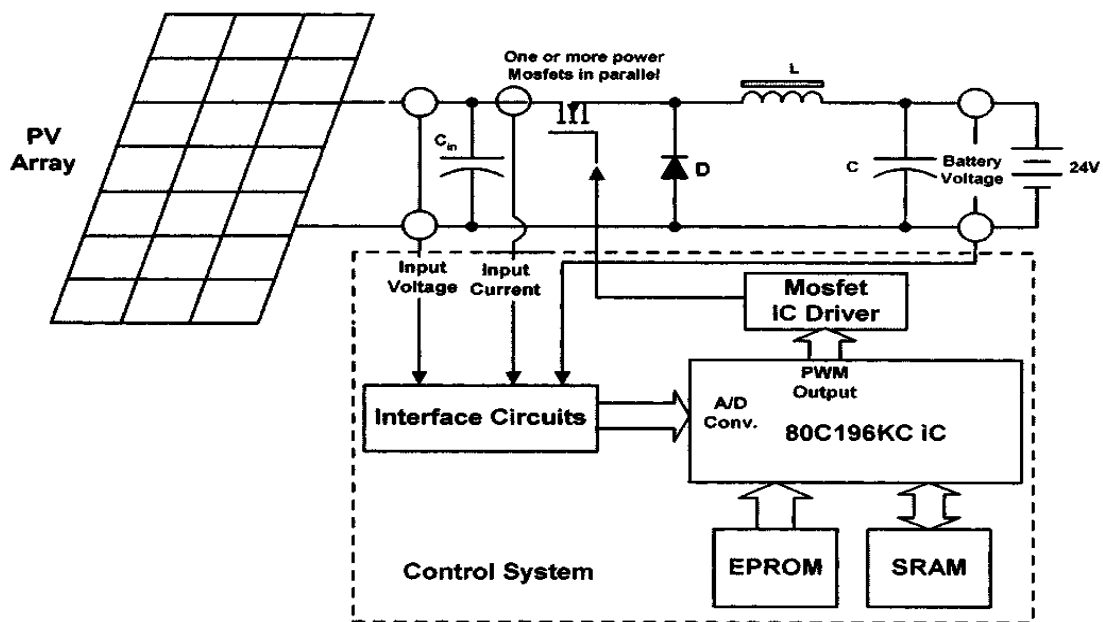
Σχήμα 5.5

Σημεία μέγιστης ισχύος φ/β για διάφορες τιμές ακτινοβολίας

Ομοίως με την Α/Γ, οι ελεγκτές MPPT του φ/β υλοποιούνται με έναν ελεγχόμενο μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Ελέγχοντας το duty cycle του μετατροπέα, ελέγχουμε το ρεύμα εξόδου του φ/β, έτσι ώστε αυτό να ανταποκρίνεται στο σημείο τάσης – ρεύματος μέγιστης ισχύος ανάλογα με τις αλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο σχήμα 5.6 φαίνεται η υλοποίηση του συστήματος ελέγχου MPPT μιας φ/β γεννήτριας [44].



(a)



(b)

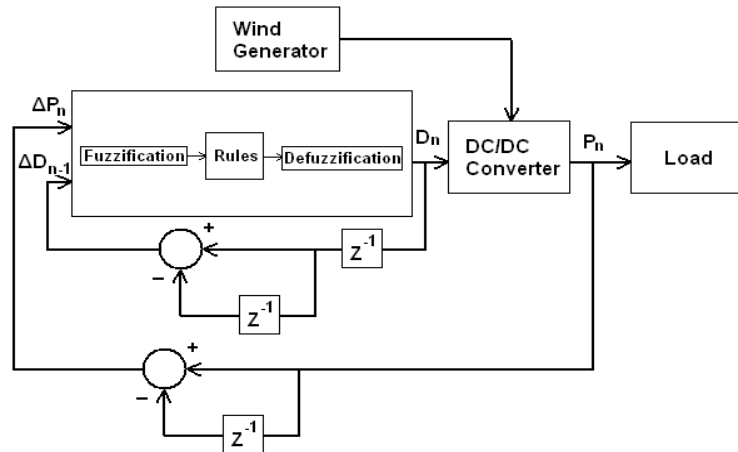
Σχήμα 5.6

(α) Μπλοκ διάγραμμα και (β) αναλυτικό διάγραμμα ελέγχου MPPT φ/β γεννήτριας

Οι ελεγκτές MPPT που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία βασίζονται στις αναφορές [8], [22], [26], [45] και [46].

5.3.1 Έλεγχος MPPT ανεμογεννήτριας με ελεγκτή ασαφούς λογικής

Η φιλοσοφία λειτουργίας του Fuzzy Logic ελεγκτή (σχήμα 5.7) είναι να πραγματοποιεί συνεχείς μεταβολές του Duty Cycle προκειμένου να εντοπίσει το σημείο βέλτιστης λειτουργίας. Χρησιμοποιώντας κατάλληλη λογική ελέγχου, επιδρά στη μεταβολή του λόγου κατάτμησης D .



Σχήμα 5.7

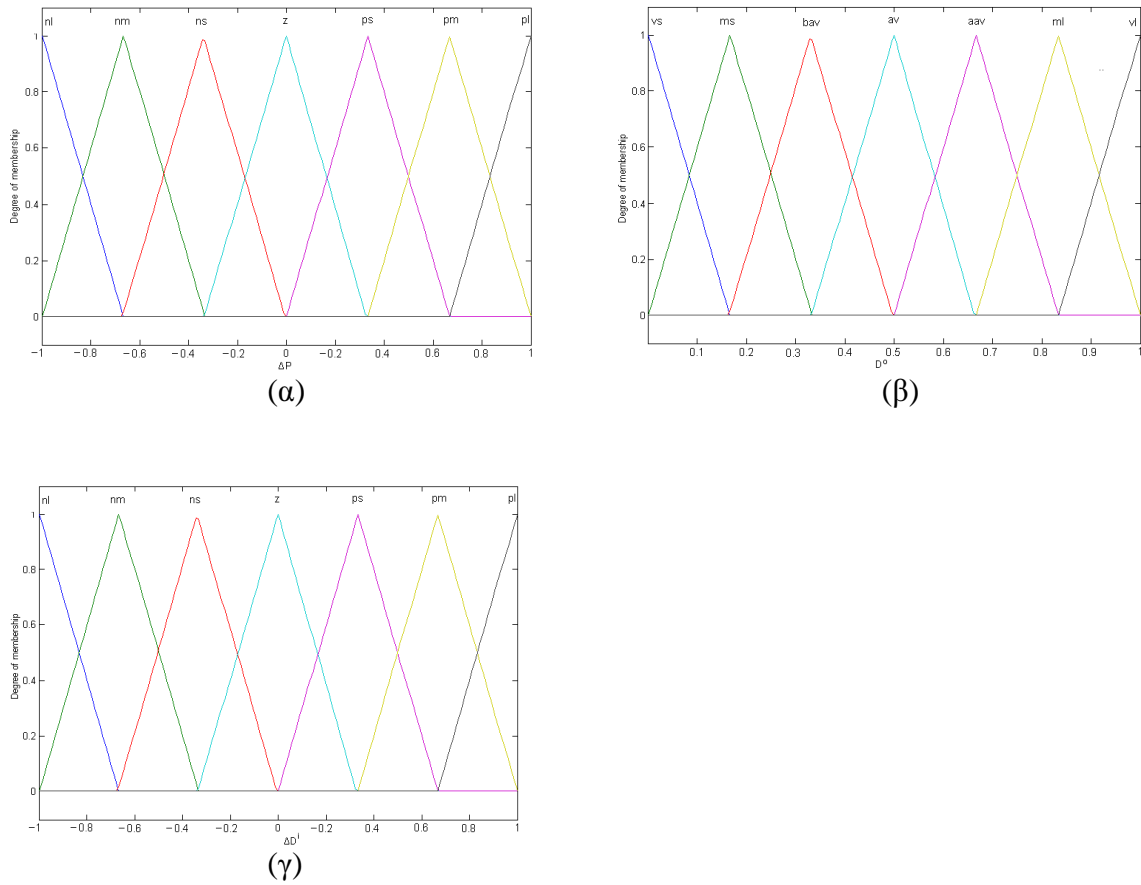
Δομικό διάγραμμα Fuzzy Logic ελεγκτή

Ο αλγόριθμος ανίχνευσης μέγιστου σημείου λειτουργίας περιλαμβάνει τρεις χωριστές διαδικασίες. Αρχικά, πραγματοποιείται η διαδικασία της ασαφοποίησης, δηλαδή του καθορισμού των εισόδων και των εξόδων της συνάρτησης συμμετοχής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.7. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η εξαγωγή των αποτελεσμάτων και τέλος η διαδικασία της αποσαφοποίησης όπου χρησιμοποιώντας συγκεκριμένη μέθοδο λαμβάνεται η τιμή του λόγου κατάτμησης από το σύνολο των αποτελεσμάτων. Κατά τη διαδικασία της ασαφοποίησης, οι συναρτήσεις συμμετοχής μετατρέπουν τις μεταβλητές εισόδου του ελεγκτή σε τιμές συμμετοχής από 0 έως 1. Για τον συγκεκριμένο ελεγκτή, οι συναρτήσεις συμμετοχής επιλέχθηκαν τριγωνικές (σχήμα 5.8) για λόγους απλότητας και λιγότερου υπολογιστικού κόστους. Οι εισοδοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου, ΔP_n , μεταξύ των συμβάντων n και $n-1$ αλλά και οι μεταβολές του λόγου κατάτμησης, ΔD_{n-1} μεταξύ των συμβάντων $n-1$ και $n-2$ (εξισώσεις 5.1, 5.2).

$$\Delta P_n = P_n - P_{n-1} \quad (5.1)$$

$$\Delta D_n^i = D_{n-1}^0 - D_{n-2}^0 \quad (5.2)$$

Κατά την διαδικασία εξαγωγής των αποτελεσμάτων, ο Fuzzy ελεγκτής πρέπει να αποφασίζει κάθε φορά τον καλύτερο τρόπο ελέγχου του φυσικού συστήματος. Η απόφαση παίρνεται με την ασαφή διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων. Οι γνώσεις που απαιτούνται βρίσκονται στη βάση ασαφών κανόνων από τους if-then κανόνες που έχουν οριστεί. Στο πίνακα 5.1 συνοψίζονται οι κανόνες στους οποίους υπακούει η ασαφής λογική ελέγχου.



Σχήμα 5.8

(α) συνάρτηση συμμετοχής ΔP , (β) συνάρτηση συμμετοχής ΔD^i , (γ) συνάρτηση συμμετοχής

$\Delta D_n^i / \Delta P_n$	nl	nm	ns	z	ps	pm	pl
nl	vl	vl	ml	bav	ms	vs	vs
nm	vl	ml	aav	bav	bav	ms	vs
ns	ml	aav	aav	av	bav	bav	vs
z	vs	ms	bav	av	aav	ml	vl
ps	ms	bav	bav	av	aav	aav	ml
pm	vs	ms	bav	aav	aav	ml	vl
pl	vs	vs	ms	aav	ml	vl	vl

Όπου είσοδοι : nl = negative large, nm = negative medium, ps = positive small, ns = negative small, pm = positive medium, pl = positive large, z = zero

Έξοδοι : vs = very small, av = average, ms = medium small, aav = above average ,bav = below average ml = medium large, vl = very large

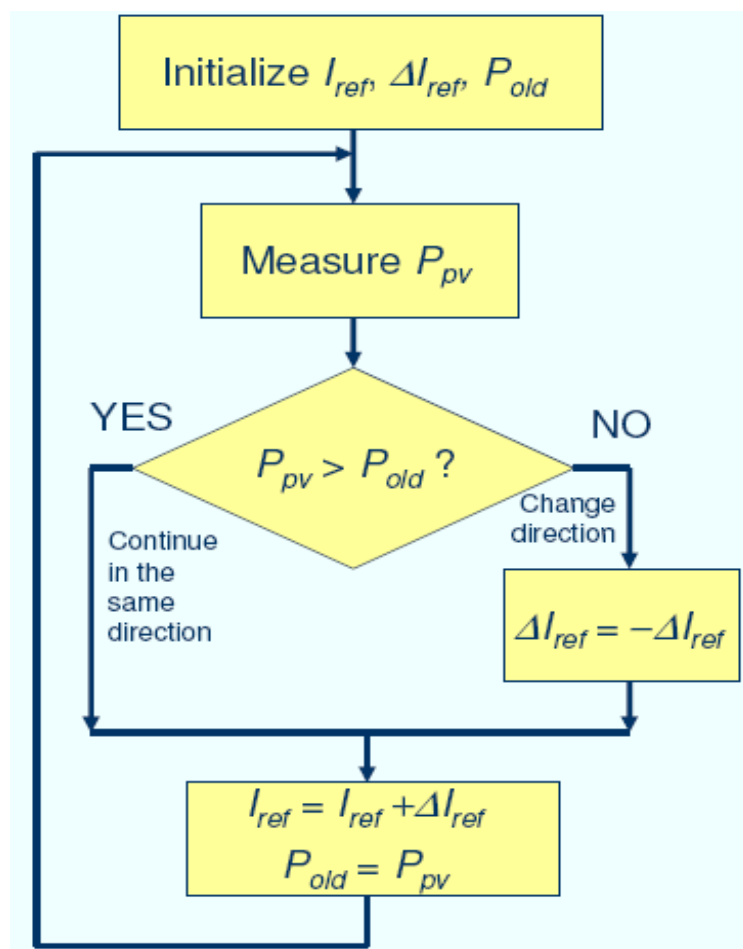
Πίνακας 5.1

Κανόνες ασαφούς λογικής

5.3.2 Έλεγχος MPPT Φ/Β γεννήτριας μέσω μικρών μεταβολών

Ο ελεγκτής μικρών μεταβολών, ή αλλιώς P&O ελεγκτής, πραγματοποιεί συνεχείς αλλαγές και συγκρίσεις της ισχύος εξόδου προς αναζήτηση του σημείου λειτουργίας με τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ. Επομένως, η λειτουργία του είναι παρόμοια με εκείνη του Fuzzy ελεγκτή, χωρίς όμως να χρησιμοποιεί συναρτήσεις συμμετοχής. Αυτό το γεγονός τον κάνει λιγότερο αποδοτικό, αλλά απλουστεύει την υλοποίησή του.

Ο αλγόριθμος ανεύρεσης του σημείου λειτουργίας δίνεται στο σχήμα 5.9. Μετά την αρχικοποίηση, μετρούνται η τάση και το ρεύμα στην είσοδο του μετατροπέα και υπολογίζεται η ισχύς P_{pv} . Η τιμή αυτή συγκρίνεται με την προηγούμενη P_{old} . Στην περίπτωση που η P_{pv} είναι μεγαλύτερη της P_{old} , τότε το πρόσημο της μεταβολής του ρεύματος αναφοράς ΔI_{ref} παραμένει ίδιο και προστίθεται στο I_{ref} . Έχοντας σαν αναφορά τη μεταβολή ΔI_{ref} , ανάλογα μεταβάλλεται και λόγος κατάτμησης ΔD . Στην αντίθετη περίπτωση, όπου η P_{pv} είναι μικρότερη της P_{old} , τότε το ΔI_{ref} αλλάζει πρόσημο και αντίστοιχη μεταβολή υφίσταται και το ΔD . Σε κάθε περίπτωση, εάν η τιμή D λαμβάνει τη μέγιστη ή την ελάχιστη επιτρεπτή τιμή, το πρόσημο του ΔD θα συνεχίζει να συμπληρώνεται.



Σχήμα 5.9

Αλγόριθμος υλοποίησης ελεγκτή P&O

Η εξίσωση 5.3 αποτελεί τον κανόνα μεταβολής του D , όπου το D_t και το D_{t-1} είναι οι τιμές του λόγου κατάτμησης για τις επαναλήψεις t και $t-1$, αντίστοιχα (όπου ισχύει $0 < D_t < 1$). Το $\Delta P_{t-1}/\Delta D_{t-1}$ είναι η κλίση της ισχύος εξόδου στην επανάληψη $t-1$ και C_1 η σταθερά που αντιπροσωπεύει το βήμα αλλαγής.

$$D_t = D_{t-1} + C_1 \frac{\Delta P_{t-1}}{\Delta D_{t-1}} \quad (5.3)$$

Η γενική φιλοσοφία του P&O ελεγκτή είναι ότι για να επιτύχουμε το σημείο μέγιστης ισχύος θα πρέπει να μεταβληθεί (αύξηση ή μείωση) το Duty Cycle προς μία κατεύθυνση μέχρι η ενεργός ισχύς να μειωθεί και η κατεύθυνση αντιστραφεί. Οι αρχικοποιήσεις των παραμέτρων, όπως το βήμα αλλαγής και η περίοδος εκτέλεσης του αλγορίθμου παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο για τη σωστή λειτουργία του ελέγχου. Ο ελεγκτής μπορεί να οδηγηθεί σε υποβέλτιστη λειτουργία ή και αποπροσανατολισμό λόγω έντονων μεταβολών της ισχύος ή λόγω χρονικών καθυστερήσεων του συστήματος, ιδιαίτερα στην περίπτωση των Α/Γ (χρονικές καθυστερήσεις μεταξύ ηλεκτρικού και μηχανικού μέρους). Παρόλα αυτά, η χρήση του ενδείκνυται στα φ/β συστήματα, όπου δεν έχουμε μεγάλη διακύμανση της παραγόμενης ισχύος λόγω της ομοιόμορφης κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας και οι χρονικές καθυστερήσεις θεωρούνται αμελητέες.

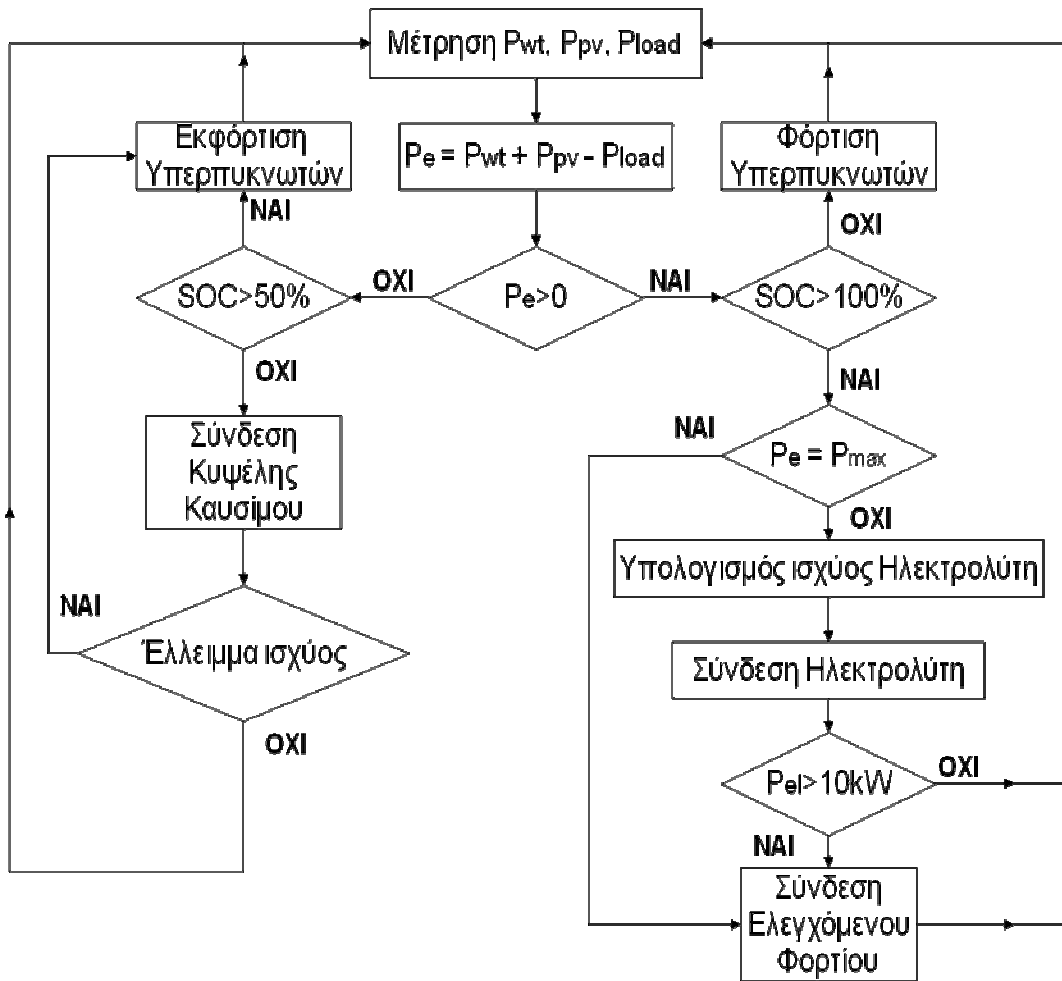
5.4 Διαχειριστικός έλεγχος του συστήματος

Κύριος σκοπός του διαχειριστικού συστήματος ελέγχου είναι η αδιάλειπτη παροχή ισχύος στο φορτίο σε αυτόνομη λειτουργία. Η απόδοση του αλγορίθμου ελέγχου θα αξιολογηθεί με τη μελέτη του συστήματος σε συγκεκριμένες περιόδους λειτουργίας, π.χ. 24ωρο. Οι βασικοί στόχοι των ελεγκτών του διαχειριστικού συστήματος είναι οι εξής:

1. Η ζήτηση ισχύος των διασυνδεδεμένων φορτίων θα πρέπει πάντα να ικανοποιείται, τουλάχιστον για φορτία τα οποία θεωρούνται συνηθισμένα βάσει της διαστασιολόγησης.
2. Όλες οι συνιστώσες του συστήματος οφείλουν να λειτουργούν, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι λειτουργικοί περιορισμοί που αναπτύχθηκαν στην ενότητα 4.2.
3. Η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια (υδρογόνο, υπερπυκνωτές) που καταναλώνεται θα πρέπει να αποκαθίσταται μετά από ένα κύκλο λειτουργίας, αν αυτό είναι δυνατό.
4. Η υψηλή ποιότητα της παραγόμενης ισχύος είναι απαραίτητη ελλείψει άλλου συστήματος σταθεροποίησης τάσης από το δίκτυο (αυτόνομη λειτουργία).

Ο αλγόριθμος λειτουργίας του διαχειριστικού ελέγχου φαίνεται στο σχήμα 5.10. Ο βασικός ελεγκτής (main controller) μετράει δειγματοληπτικά την ισχύ που παράγεται από τις κύριες ενεργειακές πηγές, δηλαδή την ισχύ της ανεμογεννήτριας P_{wt} και την ισχύ του φ/β P_{pv} , καθώς και την ισχύ του φορτίου P_{load} . Στη συνέχεια, υπολογίζει το έλλειμμα ή την περίσσεια ισχύος ως εξής:

$$P_e = P_{wt} + P_{pv} - P_{load} \quad (5.4)$$



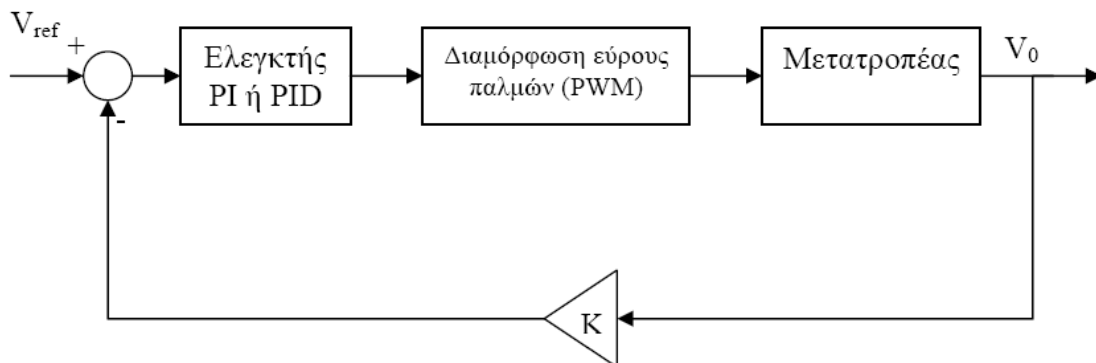
Σχήμα 5.10

Αλγόριθμος διαχειριστικού ελέγχου

Εάν υπάρχει περίσσεια ισχύος, αυτή διοχετεύεται σε πρώτο επίπεδο στον υπερπυκνωτή. Εάν το επίπεδο φόρτισης του υπερπυκνωτή (SOC) είναι μικρότερο του 100%, τότε η ενέργεια διοχετεύεται σε αυτόν μέχρι να φορτιστεί πλήρως (βραχυπρόθεσμη αποθήκευση). Εάν το επίπεδο φόρτισης είναι 100%, τότε συνδέεται ο ηλεκτρολύτης για την παραγωγή υδρογόνου (μακροπρόθεσμη αποθήκευση), εάν, φυσικά, η πίεση της δεξαμενής δεν έχει πάρει τη μέγιστη τιμή της P_{max} (πλήρης δεξαμενή). Η λειτουργία του ηλεκτρολύτη υλοποιείται με βηματικές αυξομειώσεις της ισχύος του και οι μεταβάσεις από το ένα επίπεδο στο άλλο γίνονται με περιοριστή κλίσης (rate limiter) για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.2.2. Πιο συγκεκριμένα, αντί να χρησιμοποιείται ο ηλεκτρολύτης ως φορτίο σταθεροποίησης τάσης (dump load), τροφοδοτείται με βήματα ισχύος των 500 W, από 500 W έως 5000 W, με περιορισμό κλίσης 125 W/s. Έτσι, ο βασικός ελεγκτής υπολογίζει το επίπεδο φόρτισης του ηλεκτρολύτη ανάλογα με την περίσσεια ισχύος και μεταβάλλει κατάλληλα την τιμή αναφοράς του ελεγκτή που ελέγχει την ισχύ παροχής του $P_{el,ref}$. Ο ηλεκτρολύτης θα συνεχίσει 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 ούτε από τον υπερπυκνωτή (πλήρης φόρτιση), ούτε 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.

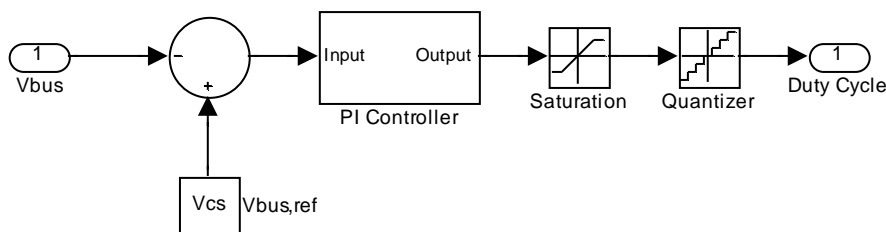
Εάν υπάρχει έλλειμμα ισχύος, τότε αυτό καλύπτεται σε πρώτο επίπεδο από τον υπερπυκνωτή. Η κυψέλη καυσίμου θα συνδεθεί μόνο όταν το επίπεδο φόρτισης του υπερπυκνωτή πέσει κάτω από 50%. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η άσκοπη χρήση της κυψέλης καυσίμου σε μεταβατικά φορτία μικρής διάρκειας, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα υψηλή ενεργειακή απόδοση: η απόδοση του υπερπυκνωτή (~95%) είναι σαφώς υψηλότερη της κυψέλης καυσίμου (~50%). Όταν το επίπεδο φόρτισης του υπερπυκνωτή πέσει κάτω από 50%, τότε συνδέεται η κυψέλη καυσίμου, για να καλύψει το έλλειμμα ισχύος. Το υπόλοιπο 50% της ενέργειας του υπερπυκνωτή χρησιμοποιείται σα βοηθητική πηγή της κυψέλης καυσίμου σε μεταβατικά φορτία ή σε περιπτώσεις που το έλλειμμα ξεπερνά τη μέγιστη ισχύ της κυψέλης.

Η σύνδεση και η αποσύνδεση της κυψέλης καυσίμου, των υπερπυκνωτών, του ηλεκτρολύτη και του ελεγχόμενου φορτίου πραγματοποιούνται με ιδανικούς διακόπτες. Οι μετατροπείς ΣΡ της κυψέλης καυσίμου, των υπερπυκνωτών και του ελεγχόμενου φορτίου λειτουργούν σε λογική σταθεροποίησης τάσης. Στην πράξη, το σφάλμα τάσης τροφοδοτεί ένα PI ελεγκτή, ο οποίος ελέγχει το Duty Cycle του μετατροπέα με τη μέθοδο PWM (σχήμα 5.11, 5.12). Ο αντίστοιχος PI ελεγκτής του μετατροπέα του ηλεκτρολύτη τροφοδοτείται από το σφάλμα ισχύος, που προκύπτει από τις διάφορες τιμές αναφοράς που ορίζει ο βασικός ελεγκτής, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω.



Σχήμα 5.11

Μπλοκ διάγραμμα ελέγχου PWM σε κλειστό βρόχο σταθεροποιητή τάσης



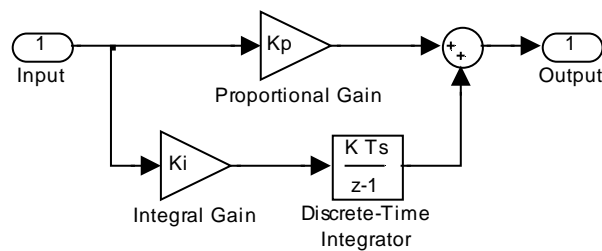
Σχήμα 5.12

Μοντέλο ελεγκτή σταθεροποίησης τάσης

Οι ελεγκτές PI χρησιμοποιούνται ευρέως στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Τα αρχικά PI προέρχονται από τις λέξεις Proportional και Integral, που σημαίνουν αναλογικός και ολοκληρωτικός αντίστοιχα. Ο αναλογικός ελεγκτής πολλαπλασιάζει το σφάλμα με ένα κέρδος K_P και επειδή η έξοδος του είναι ευθέως ανάλογη του παρόντος σφάλματος, λέμε ότι ο P ελεγκτής χειρίζεται το παρόν σφάλμα. Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής, όπως δηλώνει και η ονομασία του, ολοκληρώνει το σήμα της εισόδου του και πολλαπλασιάζει το αποτέλεσμα με μια σταθερά K_I . Επειδή στην έξοδό του ρόλο παίζουν όλες οι παρελθούσες τιμές του σφάλματος, λέμε ότι αυτός ο ελεγκτής χειρίζεται το παρελθόν σφάλμα. Αυξάνοντας την απόλυτη τιμή του κέρδους K_I , το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση μειώνεται αλλά αυξάνεται ο χρόνος απόκρισης σε μια διαταραχή του συστήματος. Η συνάρτηση μεταφοράς του PI ελεγκτή δίνεται στην εξίσωση 5.5. Εφαρμόζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace, η έξοδος του ελεγκτή $y(t)$ στο πεδίο του χρόνου δίνεται από τη σχέση 5.6, αν το $\Delta x(t)$ είναι το σφάλμα εισόδου.

$$H(s) = K_P + \frac{K_I}{s} = \frac{K_P \cdot s + K_I}{s} \quad (5.5)$$

$$y(t) = K_P \cdot \Delta x(t) + K_I \cdot \int_0^t \Delta x(t) dt \quad (5.6)$$



Σχήμα 5.13

Μοντέλο PI ελεγκτή

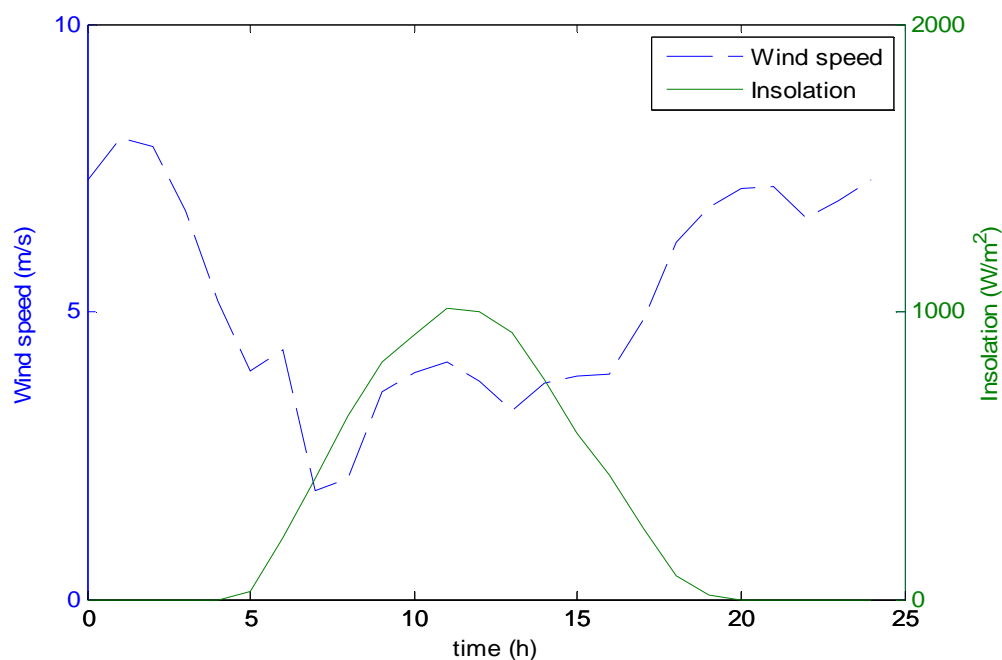
6 Προσομοίωση λειτουργίας του υβριδικού συστήματος

6.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται την προσομοίωση της λειτουργίας του υβριδικού σταθμού ΑΠΕ – υδρογόνου στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB. Η απόκριση του μοντέλου του συστήματος μελετήθηκε τόσο σε φαινόμενα μεγάλης χρονικής διάρκειας όσο και σε μεταβατικές καταστάσεις. Συγκεκριμένα, η λειτουργία του αξιολογήθηκε κατά τη διάρκεια ενός 24ωρου με χρήση πραγματικών δεδομένων για τις χρονοσειρές ανέμου – ηλιακής ακτινοβολίας και την ημερήσια καμπύλη φορτίου. Ακόμη, μελετήθηκε η απόκριση του συστήματος σε μεταβατικά φορτία, όπως εκκινήσεις κινητήρων, και αξιολογήθηκε ο ρόλος των υπερπυκνωτών στο ισοζύγιο παραγωγής – ζήτησης και στην ποιότητα ισχύος του ζυγού ΣΡ.

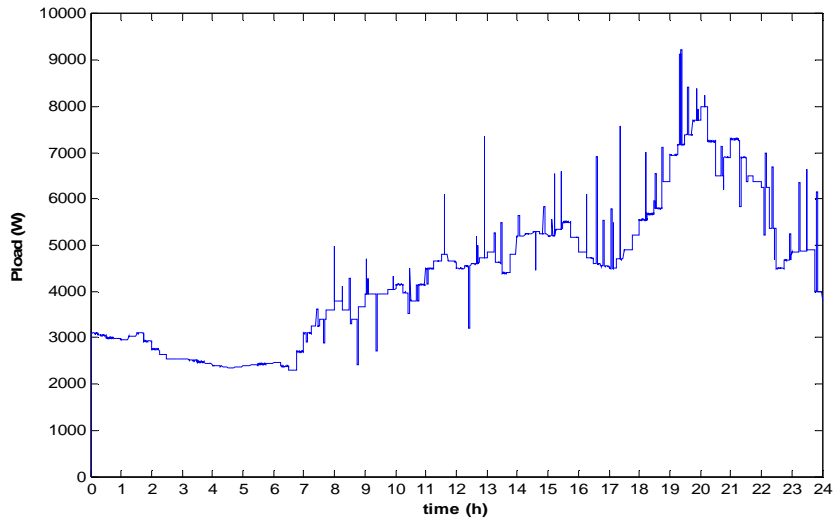
6.2 Προσομοίωση λειτουργίας του συστήματος σε φαινόμενα μεγάλης χρονικής διάρκειας

Η προσομοίωση του συστήματος σε φαινόμενα μεγάλης χρονικής διάρκειας έχει ως στόχο την αξιολόγηση του σε θέματα, όπως η διαχείριση της παραγόμενης και αποθηκευμένης ενέργειας, η ενεργειακή απόδοση και η ασφαλής χρήση των συσκευών. Ως είσοδοι του μοντέλου τέθηκαν οι ημερήσιες χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας και η ημερήσια καμπύλη φορτίου, βάσει των οποίων έγινε η διαστασιολόγηση του συστήματος στο Κεφάλαιο 3. Για την ευκολία του αναγνώστη αυτές οι καμπύλες φαίνονται στα σχήματα 6.1 και 6.2.



Σχήμα 6.1

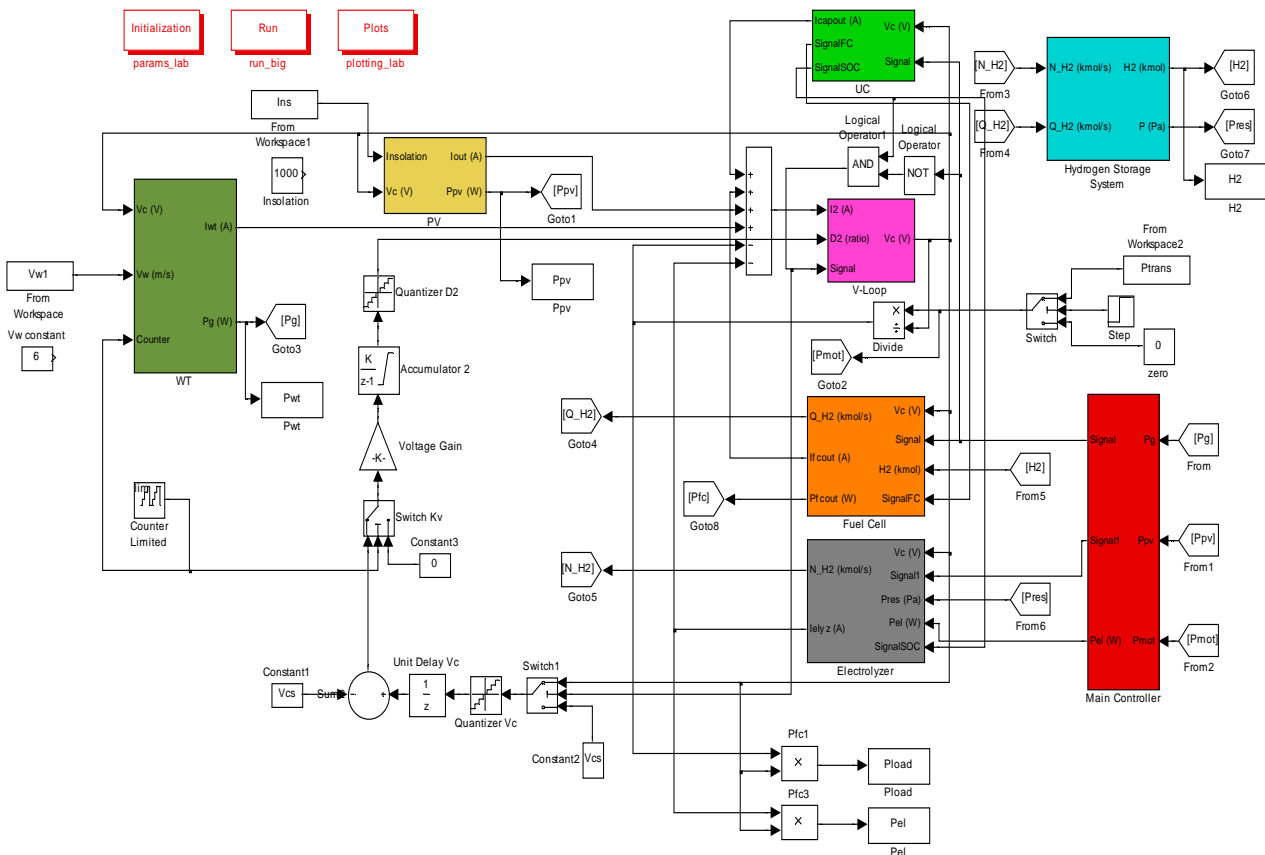
Ημερήσιες χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου – ηλιακής ακτινοβολίας



Σχήμα 6.2

Ημερήσια καμπύλη φορτίου

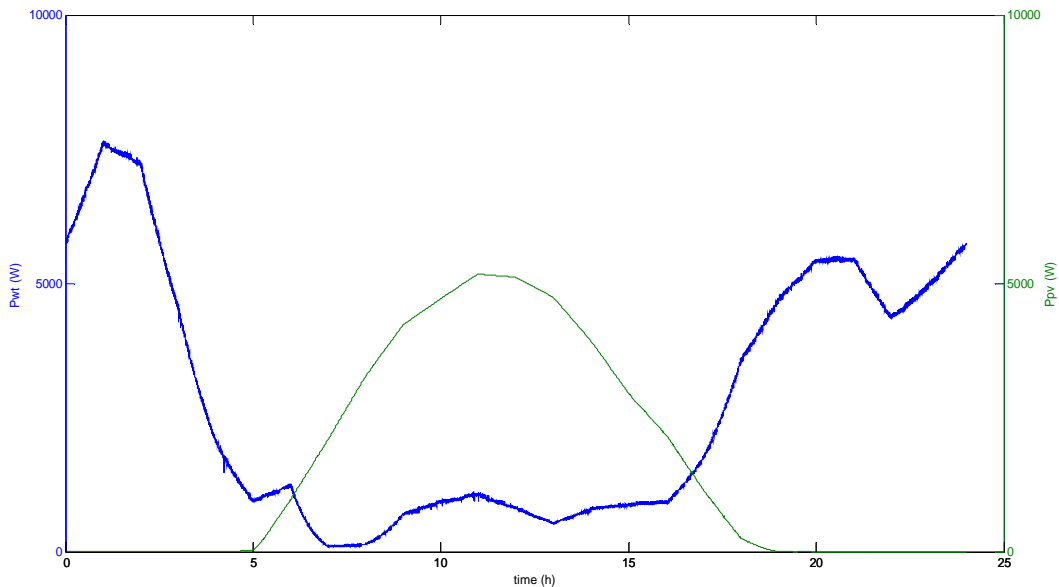
Το μοντέλο που σχεδιάστηκε στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB περιλαμβάνει όλες τις συνιστώσες που περιγράφηκαν στο σχήμα 4.20 και φαίνεται στο σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3

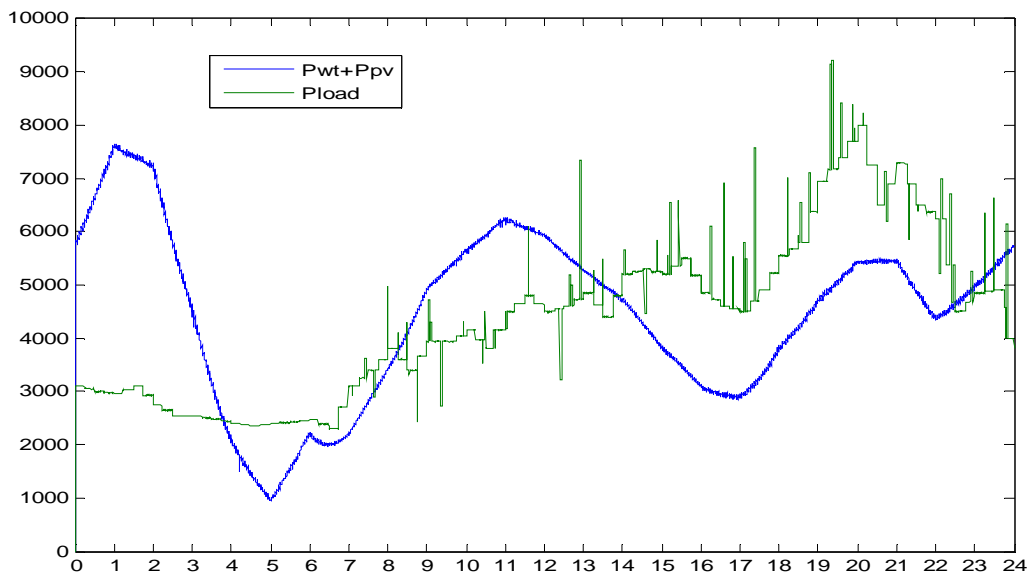
Μοντέλο προσομοίωσης υβριδικού συστήματος

Αξιοποιώντας το μοντέλο, υπολογίστηκε η παραγόμενη ισχύς από τις κύριες ενεργειακές πηγές με βάση τις χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου – ηλιακής ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 6.4 η παραγόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας αναπαρίσταται με τη μπλε καμπύλη και η παραγόμενη ισχύς της φ/β γεννήτριας με την πράσινη. Αντίστοιχα, στο σχήμα 6.5 φαίνεται η ισχύς των κύριων ενεργειακών πηγών με τη μπλε καμπύλη και η ημερήσια καμπύλη φορτίου με την πράσινη.



Σχήμα 6.4

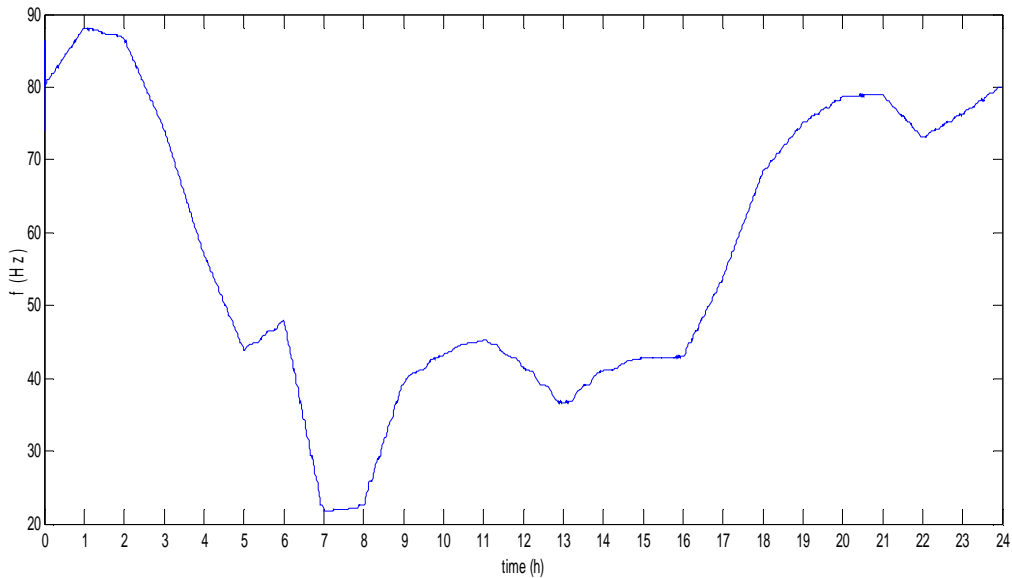
Παραγόμενες ισχύεις Α/Γ (μπλε) και Φ/Β (πράσινο)



Σχήμα 6.5

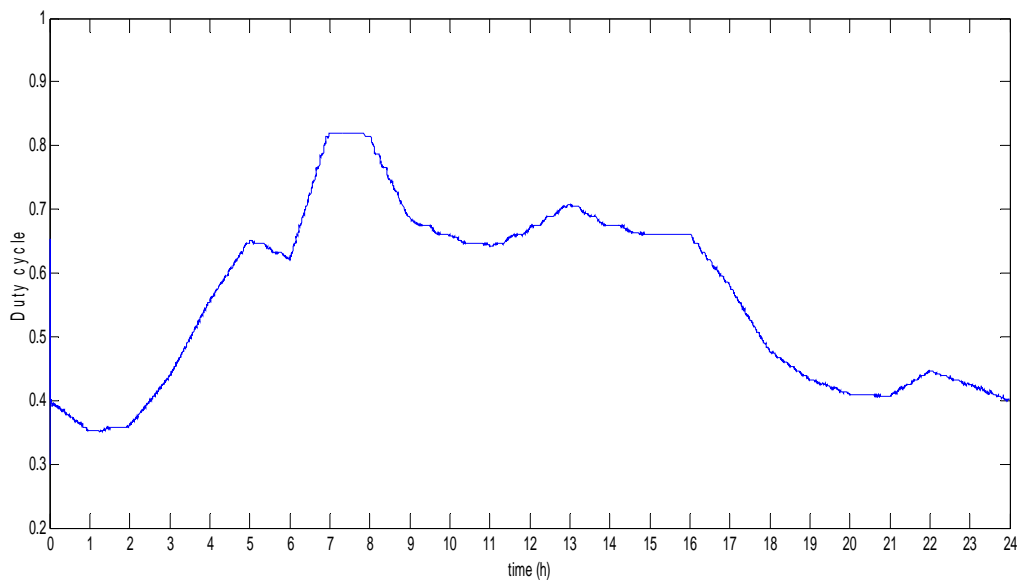
Ισχύς κύριων ενεργειακών πηγών (μπλε) και ημερήσια καμπύλη φορτίου (πράσινο)

Οι ισχύεις της Α/Γ και του Φ/Β μεγιστοποιούνται για τις διάφορες τιμές της ταχύτητας ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας με τη βοήθεια του ελέγχου ΜΡΡΤ, που έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 5. Συγκεκριμένα, το σχήμα 6.6 δείχνει τη συχνότητα περιστροφής του άξονα της Α/Γ, ενώ το σχήμα 6.7 δείχνει πως μεταβάλλεται ο λόγος κατάτμησης του μετατροπέα ΣΡ, έτσι να προσαρμόζει την ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας στις εκάστοτε ταχύτητες ανέμου. Επίσης, στο σχήμα 6.8 φαίνεται ο αεροδυναμικός συντελεστής, ο οποίος μέσω του ελέγχου διατηρείται στη μέγιστη τιμή του, έτσι ώστε η Α/Γ να αποδίδει τη μέγιστη ισχύ.



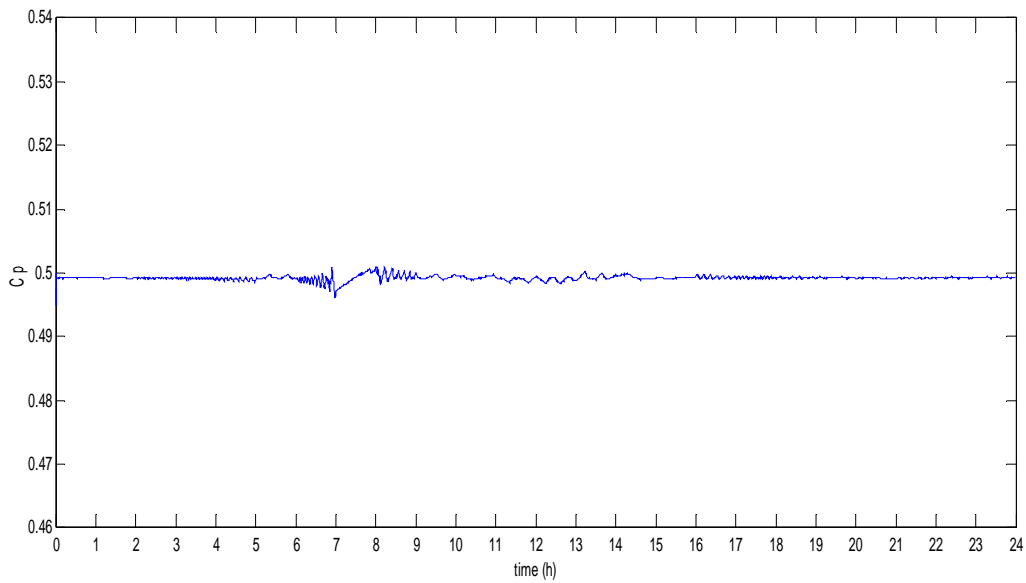
Σχήμα 6.6

Συχνότητα περιστροφής Α/Γ



Σχήμα 6.7

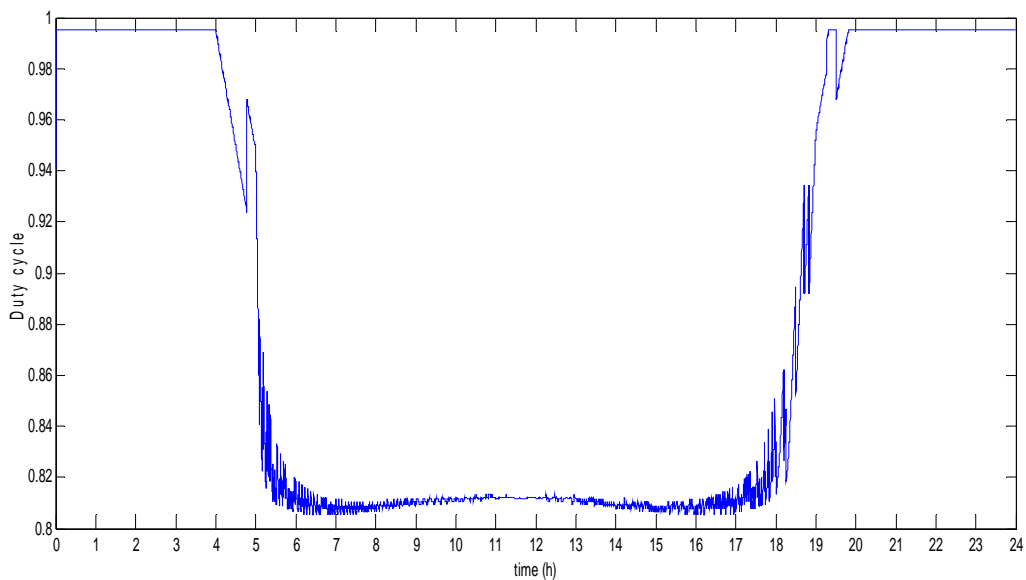
Λόγος κατάτμησης του μετατροπέα ΣΡ της Α/Γ



Σχήμα 6.8

Αεροδυναμικός συντελεστής

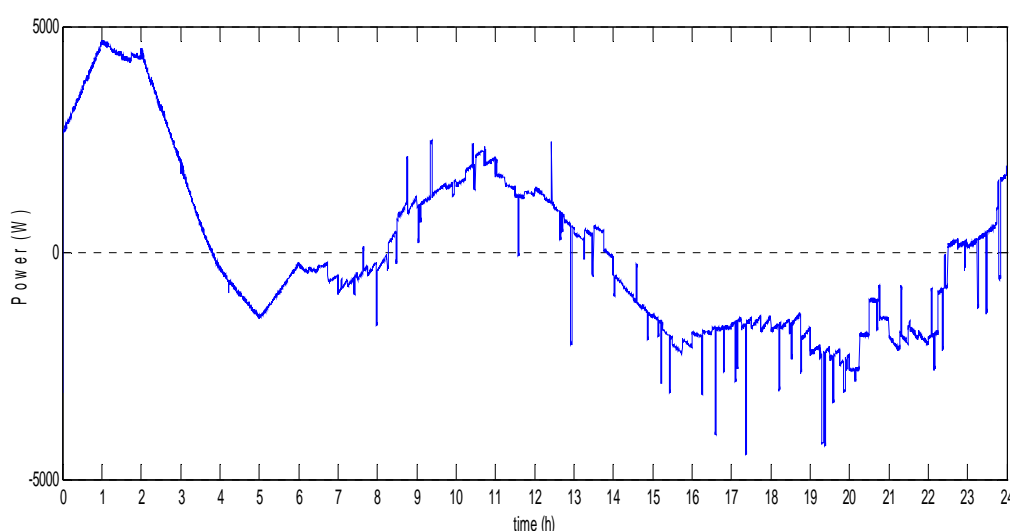
Αντίστοιχα με A/Γ , ο λόγος κατάτμησης του μετατροπέα ΣΡ του Φ/Β μεταβάλλεται για τις διάφορες τιμές της ταχύτητας ανέμου όπως δείχνει το σχήμα 6.9. Όπως παρατηρείται, με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας ο λόγος κατάτμησης μειώνεται, για να επιτευχθεί η λειτουργία του συστήματος στο ζεύγος τάσης – ρεύματος που αποδίδει μέγιστη ισχύ.



Σχήμα 6.9

Λόγος κατάτμησης του μετατροπέα ΣΡ του Φ/Β

Στο σχήμα 6.10 φαίνεται η περίσσεια (θετικές τιμές) και το έλλειμμα (αρνητικές τιμές) ισχύος κατά τη διάρκεια του 24ωρου. Εξετάζοντας το σχήμα, παρατηρείται μια μεγάλη περίσσεια ισχύος μεταξύ 0.00 h και 4.00 h λόγω της παραγωγής της Α/Γ και μια μικρότερη μεταξύ 8.00 h και 14.00 h λόγω της παραγωγής του Φ/Β. Σύμφωνα με τη λειτουργία του συστήματος, αυτή η περίσσεια θα πρέπει να τροφοδοτηθεί στη βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη αποθήκευση. Αντίστοιχα, παρατηρείται ένα μικρό έλλειμμα ισχύος μεταξύ 4.00 h και 8.00 h και ένα μεγαλύτερο μεταξύ 14.00 h και 22.00 h λόγω της απογευματινής – βραδινής αιχμής. Αυτά τα ελλείμματα θα πρέπει να καλυφθούν από την κυψέλη καυσίμου και τους υπερπυκνωτές. Τέλος, παρατηρούνται μεταβατικά φαινόμενα εναλλαγής περίσσειας – ελλείμματος μεταξύ 8.00 h - 9.00 h, 11.00 h - 13.00 h και 22.00 h – 24.00 h. Αυτά τα παροδικά φορτία είναι προτιμότερο να καλυφθούν από τους υπερπυκνωτές, έτσι ώστε να αποφευχθεί η άσκοπη χρήση της κυψέλης καυσίμου.

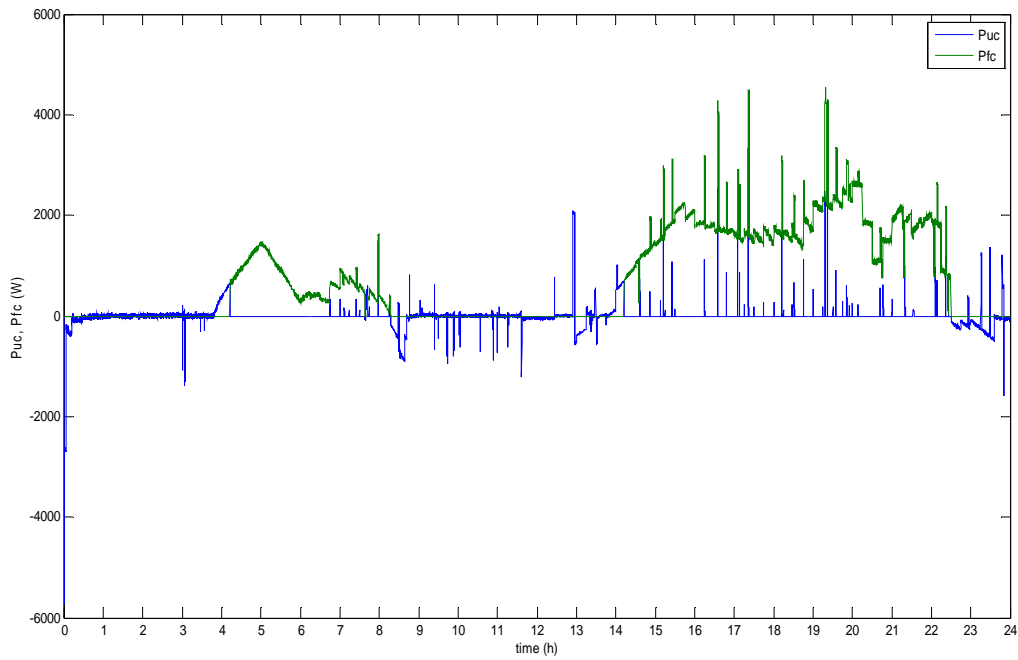


Σχήμα 6.10

Περίσσεια – Έλλειμμα ισχύος

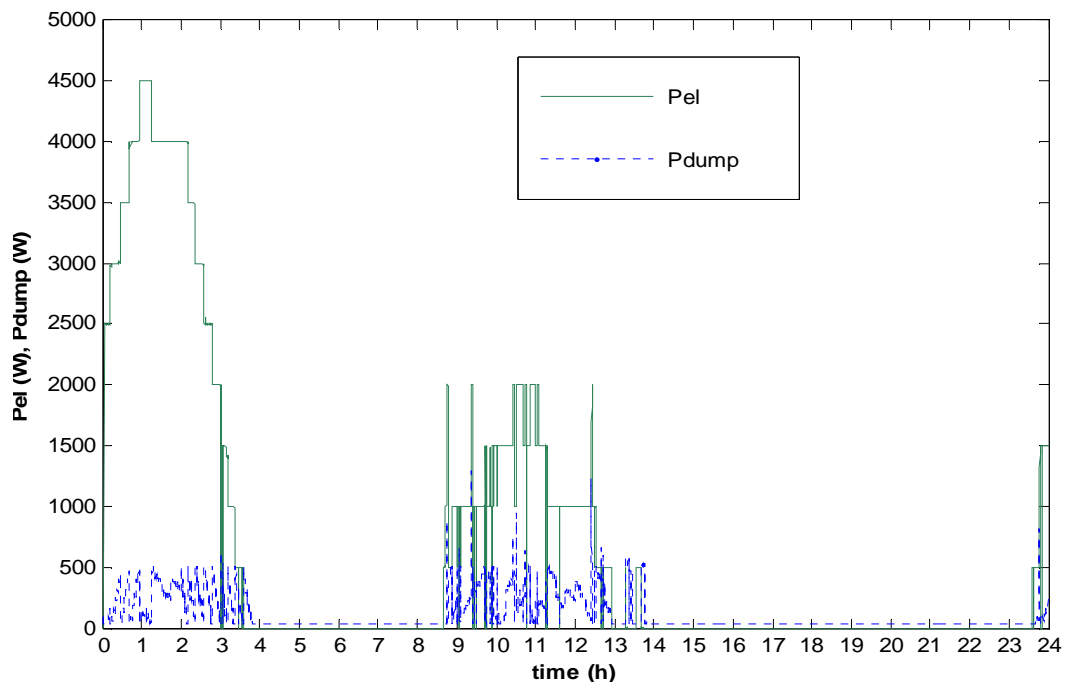
Το σχήμα 6.11 δείχνει τις ισχύεις εξόδου των υπερπυκνωτών (μπλε καμπύλη) και της κυψέλης καυσίμου (πράσινη καμπύλη), οι οποίες καλύπτουν το έλλειμμα ισχύος. Οι αρνητικές τιμές στην ισχύ των υπερπυκνωτών αντιστοιχούν σε φόρτιση, ενώ οι θετικές σε εκφόρτιση. Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί ότι το αρχικό επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών τέθηκε στο 50%. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιείται μόνο 2 φορές τη μέρα (4.00 h - 8.00 h και 14.00 h - 22.00 h) και , επομένως, αποφεύγεται η άσκοπη χρήση της σε παροδικά φορτία με τη βοήθεια του αλγόριθμου διαχείρισης. Αντίστοιχα, οι υπερπυκνωτές τροφοδοτούν τα παροδικά φορτία (8.00 h - 9.00 h, 11.00 h - 13.00 h και 22.00 h – 24.00 h), καθώς το επίπεδο φόρτισης τους είναι πάνω από 50%, και όταν υπάρχει περίσσεια ισχύος, αυτή τροφοδοτείται σε πρώτο επίπεδο στους υπερπυκνωτές μέχρι να φορτιστούν πλήρως. Τέλος, μεταξύ 4.00 h - 8.00 h και 14.00 h - 22.00 h, όπου λειτουργεί η κυψέλη καυσίμου και το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών είναι κάτω από 50%, οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν τις αιχμές που δε μπορεί να καλύψει η κυψέλη καυσίμου λόγω των καθυστερήσεων. Στην επόμενη ενότητα, θα

γίνει περαιτέρω ανάλυση για την κάλυψη των αιχμακών φορτίων από την κυψέλη καυσίμου και τους υπερπυκνωτές.



Σχήμα 6.11

Ισχύεις υπερπυκνωτών (μπλε) και κυψέλης καυσίμου (πράσινο)

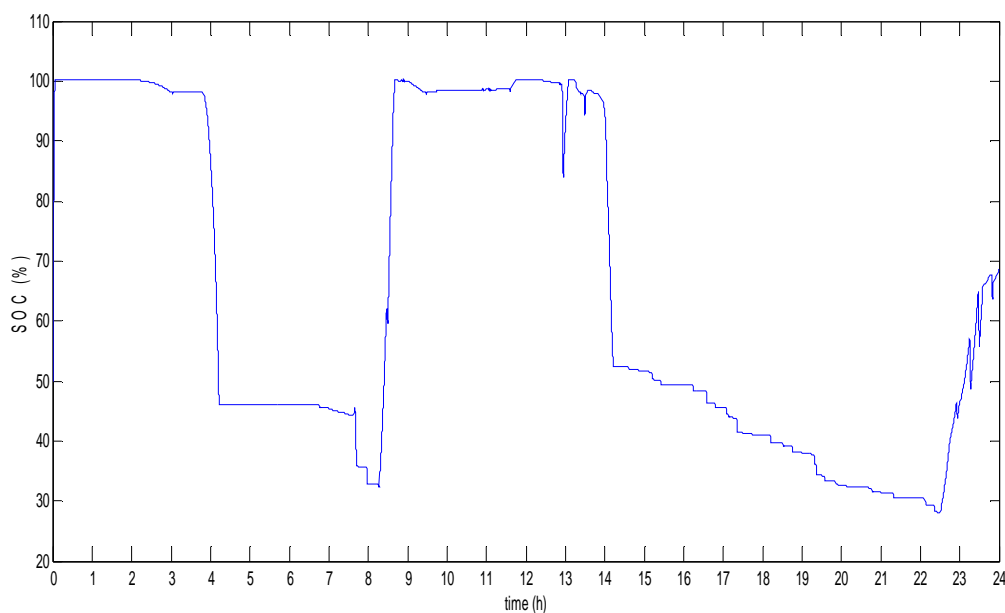


Σχήμα 6.12

Ισχύεις ηλεκτρολύτη (πράσινο) και ελεγχόμενου φορτίου (μπλε)

Το σχήμα 6.12 δείχνει τις ισχύεις του ηλεκτρολύτη (πράσινη καμπύλη) και του ελεγχόμενου φορτίου (μπλε καμπύλη). Σύμφωνα με τον αλγόριθμο διαχείρισης, ο ηλεκτρολύτης συνδέεται όταν υπάρχει περίσσεια ισχύος προς αποθήκευση και όταν οι υπερπυκνωτές είναι φορτισμένοι πλήρως. Όπως φαίνεται από το σχήμα, ο ηλεκτρολύτης τροφοδοτείται με σταθερά επίπεδα ισχύος και η μετάβαση από το ένα επίπεδο στο άλλο γίνεται με περιορισμό κλίσης 125 W/s, όπως έχει ήδη περιγραφεί στην ενότητα 5.2. Με αυτό τον τρόπο, αποφεύγονται προβλήματα υπερπίεσης ή κίνδυνοι ανάμειξης των αερίων (υδρογόνο, οξυγόνο) στο εσωτερικό του ηλεκτρολύτη. Σε αυτήν τη μελέτη, τα επίπεδα ισχύος διαφέρουν κατά 500 W, παρόλα αυτά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε τιμή ανάλογα με την εφαρμογή. Η περίσσεια ισχύος που δε μπορεί να απορροφηθεί από τον ηλεκτρολύτη λόγω του περιορισμού κλίσης καταναλώνεται στο ελεγχόμενο φορτίο για την αποφυγή υπερτάσεων.

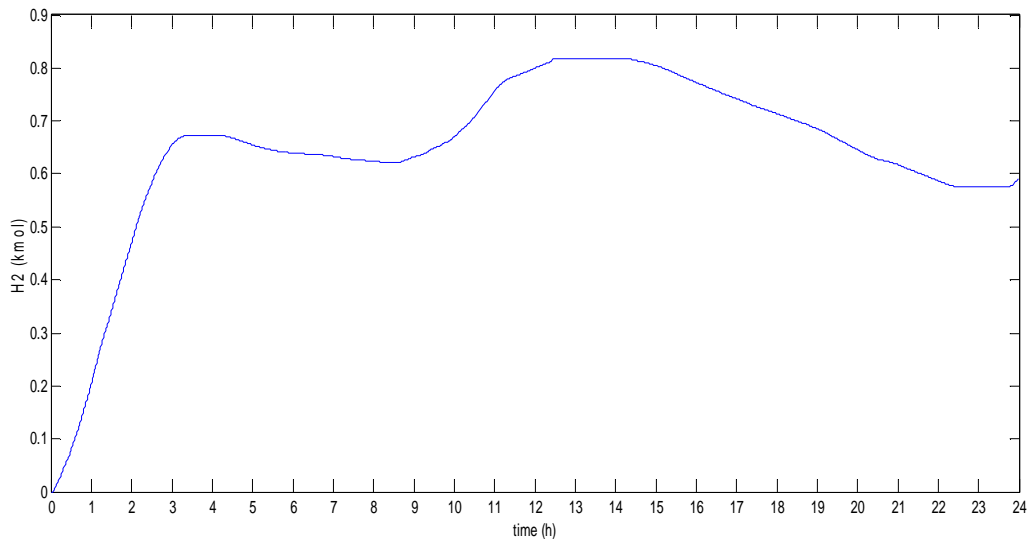
Η αποθηκευμένη ενέργεια του συστήματος φαίνεται στα σχήματα 6.13 και 6.14. Συγκεκριμένα, το σχήμα 6.13 δείχνει το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών. Όπως παρατηρείται, οι υπερπυκνωτές φορτίζονται για ένα μικρό χρονικό διάστημα μέχρι το επίπεδο φόρτισης να γίνει 100%. Όταν παρουσιαστεί το πρώτο έλλειμμα ισχύος, οι υπερπυκνωτές εκφορτίζονται μέχρι το 50% και στη συνέχεια συνδέεται η κυψέλη καυσίμου. Η περαιτέρω μείωση του επιπέδου φόρτισης οφείλεται στην τροφοδότηση των αιχμακίων φορτίων κατά τη διάρκεια λειτουργίας της κυψέλης. Όταν παρουσιαστεί η πρωινή περίσσεια ισχύος, οι υπερπυκνωτές ξαναφορτίζονται μέχρι το 100% και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση παροδικών φορτίων μέχρι τις 14.00 h. Στη συνέχεια, ξανασυνδέεται η κυψέλη καυσίμου και το φαινόμενο επαναλαμβάνεται. Λόγω της μεγάλης διακύμανσης της τάσης του υπερπυκνωτή πρέπει να αποφεύγεται η χρήση του σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης. Στην παρούσα μελέτη, το κατώτερο επίπεδο φόρτισης που παρατηρείται είναι περίπου 30%. Τέλος, το τελικό επίπεδο φόρτισης είναι περίπου 70%, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι υπάρχει περίσσεια αποθηκευμένης ενέργειας στους υπερπυκνωτές στο τέλος του 24ωρου.



Σχήμα 6.13

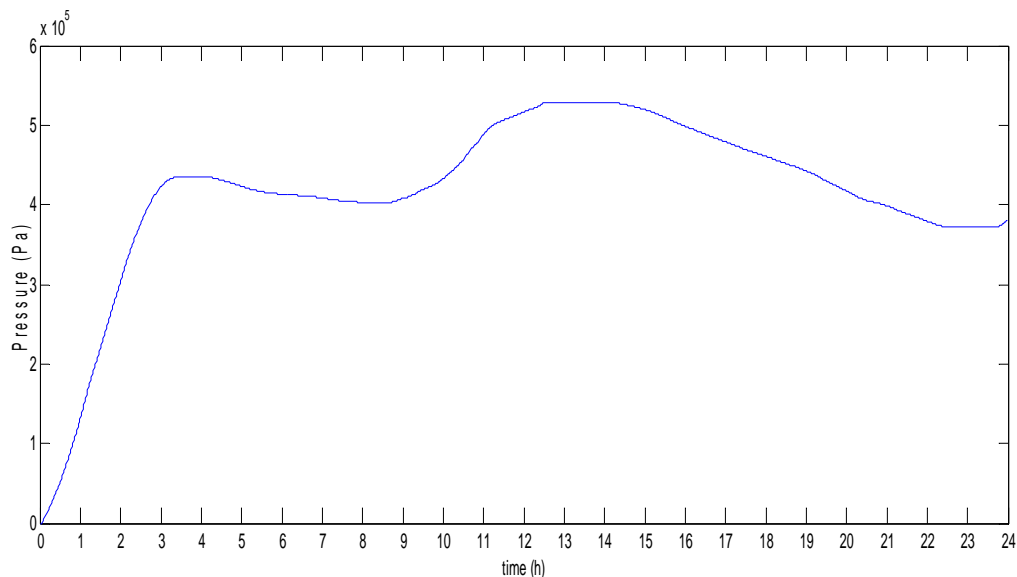
Επίπεδο φόρτισης υπερπυκνωτών

Αντίστοιχα, το σχήμα 6.14 δείχνει την ποσότητα του υδρογόνου που είναι αποθηκευμένη στη δεξαμενή. Όπως παρατηρείται, όταν λειτουργεί ο ηλεκτρολύτης, η ποσότητα του υδρογόνου αυξάνεται με βάση το ρυθμό παραγωγής από το νόμο του Faraday, ενώ όταν λειτουργεί η κυψέλη καυσίμου, το υδρογόνο μειώνεται με βάση το ρυθμό κατανάλωσης, ο οποίος υπολογίζεται από την εξίσωση 4.8. Στο τέλος του 24ωρου παρατηρείται περίσσεια αποθηκευμένης ενέργειας σε υδρογόνο. Τέλος, η πίεση της δεξαμενής μεταβάλλεται ανάλογα με την ποσότητα του υδρογόνου, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.15.



Σχήμα 6.14

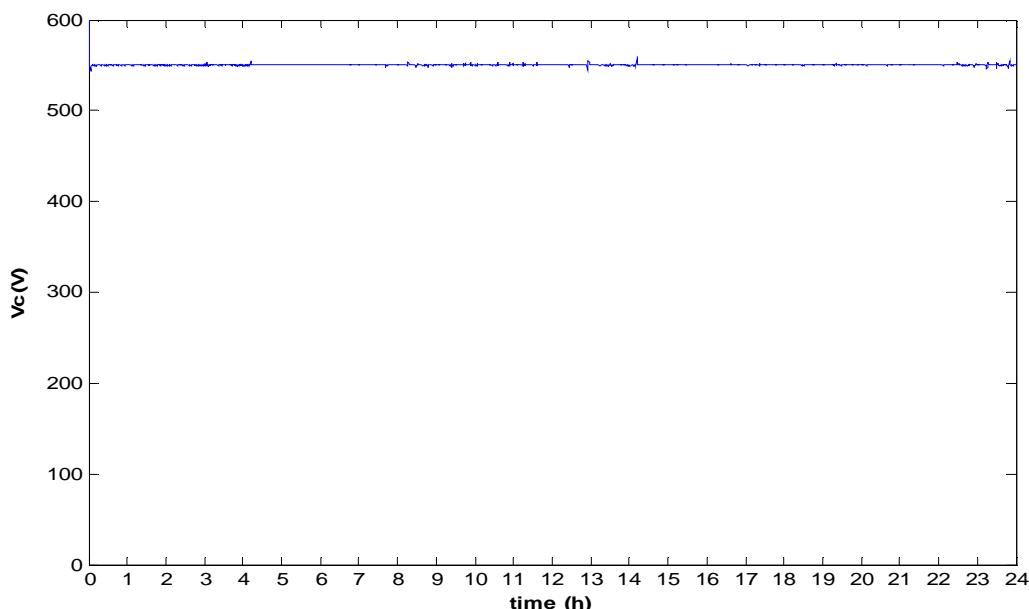
Ποσότητα υδρογόνου στη δεξαμενή



Σχήμα 6.15

Πίεση δεξαμενής

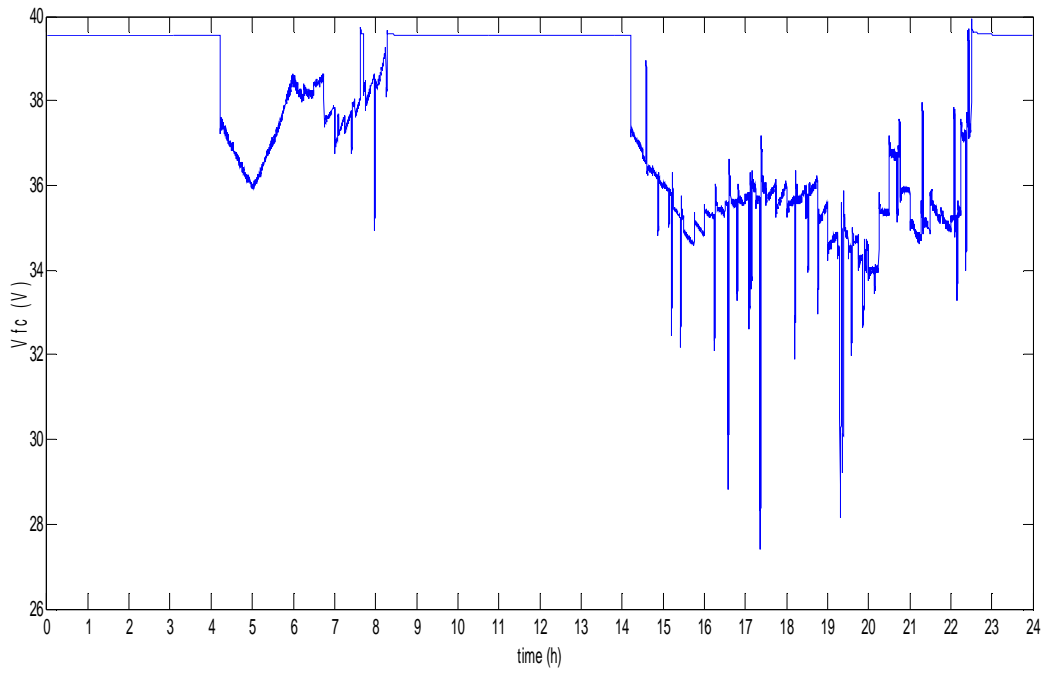
Το σχήμα 6.16 δείχνει την τάση του ζυγού ΣΡ, η οποία παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος. Η σταθερότητα της τάσης του ζυγού ΣΡ επιβεβαιώνει τη σωστή διαχείριση του ισοζυγίου παραγωγής – ζήτησης και αποτελεί ένας σημαντικός παράγοντας για την ποιότητα της ισχύος που τροφοδοτείται στο φορτίο.



Σχήμα 6.16

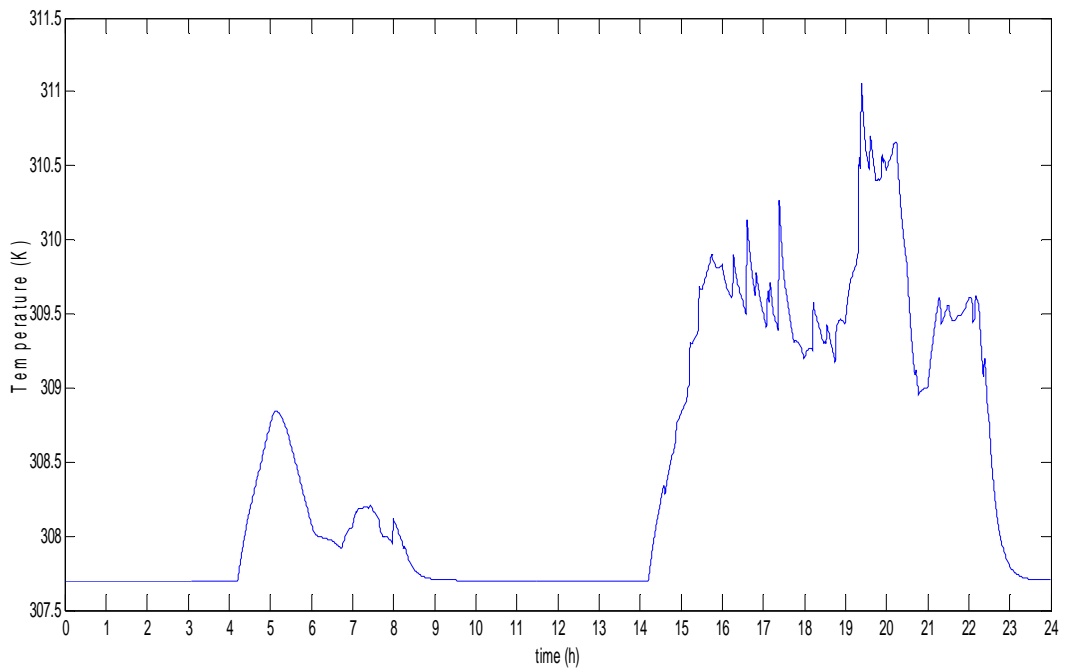
Τάση ζυγού ΣΡ

Εξετάζοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου, στο σχήμα 6.17 παρατίθεται η τάση εξόδου της συστοιχίας και στο σχήμα 6.18 η θερμοκρασία λειτουργίας της. Όπως παρατηρείται, η αύξηση του φορτίου της κυψέλης καυσίμου έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης εξόδου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τάση πέφτει σε χαμηλότερη τιμή από αυτήν της μόνιμης κατάστασης λόγω των καθυστερήσεων. Η λειτουργία της κυψέλης σε χαμηλά επίπεδα τάσης έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης και για αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη των υπερπυκνωτών, έτσι ώστε να μειώσουν τη διακύμανση της τάσης της κυψέλης. Περαιτέρω λεπτομέρειες για τη δυναμική απόκριση του συστήματος θα δοθούν στην επόμενη ενότητα. Εξετάζοντας το σχήμα 6.18, παρατηρείται η αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας με την αύξηση του φορτίου. Η αρχική θερμοκρασία θεωρήθηκε 307.7 K (θερμοκρασία δωματίου), ενώ από την καμπύλη της θερμοκρασίας προκύπτει ότι η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας που παρατηρείται είναι περίπου 311 K. Αν θεωρηθεί ότι τα επιτρεπτά όρια της θερμοκρασίας είναι μεταξύ 273 και 373 K, τότε η λειτουργία της κυψέλης στη συγκεκριμένη φόρτιση δεν έχει άλλες επιπτώσεις πέρα από μία μικρή μείωση της απόδοσης στις εκκινήσεις της κυψέλης. Παρόλα αυτά, η φόρτιση της κυψέλης σε υψηλό ρεύμα και υψηλή θερμοκρασία (ανώτερη των 80 °C) για μεγάλο χρονικό διάστημα μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση της απόδοσης και της ανθεκτικότητας της συσκευής. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός συστήματος ψύξης ή η περιοδική διακοπή της λειτουργίας της κυψέλης, όταν η θερμοκρασία προσεγγίζει απαγορευτικές τιμές.



Σχήμα 6.17

Τάση εξόδου κυψέλης καυσίμου



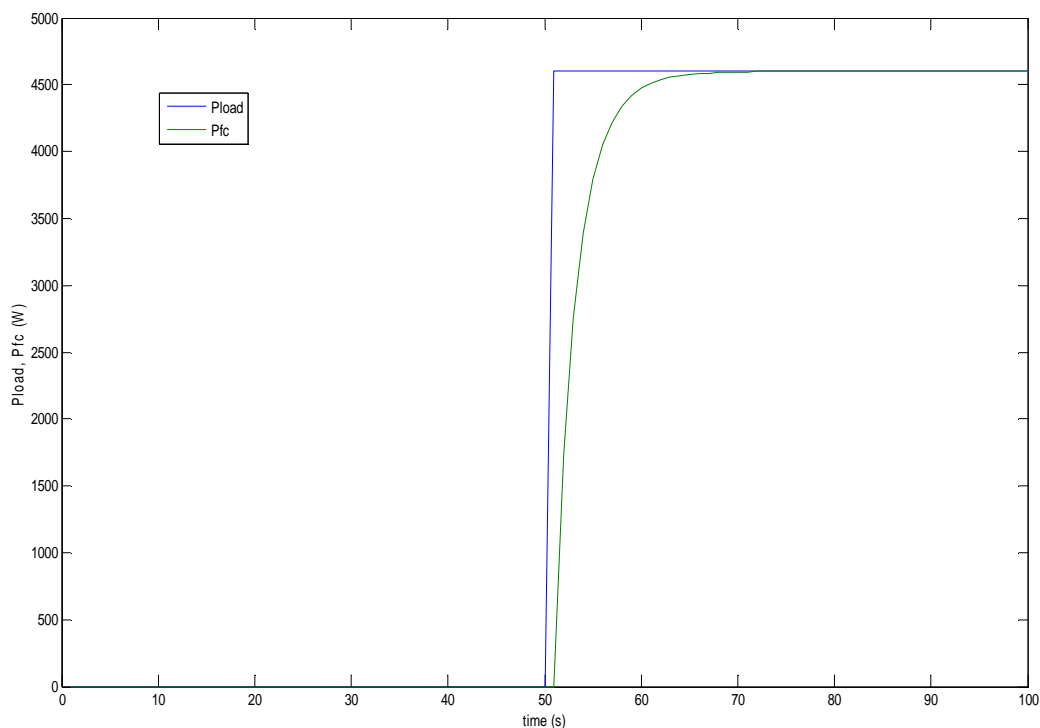
Σχήμα 6.18

Θερμοκρασία λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

6.3 Προσομοίωση λειτουργίας του συστήματος σε μεταβατικά φαινόμενα

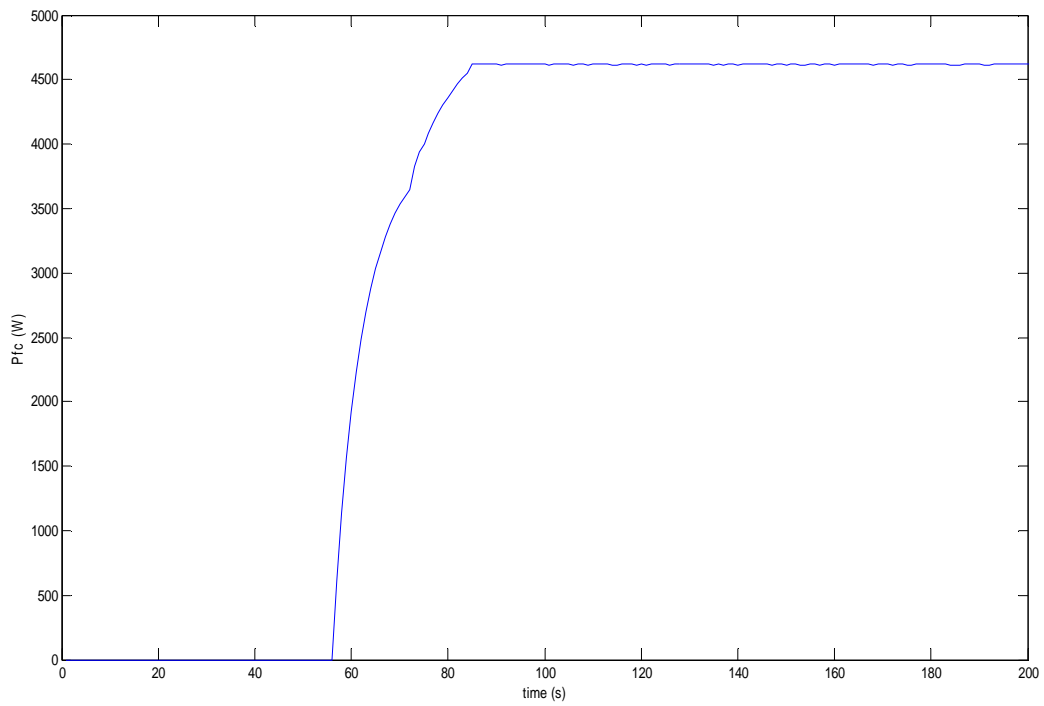
Η προσομοίωση του συστήματος σε μεταβατικά φαινόμενα έχει ως στόχο την αξιολόγηση του σε θέματα, όπως ο ρόλος των υπερπυκνωτών στο ισοζύγιο παραγωγής – ζήτησης, η καταπόνηση της κυψέλης καυσίμου και η ποιότητα ισχύος του ζυγού ΣΡ. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η απόκριση του συστήματος σε μια βηματική αλλαγή της ισχύος του φορτίου από 0 έως 5 kW. Κατά τη διάρκεια του μεταβατικού, η ταχύτητα ανέμου ήταν σταθερή στα 3 m/s και η φωτοβολταϊκή παραγωγή θεωρήθηκε μηδενική. Σκοπός της προσομοίωσης είναι η μελέτη της τάσης του ζυγού ΣΡ και της τάσης της κυψέλης με και χωρίς την επικουρική λειτουργία των υπερπυκνωτών.

Αρχικά, η απόκριση του συστήματος προσομοιώθηκε αποσυνδέοντας τη συστοιχία υπερπυκνωτών. Στο σχήμα 6.19 φαίνεται η απόκριση της ισχύος της κυψέλης στη βηματική αύξηση του φορτίου σε αυτήν την περίπτωση. Παρατηρείται μια χρονική καθυστέρηση που οφείλεται στα ηλεκτροχημικά και μηχανικά φαινόμενα που έχουν ήδη περιγραφεί. Στη συνέχεια, συνδέθηκε η συστοιχία υπερπυκνωτών και επαναλήφθηκε η προσομοίωση. Το σχήμα 6.20 δείχνει την απόκριση της ισχύος της κυψέλης καυσίμου, ενώ το σχήμα 6.21 την ισχύ που απέδωσαν οι υπερπυκνωτές. Η συνεισφορά της κάθε πηγής είναι συνάρτηση της ισχύος εξόδου της κάθε συσκευής για τη συγκεκριμένη φόρτιση, των χρονικών καθυστερήσεων και του ελέγχου των μετατροπέων ΣΡ για τη σταθεροποίηση της τάσης.



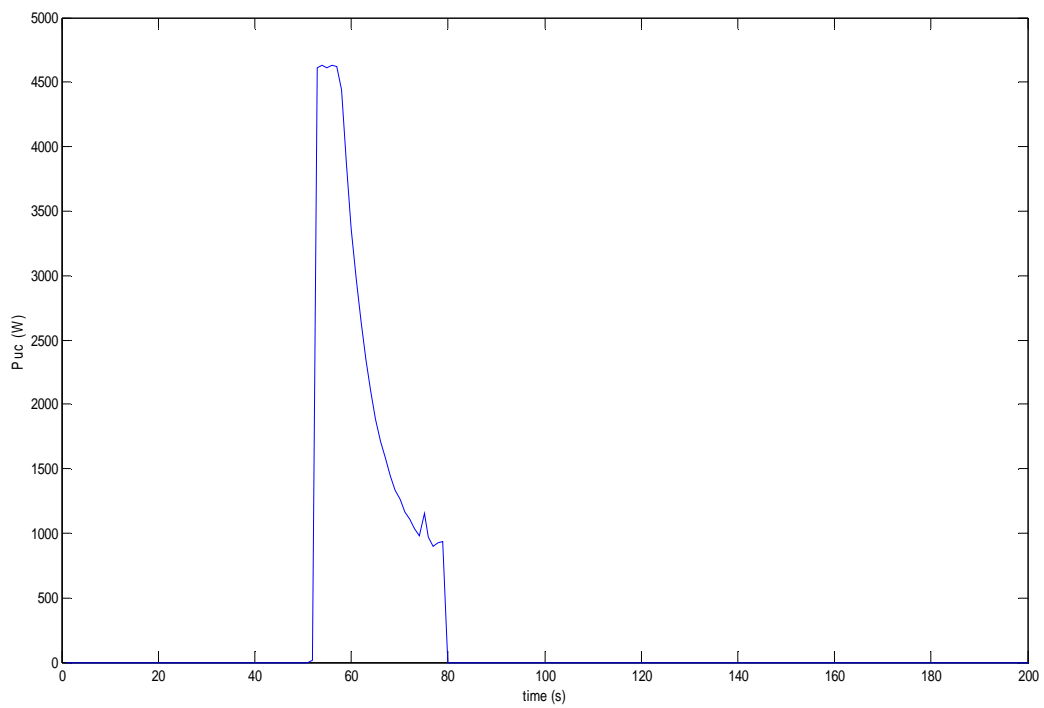
Σχήμα 6.19

Απόκριση ισχύος κυψέλης καυσίμου χωρίς υπερπυκνωτές



Σχήμα 6.20

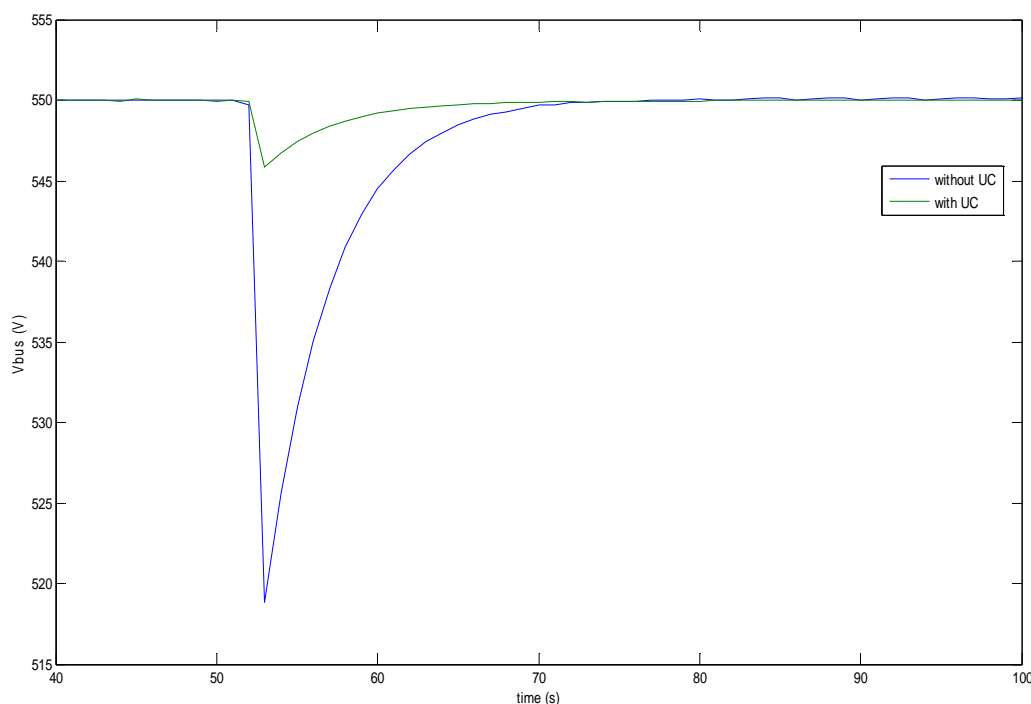
Απόκριση ισχύος κυψέλης καυσίμου με υπερπυκνωτές



Σχήμα 6.21

Απόκριση ισχύος υπερπυκνωτών

Στο σχήμα 6.22 φαίνεται η βύθιση τάσης στο ζυγό ΣΡ με και χωρίς υπερπυκνωτές. Είναι προφανές ότι με τη χρήση των υπερπυκνωτών επιτυγχάνεται μικρότερη βύθιση και ταχύτερη σταθεροποίηση τάσης. Συγκεκριμένα, η βύθιση τάσης είναι περίπου 30 V χωρίς τους υπερπυκνωτές, ενώ δε ξεπερνά τα 5 V με τους υπερπυκνωτές. Ακόμη, η σύγκλιση της τάσης στην τιμή αναφοράς επιτυγχάνεται σε 10 s με τους υπερπυκνωτές και σε 20 s χωρίς τους υπερπυκνωτές. Επομένως, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η χρήση των υπερπυκνωτών βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα ισχύος του ζυγού ΣΡ.

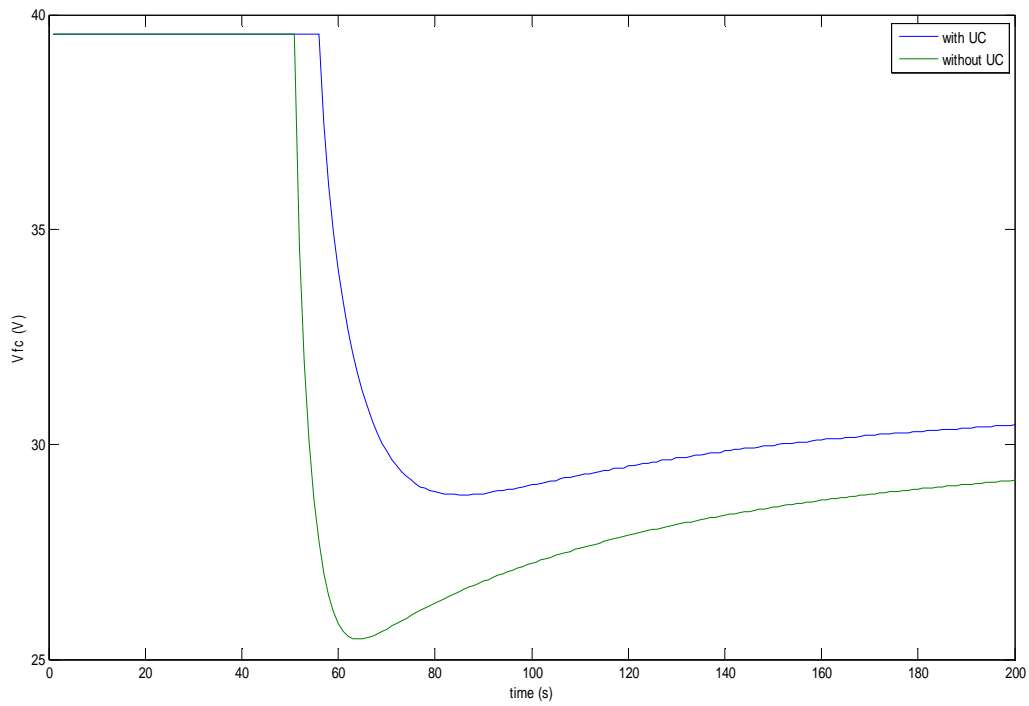


Σχήμα 6.22

Βύθιση τάσης ζυγού ΣΡ (α) με υπερπυκνωτές – πράσινο και (β) χωρίς υπερπυκνωτές – μπλε

Ένα εξίσου σημαντικό φαινόμενο που πρέπει να μελετηθεί είναι η δυναμική απόκριση της τάσης της συστοιχίας κυψελών καυσίμου. Έχει παρατηρηθεί ότι στις απότομες μεταβολές του φορτίου η τάση της συστοιχίας πέφτει σε τιμή χαμηλότερη της μόνιμης κατάστασης και στη συνέχεια σταθεροποιείται στη μόνιμη κατάσταση με σχετικά μεγάλη καθυστέρηση (μερικά εκατοντάδες δευτερόλεπτα), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7. Η λειτουργία της κυψέλης σε μειωμένη τάση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού απόδοσης και της ανθεκτικότητας της συσκευής, [5]. Για αυτό το λόγο, χρησιμοποιούνται βοηθητικά υποσυστήματα (π.χ. υπερπυκνωτές, μπαταρίες), για να μειώσουν τη διακύμανση της τάσης στις απότομες αλλαγές του φορτίου. Το σχήμα 6.23 δείχνει τη μείωση της τάσης στην βηματική αύξηση του φορτίου με και χωρίς υπερπυκνωτές. Είναι προφανές ότι με την χρησιμοποίηση των υπερπυκνωτών καταπονείται λιγότερο η κυψέλη καυσίμου, καθώς οι υπερπυκνωτές αναλαμβάνουν να καλύψουν ένα μέρος του φορτίου. Σε αυτήν την περίπτωση, η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και αποφεύγεται η έντονη καταπόνηση της σε μεταβατικά φορτία. Με αυτόν τον τρόπο, επιβραδύνεται το φαινόμενο της

υποβάθμισης των λειτουργικών της χαρακτηριστικών (degradation) και αυξάνεται η διάρκεια ζωής της.



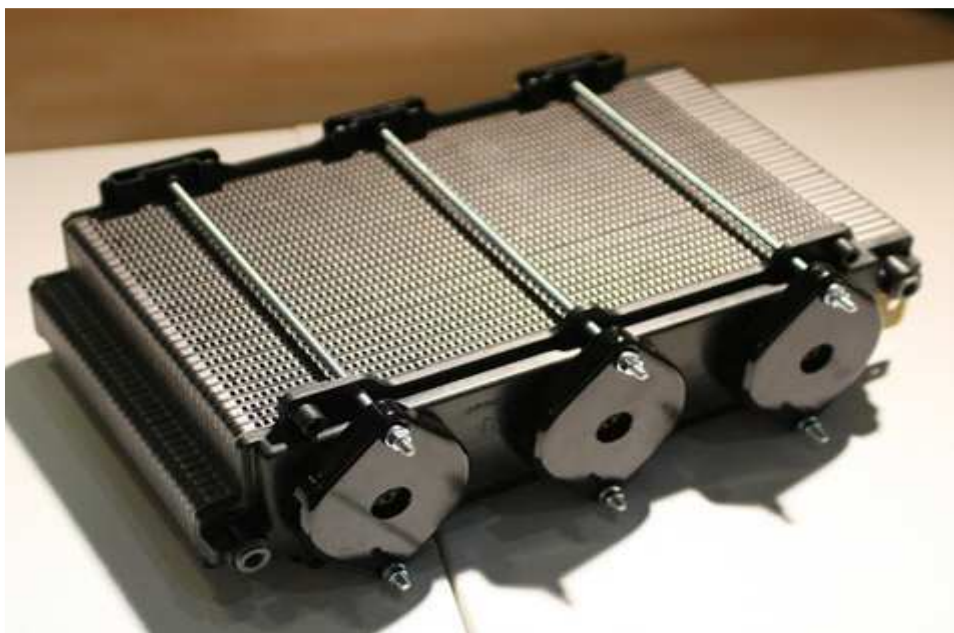
Σχήμα 6.23

Τάση κυψέλης καυσίμου (α) με υπερπυκνωτές – μπλε και (β) χωρίς υπερπυκνωτές – πράσινο

7 Πειραματική επιβεβαίωση μοντέλου κυψέλης καυσίμου

7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται η λειτουργία της πειραματικής συστοιχίας κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) Mark1020 ACS με 20 κυψέλες, που κατασκευάστηκε από την εταιρεία Ballard Power Systems, σχήμα 7.1. Η συστοιχία έχει ονομαστική ισχύ 500 W, τάση ανοικτοκύκλωσης 20 V και ονομαστική πίεση 0.35 bar. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει μετρήσεις στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας για τον υπολογισμό των καμπυλών $V - I$ και $P - I$ σε διάφορες θερμοκρασίες, καθώς και μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της κυψέλης καυσίμου σε αυξομειώσεις της ισχύος του φορτίου. Τέλος, μελετάται η δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος κυψέλης καυσίμου – μπαταριών του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ) σε απότομες αλλαγές του φορτίου και επιβεβαιώνεται πειραματικά η μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου.



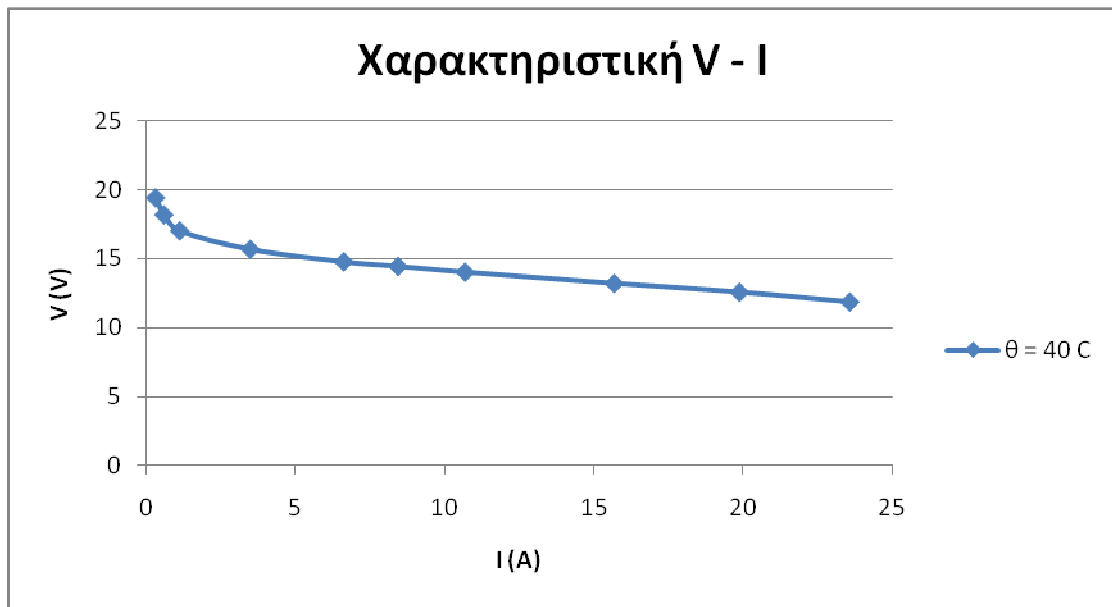
Σχήμα 7.1

Mark1020 ACS Fuel Cell Stack

7.2 Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

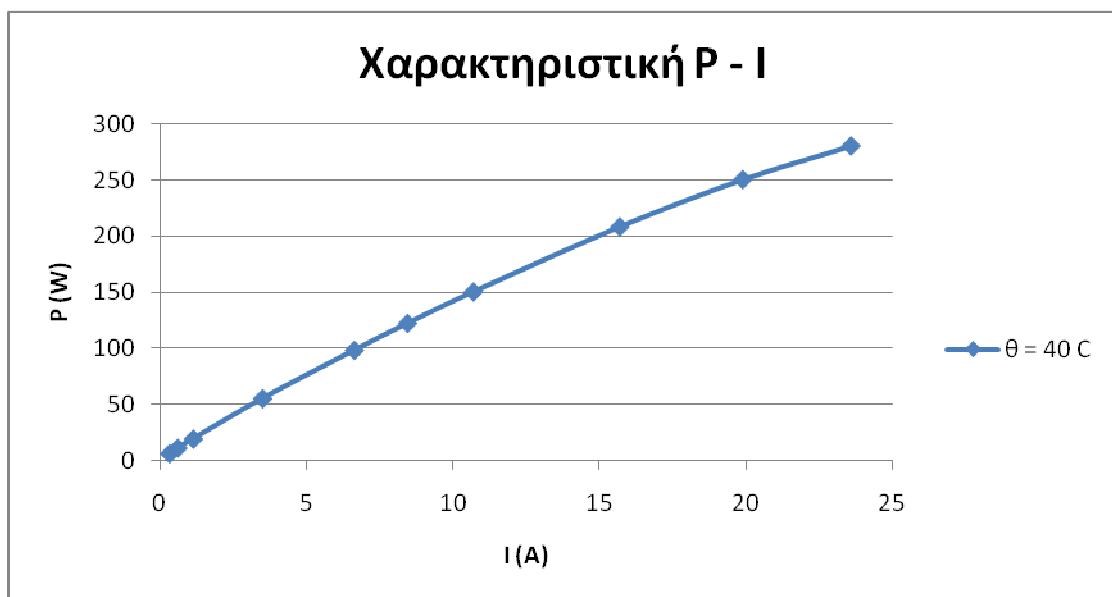
Η μελέτη της κυψέλης καυσίμου Mark1020 ACS στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας περιλαμβάνει μετρήσεις της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος για

διάφορες φορτίσεις με σκοπό τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών τάσης – ρεύματος και ισχύος – ρεύματος. Το σχήμα 7.2 δείχνει τη χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος σε θερμοκρασία 40 °C. Στις χαμηλές φορτίσεις παρατηρείται απότομη μείωση της τάσης λόγω των απωλειών ενεργοποίησης, ενώ στη συνέχεια η συστοιχία λειτουργεί στη γραμμική περιοχή. Κατά τη πειραματική διαδικασία αποφεύχθηκε η λειτουργία σε υψηλές φορτίσεις λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και γι' αυτό δεν παρατηρείται η πτώση τάσης λόγω της μείωσης της συγκέντρωσης των αντιδρώντων. Αντίστοιχα, στο σχήμα 7.3 φαίνεται η χαρακτηριστική ισχύος – ρεύματος.



Σχήμα 7.2

Πειραματική χαρακτηριστική καμπύλη V – I στους 40 °C



Σχήμα 7.3

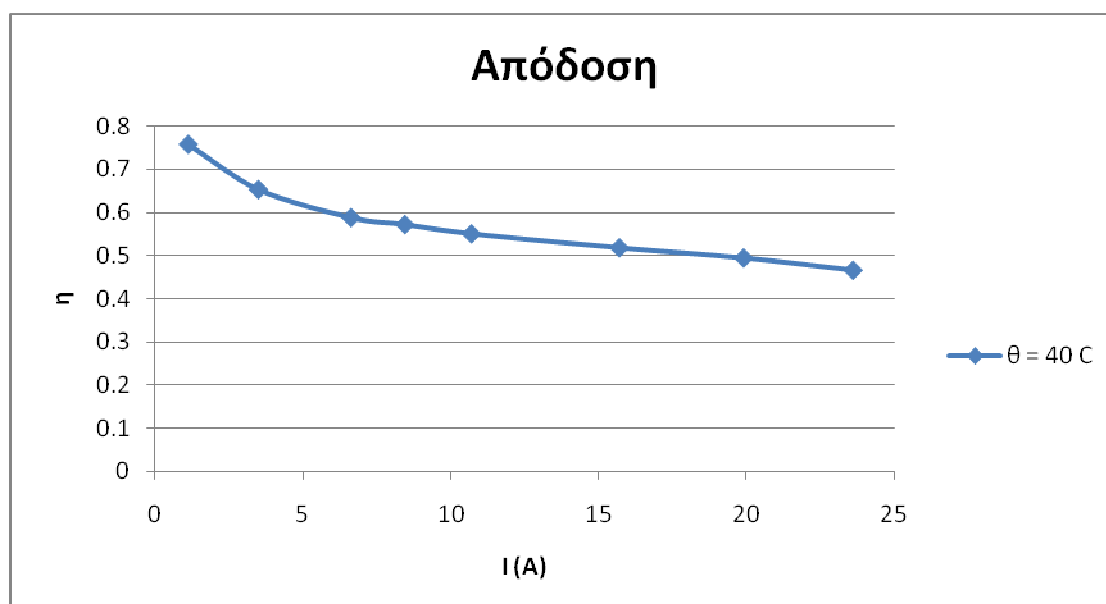
Πειραματική χαρακτηριστική καμπύλη P – I στους 40 °C

Στο σχήμα 7.4 παρουσιάζεται ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης καυσίμου συναρτήσει του ρεύματος λειτουργίας, υπολογισμένος με βάση την κατώτερη θερμογόνο δύναμη (Lower Heating Value - LHV) του υδρογόνου. Ο τύπος που εφαρμόζεται για την εξαγωγή του βαθμού απόδοσης η είναι ο ακόλουθος:

$$\eta = \frac{P_{fc}}{LHV \cdot \dot{q}_{H_2}^{in}} \quad (6.1)$$

Όπου P_{fc} η μετρούμενη ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου, LHV η κατώτερη θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου και $\dot{q}_{H_2}^{in}$ ο ρυθμός κατανάλωσης υδρογόνου.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.4, η απόδοση της κυψέλης καυσίμου μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του ρεύματος. Για αυτό το λόγο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η λειτουργία της κυψέλης σε υψηλές φορτίσεις θα πρέπει να αποφεύγεται.



Σχήμα 7.4

Απόδοση κυψέλης καυσίμου συναρτήσει του ρεύματος στους 40 °C

7.2.1 Επίδραση της θερμοκρασίας

Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης μιας κυψέλης καυσίμου. Ο λόγος είναι το γεγονός ότι στις υψηλές θερμοκρασίες βελτιώνεται η μεταφορά μάζας εντός της κυψέλης. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει τη κίνηση των ηλεκτρονίων στα μέταλλα, αλλά η κίνηση των ιόντων εντός του ηλεκτρολύτη αυξάνει. Αυτά τα δύο γεγονότα εάν συνδυαστούν βελτιώνουν την ηλεκτροχημική αντίδραση. Η συγκέντρωση του νερού που παράγεται δεν επιτρέπει την αύξηση της θερμοκρασίας πέραν των 100 °C, διότι το νερό θα αρχίσει να βράζει και ο παραγόμενος ατμός θα μειώσει δραστικά τη μερική πίεση του οξυγόνου. Το γεγονός αυτό της στέρευσης του O₂ μειώνει τελικά την απόδοση της κυψέλης και ενδέχεται να την καταστρέψει ή να μειώσει τη διάρκεια ζωής της. Βέβαια,

υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούμε να επιτύχουμε σε υψηλότερες πιέσεις λειτουργίας εφόσον σ' αυτές αυξάνεται το σημείο βρασμού του νερού, γεγονός που εφαρμόζουμε στη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου PEM. Τελικά, η τάση της κυψέλης αυξάνει με τη θερμοκρασία μέχρι αυτή να φτάσει το σημείο βρασμού του νερού πέραν του οποίου η τάση αρχίζει να πέφτει. Η βέλτιστη θερμοκρασία είναι αυτή των 80 °C όπου ισορροπούν οι δύο παραπάνω αντίθετοι παράγοντες. Το σχήμα 7.5 δείχνει την αύξηση της τάσης της κυψέλης μέχρι την οριακή θερμοκρασία των 80 °C και στη συνέχεια τη μείωση της [47].

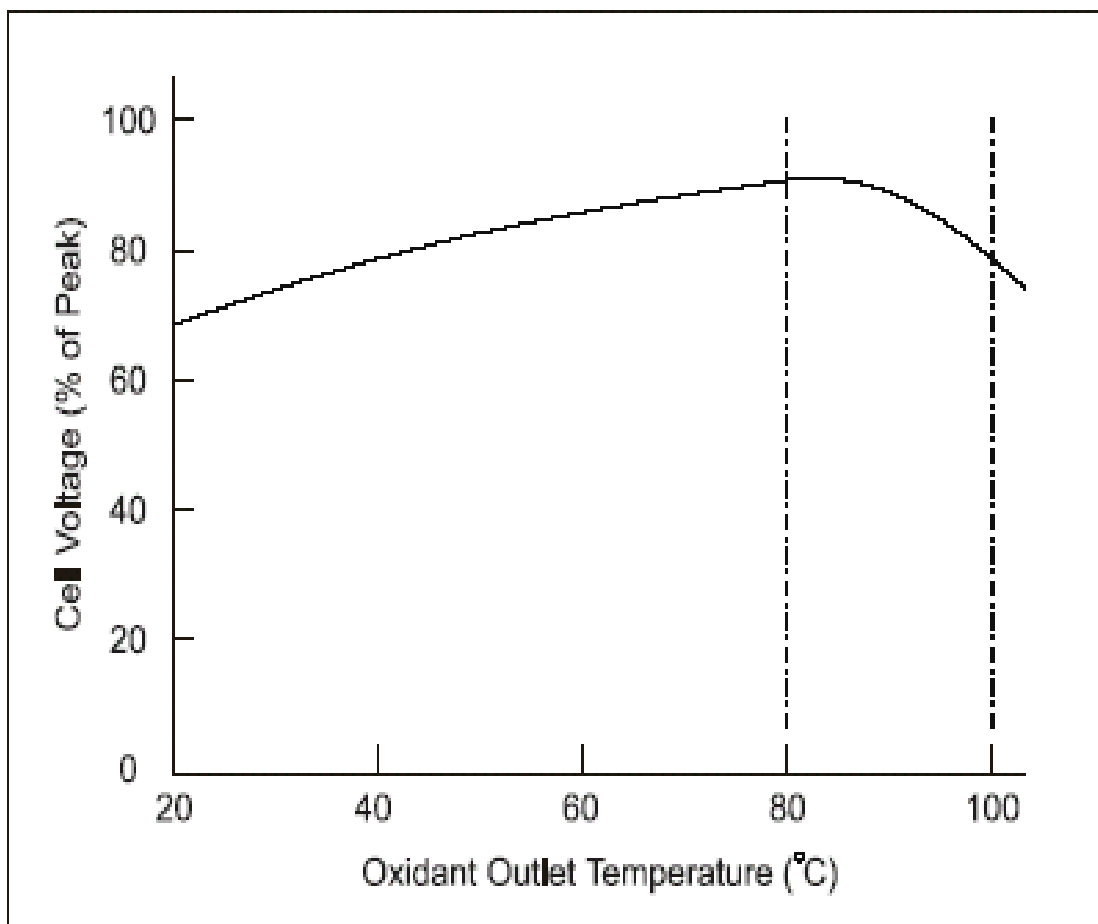
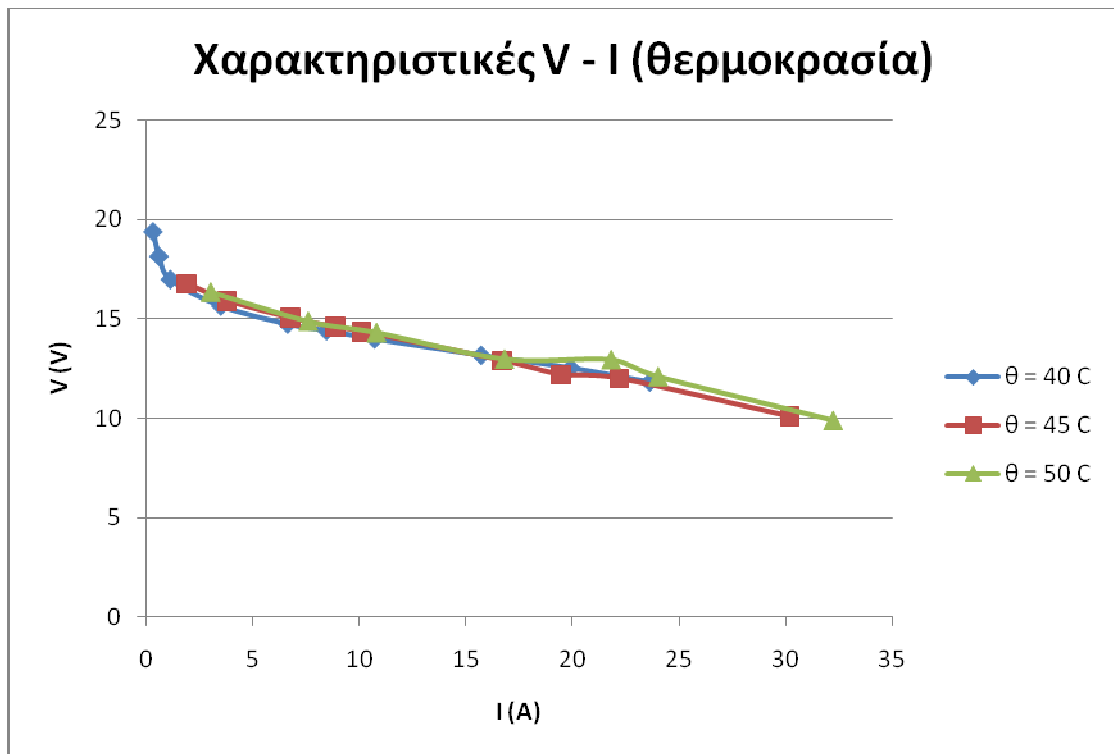


Figure 4-26 Effect of Temperature on Fuel Cell Voltage

Σχήμα 7.5

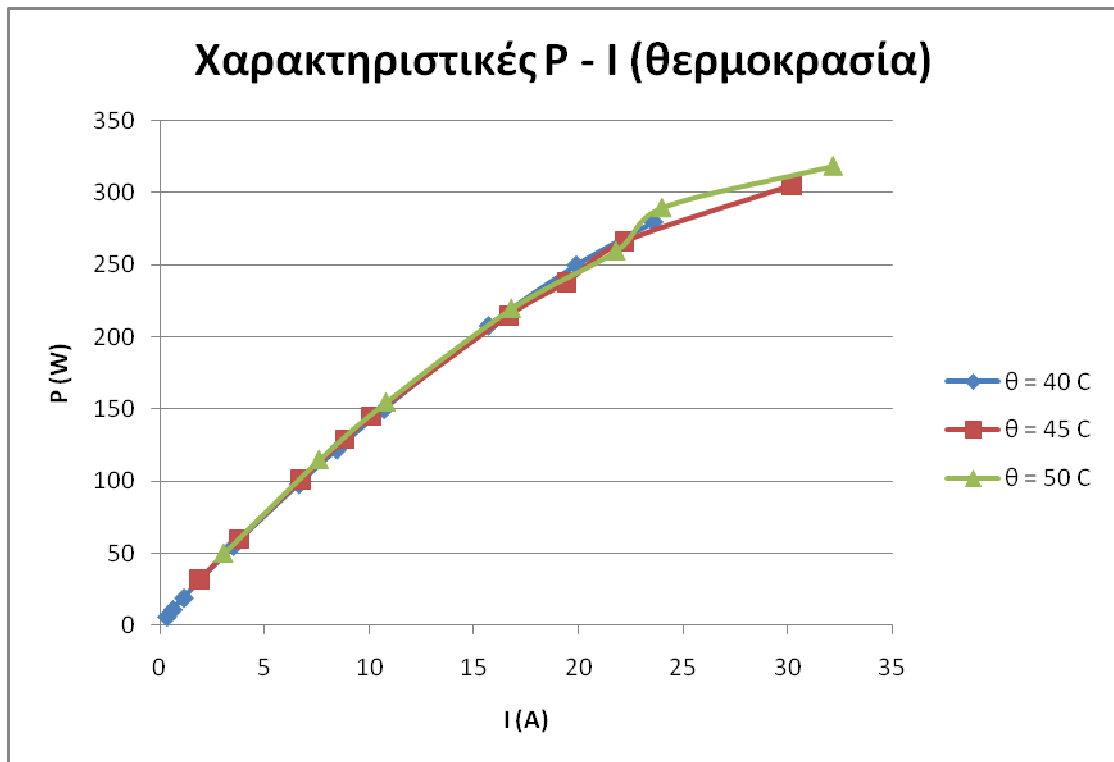
Μεταβολή της τάσης της κυψέλης καυσίμου PEM με τη θερμοκρασία λειτουργίας

Στο σχήμα 7.6 και στο σχήμα 7.7 φαίνονται οι χαρακτηριστικές τάσης – ρεύματος και ισχύος – ρεύματος αντίστοιχα για θερμοκρασίες 40 °C, 45 °C και 50 °C. Από τα σχήματα παρατηρείται η αύξηση του επιπέδου των χαρακτηριστικών με την αύξηση της θερμοκρασίας, όπως επιβεβαιώνεται και από τη θεωρία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης της κυψέλης καυσίμου με την αύξηση της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.8. Αυτή η αύξηση είναι μικρή διότι είναι μικρή η διαφορά των θερμοκρασιών των τριών καταστάσεων.



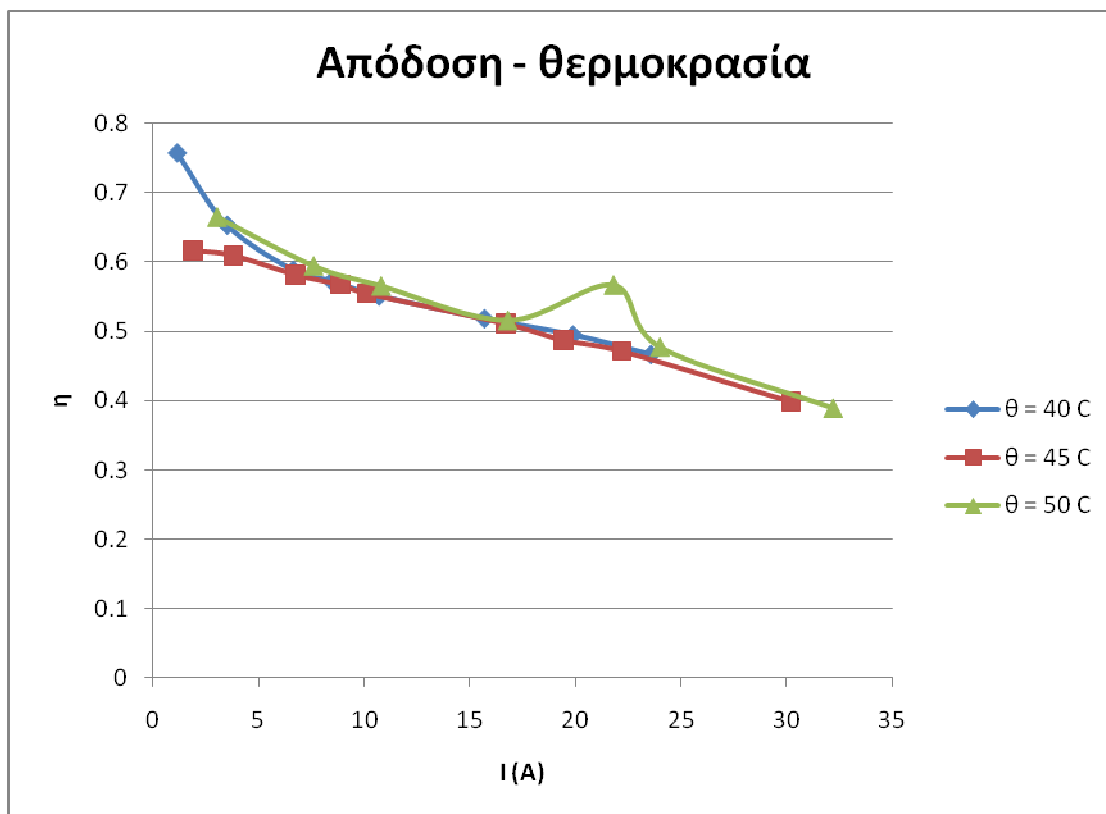
Σχήμα 7.6

Χαρακτηριστικές V - I σε σχέση με τη θερμοκρασία



Σχήμα 7.7

Χαρακτηριστικές P - I σε σχέση με τη θερμοκρασία

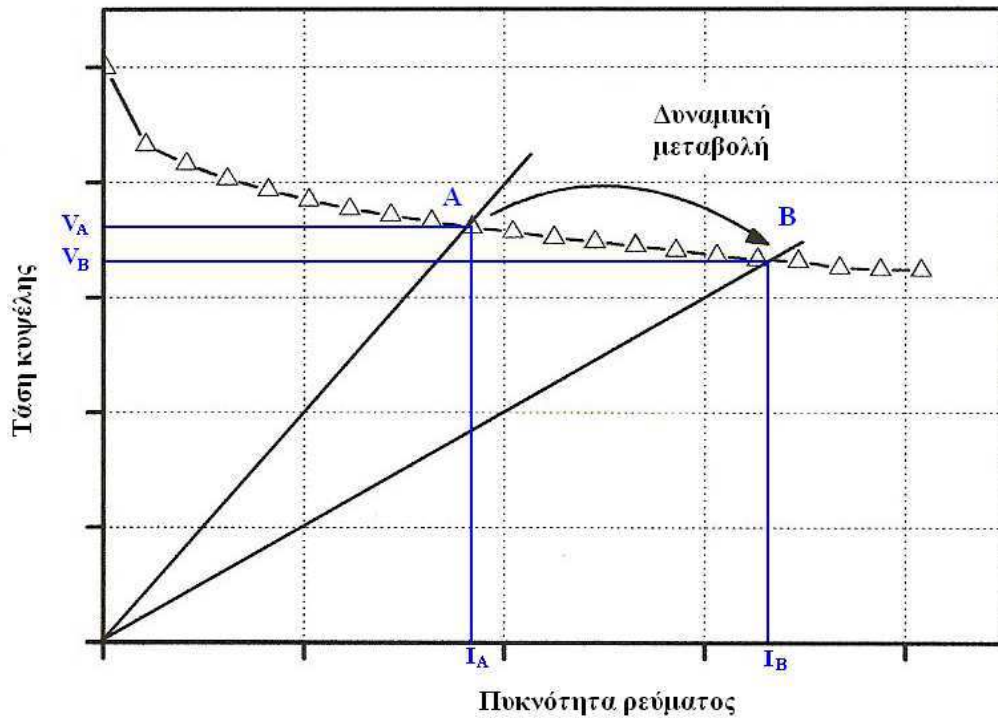


Σχήμα 7.8

Απόδοση σε σχέση με τη θερμοκρασία

7.3 Μεταβατική κατάσταση λειτουργίας

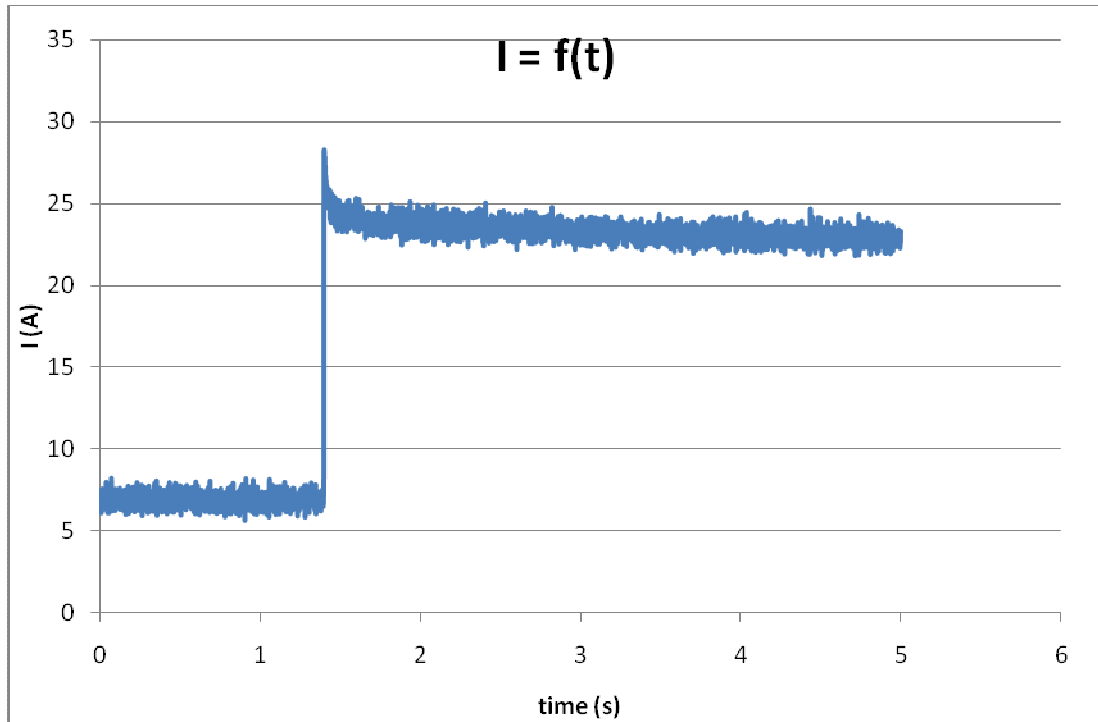
Η μελέτη της κυψέλης καυσίμου Mark1020 ACS στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας περιλαμβάνει μετρήσεις της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος σε βηματικές αυξομειώσεις της ισχύος του φορτίου (ωμική αντίσταση). Η χαρακτηριστική τάσης - ρεύματος έχει ένα μεγάλο μειονέκτημα, δεν απεικονίζει τη δυναμική συμπεριφορά της κυψέλης με τις μεταβολές του φορτίου παρά μόνο με καθυστέρηση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πρέπει πρώτα να πραγματοποιηθεί η μετάβαση από την προηγούμενη κατάσταση στην επόμενη. Η μεταβατική αυτή απόκριση που παρουσιάζεται με τη μεταβολή του φορτίου στην κυψέλη καυσίμου κυμαίνεται μεταξύ μερικών έως και δεκάδων δευτερολέπτων. Η δυναμική συμπεριφορά μίας κυψέλης καυσίμου χαρακτηρίζεται από τη μεταβολή του φορτίου και συνεπώς από τη μεταβολή του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει την κυψέλη. Η μεταβολή του φορτίου έχει ως συνέπεια τη μετάθεση του σημείου λειτουργίας που απεικονίζεται δια μέσου της χαρακτηριστικής τάσης - ρεύματος της κυψέλης. Το σχήμα 7.9 αναπαριστά τη μεταβολή του σημείου λειτουργίας (από το σημείο Α στο σημείο Β) πάνω στη χαρακτηριστική, που οφείλεται στη μεταβολή του φορτίου. Συγκεκριμένα καθώς μεταβάλλεται το φορτίο (αύξηση του φορτίου) παρατηρείται αύξηση του ρεύματος της κυψέλης και ταυτόχρονη μείωση της τάσεως.



Σχήμα 7.9

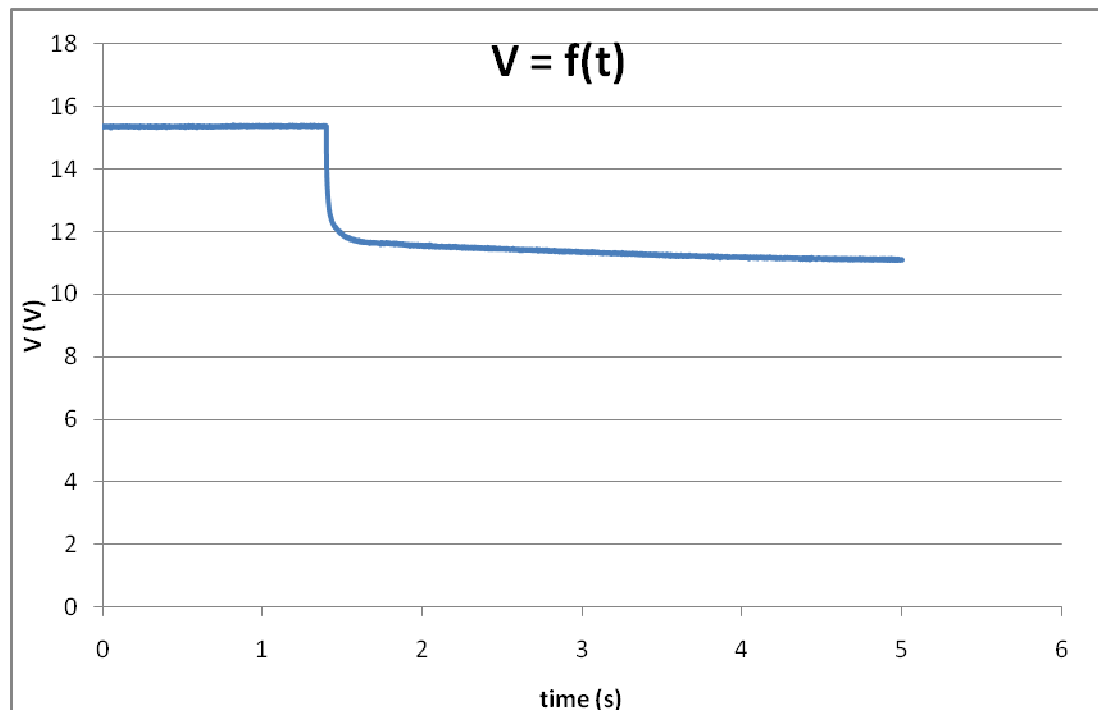
Δυναμική μεταβολή του σημείου λειτουργίας

Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι η μελέτη της δυναμικής απόκρισης της κυψέλης, δηλαδή η μεταβολή από ένα σημείο λειτουργίας σε ένα άλλο, η οποία δε μπορεί να αναπαρασταθεί από τη χαρακτηριστική τάσης - ρεύματος. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η δυναμική απόκριση της κυψέλης σε μεταβολή του φορτίου από 100 έως 250 W σε θερμοκρασία 46 °C. Το σχήμα 7.10 δείχνει το ρεύμα εξόδου της συστοιχίας, ενώ το σχήμα 7.11 δείχνει τη δυναμική απόκριση της τάσης. Όπως παρατηρείται, κατά την αύξηση του φορτίου η τάση πέφτει απότομα σε μία τιμή λόγω της ωμικής πτώσης τάσης στην ισοδύναμη αντίσταση R_{ohm} και μετά μειώνεται εκθετικά μέχρι την τιμή μόνιμης κατάστασης λόγω της χωρητικότητας C που μοντελοποιεί το φαινόμενο της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας. Αυτό επαληθεύεται και από τη θεωρία, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.12 [5]. Επομένως, ο χρόνος της δυναμικής απόκρισης της κυψέλης καυσίμου σε βραχυχρόνια κλίμακα είναι πολύ μικρός (μερικά δευτερόλεπτα) και οφείλεται κατά κύριο λόγο στο φαινόμενο της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας, το οποίο μοντελοποιείται με πυκνωτές μεγάλων τιμών (μερικά Farads). Στο σχήμα 7.13 φαίνεται η δυναμική απόκριση της ισχύος της κυψέλης καυσίμου. Εφόσον το φορτίο είναι ωμικό και δεν παρεμβάλλεται κάποιος μετατροπέας σταθεροποίησης τάσης ανάμεσα στη συστοιχία και στο φορτίο, τότε το ρεύμα και η ισχύς του φορτίου ακολουθούν την καμπύλη της τάσης εξόδου της συστοιχίας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η επόμενη ενότητα στην οποία μελετάται η λειτουργία μίας κυψέλης καυσίμου με μετατροπής σταθεροποίησης τάσης στα άκρα του φορτίου. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούνται καθυστερήσεις στην απόκριση της ισχύος της κυψέλης, κάνοντας απαραίτητη την ύπαρξη βοηθητικών διατάξεων, όπως μπαταρίες και υπερπυκνωτές.



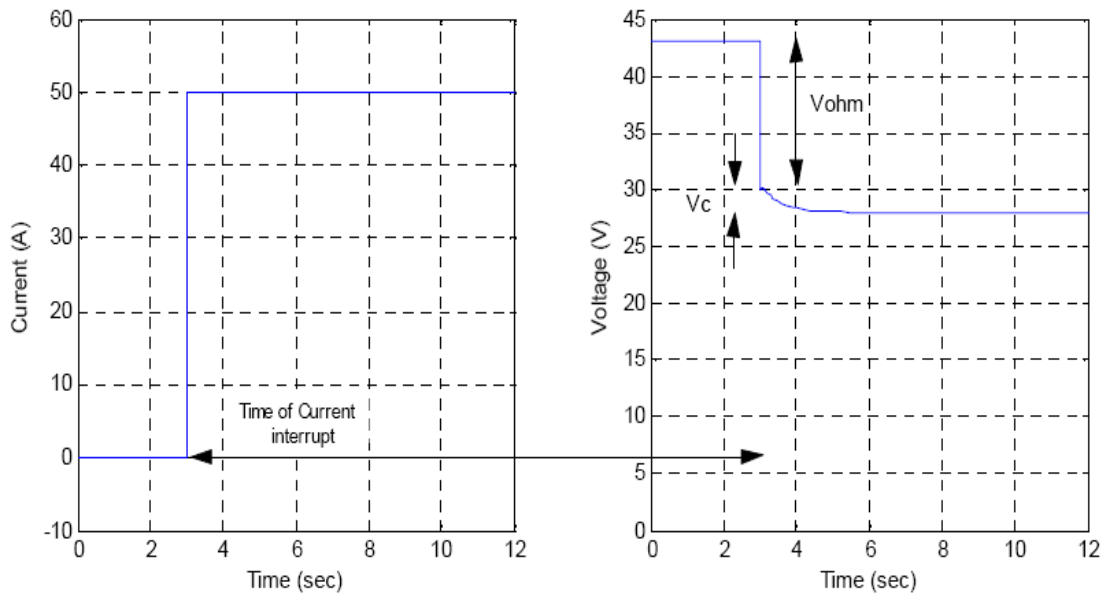
Σχήμα 7.10

Ρεύμα φορτίου



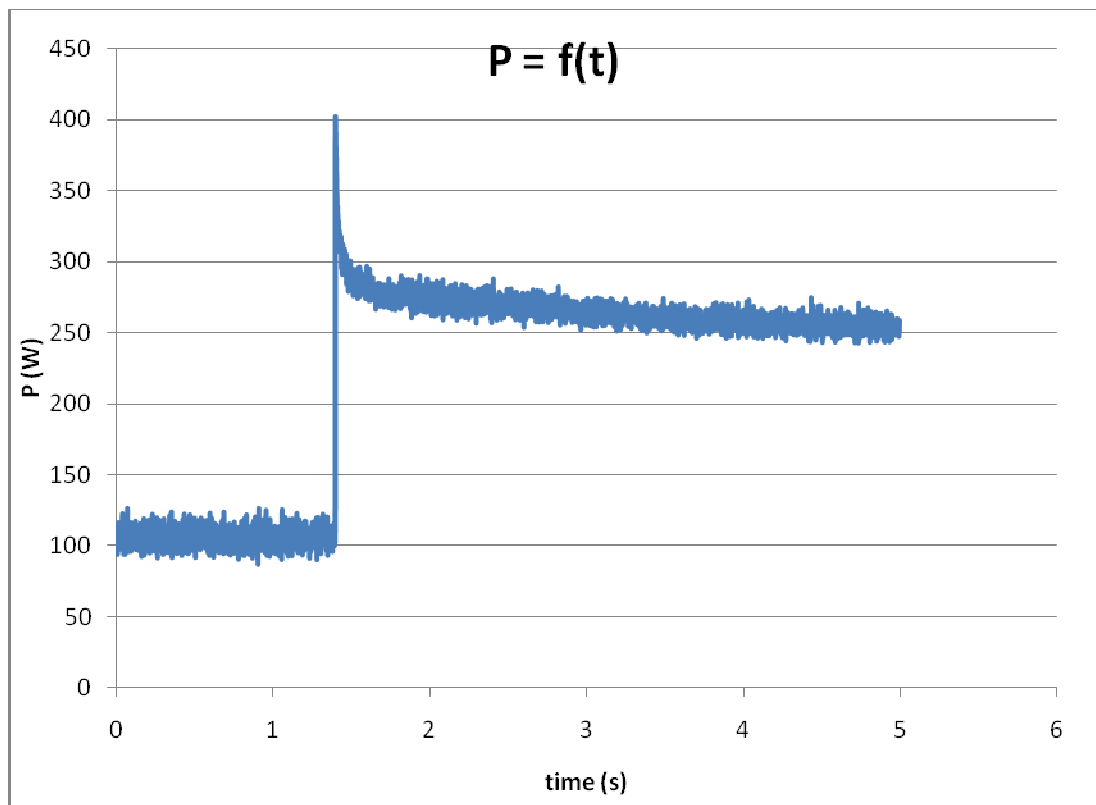
Σχήμα 7.11

Δυναμική απόκριση τάσης κυψέλης καυσίμου



Σχήμα 7.12

Θεωρητική απόκριση της τάσης σε βηματική αύξηση του φορτίου



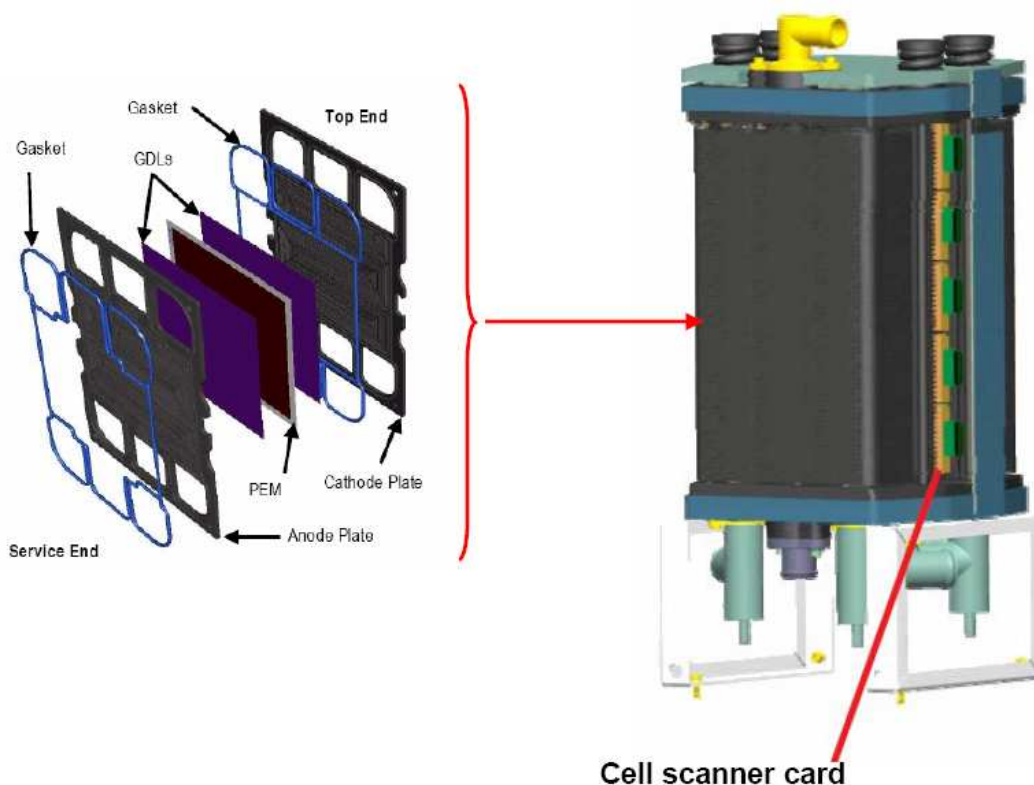
Σχήμα 7.13

Δυναμική απόκριση ισχύος κυψέλης καυσίμου

7.4 Πειραματική μελέτη συστήματος κυψέλης καυσίμου – μπαταριών

Σε αυτήν την ενότητα μελετάται η δυναμική απόκριση ενός συστήματος κυψέλης καυσίμου – μπαταριών που λειτουργεί στις εγκαταστάσεις του Τμήματος Τεχνολογιών ΑΠΕ και Υδρογόνου του ΚΑΠΕ και χρησιμεύει σαν μονάδα υποστήριξης σε τηλεπικοινωνιακούς σταθμούς, σε υποσταθμούς ή σαν UPS (Uninterruptible Power Supply). Η κυψέλη καυσίμου Gencore 5B48 είναι τύπου PEM ονομαστικής ισχύος 5 kW και έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Plug Power. Η δομή της συστοιχίας και των υποσυστημάτων της φαίνονται στο σχήμα 7.14 και στο σχήμα 7.15 αντίστοιχα.

Η κυψέλη καυσίμου τροφοδοτείται από φιάλη υδρογόνου, ενώ το οξυγόνο παρέχεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Για την ομαλή της λειτουργία αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό βοηθητικών εξαρτημάτων, η ισχύς τροφοδοσίας των οποίων κυμαίνεται από 600 W έως 1 kW. Η συνδεσμολογία του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 7.16. Ένα μέρος της παραγόμενης ισχύος της κυψέλης καυσίμου τροφοδοτείται μέσω ενός μετατροπέα ανύψωσης ΣΡ στα βοηθητικά συστήματα, ενώ το υπόλοιπο ανυψώνεται στα 50 V μέσω μετατροπέα ΣΡ. Στην έξοδο του μετατροπέα συνδέεται συστοιχία μπαταριών που χρησιμεύει για την εκκίνηση της συστοιχίας και για την κάλυψη των αιχμακών φορτίων. Στη συνέχεια, μέσω ενός αντιστροφέα συνδέεται ένα ελεγχόμενο ωμικό φορτίο με ισχύ που μεταβάλλεται από 0 έως 5 kW με βήμα 0.25 kW.



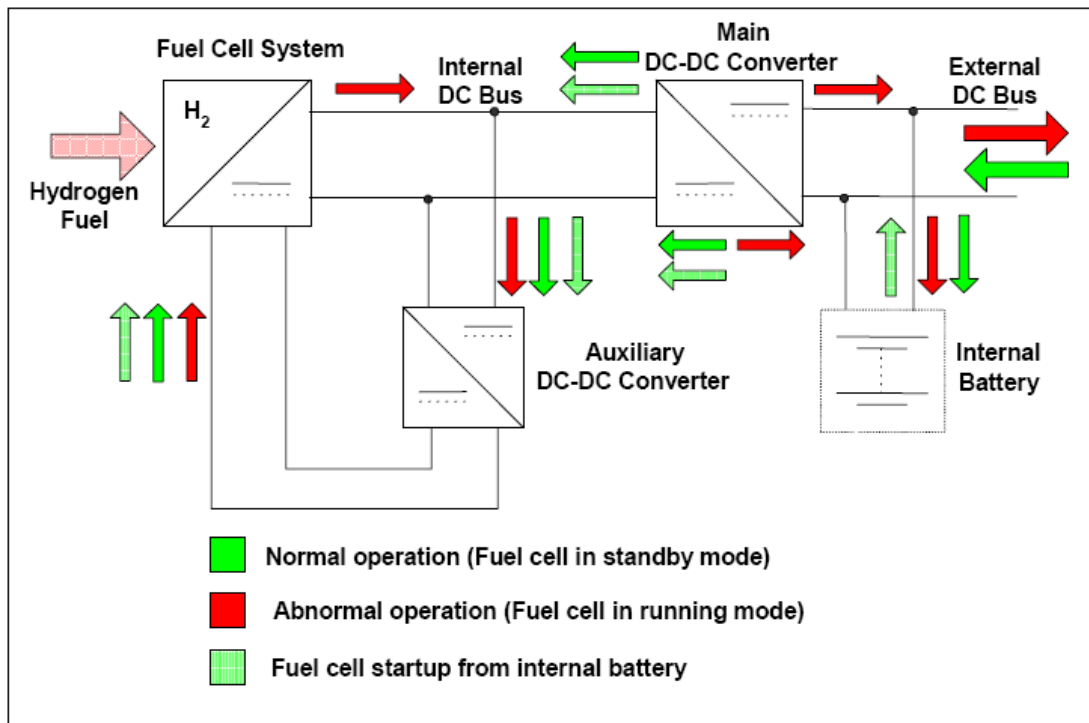
Σχήμα 7.14

Δομή συστοιχίας κυψελών καυσίμου Gencore 5B48



Σχήμα 7.15

Δομή συστήματος Gencore 5B48 - υποσυστήματα

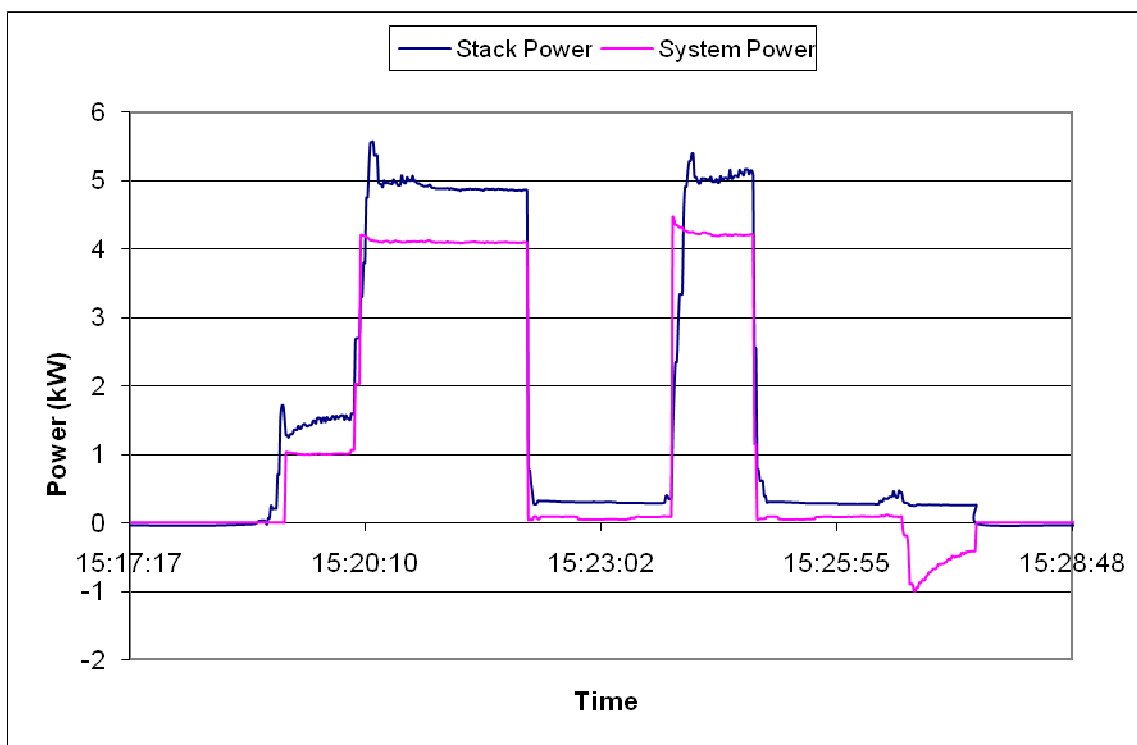


Σχήμα 7.16

Συνδεσμολογία συστήματος κυψέλης καυσίμου – μπαταριών

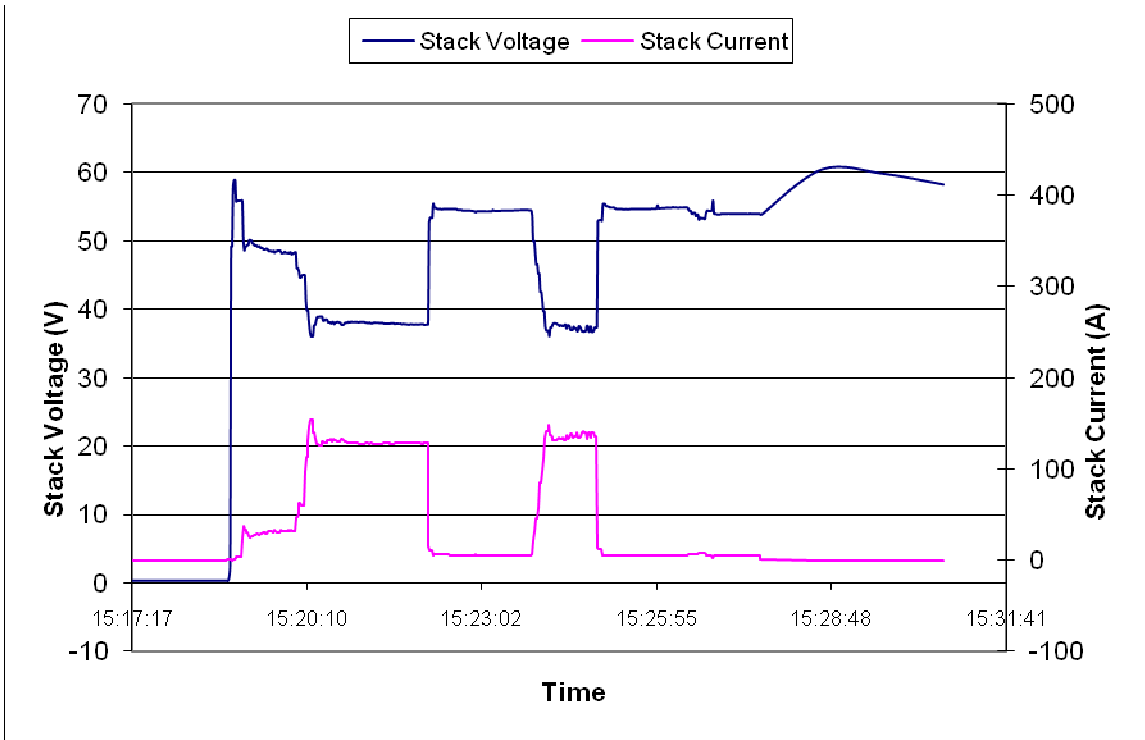
Στο σχήμα 7.17 φαίνονται εποπτικά οι αλλαγές του φορτίου που πραγματοποιήθηκαν. Το φορτίο μεταβλήθηκε από 0 στα 2 kW και μετά στα 4 kW, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μία αλλαγή από τα 0 απευθείας στα 4 kW. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία της κυψέλης καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων κυμαίνονταν μεταξύ 50 και 55 °C, εξασφαλίζοντας έτσι τη μέγιστη δυνατή απόδοση. Όπως παρατηρείται, η ισχύς της συστοιχίας υπερβαίνει την ισχύ του φορτίου, καθώς η συστοιχία τροφοδοτεί και τις βοηθητικές διατάξεις, ενώ υπάρχουν και απώλειες ισχύος στους μετατροπείς. Ακόμη, διαπιστώνεται καθυστέρηση της κυψέλης καυσίμου στην ανάληψη του φορτίου, ενώ η απόρριψη γίνεται άμεσα. Όπως φαίνεται και από την ισχύ του συστήματος, η ανάληψη του φορτίου γίνεται επιτυχώς λόγω της συνεισφοράς των μπαταριών. Λεπτομερής ανάλυση της απόκρισης ισχύος της κυψέλης καυσίμου θα γίνει στη συνέχεια.

Στο σχήμα 7.18 φαίνονται το ρεύμα και η τάση της συστοιχίας κυψελών καυσίμου σε συνάρτηση με το χρόνο. Από την καμπύλη του ρεύματος παρατηρείται η καθυστέρηση στη ανάληψη του φορτίου, ενώ από την καμπύλη της τάσης παρατηρείται η μείωση της τάσης με την αύξηση του ρεύματος. Αντίστοιχα, στο σχήμα 7.19 φαίνονται το ρεύμα και η τάση της συστοιχίας των μπαταριών. Από την καμπύλη του ρεύματος διαπιστώνεται η συνεισφορά (εκφόρτιση) των μπαταριών κατά την ανάληψη του φορτίου και η φόρτιση τους μετά τη σταθεροποίηση του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι αρνητικό ρεύμα σημαίνει εκφόρτιση και το θετικό φόρτιση. Από την καμπύλη της τάσης παρατηρείται η μείωση της τάσης κατά τη εκφόρτιση και η αύξηση της κατά τη φόρτιση. Η τιμή της τάσης σταθεροποιείται στα 50 V, καθώς η μπαταρία είναι απευθείας συνδεδεμένη με το ζυγό.



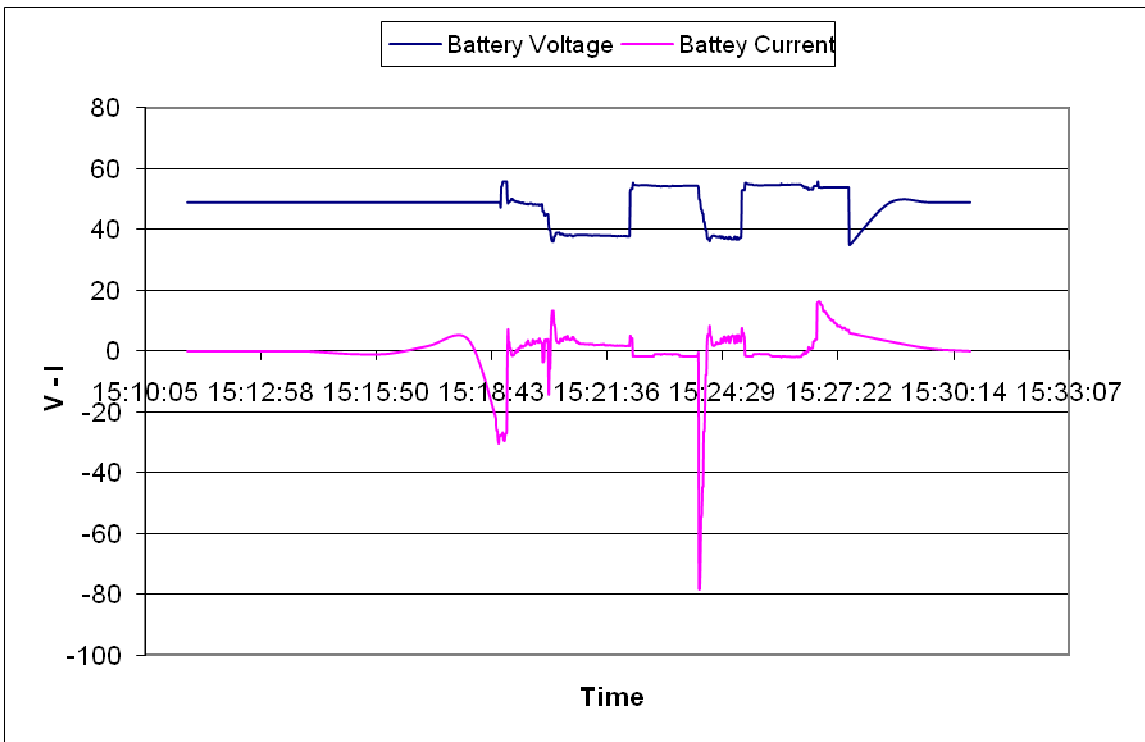
Σχήμα 7.17

Ισχύεις κυψέλης καυσίμου και συστήματος



Σχήμα 7.18

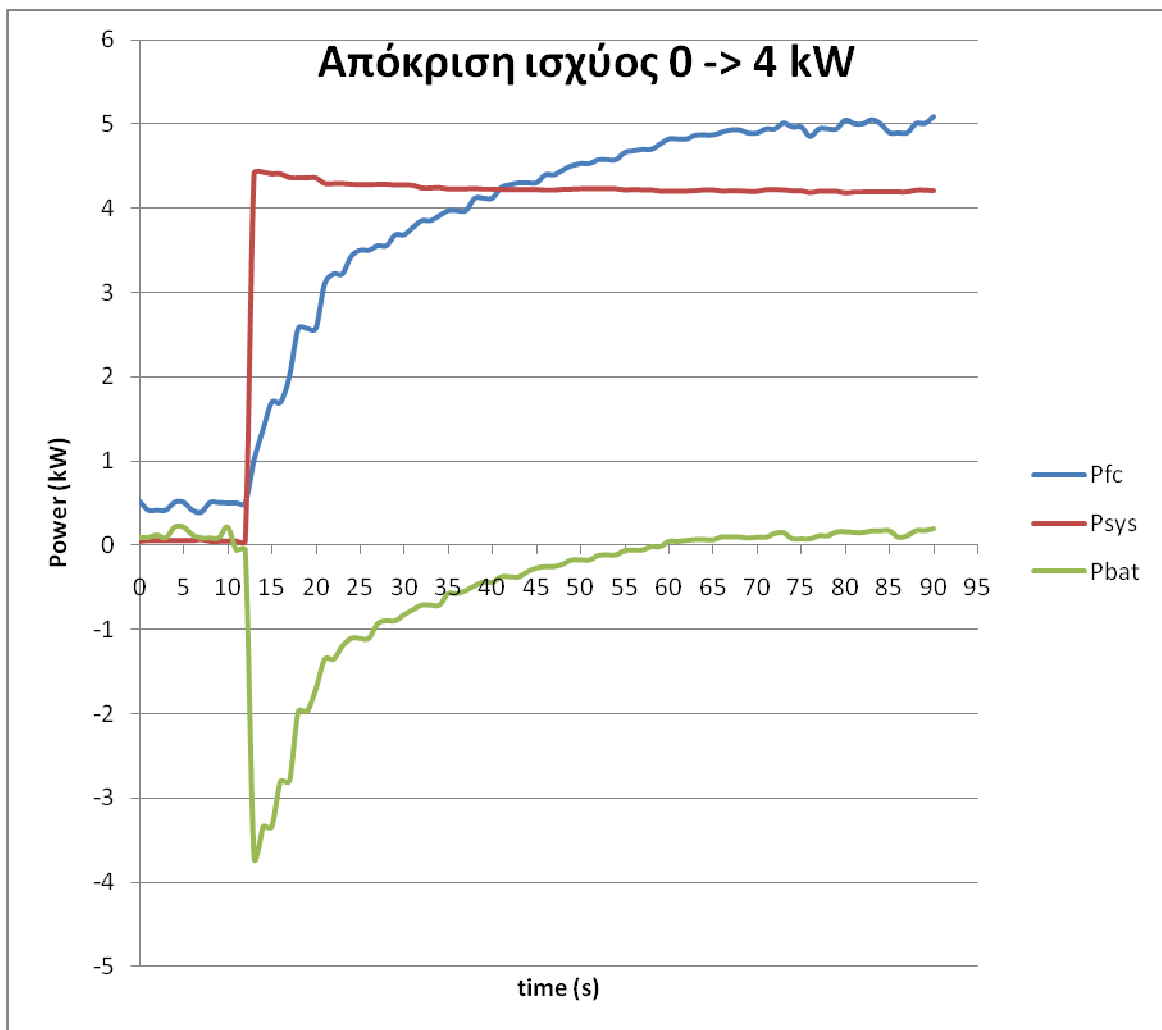
Τάση – ρεύμα συστοιχίας κυψελών καδμίου



Σχήμα 7.19

Τάση – ρεύμα συστοιχίας μπαταριών

Στη συνέχεια, θα αναλυθεί περαιτέρω η απόκριση ισχύος του συστήματος στην μεταβολή του φορτίου από 0 στα 4 kW. Το σχήμα 7.20 δείχνει την απόκριση ισχύος της κυψέλης, των μπαταριών και συνολικά του συστήματος. Ο άξονας του χρόνου έχει μονάδα μέτρησης τα δευτερόλεπτα για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου. Όπως παρατηρούμε, η ισχύς της κυψέλης φτάνει τη μόνιμη κατάσταση μετά από 50 δευτερόλεπτα, κατά τη διάρκεια των οποίων οι μπαταρίες καλύπτουν το έλλειμμα ισχύος. Η μέγιστη ισχύς που παρέχουν οι μπαταρίες είναι περίπου 3.7 kW τη χρονική στιγμή 15 s. Μετά από τη χρονική στιγμή 60 s οι μπαταρίες αρχίζουν να φορτίζονται με αποτέλεσμα η κυψέλη καυσίμου να αυξήσει την παραγωγή στα 5 kW. Η ισχύς που αποδίδεται συνολικά από το σύστημα καλύπτει ικανοποιητικά την αύξηση της ισχύος του φορτίου και μάλιστα με μια μικρή αιχμή τη στιγμή της ανάληψης, η οποία οφείλεται στις μπαταρίες. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι οι καθυστερήσεις της απόκρισης ισχύος μιας κυψέλης καυσίμου καθιστούν απαραίτητη την ύπαρξη βοηθητικών διατάξεων (μπαταρίες/υπερπυκνωτές) για την κάλυψη μεταβατικών φορτίων σε συστήματα ηλεκτροκίνησης ή αυτόνομα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής.



Σχήμα 7.20

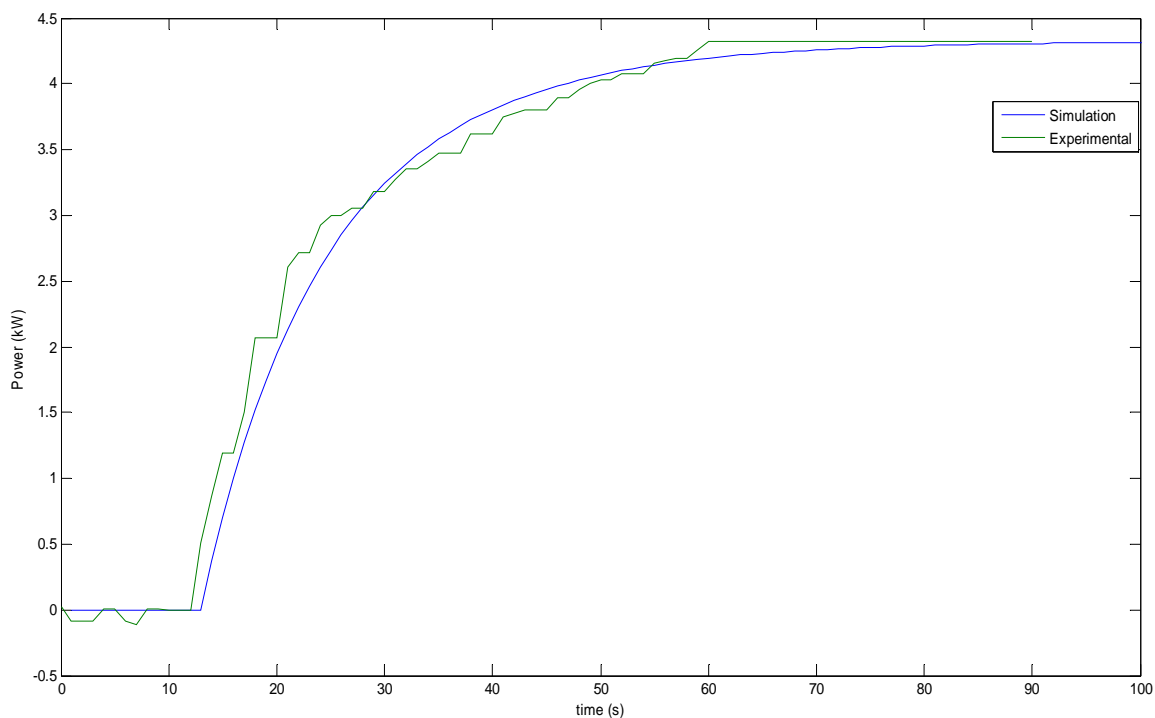
Απόκριση ισχύος συστήματος στη μεταβολή του φορτίου από 0 έως 4 kW

Στο σχήμα 7.21 φαίνεται η πειραματική επιβεβαίωση της απόκρισης ισχύος του μοντέλου μηχανικών καθυστερήσεων της κυψέλης καυσίμου που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Αυτό το αποτέλεσμα προέκυψε από τη χρήση των παραμέτρων που φαίνονται στον πίνακα 7.1. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παράμετροι τ_{el} και τ_{mech} συμβολίζουν την ηλεκτρική σταθερά χρόνου των μετατροπών και τη μηχανική σταθερά χρόνου της τροφοδοσίας καυσίμου αντίστοιχα.

Μέγεθος	Τιμή
τ_{H_2}	3.37 s
τ_{O_2}	6.74 s
τ_{el}	0.8 s
τ_{mech}	10.5 s

Πίνακας 7.1

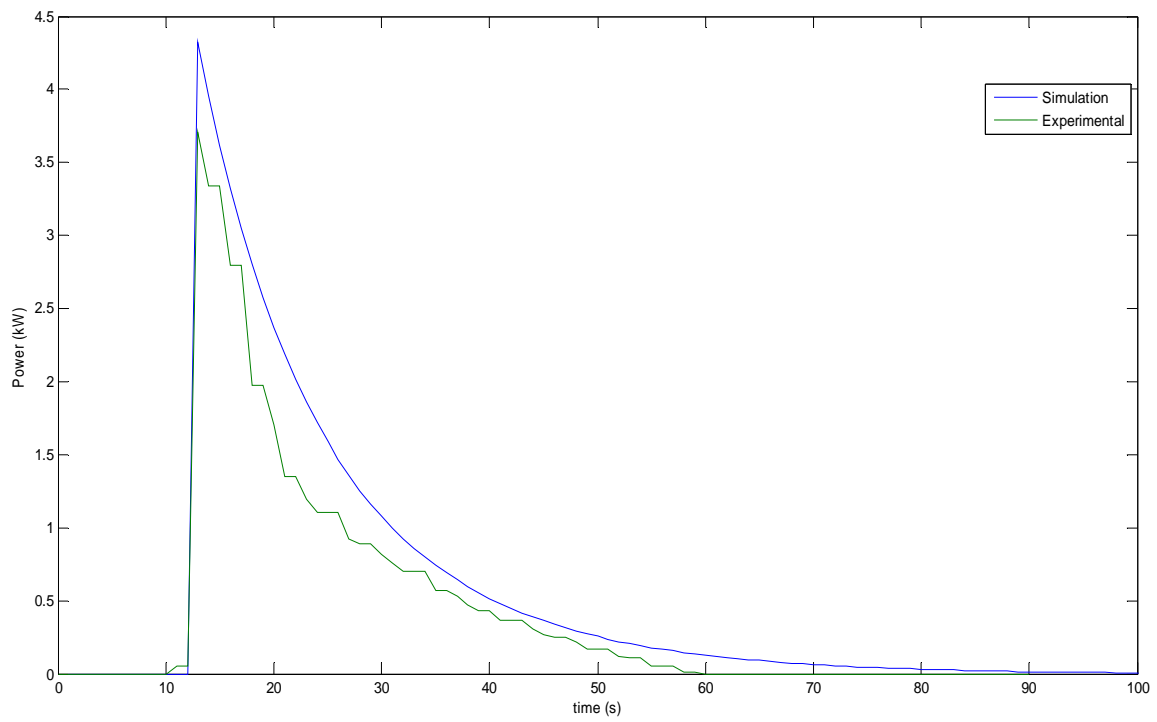
Παράμετροι δυναμικού μοντέλου μηχανικών καθυστερήσεων



Σχήμα 7.21

Πειραματική επιβεβαίωση απόκρισης ισχύος μοντέλου μηχανικών καθυστερήσεων κυψέλης καυσίμου

Αντίστοιχα, στο σχήμα 7.22 φαίνεται η απόκριση ισχύος της βοηθητικής διάταξης του μοντέλου σε αντιπαράθεση με αυτήν της πειραματικής διάταξης. Παρά το γεγονός ότι υπάρχει μία απόκλιση λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών των δύο βοηθητικών διατάξεων, οι αποκρίσεις είναι παρόμοιες.



Σχήμα 7.22

Απόκριση βοηθητικής διάταξης (Προσομοίωση - Πείραμα)

8 Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα

8.1 Κυριότερα συμπεράσματα εργασίας

Στη παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώθηκε η λειτουργία ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ΑΠΕ – υδρογόνου μέσω ενός δυναμικού μοντέλου διακριτού χρόνου που υλοποιήθηκε στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB. Πιο συγκεκριμένα, μία ανεμογεννήτρια και μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια χρησιμοποιήθηκαν ως κύριες ενεργειακές πηγές, ενώ μία κυψέλη καυσίμου σε συνδυασμό με μία συστοιχία υπερπυκνωτών χρησιμοποιήθηκαν για να καλύψουν 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. Η διαστασιολόγηση τους έγινε με βάση τη μέθοδο της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας (μέθοδος LPSP), χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα για τις χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου – ηλιακής ακτινοβολίας και για την ημερήσια καμπύλη φορτίου. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν τρία σενάρια διαστασιολόγησης με διαφορετικό δείκτη αξιοπιστίας και μετά από μία ανάλυση κόστους επιλέχθηκε η βέλτιστη λύση, η οποία αντιστοιχούσε στο σενάριο υψηλής αξιοπιστίας. Η λύση αυτή προέκυψε για τη συγκεκριμένη τιμή του κόστους μη τροφοδοτούμενης ενέργειας που θεωρήθηκε στην παρούσα εργασία. Παρόλα αυτά, το κόστος της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας ποικίλει ανάλογα με το είδος της εφαρμογής και επομένως η λύση ενός τέτοιου προβλήματος δεν είναι μονοσήμαντη. Τέλος, η επιλεγθείσα διαστασιολόγηση επαληθεύτηκε με την προσομοίωση του συστήματος σε ετήσια βάση με το λογισμικό HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables).

Ο έλεγχος του συστήματος περιλαμβάνει τον έλεγχο MPPT των κύριων ενεργειακών πηγών, καθώς και το διαχειριστικό έλεγχο του συστήματος. Ο ελεγκτής MPPT της ανεμογεννήτριας βασίστηκε στην ασαφή λογική, ενώ ο ελεγκτής MPPT της φωτοβολταϊκής γεννήτριας βασίστηκε στη μέθοδο των συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων. Ο διαχειριστικός έλεγχος υλοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός βασικού ελεγκτή, ο οποίος εκτελούσε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο. Η διαμόρφωση του διαχειριστικού αλγορίθμου δε βασίστηκε μόνο στο ισοζύγιο παραγωγής – ζήτησης, αλλά δόθηκε μεγάλη έμφαση στην ασφαλή και αποδοτική λειτουργία των τεχνολογιών υδρογόνου. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε μία εκτενής βιβλιογραφική έρευνα για τον προσδιορισμό των λειτουργικών περιορισμών των κυψελών καυσίμου και των ηλεκτρολυτών. Εξετάστηκαν θέματα, όπως η διάρκεια ζωής των συσκευών, η υποβάθμιση της απόδοσης τους με το χρόνο, οι επιπτώσεις της διακοπτικής λειτουργίας τους, η ενεργειακή τους απόδοση σε σχέση με την εκάστοτε φόρτιση, η δυναμική απόκριση της κυψέλης καυσίμου σε μεταβατικά φορτία κτλ.

Αρχικά, η αξιολόγηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με την προσομοίωση της λειτουργίας του κατά τη διάρκεια ενός 24ωρου. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα, οι κύριοι στόχοι που επιτεύχθηκαν είναι οι εξής:

- Αδιάλειπτη παροχή ισχύος στο φορτίο (100% αυτονομία).
- Διαχείριση της παραγόμενης και αποθηκευμένης ενέργειας (energy management).
- Αποφυγή χρήσης κυψέλης καυσίμου σε διακοπτική λειτουργία.
- Κάλυψη ελλειμμάτων ισχύος που οφείλονται σε καθυστερήσεις της κυψέλης καυσίμου από τους υπερπυκνωτές.
- Ασφαλής χρήση του ηλεκτρολύτη.
- Ποιότητα ισχύος στο ζυγό ΣΡ.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η δυναμική απόκριση του συστήματος σε μεταβατικά φαινόμενα και αξιολογήθηκε ο ρόλος των υπερπυκνωτών στην εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Οι βασικοί λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιήθηκαν υπερπυκνωτές στο υπό μελέτη σύστημα είναι οι εξής:

- Κάλυψη ελλειμμάτων ισχύος που οφείλονται σε καθυστερήσεις της κυψέλης καυσίμου.
- Καλύτερη σταθεροποίηση τάσης στο ζυγό ΣΡ.
- Μείωση της καταπόνησης της κυψέλης καυσίμου σε μεταβατικά φορτία.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις σε μία εργαστηριακή συστοιχία κυψελών καυσίμου τόσο στη μόνιμη όσο και στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Εξήχθησαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης – ρεύματος, ισχύος – ρεύματος και απόδοσης – ρεύματος της συστοιχίας και μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της. Εξετάζοντας τη δυναμική απόκριση ενός συστήματος κυψέλης καυσίμου – μπαταριών, παρατηρήθηκε καθυστέρηση στην απόκριση ισχύος της κυψέλης που οφείλεται κυρίως σε ηλεκτροχημικά και μηχανικά φαινόμενα και αξιολογήθηκε η συνεισφορά των μπαταριών. Τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση της δυναμικής απόκρισης του μοντέλου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

8.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Τα τελευταία χρόνια, γίνεται ολοένα και ισχυρότερη η πεποίθηση για τη διάδοση των καθαρών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η κατασπατάληση των φυσικών ενεργειακών πόρων κατέστησαν το υδρογόνο ως τον πιο πιθανό μελλοντικό αντικαταστάτη των συμβατικών καυσίμων. Η χρησιμοποίηση του υδρογόνου σε συνδυασμό με άλλες ενεργειακές πηγές, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, έστρεψε το ενδιαφέρον της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας προς τα υβριδικά συστήματα παραγωγής. Διάφορες εφαρμογές που συνδυάζουν το υδρογόνο με άλλες ΑΠΕ συναντώνται στη βιβλιογραφία. Τα καινοτομικά στοιχεία που περιλαμβάνει η παρούσα διπλωματική εργασία είναι τα εξής:

- Ανάπτυξη ενός μοντέλου που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός ολοκληρωμένου σταθμού παραγωγής ΑΠΕ – υδρογόνου και των απαραίτητων ελεγκτών για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος.
- Διαστασιολόγηση του συστήματος με χρήση του αλγορίθμου LPSP και του λογισμικού HOMER.
- Δημιουργία αλγορίθμου διαχείρισης με στόχους την αξιοπιστία του συστήματος και την ασφαλή και αποδοτική χρήση των τεχνολογιών υδρογόνου.
- Χρήση υπερπυκνωτών και αξιολόγηση της συμβολής τους στο ισοζύγιο ισχύος, στη μείωση της καταπόνησης της κυψέλης καυσίμου και στην ποιότητα ισχύος του ζυγού ΣΡ.
- Πειραματική επιβεβαίωση του δυναμικού μοντέλου της κυψέλης καυσίμου.

8.3 Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση αυτή της εργασίας αναδείχθηκαν τα ακόλουθα σημεία, τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης:

- Πειραματική επιβεβαίωση των ελεγκτών και υλοποίηση του προτεινόμενου υβριδικού συστήματος.
- Ανάπτυξη ενός μοντέλου που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός αντίστοιχου υβριδικού συστήματος που χρησιμοποιεί μπαταρίες για αποθήκευση αντί για υδρογόνο και σύγκριση των δύο συστημάτων σε θέματα αξιοπιστίας, κόστους, ενεργειακής απόδοσης, διάρκειας ζωής των συσκευών, δυναμικής απόκρισης σε μεταβατικά φορτία κτλ.
- Σύγκριση διαφορετικών μεθόδων σύνδεσης και ελέγχου των υπερπυκνωτών.
- Ετήσια προσομοίωση του συστήματος με πραγματικά δεδομένα για μία συγκεκριμένη θέση εγκατάστασης με στόχο την επιβεβαίωση της διαστασιολόγησης και του προτεινόμενου αλγορίθμου διαχείρισης.

Βιβλιογραφία

- [1] B.K. BOSE, “Global Warming: Energy, Environmental Pollution and the Impact of Power Electronics”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp. 6-17, Mar. 2010.
- [2] <http://www.eia.doe.gov/>
- [3] <http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi327.html>
- [4] Ε. ΒΡΕΤΤΟΣ, “Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών – Υδρογόνου”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2010.
- [5] Η. ΓΚΟΥΓΚΑΣ, “Ανάλυση λειτουργίας και ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2009.
- [6] Ε. ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΑΔΟΥ, “Ανάλυση - Λειτουργία Κυψελών Καυσίμου και Προσομοίωση Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC) για την Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2006.
- [7] T.K. BOSE, K. AGBOSSOU, M. KOLHE, J. HAMELIN, “Stand-Alone Renewable Energy System Based on Hydrogen Production”, Institut de recherche sur l’hydrogène, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada.
- [8] Μ. ΝΤΡΕΚΟ, “Ανάλυση Λειτουργίας και Έλεγχος Συστήματος Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών Διασυνδεδεμένης στο Δίκτυο”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2009.
- [9] Α. ΧΑΝΙΟΤΙΣ, Α. ΚΛΑΔΑΣ and J. ΤΕΓΟΠΟΥΛΟΣ, “Advanced harmonic permanent magnet generator model for energy efficient wind turbine control systems”, in *6th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion – Med Power 2008*.
- [10] Ι.Α. ΤΕΓΟΠΟΥΛΟΣ, “Ηλεκτρικές Μηχανές”, Εκδόσεις Συμμετρία, 1991.
- [11] Μ.Γ. ΣΑΥ, “Alternating Current Machines”, Longman Scientific & Technical, 1983.
- [12] Γ. ΚΤΕΝΙΔΗΣ, “Μελέτη Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας των 100 kW”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2008.
- [13] Μ.Ι. ΧΑΝ, Μ.Τ. ΙΚΒΑΛ, “Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system”, *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 421-439, 2005.

- [14] C. WANG, M. HASHEM NEHRIR, S.R. SHAW, “Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits”, *IEEE Trans. on energy conversion*, vol. 20, pp. 442-451, Jun. 2005.
- [15] Ν. ΛΥΜΠΕΡΟΠΟΥΛΟΣ, Ε. ΒΑΡΚΑΡΑΚΗ, Ε. ΖΟΥΛΙΑΣ, “Μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια”, *Ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς στην Ελλάδα – Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές*, ΤΕΕ, Αθήνα, 12-13 Ιαν., 2006.
- [16] O. ULLEBERG, “Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, pp. 21-33, 2003.
- [17] M. UZUNOGLU, O.C. ONAR, M.S. ALAM, “Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications”, *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 509-520, Mar. 2009.
- [18] H. GORGUN, “Dynamic modeling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, pp. 29-38, 2006.
- [19] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_double-layer_capacitor
- [20] M. EHSANI, Y. GAO, A. EMADI, “Modern electric, Hybrid electric and Fuel cell vehicles”, CRC Press, 2010.
- [21] http://www.maxwell.com/pdf/uc/datasheets/mc_power_series_48_1009365_rev_3.pdf
- [22] Α. ΧΑΝΙΩΤΗΣ, “Ανάπτυξη, προσομοίωση και κατασκευή συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια μόνιμων μαγνητών για απομονωμένη και διασυνδεδεμένη λειτουργία”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, 2007.
- [23] Σ.Ν. ΜΑΝΙΑΣ, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Εκδόσεις Συμεών, 2007.
- [24] Ν. ΜΟΗΑΝ, Τ.Α. ΟΝΔΕΛΑΝΔ, W.P. ΡΟΒΒΙΝΣ, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Εκδόσεις Τζιόλα, 1996.
- [25] Τ. ΜΟΝΑΙ, Ι. ΤΑΚΑΝΟ, Η. ΝΙΣΗΚΑΒΑ, Υ. ΣΑΒΑΔΑ, “A Collaborative Operation Method between New Energy-Type Dispersed power supply and EDLC”, *IEEE Trans. on energy conversion*, vol. 19, pp 590-598, Sep. 2004.
- [26] Μ. ΡΩΤΑ, “Σύγκριση Κλασσικού και Ελέγχου Βασισμένου σε Ασαφή Λογική Ανεμογεννήτριας Μονίμων Μαγνητών”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2008.
- [27] D.B. NELSON, M.H. NEHRIR, C. WANG, “Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems”, *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 1641-1656, 2006.

- [28] B.Z. BOROWY, Z.M. SALAMEH, “Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System”, *IEEE Trans. on energy conversion*, vol. 11, No. 2, pp 367-375, Jun. 1996.
- [29] Ε.Ν. ΔΙΑΛΥΝΑΣ, “Αξιοπιστία λειτουργίας συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2007.
- [30] S.R. VOSEN, J.O. KELLER, “Hybrid energy storage systems for stand-alone electric power systems: optimization of system performance and cost through control strategies”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 24, pp. 1139-1156, 1999.
- [31] Γ. ΤΖΑΜΑΛΗΣ, Ε. ΖΟΥΛΙΑΣ, Ε. ΣΤΑΜΑΤΑΚΗΣ, Ο. ΠΑΡΙΣΣΗ, Α. ΒΛΑΣΣΗΣ, “Τεχνολογίες υδρογόνου ως μέσο αύξησης της διείσδυσης των ΑΠΕ και ως μέσο κάλυψης ενεργειακών αναγκών στον τομέα των μεταφορών. Η μελέτη περίπτωσης της Μήλου”, *4^ο Εθνικό Συνέδριο: Η Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας προς ένα Φιλόδοξο και Αξιοπίστο Εθνικό Πρόγραμμα Δράσης*, Αθήνα, 10-12 Μαΐου, 2010.
- [32] <http://www.homerenergy.com/>
- [33] Κ. ΣΦΑΚΙΑΝΑΚΗΣ, “Εξομοίωση υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας συνδεδεμένου σε δίκτυο υψηλής τάσης”, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2009.
- [34] G.J.M. JANSSEN, E.F. SITTERS, A. PFRANG, “Proton-exchange-membrane fuel cells durability evaluated by load-on/off cycling”, *Journal of Power Sources*, Vol. 191, Issue 2, 15, pp. 501-509, Jun. 2009.
- [35] D. LIU, S. CASE, “Durability study of proton exchange membrane fuel cells under dynamic testing conditions with cyclic current profile”, *Journal of Power Sources*, Vol. 162, Issue 1, pp. 521-531, Nov. 2006.
- [36] FERREIRA, P.J., G.J. LA O', Y. SHAO-HORN, D. MORGAN, R. MAKHARIA, S. KOCHA and H. GASTEIGER, “Instability of Pt/C Electrocatalysts in Proton Exchange Membrane Fuel Cells: A Mechanistic Investigation”, *J. Electrochem. Soc.*, 152, A2256-A2271, 2005.
- [37] D. SEO, S. PARK, Y. JEON, S.W. CHOI, Y.G. SHUL, “Physical degradation of MEA in PEM fuel cell by on/off operation under nitrogen atmosphere”, *Korean J. Chem. Eng.*, Vol. 27, Issue 1, pp. 104-109, 2010.
- [38] Γ. ΜΕΞΗΣ, “Τεχνικές Προσομοίωσης Συστημάτων Κυψελών Υδρογόνου”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2006.
- [39] D. GEORGAKIS, S. PAPATHANASSIOU, “Modeling of grid-connected fuel cell plants”, School of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens.

- [40] T.F. EL-SHATTER, M.N. ESKANDER, M.T. EL-HAGRY, “Energy flow and management of a hybrid wind/PV/fuel cell generation system”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, Issues 9-10, pp. 1264-1280, Jun. 2006.
- [41] K. AGBOSSOU, M. KOLHE, J. HAMELIN, T.K. BOSE, “Performance of a Stand-Alone Renewable Energy System Based on Energy Storage as Hydrogen”, *IEEE Trans. on energy conversion*, vol. 19, No. 3, pp 633-640, Sep. 2004.
- [42] F. BARBIR, “PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources”, *Solar Energy*, Vol. 78, pp. 661–669, 2005.
- [43] T. ZHOU, B. FRANCOIS, “Modeling and control design of hydrogen production process for an active hydrogen/wind hybrid power system”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, Issue 1, pp. 21-30, Jan. 2009.
- [44] E. KOUTROULIS, K. KALAITZAKIS, N.C. VOULGARIS, “Development a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System”, *IEEE Trans. on power electronics*, vol. 16, No. 1, pp 46-54, Jan. 2001.
- [45] C. PATSIOS, A. CHANIOTIS, A. KLADAS, “A Hybrid Maximum Power Point Tracking System for Grid-Connected Variable Speed Wind-Generators”, *Power Electronics Specialists Conference 2008, PESC08*, June 15-19, 2008 Rhodes, Greece.
- [46] E. KOUTROULIS, K. KALAITZAKIS, “Design of a maximum power point tracking system for Wind-Energy-Conversion applications”, *IEEE Trans. on industrial electronics*, vol. 53, No. 2, pp 486-495, Apr. 2006.
- [47] Θ. ΖΑΧΜΑΝΟΓΛΟΥ, Α. ΖΑΧΜΑΝΟΓΛΟΥ, “Τεχνολογίες κυψελών καυσίμου για την ηλεκτροκίνηση των οχημάτων”, *Ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς στην Ελλάδα – Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές*, ΤΕΕ, Αθήνα, 12-13 Ιαν., 2006.