



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

Σχεδιασμός και Έλεγχος Λειτουργίας Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικολέττα Σ. Παπαλουκά

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής

Αθήνα, Νοέμβριος 2011



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

Σχεδιασμός και Έλεγχος Λειτουργίας Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικολέττα Σ. Παπαλουκά

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή το Νοέμβριο 2011.

.....

Αντώνιος Γ. Κλαδάς

.....

Στ. Ν. Μανιάς

.....

Στ. Παπαθανασίου

Αθήνα, Νοέμβριος 2011

.....

Νικολέττα Παπαλουκά

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

Copyright © Νικολέττα Παπαλουκά 2011.

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

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται ένα δυναμικό μοντέλο που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός αυτόνομου υβριδικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συνδυάζει ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τεχνολογίες υδρογόνου. Μία ανεμογεννήτρια και μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια αποτελούν τις κύριες ενεργειακές πηγές του συστήματος, ενώ μία κυψέλη καυσίμου σε συνδυασμό με μια συστοιχία υπερπυκνωτών χρησιμοποιούνται για να καλύψουν τη διακύμανση της παραγόμενης ισχύος. Προκειμένου να αξιοποιηθούν στο μέγιστο οι δυνατότητες του συστήματος χρησιμοποιήθηκε μία μονάδα ηλεκτρόλυσης σε συνδυασμό με μία δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου για να απορροφήσει την περίσσεια ισχύος και να την αποθηκεύσει υπό μορφή υδρογόνου. Η διασύνδεση των επιμέρους υποσυστημάτων και η διαχείριση της ισχύος πραγματοποιούνται μέσω ενός κοινού ζυγού συνεχούς ρεύματος. Τα υποσυστήματα μοντελοποιούνται αναλυτικά με μαθηματικές εξισώσεις και δίνεται μεγάλη έμφαση στη δυναμική συμπεριφορά τους. Έπειτα, διαστασιολογείται το σύστημα με χρήση πραγματικών δεδομένων για τις χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου – ηλιακής ακτινοβολίας και την ημερήσια καμπύλη φορτίου. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται διαστασιολόγηση εναλλακτικών τοπολογιών υβριδικών συστημάτων και συγκρίνονται με βάση τα οικονομικά αποτελέσματα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Στη συνέχεια, αναπτύσσεται ο διαχειριστικός έλεγχος του συστήματος που βασίζεται στην ασαφή λογική. Ο έλεγχος λαμβάνει υπόψη το ισοζύγιο παραγωγής – ζήτησης και δίνει έμφαση στην ποιότητα της παραγόμενης ισχύος. Παράλληλα εξασφαλίζει την αποδοτική και οικονομική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τη διάρκεια ζωής της και μειώνοντας το μέσο κόστος λειτουργίας του συστήματος. Ακόμα, λαμβάνει υπόψη θέματα ενεργειακής απόδοσης, καθώς και περιορισμούς ασφαλείας στη λειτουργία του ηλεκτρολύτη. Η συμπεριφορά του συστήματος μελετάται στο χρονικό ορίζοντα ενός 24ώρου. Προτείνεται συγκεκριμένη τεχνική έλεγχου της ροής ισχύος η οποία εξασφαλίζει ευσταθή λειτουργία και αδιάλειπτη παροχή ισχύος στο φορτίο. Τέλος αξιολογείται ο προτεινόμενος έλεγχος συγκριτικά με νετερμινιστικό έλεγχο που έχει αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία.

Λέξεις Κλειδιά

Διαχείριση ενέργειας, Υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας, αποθήκευση με υδρογόνο, κυψέλη καυσίμου, υπερπυκνωτές, ανεμογεννήτρια, φωτοβολταϊκή γεννήτρια, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, Ασαφής λογική

Abstract

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. Moreover, alternative topologies of hybrid systems are sized and evaluated based to their economical results.

The control system is based on fuzzy logic. The control system 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 long duration phenomena (24 hours). A particular control technique is proposed for power flow regulation ensuring both firm system performance and uninterrupted supply of load demand. Finally, the proposed control technique is evaluated in comparison with deterministic control technique that has been developed in references.

Key Words

Energy management, hybrid energy system, hydrogen storage, fuel cell, ultra-capacitors, wind energy, solar energy, power generation, fuzzy logic

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 Δρ. Χαράλαμπο Πάτσιο για τη συνεχή υποστήριξη και βοήθεια του και την εξαιρετική συνεργασία μας κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	Εισαγωγή	11
1.1	Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	11
1.2	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	11
1.3	Υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας	14
1.3.1	Εφαρμογές αυτόνομων υβριδικών συστημάτων	15
1.3.2	Εφαρμογές αυτόνομων υβριδικών συστημάτων με χρήση τεχνολογιών υδρογόνου	16
1.4	Δομή διπλωματικής εργασίας	18
2	Συνιστώσες Υβριδικού Συστήματος	20
2.1	Ανεμογεννήτρια	20
2.1.1	Αεροδυναμικό μέρος	20
2.1.2	Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών	22
2.2	Φωτοβολταϊκή γεννήτρια	23
2.2.1	Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκής γεννήτριας	23
2.3	Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC)	24
2.3.1	Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου	25
2.3.2	Δομή της κυψέλης	26
2.3.3	Υποσυστήματα κυψέλης καυσίμου	28
2.4	Ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων και δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου	29
2.4.1	Εισαγωγή	29
2.4.2	Αρχή λειτουργίας ηλεκτρολύτη	30
2.4.3	Βοηθητικά υποσυστήματα ηλεκτρολύτη και δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου	31
2.5	Υπερπυκνωτής	32
2.6	Ελεγχόμενο φορτίο	33
2.7	Μετατροπέας συνεχούς ρεύματος	34
2.7.1	Μετατροπέας ανύψωσης τάσης συνεχούς ρεύματος (Boost DC –DC Converter)	35
2.7.2	Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης συνεχούς ρεύματος (Step - Down DC-DC Converter)	37

2.7.3	Αμφίδρομος μικτός μετατροπέας συνεχούς ρεύματος (Bidirectional Bunk – Boost Converter)	38
2.8	Σύνοψη	39
3	Μοντελοποίηση Συνιστωσών Υβριδικού Συστήματος	40
3.1	Μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας.....	40
3.2	Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκής γεννήτριας	41
3.3	Μοντελοποίηση κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων	42
3.4	Μοντελοποίηση ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων	52
3.5	Μοντελοποίηση δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου	54
3.6	Μοντελοποίηση υπερπυκνωτή	55
3.7	Μοντελοποίηση μετατροπέα συνεχούς ρεύματος	56
4	Διαστασιολόγηση συνιστωσών και κόστος κτήσης υβριδικού συστήματος	57
4.1	Εισαγωγή	57
4.2	Διαστασιολόγηση συστήματος με τη μέθοδο LPSP	57
4.2.1	Μέθοδος LPSP	58
4.2.2	Αποτελέσματα μεθόδου LPSP για τη διαστασιολόγηση της μονάδας αποθήκευσης	59
4.3	Ανάλυση κόστους	62
4.3.1	Στοιχεία ανάλυσης κόστους	62
4.3.2	Αποτελέσματα ανάλυσης κόστους.....	64
4.4	Διαστασιολόγηση του συστήματος με το λογισμικό HOMER.....	65
4.4.1	Δομή του συστήματος και δεδομένα προσομοίωσης	65
4.4.2	Προσομοίωση του συστήματος	67
4.5	Συγκριτική παρουσίαση διαφορετικών τοπολογιών υβριδικών συστημάτων.....	71
4.5.1	Προσομοίωση των συστημάτων	72
4.5.2	Συμπεράσματα	75
5	Λειτουργικοί περιορισμοί και κόστος τεχνολογιών υδρογόνου και συνιστωσών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	76
5.1	Εισαγωγή	76
5.2	Λειτουργικοί περιορισμοί κυψέλης καυσίμου	76
5.2.1	Δυναμική απόκριση σε μεταβατικά φαινόμενα	78
5.2.2	Απόδοση κυψέλης καυσίμου	83
5.2.3	Κόστος λειτουργίας κυψέλης καυσίμου	85

5.3	Λειτουργικοί περιορισμοί ηλεκτρολύτη PEM	86
5.3.1	Διακοπτόμενη λειτουργία και κυμάτωση ισχύος	86
5.3.2	Σύστημα διαχείρισης νερού και κατανάλωση νερού	86
5.3.3	Θερμοκρασία ηλεκτρολύτη	87
5.3.4	Πίεση	88
5.3.5	Παραγωγή οξυγόνου	88
5.3.6	Απόδοση	88
5.3.7	Διάρκεια ζωής και υποβάθμιση της απόδοσης με το χρόνο (degradation) ...	89
5.4	Λειτουργικοί περιορισμοί υπερπυκνωτή	90
5.5	Σύνοψη	90
6	Μεθοδολογίες Ελέγχου Υβριδικών Συστημάτων	91
6.1	Εισαγωγή	91
6.2	Στρατηγικές ελέγχου	91
6.3	Συμπεράσματα	98
7	Προτεινόμενη στρατηγική διαχειριστικού ελέγχου υβριδικού συστήματος βασιζόμενη σε ασαφή λογική	99
7.1	Εισαγωγή	99
7.2	Διάταξη και περιγραφή του συστήματος	99
7.3	Θεωρητική ανάλυση και βασικές έννοιες ασαφούς λογικής	101
7.3.1	Ασαφές σύνολο και συνάρτηση συμμετοχής	101
7.3.2	Πράξεις ασαφούς λογικής	103
7.3.3	Ασαφείς κανόνες (fuzzy rules)	103
7.3.4	Βασική δομή της ασαφούς λογικής	104
7.3.5	Πλεονεκτήματα ασαφούς λογικής	106
7.4	Διαχειριστικός έλεγχος του συστήματος	106
7.4.1	Σκοπός διαχειριστικού ελέγχου	106
7.4.2	Αλγόριθμος λειτουργίας διαχειριστικού ελέγχου.	108
7.4.3	Σχεδιασμός του βασικού ελεγκτή με βάση την ασαφή λογική	111
7.4.4	Τοπικοί ελεγκτές του συστήματος	117
7.5	Συμπεράσματα	123
8	Προσομοίωση λειτουργίας συστήματος με τον προτεινόμενο έλεγχο και σύγκριση με υφιστάμενη τεχνική ελέγχου	124
8.1	Εισαγωγή	124

8.2	Προσομοίωση λειτουργίας υβριδικού συστήματος	124
8.3	Σύγκριση της απόκρισης υβριδικού συστήματος με βάση υφιστάμενη ντετερμινιστική τεχνική ελέγχου.....	135
8.4	Συμπεράσματα υλοποίησης προσομοίωσης με βάση την στρατηγική ελέγχου της παρούσας εργασίας	141
9	Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα	143
9.1	Κυριότερα συμπεράσματα.....	143
9.2	Σημεία προαγωγής της επιστήμης.....	145
9.3	Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση.....	145
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	146
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	152

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εντάσσεται στο γενικότερο ερευνητικό πεδίο των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και αποθήκευσης ενέργειας. Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη κατάλληλου ελέγχου ενός υβριδικού συστήματος βασισμένο στην ασαφή λογική που αποτελείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε συνδυασμό με κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιώντας βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες συνιστώσες αποθήκευσης κατάλληλο για αυτόνομη λειτουργία. Το υπό εξέταση σύστημα περιλαμβάνει ανεμογεννήτρια μονίμων μαγνητών – μεταβλητών στροφών, φωτοβολταϊκή γεννήτρια, συστοιχία κυψελών καυσίμου, μονάδα ηλεκτρόλυσης, δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου, συστοιχία υπερπυκνωτών, και ελεγχόμενο φορτίο. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται και μοντελοποιούνται τα επιμέρους υποσυστήματα των συνιστωσών. Επιχειρείται κατάλληλη διαστασιολόγηση με βάση τα κόστη του συστήματος. Προτείνονται ελεγκτές βασισμένοι σε ασαφή λογική προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία των επιμέρους υποσυστημάτων αλλά και η διαχείριση ολόκληρου του συστήματος. Τέλος προσομοιώνεται η λειτουργία του συστήματος σε εικοσιτετράωρη χρονική κλίμακα και συγκρίνεται με την λειτουργία του όταν χρησιμοποιείται ντετερμινιστική μέθοδος ελέγχου που έχει αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία.

1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η θέρμανση χώρων, καθώς και η λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων αποτελούν μερικές από τις κύριες ανάγκες του 21ου αιώνα που ικανοποιούνται κατά κύριο λόγο από τη χρησιμοποίηση ορυκτών καυσίμων που αποτελούν τις κύριες πηγές κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη. Για το λόγο αυτό έχουν σημαντικό μερίδιο ευθύνης σε μια σειρά από περιβαλλοντικά προβλήματα με κυριότερα το φαινόμενο του θερμοκηπίου και των κλιματικών αλλαγών. Συνεπώς είναι αναμενόμενο ότι η ανάγκη για ενέργεια θα αυξάνεται συνεχώς αφού ο πληθυσμός της γης αυξάνεται με ταχύτατους ρυθμούς αλλά και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου του ανθρώπου πολλαπλασιάζει τις δραστηριότητές του οι οποίες τελικά απαιτούν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας προς κατανάλωση.

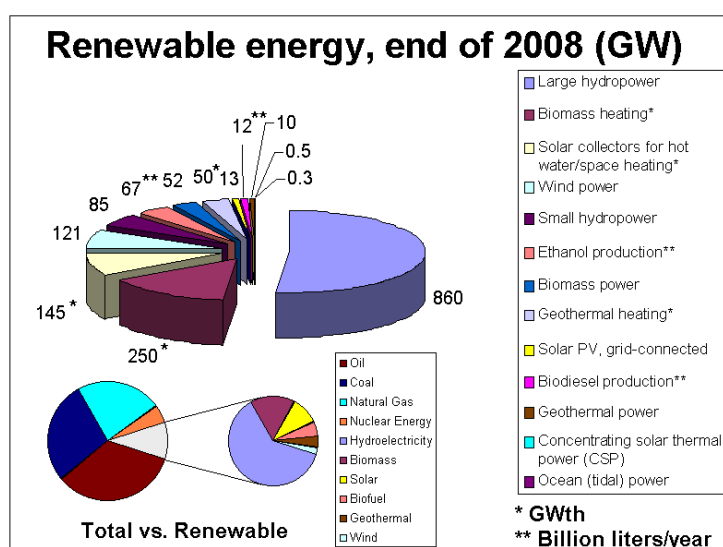
Για τους παραπάνω λόγους χρησιμοποιούνται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) όπως η αιολική, η ηλιακή, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμική, η ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων, η παλιρροϊκή ενέργεια, η βιομάζα και τα βιοαέρια. Στις ΑΠΕ η ενέργεια που αντλείται ανανεώνεται, άρα δεν εξαντλούνται ή αντικαθίστανται, και διεκδικούν δίκαια μία θέση ανάμεσα στις συμβατικές μορφές (πετρέλαιο, βενζίνη, άνθρακας) για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του πλανήτη μιας και ποσοτικά τουλάχιστον επαρκούν. Ενώ τα αποθέματα των συμβατικών μορφών ενέργειας φαίνεται να αποκτούν με τον καιρό ημερομηνία λήξης, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ανανεώνονται μέσω του κύκλου της φύσης και θεωρούνται πρακτικά **ανεξάντλητες**.

Για πολλές χώρες οι ΑΠΕ αποτελούν μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο συμβάλλοντας στη **μείωση της**

εξάρτησης από το ακριβό εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Μπορούν να συμβάλλουν στην ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών αποτελώντας την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου. Οι ΑΠΕ αποτελούν ευέλικτες εφαρμογές που μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του εγχώριου πληθυσμού καταργώντας με αυτό τον τρόπο την ανάγκη για τεράστιες μονάδες ενεργειακής παραγωγής αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Παράλληλα, συμβάλλουν στη **βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος** καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο κλάδος που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

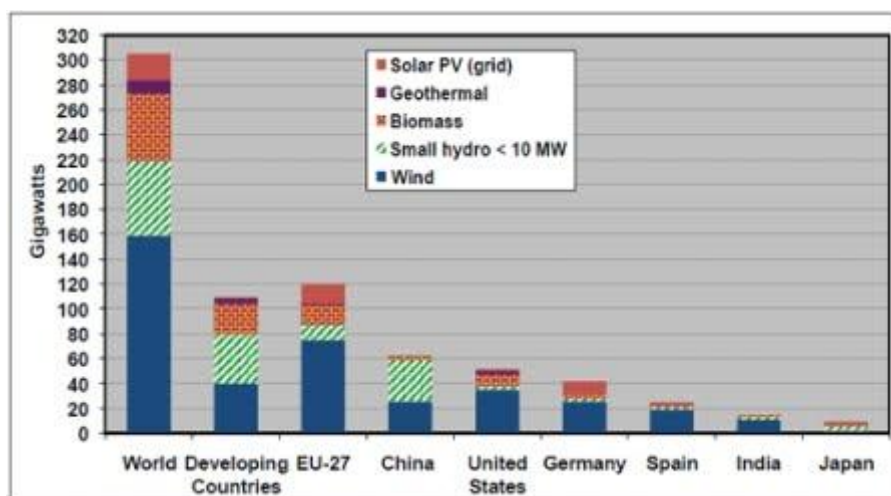
Από τεχνικής πλευράς το δυναμικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (δηλαδή η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αντληθεί από την φυσική προσφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με χρήση των υπαρχουσών τεχνολογιών) είναι πολύ μεγαλύτερο από την παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση. Ωστόσο, τόσο το θεωρητικό δυναμικό όσο και τεχνολογικό δυναμικό δεν αντιστοιχούν στο οικονομικά διαθέσιμο δυναμικό από τη στιγμή που θα ληφθούν υπόψη τεχνολογικοί, περιβαλλοντικοί και οικονομικοί παράγοντες. Παρόλα αυτά το κόστος των εφαρμογών ήπιων μορφών ενέργειας ελαττώνεται διαρκώς τα τελευταία είκοσι έτη και ιδίως η αιολική και υδροηλεκτρική ενέργεια αλλά και η βιομάζα είναι δυνατόν πλέον να ανταγωνίζονται τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας, όπως ο άνθρακας και η πυρηνική ενέργεια.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) είναι επομένως ελκυστικές για λόγους ενεργειακού εφοδιασμού καθώς και για περιβαλλοντικούς και γεωπολιτικούς λόγους, καθώς θεωρητικά μπορούν να παρέχουν ασφαλή, καθαρό και προσιτό στις τιμές ενεργειακό εφοδιασμό με χρήση των ενδογενών πηγών χωρίς να απειλείται η εξωτερική διακοπή και η εξάντληση των αποθεμάτων. Η χρήση ΑΠΕ μπορεί να αποφέρει επιπρόσθετα οικονομικά οφέλη σε αυτόν που θα δεσμεύσει το ενεργειακό τους δυναμικό. Απαραίτητη προϋπόθεση βέβαια αποτελεί η αξιόπιστη σύνδεση μεταξύ της υπάρχουσας τεχνολογίας και των ΑΠΕ με απώτερο στόχο το μεγαλύτερο δυνατό ενεργειακό κέρδος όπου αυτό είναι εφικτό.



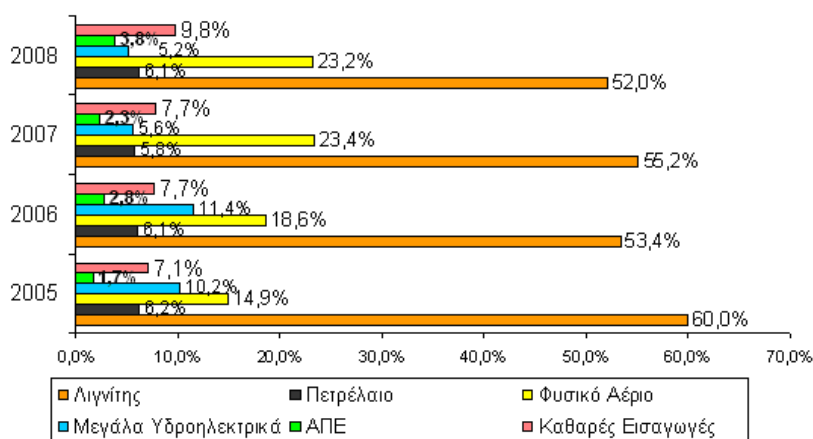
Σχήμα 1.1 : Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ σε GW στο τέλος του 2008

Στο σχ. 1.1 παρατίθεται η συνεισφορά των ΑΠΕ στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η κατανομή των διαφόρων μορφών για το έτος 2008 [2]. Αντίστοιχα στο σχ. 1.2 παρατίθεται η αξιοποίηση των ΑΠΕ σε παγκόσμιο επίπεδο ανάλογα με τη χώρα [3].



Σχήμα 1.2 : Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ σε GW το έτος 2010 ανά χώρα

Η Ελλάδα αποτελεί ιδανικό τόπο για ευρεία χρήση των ΑΠΕ. Τα ιδιαίτερα φυσικά χαρακτηριστικά της σε συνδυασμό με τα ποικιλόμορφα κλιματολογικά στοιχεία της ικανοποιούν την αναγκαία συνθήκη για την ανάπτυξη κάθε εφαρμογής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [94]. Στο σχ. 1.3 παρατίθενται κάποια στατιστικά στοιχεία που καταδεικνύουν τη διεξόδυση των ΑΠΕ στην Ελλάδα [3].



Σχήμα 1.3 : Συμμετοχή μονάδων ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα

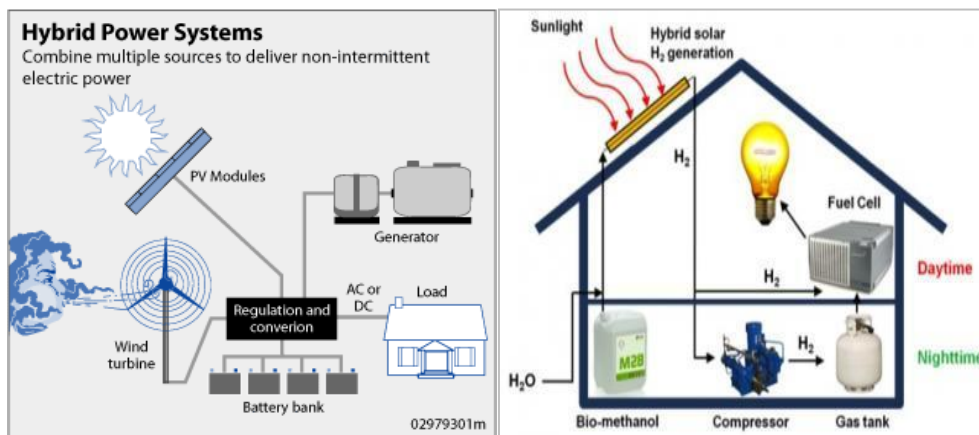
Ενδεικτικά, σύμφωνα με μελέτη για τις ανανεώσιμες πηγές στη Μεσόγειο, η οικονομικά εκμεταλλεύσιμη παραγωγή ηλεκτρισμού στην Ελλάδα από κάθε μορφής ΑΠΕ ανέρχεται σε 55.000 GWh το χρόνο, ενώ το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό υπερβαίνει τις 218.000 GWh [14]. Παρατηρώντας τα ανωτέρω στοιχεία, αναμένεται περαιτέρω ανάπτυξη των ΑΠΕ τα επόμενα χρόνια δημιουργώντας νέα δεδομένα στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής τόσο στην Ελλάδα όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η παγκόσμια τάση προσανατολίζεται στην αξιοποίηση ποικίλων ενεργειακών πηγών που θα ενσωματώνονται σε ένα ενιαίο υβριδικό σύστημα.

1.3 Υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας

Ο στοχαστικός χαρακτήρας πολλών μορφών ΑΠΕ θέτει ορισμένους τεχνικοοικονομικούς και λειτουργικούς περιορισμούς κατά τη χρήση τους για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Για παράδειγμα η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας προϋποθέτει τη χρήση αποθηκευτικών μέσων εξαιτίας των διακυμάνσεων στη διάθεσή της. Το ίδιο ισχύει και για την αιολική ενέργεια, η οποία δεν παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα και προβλεψιμότητα στη χρήση της. Τα παραπάνω θέματα έχουν οδηγήσει στην έρευνα και ανάπτυξη των υβριδικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία ορίζονται ως εκείνα τα συστήματα παραγωγής ενέργειας τα οποία περιλαμβάνουν περισσότερες από μία ηλεκτρικές γεννήτριες διαφορετικής τεχνολογίας ως προς το εν χρήσει καύσιμο.

Ο συνδυασμός διαφορετικών αλλά συμπληρωματικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας βασιζόμενων σε ΑΠΕ ή και σε συνδυασμούς ανανεώσιμων και μη (όπως ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη) πηγών ενέργειας είναι γνωστός ως υβριδικό σύστημα ενέργειας (σχ. 1.4). Συνήθως τα υβριδικά συστήματα περιλαμβάνουν δύο ή περισσότερες ΑΠΕ συνδυασμένες με συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας όπως είναι οι νηζελογεννήτριες. Τα συνηθέστερα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες, οι ανεμογεννήτριες, οι υδροηλεκτρικές γεννήτριες σε ποτάμια και η βιομάζα. Συνήθως στο σύστημα προστίθεται και μία ηλεκτρογεννήτρια με συμβατικά καύσιμα, μπαταρίες ή και γεννήτριες μετατροπής για μεγαλύτερη αξιοπιστία [6]. Επίσης αρκετά συστήματα έχουν τη δυνατότητα είτε της άμεσης χρησιμοποίησης της ενέργειας που παράγεται από τις ΑΠΕ είτε της αποθήκευσής της σε διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας, όπως είναι οι συσσωρευτές.



Σχήμα 1.4 : Παράδειγμα υβριδικών συστημάτων ενέργειας [10][11]

Τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας χαρακτηρίζονται γενικά ως **δυναμικά συστήματα** καθώς είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να εναλλάσσουν τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας ή και να τις συνδυάζουν ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να **εξαρτώνται κατά το ελάχιστο από τις μεταβολές των εξωγενών παραγόντων**, όπως το τοπικό δίκτυο, η ηλιοφάνεια, η ένταση του ανέμου, η ροή του νερού κ.τ.λ. [5].

Τα υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνουν τα εξής:

- Διασφαλίζουν την αξιοπιστία του συστήματος.

- Εκμεταλλεύονται τα καλύτερα χαρακτηριστικά της εκάστοτε τεχνολογίας που χρησιμοποιείται και με αυτό τον τρόπο διασφαλίζουν υψηλή απόδοση.
- Ικανοποιούν το φορτίο ακόμα και σε περίπτωση χαμηλού ανανεώσιμου δυναμικού.
- Συμβάλλουν στη διαφοροποίηση των ενεργειακών πηγών αποφεύγοντας με αυτό τον τρόπο την εξάρτηση από συγκεκριμένες ενεργειακές πηγές.
- Επιτυγχάνουν τη μειωμένη κατανάλωση καυσίμου στην περίπτωση των συμβατικών μονάδων καθώς αυτές χρησιμοποιούνται σε σχετικά σταθερό φορτίο σε σύγκριση με συστήματα που περιλαμβάνουν μόνο τις αντίστοιχες μονάδες συμβατικής τεχνολογίας.

Τα υβριδικά συστήματα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες : στα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο και στα αυτόνομα υβριδικά συστήματα.

Τα **διασυνδεδεμένα στο δίκτυο** υβριδικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να εγκαθίστανται είτε αποκλειστικά για την παραγωγή ενέργειας σε μόνιμη βάση είτε ως συστήματα υποστήριξης σε περιπτώσεις διακοπής του ηλεκτρικού δικτύου είτε για τη σύνδεση σε ώρες αιχμής όταν η τιμή της kWh είναι υψηλή. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν μονάδες ΑΠΕ οι οποίες είτε διασυνδέονται απευθείας στο δίκτυο είτε αποθηκεύουν την ενέργεια τους σε μέσα αποθήκευσης προκειμένου αυτή να χρησιμοποιηθεί όταν είναι απαραίτητο. Συνήθως οι παράγοντες που επηρεάζουν το είδος της λειτουργίας των συστημάτων αυτών είναι η τιμή της παραγόμενης kWh από κάθε μορφή ΑΠΕ καθώς και το φορτίο που πρέπει να καλυφθεί.

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. Το αυτόνομο σύστημα απαιτείται να είναι σε θέση να παρέχει όλη την ενέργεια που ζητείται οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή να αποκόπτει το φορτίο, όταν αυτό δεν είναι εφικτό. Επιπλέον, οφείλει να έχει την ικανότητα ρύθμισης της συχνότητας και της παραγωγής άεργου ισχύος ώστε να ρυθμίζει την τάση του δικτύου. Όταν η ηλεκτρική παραγωγή από ΑΠΕ ξεπερνά το φορτίο η περίσσεια ενέργειας πρέπει να αποθηκευτεί ή και να απορριφθεί με κάποιο τρόπο ώστε να μην προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα. Για τους παραπάνω λόγους, τα περισσότερα ΑΥΣ περιλαμβάνουν διατάξεις αποθήκευσης, συστήματα ελέγχου και συστήματα διαχείρισης φορτίου. Μία πρόσθετη δυνατότητα που παρέχουν τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα είναι η μελλοντική διασύνδεση με το δίκτυο.

1.3.1 Εφαρμογές αυτόνομων υβριδικών συστημάτων

Επειδή τα υβριδικά συστήματα ενέργειας μπορούν να παράγουν ενέργεια από μερικά W μέχρι μερικά χιλιάδες kW και παράλληλα να είναι φιλικά προς το περιβάλλον μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

Τα υβριδικά συστήματα εφαρμόζονται κατά κύριο λόγο για την **αδιάλειπτη λειτουργία** σημαντικών οικιακών και επαγγελματικών εφαρμογών ή εφαρμογών πρώτης ανάγκης όπως στρατιωτικές μονάδες, αεροδρόμια, νοσοκομεία, ηλεκτρικών ή ευαίσθητων φορτίων σε περιοχές όπου το κεντρικό δίκτυο παρουσιάζει προβλήματα. Ενδείκνυνται και για την ηλεκτροδότηση εξοχικών κατοικιών, το φωτισμό και τη σήμανση δρόμων, αεροδρομίων και

λιμένων . Επίσης προσφέρονται για αφαλάτωση νερού και για λειτουργία συστημάτων τηλεπικοινωνιών, τηλεμετρήσεων, συναγερμού κ.α. [5].

Συνήθως, τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα εφαρμόζονται σε **απομακρυσμένες περιοχές αποκομμένες από το δίκτυο**. Επειδή αυτές οι περιοχές δεν παρουσιάζουν μεγάλο φορτίο και συνήθως βρίσκονται μακριά από το υπάρχον δίκτυο καθίσταται αντιοικονομική η δημιουργία δικτύου για την ηλεκτροδότηση τέτοιων κοινοτήτων ή ακόμα και κατοικιών. Συνεπώς, σε αυτές τις περιπτώσεις η παροχή ενέργειας από υβριδικά συστήματα βασιζόμενα σε ΑΠΕ είναι πιο οικονομική και πιο φιλική προς το περιβάλλον. Η αύξηση της αξιοπιστίας αυτών των συστημάτων, οι ασήμαντες απώλειες μεταφοράς και η χρήση αιεφόρων πηγών ενέργειας είναι σημαντικοί παράγοντες για να αποτελέσουν τα υβριδικά συστήματα την καλύτερη αποκεντρωμένη λύση. Εκτός από την αυτονομία παρέχεται και η δυνατότητα μελλοντικής σύνδεσης με το δίκτυο στις περιοχές όπου γίνεται η εγκατάστασή τους. Επιπλέον, λόγω της υψηλής αποδοτικότητάς τους και της αξιοπιστίας τους, τέτοιου τύπου συστήματα μπορούν να φανούν χρήσιμα ως μία αποτελεσματική λύση παροχής ισχύος σε περιπτώσεις διακοπών ή ακόμα και σε εξειδικευμένους καταναλωτές, όπως οι τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί και οι νοσοκομειακές μονάδες.

Στα υβριδικά συστήματα που προορίζονται για **οικιακή χρήση** είναι σύνηθες να συναντούνται υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών – θερμικής ισχύος (PV-T). Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται συλλέκτες που ενσωματώνουν σε ένα σώμα την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας για την κάλυψη όλων των αναγκών ενός κτιρίου [5].

Τα υβριδικά συστήματα που χρησιμοποιούνται στον **τομέα των μεταφορών** εφαρμόζονται κυρίως σε περιοχές όπου ο θόρυβος ή η μόλυνση από τις μηχανές εσωτερικής καύσης υπαγορεύουν τη χρήση τους. Συνήθως τα οχήματα αυτά λειτουργούν με συσσωρευτές. Οι κυψέλες καυσίμου επίσης προσφέρουν πλεονεκτήματα έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσης στην ηλεκτροκίνηση λόγω της ενεργειακής απόδοσής τους και της καθαρής ενέργειας. Τα συστήματα υδρογόνου έχουν τη δυνατότητα να φτάσουν το 60% της μέγιστης απόδοσης σε χαμηλές θερμοκρασίες. Κατά τη λειτουργία των οχημάτων η μετατροπή του υδρογόνου σε μηχανική ενέργεια παράγει μόνο νερό, γεγονός που συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος [7].

Τα υβριδικά συστήματα αποτελούνται από διαφορετικές τοπολογίες και μεγέθη συνιστωσών ανάλογα με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται.

1.3.2 Εφαρμογές αυτόνομων υβριδικών συστημάτων με χρήση τεχνολογιών υδρογόνου

Μία από τις εναλλακτικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας είναι η τεχνολογία που βασίζεται στο καύσιμο υδρογόνο. Το υδρογόνο βρίσκεται σε **αφθονία** στη φύση υπό τη μορφή χημικών ενώσεων και μιγμάτων και για το λόγο αυτό μπορεί να παρασκευαστεί με αρκετές μεθόδους από οποιαδήποτε χώρα από πλήθος πηγών συμπεριλαμβανομένων των ορυκτών καυσίμων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [7]. Η μετατροπή του υδρογόνου σε ηλεκτρισμό πραγματοποιείται με χημική αντίδραση με παραπροϊόντα νερό και έκλυση θερμότητας. Συνεπώς, το υδρογόνο είναι **καθαρό καύσιμο** και συμβάλλει στην μείωση του CO₂. Επίσης, το υδρογόνο έχει το **υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο** ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο. Άλλο ένα γεγονός που καθιστά τη

θέση του υδρογόνου σημαντική στην ενεργειακή παραγωγή είναι πως συμβάλλει στην **απεξάρτηση των οικονομιών από τα περιορισμένα σε ποσότητες ορυκτά καύσιμα**.

Η κυψέλη καυσίμου είναι η διάταξη που μετατρέπει άμεσα τη χημική ενέργεια μιας αντίδρασης σε ηλεκτρική και για αυτό το σκοπό χρησιμοποιεί κυρίως ως καύσιμο το υδρογόνο. Υπάρχουν αρκετοί τύποι διαθέσιμων κυψελών καυσίμου στο εμπόριο όπως η κυψέλη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFCs), η κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (solid oxide FCs), η αλκαλική κυψέλη καυσίμου (alkaline FCs) και η κυψέλη καυσίμου μεθανόλης (direct methanol FCs). Ανάμεσα στους διαφορετικούς τύπους κυψελών η τεχνολογία των PEMFC χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές.

Τα υβριδικά συστήματα που βασίζονται σε τεχνολογίες υδρογόνου θα χρησιμοποιούνται ευρέως στο άμεσο μέλλον ειδικά σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, αυτόνομων και απομονωμένων συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής. Η διαχείριση ενέργειας σε τέτοια συστήματα παίζει σημαντικό ρόλο καθώς πρέπει να επιτευχθεί εύρυθμη λειτουργία, που δεν επιδρά αρνητικά στη διάρκεια ζωής των συνιστωσών, και επιτυγχάνει υψηλή απόδοση.

1.3.2.1 Διατάξεις αποθήκευσης

Ένα από τα πιο σημαντικά θέματα που προκύπτουν σε περιπτώσεις υβριδικών συστημάτων, τα οποία περιλαμβάνουν ΑΠΕ και τεχνολογίες υδρογόνου, είναι η ανάγκη για διατάξεις αποθήκευσης. Σε αυτόνομα συστήματα η παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις δεδομένου ότι βασίζεται σε μη προβλέψιμα μετεωρολογικά δεδομένα. Συνεπώς, η μονάδα αποθήκευσης είναι σημαντική για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας και τη χρησιμοποίησή της, όταν υφίσταται έλλειμμα από ΑΠΕ. Σε συστήματα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο η ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση ανακύπτει από την ανάγκη κάλυψης των αιχμών ισχύος. Σε τέτοια συστήματα, η μονάδα αποθήκευσης προσθέτει αξία **στις διακοπτόμενες ανανεώσιμες πηγές** διευκολύνοντας τον καλύτερο συσχετισμό της τροφοδοσίας με τη ζήτηση. Η εφαρμογή των διατάξεων των ΑΠΕ παράλληλα με συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης παρέχει στις ανανεώσιμες πηγές ευελιξία εγκατάστασης με ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η ενεργειακή αποθήκευση διαδραματίζει επίσης έναν ευέλικτο και πολυπαραγοντικό ρόλο στο δίκτυο παροχής ηλεκτρισμού όσον αφορά στην αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων. Ως παραγωγική πηγή, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιφέρει **εξοικονόμηση στις λειτουργικές δαπάνες ή την επένδυση κεφαλαίων**. Επιπρόσθετα, η αποθήκευση της ενέργειας μπορεί να συνεισφέρει στη μείωση της έντασης στις μεμονωμένες γραμμές μεταφοράς που είναι κοντά στη μέγιστη ονομαστική τιμή, με τη μείωση του φορτίου αιχμής του υποσταθμού [9].

Οι διατάξεις αποθήκευσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Τις διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης οι οποίες χρησιμοποιούνται σε κατανεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής (όταν δηλαδή η παραγωγή λαμβάνει χώρα κοντά ή στην ίδια τη θέση της ζήτησης) και έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται στα αιτήματα ζήτησης για μικρά χρονικά διαστήματα.

- Τις διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης οι οποίες είναι κυρίως μεγάλες, κεντρικές εγκαταστάσεις και έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια για μεγάλες χρονικές περιόδους

Συνήθως, στα αυτόνομα υβριδικά συστήματα ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη καταναλωτών, όπως το σύστημα που θα εξεταστεί στην παρούσα διπλωματική εργασία, ως διατάξεις αποθήκευσης χρησιμοποιούνται υπερπυκνωτές, μπαταρίες και ηλεκτρολύτες, σε περιπτώσεις τεχνολογιών υδρογόνου. Σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης συνήθως χρησιμοποιούνται κυψέλες καυσίμου με αποθηκευτικές διατάξεις μπαταρίες ή υπερπυκνωτές. Σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής είναι συνήθεις οι συσσωρευτές ως διατάξεις αποθήκευσης ή ο συνδυασμός του ηλεκτρολύτη (μακροπρόθεσμη αποθήκευση) με μπαταρίες ή υπερπυκνωτές (βραχυπρόθεσμη αποθήκευση).

1.3.2.2 Διαστασιολόγηση και έλεγχος υβριδικών συστημάτων

Μείζονος σημασίας για την υλοποίηση των υβριδικών συστημάτων ενέργειας αποτελεί το θέμα του **οικονομικού κόστους του υβριδικού συστήματος**, τόσο του κόστους κτήσης όσο και του κόστους λειτουργίας. Ιδιαίτερα, οι διατάξεις των τεχνολογιών υδρογόνου έχουν αυξημένο κόστος κτήσης. Το υβριδικό σύστημα πρέπει να σχεδιαστεί κατάλληλα προκειμένου να ικανοποιήσει τη ζήτηση του καταναλωτή σε κάθε περίπτωση και ταυτόχρονα να έχει το δυνατότερο χαμηλό κόστος. Συνεπώς, η διαστασιολόγηση ενός συστήματος είναι σημαντική παράμετρος για την υλοποίησή του καθώς από αυτή εξαρτάται η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη πως εκτός από το οικονομικό κόστος υπάρχει και το περιβαλλοντικό κόστος το οποίο είναι εξίσου σημαντικό και στην περίπτωση των υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας χωρίς συμβατικές πηγές είναι μηδαμινό.

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του υβριδικού συστήματος πρέπει να ληφθούν υπόψη οι λειτουργικοί περιορισμοί των συνιστωσών προκειμένου να μην παρουσιάζονται προβλήματα στην παροχή της ισχύος, οι συνιστώσες να λειτουργούν κατά το δυνατόν αποδοτικότερα και η λειτουργία τους να μην επιδρά αρνητικά στο χρόνο ζωής τους. Προκειμένου λοιπόν να επιτευχθεί η **εύρυθμη λειτουργία του συστήματος** εφαρμόζονται πολλές διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης ελέγχου που ποικίλουν ανάλογα με το μέγεθος του συστήματος καθώς και την εφαρμογή για την οποία αυτό προορίζεται. Οι τεχνικές ελέγχου που εφαρμόζονται σε κάθε περίπτωση πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και τη συμπεριφορά των καταναλωτών, δηλαδή το είδος του φορτίου που θα τροφοδοτήσουν. Για το λόγο αυτό, οι παράμετροι ελέγχου μπορεί να διαφέρουν σε κάθε περίπτωση. Σε κάθε περίπτωση, για διαφορετικούς τύπους εφαρμογών, γίνεται διαφορετικός συμβιβασμός μεταξύ της πολυπλοκότητας του ελέγχου και της βέλτιστης απόκρισης του συστήματος [8].

1.4 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η εργασία αναπτύσσεται σε οχτώ κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται η συμβολή των υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας που περιλαμβάνουν ΑΠΕ και τεχνολογίες υδρογόνου. Παρουσιάζονται οι

κυριότερες εφαρμογές υβριδικών συστημάτων καθώς και τεχνικά και οικονομικά θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι συνιστώσες του αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από ανεμογεννήτρια μονίμων μαγνητών – μεταβλητών στροφών, φωτοβολταϊκή γεννήτρια, συστοιχία κυψελών καυσίμου, μονάδα ηλεκτρόλυσης, δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου, συστοιχία υπερπυκνωτών και ελεγχόμενο φορτίο. Περιγράφεται η αρχή λειτουργίας της εκάστοτε συνιστώσας καθώς επίσης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα αριθμητικά μοντέλα των συνιστωσών και αναλύονται οι προσομοιώσεις τους στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB.

Στο τέταρτο κεφάλαιο επιχειρείται κατάλληλη διαστασιολόγηση του υβριδικού συστήματος με τη μέθοδο μη τροφοδοτούμενης ενέργειας (μέθοδος LPSP). Ακολουθεί μία ανάλυση κόστους του συστήματος και μελετάται η επίδραση της διαστασιολόγησης που επιλέχθηκε στο κόστος. Στη συνέχεια γίνεται επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της διαστασιολόγησης με την προσομοίωση του συστήματος σε ετήσια βάση χρησιμοποιώντας το λογισμικό HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables). Τέλος παρουσιάζεται η διαστασιολόγηση και το κόστος εναλλακτικών τοπολογιών του συστήματος οι οποίες προσομοιώθηκαν στο λογισμικό HOMER προκειμένου να συγκριθούν τεχνικά και οικονομικά.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται οι λειτουργικοί περιορισμοί και το κόστος των τεχνολογιών υδρογόνου και των συνιστωσών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες απαιτείται να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό της στρατηγικής ελέγχου του συστήματος. Κυρίως μελετώνται οι περιορισμοί που οδηγούν σε αύξηση της διάρκειας ζωής των συνιστωσών των κυψελών καυσίμου, των ηλεκτρολυτών και των υπερπυκνωτών.

Στο έκτο κεφάλαιο επιχειρείται η επισκόπηση των υφιστάμενων μεθοδολογιών ελέγχου υβριδικών συστημάτων. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική έρευνα για τον εντοπισμό των κυριότερων μεθόδων. Τέλος παρουσιάζεται μία ντετερμινιστική μεθοδολογία ελέγχου και ο αλγόριθμός της προκειμένου να συγκριθεί με την προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου του συστήματος.

Στο έβδομο κεφάλαιο αναλύεται η δομή και η προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου του υπό μελέτη υβριδικού συστήματος. Αρχικά παρουσιάζεται η γενική θεωρία της ασαφούς λογικής που εφαρμόζεται στους ελεγκτές του συστήματος. Στη συνέχεια αναπτύσσεται ο αλγόριθμος διαχείρισης του συστήματος και η υλοποίηση του χρησιμοποιώντας ελεγκτή ασαφούς λογικής και περιγράφεται η τεχνική ελέγχου ανίχνευσης του μέγιστου σημείου ισχύος (MPPT) των κύριων ενεργειακών πηγών.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος με τη χρήση του λογισμικού SIMULINK/MATLAB για λειτουργία σε εικοσιτετράωρη χρονική κλίμακα. Στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα αυτά με τα αποτελέσματα που προκύπτουν υιοθετώντας τη ντετερμινιστική μέθοδο ελέγχου που παρουσιάστηκε στο έκτο κεφάλαιο.

Στο ένατο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας και επισημαίνονται τα στοιχεία καινοτομίας της. Επιπλέον προτείνονται θέματα τα οποία θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενα μελλοντικής ερευνητικής διερεύνησης.

2 Συνιστώσες Υβριδικού Συστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αναλύονται οι συνιστώσες που θα συνθέσουν το αυτόνομο υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του οποίου η λειτουργία θα μελετηθεί στη συνέχεια.

2.1 Ανεμογεννήτρια

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών αναφορικά με τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους τους, κάθε ένας με διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφορετικά πλεονεκτήματα λειτουργίας. Ο τύπος των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιείται κυρίως για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στα αιολικά πάρκα και στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η **ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών**. Ο λόγος για τον οποίο έχουν αντικαταστήσει τις γεννήτριες σταθερών στροφών που χρησιμοποιούνταν παλιότερα είναι πως παρουσιάζουν **αυξημένη ενεργειακή απόδοση** καθώς επιτυγχάνεται μέγιστη αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Αυτό το χαρακτηριστικό οφείλεται στην μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Επιπροσθέτως, στις εφαρμογές μικρής ισχύος αυτό οδηγεί σε **μειωμένη μηχανική καταπόνηση** τόσο στα πτερύγια όσο και στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, σε απαλοιφή του κιβωτίου ταχυτήτων, σε μείωση του ακουστικού θορύβου και στην προσαρμογή της ανεμογεννήτριας στις τοπικές ανεμολογικές συνθήκες. Εκτός των παραπάνω οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών παρέχουν στο δίκτυο **καλύτερης ποιότητας ηλεκτρική ισχύ** καθώς και τη **δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας** στην περίπτωση αυτόνομων συστημάτων [12,13].

2.1.1 Αεροδυναμικό μέρος

Ο αέρας αν και έχει μάζα χαμηλής πυκνότητας, όταν έχει ταχύτητα, ο προκύπτων άνεμος έχει κινητική ενέργεια. Η ολική ισχύς που υπάρχει στον άνεμο είναι η ισχύς την οποία μπορεί να δεσμεύσει μια αιολική μηχανή. Στην πράξη όμως ένας ανεμοκινητήρας δεν δεσμεύει όλη την παραπάνω ενέργεια αλλά μόνο ένα κλάσμα αυτής. Η αιολική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική μέσω των πτερυγίων του ανεμοκινητήρα. Η αεροδυναμική ισχύς μιας ποσότητας ανέμου, η οποία κινείται με ταχύτητα V_w ισούται με την ανά μονάδα χρόνου κινητική ενέργεια που περιέχεται στην ποσότητα αυτή:

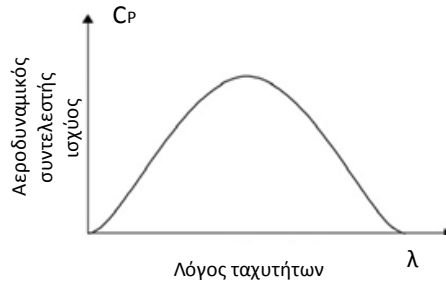
$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_w^3 \quad 2-1$$

Όπου ρ η πυκνότητα του αέρα, η οποία στην παρούσα εργασία λαμβάνεται 1.25 kg/m^3 , A η επιφάνεια που διαπερνά κάθετα ο άνεμος η οποία ισούται με: $A = \pi R^2$, C_p ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος (σχ. 2.1) που δίνεται συναρτήσει της γωνίας του πτερυγίου (β) και του λόγου ταχυτήτων (της ταχύτητας του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου):

$$\lambda = \frac{\omega_R R}{V_w} \quad 2-2$$

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

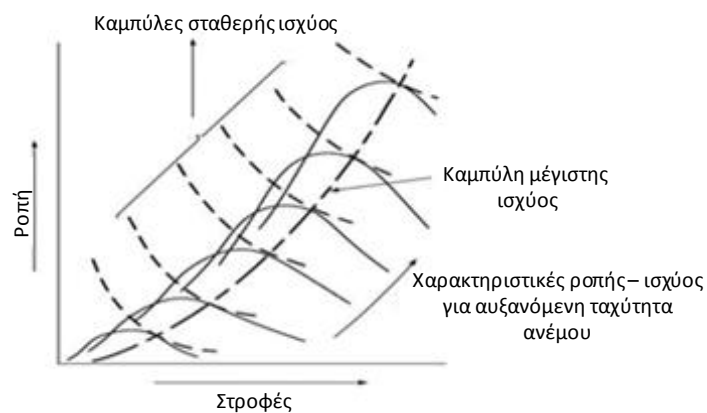
Η μέγιστη τιμή του C_p με βάση την απόδειξη του A.Betz για έναν ιδανικό ανεμοκινητήρα είναι 0.593. Στην πράξη λόγω μηχανικών τριβών των στροβίλων και αεροδυναμικών ατελειών οι τιμές που λαμβάνει ο αεροδυναμικός συντελεστής είναι αρκετά μικρότερες, 0.3 έως 0.5. Για κάθε ταχύτητα ανέμου η μέγιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή δίνεται για ένα συγκεκριμένο $\lambda - \lambda_{\text{optimum}}$.



Σχήμα 2.1 : Καμπύλη αεροδυναμικού συντελεστή συναρτήσει του λόγου ταχυτήτων

Από τη σχέση (2-2) με γνωστή και σταθερή την τιμή του λ , υπολογίζονται για κάθε ταχύτητα ανέμου οι ιδανικές στροφές λειτουργίας και συνεπώς για διάφορες ταχύτητες ανέμου προκύπτουν χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος - στροφών ανεμοκινητήρα. Αντίστοιχες χαρακτηριστικές καμπύλες συσχετισμού της ροπής με τις στροφές παρουσιάζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί και προκύπτουν από τη σχέση:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_R} \quad 2-3$$



Σχήμα 2.2 : Χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής - στροφών

Η μέγιστη ισχύς στις καμπύλες αυτές εμφανίζεται σε σημεία που το γινόμενο της ροπής επί των στροφών μεγιστοποιείται. Συνδυάζοντας αυτά τα σημεία εξάγεται η **βέλτιστη χαρακτηριστική ροπής - στροφών**, η οποία διακρίνεται στο σχ. 2.2 ως η διακεκομμένη καμπύλη. Η καμπύλη αυτή αποτελεί την καμπύλη επί της οποίας πρέπει να λειτουργεί το σύστημα προκειμένου να μεγιστοποιείται η ισχύς του ανέμου που προσλαμβάνεται από τον ανεμοκινητήρα.

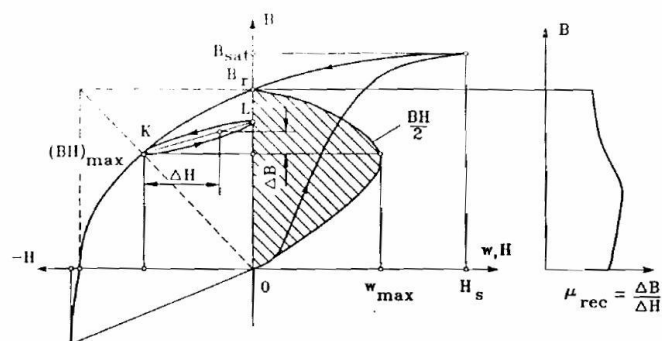
2.1.2 Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών

Οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών ενδείκνυνται ως οι πλέον κατάλληλες για ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Παρουσιάζουν αρκετά **πλεονεκτήματα** εκ των οποίων τα κυριότερα είναι τα εξής:

- **Καλύτερη απόδοση** δεδομένου ότι δεν υπάρχει ηλεκτρική σύνδεση στο δρομέα, με αποτέλεσμα μειωμένες απώλειες.
- **Ανάπτυξη μεγαλύτερης ροπής ή μεγαλύτερης ισχύος εξόδου** ανά μονάδα.
- **Καλή δυναμική συμπεριφορά** λόγω της μεγάλης πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο.

Επιπλέον, η πρόοδος που συντελέστηκε τα τελευταία χρόνια στην επιστήμη των υλικών έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή μόνιμων μαγνητών που παρουσιάζουν μεγάλη σταθερότητα στα χαρακτηριστικά τους.

Η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) είναι ικανή να παράγει μαγνητική ροή στο διάκενο χωρίς να απαιτείται κάποιο σύστημα διέγερσης ή ηλεκτρομαγνητική μετατροπή. Περιγράφεται από ένα B-H βρόγχο υστέρησης, ο οποίος στις μηχανές αυτού του τύπου είναι πεπλατυσμένος (σχ.2.3). Η λειτουργία αντιστοιχεί στο τμήμα της καμπύλης μαγνητίσεως που βρίσκεται στο δεύτερο τεταρτημόριο γνωστή ως και απομαγνητίζουσα καμπύλη. Όταν μία ανάστροφη πυκνότητα μαγνητικής ροής εφαρμόζεται στην ήδη υπάρχουσα, η συνολική πυκνότητα μαγνητικής ροής πέφτει ώσπου τελικά φτάνει στο σημείο K. Στη συνέχεια, μόλις η ανάστροφη αυτή ροή αφαιρεθεί, η πυκνότητα μαγνητικής ροής επιστρέφει στο σημείο που βρισκόταν αρχικά (σημείο L) κατά μήκος ενός μικρού βρόγχου υστέρησης. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή ενός ανάστροφου πεδίου οδηγεί σε μείωση του παραμένουστος μαγνητισμού. Με την επανάληψη της ίδιας διαδικασίας παρατηρείται πως η πυκνότητα της μαγνητικής ροής μειώνεται ξανά και πλησιάζει σε κάποιο σημείο αρκετά κοντά στο K. Αυτός ο μικρός βρόχος υστέρησης δύναται να αντικατασταθεί από μία γραμμή, την χαρακτηριστική απομαγνήτισης, της οποίας η κλίση ονομάζεται διαφορική διαπερατότητα. Σε περίπτωση που το πλάτος του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου H δεν ξεπερνά τη μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο K, τα χαρακτηριστικά του μόνιμου μαγνήτη παραμένουν. Όταν εφαρμοστεί μεγαλύτερο πεδίο H, τότε η μείωση της συνολικής πυκνότητας μαγνητικής ροής θα είναι μικρότερη του σημείου K.



Σχήμα 2.3 : Τυπική μορφή βρόγχου υστέρησης μόνιμων μαγνητών

Οι δύο συνηθέστεροι τύποι μηχανών μόνιμων μαγνητών είναι αυτές με ομοιόμορφο στρεφόμενο ημιτονοειδές καταναμημένο πεδίο στάτη και οι διακοπτικοί, τραπεζοειδείς (με

πεδίο στο στάτη το οποίο εναλλάσσεται διακοπτικά σε διακριτά βήματα). Κατασκευαστικά οι μηχανές μονίμων μαγνητών ποικίλουν. Ωστόσο, σε όλες τα τυλίγματα του στάτη είναι τοποθετημένα μέσα σε αύλακες. Ο δρομέας της μηχανής αποτελείται από ένα σιδηροπυρήνα ο οποίος είτε είναι συμπαγής είτε 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.

2.2 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια

Η αρχή λειτουργίας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας στηρίζεται στο **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο αποκαλείται η εμφάνιση διαφοράς δυναμικού στα άκρα μιας διόδου η οποία ακτινοβολείται με ηλιακή ενέργεια. Για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η ακτινοβολία, παράγεται από την διόδο συνεχές ρεύμα το οποίο μπορεί να τροφοδοτήσει ένα οποιοδήποτε φορτίο συνεχούς ρεύματος και κατά συνέπεια να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς. Όταν διακοπεί η ακτινοβολία της διόδου, σταματάει και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Τα ηλιακά στοιχεία είναι διόδοι ημιαγωγού, με την μορφή ενός δίσκου, που δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία. Πρόκειται για διόδους επαφής τύπου – n και τύπου - p οι οποίες εκτείνονται σε όλο το πλάτος του δίσκου. Τα ηλιακά στοιχεία βασίζουν τη λειτουργία τους στη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού το οποίο εκτείνεται σε όλο το πλάτος του στοιχείου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό το φράγμα δυναμικού βρίσκεται κατανεμημένο σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και τοποθετείται από την πλευρά από την οποία προσπίπτει το φως. Με τη βοήθεια αυτού του φράγματος δυναμικού γίνεται ο διαχωρισμός των θετικών και των αρνητικών φορέων φορτίου και η συσσώρευσή τους πάνω στις δύο όψεις του ηλιακού στοιχείου με αποτέλεσμα τη δημιουργία διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων του ηλιακού στοιχείου.

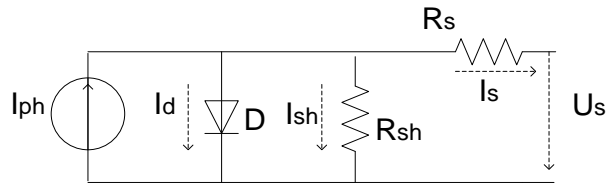
Οι **κύριες τεχνολογίες** που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φ/β στοιχείων είναι οι εξής [15]:

- Τεχνολογία παραγωγής ημιαγωγικών υλικών με κρυσταλλική δομή, κυρίως πυρίτιο.
- Τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film).
- Άλλες τεχνολογίες με κύριο στόχο να είναι λιγότερο ενεργοβόρα η παραγωγή του καθαρού πυριτίου, περιορίζοντας τις απώλειες σε ακριβό καθαρό πυρίτιο (πχ. μέθοδος EFG, και μέθοδος String Process)

Τα φ/β στοιχεία ενώνονται και σχηματίζουν φ/β πλαίσια, τα οποία στη συνέχεια συγκροτούν μία φ/β συστοιχία. Η φ/β γεννήτρια αποτελείται φ/β συστοιχίες [15].

2.2.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φ/β στοιχείου ακολουθεί στο σχήμα:



Σχήμα 2.4 : Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φ/β στοιχείου

Το φωτόρρευμα I_{ph} δημιουργείται, όταν προσπέσει ηλιακή ακτινοβολία στο φ/β στοιχείο. Για το λόγο αυτό το φ/β στοιχείο αναπαρίσταται σαν μία πηγή ρεύματος. Το ρεύμα I_{ph} είναι ευθέως ανάλογο της ηλιακής ακτινοβολίας E_s και της θερμοκρασίας του στοιχείου. Επομένως, το κύκλωμα αποτελείται από μία πηγή ρεύματος η οποία ελέγχεται από μία δίοδο, την αντίσταση σειράς R_s η οποία εμποδίζει την κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό και την παράλληλη αντίσταση R_{sh} η οποία εμφανίζεται λόγω διαρροών ρεύματος.

Εφαρμόζοντας το νόμο των ρευμάτων του Kirchhoff στο παραπάνω κύκλωμα προκύπτει η σχέση:

$$I_D = I_{ph} - I_{sh} - I_s \Rightarrow I_D = I_{ph} - \frac{V_D}{R_{sh}} - I_s \quad 2-4$$

Όπου το I_D είναι το ρεύμα της διόδου:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) \quad 2-5$$

όπου I_0 το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου, V_D η τάση στα άκρα της διόδου και V_T η θερμική τάση (25,7mV σε θερμοκρασία δωματίου 298K) η οποία ορίζεται ως εξής:

$$V_T = kT / q \quad 2-6$$

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

Η τάση στα άκρα της διόδου δίνεται από την επίλυση της σχέσης 2-4:

$$I_D = I_{ph} - I_{sh} - I_s \Rightarrow I_D = I_{ph} - \frac{V_D}{R_{sh}} - I_s \Rightarrow V_D = -R_{sh} (I_D + I_s - I_{ph}) \quad 2-7$$

Τέλος η τάση στα άκρα του φ/β στοιχείου υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{PV} = V_D - R_s I_s \quad 2-8$$

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

Οι κυψέλες καυσίμου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας παρουσιάζουν τα παρακάτω **πλεονεκτήματα** [21] :

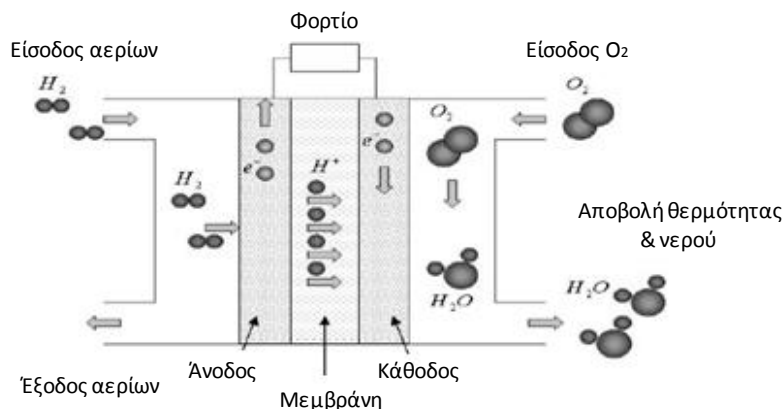
- Απ' ευθείας μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική χωρίς το ενδιάμεσο στάδιο της καύσης (ως αποτέλεσμα να έχουν υψηλές αποδόσεις από 30 έως 55%).
- Εξαιρετικά χαμηλές εκπομπές ρύπων. Το υποπροϊόν της κύριας αντίδρασης στην κυψέλη, όταν το καύσιμο είναι το υδρογόνο, είναι το νερό, το οποίο ουσιαστικά σημαίνει ότι η κυψέλη παράγει μηδενικούς ρύπους.

- Αθόρυβη λειτουργία, αφού δεν έχουν κινούμενα μέρη κατά την ενεργειακή μετατροπή.
- Έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν διάφορα καύσιμα.
- Υπάρχουν τύποι κυψελών καυσίμου που λειτουργούν σε χαμηλή θερμοκρασία, οι οποίοι παρουσιάζουν αντοχή και αξιοπιστία.
- Υψηλή απόδοση ακόμα και σε κατάσταση μη πλήρους φόρτισης. Η απόδοση αυξάνεται σε κατάσταση μερικής λειτουργίας της κυψέλης.
- Παρουσιάζουν ευελιξία στη διαστασιολόγηση τους. Ανάλογα με τις ανάγκες του φορτίου και την αξιοπιστία που απαιτείται μπορούν οι κυψέλες καυσίμου να συνδεθούν σε σειρά και παράλληλα.
- Ικανότητα γρήγορης απόκρισης στις αλλαγές του φορτίου. Σε μερικά δευτερόλεπτα η τάση και η ισχύς της κυψέλης καυσίμου έρχονται σε κατάσταση ισορροπίας.

Από την άλλη πλευρά, οι κυψέλες καυσίμου χαρακτηρίζονται από τα παρακάτω **μειονεκτήματα**:

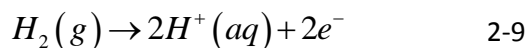
- Το αρχικό κόστος επένδυσης είναι υψηλό.
- Δεν υπάρχουν οι κατάλληλες υποδομές για τη μεταφορά και διανομή του υδρογόνου.
- Αποτελεί σχετικά νέα τεχνολογία στη βιομηχανία της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και επομένως δεν έχει δοκιμαστεί αρκετά. Χρειάζεται έρευνα σε ορισμένους τομείς όπως για παράδειγμα αυτός της βελτίωσης των υλικών.
- Η αντοχή και η αξιοπιστία των κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας δεν ενδείκνυται.

2.3.1 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου



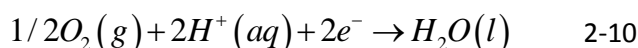
Σχήμα 2.5 : Αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην κυψέλη καυσίμου [16]

Στα ηλεκτρόδια κάθε κυψέλης καυσίμου λαμβάνει χώρα μια οξειδοαναγωγή. Στις κυψέλες καυσίμου PEM το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως καύσιμο και το οξυγόνο ως οξειδωτής. Στην άνοδο μιας κυψέλης καυσίμου πραγματοποιείται ο ιονισμός του αερίου υδρογόνου. Καθώς αυτό οξειδώνεται υπό την επίδραση ενός καταλύτη απελευθερώνονται ηλεκτρόνια και δημιουργούνται θετικά ιόντα υδρογόνου (οξείδωση):

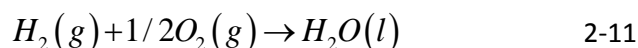


Τα κατιόντα υδρογόνου (H^+) μεταφέρονται από την άνοδο στην κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη. Τα ηλεκτρόνια που προέκυψαν από την αντίδραση διαρρέουν το εξωτερικό

κύκλωμα παράγοντας ηλεκτρικό έργο και καταλήγουν στην κάθοδο. Στην κάθοδο τα ηλεκτρόνια αντιδρούν με το οξυγόνο και με τα θετικά ιόντα υδρογόνου και παράγεται νερό και θετικά ιόντα υδρογόνου (αναγωγή):



Η συνολική αντίδραση που πραγματοποιείται είναι η εξής:

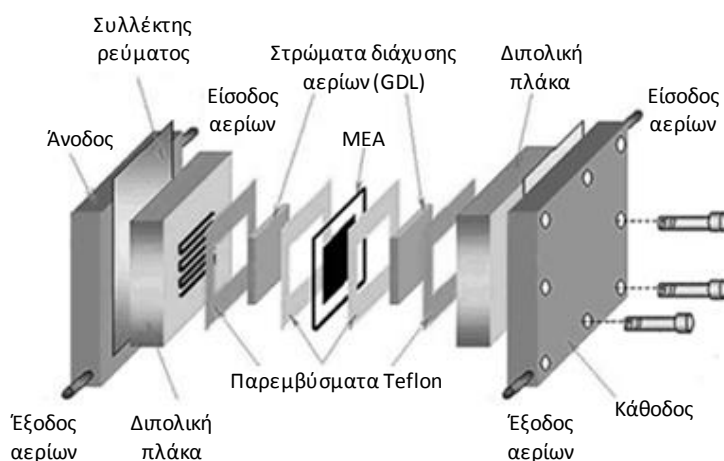


2.3.2 Δομή της κυψέλης

Τα δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται η κυψέλη καυσίμου είναι τα εξής:

- 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.

Η δομή της κυψέλης καυσίμου απεικονίζεται στο σχ. 2.6:



Σχήμα 2.6 : Δομή κυψέλης καυσίμου PEM

2.3.2.1 Μεμβράνη

Η βασική λειτουργία της μεμβράνης είναι να επιτρέπει σε ιόντα να τη διαπερνούν και ταυτόχρονα να διαχωρίζει με φυσικό τρόπο τα αντιδρώντα από τα προϊόντα. Η μεμβράνη στην κυψέλη καυσίμου PEM είναι συνήθως στερεός ηλεκτρολύτης από πολυμερές με πάχος από 25 έως 200μm ο οποίος είναι αγώγιμος για τα πρωτόνια. Η μεταφορά των ιόντων γίνεται μέσα στο πολυμερές και εξαρτάται από την ποσότητα νερού που βρίσκεται δεσμευμένη ή ελεύθερη μέσα στο πολυμερές. Το πιο διαδεδομένο πολυμερές που χρησιμοποιείται σήμερα είναι το Nafion της εταιρίας Dupont, το οποίο έχει παρόμοια δομή με το Teflon.

Η βασική λειτουργία της μεμβράνης στηρίζεται στην ιδιότητά της να επιτρέπει την μετακίνηση ιόντων στο εσωτερικό της. Η μεμβράνη θα πρέπει να διαθέτει μεγάλη ιοντική αγωγιμότητα και παράλληλα να εμποδίζει τη διέλευση των ηλεκτρονίων, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες και να διατηρείται η ομαλή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Εάν η

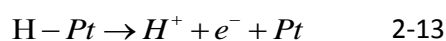
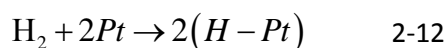
μεμβράνη επιτρέπει τη διέλευση των ηλεκτρονίων, τότε παρουσιάζονται προβλήματα βραχυκύκλωσης. Παράλληλα λειτουργεί και σαν διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στο οξειδωτικό και το καύσιμο έτσι ώστε να αποφεύγεται η απευθείας μεταξύ τους αντίδραση. Η μεμβράνη πρέπει να είναι ενυδατωμένη για να είναι αγωγίμη για τα κατιόντα H^+ , άρα η θερμοκρασία λειτουργίας απαιτείται να βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα. Συνεπώς διαφαίνεται πως η διαχείριση του νερού μέσα στην κυψέλη είναι πρωτεύουσας σημασίας. Πρακτικά η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί κάτω από τους $100^{\circ}C$ ενώ σε περιπτώσεις που λειτουργούν κυψέλες καυσίμου πάνω από $100^{\circ}C$ πρέπει να υπάρχουν 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 (Membrane Electrode Assembly). Η μετατροπή της χημικής ενέργειας, που περιέχει το καύσιμο, σε ηλεκτρική λαμβάνει χώρα στα ηλεκτρόδια καθώς αποδεσμεύονται τα ηλεκτρόνια από τα άτομα του καυσίμου και του αέρα. Στη συνέχεια τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσα από εξωτερικό κύκλωμα ενώ τα ιόντα διαπερνάνε τον ηλεκτρολύτη. Επομένως, είναι απαραίτητο τα ηλεκτρόδια να είναι πορώδη, διαπερατά από τα αέρια μόρια, τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια, καθώς επίσης και να είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού.

Η ταχύτητα των αντιδράσεων είναι μείζονος σημασίας για την απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Ο ρυθμός με τον οποίο πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις σχετίζεται με την επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Η πορώδης κατασκευή τους αυξάνει την ενεργό επιφάνειά τους. Τα μοντέρνα ηλεκτρόδια έχουν τέτοια μικροδομή που τους δίνει ενεργό επιφάνεια εκατοντάδες ή ακόμα χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από τις πραγματικές τους διαστάσεις. Με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιείται και το κόστος παραγωγής των ηλεκτροδίων. Η αύξηση της ταχύτητας μπορεί να επιτευχθεί εκτός από την αύξηση της επιφάνειας των ηλεκτροδίων είτε με την προσθήκη καταλυτικών επενδύσεων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων είτε με την αύξηση της θερμοκρασίας [17].

Ο καταλληλότερος καταλύτης είναι ο λευκόχρυσος (Pt) που παρουσιάζει καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, μεγάλη επιφάνεια σύνδεσης με τον ηλεκτρολύτη, καλές ιδιότητες μεταφοράς αερίων και ιόντων, και επιταχύνει το ρυθμό αναγωγής του οξυγόνου. Στην άνοδο, το υδρογόνο αντιδρά με το λευκόχρυσο και στη συνέχεια διασπάται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια σύμφωνα με την αντίδραση:

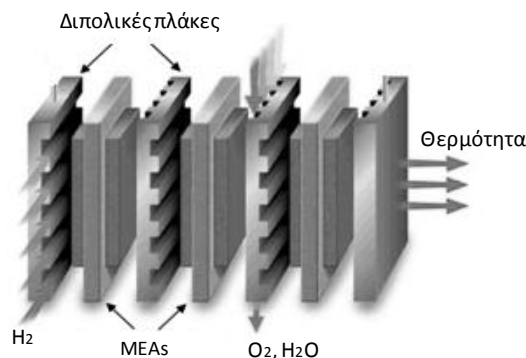


2.3.2.3 Στρώμα διάχυσης αερίων

Το στρώμα διάχυσης των αερίων, μπορεί είτε να αποτελεί μέρος του ηλεκτροδίου, τόσο της ανόδου όσο και της καθόδου είτε να είναι ξεχωριστό στρώμα. Ο κύριος ρόλος του είναι η διάχυση, δηλαδή η ισοκατανομή των αερίων πάνω στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Επιπροσθέτως συμβάλλει στη δημιουργία ηλεκτρικής σύνδεσης μεταξύ του καταλύτη και της διπολικής πλάκας και στην απομάκρυνση του παραγόμενου νερού από την επιφάνεια του ηλεκτρολύτη σχηματίζοντας ένα προστατευτικό λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του καταλύτη [18].

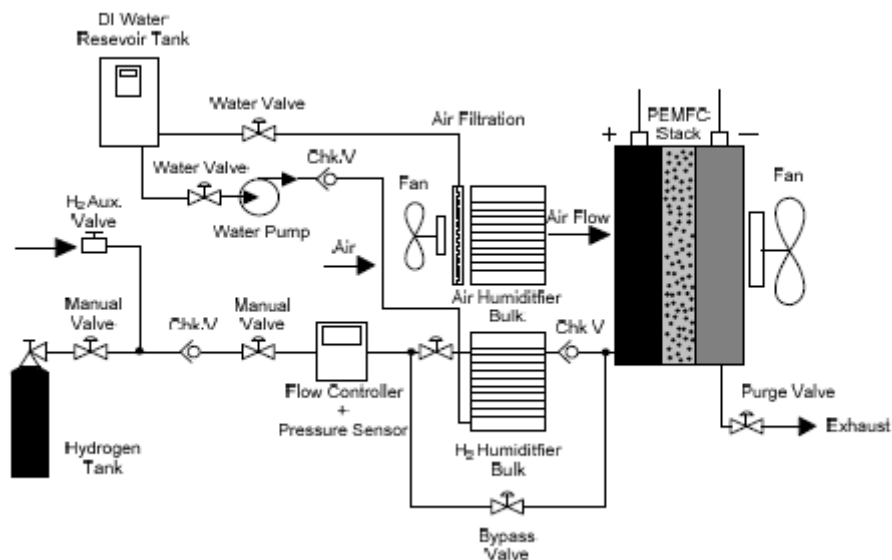
2.3.2.4 Πλάκα ροής των αερίων και διπολική πλάκα

Η πλάκα ροής των αερίων (flow field plate) χαράσσεται πάνω στην τελική πλάκα (από γραφίτη) της ανόδου και της καθόδου σε περίπτωση που πρόκειται μόνο για μία κυψέλη. Η τάση όμως που εμφανίζει μία μόνο κυψέλη καυσίμου είναι μικρή, για το λόγο αυτό πολλές κυψέλες καυσίμου ενώνονται σε σειρά ούτως ώστε να αυξήσουν τη λειτουργική τάση [18]. Είναι απαραίτητο να υπάρχουν πλάκες που να έχουν και στις δύο πλευρές τους χαραγμένα κανάλια ώστε να υπάρχει πιο ομοιόμορφη κατανομή των αερίων στο στρώμα διάχυσης. Τα κανάλια αυτά μπορούν να έχουν διαφορετική διάρθρωση ανάλογα με την κατασκευή, στην πλειοψηφία επικρατούν ελικοειδή και παράλληλα κανάλια. Στο σχ. .2.7 παρουσιάζεται η δομή μίας συστοιχίας κυψελών καυσίμου [19].



Σχήμα 2.7 : Συστοιχία κυψελών καυσίμου

2.3.3 Υποσυστήματα κυψέλης καυσίμου



Σχήμα 2.8 : Σχεδιάγραμμα βοηθητικών υποσυστημάτων κυψέλης καυσίμου

Το ολικό σύστημα υποστήριξης μίας κυψέλης καυσίμου αποτελείται από τα εξής επιμέρους υποσυστήματα:

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

- Σύστημα διαχείρισης ισχύος.

Τα αναγκαία συστήματα που απαιτούνται για τη λειτουργία μίας κυψέλης καυσίμου παρουσιάζονται σχ. 2.8. Για τη ροή του συστήματος που εφοδιάζει την πλευρά της καθόδου της κυψέλης με αέρα, και συνεπώς με οξυγόνο, απαιτείται η χρήση ενός συμπιεστή και του συνοδευτικού κινητήρα προκειμένου να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ροή και πίεση του αέρα. Ο ρυθμισμένος ως προς την πίεση αέρας έπειτα ψύχεται ώστε η θερμοκρασία εισόδου του στην κυψέλη να είναι σε επιθυμητά επίπεδα. Στη συνέχεια, ο υγραντήρας 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. Εκτός του νερού, εκλύεται και θερμότητα η οποία πρέπει να εξάγεται προκειμένου να διατηρείται η θερμοκρασία της κυψέλης κάτω από τους 100°C. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με απιονισμένο νερό που απάγει τη θερμότητα της κυψέλης και στη συνέχεια ψύχεται είτε με κατάλληλο σχεδιασμό της κυψέλης που να επιτρέπει τη φυσική απαγωγή της θερμότητας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω 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 και η μεταβολή μίας παραμέτρου επηρεάζει και τις υπόλοιπες.

Κατά τη μεταβατική λειτουργία του συστήματος το σύστημα ελέγχου απαιτείται 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 [20-21]. Η κατάσταση αυτή αντιμετωπίζεται προσθέτοντας συμπληρωματικούς τύπους αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

2.4 Ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων και δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου

2.4.1 Εισαγωγή

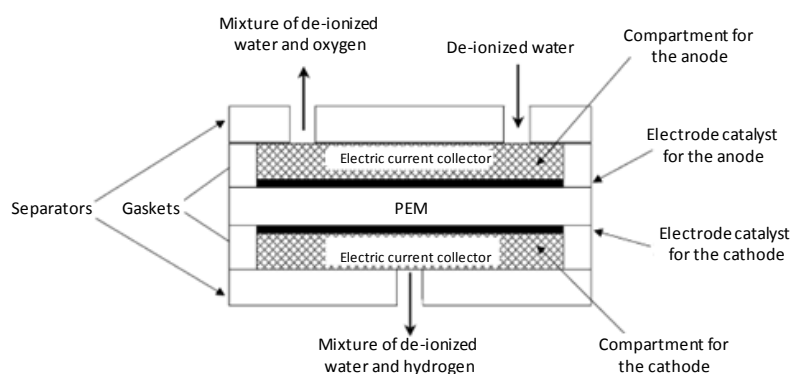
Η ηλεκτρόλυση του H_2O είναι η αντίστροφη διεργασία από αυτή που πραγματοποιείται στα κελιά καυσίμου υδρογόνου. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης έχει παρόμοιο σχεδιασμό με ένα κελί καυσίμου και αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο σε επαφή με έναν ηλεκτρολύτη. Τα επιμέρους κελιά στοιχίζονται σε διπολική διάταξη με διαχωριστές γραφίτη παρέχοντας τους απαραίτητους πολλαπλούς αγωγούς για την τροφοδοσία του νερού και τη διαφυγή των αερίων. Οι ηλεκτρολύτες που

χρησιμοποιούνται είναι υγροί όξινοι ή αλκαλικοί, πολυμερείς μεμβράνες και ανόργανα οξείδια (κεραμικά). Ανάλογα με τους ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται η ηλεκτρόλυση του νερού μπορεί να είναι χαμηλής ή υψηλής θερμοκρασίας.

Οι πιο διαδεδομένοι ηλεκτρολύτες είναι αυτοί που χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη στερεό πολυμερές, οι **ηλεκτρολύτες μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)** καθώς παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις μονάδες ηλεκτρόλυσης αλκαλικού διαλύματος. Συγκεκριμένα, χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη απόδοση και μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγάλες πυκνότητες ρεύματος. Επίσης, ο όγκος του συστήματος είναι μειωμένος και τα αέρια που παράγονται είναι υψηλής καθαρότητας.

Αν και η αρχή λειτουργίας των μονάδων ηλεκτρόλυσης τύπου PEM είναι η αντίστροφη της λειτουργίας των αντίστοιχων κελιών καυσίμου, τα υλικά είναι διαφορετικά από αυτά που χρησιμοποιούνται στις PEMFCs λόγω διάβρωσης. Η κάθοδος αποτελείται από συλλέκτη ρεύματος κατασκευασμένο από πορώδη γραφίτη με λευκόχρυσο ή με μικτό οξείδιο ως ηλεκτροκαταλύτη. Για την κατασκευή της ανόδου χρησιμοποιείται πορώδες τιτάνιο και ως ενεργό υλικό καταλύτη από μικτό ευγενές οξείδιο μετάλλου. Η μεμβράνη κατασκευάζεται από Nafion.

Παρακάτω παρατίθεται ένα σχηματικό διάγραμμα του κελιού ηλεκτρόλυσης [27]:

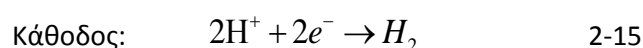
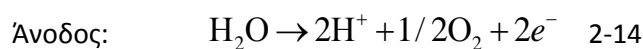


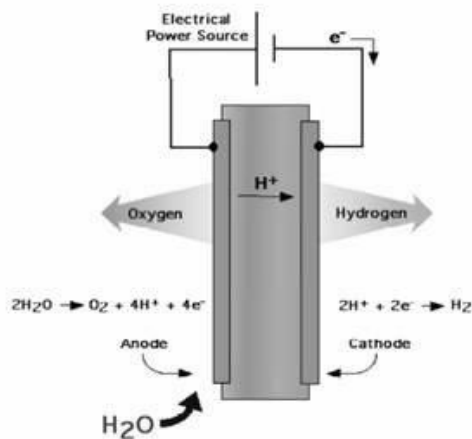
Σχήμα 2.9 : Δομή του κελιού ηλεκτρόλυσης

Οι μονάδες ηλεκτρόλυσης PEM λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, περίπου 80°C. **Η λειτουργία σε χαμηλή θερμοκρασία** τους επιτρέπει να ξεκινάνε γρήγορα, καθώς απαιτείται μικρότερος χρόνος για να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία και με αυτό τον τρόπο δεν υπάρχει αρνητική επίδραση στη διάρκεια ζωής τους. Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας των μονάδων ηλεκτρόλυσης έχει το μειονέκτημα της μικρότερης θερμοδυναμικής απόδοσης σε σχέση με τις μονάδες υψηλής θερμοκρασίας, αλλά το κόστος είναι μειωμένο λόγω των φτηνών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν [26].

2.4.2 Αρχή λειτουργίας ηλεκτρολύτη

Στο σχ. 2.10 παρουσιάζεται η λειτουργία ενός PEM ηλεκτρολύτη [28]. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης είναι οι εξής:

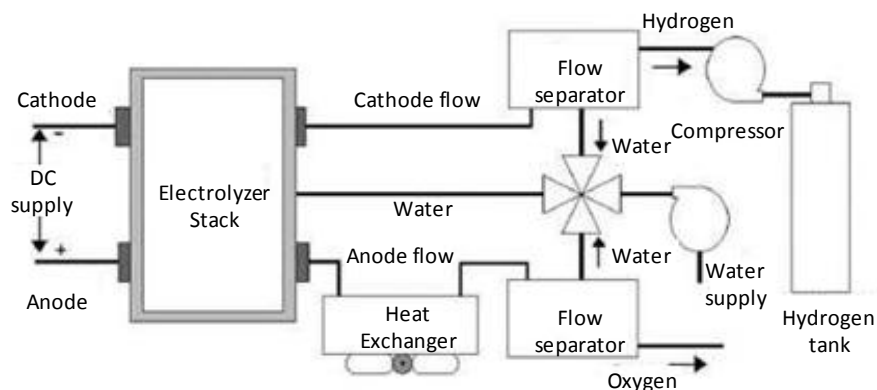




Σχήμα 2.10 : Αρχή λειτουργίας PEM ηλεκτρολύτη

Η ροή του νερού γίνεται από την άνοδο όπου και διαχωρίζεται σε πρωτόνια (κατιόντα υδρογόνου), ηλεκτρόνια και οξυγόνο με την εφαρμογή μιας τάσης υψηλότερης από την θερμοουδέτερη τάση (1.482V). Τα πρωτόνια διαπερνούν τη μεμβράνη του πολυμερούς ηλεκτρολύτη φτάνοντας στην κάθοδο όπου αντιδρούν με ηλεκτρόνια, που προέρχονται από το εξωτερικό κύκλωμα, σχηματίζοντας μόρια υδρογόνου. Παράλληλα, η διέλευση των πρωτονίων μέσα από τη μεμβράνη συνοδεύεται από τη μεταφορά μορίων νερού από την άνοδο στην κάθοδο. Η ροή του απιονισμένου νερού που παρέχεται στην άνοδο γίνεται διαμέσου του καναλιού στη διπολική πλάκα της ανόδου και διαχέεται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου μέσα από ένα πορώδες στρώμα. Το παραγόμενο αέριο οξυγόνο και το νερό που δεν συμμετείχε στην αντίδραση συλλέγονται στο κανάλι ροής της ανόδου. Το διαχωρισμένο νερό επανατροφοδοτεί το κελί και το επιπλέον νερό ανακυκλώνεται μεταξύ της ανόδου και του συλλέκτη με μια αντλία κυκλοφορίας. Η χωρητικότητα αυτής της αντλίας μπορεί να καθοριστεί βασιζόμενη στην πτώση πίεσης και στο ρυθμό ροής του ανακυκλούμενου νερού.

2.4.3 Βοηθητικά υποσυστήματα ηλεκτρολύτη και δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου



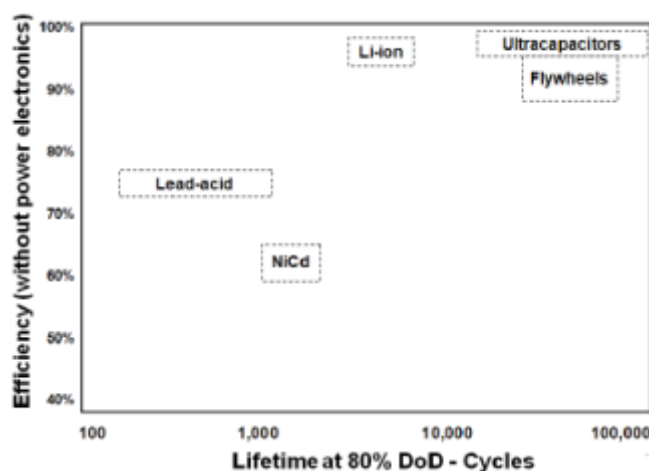
Σχήμα 2.11 : Διάγραμμα συστήματος αποθήκευσης υδρογόνου με τη μονάδα ηλεκτρόλυσης και τα περιφερειακά βοηθητικά κυκλώματα

Τα βοηθητικά υποσυστήματα του ηλεκτρολύτη περιλαμβάνουν: διατάξεις διαχωρισμού του νερού από τα αέρια παράγωγα, εναλλάκτες θερμότητας, διάταξη αποθήκευσης, συμπιεστή, σύστημα παροχής νερού με δυνατότητα θέρμανσης και ψύξης, σύστημα πεπιεσμένου

αέρα, καθώς και συστήματα ελέγχου και ασφαλείας. Ένα τυπικό διάγραμμα συστήματος υδρογόνου φαίνεται στο σχ. 2.11. Το υδρογόνο αποθηκεύεται είτε σε συμβατικές δεξαμενές υπό πίεση είτε σε δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων [29]. Τα βοηθητικά συστήματα, καταναλώνουν εξαιρετικά σημαντικό ποσό ενέργειας, περίπου το 50% της ισχύος που απορροφά η μονάδα ηλεκτρόλυσης και για το λόγο αυτό επηρεάζουν σημαντικά το συνολικό βαθμό απόδοσης της μονάδας.

2.5 Υπερπυκνωτής

Οι πιο κοινές διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας είναι οι πυκνωτές και οι μπαταρίες. Η αποθήκευση της ενέργειας στους πυκνωτές επιτυγχάνεται με το διαχωρισμό του φορτίου. Ο υπερπυκνωτής αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια τα οποία διαχωρίζονται με ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη, σε αντίθεση με τους απλούς πυκνωτές που διαχωρίζονται με στερεό διηλεκτρικό. Η πρόοδος που έχει συντελεστεί έχει οδηγήσει σε τιμές πυκνότητας ενέργειας από μερικές δεκάδες έως εκατοντάδες φορές μεγαλύτερες από αυτές των συμβατικών πυκνωτών (10-100 kW). Οι υπερπυκνωτές σε σύγκριση με τις μπαταρίες παρουσιάζουν πολύ **μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος, ταχεία φόρτιση/εκφόρτιση** καθώς και **μεγαλύτερη απόδοση (95%)**. Επιπρόσθετα αποτελούν διατάξεις με **μεγαλύτερη διάρκεια ζωής**, καθώς μπορούν να υποστούν **μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης με χαμηλό κόστος** (σχ. 2.12). Πλεονέκτημα επίσης αποτελεί το γεγονός πως η φόρτιση και η εκφόρτιση δεν πραγματοποιείται με χημικές αντιδράσεις, συνεπώς είναι λιγότερο επικίνδυνοι στο χειρισμό τους και για το περιβάλλον χάρη στην έλλειψη οξειδίων [33-34].



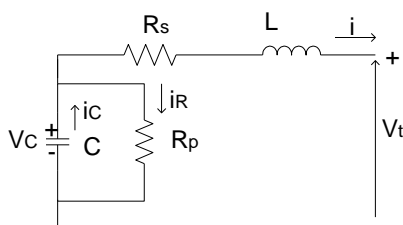
Σχήμα 2.12 : Διάρκεια ζωής των διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας

Για τους παραπάνω λόγους αποτελούν ελκυστική λύση ως διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας σε εφαρμογές που υπάρχει απαίτηση παροχής υψηλής ισχύος σε σύγκριση με τη μέση ζήτηση ισχύος για μικρά χρονικά διαστήματα. Με αυτό τον τρόπο ουσιαστικά λειτουργούν σαν να εξομαλύνουν την ζήτηση ισχύος και να σταθεροποιούν το φορτίο και συνεπώς εξοικονομείται ενέργεια.

Τα κύρια μειονεκτήματα των υπερπυκνωτών είναι η **μικρή πυκνότητα ενέργειας** (3-5Wh/kg, ενώ για μπαταρίες μολύβδου- οξέως 30-40Wh/kg) και η **πιθανή μεγάλη διασπορά της τάσης** μεταξύ των κελιών του υπερπυκνωτή. Η τάση εξόδου των υπερπυκνωτών είναι ευθέως ανάλογη του επιπέδου φόρτισής τους. Για το λόγο αυτό απαιτείται είτε ο περιορισμός της λειτουργίας τους σε υψηλά επίπεδα φόρτισης είτε η

χρήση ηλεκτρονικών ισχύος προκειμένου να διαχειριστούν τις μεγάλες διακυμάνσεις της τιμής της τάσης [35]. Συνεπώς χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές ποιότητας ισχύος, όπως ride-through και power bridging, καθώς και σε εφαρμογές ανάκτησης ενέργειας σε εκτεταμένα συστήματα διαμετακόμισης. Επιπλέον μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός πως απαιτούνται συστοιχίες υπερπυκνωτών για την επίτευξη υψηλής τερματικής τάσης.

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του υπερπυκνωτή παριστάνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.13 : Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα υπερπυκνωτή

Το κύκλωμα αποτελείται από μία χωρητικότητα, μία αυτεπαγωγή, μία ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά που αναπαριστά την αντίσταση φόρτισης και εκφόρτισης και μία ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση (EPR) που μοντελοποιεί τις απώλειες αυτοεκφόρτισης [36].

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο είναι:

$$V_t = V_c - R_s i + L \frac{di}{dt} \quad 2-16$$

$$V_c = V_c^0 - C \int_0^t i_c dt \quad 2-17$$

$$i_c = i + i_R \quad 2-18$$

$$i_L = V_c / R_p \quad 2-19$$

Το επίπεδο φόρτισης του υπερπυκνωτή (State of charge –SOC) υπολογίζεται:

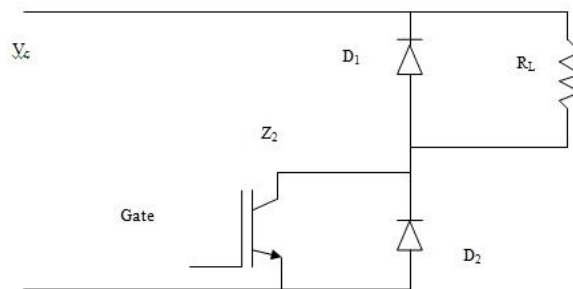
$$SOC = \frac{V_c}{V_{c,max}} \cdot 100\% \quad 2-20$$

όπου $V_{c,max}$ είναι η μέγιστη τάση του υπερπυκνωτή και V_c είναι η τάση του υπερπυκνωτή.

2.6 Ελεγχόμενο φορτίο

Το ελεγχόμενο φορτίο χρησιμοποιείται στην απομονωμένη λειτουργία προκειμένου να **παραμείνει ευσταθές το σύστημα**. Συνδέεται για να απορροφήσει τυχόν περίσσεια παραγωγής ισχύος από την ανεμογεννήτρια και τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια την οποία δεν μπορεί να απορροφήσει το φορτίο του συστήματος. Επομένως, συμβάλλει στην αποφυγή υπερτάσεων στο ζυγό. Το ελεγχόμενο φορτίο είναι ωμικό και πρωταρχικός σκοπός της χρήσης του είναι η σταθεροποίηση της τάσης στο ζυγό συνεχούς ρεύματος. Απαραίτητες κρίνονται οι κατάλληλες διατάξεις ελέγχου που θα αυξομειώνουν την τάση του.

Το κύκλωμα που αναπαριστά το ελεγχόμενο φορτίο φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα [37]:



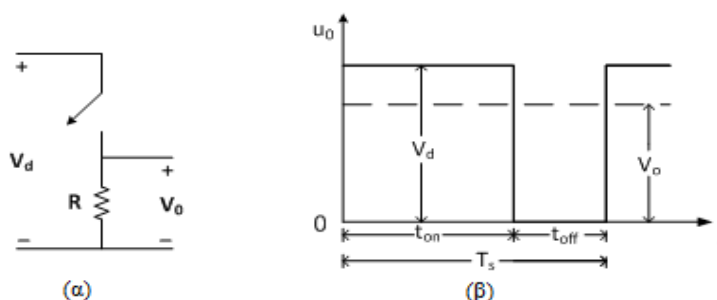
Σχήμα 2.14 : Κύκλωμα ελεγχόμενου φορτίου

Όταν το IGBT Z2 (Insulated Bipolar Transistor) άγει ρεύμα διαρρέει το φορτίο R_L . Όταν είναι σε κατάσταση αποκοπής η κυκλοφορία του ρεύματος συνεχίζεται για λίγο μέσα από τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης D1. Η δίοδος D2, που βρίσκεται ενσωματωμένη στο IGBT, είναι ήσσονος σημασίας καθώς χρησιμεύει κυρίως για την προστασία του Z2 από ανάστροφες τάσεις λόγω αυτεπαγωγών σύνδεσης. Το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση προκύπτει από τη σχέση:

$$\overline{I}_L = \frac{V_C \cdot D}{R_L} \quad 2-21$$

όπου D είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης του Z2, και V_C η τάση εισόδου.

2.7 Μετατροπείας συνεχούς ρεύματος



Σχήμα 2.15 : α. Βασικό κύκλωμα μετατροπέα συνεχούς ρεύματος, β. Τάση εξόδου κυκλώματος

Οι μετατροπείες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται ευρέως για τη ρύθμιση της συνεχούς τάσης σε **διακοπτικά τροφοδοτικά και σε εφαρμογές κινητήρων**. Η λογική λειτουργίας των διαφόρων μετατροπέων συνεχούς ρεύματος είναι κατά βάση η ίδια καθώς όλοι περιλαμβάνουν τα ίδια ενεργά και παθητικά στοιχεία. Στο σχ. 2.15 α παρατίθεται το βασικό κύκλωμα του μετατροπέα συνεχούς ρεύματος. Η είσοδος στους μετατροπείς είναι μη ρυθμισμένη τάση V_d ενώ η έξοδος ρυθμίζεται στο επιθυμητό επίπεδο τάσης μέσω της διακοπτικής λειτουργίας. Η μέση τιμή V_0 της τάσης εξόδου u_0 ρυθμίζεται βάση των διαστημάτων αγωγής και αποκοπής (t_{on} και t_{off} αντίστοιχα), σχ. 2.15 β.

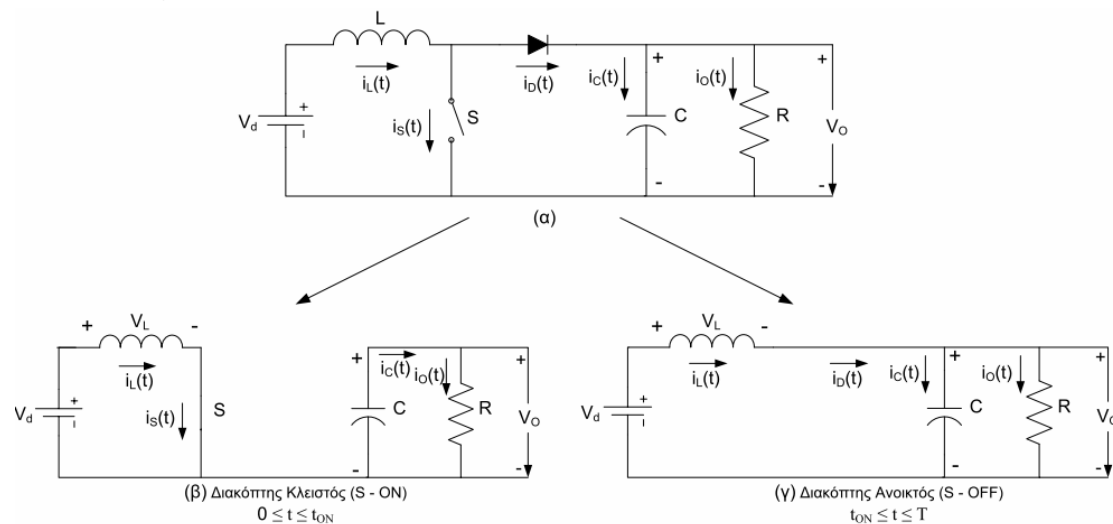
Η ρύθμιση της τάσης εξόδου επιτυγχάνεται όταν η διακοπτική λειτουργία έχει σταθερή συχνότητα, δηλαδή η διακοπτική περίοδος είναι σταθερή $T_s = t_{on} + t_{off}$. Προσαρμόζοντας τη διάρκεια του διαστήματος αγωγής του διακόπτη, μεταβάλλοντας δηλαδή το βαθμό χρησιμοποίησης (duty ratio) που ορίζεται ως ο λόγος του διαστήματος αγωγής ως προς τη

συνολική διακοπτική περίοδο $D = t_{on} / T_s$, ρυθμίζεται η μέση τάση εξόδου. Αυτή η τεχνική ελέγχου ονομάζεται Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation – PWM).

Υπάρχουν διάφορα είδη μετατροπέων συνεχούς ρεύματος. Η διαφορά τους έγκειται στη σχέση της τάσης εξόδου με την τάση εισόδου. Συγκεκριμένα, ο DC-DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης δημιουργεί τάση εξόδου μικρότερη από την τάση εισόδου, ο DC – DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης δημιουργεί μεγαλύτερη τάση εξόδου, ενώ ο μικτός DC - DC μετατροπέας δημιουργεί και μεγαλύτερη αλλά και μικρότερη τάση εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου αλλά με διαφορετική πολικότητα. Εκτός αυτών των βασικών μετατροπέων υπάρχουν και άλλες τοπολογίες που χρησιμοποιούνται, όπως ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας τεσσάρων τεταρτημορίων, ο μετατροπέας forward, ο μετατροπέας flyback, ο μετατροπέας push-pull και ο μετατροπέας ημιγέφυρας.

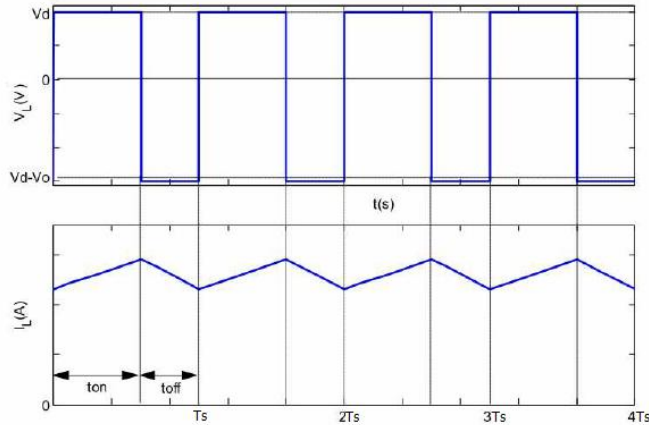
2.7.1 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης συνεχούς ρεύματος (Boost DC –DC Converter)

Ο σκοπός αυτού του μετατροπέα είναι η ανύψωση της συνεχούς τάσης εισόδου με ελεγχόμενο τρόπο. Το κύκλωμα αποτελείται από ένα διακόπτη, μία δίοδο, ένα πηνίο και ένα πυκνωτή [38].



Σχήμα 2.16 : Κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης τάσης και ισοδύναμα κυκλώματα για τις καταστάσεις του διακόπτη [1]

Όταν ο διακόπτης (S) άγει (για το χρονικό διάστημα t_{on}), η δίοδος πολώνεται ανάστροφα με αποτέλεσμα την απομόνωση της βαθμίδας εξόδου από το υπόλοιπο κύκλωμα. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, στα άκρα του πηνίου εφαρμόζεται η τάση εισόδου $V_L = V_d$ και το ρεύμα του πηνίου αυξάνεται, συνεπώς η ενέργεια που εισέρχεται στο κύκλωμα αποθηκεύεται στο πηνίο. Μόλις ο διακόπτης σταματήσει να άγει (για το χρονικό διάστημα t_{off}) η δίοδος πολώνεται θετικά και η αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου καθώς και η ενέργεια της πηγής εισόδου ρέουν προς την έξοδο. Η τάση στα άκρα του πηνίου προκύπτει: $V_L = V_d - V_o$. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, ο πυκνωτής εξομάλυνσης θεωρείται πολύ μεγάλος προκειμένου να εξασφαλίζεται μια σταθερή τάση εξόδου ($v_o(t) = V_o$).



Σχήμα 2.17 : Κυματομορφές τάσης και ρεύματος πηνίου μετατροπέα ανύψωσης τάσης

Η τάση στα άκρα ενός πηνίου δίνεται από το νόμο του Faraday:

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad 2-22$$

Οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος του πηνίου δίνονται στο σχ. 2.17. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, το ολοκλήρωμα της τάσης στα άκρα του πηνίου στη διάρκεια μιας διακοπτικής περιόδου πρέπει να είναι μηδέν.

$$\int_0^{T_s} v_L dt = L \int_0^{T_s} di = 0 \quad 2-23$$

Επειδή η ενέργεια διατηρείται η αρχική και η τελική τιμή του ρεύματος του πηνίου πρέπει να είναι ίδιες. Για ένα μετατροπέα που δεν εμφανίζει απώλειες η σχέση απλοποιείται:

$$\int_0^{T_s} v_L dt = L \int_0^{T_s} di = 0 \quad 2-24$$

Διαιρώντας την παραπάνω σχέση με την περίοδο προκύπτει η σχέση που συνδέει την τάση εισόδου- εξόδου:

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad 2-25$$

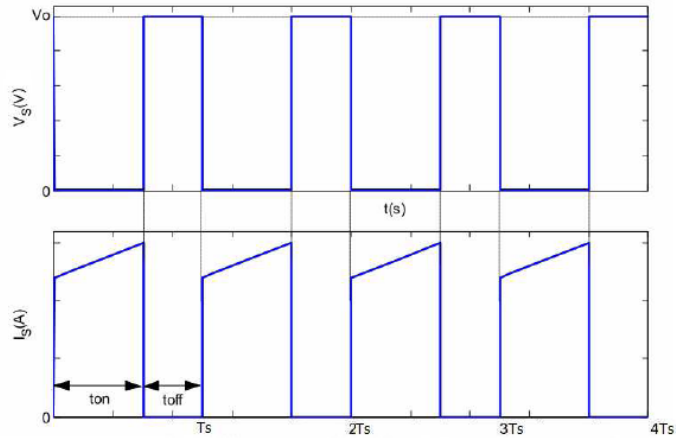
Θεωρώντας πως στο κύκλωμα δεν υπάρχουν απώλειες, η ισχύς εξόδου θα ισούται με την ισχύ εισόδου:

$$P_d = P_0 \Rightarrow V_d I_d = V_o I_0 \quad 2-26$$

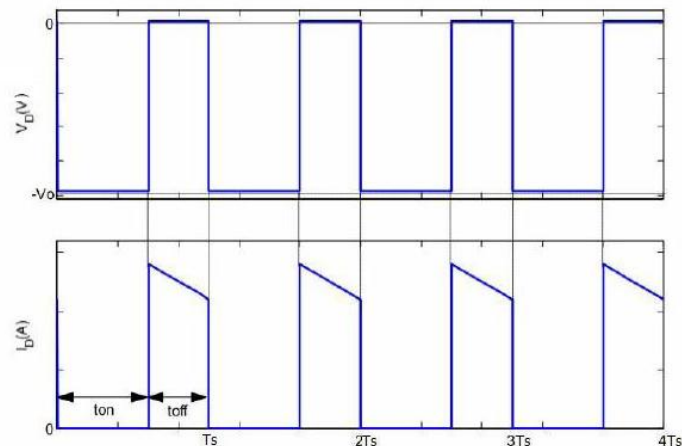
Από τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει η σχέση ρεύματος εισόδου και εξόδου:

$$I_0 / I_d = 1 - D \quad 2-27$$

Οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος του διακόπτη και της διόδου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα.

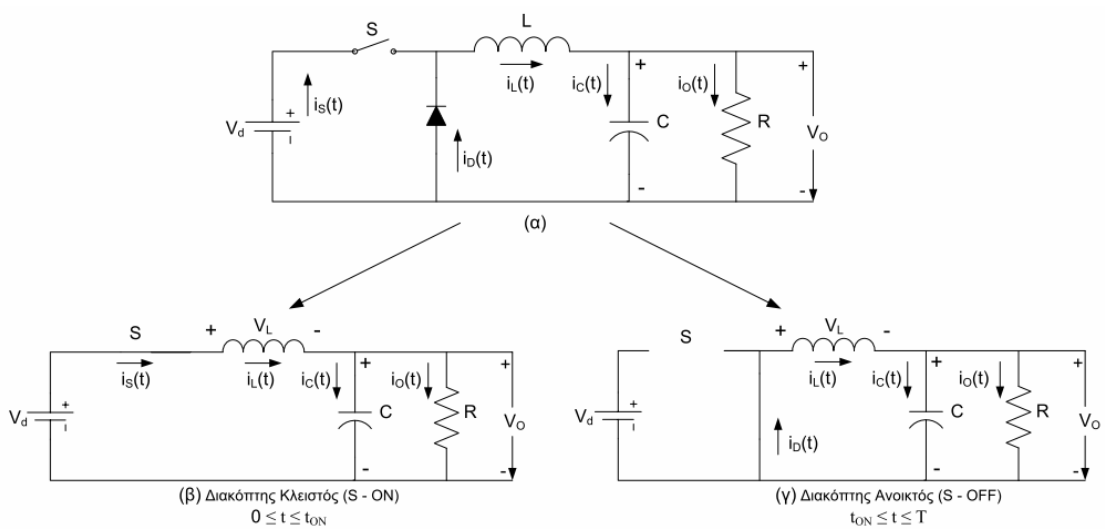


Σχήμα 2.18 : Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του διακόπτη μετατροπέα ανύψωσης τάσης



Σχήμα 2.19 : Κυματομορφές τάσης και ρεύματος της διόδου μετατροπέα ανύψωσης τάσης

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



Σχήμα 2.20 : Κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης και ισοδύναμα κυκλώματα για τις καταστάσεις του διακόπτη.

Ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης παράγει μέση τάση εξόδου V_0 μικρότερη από την DC τάση εισόδου του V_d . Το κύκλωμα του μετατροπέα παρουσιάζεται στο σχ. 2.20.

Κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης S είναι κλειστός (t_{on}), το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα και η δίοδος πολώνεται ανάστροφα. Σε αυτό το χρονικό διάστημα στα άκρα του πηνίου εφαρμόζεται τάση $V_L = V_d - V_0$, η οποία προκαλεί γραμμική αύξηση του ρεύματός του και η ενέργεια που εισέρχεται στο κύκλωμα αποθηκεύεται στο πηνίο. Όταν ο διακόπτης ανοίξει, λόγω της αποθηκευμένης στο πηνίο ενέργειας, το πηνίο συνεχίζει να διαρρέεται από ρεύμα το οποίο όμως διέρχεται από τη δίοδο. Λόγω αγωγής της δίοδου, το πηνίο συνδέεται παράλληλα με τον πυκνωτή εξόδου, και η τάση του γίνεται $V_L = -V_0$.

Αντίστοιχα με το μετατροπέα ανύψωσης πρέπει η αρχική και η τελική τιμή του ρεύματος πηνίου να είναι ίδιες. Ισχύει:

$$(V_d - V_0)t_{on} = V_0(T_s - t_{on}) \quad 2-28$$

Διαιρώντας την παραπάνω σχέση με την περίοδο προκύπτει η σχέση που συνδέει την τάση εισόδου- εξόδου:

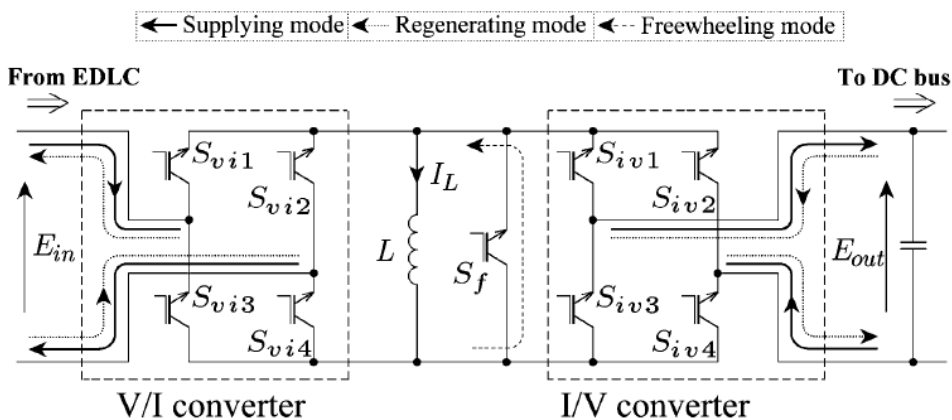
$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{t_{on}}{T_s} = D \quad 2-29$$

Η σχέση ρεύματος εισόδου και ρεύματος εξόδου προκύπτει όπως και στον μετατροπέα ανύψωσης τάσης:

$$P_d = P_0 \Rightarrow V_d I_d = V_0 I_0 \Rightarrow \frac{I_0}{I_d} = \frac{V_d}{V_0} \Rightarrow \boxed{\frac{I_0}{I_d} = \frac{1}{D}} \quad 2-30$$

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

Ο μικτός DC - DC μετατροπέας ανυψώνει ή υποβιβάζει την τάση εισόδου και δίνει τη δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος από την είσοδο στην έξοδο και αντίστροφα ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του. Για το λόγο αυτό είναι ο κατάλληλος μετατροπέας για τη διασύνδεση των υπερπυκνωτών με το ζυγό συνεχούς ρεύματος εφόσον απαιτείται συνεχής φόρτιση και εκφόρτισή τους. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε η διάταξη που προτείνεται στην αναφορά [39]. Το κύκλωμα του μετατροπέα παρουσιάζεται στο σχήμα:



Σχήμα 2.21 : Κύκλωμα αμφίδρομου μετατροπέα

Ο συγκεκριμένος μετατροπέας λειτουργεί σε 3 καταστάσεις: Supplying mode – Εκφόρτιση υπερπυκνωτών, Regenerative mode – Φόρτιση υπερπυκνωτών και Freewheeling mode. Οι διάφοροι τρόποι λειτουργίας του παρουσιάζονται στα ακόλουθο σχήμα:

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

Πίνακας 2.1 : Μέθοδοι αγωγής διακοπών για κάθε λειτουργία

Ο κύριος ρόλος του μετατροπέα I/V είναι η σταθεροποίηση της τάσης του ζυγού E_{out} . Αν η τιμή της τάσης εξόδου είναι διαφορετική από την επιθυμητή, τα IGBTs αλλάζουν κατάσταση αγωγής εξαναγκάζοντας το ρεύμα του πηνίου να κινηθεί σύμφωνα με τη λειτουργία regenerative/supplying (μετασχηματισμός I/V). Πρωταρχικός σκοπός του μετατροπέα V/I είναι η σταθεροποίηση του ρεύματος του πηνίου I_L . Αν η τιμή του ρεύματος του πηνίου δεν είναι η επιθυμητή αναπροσαρμόζεται η κατάσταση αγωγής των IGBTs προκειμένου να συνδεθεί η τάση E_{in} με το πηνίο όπως φαίνεται στα βέλη της λειτουργίας regenerative/supplying (μετασχηματισμός V/I). Όταν οι τιμές των μεγεθών E_{out} και I_L βρίσκονται στα επιθυμητά όρια, το ρεύμα του πηνίου κινείται ελεύθερα μέσω του διακόπτη S_f (freewheeling mode). Ο αμφίδρομος μετατροπέας λειτουργεί σαν μικτός μετατροπέας μετά από επαναλαμβανόμενους μετασχηματισμούς V/I και I/V με σχέση εισόδου-εξόδου:

$$D = \frac{E_{out}}{E_{in} + E_{out}} \quad 2-31$$

2.8 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά των συνιστωσών του υβριδικού συστήματος. Συγκεκριμένα περιγράφηκε η αρχή λειτουργίας της εκάστοτε συνιστώσας και αναφέρθηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της καθώς επίσης και οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκαν οι συνιστώσες αυτές να συνθέσουν το υβριδικό σύστημα.

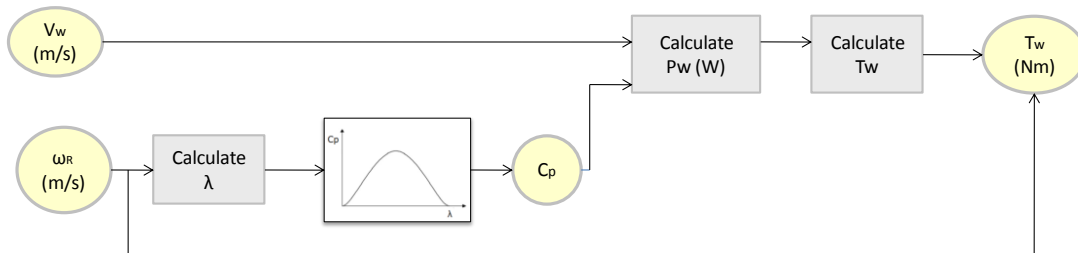
3 Μοντελοποίηση Συνιστωσών Υβριδικού Συστήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσονται τα αριθμητικά μοντέλα των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος και παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις τους. Τα ακριβή μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του συστήματος παρατίθενται στο Παράρτημα.

3.1 Μοντελοποίηση ανεμογεννήτριας

3.1.1.1 Μοντελοποίηση αεροδυναμικού μέρους

Σύμφωνα με τις εξισώσεις που περιγράφουν το αεροδυναμικό μέρος της Α/Γ, κατασκευάστηκε το αντίστοιχο μοντέλο.



Σχήμα 3.1 : Υποσύστημα Blades, αεροδυναμικό μέρος

Είσοδοι στο μοντέλο αποτελούν η ταχύτητα του ανέμου και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων. Από τη σχέση (2-2) και τις στιγμιαίες τιμές που λαμβάνονται για τα μεγέθη αυτά υπολογίζεται ο στιγμιαίος λόγος ταχυτήτων. Στη συνέχεια, από το στιγμιαίο λόγο ταχυτήτων με τη βοήθεια ενός πίνακα αναφοράς (lookup table) αντιστοιχίζεται η τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή. Από τα παραπάνω μεγέθη υπολογίζεται σε κάθε χρονική στιγμή η αεροδυναμική ροπή που ασκείται στον άξονα της γεννήτριας με βάση τις σχέσεις (2-1) και (2-3).

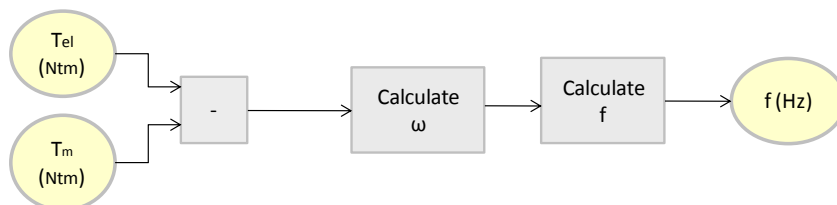
3.1.1.2 Μοντελοποίηση σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών

Η στοιχειώδης εξίσωση των ρομών που προκύπτει από τις εξισώσεις γενικευμένης θεωρίας χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ταχύτητας του δρομέα:

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega}{dt} \quad 3-1$$

όπου J η ροπή αδράνειας του δρομέα και $d\omega/dt$ η γωνιακή επιτάχυνσή του.

Βάσει των ανωτέρω εξισώσεων προκύπτουν τα επιμέρους υποσυστήματα.



Σχήμα 3.2 : Υποσύστημα Machine I

Το υποσύστημα Machine δέχεται ως εισόδους την ηλεκτρομαγνητική ροπή και τη μηχανική ροπή της γεννήτριας και υπολογίζει από τη σχέση (3-1) τη συχνότητα περιστροφής f .

Το δεύτερο υποσύστημα (Machine II) υπολογίζει το ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας το οποίο συνδέεται με τη ροπή με γραμμική σχέση κοντά στα σημεία λειτουργίας. Στην πράξη χρησιμοποιήθηκαν πίνακες αναφοράς (lookup tables) για την προσομοίωση των χαρακτηριστικών της γεννήτριας.

Τα ακριβή μοντέλα που υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον του SIMULINK/MATLAB βρίσκονται στο Παράρτημα - Μοντέλα 1-3.

3.2 Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Οι παράμετροι βάσει των οποίων μοντελοποιήθηκε το σύστημα της Φ/β γεννήτριας δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

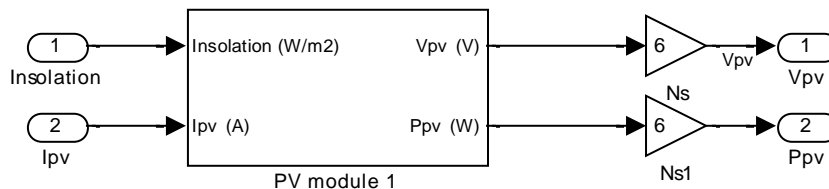
Παράμετρος Φ/β στοιχείου	Τιμή
Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC}	5.45A
Τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC}	22.2V
Μέγιστο ονομαστικό ρεύμα I_R	4.95A
Μέγιστη ονομαστική τάση V_R	17.2V

Πίνακας 3.1 : Παράμετροι β/ϕ στοιχείου

Ο συντελεστής πλήρωσης του Φ/β στοιχείου είναι ένα μέγεθος που δίνει την εικόνα της απόδοσής του καθώς αποτελεί μια ένδειξη σχετικά με το πόσο κοντά είναι η χαρακτηριστική της ηλιακής κυψέλης στο ιδεατό σχήμα της καμπύλης $I-V$ από την οποία προκύπτει η μέγιστη ισχύς. Δεδομένου των τιμών των παραμέτρων στον πίνακα 3.1 ο συντελεστής πλήρωσης (fill factor) προκύπτει:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC} V_{OC}} \Rightarrow FF = \frac{I_R V_R}{I_{SC} V_{OC}} \Rightarrow FF = 70.37\% \quad 3-2$$

Η μοντελοποίηση του Φ/β στοιχείου βάσει των εξισώσεων του μαθηματικού μοντέλου οδηγεί στο παρακάτω σχηματικό διάγραμμα:

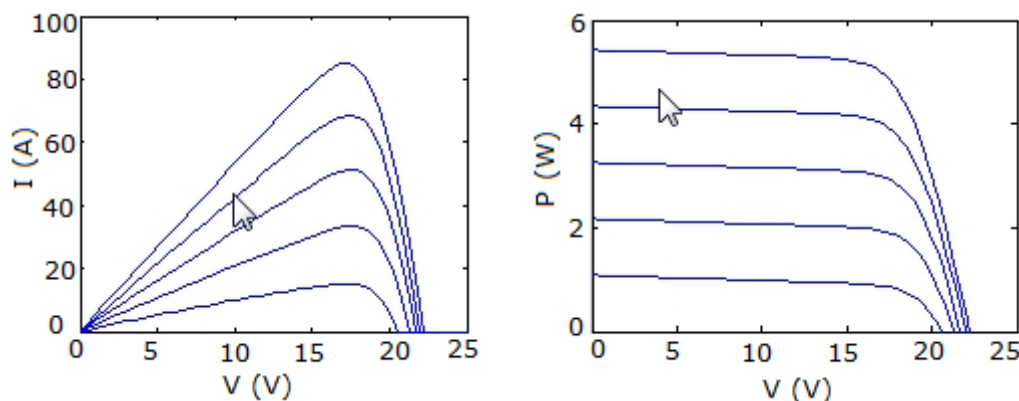


Σχήμα 3.3 : Σχηματικό διάγραμμα μοντελοποίησης Φ/β Γεννήτριας

Εισόδους του μοντέλου αποτελούν η ηλιακή ακτινοβολία (W/m^2) και το ρεύμα του φορτίου (A). Εξόδους αποτελούν η τάση στα άκρα του Φ/β πλαισίου (V) και η ισχύς εξόδου (W). Η ηλιακή ακτινοβολία μέσω κατάλληλου κέρδους μετατρέπεται σε ένταση ρεύματος (I_{sc}). Η μεταβλητή N_s αναπαριστά τον αριθμό των εν σειρά συνδεδεμένων Φ/β στοιχείων

που συνθέτουν το ϕ/β πλαίσιο. Το αντίστοιχο μοντέλο στο περιβάλλον του SIMULINK/MATLAB βρίσκεται στο Παράρτημα - Μοντέλο 4.

Από το παραπάνω μοντέλο εξήχθησαν οι καμπύλες I-V και P-V του ϕ/β πλαισίου για διάφορες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας (σχ.3.4). Από το διάγραμμα P-V προκύπτει πως το μέγιστο σημείο της καμπύλης (το σημείο μέγιστης ισχύος, Maximum Power Point - MPP) μετατοπίζεται καθώς αλλάζει η ηλιακή ακτινοβολία. Η μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου του ϕ/β πλαισίου είναι απαραίτητη και για αυτό απαιτείται να λειτουργεί στο ζεύγος τάσης ρεύματος που βρίσκεται στο μέγιστο της εκάστοτε καμπύλης.



Σχήμα 3.4 : I-V καμπύλες και P-V καμπύλες ϕ/β πλαισίου για τιμές ηλιακής ακτινοβολίας για 200, 400, 600, 800 και 1000 W/m²

Η ϕ/β γεννήτρια συγκροτείται από ϕ/β πλαίσια σε σειρά ή παράλληλα. Το μοντέλο της ϕ/β συστοιχίας που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 6 ϕ/β πλαίσια σε σειρά (Παράρτημα – Μοντέλο 5).

3.3 Μοντελοποίηση κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

Στην ενότητα αυτή αναπτύσσεται ένα δυναμικό μοντέλο που προσομοιώνει την λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου PEM, η οποία βασίστηκε στην αναφορά [23]. Προκειμένου η ανάλυση να είναι απλοποιημένη θεωρήθηκαν 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.

Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των εξισώσεων σύμφωνα με τις οποίες μοντελοποιήθηκε η κυψέλη καυσίμου.

A. Διάχυση 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:

$$\nabla x_i = \frac{RT}{P} \sum_{j=1}^N \frac{x_i N_j - x_j N_i}{D_{i,j}} \quad 3-3$$

όπου N ο μοριακός αριθμός (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 σχέση 3-3 γράφεται:

$$\frac{dx_{H_2O}}{dx} = \frac{RT}{P_a} \left(\frac{x_{H_2O} N_{H_2} - x_{H_2} N_{H_2O}}{D_{H_2O,H_2}} \right) \quad 3-4$$

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

$$\frac{dx_{H_2O}}{dx} = \frac{RT}{P_a} \left(\frac{x_{H_2O} N_{H_2}}{D_{H_2O,H_2}} \right) \quad 3-5$$

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

$$N_{H_2} = \frac{I_{den}}{2F} \quad 3-6$$

όπου I_{den} η πυκνότητα ρεύματος και F η σταθερά του Faraday (96487C/mol)

Ολοκληρώνοντας τη σχέση 3 - 5 και συνδυάζοντας την με την σχέση 3 - 6 από την περιοχή του καναλιού εισόδου έως την επιφάνεια του ηλεκτρολύτη (απόσταση l_a), προκύπτει:

$$x_{H_2O}^* = x_{H_2O}^{channel} \exp \left(\frac{RT I_{den} l_a}{2FP_a D_{H_2O,H_2}} \right) \quad 3-7$$

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

$$p_a = x_a P_a \quad 3-8$$

και τη σχέση:

$$x_{H_2O}^* + x_{H_2}^* = 1 \quad 3-9$$

η μερική ενεργός πίεση του υδρογόνου υπολογίζεται:

$$p_{H_2}^* = 0.5 p_{H_2O}^{sat} \left(\frac{1}{x_{H_2O}^{channel} \exp \left(\frac{RT I_{den} l_a}{2FP_a D_{H_2O,H_2}} \right)} - 1 \right) \quad 3-10$$

Τα αέρια που διαχέονται στην κάθοδο είναι τα εξής: O₂, N₂, H₂O_(g), CO₂. Η εξίσωση διάχυσης στην κάθοδο προκύπτει:

$$\frac{dx_{H_2O}}{dx} = \frac{RT}{P_a} \left(\frac{x_{H_2O} N_{H_2} - x_{H_2} N_{H_2O}}{D_{H_2O,H_2}} \right) = \frac{RT}{P_a} \left(\frac{-x_{H_2O} N_{O_2}}{D_{H_2O,O_2}} \right) \quad 3-11$$

Το μοριακό κλάσμα του νερού στην ενεργή επιφάνεια του καταλύτη στην κάθοδο ισούται με:

$$x_{H_2O}^* = x_{H_2O}^{channel} \exp\left(\frac{RTI_{den} l_a}{4FP_a D_{H_2O,O_2}}\right) \quad 3-12$$

Ομοίως τα μοριακά κλάσματα για το N₂ και το CO₂ δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$x_{N_2}^* = x_{N_2}^{channel} \exp\left(\frac{RTI_{den} l_a}{4FP_a D_{N_2,O_2}}\right) \quad 3-13$$

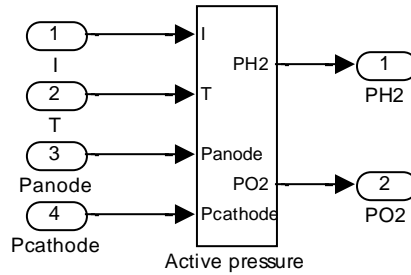
Επομένως το μοριακό κλάσμα του οξυγόνου O₂ είναι:

$$x_{O_2}^* = 1 - x_{CO_2}^* - x_{H_2O}^* - x_{N_2}^* \quad 3-14$$

Η μερική ενεργός πίεση του οξυγόνου υπολογίζεται ως εξής:

$$p_{O_2}^* = \frac{p_{H_2O}^*}{x_{H_2O}^*} x_{O_2}^* = \frac{p_{H_2O}^*}{x_{H_2O}^*} (1 - x_{CO_2}^* - x_{H_2O}^* - x_{N_2}^*) \quad 3-15$$

Από τις σχέσεις 3-10 και 3-15 υπολογίζονται οι μερικές πιέσεις του υδρογόνου και του οξυγόνου, οι οποίες αξιοποιούνται στην εξίσωση του Nernst για τον καθορισμό της τάσης εξόδου της κυψέλης. Το υποσύστημα που μοντελοποιεί τις ανωτέρω εξισώσεις φαίνεται στο σχ. 3.5 (το αντίστοιχο μοντέλο στο περιβάλλον του SIMULINK/MATLAB βρίσκεται στο Παράρτημα - Μοντέλο 6).



Σχήμα 3.5 : Υποσύστημα Active pressure

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:

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dp_{H_2}^*}{dt} = M_{H_2,in} - M_{H_2,out} - \frac{i}{2F} = M_{H_2,net} - \frac{i}{2F} \quad 3-16$$

$$\frac{V_c}{RT} \frac{dp_{O_2}^*}{dt} = M_{O_2,in} - M_{O_2,out} - \frac{i}{4F} = M_{O_2,net} - \frac{i}{4F} \quad 3-17$$

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.

Στη μόνιμη κατάσταση όλες οι μερικές πιέσεις θεωρούνται σταθερές, δηλαδή:

$$\frac{dp_{O_2}^*}{dt} = \frac{dp_{H_2}^*}{dt} = 0 \quad 3-18$$

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

$$M_{H_2,net} = 2M_{O_2,net} = \frac{i}{2F} \quad 3-19$$

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

$$\tau_a \frac{dM_{O_2,net}}{dt} = \frac{i}{4F} - M_{O_2,net} \quad 3-20$$

όπου τ_a και τ_c οι σταθερές χρόνου της μοριακής ροής του υδρογόνου και του οξυγόνου σε sec, οι οποίες ορίζονται ως εξής:

$$\tau_a = \frac{V_a}{K_{H_2} RT} \quad 3-21$$

$$\tau_c = \frac{V_c}{K_{O_2} RT} \quad 3-22$$

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

Οι μηχανικές καθυστερήσεις που υλοποιούνται με τις παραπάνω εξισώσεις μοντελοποιούνται στο περιβάλλον του SIMULINK/MATLAB (Παράρτημα - μοντέλο 7).

Γ. Τάση εξόδου κυψέλης καυσίμου

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

$$E_{cell} = E_{0,cell} + \frac{RT}{2F} \ln \left(p_{H_2}^* (p_{O_2}^*)^{0.5} \right) \quad 3-23$$

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

$$E_{0,cell} = E_{0,cell}^0 - k_E (T - 298) \quad 3-24$$

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

Προκειμένου να απλοποιηθεί η ανάλυση, 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 εξής εξίσωση:

$$E_{d,cell} = \lambda_e \left[i(t) - i(t) \cdot \exp \left(-\frac{t}{\tau_e} \right) \right] \quad 3-25$$

όπου λ_e μια εμπειρική σταθερά και τ_e η συνολική σταθερά χρόνου των μηχανικών καθυστερήσεων σε sec. Ο μετασχηματισμός της σχέσης αυτής στο πεδίο της συχνότητας δίνει την παρακάτω σχέση:

$$E_{d,cell}(s) = \lambda_e I(s) \frac{\tau_e s}{\tau_e s + 1} \quad 3-26$$

Επομένως η σχέση 3 - 23 γίνεται:

$$E_{cell} = E_{0,cell} + \frac{RT}{2F} \ln \left(p_{H_2}^* (p_{O_2}^*)^{0.5} \right) - E_{d,cell} \quad 3-27$$

Το δυναμικό E_{cell} είναι στην πραγματικότητα η τάση ανοιχτοκύκλωσης της κυψέλης καυσίμου. Ωστόσο, η τάση είναι μικρότερη σε συνθήκες φόρτισης λόγω απωλειών ενεργοποίησης (Activation loss), ωμικών απωλειών (Ohmic loss) και μείωσης στη συγκέντρωση των αντιδρώντων (Concentration loss). Συνεπώς η τερματική τάση ενός κελιού υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{cell} = E_{cell} - V_{act,cell} - V_{ohm,cell} - V_{conc,cell} \quad 3-28$$

$$V_{cell} = E_{cell} - V_{act,cell} - V_{ohm,cell} - V_{conc,cell} \quad 3-29$$

και η συνολική τάση εξόδου της συστοιχίας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{out} = N_{cell} V_{cell} \Rightarrow V_{out} = E_{cell} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad 3-30$$

όπου N_{cell} είναι ο αριθμός των κυψελών.

Πιο αναλυτικά οι απώλειες που προκύπτουν είναι:

i. Απώλειες ενεργοποίησης

Τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν από τη διάσπαση και την ένωση χημικών δεσμών κινούνται προς την άνοδο και την κάθοδο της κυψέλης καυσίμου. Προκειμένου να λάβουν χώρα οι χημικές αντιδράσεις που θα μεταφέρουν τα ηλεκτρόνια δίνεται κάποιο μέρος της διαθέσιμης ενέργειας. Ως αποτέλεσμα προκύπτουν οι απώλειες ενεργοποίησης οι οποίες συμβαίνουν τόσο στην άνοδο όσο και στην κάθοδο. Η αντίδραση της οξείδωσης που λαμβάνει χώρα στην άνοδο ολοκληρώνεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς αντίθετα από την αναγωγή του οξυγόνου στην κάθοδο η οποία ολοκληρώνεται πολύ αργά [21]. Οι απώλειες ενεργοποίησης εκφράζονται μαθηματικά με μια εμπειρική εξίσωση που βασίζεται σε ηλεκτροχημικές παρατηρήσεις, γνωστή ως εξίσωση Tafel:

$$V_{act} = \frac{RT}{azF} \ln \left(\frac{l}{l_0} \right) \Rightarrow V_{act} = t [a + b \ln(l)] \quad 3-31$$

όπου α ο συντελεστής μεταφοράς (coefficient transfer), z ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μεταφέρονται ανά αντίδραση και l_0 το ρεύμα ανταλλαγής (exchange current).

Οι απώλειες ενεργοποίησης υπολογίζονται επίσης και από μία άλλη εμπειρική εξίσωση:

$$V_{act} = \eta_0 + (T - 298) \cdot a + T \cdot b \cdot \ln(l) = V_{act1} + V_{act2} \quad 3-32$$

όπου V_{act1} είναι η πτώση τάσης ενεργοποίησης συναρτήσει της εσωτερικής θερμοκρασίας της κυψέλης και V_{act2} η πτώση τάσης ενεργοποίησης συναρτήσει της θερμοκρασίας και της έντασης του ρεύματος.

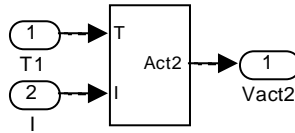
Η ισοδύναμη αντίσταση ενεργοποίησης που οφείλεται στην V_{act2} είναι:

$$R_{act} = \frac{V_{act2}}{l} \Rightarrow R_{act} = \frac{T \cdot b \cdot \ln(l)}{l} \quad 3-33$$

Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται τα υποσυστήματα που μοντελοποιούν τις απώλειες ενεργοποίησης:



Σχήμα 3.6 : Υποσύστημα Activation 1



Σχήμα 3.7 : Υποσύστημα Activation 2

Τα αντίστοιχα μοντέλα που υλοποιούν τις απώλειες ενεργοποίησης στο περιβάλλον του SIMULINK/MATLAB βρίσκονται στο Παράρτημα – Μοντέλα 8 και 9.

ii. Ωμικές απώλειες

Η ωμική αντίσταση της κυψέλης συνίσταται από την αντίσταση της μεμβράνης, την αγωγιμότητα μεταξύ μεμβράνης και ηλεκτροδίων και την αντίσταση των ηλεκτροδίων. Συνεπώς η πτώση τάσης λόγω ωμικών απωλειών προκύπτει:

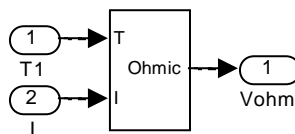
$$V_{ohm} = V_{ohm,a} + V_{ohm,membrane} + V_{ohm,c} = IR_{ohm} \quad 3-34$$

όπου R_{ohm} η συνολική ωμική αντίσταση της κυψέλης η οποία υπολογίζεται συναρτήσει της θερμοκρασίας και του ρεύματος:

$$R_{ohm} = R_{ohm0} + k_R I - k_R T \quad 3-35$$

όπου R_{ohm0} η σταθερή ωμική αντίσταση και k_{Ri} , k_{RT} εμπειρικές σταθερές.

Το υποσύστημα μοντελοποίησης των ωμικών απωλειών ακολουθεί στο σχήμα:



Σχήμα 3.8 : Υποσύστημα Ohmic

Το αντίστοιχο μοντέλο που υλοποιεί τις ωμικές απώλειες με βάση τις ανωτέρω εξισώσεις στο περιβάλλον του SIMULINK/MATLAB βρίσκεται στο παράρτημα – Μοντέλο 10.

iii. Απώλειες μειωμένης συγκέντρωσης αντιδρώντων

Η πτώση τάσεως λόγω μείωσης της συγκέντρωσης των αντιδρώντων εμφανίζεται σε όλο το φάσμα της πυκνότητας ρεύματος, σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος όμως γίνεται πολύ πιο αισθητή. Οι χημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα στην περιοχή μεταξύ μεμβράνης και ηλεκτροδίου. Το υδρογόνο όπως και το οξυγόνο μέσω της διαδικασίας

διάχυσης πρέπει να βρεθεί σε αυτή την περιοχή. Στην κυψέλη καυσίμου όμως το υδρογόνο και το οξυγόνο διέρχονται μέσα από το στρώμα διάχυσης των αερίων. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει φορτίο, και άρα ούτε και ρεύμα, η συγκέντρωση των αντιδρώντων είναι ίδια με αυτή που εμφανίζεται και στην περιοχή του συλλέκτη. Στην περίπτωση που ρέει ρεύμα, η ροή του ρεύματος επιβραδύνει και εμποδίζει τη διάχυση των στοιχείων στην περιοχή που πραγματοποιούνται οι χημικές αντιδράσεις. Το πρόβλημα αυτό είναι αρκετά πιο έντονο στην κάθοδο όπου το οξυγόνο συναντά αντίσταση η οποία οφείλεται στην παραγόμενη ποσότητα του νερού που κλείνει τις λεπτές διαδρομές του στρώματος διάχυσης. Η μαθηματική έκφραση της απώλειας είναι η ακόλουθη:

$$V_{conc} = -\frac{RT}{zF} \ln\left(\frac{C_s}{C_R}\right) \quad 3-36$$

όπου C_s η επιφανειακή συγκέντρωση και C_R η χωρική συγκέντρωση.

Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο του Fick και το νόμο του Faraday η εξίσωση 3-36 μετατρέπεται ως εξής:

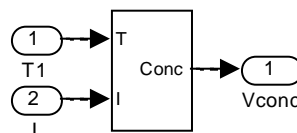
$$V_{conc} = -\frac{RT}{zF} \ln\left(1 - \frac{l}{l_{limit}}\right) \quad 3-37$$

όπου l_{limit} η μέγιστη τιμή του ρεύματος η οποία αντιστοιχεί στο μέγιστο ρυθμό παροχής καυσίμου στην κυψέλη.

Η ισοδύναμη ωμική αντίσταση που αναπαριστά τις απώλειες συγκέντρωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{conc} = \frac{V_{conc}}{I} \Rightarrow R_{conc} = -\frac{RT}{zFI} \ln\left(1 - \frac{l}{l_{limit}}\right) \quad 3-38$$

Το υποσύστημα που μοντελοποιεί τις απώλειες συγκέντρωσης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.9 : Υποσύστημα Concentration

Το αντίστοιχο μοντέλο που υλοποιεί τις απώλειες συγκέντρωσης στο περιβάλλον του SIMULINK/MATLAB βρίσκεται στο Παράρτημα – Μοντέλο 11.

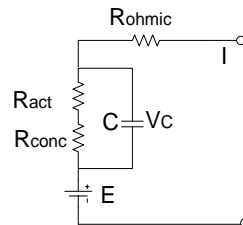
Δ. Φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας (*Double-layer charging effect*)

Όταν δύο διαφορετικά υλικά έρχονται σε επαφή, εμφανίζεται το φαινόμενο της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας, όπως για παράδειγμα στη δίοδο p-n. Καθώς τα δύο διαφορετικά υλικά έρχονται σε επαφή παρουσιάζεται διάχυση των οπών από τη μία πλευρά στην άλλη και ροή ηλεκτρονίων προς την αντίθετη πλευρά. Λόγω της ροής των φορτίων δημιουργείται μία επιφάνεια που αποτελείται από ένα στρώμα διπλής στρώσης αρνητικού και θετικού φορτίου το οποίο 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 [24].

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

Σύμφωνα με τα παραπάνω το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της κυψέλης είναι:



Σχήμα 3.10 : Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κυψέλης καυσίμου

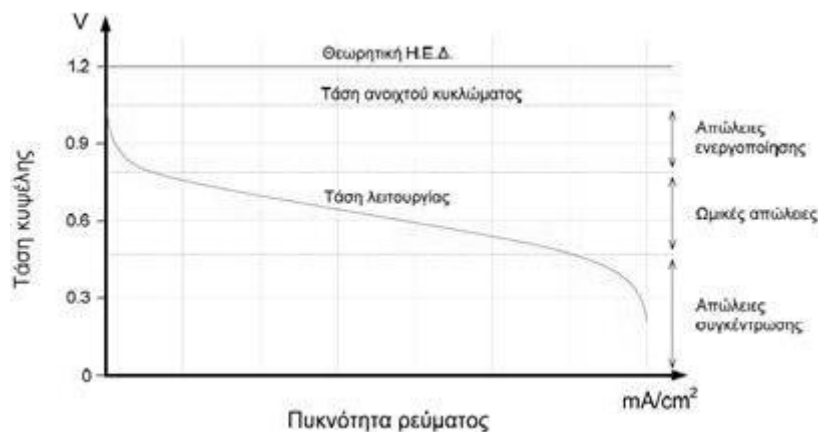
Η τάση στα άκρα του πυκνωτή που μοντελοποιεί το φαινόμενο της διπλοστοιβάδας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_C = \left(1 - C \frac{dV_C}{dt}\right) (R_{ct} + R_{conc}) \quad 3-39$$

Συνεπώς η τάση εξόδου υπολογίζεται συναρτήσει της τάσης V_C αντί των τάσεων V_{act2} και V_{conc} από την σχέση:

$$V_{out} = E - V_C - V_{act1} - V_{ohm} \quad 3-40$$

Η χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος (καμπύλη πόλωσης) που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την συμπεριφορά της κυψέλης καυσίμου είναι μη γραμμική. Η τάση της κυψέλης μειώνεται με την αύξηση του ρεύματος. Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις απώλειες προκύπτει η καμπύλη της τάσης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [25]:



Σχήμα 3.11 : Χαρακτηριστική τάσης ρεύματος μίας κυψέλης

Ε. Θερμοδυναμική προσέγγιση

Το προϊόν των χημικών αντιδράσεων που αναφέρθηκαν ανωτέρω είναι νερό με παράλληλη έκλυση θερμότητας. Στην κυψέλη καυσίμου πραγματοποιείται μετατροπή της χημικής ενέργειας των αερίων αντιδρώντων σε ηλεκτρική. Επομένως είναι απαραίτητη η μελέτη των θερμοδυναμικών φαινομένων προκειμένου να γίνει ανάλυση της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει τον θεωρητικό προσδιορισμό της τάσης που αναπτύσσεται στην κυψέλη και επιδεικνύει την εξάρτησή 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 μια χημική αντίδραση σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια Gibbs αποτελεί το μέγιστο μέτρο της ηλεκτρικής ενέργειας την οποία μπορεί να παράγει ένα σύστημα υπό σταθερή θερμοκρασία και πίεση. Το ηλεκτρικό έργο W_{el} δίνεται από την αρνητική μεταβολή της ενέργειας Gibbs με βάση τη σχέση:

$$W_{el} = -\Delta G \quad 3-41$$

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

$$\dot{q}_{net} = \dot{q}_{chem} - \dot{q}_{elec} - \dot{q}_{sens+latent} - \dot{q}_{loss} \quad 3-42$$

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

Η διαθέσιμη ισχύ που απελευθερώνεται από την χημική αντίδραση είναι:

$$\dot{q}_{chem} = \dot{n}_{H_2,consumed} \cdot \Delta G \quad 3-43$$

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:

$$\Delta G = \Delta G_0 - RT \cdot \ln \left(p_{H_2}^* \cdot (p_{O_2}^*)^{0.5} \right) \quad 3-44$$

Η ηλεκτρική ισχύς εξόδου προκύπτει από την σχέση:

$$\dot{q}_{elec} = V_{out} \cdot I \quad 3-45$$

Το άθροισμα της αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας που απορροφάται κατά τη διαδικασία υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \dot{q}_{sens+latent} = & \left(\dot{n}_{H_2,out} \cdot T - \dot{n}_{H_2,in} \cdot T_{room} \right) \cdot C_{H_2} + \left(\dot{n}_{O_2,out} \cdot T - \dot{n}_{O_2,in} \cdot T_{room} \right) \cdot C_{O_2} + \\ & \dot{n}_{H_2O,generated} \cdot (T - T_{room}) \cdot C_{H_2O,l} + \dot{n}_{H_2O,generated} \cdot H_V \end{aligned} \quad 3-46$$

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

Οι θερμότητες που οφείλονται κατά κύριο λόγο στην μεταγωγή του αέρα προκύπτουν ως εξής:

$$\dot{q}_{loss} = h_{cell} \cdot (T - T_{room}) \cdot N_{cell} \cdot A_{cell} \quad 3-47$$

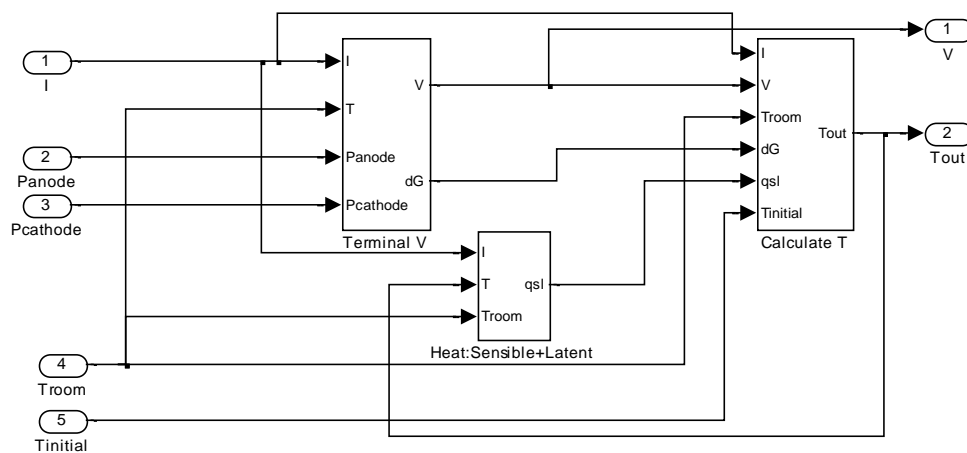
όπου h_{cell} ο συντελεστής θερμοπερατότητας μιας κυψέλης και A_{cell} η επιφάνεια της κυψέλης.

Στη μόνιμη κατάσταση η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί υπό σταθερή θερμοκρασία και η καθαρή θερμότητα που παράγεται από την χημική αντίδραση ισούται με μηδέν, $q_{net}=0$. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων η θερμοκρασία της κυψέλης υφίσταται αυξομειώσεις σύμφωνα με τη σχέση:

$$M_{FC} \cdot C_{FC} \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{net} \quad 3-48$$

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

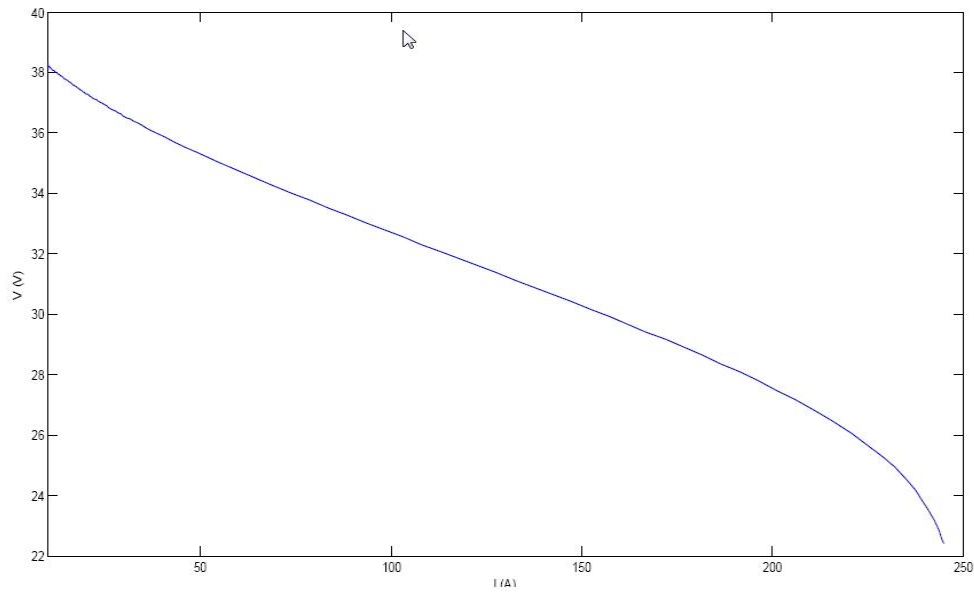
Τα ηλεκτροχημικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου περιγράφονται πλήρως από τις ανωτέρω εξισώσεις. Στο ακόλουθο σχήμα παρατίθεται το σχηματικό διάγραμμα της κυψέλης καυσίμου.



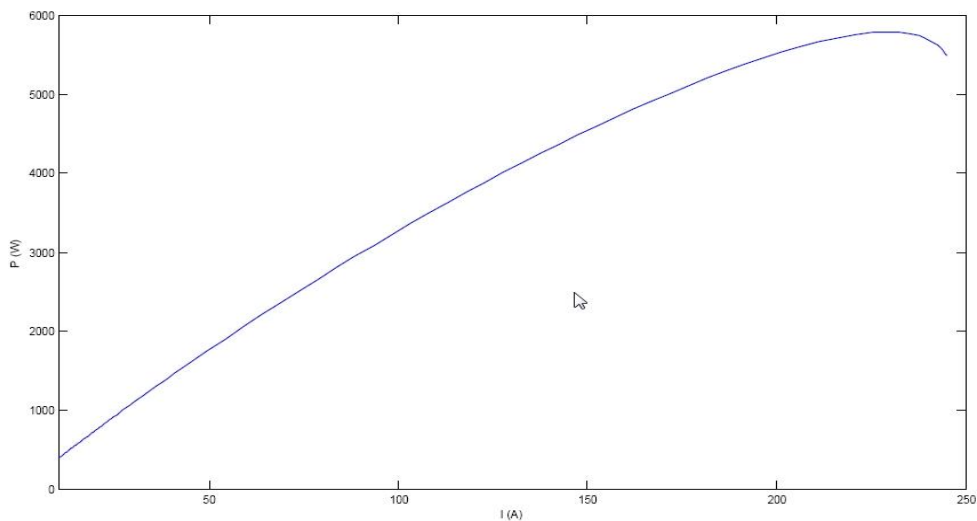
Σχήμα 3.12 : Μοντέλο κυψέλης καυσίμου PEM

Οι είσοδοι του μοντέλου είναι: το ρεύμα φόρτισης της κυψέλης, η πίεση της ανόδου και της καθόδου, η αρχική θερμοκρασία της κυψέλης και η θερμοκρασία δωματίου. Οι έξοδοι είναι: η θερμοκρασία της κυψέλης και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Στο υποσύστημα Terminal V μοντελοποιούνται οι επιμέρους απώλειες που περιγράφηκαν παραπάνω και οι μηχανικές καθυστερήσεις. Στο υποσύστημα Heat: Sensible+Latent υπολογίζεται το άθροισμα της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας, όπως έχει περιγραφεί από την αντίστοιχη εξίσωση 3 - 46. Η μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου στο περιβάλλον του SIMULINK/MATLAB βρίσκεται στο Παράρτημα – Μοντέλα 12 έως 15.

Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες V-I και P-V της κυψέλης καυσίμου. Είναι φανερό πως επαληθεύεται η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης ρεύματος (σχ. 3.11).



Σχήμα 3.13 : Χαρακτηριστική V-I κυψέλης καυσίμου



Σχήμα 3.14 : Χαρακτηριστική P-V κυψέλης καυσίμου

3.4 Μοντελοποίηση ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

A. Ηλεκτρικό μοντέλο

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

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

3-49

όπου U_{cell} η τάση στα άκρα καθενός από τα εν σειρά κελιά, U_{ref} 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

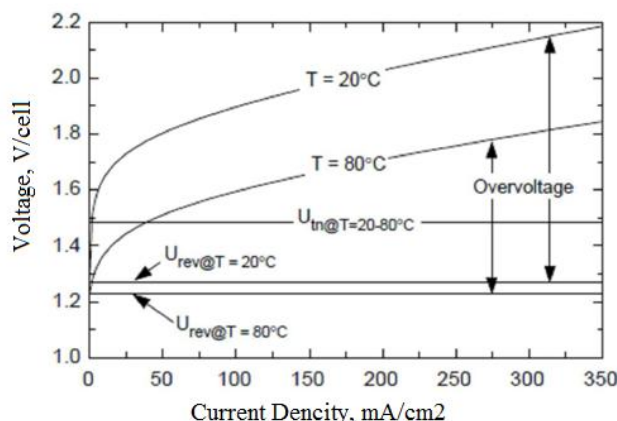
παράμετροι ωμικής αντίστασης του ηλεκτρολύτη και s_i , t_i οι παράμετροι υπερδυναμικού (overvoltage) στα ηλεκτρόδια.

Συνεπώς, η τάση στα άκρα του ηλεκτρολύτη συναρτίζεται της τάσης ενός κελιού δίνεται από την εξής σχέση:

$$U_{el} = n_C \cdot U_{cell} \quad 3-50$$

όπου n_C το πλήθος των εν σειρά συνδεδεμένων κελιών.

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. Συγκεκριμένα, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί ελάττωση των υπερδυναμικών και άρα και της τάσης λειτουργίας του κελιού. Θεωρώντας πως η ισχύς εισόδου διατηρείται σταθερή, η ελάττωση της τάσης συνεπάγεται αύξηση του ρεύματος λειτουργίας και επομένως του ρυθμού παραγωγής υδρογόνου. Συνεπώς, η αύξηση της θερμοκρασίας βελτιώνει τη λειτουργική συμπεριφορά του ηλεκτρολύτη. Στο σχ. 3.15 δίνεται η τάση κελιού ως συνάρτηση της πυκνότητας ρεύματος για χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας. [30]



Σχήμα 3.15 : Καμπύλες V – I για ένα κελί ηλεκτρολύτη σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας

B. Ηλεκτροχημικό μοντέλο

Ο ρυθμός παραγωγής υδρογόνου είναι ευθέως ανάλογος της έντασης του ρεύματος λειτουργίας του ηλεκτρολύτη. Ο βαθμός απόδοσης Faraday είναι ο λόγος 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 στις απώλειες λόγω παρασιτικών ρευμάτων κατά μήκος των αγωγών των αερίων και για το λόγο αυτό αναφέρεται και 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 της ελάττωσης της ηλεκτρικής του αντίστασης. Επιπλέον, το μέγεθος των παρασιτικών ρευμάτων σε κάθε κελί είναι ανάλογο της τάσης του κελιού και κατά συνέπεια το κλάσμα των παρασιτικών ρευμάτων προς το συνολικό ρεύμα του ηλεκτρολύτη αυξάνεται όσο ελαττώνεται η πυκνότητα ρεύματος. Παράλληλα αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει ελάττωση της αντίστασης του διαλύματος η οποία αντιστοιχεί σε υψηλότερες απώλειες παρασιτικών ρευμάτων και μικρότερο βαθμό απόδοσης Faraday.

Ο βαθμός απόδοσης Faraday υπολογίζεται ως εξής [30]:

$$n_F = \frac{\left(\frac{I_{el}}{A}\right)^2}{f_1 + \left(\frac{I_{el}}{A}\right)^2} \cdot f_2 \quad 3-51$$

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

$$f_1 = 2.5 \cdot T_{el} + 50 \quad 3-52$$

$$f_2 = -0.00075 \cdot T_{el} + 1 \quad 3-53$$

Ο βαθμός απόδοσης Faraday είναι δυνατόν να προσεγγισθεί από μία σύνθετη εκθετική συνάρτηση:

$$n_F = a_1 \cdot \exp \left[\frac{a_2 + a_3 \cdot T_{el}}{\left(\frac{I_{el}}{A}\right)} + \frac{a_4 + a_5 \cdot T_{el}}{\left(\frac{I_{el}}{A}\right)^2} \right] \quad 3-54$$

όπου a_i παράμετροι που καθορίζονται πειραματικά.

Η απόδοση Faraday του συγκεκριμένου μοντέλου για θερμοκρασία λειτουργίας 40°C υπολογίζεται από την εξής σχέση [32-33]:

$$n_F = 96.5 \cdot \exp \left[\frac{0.09}{I_{el}} - \frac{75.5}{I_{el}^2} \right] (\%) \quad 3-55$$

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

$$n_{H_2} = \frac{n_F \cdot n_C \cdot I_{el}}{2F} \quad 3-56$$

Ο ηλεκτρολύτης υλοποιείται με βάση τις ανωτέρω εξισώσεις στο περιβάλλον του SIMULINK/MATLAB (Παράρτημα – Μοντέλο 16).

3.5 Μοντελοποίηση δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου

Η ποσότητα του υδρογόνου που είναι αποθηκευμένη στη δεξαμενή N_{H_2} (mol) μπορεί να υπολογιστεί ανά πάσα στιγμή από τη σχέση:

$$N_{H_2} = N_0 + \int \dot{n}_{H_2} dt - \int \dot{q}_{H_2} dt \quad 3-57$$

όπου N_0 η αρχική ποσότητα υδρογόνου σε mol, \dot{n}_{H_2} (mol / s) ο μοριακός ρυθμός εισροής υδρογόνου στη δεξαμενή από τον ηλεκτρολύτη και \dot{q}_{H_2} (mol / s) ο μοριακός ρυθμός εκροής υδρογόνου από τη δεξαμενή προς την κυψέλη καυσίμου.

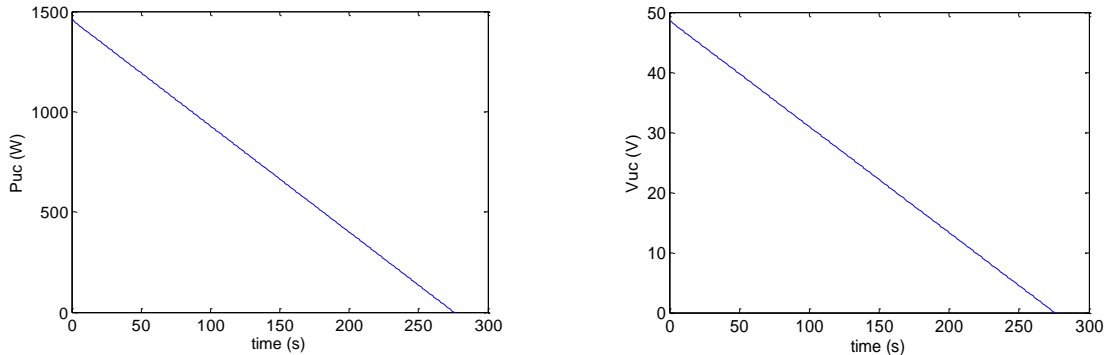
Η πίεση της δεξαμενής P_{tank} δίνεται από την εξής σχέση: [35]

$$P_{\text{tank}} = z \cdot \frac{N_{H_2} \cdot R \cdot T_{\text{tank}}}{M_{H_2} \cdot V_{\text{tank}}} \quad 3-58$$

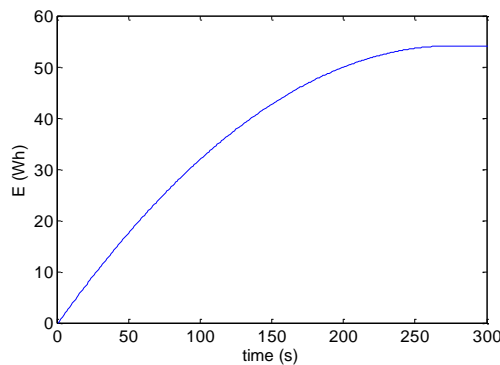
Η μοντελοποίηση του υπερπυκνωτή βασίστηκε στις παραμέτρους του μοντέλου Maxwell Bootcap BMOD0165 - 48.6V που έχουν καταγραφεί στον πίνακα 3.2.

Βάσει των ανωτέρων εξισώσεων και παραμέτρων μοντελοποιήθηκε ο υπερπυκνωτής στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB (Παράρτημα – Μοντέλο 18).

Από το ανωτέρω μοντέλο εξήχθηκαν οι καμπύλες εκφόρτισης V-t και P-t για ρεύμα 30A, καθώς και η ενέργεια του υπερπυκνωτή που προέκυψε ολοκληρώνοντας την ισχύ.



Σχήμα 3.17 : Καμπύλες φόρτισης και εκφόρτισης υπερπυκνωτή V-t και P-t για ρεύμα 30A



Σχήμα 3.18 : Ενέργεια που αποδόθηκε από τον υπερπυκνωτή (54Wh)

Οι υπερπυκνωτές είναι διατάξεις χαμηλής τάσης. Για εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερες τιμές τερματικής τάσης ή χωρητικότητας δημιουργούνται συστοιχίες υπερπυκνωτών. Η τερματική τάση καθορίζει τον αριθμό των υπερπυκνωτών (n_s) που πρέπει να συνδεθούν σε σειρά. Η απαιτούμενη χωρητικότητα καθορίζει τον αριθμό των υπερπυκνωτών που πρέπει να συνδεθούν παράλληλα (n_p). Η ισοδύναμη αντίσταση σειράς και η ισοδύναμη χωρητικότητα υπολογίζονται ως εξής:

$$R_{s,total} = n_s \frac{R_s}{n_p} \quad 3-61$$

$$C_{total} = n_p \frac{C}{n_s} \quad 3-62$$

3.7 Μοντελοποίηση μετατροπέα συνεχούς ρεύματος

Για τη μοντελοποίηση των μετατροπέων συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη SimPower Systems του SIMULINK/MATLAB.

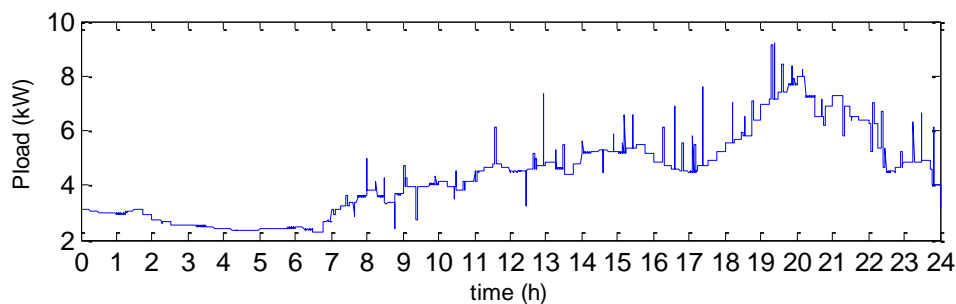
4 Διαστασιολόγηση συνιστωσών και κόστος κτήσης υβριδικού συστήματος

4.1 Εισαγωγή

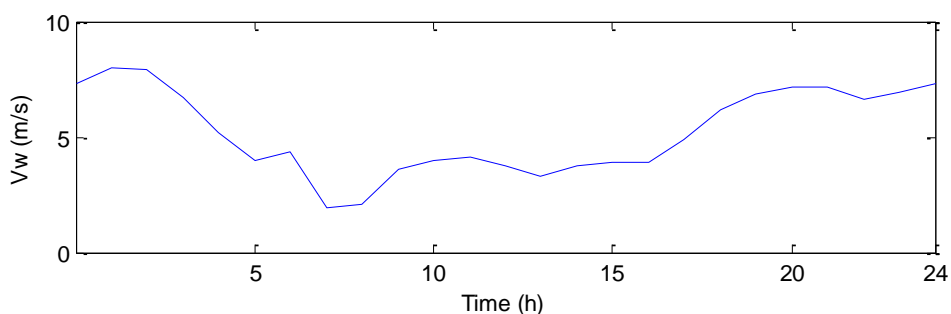
Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται μια βασική διαστασιολόγηση του συστήματος με κριτήριο το ετήσιο κόστος του συστήματος και την πιθανότητα μη τροφοδοτούμενης ενέργειας. Εφαρμόζεται η μέθοδος διαστασιολόγησης LPSP που βασίζεται στην αξιοπιστία του συστήματος. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται το λογισμικό HOMER για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Τέλος, γίνεται μία συγκριτική παρουσίαση με διαφορετικές τοπολογίες συστήματος προκειμένου να διαπιστωθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της εκάστοτε τοπολογίας.

4.2 Διαστασιολόγηση συστήματος με τη μέθοδο LPSP

Η διαστασιολόγηση ενός υβριδικού συστήματος είναι μια δύσκολη μελέτη καθώς θα πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετές παράμετροι, μερικές από τις οποίες αποτελούν αποτέλεσμα μακροχρόνιων μελετών των περιβαλλοντικών συνθηκών μιας περιοχής. Μία από τις κύριες απαιτήσεις ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας είναι να εγγυάται αξιοπιστία στην παροχή ισχύος στο φορτίο. Για το λόγο αυτό η διαστασιολόγηση του συστήματος θα γίνει με βάση την αξιοπιστία του συστήματος. Ο δείκτης που χρησιμοποιείται προκειμένου να αξιολογηθούν οι δύο διαφορετικές περιπτώσεις είναι η πιθανότητα μη τροφοδοτούμενης ενέργειας (Loss of Power Supply Probability- LPSP).

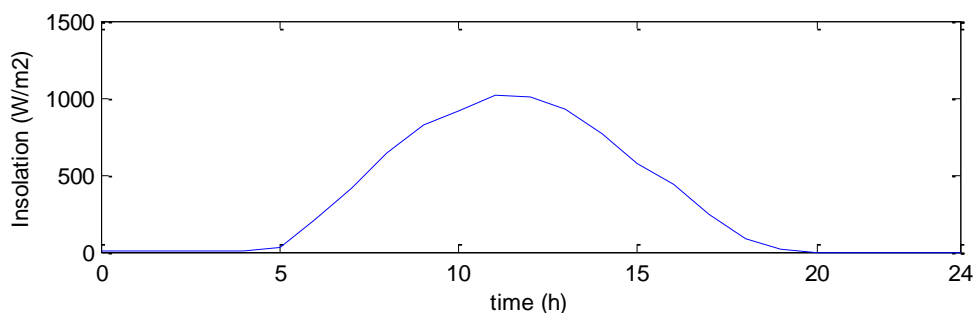


Σχήμα 4.1 : Ημερήσια καμπύλη φορτίου



Σχήμα 4.2 : Ημερήσια χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου

Η ανάλυση του συστήματος γίνεται σε 24ωρη βάση. Το φορτίο (σχ. 4.1) του συστήματος προέκυψε από 15λεπτη δειγματοληψία της ζήτησης μιας τυπικής οικιακής μονάδας και προστέθηκαν αιχμές που μοντελοποιούν μεταβατικές καταστάσεις, όπως π.χ. εκκίνηση κινητήρα. Ως δεδομένα εισόδου θεωρούνται η ημερήσια χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου (σχ. 4.2) και ηλιακής ακτινοβολίας (σχ. 4.3) στη θέση εγκατάστασης.



Σχήμα 4.3 : Ημερήσια χρονοσειρά ηλιακής ακτινοβολίας

Το υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται ως ένα ανάλογο των συμβατικών συστημάτων, όπου η φθηνότερη παραγωγή ενέργειας καθίσταται ως η κύρια παραγωγή ενέργειας ενώ η πιο ακριβή πηγή ενέργειας τροφοδοτεί την αιχμή του φορτίου.

Σε ένα υβριδικό σύστημα η Α/Γ είναι η λιγότερη ελαστική παράμετρος καθώς τα μεγέθη τους είναι έντονα κβαντισμένα [48]. Καθώς η Α/Γ έχει μικρότερο κόστος από τα Φ/Β, επιλέγεται αυθαίρετα το μέγεθός της στα 20kW (ονομαστική ταχύτητα ανέμου 11m/s). Είναι φανερό πως η μέση ταχύτητα ανέμου είναι κατώτερη της ονομαστικής ταχύτητας της Α/Γ ωστόσο οι Α/Γ είναι μηχανές που λειτουργούν με χαμηλό συντελεστή δυναμικότητας (capacity factor). Στη συνέχεια, με δεδομένο το μέγεθος της Α/Γ έγιναν αναλύσεις ευαισθησίας με παραμέτρους το μέγεθος του Φ/Β και της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου. Μία μονάδα Φ/Β αποτελείται από μία φ/β συστοιχία 1 kW και μία μονάδα για τη δεξαμενή αποθήκευσης 1 kWh που αντιστοιχεί σε όγκο 0,0304m³.

4.2.1 Μέθοδος LPSP

Η ολική παραγόμενη ισχύς από την Α/Γ και το Φ/Β κατά τη διάρκεια κάθε ώρας υπολογίζεται με βάση τον τύπο [40][41][42]:

$$P_{gen} = P_{wt}(t) + N_{pv}P_{pv}(t) \quad 4-1$$

όπου N_{pv} ο αριθμός των Φ/Β πάνελ, P_{wt} και P_{pv} η συνολική ισχύς εξόδου της Α/Γ και η ισχύς μίας μονάδας Φ/Β τη χρονική στιγμή t αντίστοιχα.

➤ Περίσσεια ισχύος : Αν η ισχύς που παράγεται από τις κύριες πηγές του συστήματος είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τη ζήτηση του φορτίου τότε η περίσσεια ισχύος τροφοδοτεί τον ηλεκτρολύτη για την παραγωγή υδρογόνου. Η ποσότητα του αποθηκευμένου στη δεξαμενή υδρογόνου σε kWh υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$E_{st}(t) = E_{st}(t-1) + (E_{Gen}(t) - E_{load}(t) / \eta_{inv}) \eta_{el} \quad 4-2$$

όπου $E_{st}(t)$ και $E_{st}(t-1)$ η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη με τη μορφή υδρογόνου στην δεξαμενή καυσίμου τις ώρες t και $(t-1)$ αντίστοιχα, E_{Gen} η ολική ενέργεια που παράγεται

από τις κύριες ενεργειακές πηγές, E_{load} η ζήτηση ενέργειας την συγκεκριμένη ώρα t , n_{inv} η απόδοση του αντιστροφέα (95%) και n_{el} η απόδοση του ηλεκτρολύτη (74%) [40][43].

➤ Έλλειμμα ισχύος : Σε περίπτωση που υπάρχει έλλειμμα ισχύος, δηλαδή η ζήτηση ισχύος ξεπερνά την παραγωγή των κύριων πηγών του συστήματος, τότε συνδέεται η κυψέλη καυσίμου η οποία τροφοδοτείται με το αποθηκευμένο υδρογόνο. Η ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου σε kWh υπολογίζεται ως εξής:

$$E_{st}(t) = E_{stor}(t-1) + (E_{load}(t)/n_{inv} - E_{Gen}(t))/n_{fuel_cell} \quad 4-3$$

όπου n_{fuel_cell} η συνδυασμένη απόδοση της κυψέλης καυσίμου και του μετατροπέα (50%).

➤ Περιορισμοί συστήματος : Ο πρώτος περιορισμός σχετίζεται με την μέγιστη δυνατή ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί στη δεξαμενή υδρογόνου:

$$0 \leq E_{st}(t) \leq E_{st_max} \quad 4-4$$

Σε περίπτωση που υπάρχει αδυναμία ικανοποίησης του φορτίου, δηλαδή η συνολικά παραγόμενη ενέργεια από τις κύριες ενεργειακές πηγές και την κυψέλη καυσίμου είναι μικρότερη από τη ζήτηση του φορτίου τότε η μη τροφοδοτούμενη ισχύς (Loss of Power Supply - LPS) δίνεται από τον τύπο:

$$LPS(t) = E_{load}(t) - (E_{Gen}(t) + E_{st}(t-1) \cdot n_{fuel_cell}) \cdot n_{inv} \quad 4-5$$

Η πιθανότητα της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας για μια ορισμένη χρονική περίοδο T ορίζεται ως ο λόγος της μη τροφοδοτούμενης ισχύος στην περίοδο αυτή προς την αντίστοιχη ενέργεια του φορτίου:

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS(t)}{\sum_{t=1}^T E_{load}(t)} \quad 4-6$$

Η πιθανότητα μη τροφοδοτούμενης ενέργειας, η οποία συνήθως είναι ένας πολύ μικρός αριθμός, αντιστοιχεί στον αριθμό των ημερών που δεν ικανοποιείται η ζήτηση ισχύος για μία δοσμένη χρονική περίοδο.

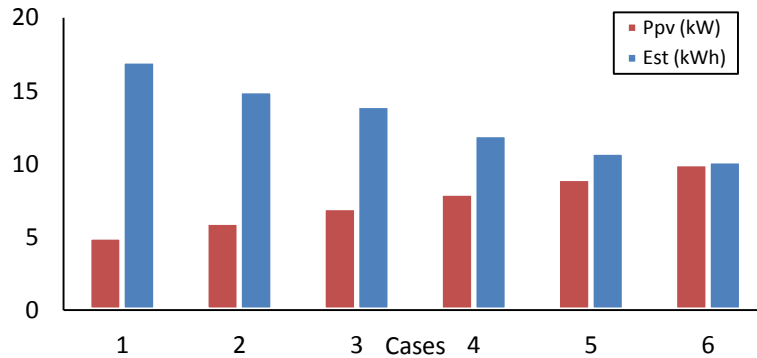
4.2.2 Αποτελέσματα μεθόδου LPSP για τη διαστασιολόγηση της μονάδας αποθήκευσης

Η αρχική ποσότητα υδρογόνου στη δεξαμενή θεωρήθηκε μηδενική, συνεπώς ο αλγόριθμος δίνει τόσες μονάδες αποθήκευσης όσες μπορούν να καλύψουν την περίσσεια ενέργειας σε κάθε περίπτωση.

4.2.2.1 Υψηλή αξιοπιστία (LPSP = 0.0003)

Μελετάται η περίπτωση αξιοπιστίας με $LPSP = 0.0003$ που αντιστοιχεί σε μη τροφοδοτούμενη ενέργεια για μία ημέρα στα δέκα χρόνια ή 25.92sec ανά ημέρα [44]. Τα κυριότερα ζευγάρια λύσεων ϕ/β και δεξαμενής υδρογόνου που προέκυψαν παρατίθενται στο σχ. 4.4 Η χαμηλότερη ισχύς του ϕ/β στην οποία επιτυγχάνεται η αξιοπιστία του συστήματος είναι τα 5 kW. Μικρότερες τιμές ισχύος ϕ/β απαιτούν μεγαλύτερο μέγεθος δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου η οποία δεν μπορεί να τροφοδοτηθεί από την περίσσεια ισχύος του συστήματος και επομένως δεν θα ήταν δυνατή η αυτόνομη

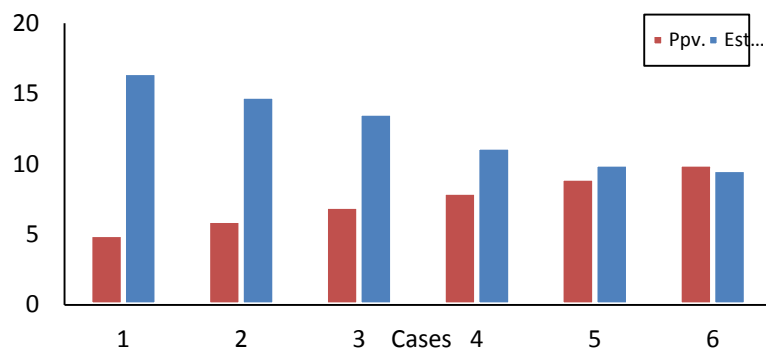
λειτουργία του συστήματος. Με την αύξηση του φ/β μειώνεται το μέγεθος της δεξαμενής αποθήκευσης. Ωστόσο επειδή τα φ/β έχουν υψηλό κόστος η βέλτιστη λύση είναι η επιλογή 5 kW φ/β και 17.036 kWh αποθηκευμένου υδρογόνου που αντιστοιχεί σε όγκο δεξαμενής 0.518 m³. Καθώς τα μεγέθη είναι κβαντισμένα θα επιλεγεί μία τιμή κοντά σε αυτόν τον όγκο.



Σχήμα 4.4 : Αποτελέσματα μεθόδου LPSP για τα μεγέθη του Φ/Β (κόκκινη) και της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου (μπλε)

4.2.2.2 Μέση αξιοπιστία (LPSP = 0.00694)

Αυτή η τιμή LPSP αντιστοιχεί σε 10 λεπτά μη τροφοδοτούμενης ενέργειας ανά ημέρα. Η ελάχιστη φ/β ισχύς στην οποία επιτυγχάνεται η αξιοπιστία του συστήματος είναι 5kW. Η αποθήκευση υδρογόνου μειώνεται σε σχέση με το πρώτο σενάριο. Η λύση που επιλέγεται είναι 5 kW φ/β και 16,339 kWh αποθηκευμένου υδρογόνου που αντιστοιχεί σε όγκο δεξαμενής 0.4967 m³



Σχήμα 4.5 : Αποτελέσματα μεθόδου LPSP για τα μεγέθη του Φ/Β (κόκκινη) και της αποθήκευσης υδρογόνου (μπλε)

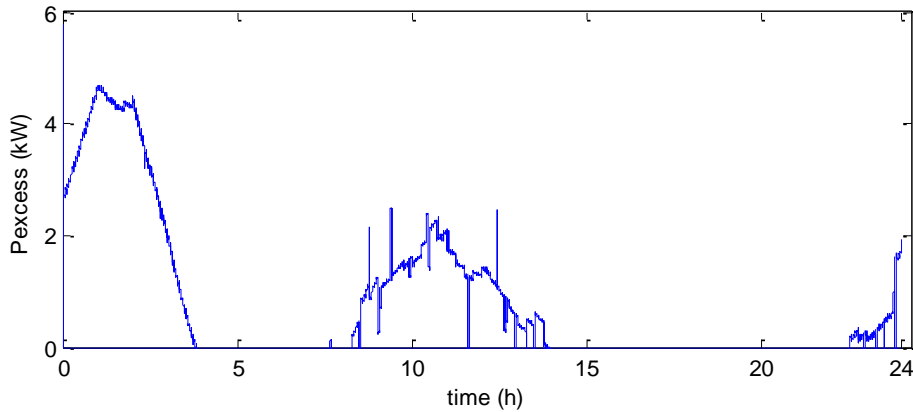
4.2.2.3 Διαστασιολόγηση κυψέλης καυσίμου

Η διαστασιολόγηση της κυψέλης καυσίμου πραγματοποιείται με βάση το μέγιστο έλλειμμα ισχύος από τις κύριες ενεργειακές πηγές που η κυψέλη πρέπει να δύναται να το τροφοδοτήσει. Το έλλειμμα ισχύος υπολογίζεται ως εξής:

$$P_d = P_{load} - P_{wt} - P_{pv} \text{ για } P_d \geq 0 \quad 4-7$$

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

Για φ/β γεννήτρια 5kW το έλλειμμα ισχύος παρατίθεται στο σχ. 4.6. Το έλλειμμα ισχύος δεν ξεπερνά τα 5 W οπότε η κυψέλη καυσίμου που επιλέγεται είναι ισχύος 5kW.

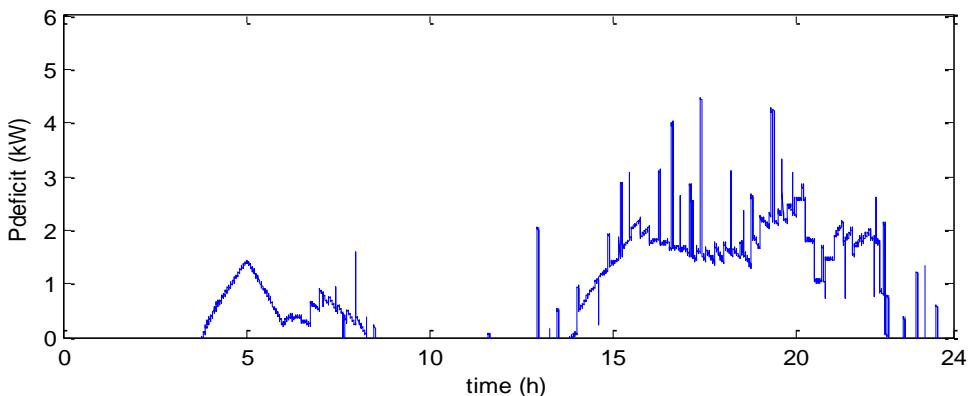


Σχήμα 4.6 : Έλλειμμα

4.2.2.4 Διαστασιολόγηση ηλεκτρολύτη

Η διαστασιολόγηση του ηλεκτρολύτη πραγματοποιείται με βάση την αιχμή της περίσσειας ισχύος από τις κύριες ενεργειακές πηγές που ο ηλεκτρολύτης μπορεί να απορροφήσει για την παραγωγή υδρογόνου. Ο ηλεκτρολύτης μπορεί να διαστασιολογηθεί στην ονομαστική ισχύ των κύριων ενεργειακών πηγών και να απορροφά όλη την ισχύ τους. Ωστόσο λόγω των διακυμάνσεων του αιολικού και ηλιακού δυναμικού θα λειτουργεί σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης, γεγονός που είναι ανεπιθύμητο λόγω της μειωμένης απόδοσης. Για το λόγο αυτό η περίσσεια υπολογίζεται από τις ημερήσιες καμπύλες φορτίου και παραγωγής:

$$P_e = P_{wt} + P_{pv} - P_{load} \text{ για } P_e \geq 0 \quad 4-8$$

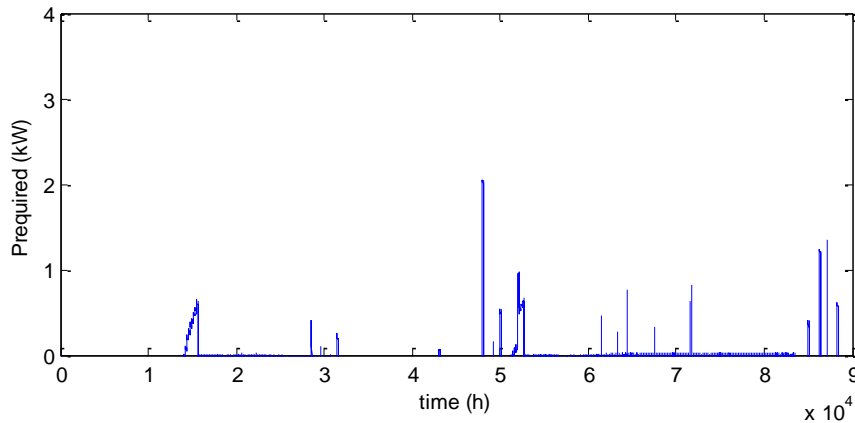


Σχήμα 4.7 : Περίσσεια

Από το διάγραμμα (σχ.4.7) παρατηρείται πως η περίσσεια δεν ξεπερνάει τα 5kW συνεπώς επιλέγεται ηλεκτρολύτης ονομαστικής ισχύος 5kW.

4.2.2.5 Διαστασιολόγηση υπερπυκνωτή

Ο υπερπυκνωτής ουσιαστικά τροφοδοτεί τις αιχμές του φορτίου που δεν είναι σε θέση να τροφοδοτήσει η κυψέλη καυσίμου λόγω ηλεκτροχημικών ή μηχανικών καθυστερήσεων. Χρησιμοποιώντας μοντέλο που λαμβάνει υπόψη αυτές τις καθυστερήσεις υπολογίστηκε η ισχύς που δε μπορεί να τροφοδοτηθεί από την κυψέλη καυσίμου:



Σχήμα 4.8 : Απαιτούμενη ισχύς υπερπυκνωτή

Αν ολοκληρωθεί το έλλειμμα ισχύος προκύπτει πως η ελάχιστη χωρητικότητα του υπερπυκνωτή πρέπει να είναι 113 Wh. Ωστόσο, ο αλγόριθμος του συστήματος δίνει προτεραιότητα στον υπερπυκνωτή προκειμένου να λειτουργεί αποδοτικότερα και να μην ανοίγει άσκοπα η κυψέλη καυσίμου οπότε η συστοιχία των υπερπυκνωτών επιλέγεται να έχει χωρητικότητα 216,52 Wh.

4.3 Ανάλυση κόστους

Η ανάλυση κόστους αποτελεί επίσης ουσιώδη παράγοντα για τη διαστασιολόγηση του συστήματος και για τη βιωσιμότητα της επένδυσης. Συνεπώς, ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται να είναι ταυτόχρονα αξιόπιστο και οικονομικά βιώσιμο. Η βελτιστοποίηση της διαστασιολόγησης επιτυγχάνεται με το συμβιβασμό αυτών των δύο παραμέτρων.

4.3.1 Στοιχεία ανάλυσης κόστους

4.3.1.1 Ετήσιο κόστος

Η ανάλυση κόστους περιλαμβάνει το ετήσιο κόστος το οποίο συντίθεται από το ετήσιο επενδυτικό κόστος και το ετήσιο κόστος αντικατάστασης των επιμέρους υποσυστημάτων. Τα κύρια υποσυστήματα αποτελούν η Α/Γ, το Φ/Β, η κυψέλη καυσίμου, ο ηλεκτρολύτης, η δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου και οι υπερπυκνωτές. Οι υπόλοιπες συσκευές δεν περιλαμβάνονται στην ανάλυση για λόγους απλοποίησης. Η διάρκεια ζωής του συστήματος εκτιμήθηκε στα 25 χρόνια. Θεωρείται πως οι συνιστώσες του συστήματος δεν απαιτούν αντικατάσταση πριν το τέλος της αναμενόμενης διάρκειας ζωής τους.

Το ετήσιο κόστος του συστήματος (Annualized Cost of System) προκύπτει από τη συνάρτηση [41][45]:

$$ACS = C_{acap} (PV + WT + EL + FC + UC) + C_{arep} (PV + WT + EL + FC + UC) \quad 4-9$$

όπου C_{acap} το ετήσιο επενδυτικό κόστος κάθε συνιστώσας και C_{arep} το ετήσιο κόστος αντικατάστασης κάθε συσκευής.

Το ετήσιο επενδυτικό κόστος κάθε συνιστώσας (Annualized Capital Cost) λαμβάνει υπόψη το αρχικό κόστος επένδυσης κάθε συσκευής και υπολογίζεται ως εξής:

$$C_{acap} = C_{cap} \cdot CRF(i_r, y_{proj}) \quad 4-10$$

όπου C_{inv} το κόστος κτήσης κάθε συσκευής, y_{proj} η διάρκεια ζωής του συστήματος και $CRF(i_r, y_{proj})$ ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου (capital recovery factor):

$$CRF = \frac{i_r (1+i_r)^y}{(1+i_r)^y - 1} \quad 4-11$$

όπου i_r το επιτόκιο αναγωγής (6% σε αυτή τη μελέτη) και y η διάρκεια ζωής της εκάστοτε συσκευής, και η διάρκεια ζωής του κάθε κελιού της κυψέλης καυσίμου και του ηλεκτρολύτη.

Το ετήσιο κόστος αντικατάστασης μίας συνιστώσας αφορά στις συνιστώσες που απαιτείται να αντικατασταθούν κατά τη διάρκεια ζωής της επένδυσης.

$$C_{arep} = C_{rep} \cdot SFF(i_r, y_{rep}) \quad 4-12$$

όπου C_{rep} το κόστος κτήσης κάθε συσκευής, y_{rep} η διάρκεια ζωής του εκάστοτε υποσυστήματος και $SFF(i_r, y_{rep})$ ο συντελεστής απόσβεσης κεφαλαίου (Sinking Fund factor):

$$SFF(i_r, y_{rep}) = \frac{i_r}{(1+i_r)^{y_{rep}} - 1} \quad 4-13$$

4.3.1.2 Κόστος τροφοδοτούμενης ενέργειας

Αρχικά υπολογίζεται η ετήσια ζήτηση ενέργειας (annual energy demand - AED), η οποία προσδιορίζεται ως το άθροισμα της ζήτησης ενέργειας που καταναλώνει το φορτίο κατά τη διάρκεια ενός έτους. Η συνολική πραγματική παραγωγή ενέργειας στο σύστημα είναι μεγαλύτερη από αυτή που ζητείται χάρη στις απώλειες του συστήματος και στην ενέργεια που καταναλώνεται στο ελεγχόμενο φορτίο. Ωστόσο το σφάλμα αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς για το κόστος τροφοδοτούμενης ενέργειας. Το κόστος τροφοδοτούμενης ενέργειας (Cost of Electricity – COE) σε \$/kWh της εκάστοτε συσκευής υπολογίζεται ως εξής:

$$COE = \frac{ACS}{AED} \quad 4-14$$

4.3.1.3 Κόστος μη τροφοδοτούμενης ενέργειας

Ο δείκτης του κόστους 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 και δίνεται σε \$/kWh. Τυπικές τιμές για το κόστος της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας για διάφορες κατηγορίες καταναλωτών βρίσκονται σύμφωνα με τις αναφορές [46][47]. Για την ανάλυση κόστους που πραγματοποιείται σε αυτή την εργασία θεωρείται πως η τιμή για την περίπτωση ενός οικιακού καταναλωτή είναι 1.60\$/kWh.

4.3.1.4 Δεδομένα

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανάλυση κόστους του υβριδικού συστήματος χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που αφορούν στο μοναδιαίο επενδυτικό κόστος και στη

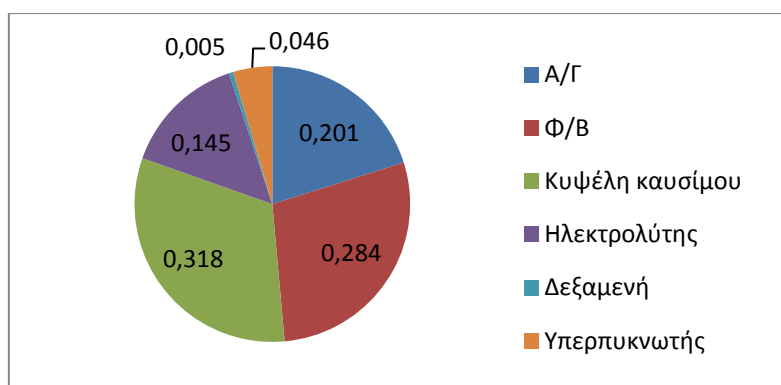
διάρκεια ζωής των συσκευών του συστήματος και βασίστηκαν στις αναφορές [28][40][48][49][50][51]. Η διάρκεια ζωής της επένδυσης θεωρήθηκε 25 έτη. Τα δεδομένα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Παράμετρος	Τιμή	Διάρκεια ζωής	Κόστος αντικατάστασης
A/Γ	1500 \$/kW	15 έτη	1500 \$/kW
Φ/Β	6500 \$/kW	20 έτη	6500 \$/kW
Κυψέλη καυσίμου	3000 \$/kW	5 έτη	3000 \$/kW
Ηλεκτρολύτης	2000 \$/kW	15 έτη	2000 \$/kW
Δεξαμενή αποθήκευσης	1500 \$/kg	25 έτη	1500 \$/kg
Υπερπυκνωτές	10 \$/Wh	10 έτη	10\$/Wh

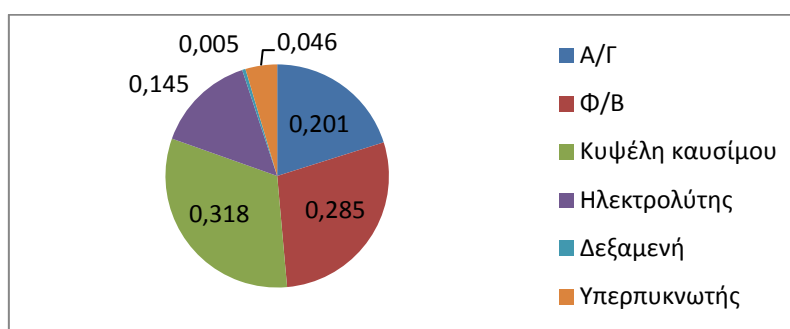
Πίνακας 4.1 : Δεδομένα ανάλυσης κόστους

4.3.2 Αποτελέσματα ανάλυσης κόστους

Τα αποτελέσματα που βρίσκονται μέσω της μεθόδου καταγράφονται στον πίνακα 4.2 και στα σχ. 4.9 και σχ. 4.10.



Σχήμα 4.9 : Επίδραση υποσυστημάτων στο κόστος του συστήματος — Υψηλή αξιοπιστία



Σχήμα 4.10 : Επίδραση υποσυστημάτων στο κόστος του συστήματος — Μέση αξιοπιστία

Από τα σχ. 4.9 και 4.10 παρατηρείται πως η επίδραση της δεξαμενής και του ηλεκτρολύτη στο κόστος αποθήκευσης είναι σχετικά μικρή. Η κυψέλη καυσίμου και το φ/β έχουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στο επενδυτικό κόστος κυρίως λόγω του αυξημένου κόστους του φ/β και της μικρής διάρκειας ζωής της κυψέλης καυσίμου. Οι υπερπυκνωτές συμβάλλουν ελάχιστα στο κόστος καθώς έχουν σχετικά μικρή χωρητικότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής.

Παράμετροι	Σενάριο 1	Σενάριο 2
AC_{WT} (\$)	2423,79	2423,79
AC_{PV} (\$)	3425,866	3425,866
AC_{FC} (\$)	3834,347	3834,347
AC_{EL} (\$)	1745,129	1745,129
AC_{TANK} (\$)	60,78216	58,20068
AC_{UC} (\$)	553,4752	553,4752
ACS_{SUM} (\$)	13977,39	13860,05
COENS (\$)	328	528
ACS_{TOT} (\$)	14305,39	14388,05
COE (\$/kW)	0,386632	0,39098

Πίνακας 4.2 : Αποτελέσματα ανάλυσης κόστους

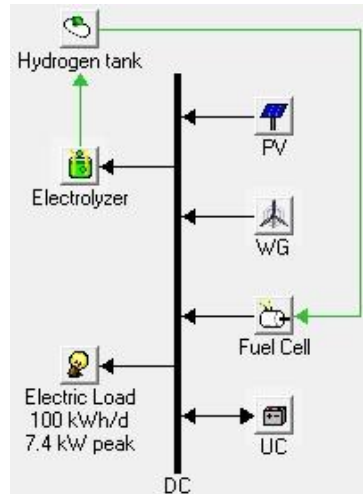
Από τα αποτελέσματα του πίνακα 4.2 παρατηρείται πως το σενάριο 1 έχει μεγαλύτερο ετήσιο κόστος καθώς παρέχει υψηλή αξιοπιστία. Ωστόσο, συνυπολογίζοντας το κόστος μη τροφοδοτούμενης ενέργειας το σενάριο 1 έχει χαμηλότερο κόστος και συνεπώς επιλέγεται για την υλοποίηση της επένδυσης.

4.4 Διαστασιολόγηση του συστήματος με το λογισμικό HOMER

Η μελέτη ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος με το ελάχιστο δυνατό κόστος είναι ζωτικής σημασίας καθώς ένα υπερδιαστασιοποιημένο σύστημα ίσως συνεπάγεται πολύ υψηλό οικονομικό κόστος. Καθώς δεν υπάρχει σχέση αναλογίας μεταξύ του μεγέθους των συσκευών και του ολικού κόστους του συστήματος, οι μέθοδοι που συναντώνται στη βιβλιογραφία βασίζονται κυρίως σε προσομοιώσεις της συμπεριφοράς του συστήματος. Σε αυτή την λογική έχουν αναπτυχθεί διάφορα λογισμικά για τη διαστασιολόγηση υβριδικών συστημάτων ενέργειας. Ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα λογισμικά είναι το HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) το οποίο αναπτύσσεται από το National Renewable Energy Laboratory (NREL) των ΗΠΑ. Αυτό το εργαλείο προσομοιώνει τη φυσική συμπεριφορά ενός ηλεκτρικού συστήματος και το κόστος του κύκλου ζωής του, δηλαδή προσφέρει μία ρεαλιστική πρόβλεψη σχετικά με το κόστος κτήσης και το κόστος λειτουργίας ενός ηλεκτρικού συστήματος. Με αυτό τον τρόπο επιτρέπει στον χρήστη να εκτιμήσει την βιωσιμότητα του συστήματος τόσο από τεχνική όσο και από οικονομική πλευρά. Επίσης, παρέχει τη δυνατότητα στον χρήστη να συγκρίνει πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς πηγών [51].

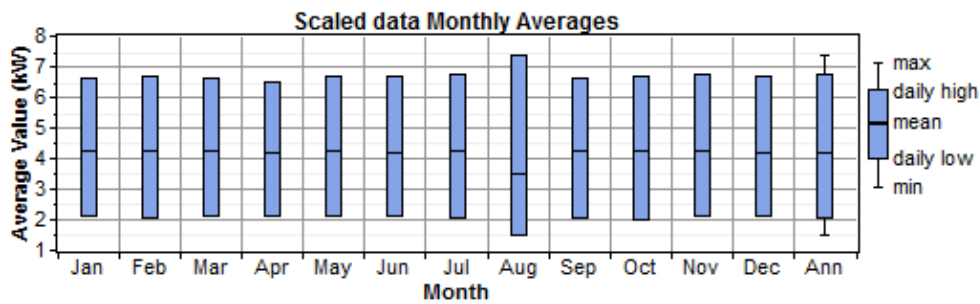
4.4.1 Δομή του συστήματος και δεδομένα προσομοίωσης

Η διάταξη του συστήματος φαίνεται στο σχ. 4.11. Η ροή ισχύος πραγματοποιείται μέσω ενός ζυγού ΣΡ. Οι μετατροπείς ισχύος έχουν παραλειφθεί για την απλοποίηση της ανάλυσης.

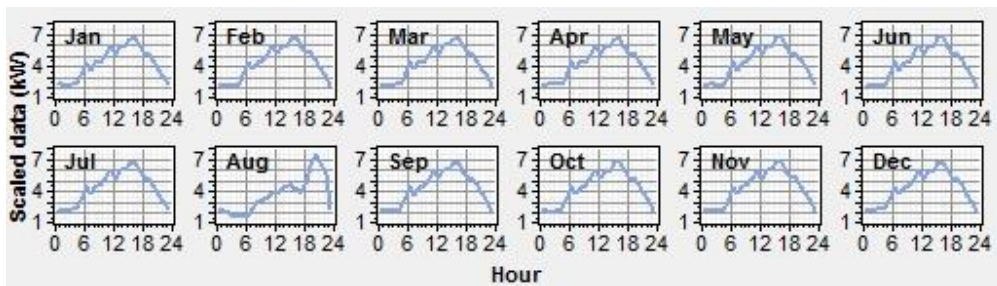


Σχήμα 4.11 : Αρχιτεκτονική υβριδικού συστήματος

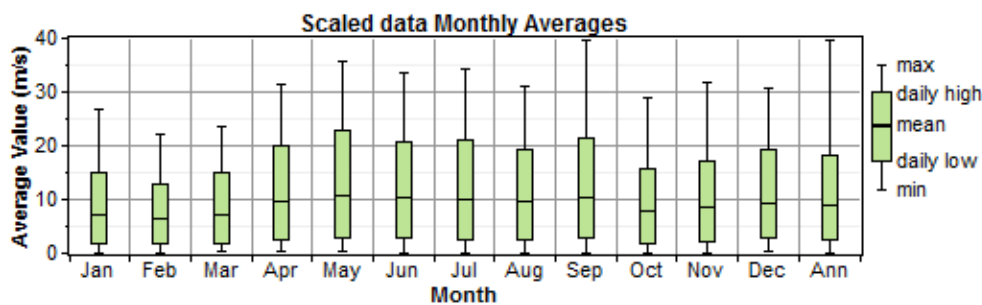
Για τον προσδιορισμό του φορτίου χρησιμοποιήθηκε η ημερήσια καμπύλη φορτίου για το μήνα Αύγουστο και στη συνέχεια το λογισμικό μετέβαλε κατάλληλα την ημερήσια καμπύλη των υπόλοιπων μηνών (σχ. 4.12 και σχ. 4.13). Το φορτίο που προέκυψε έχει αιχμή 7,4kW και ημερήσια ζήτηση ενέργειας 100kW/day.



Σχήμα 4.12 : Μέγιστη, μέση και ελάχιστη τιμή φορτίου ανά μήνα



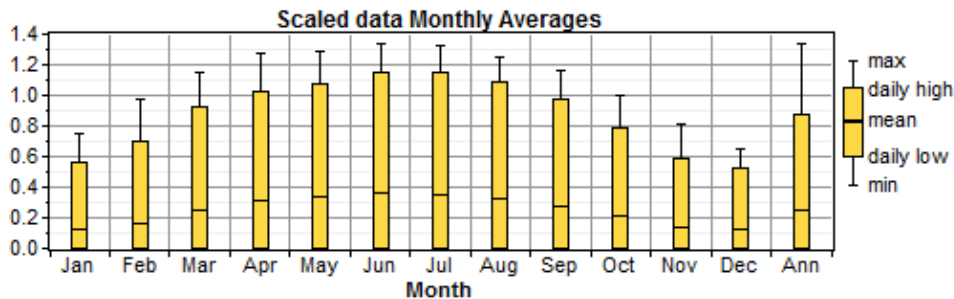
Σχήμα 4.13 : Ημερήσια καμπύλη φορτίου ανά μήνα



Σχήμα 4.14 : Μέγιστη, μέση και ελάχιστη ταχύτητα ανέμου ανά μήνα

Στο σχήμα 4.14 φαίνεται η μέγιστη, η μέση και η ελάχιστη ταχύτητα ανέμου σε m/s ανά μήνα και ανά έτος που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση.

Στο σχήμα 4.15 φαίνεται η μέγιστη, η μέση και η ελάχιστη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας σε kW/m² ανά μήνα και ανά έτος που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση.



Σχήμα 4.15 : Μέγιστη, μέση και ελάχιστη ηλιακή ακτινοβολία 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 μεγαλύτερη ή ίση από 10%. Η μέγιστη επιτρεπόμενη μη τροφοδοτούμενη ενέργεια ανά έτος τέθηκε στο 2% της συνολικής ετήσιας ζήτησης.

Όσον αφορά στις συνιστώσες του συστήματος σταθερό μέγεθος έχουν η Α/Γ ισχύος 20kW και μία συστοιχία υπερπυκνωτών 220Wh. Τα μεγέθη της κυψέλης καυσίμου, του Φ/Β και του ηλεκτρολύτη κυμαίνονται από 0 έως 10kW με βήμα 1kW και το μέγεθος της δεξαμενής κυμαίνεται από 0 έως 10 kg H₂ με βήμα 1 kg H₂. Το λογισμικό πραγματοποιεί όλους του δυνατούς συνδυασμούς των συνιστωσών και επιλέγει τη βέλτιστη λύση με κριτήρια την ικανοποίηση του φορτίου και την ελαχιστοποίηση του κόστους. Το κόστος των μονάδων και η διάρκεια ζωής τους είναι αυτά που καταγράφονται στον πίνακα 4.1 με εξαίρεση την κυψέλη καυσίμου που η διάρκεια ζωής της προσδιορίζεται στις 40000 ώρες λειτουργίας. Το επιτόκιο αναγωγής τέθηκε στο 6% και η διάρκεια επένδυσης στα 25 έτη. Το λογισμικό πραγματοποιεί προσομοιώσεις με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς συνιστωσών και επιλέγει τη βέλτιστη λύση με κριτήρια την ικανοποίηση του φορτίου και την ελαχιστοποίηση του κόστους.

4.4.2 Προσομοίωση του συστήματος

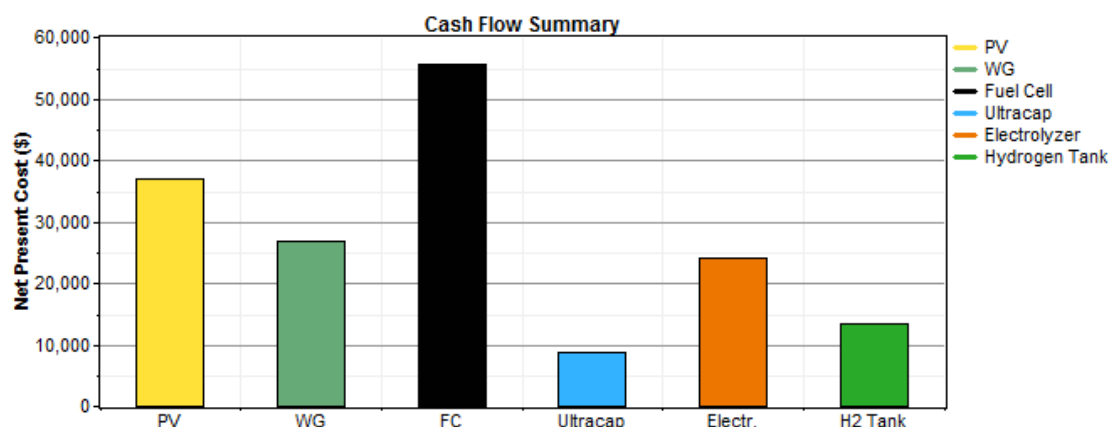
Η προσομοίωση του συστήματος με το λογισμικό HOMER υπέδειξε την εξής διαστασιολόγηση ως την βέλτιστη για το υβριδικό σύστημα και τα δεδομένα εισόδου του.

Συνιστώσες	Μέγεθος
Φ/Β	5 kW
Κυψέλη καυσίμου	5 kW
Ηλεκτρολύτης	9 kW
Δεξαμενή αποθήκευσης	9 kg

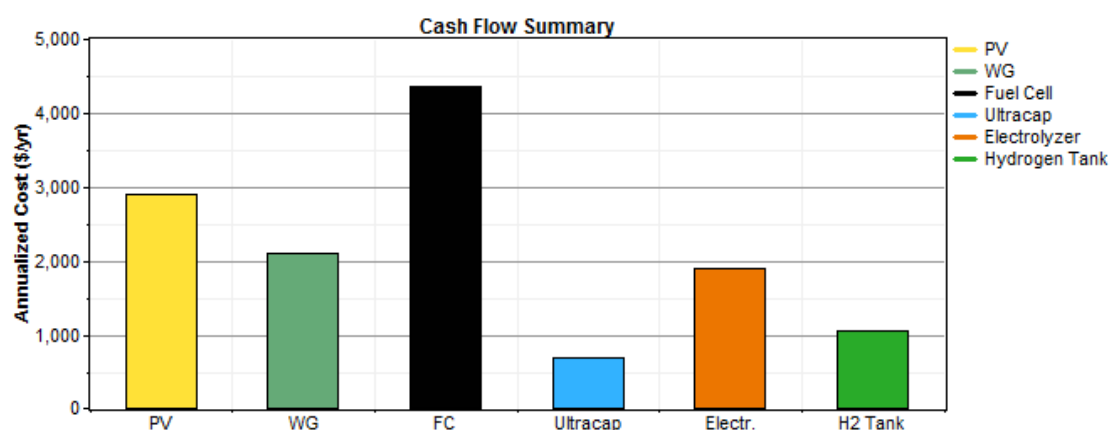
Πίνακας 4.3 : Βέλτιστη διαστασιολόγηση

4.4.2.1 Οικονομικά αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο σχ. 4.16 φαίνεται το συνολικό ανηγμένο κόστος ανά υποσύστημα και στο σχ. 4.17 το ετήσιο κόστος ανά υποσύστημα.



Σχήμα 4.16 : Συνολικά ανηγμένο κόστος ανά υποσύστημα

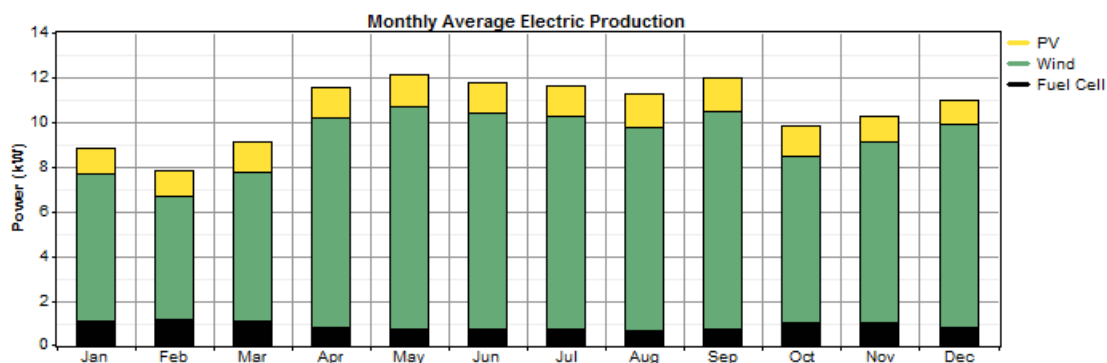


Σχήμα 4.17 : Ετήσιο κόστος ανά υποσύστημα

Το συνολικό ανηγμένο κόστος της επένδυσης ανέρχεται στα 165,851\$ και το συνολικό ετήσιο κόστος στα 12,974\$. Από τα διαγράμματα παρατηρείται πως μεγαλύτερη συνεισφορά στο κόστος έχει η κυψέλη καυσίμου λόγω της συχνής αντικατάστασής της και στη συνέχεια το Φ/Β λόγω του υψηλού κόστους κτήσης του. Το κόστος τροφοδοτούμενης ενέργειας (COE) ανέρχεται στα 0.359 \$/kWh και το ετήσιο λειτουργικό κόστος στα 5.004\$/yr.

4.4.2.2 Ενεργειακά αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο σχ. 4.18 παρατίθεται η μέση μηνιαία παραγωγή ισχύος από την κυψέλη καυσίμου, την Α/Γ και το Φ/Β. Από το σχ. 4.18 καθώς και τον πίνακα 4.4 φαίνεται πως η αιολική παραγωγή έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην ενεργειακή παραγωγή λόγω του υψηλού αιολικού δυναμικού και της αυξημένης εγκατεστημένης αιολικής ισχύος, σε σύγκριση με τη συνεισφορά του Φ/Β και της κυψέλης καυσίμου.



Σχήμα 4.18 : Μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Component	Production	
	kWh/yr	%
PV array	11,511	12
Wind turbine	73,88	79
Fuel Cell	7,573	8
Total	92,964	100

Πίνακας 4.4 : Παραγωγή ενεργειακών πηγών

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

Πίνακας 4.5 : Καταναλώσεις

Στον πίνακα 4.5 καταγράφονται οι καταναλώσεις της παραγόμενης ενέργειας. Το 63% καταναλώνεται στο φορτίο και το υπόλοιπο 37% καταναλώνεται στη μονάδα ηλεκτρόλυσης. Ο πίνακας 4.6 δείχνει την περίσσεια και το έλλειμμα της ισχύος στο τέλος ενός έτους. Η περίσσεια ενέργειας που είναι αποθηκευμένη σε υδρογόνο αποτελεί το 38% της συνολικής παραγωγής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη άλλων αναγκών [42].

Component	Quantity	
	kWh/yr	%
Excess electricity	35,365	38.0
Unmet electric load	367	1.0
Capacity shortage	741	2.0

Πίνακας 4.6 : Περίσσεια – Έλλειμμα

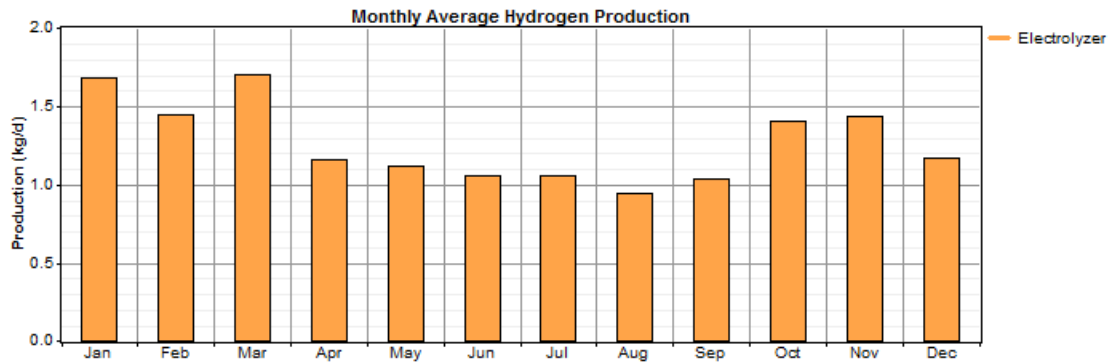
Quantity	Value	Units
Hours of operation	4,346	hr/yr
Number of starts	943	starts/yr
Operational life	9.20	yr
Capacity factor	17.3	%
Fixed generation cost	0.875	\$/hr

Πίνακας 4.7 : Φόρτιση κυψέλης καυσίμου

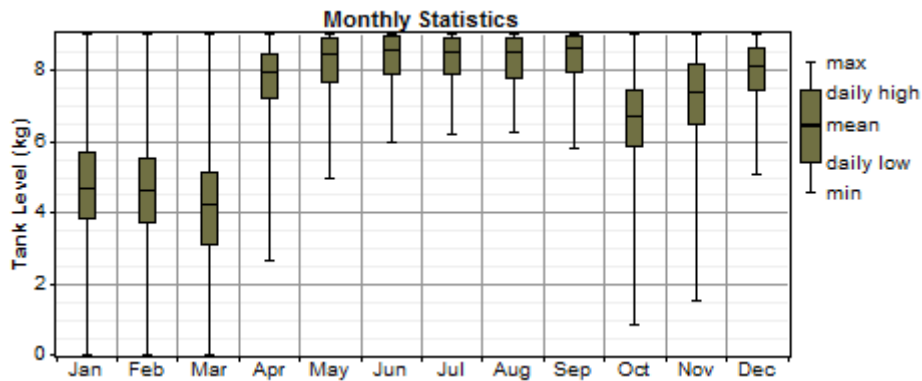
Η ανάλυση του συστήματος πρέπει να επικεντρωθεί και στην καταπόνηση της κυψέλης καυσίμου. Από τον πίνακα 4.6 παρατηρείται πως η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί 4.346 ώρες ετησίως πραγματοποιώντας 943 εκκινήσεις. Η διάρκεια ζωής της υπολογίζεται στα 9.2 έτη και ο συντελεστής δυναμικότητας της στα 17.3%.

Στο σχ. 4.19 παρατίθεται η μέση μηνιαία παραγωγή υδρογόνου από τη μονάδα ηλεκτρόλυσης και στο σχ. 4.20 η μέγιστη, μέση και ελάχιστη ποσότητα αποθηκευμένου υδρογόνου ανά μήνα. Όπως φαίνεται η παραγωγή του υδρογόνου περιορίζεται τους

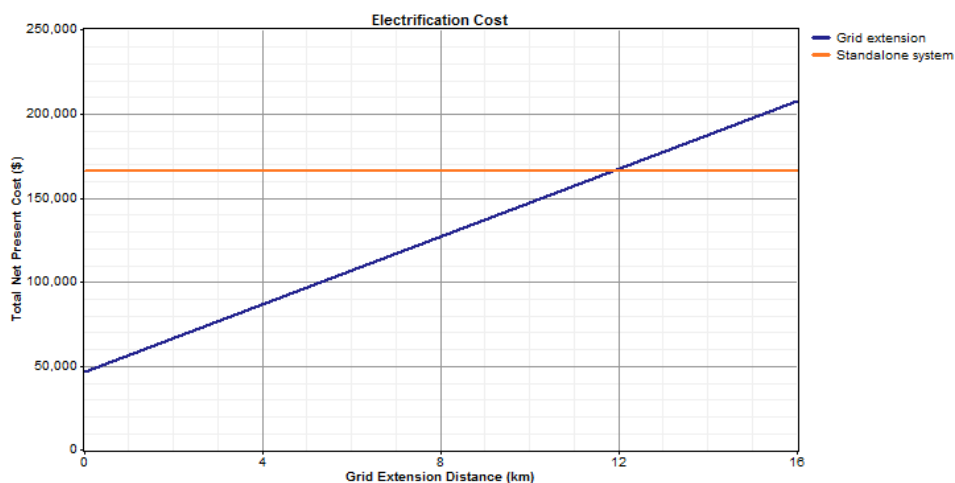
Θερινούς μήνες λόγω πληρότητας της δεξαμενής και αυξάνεται τους χειμερινούς μήνες λόγω της μειωμένης παραγωγής ισχύος από τις κύριες ενεργειακές πηγές.



Σχήμα 4.19 : Μέση μηνιαία παραγωγή υδρογόνου



Σχήμα 4.20 : Μέγιστη, μέση και ελάχιστη ποσότητα αποθηκευμένου υδρογόνου ανά μήνα



Σχήμα 4.21 : Κόστος επέκτασης ηλεκτρικού δικτύου συναρτήσει της απόστασης και κόστος αυτόνομης λειτουργίας

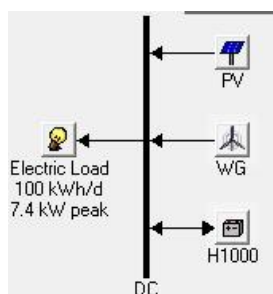
Είναι σημαντικό για την ανάλυση του συστήματος και την εκτίμηση για την βιωσιμότητά του να εξεταστεί το κόστος του σε σύγκριση με το κόστος της επέκτασης του ηλεκτρικού δικτύου σε περίπτωση διασύνδεσης του απομακρυσμένου φορτίου. Στο σχ. 4.21 παρατίθεται το διάγραμμα που αφορά στο κόστος της αυτόνομης λειτουργίας σε

αντιδιαστολή με το κόστος της επέκτασης του υπάρχοντος δικτύου μέχρι το απομακρυσμένο φορτίο. Το κόστος επέκτασης του δικτύου είναι συνάρτηση της απόστασης. Το σημείο που τέμνονται οι δύο καμπύλες ορίζεται ως ισοδύναμη απόσταση επέκτασης δικτύου (Breakeven Grid Extension Distance) και ανέρχεται στα 11.9 km. Για μεγαλύτερες από αυτήν αποστάσεις η επένδυση αποδεικνύεται βιώσιμη.

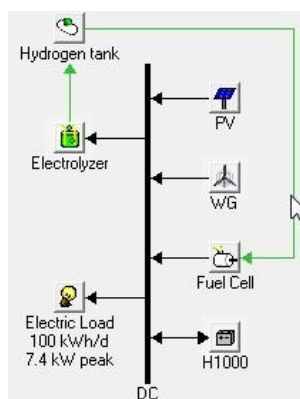
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση με το λογισμικό HOMER είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου LPSP αν εξαιρέσουμε το μέγεθος της δεξαμενής αποθήκευσης. Αυτό οφείλεται κυρίως στη διακύμανση του αιολικού και ηλιακού δυναμικού ανάλογα με το μήνα του έτους αλλά και την εξάρτηση της αποθηκευμένης ενέργειας μίας ημέρας από το απόθεμα της προηγούμενης που εξετάζονται μόνο στη μέθοδο με το λογισμικό homer. Συνεπώς η ετήσια ανάλυση του συστήματος επιβεβαιώνει πως έχει επιτευχθεί η βέλτιστη διαστασιολόγηση για την συγκεκριμένη τοπολογία συστήματος.

4.5 Συγκριτική παρουσίαση διαφορετικών τοπολογιών υβριδικών συστημάτων

Προκειμένου να διαπιστωθεί η καταλληλότητα της τοπολογίας που επιλέχθηκε μελετήθηκαν δύο εναλλακτικές τοπολογίες που έχουν ως κύριες πηγές Α/Γ και φ/β. Στη δεύτερη τοπολογία το υβριδικό σύστημα αποτελείται από κυψέλη καυσίμου και ηλεκτρολύτη ενώ χρησιμοποιούνται μπαταρίες για την κάλυψη των αιχμών του φορτίου. Στην τρίτη το υβριδικό σύστημα αποτελείται μόνο από τις κύριες πηγές και μπαταρίες. Ως δεδομένα για το φορτίο και το αιολικό και ηλιακό δυναμικό θεωρούνται τα στοιχεία που δίνονται στην ενότητα 4.4.1.



Σχήμα 4.22 : Αρχιτεκτονική υβριδικού συστήματος με μπαταρίες



Σχήμα 4.23 : Αρχιτεκτονική υβριδικού συστήματος με μπαταρίεςκαι κυψέλη καυσίμου

Στο σχ. 4.22 παρατίθεται η διάταξη συστήματος της τρίτης τοπολογίας και στο σχ. 4.23 η διάταξη του συστήματος της δεύτερης τοπολογίας.

Όσον αφορά στις συνιστώσες του συστήματος σταθερό μέγεθος έχει η Α/Γ ισχύος 20kW. Τα μεγέθη της κυψέλης καυσίμου, του Φ/Β και του ηλεκτρολύτη κυμαίνονται από 0 έως 10kW με βήμα 1kW, το μέγεθος της δεξαμενής κυμαίνεται από 0 έως 10 kg H₂ με βήμα 1 kg H₂ και το μέγεθος της μπαταρίας (που αποδίδει ενέργεια 7.6kWh) κυμαίνεται από 0 έως 100 μονάδες μπαταρίας με βήμα 5. Τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας καταγράφονται στον πίνακα 4.8, ενώ τα χαρακτηριστικά των υπόλοιπων συνιστωσών λαμβάνονται από τον πίνακα 4.1.

Παράμετρος	Τιμή	Διάρκεια ζωής	Κόστος αντικατάστασης
Μπαταρία	1500 \$/Ah	12 έτη	1500 \$/Ah

Πίνακας 4.8 : Χαρακτηριστικά μπαταρίας

4.5.1 Προσομοίωση των συστημάτων

Η προσομοίωση του συστήματος με το λογισμικό HOMER για το υβριδικό σύστημα και τα δεδομένα εισόδου του υπέδειξε την εξής διαστασιολόγηση ως την βέλτιστη στις περιπτώσεις των τριών τοπολογιών του συστήματος:

Συνιστώσες	Μέγεθος		
	Τοπολογία 1	Τοπολογία 2	Τοπολογία 3
Φ/Β	5kW	4 kW	4kW
Κυψέλη καυσίμου	5kW	5 kW	-
Ηλεκτρολύτης	9kW	4 kW	-
Δεξαμενή αποθήκευσης	9kg	6 kg	-
Μπαταρίες	-	76kWh	152kWh

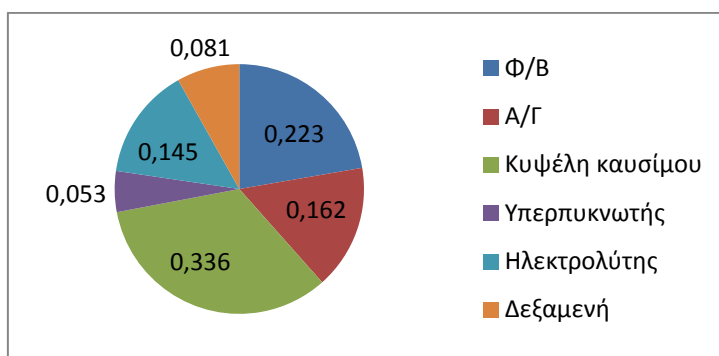
Πίνακας 4.9 : Βέλτιστη διαστασιολόγηση τοπολογιών

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται πως στη δεύτερη και τρίτη τοπολογία το μέγεθος του φ/β είναι μειωμένο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως στην πρώτη περίπτωση μέρος της ισχύος που αποδίδει τροφοδοτεί την κυψέλη καυσίμου, ενώ οι μπαταρίες στη δεύτερη περίπτωση αποδίδουν ενέργεια που δεν απαιτείται να την παράγει το φ/β. Για τον ίδιο λόγο είναι μειωμένο και το μέγεθος του ηλεκτρολύτη και της δεξαμενής αποθήκευσης στη δεύτερη τοπολογία. Επιπρόσθετα, είναι λογικές οι αυξημένες εγκατεστημένες μονάδες μπαταριών στην τρίτη τοπολογία.

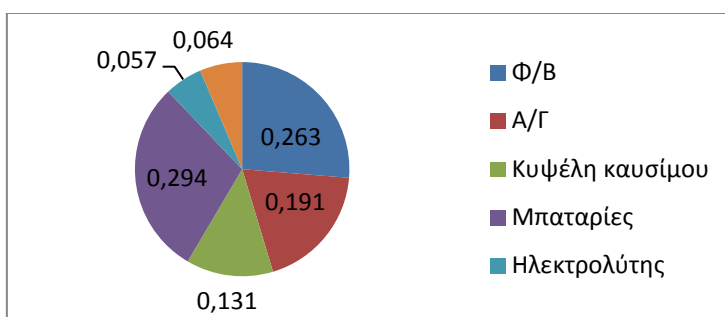
4.5.1.1 Οικονομικά αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στα σχ. 4.24, 4.25 και 4.26 φαίνονται οι επιδράσεις του εκάστοτε υποσυστήματος στο συνολικό κόστος του συστήματος για την τοπολογία 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Από τα διαγράμματα παρατηρείται πως στην πρώτη τοπολογία μεγαλύτερη συνεισφορά στο κόστος έχει η κυψέλη καυσίμου λόγω της συχνής αντικατάστασής της καθώς έχει μεγάλο ποσοστό στην παραγωγή ενέργειας και στη συνέχεια το Φ/Β λόγω του υψηλού κόστους

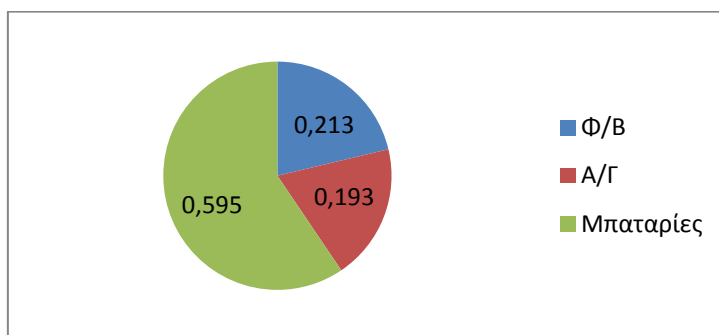
του. Στη δεύτερη τοπολογία το μεγαλύτερο κόστος έχουν οι μπαταρίες σε συνδυασμό με το φ/β, ενώ στην τρίτη οι μπαταρίες καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους καθώς είναι αρκετά μεγάλο το πλήθος τους.



Σχήμα 4.24 : Επίδραση υποσυστημάτων στο κόστος του συστήματος για την τοπολογία 1



Σχήμα 4.25 : Επίδραση υποσυστημάτων στο κόστος του συστήματος για την τοπολογία 2



Σχήμα 4.26 : Επίδραση υποσυστημάτων στο κόστος του συστήματος για την τοπολογία 3

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται συγκριτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης κόστους του συστήματος:

Cost Parameters	Τοπολογία		
	1	2	3
TNPC (\$)	165851	136950	148177
COE (\$/kWh)	0,359	0,298	0,321
OC (\$/yr)	5004	2499	3299
ACS (\$/yr)	12974	10713	11591

Πίνακας 4.10 : Οικονομικές παράμετροι συστήματος

Από τον πίνακα παρατηρούμε πως τα κόστη στην περίπτωση της πρώτης τοπολογίας είναι μεγαλύτερα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η κυψέλη καυσίμου και οι υπερπυκνωτές έχουν μεγάλο κόστος εγκατάστασης καθώς επίσης το μέγεθος του φ/β είναι μεγαλύτερο σε αυτή την περίπτωση.

4.5.1.2 Ενεργειακά αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στον πίνακα 4.11 καταγράφονται τα ενεργειακά αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε kwh/yr και στον πίνακα 4.12 οι αντίστοιχες ποσότητες σε ποσοστά επί τις 100.

Αρχικά καταγράφεται η ετήσια παραγωγή από τις κύριες πηγές παραγωγής ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση φαίνεται πως η Α/Γ έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην ενεργειακή παραγωγή. Η συνεισφορά του φ/β στην δεύτερη και τρίτη τοπολογία είναι μειωμένη καθώς είναι μειωμένες οι εγκατεστημένες μονάδες. Τέλος η συνεισφορά της κυψέλης καυσίμου είναι μειωμένη στη δεύτερη τοπολογία καθώς η δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου η οποία την τροφοδοτεί έχει μικρότερο μέγεθος.

Electrical Energy parameters (kwh/yr)	Τοπολογία 1			Τοπολογία 2			Τοπολογία 3	
	WT	PV	FC	WT	PV	FC	WT	PV
Production	73880	11511	7573	73880	9209	3790	73880	9209
Consumption	Load	Electrolyzer		Load	Electrolyzer		Load	
	36133	21463		36089	10802		36086	
Excess	35365			38902			44972	
Unmet Load	367			410			414	

Πίνακας 4.11 : Ενεργειακές παράμετροι συστήματος

Στην περίπτωση της δεύτερης τοπολογίας στο φορτίο καταναλώνεται το 77% και μόνο το 23% στη μονάδα ηλεκτρόλυσης, γεγονός που εξηγείται λόγω του μικρότερου μεγέθους της μονάδας.

Electrical Energy parameters (%)	Τοπολογία 1			Τοπολογία 2			Τοπολογία 3	
	WT	PV	FC	WT	PV	FC	WT	PV
Production	79%	12%	8%	85%	11%	5%	89%	11%
Consumption	Load	Electrolyzer		Load	Electrolyzer		Load	
	63%	37%		77%	23%		100%	
Excess	38%			44,80%			54,10%	
Unmet Load	1%			1,10%			1,10%	

Πίνακας 4.12 : Ποσοστά ενεργειακών παραμέτρων συστήματος

Η περίσσεια ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο σύστημα στις περιπτώσεις της δεύτερης και τρίτης τοπολογίας είναι αυξημένη καθώς η ενέργεια αποθηκεύεται στις

μπαταρίες ενώ στην πρώτη τοπολογία μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας καταναλώνεται για τη λειτουργία της κυψέλης και δεν τροφοδοτεί απευθείας το φορτίο. Η μεγαλύτερη περίσσεια ενέργειας δεν είναι επιθυμητή για το σύστημα εκτός από την περίπτωση που χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη άλλων αναγκών.

Το έλλειμμα ενέργειας στις περιπτώσεις της δεύτερης και τρίτης τοπολογίας είναι αυξημένο λόγω των μπαταριών.

Η ισοδύναμη απόσταση επέκτασης δικτύου καταγράφεται στον παρακάτω πίνακα:

Τοπολογίες	Ισοδύναμη απόσταση επέκτασης δικτύου (km)
1	11,9
2	8,99
3	9,19

Πίνακας 4.13 : Ισοδύναμη απόσταση επέκτασης δικτύου

4.5.2 Συμπεράσματα

Ο μεγάλος αριθμός των μπαταριών καθιστά την τρίτη τοπολογία μη πρακτική αν και το οικονομικό κόστος της είναι μικρότερο σε σχέση με την πρώτη. Επίσης οι μπαταρίες ενώ έχουν μικρότερο οικονομικό κόστος εγκατάστασης είναι πολύ ευαίσθητες κάτω από κάποιες συνθήκες, (όπως η επίδραση της θερμοκρασίας) και έχουν μεγαλύτερο κόστος αντικατάστασης και συντήρησης.

Η μελέτη δείχνει πως το σύστημα με βοηθητική διάταξη αποθήκευσης υπερπυκνωτές είναι **οικονομικά λιγότερο ελκυστικό** σε σχέση με τη δεύτερη τοπολογία που καταδεικνύεται οικονομικά συμφέρουσα. Ωστόσο, η πρώτη τοπολογία παρουσιάζει πλεονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη όπως το **μικρό περιβαλλοντικό κόστος** που δεν υπολογίστηκε στην παρούσα μελέτη και η **πιθανή αύξηση του μεγέθους της διάταξης αποθήκευσης που είναι φθηνότερη** σε σύγκριση με την περίπτωση πιθανής αύξησης του μεγέθους των μπαταριών. Επιπρόσθετα, συνυπολογίστηκαν και τα πλεονεκτήματα που αφορούν στους υπερπυκνωτές σε σύγκριση με τις μπαταρίες και έχουν αναλυθεί στην ενότητα 2.5. Για τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε να μελετηθεί στη συνέχεια η λειτουργία της συγκεκριμένης τοπολογίας.

Τελικά η εκάστοτε τοπολογία παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (οικονομικά, ενεργειακά, περιβαλλοντικά, λειτουργικά) τα οποία έχουν μεγαλύτερο ή μικρότερο αντίκτυπο στην απόφαση για την επιλογή της τοπολογίας ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί.

5 Λειτουργικοί περιορισμοί και κόστος τεχνολογιών υδρογόνου και συνιστωσών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

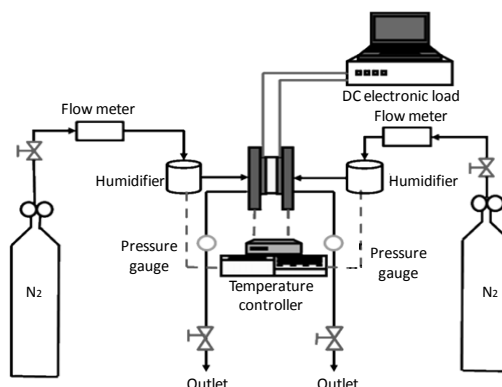
5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κυριότερα λειτουργικά χαρακτηριστικά και οι περιορισμοί των συνιστωσών του υβριδικού συστήματος που σχετίζονται με τεχνολογίες υδρογόνου και με τις διατάξεις αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι καίριο η στρατηγική ελέγχου του υβριδικού συστήματος να διαμορφωθεί με βάση αυτούς τους περιορισμούς προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία του συστήματος.

5.2 Λειτουργικοί περιορισμοί κυψέλης καυσίμου

Προκειμένου να γίνει ευρεία η χρήση των κυψελών καυσίμων PEM σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής και ηλεκτροκίνησης πρέπει να επιτευχθεί **αύξηση της διάρκειας ζωής** τους. Η **βελτίωση της λειτουργίας και της αντοχής** τους σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας, όπως σε δυναμικά μεταβατικά φορτία, κατά τη διάρκεια της έναρξης και του τερματισμού της λειτουργίας τους καθώς και σε κύκλους ψύξης και θέρμανσης της κυψέλης καθίσταται αναγκαίος αλλά δύσκολος στόχος.

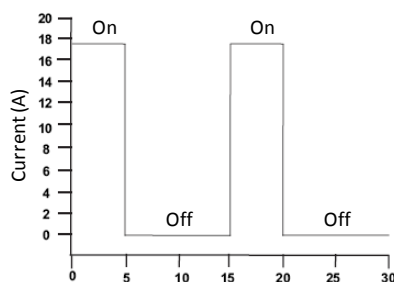
Έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί αποδεικνύουν πως η **αυξομείωση του δυναμικού** της κυψέλης προκαλεί την ταχύτερη υποβάθμιση της κυψέλης. Μία αιτία είναι η **υποβάθμιση της συνδεσμολογίας μεμβράνης - ηλεκτροδίου** που οφείλεται σε διάλυση του καταλύτη, σε διάβρωση του άνθρακα, σε γήρανση της μεμβράνης και σε αποκόλληση στρωμάτων της MEA που σχετίζονται με τις περίπλοκες διαντιδράσεις των στοιχείων που συνθέτουν την κυψέλη καυσίμου. Η λειτουργία της μεμβράνης για μεγάλη χρονική διάρκεια σε συνδυασμό με τη διάβρωση του άνθρακα στα ηλεκτρόδια οδηγεί σε αλλαγές στην κατανομή του καταλύτη (πλατίνα) στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων και συνεπώς σε απώλειες της επιφάνειας του ηλεκτροδίου. Επιπλέον κατά την έναρξη ή τον τερματισμό της λειτουργίας της κυψέλης τμήματα της καθόδου μπορούν να υποστούν δυναμικό διπλάσιο από αυτό σε συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης (OCV) γεγονός που συμβάλει στη χημική υποβάθμιση της μεμβράνης. Τέλος, εμφανίζονται διακυμάνσεις στην περιεκτικότητα του νερού ανάλογα με το ρεύμα φόρτισης προκαλώντας τη μηχανική υποβάθμιση της μεμβράνης.



Σχήμα 5.1 : Σχηματικό διάγραμμα του πειράματος

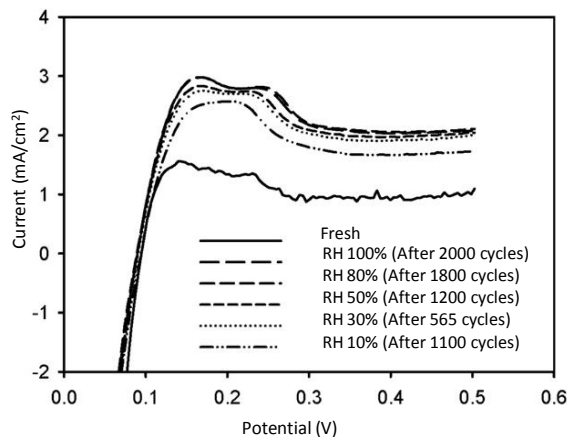
Στο πείραμα που παρουσιάζεται στην αναφορά [52] εξετάζεται η υποβάθμιση της κυψέλης σε μεταβατικά φορτία τύπου on/off σε περιβάλλον αζώτου. Το πείραμα ολοκληρώνεται μετά από τους κύκλους λειτουργίας στους οποίους παρατηρείται μείωση της τάσης κατά 20% της αρχικής τιμής για διαφορετικές συνθήκες σχετικής υγρασίας (relative humidity –RH) 100, 80, 50, 30, και 10%. και θερμοκρασία 70⁰C. Στο σχ. 5.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη.

Το φορτίο τύπου on/off του πειράματος αντικατοπτρίζεται στο ρεύμα που εφαρμόζεται σε ένα κελί (σχ. 5.2). Στη λειτουργία on το υδρογόνο και ο αέρας ρέουν στην ανόδο και στην καθόδο για 5 λεπτά. Στη λειτουργία off οι βαλβίδες εισόδου και εξόδου είναι κλειστές για 10 λεπτά.



Σχήμα 5.2 : Ρεύμα ενός κελιού της κυψέλης καυσίμου κατά το μεταβατικό φορτίο τύπου on/off.

Στο σχ. 5.3 φαίνεται η υποβάθμιση της καμπύλης ρεύματος - τάσης για όλες τις συνθήκες σχετικής υγρασίας. Παρατηρείται **σημαντική πτώση τάσης σε πυκνότητες ρεύματος ανώτερες των 0.8 A/cm²**. Η καλύτερη λειτουργία της κυψέλης επιτυγχάνεται για σχετική υγρασία μεγαλύτερη του 70% έτσι ώστε να μην αυξηθεί η μείωση της τάσης του κελιού πάνω από 10% μέχρι τους 1500 κύκλους.



Σχήμα 5.3 : Καμπύλες I-V πριν και μετά την μείωση πτώση τάσης κατά 20%

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων συνοψίζονται στον πίνακα 5.1:

	RH 100%	RH 80%	RH 50%	RH 30%	RH 10%
Beginning cell voltage (V)	0.67	0.67	0.58	0.58	0.35
Number of cycles at 10% cell voltage loss	1980	1650	1100	520	320
Decay rate of 10% cell voltage loss for time (mV/h)	0.40	0.49	0.63	1.30	1.30
Decay rate of 10% cell voltage loss for time (μV/cycle)	33.8	40.6	52.7	112.0	110.0
Number of cycles at 20% cell voltage loss	2000	1750	1200	550	365
Decay rate of 20% cell voltage loss for time (mV/h)	0.80	0.93	1.16	253	2.3
Decay rate of 20% cell voltage loss for time (μV/cycle)	67.0	76.5	96.7	211.0	192.0

Πίνακας 5.1: Αριθμός κύκλων και ρυθμός υποβάθμισης για 10% και 20% μείωση της τάσης σε διαφορετικές συνθήκες μέσης υγρασίας

Ο κύκλος on/off επηρεάζει αρνητικά την MEA συμπεριλαμβανομένου του στρώματος διάχυσης αερίων και της διεπιφανειακής δομής της μεμβράνης ηλεκτροδίου με αποτέλεσμα τη **μείωση της απόδοσης της κυψέλης**.

Ο σχετικά χαμηλός ρυθμός μείωσης της τάσης σε υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας οφείλεται στην αύξηση της ωμικής αντίστασης της μεμβράνης. Σε χαμηλή σχετική υγρασία η μείωση της τάσης οφείλεται στην αύξηση της σύνθετης αντίστασης μετά από πολλούς κύκλους on/off. **Η αφυδάτωση της κυψέλης και το φαινόμενο της διάχυσης του καυσίμου (hydrogen/air crossover) επιταχύνονται με την αύξηση των κύκλων on/off και τη μείωση της σχετικής υγρασίας.**

Η σύνθετη αντίσταση της MEA εξαρτάται άμεσα από την καμπύλη τάσης ρεύματος. Η αύξηση της σύνθετης αντίστασης προέρχεται από την υποβάθμιση του ηλεκτροκαταλύτη και της διεπαφής μεταξύ της μεμβράνης και του ηλεκτροδίου. Σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος η καμπύλη επηρεάζεται από το μηχανικό φαινόμενο ροής των αερίων ενώ σε χαμηλές πυκνότητες ρεύματος επηρεάζεται από το φαινόμενο της ενεργοποίησης.

Μετά από on/off κύκλους, η μείωση της περιοχής της ηλεκτροχημικής επιφάνειας όπως παρατηρείται στον πίνακα 5.2 αποδίδεται στην αύξηση της πλατίνας ή στη διάλυση του καταλύτη λόγω της υψηλής διαφυγής των αντιδρώντων (H_2 , air crossover) και συνεπώς **επιδρά αρνητικά στην απόδοση** της κυψέλης καυσίμου.

Relative humidity (%)	Number of cycles	Initial ESA	After ESA	Loss rate of ESA (%)
50	1200	70.5	55.3	21
30	565	70.3	65.4	7

Πίνακας 5.2: Επίδραση των on/off κύκλων στην περιοχή της ηλεκτροχημικής επιφάνειας

Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζεται το πάχος της μεμβράνης σε κάθε συνθήκη σχετικής υγρασίας. Η **μείωση του πάχους της μεμβράνης** οφείλεται στο υπεροξείδιο του υδρογόνου που σχηματίζεται κατά τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Η μεγαλύτερη μείωση στα στρώματα της καθόδου είναι λογική καθώς εκεί διαβρώνεται περισσότερο λόγω του μεγαλύτερου δυναμικού που εφαρμόζεται στην κάθοδο.

	Fresh	RH 100% (2000cycles)	RH 80% (1850 cycles)	RH 30% (565 cycles)	RH 10% (1100 cycles)
Cathode (μm)	20.0	13.5	19.0	14.1	11.3
Membrane (μm)	20.0	15.0	18.8	18.8	16.3
Anode (μm)	20.2	18.0	20.0	14.1	17.5

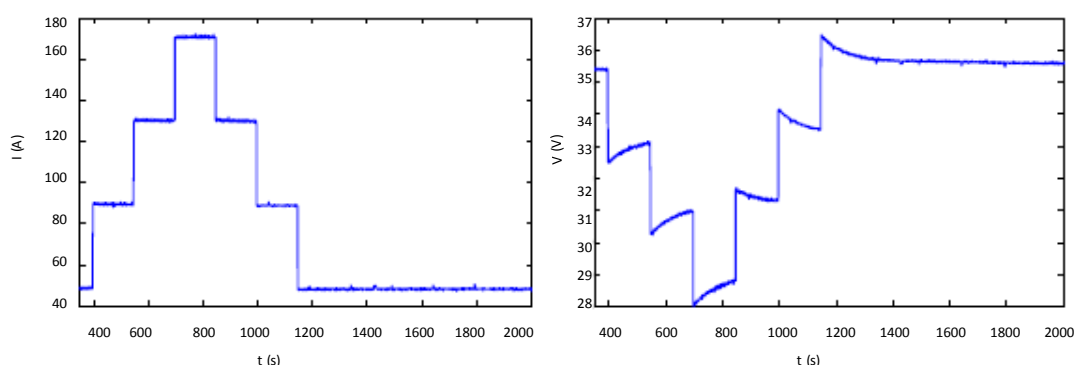
Πίνακας 5.3: Μέγεθος της καθόδου, της ανόδου και της μεμβράνης πριν και μετά από 100.000 κύκλους λειτουργίας για διάφορες συνθήκες υγρασίας

Από τα αποτελέσματα του πειράματος συμπεραίνεται πως η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε μεταβατικά φορτία επιταχύνει την υποβάθμιση της απόδοσής της και μειώνει τη διάρκεια ζωής της. Προκειμένου να παραμένει υψηλή η απόδοση της κυψέλης η σχετική υγρασία της κυψέλης απαιτείται να είναι μεγαλύτερη από 70%.

5.2.1 Δυναμική απόκριση σε μεταβατικά φαινόμενα

Η δυναμική συμπεριφορά μίας κυψέλης καυσίμου χαρακτηρίζεται από τη μεταβολή του φορτίου και συνεπώς από τη μεταβολή του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει την κυψέλη. Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η αποδοτική λειτουργία του συστήματος πρέπει να εξεταστεί η δυναμική απόκριση της κυψέλης σε μεταβατικά φορτία.

Βασιζόμενοι στο μοντέλο που παρουσιάστηκε στο 2^ο κεφάλαιο πραγματοποιούνται βηματικές αλλαγές στο φορτίο και προκύπτει η κυματομορφή του ρεύματος και της τάσης εξόδου της κυψέλης:



Σχήμα 5.4 : Μεταβατικό ρεύμα και τάση φόρτισης της κυψέλης καυσίμου

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρούμε πως η τάση της κυψέλης καυσίμου σταθεροποιείται στη μόνιμη κατάσταση με αρκετά μεγάλη χρονική καθυστέρηση. **Η κυψέλη δεν είναι δυνατόν να αποκριθεί ακαριαία σε μεταβολές του φορτίου λόγω των καθυστερήσεων** που διέπουν το μοντέλο της κυψέλης. Η δυναμική απόκριση της κυψέλης καυσίμου περιορίζεται από διαφορετικά φαινόμενα όπως η μεταβολή της αντίστασης της μεμβράνης λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας της, το φαινόμενο ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας, τις μηχανικές καθυστερήσεις που οφείλονται στο σύστημα μεταφοράς του υδρογόνου και τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της κυψέλης [53].

Η χωρητικότητα C που αναπαριστά την επίδραση του φαινομένου της ηλεκτρικής διπλοστοιβάδας έχει σχετικά μεγάλη τιμή, ωστόσο η σταθερά χρόνου είναι σχετικά μικρή (λιγότερο από 1sec) όταν η κυψέλη λειτουργεί στη γραμμική περιοχή. Συνεπώς, η χωρητικότητα C δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη δυναμική απόκριση της κυψέλης.

Κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων η αλλαγή της θερμοκρασίας της κυψέλης απαιτεί κάποιο χρονικό διάστημα καθώς λαμβάνουν χώρα οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στο κελί. Για το λόγο αυτό η θερμοδυναμική σταθερά της κυψέλης καυσίμου είναι αρκετά μεγάλη, της τάξης μερικών λεπτών. Ομοίως, η ροή του καυσίμου και του οξειδωτικού στην άνοδο και την κάθοδο δεν είναι δυνατόν να ακολουθήσει ακαριαία τις αλλαγές στο φορτίο με αποτέλεσμα να παρατηρούνται μηχανικές καθυστερήσεις της τάξης των μερικών δεκάδων έως εκατοντάδων δευτερολέπτων. Συνεπώς η θερμοδυναμική σταθερά και οι καθυστερήσεις της ροής επικρατούν και υπερκαλύπτουν το φαινόμενο της διπλοστοιβάδας σε μεγάλη κλίμακα χρόνου [54].

Η ισχύς εξόδου είναι αύξουσα συνάρτηση του ρυθμού τροφοδοσίας του καυσίμου για μια δεδομένη συστοιχία κυψελών καυσίμου. Για να επιτευχθεί αύξηση του ρυθμού αυτού απαιτείται να μεταβληθεί η ταχύτητα με την οποία λειτουργεί η αντλία, διαδικασία που απαιτεί κάποια δευτερόλεπτα. Σε αυτό το χρονικό διάστημα το ρεύμα και η τάση θα καθυστερήσουν να φτάσουν στην τελική τιμή τους και η ισχύς εξόδου θα έχει εκθετική αντί για βηματική απόκριση. Η σταθερά χρόνου ποικίλει από μερικά μέχρι μερικές δεκάδες δευτερόλεπτα.

Η δυναμική απόκριση της κυψέλης εξαρτάται και από το ισοζύγιο των μαζών των στοιχείων που αντιδρούν στο εσωτερικό της κυψέλης. Στη μόνιμη κατάσταση οι μερικές

πιέσεις των αντιδρώντων (υδρογόνου και οξυγόνου) είναι σταθερές. Καθώς μεταβάλλεται το φορτίο ρεύματος το ισοζύγιο των μαζών μεταβάλλεται αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει διότι το ηλεκτρικό ρεύμα είναι ανάλογο της ροής εισόδου των αερίων και στη μόνιμη κατάσταση ισχύει [55]:

$$\dot{m}_{H_2}^{react} = 2\dot{m}_{O_2}^{react} = \frac{I}{2F} \quad 5-1$$

όπου $\dot{m}_{H_2}^{react}$ η μάζα του υδρογόνου και $\dot{m}_{O_2}^{react}$ η μάζα του οξυγόνου και F η σταθερά Faraday.

Το υδρογόνο διαχέεται μέσω των καναλιών διάχυσης των αερίων στην άνοδο και συνεπώς στην ενεργή περιοχή της αντίδρασης. Καθώς πραγματοποιείται η ηλεκτροχημική αντίδραση τα πρωτόνια εισέρχονται στη μεμβράνη. Η μεταφορά των πρωτονίων αυτών στη μεμβράνη συσχετίζεται άμεσα με την περιεκτικότητα της σε νερό. Από την άλλη πλευρά στην άνοδο το οξυγόνο ή ο αέρας διαχέεται στην ενεργή επιφάνεια της καθόδου και αντιδρά με τα πρωτόνια. Όταν αυξάνεται ή μειώνεται η πυκνότητα ισχύος ακαριαία, η συγκέντρωση των πρωτονίων υπόκειται σε αύξηση ή μείωση αντίστοιχα. Συνεπώς, για την επίτευξη της μεταβολής της συγκέντρωσης των πρωτονίων στη μεμβράνη απαιτείται και αντίστοιχη μεταβολή των ροών των αερίων, η οποία σύμφωνα με την καταστατική εξίσωση επηρεάζει τη μερική πίεση των αερίων μέσα στην κυψέλη:

$$\frac{V_A}{RT} \frac{dp_{H_2}^{partial}}{dt} = \dot{m}_{H_2} - \frac{I}{2F} \quad 5-2$$

$$\frac{V_A}{RT} \frac{dp_{O_2}^{partial}}{dt} = \dot{m}_{O_2} - \frac{I}{4F} \quad 5-3$$

Στη μόνιμη κατάσταση οι μερικές πιέσεις είναι σταθερές:

$$\frac{dp_{H_2}^{partial}}{dt} = \frac{dp_{O_2}^{partial}}{dt} = 0 \quad 5-4$$

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

$$\dot{p}_{H_2} = -\frac{1}{t_{H_2}} \left(p_{H_2} + \frac{1}{K_{H_2}} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I_{fc}) \right) \quad 5-5$$

$$\dot{p}_{H_2O} = -\frac{1}{t_{H_2O}} \left(p_{H_2O} + \frac{2}{K_{H_2O}} K_r I_{fc} \right) \quad 5-6$$

$$\dot{p}_{O_2} = -\frac{1}{t_{O_2}} \left(p_{O_2} + \frac{2}{K_{O_2}} (q_{O_2}^{in} - K_r I_{fc}) \right) \quad 5-7$$

όπου I_{fc} το ρεύμα εξόδου της κυψέλης, $q_{O_2}^{in}$ η μοριακή ροή εισόδου του οξυγόνου (mol/s), $K_{H_2}, K_{H_2O}, K_{O_2}$ οι μοριακές σταθερές των βαλβίδων (mol/A·s) και $t_{H_2}, t_{H_2O}, t_{O_2}$ οι χρονικές σταθερές που σχετίζονται με τις ροές των αντιδρώντων και υπολογίζονται ως εξής:

$$t_{O_2} = \frac{V_C}{K_{O_2} RT} \quad 5-8$$

$$t_{H_2} = \frac{V_a}{K_{H_2} RT} \quad 5-9$$

$$t_{H_2O} = \frac{V_c}{K_{H_2O} RT} \quad 5-10$$

Η σταθερά K_r δίνεται από τη σχέση:

$$K_r = \frac{N_{cell}}{4F} \quad 5-11$$

και η ροή του αντιδρώντος υδρογόνου υπολογίζεται ως εξής:

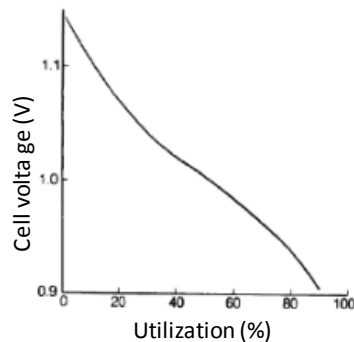
$$q_{H_2}^r = 2 \cdot K_r \cdot I_{fc} \quad 5-12$$

Σημαντική παράμετρος για την αποτελεσματικότερη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης, ο οποίος ορίζεται ως το κλάσμα της ροής του αντιδρώντος υδρογόνου προς τη συνολική ροή:

$$U_f = \frac{q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out}}{q_{H_2}^{in}} = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{in}} \quad 5-13$$

όπου $q_{H_2}^{in}$ η μοριακή ροή εισόδου του υδρογόνου και $q_{H_2}^r$ η μοριακή ροή του αντιδρώντος υδρογόνου (mol/s).

Η υψηλή τιμή του βαθμού χρησιμοποίησης του υδρογόνου είναι επιθυμητή, ιδιαίτερα σε μικρότερα συστήματα, καθώς τότε ελαχιστοποιείται η ροή του υδρογόνου και του οξυγόνου και συνεπώς και το κόστος καυσίμου και οι συμπιεστές που απαιτούνται από το σύστημα είναι μικρότεροι και φθηνότεροι. Ωστόσο, η αύξηση του βαθμού χρησιμοποίησης πάνω από κάποιο βαθμό οδηγεί σε μεγάλη πτώση τάσης στην έξοδο της κυψέλης. Η ιδανική τιμή του θεωρείται περίπου στο 85%. Η τάση του κελιού συναρτηθεί του βαθμού χρησιμοποίησης παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα (σχ. 5.5):



Σχήμα 5.5 : Τάση ανοικτού κυκλώματος κυψέλης καυσίμου συναρτηθεί του βαθμού χρησιμοποίησης καυσίμου

Από τις σχέσεις 5 - 12 και 5 - 13 προκύπτει η επιθυμητή ροή καυσίμου:

$$q_{H_2}^{in} = \frac{2 \cdot K_r \cdot i}{0.85} \quad 5-14$$

Η μοριακή ροή του εισερχόμενου οξυγόνου προκύπτει ως ένα κλάσμα της ροής του υδρογόνου:

$$q_{O_2}^{in} = \frac{q_{H_2}^{in}}{r_{H-O}} \quad 5-15$$

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 την ποσότητα υδρογόνου, στον επεξεργαστή καυσίμου εισάγεται αρκετά μεγαλύτερη ποσότητα οξυγόνου. Με αυτό τον τρόπο (δηλαδή με την αύξηση της συγκέντρωσης ενός αντιδρώντος) εξασφαλίζεται καλύτερος βαθμός χρησιμοποίησης του υδρογόνου και μεγαλύτερη ταχύτητα στην πραγματοποίηση της αντίδρασης.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία της συστοιχίας ο συντελεστής χρησιμοποίησης του καυσίμου πρέπει να περιορίζεται μεταξύ δύο ορίων, σε διαφορετική περίπτωση μπορεί να παρουσιαστεί [56]:

- *Υποχρησιμοποίηση καυσίμου*: η τάση της κυψέλης θα αυξηθεί απότομα.
- *Υπερχρησιμοποίηση καυσίμου*: θα παρουσιαστεί έλλειψη καυσίμου και θα επέλθουν μόνιμες βλάβες στις κυψέλες.
- *Υπόταση*: Η χαρακτηριστική καμπύλη της κυψέλης καυσίμου θέτει την κατώτατη τιμή της τάσης κοντά στα 0,5V, κάτω από την οποία η τάση της κυψέλης μειώνεται πολύ απότομα με την αύξηση του ρεύματος.

Προκειμένου να επιτυγχάνεται ο βαθμός χρησιμοποίησης κοντά στη βέλτιστη τιμή των 85% πρέπει αυτός να περιορίζεται μεταξύ των τιμών 0,8 και 0,9. Συνεπώς, για το ρεύμα φόρτισης της κυψέλης προκύπτει ο εξής περιορισμός:

$$0.8 \leq U_f \leq 0.9 \Rightarrow 0.8 \leq \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{in}} \leq 0.9 \Rightarrow 0.8q_{H_2}^{in} \leq q_{H_2}^r \leq 0.9q_{H_2}^{in} \Rightarrow$$

$$\frac{0.8q_{H_2}^{in}}{2K_r} = I_{fc_min} \leq i \leq I_{fc_max} = \frac{0.9q_{H_2}^{in}}{2K_r} \quad 5-16$$

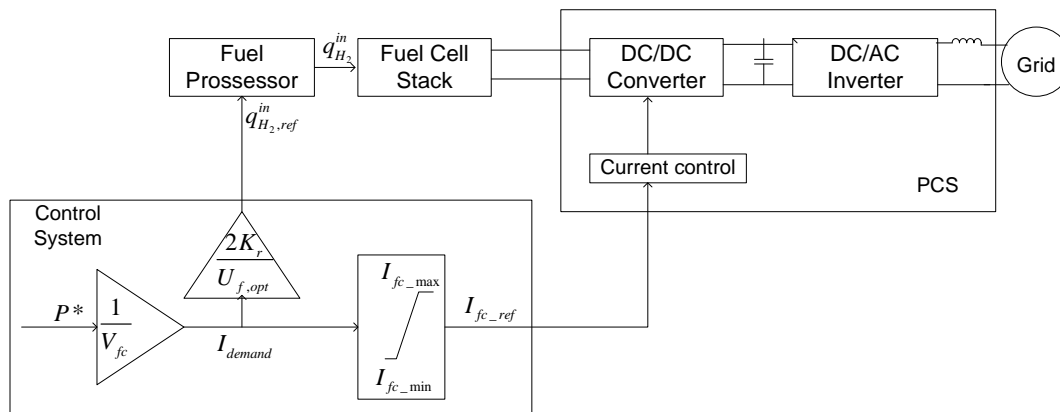
Από τα παραπάνω, είναι φανερό πως η ισχύς εξόδου της κυψέλης σχετίζεται άμεσα με την κατανάλωση καυσίμου του επιλεγμένου σημείου λειτουργίας της χαρακτηριστικής καμπύλης V-I. **Η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος εξόδου απαιτεί κατάλληλη μεταβολή του ρυθμού ροής εισόδου καυσίμου.** Η απαιτούμενη ζήτηση ισχύος αντιστοιχεί στο ρεύμα φόρτισης που προκύπτει:

$$I_{demand} = P_{demand} / V_{fc} \quad 5-17$$

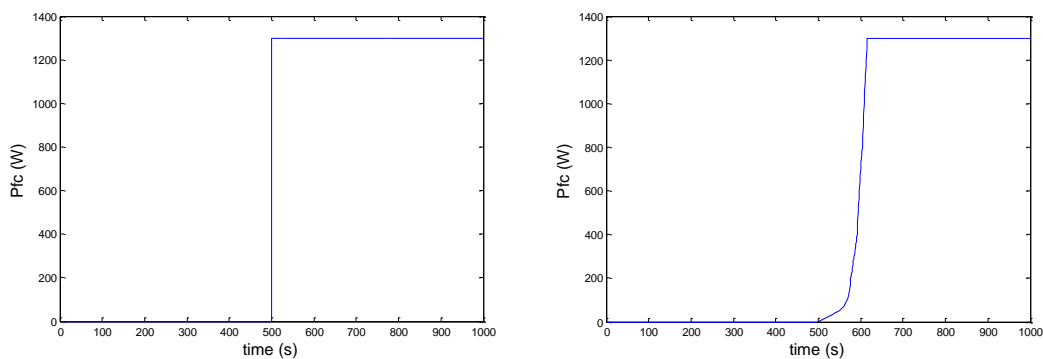
Από το ρεύμα φόρτισης υπολογίζεται η επιθυμητή ροή καυσίμου για το δεδομένο συντελεστή χρησιμοποίησης.

Ο έλεγχος της ροής καυσίμου υλοποιείται με το διάγραμμα που παρατίθεται στο σχ. 5.16 [16].

Το μοντέλο απόκρισης ισχύος της κυψέλης καυσίμου [57], στο οποίο ελήφθησαν υπόψη οι μηχανικές καθυστερήσεις λόγω του επεξεργαστή καυσίμου και των αντλιών υδρογόνου, οξυγόνου και νερού καθώς και καθυστερήσεις που οφείλονται σε ηλεκτροχημικά φαινόμενα βρίσκεται στο Παράρτημα - Μοντέλο 19. Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο μελετήθηκε η απόκριση της ισχύος της κυψέλης σε μία βηματική αύξηση της ισχύος του φορτίου (σχ.5.7).



Σχήμα 5.6 : Αρχιτεκτονική ελέγχου κυψέλης καυσίμου



Σχήμα 5.7 : Καμπύλη επιθυμητής και πραγματικής ισχύος εξόδου της κυψέλης καυσίμου

Η ακαριαία μεταβολή της απαιτούμενης ισχύος πρέπει να συνοδεύεται από ταυτόσημη μεταβολή της ισχύος τροφοδοσίας. Από τα ανωτέρω διαγράμματα παρατηρούμε πως η πραγματική ισχύς εξόδου υπολείπεται της επιθυμητής. Αυτό το έλλειμμα ισχύος πρέπει να καλυφθεί από κάποια βοηθητική πηγή.

Συμπερασματικά, κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων παρουσιάζονται καθυστερήσεις στην απόκριση ισχύος της κυψέλης, μειώνεται ο βαθμός απόδοσής της, υποβαθμίζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της και μειώνεται ο χρόνος ζωής της.

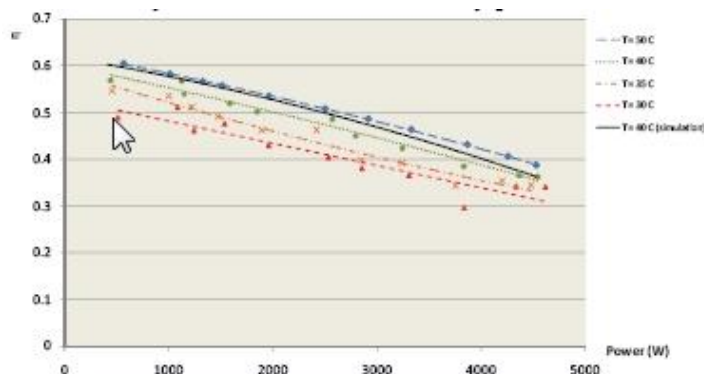
Συνεπώς, για τους ανωτέρω λόγους, σε ένα σύστημα αποτελούμενο από κυψέλες καυσίμου πρέπει να υπάρχουν επιμέρους πηγές ισχύος. Η ενσωμάτωση τέτοιων πηγών έχει ως σκοπό την εύρυθμη προσαρμογή ακραίων μεταβολών του φορτίου που μπορούν να οδηγήσουν σε κακή λειτουργία της κυψέλης ή ακόμα και σε διακοπή της λειτουργίας του συστήματος στη χειρότερη περίπτωση. Αυτή η κατάσταση είναι επικίνδυνη όχι μόνο για την κυψέλη καυσίμου αλλά και για τα βοηθητικά συστήματα διότι σε περίπτωση μη αποδοτικής αντιστάθμισης της διαφοράς της απαιτούμενης ισχύος, τα ηλεκτρονικά στοιχεία που συνοδεύουν το σύστημα μπορούν να καταστραφούν. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ως βοηθητική πηγή ισχύος χρησιμοποιείται ο υπερπυκνωτής.

5.2.2 Απόδοση κυψέλης καυσίμου

Η αύξηση της διάρκειας ζωής της κυψέλης καυσίμου επιτυγχάνεται σε λειτουργία υψηλής απόδοσης [53]. Η απόδοση της κυψέλης καυσίμου εμφανίζει σημαντική εξάρτηση

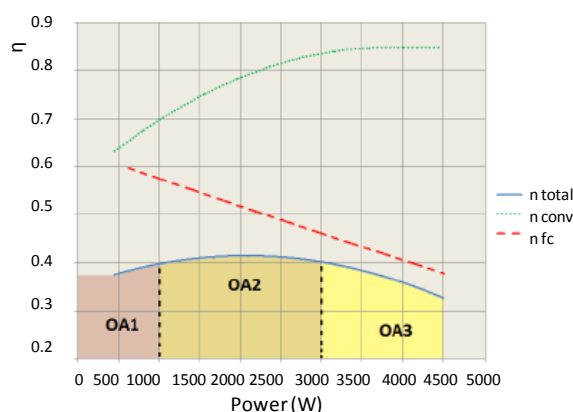
από το είδος και το επίπεδο της ισχύος που παρέχει όπως επίσης και από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας της κυψέλης.

Η πειραματική απόδοση της κυψέλης συναρτήσει της ισχύος που παρέχει με παράμετρο τη θερμοκρασία παρουσιάζεται στο σχ. 5.8. Η απόδοση που προέκυψε με την προσομοίωση του μοντέλου που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 για θερμοκρασία 40°C αναπαρίσταται με την συνεχή γραμμή.



Σχήμα 5.8 : Απόδοση κυψέλης καυσίμου συναρτήσει την ισχύος που παρέχει κάτω από διαφορετικές θερμοκρασίες και η προσομοιωμένη καμπύλη απόδοσης για θερμοκρασία 40°C

Από το διάγραμμα φαίνεται πως η απόδοση της κυψέλης καυσίμου είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας της και της ισχύος που παρέχει. Όπως έχει αναφερθεί, η κυψέλη καυσίμου δεν είναι δυνατόν να τροφοδοτήσει μεταβατικά φορτία λόγω της αργής δυναμικής της απόκρισης και επιπλέον η ατέρμονη λειτουργία της οδηγεί στην γρηγορότερη υποβάθμιση και στη μείωση του χρόνου ζωής της. Το διάγραμμα επιβεβαιώνει πως, αν η κυψέλη καυσίμου κληθεί να ικανοποιήσει φορτία μικρής χρονικής διάρκειας, η απόδοσή της είναι σημαντικά μειωμένη καθώς δεν μεσολαβεί αρκετός χρόνος προκειμένου να θερμανθεί επαρκώς ώστε να λειτουργήσει.



Σχήμα 5.9 : Συνδυασμένη απόδοση κυψέλης καυσίμου και μετατροπέα συναρτήσει της ισχύος

Στο σχ. 5.9 απεικονίζονται οι καμπύλες της απόδοσης της κυψέλης καυσίμου, της απόδοσης του μετατροπέα DC/DC και της συνδυασμένης απόδοσης τους. Με βάση αυτή την καμπύλη απαιτείται η παρεχόμενη ισχύς να βρίσκεται στο μέσο της καμπύλης κοντά στην περιοχή (OA2) στην οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση.

Στην καμπύλη της απόδοσης διακρίνονται **3 περιοχές λειτουργίας που εφαρμόζονται στον αλγόριθμο ελέγχου του υβριδικού συστήματος στην παρούσα εργασία** (κεφάλαιο 7).

Στην πρώτη περιοχή λειτουργίας (OA1) είναι απαιτούμενο η ζήτηση ισχύος να ικανοποιείται από κάποια βοηθητική πηγή (υπερπυκνωτές στην παρούσα διπλωματική εργασία). Στην δεύτερη (OA2) η απαιτούμενη ισχύς παρέχεται εξολοκλήρου από την κυψέλη καυσίμου. Στην τρίτη η επιπλέον των 3000 W ισχύς παρέχεται από την βοηθητική πηγή, εφόσον αυτό είναι δυνατόν.

5.2.3 Κόστος λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ενέργεια απευθείας μέσω μιας χημικής αντίδρασης χωρίς να απαιτείται η κατανάλωση καυσίμου (καύση). Προσφέρουν υψηλή απόδοση και δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον. Το **κόστος λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου είναι σημαντικός παράγοντας για την βιωσιμότητα** του υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Προκειμένου να είναι οικονομικά συμφέρουσα η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου απαιτείται να ληφθεί υπόψη η συνάρτηση κόστους της στον διαχειριστικό έλεγχο του συστήματος. Το συνολικό ημερήσιο κόστος λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου δεν πρέπει να υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο όριο.

Οι συναρτήσεις κόστους της κυψέλης περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω [58][59][60][61].

Το ημερήσιο κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και υδρογόνου δίνεται από την συνάρτηση:

$$C_{fc} = c_{n1} T \sum_j \frac{P_j + P_{a_j} + P_{H_j}}{n_j} \quad 5-18$$

όπου c_{n1} η τιμή αγοράς του υδρογόνου (\$/kWh), T το μήκος του χρονικού διαστήματος στο οποίο λαμβάνονται οι μετρήσεις (h), P_j η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς στο διάστημα j μειωμένη κατά την ισχύ των βοηθητικών διατάξεων της κυψέλης (kW), P_{a_j} η ισχύς των βοηθητικών διατάξεων της κυψέλης (kW), P_{H_j} η ισοδύναμη ηλεκτρική ισχύς που αντιστοιχεί στην παραγωγή του υδρογόνου (kW), n_j η ηλεκτρική απόδοση της κυψέλης καυσίμου στο διάστημα j (%).

Το λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης (Operation and Maintenance Cost - COM) είναι συνάρτηση της ισχύος εξόδου.

Το κόστος έναρξης λειτουργίας της κυψέλης (Startup Cost) εξαρτάται από την θερμοκρασία και τον χρόνο που υπήρξε εκτός λειτουργίας η κυψέλη. Μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση αυτού του χρόνου και δίνεται από την εξίσωση:

$$C_{SUP} = a + \beta \left(1 - e^{-\frac{t_{off}}{\tau}} \right) \quad 5-19$$

όπου a , β το κόστος θέρμανσης και ψύξης κατά την έναρξη και τον τερματισμό της λειτουργίας της κυψέλης αντίστοιχα (\$), τ είναι η χρονική σταθερά ψύξης της κυψέλης (h) και t_{off} το χρονικό διάστημα που η κυψέλη βρίσκεται αποσυνδεδεμένη (h).

Συνεπώς το κόστος λειτουργίας της κυψέλης δίνεται συνολικά από το άθροισμα των προαναφερθέντων επιμέρους κοστών:

$$COST = \sum Cost = C_{fc} + COM + C_{SUP} \quad 5-20$$

Οι τιμές των σταθερών και των μεταβλητών για κυψέλη καυσίμου μέγιστης ισχύος 250W, όπως αυτές προέκυψαν από την βιβλιογραφία είναι οι εξής [59][60]:

$c_{n1}=0.07\$/kWh$, $\alpha=0.05\%$ και $\beta=0.15\%$, $\tau=0.75h$ και $COM= 4.97 \$$.

5.3 Λειτουργικοί περιορισμοί ηλεκτρολύτη PEM

5.3.1 Διακοπτόμενη λειτουργία και κυμάτωση ισχύος

Οι εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται συνήθως οι ηλεκτρολύτες περιλαμβάνουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε αρκετές περιπτώσεις υβριδικών συστημάτων ο ηλεκτρολύτης τροφοδοτείται με την περίσσεια ισχύος που υπάρχει στο σύστημα. Το γεγονός ότι χρησιμοποιείται σαν ελεγχόμενο φορτίο (dump load) έχει ως αποτέλεσμα τη διακοπτόμενη λειτουργία του, αλλά και υψηλή κυμάτωση ισχύος και μεταβολές στο ρεύμα του ηλεκτρολύτη.

Αν οι αλλαγές στην ισχύ του ηλεκτρολύτη είναι ταχύτερες από το ρυθμό επεξεργασίας των αερίων η πίεση δεν μπορεί να ελεγχθεί με αποτέλεσμα να υπάρχουν προβλήματα ασφαλείας [67]. Για το λόγο αυτό προτείνεται η **αυξομείωση της ισχύος του ηλεκτρολύτη με τη χρήση περιοριστών κλίσης (rate limiters)**. Παραδείγματος χάριν, ένας τυπικός ηλεκτρολύτης 20 kW μπορεί να αυξήσει την ισχύ του από το 16% έως το 100% της ονομαστικής του τιμής σε 40 sec, δηλαδή με κλίση 500 W/sec.

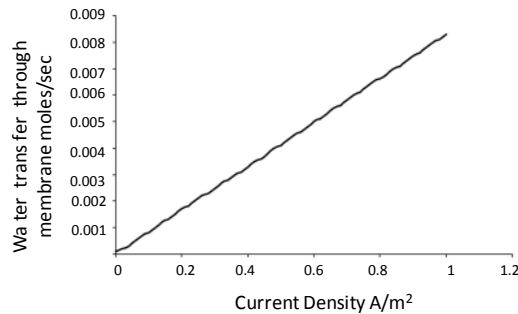
Ο ηλεκτρολύτης απαιτεί κάποιο χρονικό διάστημα για να φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία λειτουργίας. Ωστόσο, λόγω της διακοπτόμενης λειτουργίας μπορεί να λειτουργεί σε θερμοκρασίες κατώτερες της ονομαστικής, με αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοση.

Τέλος, **σε μεγάλη περίσσεια ισχύος** ο ρυθμός με τον οποίο παράγεται 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, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη. Τα όρια ανάφλεξης του υδρογόνου αναμεμιγμένο με οξυγόνο είναι μεταξύ 4.3% και 93.9%, αλλά η αυτόματη απενεργοποίηση της συσκευής πραγματοποιείται σε αρκετά χαμηλότερες συγκεντρώσεις. Ο ρυθμός διεύθυνσης 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 $0.002\text{A}/\text{cm}^2$ [29]. Η τιμή αυτή είναι αμελητέα σε σύγκριση με την τυπική πυκνότητα ρεύματος. Ωστόσο, ο ρυθμός διαπερατότητας του υδρογόνου υπόκειται σε γραμμική αύξηση με την πίεση, που σημαίνει πως σε πίεση 200bar οι απώλειες υδρογόνου θα είναι $0.04\text{A}/\text{cm}^2$.

5.3.2 Σύστημα διαχείρισης νερού και κατανάλωση νερού

Η βελτίωση του συστήματος διαχείρισης νερού στην μεμβράνη του ηλεκτρολύτη PEM είναι σημαντική για την αύξηση της απόδοσης και του χρόνου ζωής των ηλεκτρολυτών. Η ύγρανση της μεμβράνης οφείλεται στην υψηλή ροή του αντλούμενου νερού. Η έξοδος του υδρογόνου από την κάθοδο συνοδεύεται από μεταφορά νερού από την άνοδο προς την κάθοδο. Το αέριο υδρογόνο πρέπει να διαχωριστεί από αυτή την ποσότητα νερού πριν αποθηκευτεί. Για το λόγο αυτό απαιτούνται διατάξεις που λειτουργούν σε υψηλές πιέσεις και άρα επιβάλλεται η μείωση του νερού που μετακινείται μέσα στην κυψέλη. Επομένως, ο έλεγχος της διακίνησης του νερού στον ηλεκτρολύτη είναι σημαντικός για την εύρυθμη λειτουργία της κυψέλης [18].

Το σχ. 5.10 δείχνει την επίδραση της πυκνότητας του ρεύματος λειτουργίας στην μεταφορά του νερού διαμέσου της μεμβράνης.

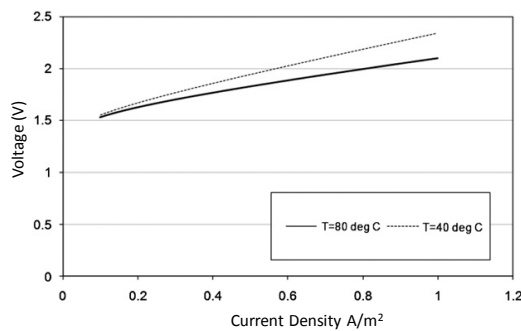


Σχήμα 5.10 : Επίδραση πυκνότητας ρεύματος στην ποσότητα του νερού που μεταφέρεται δια μέσου της μεμβράνης

Θεωρητικά 1 lt νερού μπορεί να παράγει 1.24Nm³ υδρογόνου. Ωστόσο, η πραγματική κατανάλωση του νερού είναι αυξημένη κατά 25% 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.

5.3.3 Θερμοκρασία ηλεκτρολύτη

Η αύξηση της θερμοκρασίας ενός κελιού οδηγεί σε βελτίωση της λειτουργίας της κυψέλης καθώς μειώνεται η τάση για μία δεδομένη τιμή ρεύματος (μείωση της χαρακτηριστικής V-I) (σχ.5.11). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση λιγότερης ισχύος για ένα συγκεκριμένο ρυθμό παραγωγής υδρογόνου. [63]



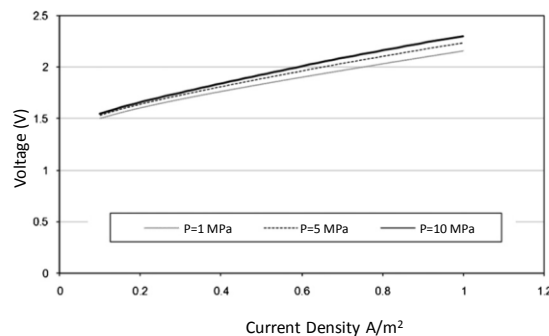
Σχήμα 5.11 : Επίδραση της θερμοκρασίας στην χαρακτηριστική V-I του ηλεκτρολύτη PEM

Παράλληλα, η αγωγιμότητα ενός κελιού του ηλεκτρολύτη αυξάνεται γραμμικά με την θερμοκρασία. Αυτό οδηγεί στην εμφάνιση χαμηλότερων υπερτάσεων που οφείλονται σε ωμικές απώλειες, όταν λειτουργεί ο ηλεκτρολύτης σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Η αύξηση της αγωγιμότητας αναμένεται να συνεχίζει μέχρι θερμοκρασίες που δεν παρουσιάζεται πρόβλημα με την υγρασία του κελιού. Συνεπώς υπάρχει ένα όριο θερμοκρασίας πάνω από την οποία δεν είναι αποδοτική η λειτουργία του ηλεκτρολύτη. Επομένως, απαιτείται κατάλληλος έλεγχος προκειμένου να μην αυξάνεται κατά πολύ η θερμοκρασία στο κελί του ηλεκτρολύτη [64].

5.3.4 Πίεση

Η παραγωγή υδρογόνου μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε υψηλές είτε σε χαμηλές πιέσεις. Το πλεονέκτημα της ηλεκτρόλυσης υψηλής πίεσης είναι πως είναι δυνατή η εξάλειψη της μονάδας συμπίεσης συνεισφέροντας σημαντικά στην εξοικονόμηση κόστους και ενέργειας. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται πως η ισχύς που απαιτείται για την παραγωγή υδρογόνου υψηλής πίεσης είναι περίπου 5% λιγότερη από αυτή για υδρογόνο χαμηλής πίεσης [65]. Οι ηλεκτρολύτες του εμπορίου μπορούν να παράγουν υδρογόνο υπό πίεση 14bar και πειραματικά να φτάσουν έως και 200bar.

Ωστόσο, οι συνθήκες υψηλής πίεσης απαιτούν την αντοχή της πολυμερούς μεμβράνης και τα κατάλληλα υλικά. Κατά τη διαδικασία της συμπίεσης στην ηλεκτρόλυση αυξάνεται ελαφρώς η τάση των κελιών. Η μόνη απώλεια που πραγματοποιείται είναι η διάχυση του υδρογόνου στην πολυμερή μεμβράνη. Συνεπώς, απαιτείται έλεγχος προκειμένου να διακόπτεται η τροφοδοσία του ηλεκτρολύτη, όταν η πίεση του υδρογόνου φτάσει σε απαγορευτικές τιμές.



Σχήμα 5.12 : Επίδραση της πίεσης στην χαρακτηριστική V-I του ηλεκτρολύτη PEM

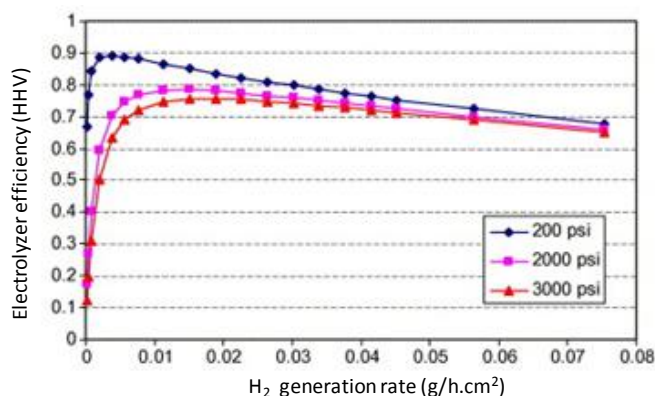
5.3.5 Παραγωγή οξυγόνου

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

5.3.6 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 οδηγεί σε μεγαλύτερη παραγωγή υδρογόνου με χαμηλότερη απόδοση. Η τυπική τιμή της τάσης του κελιού είναι 2V αλλά συνήθως η ονομαστική τιμή είναι μικρότερη (1.6V).

Επιπροσθέτως, αρνητική επίδραση στην απόδοση έχουν οι απώλειες διάχυσης του υδρογόνου μέσα από την πολυμερή μεμβράνη. Οι απώλειες αυτές είναι αμελητέες για χαμηλές πιέσεις αλλά είναι δυνατόν να επηρεάσουν την συνολική απόδοση για υψηλές πιέσεις (>100bar).



Σχήμα 5.13 : Καμπύλες απόδοσης συστοιχίας ηλεκτρολύτη για διάφορες πιέσεις

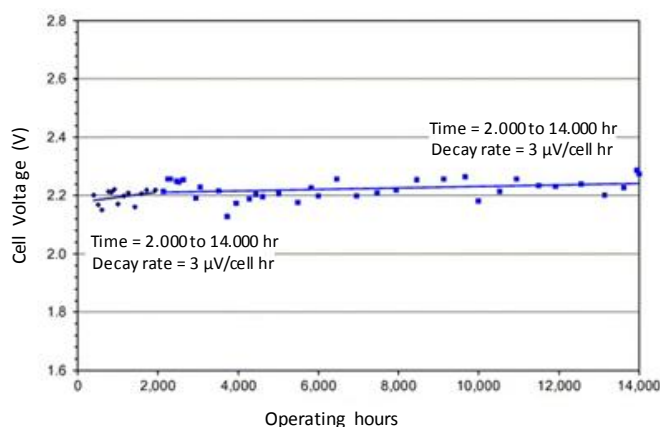
Ακόμα, σημαντικές είναι και οι απώλειες ισχύος που οφείλονται στα βοηθητικά συστήματα. Οι τυπικοί ηλεκτρολύτες του εμπορίου έχουν κατανάλωση ενέργειας από 4.5 έως 6.0 kWh/Nm³, που αντιστοιχεί σε απόδοση 65-80%. Στο σχ. 5.13 παρατίθενται οι καμπύλες απόδοσης συναρτήσει της παραγωγής υδρογόνου για διάφορες πιέσεις [29]:

Η συνολική απόδοση ενός ηλεκτρολύτη δίνεται από την εξίσωση:

$$n_{EL} = \frac{1.482}{V_{cell}} \cdot \frac{i - i_{loss}}{i} \cdot \frac{n_{DC}}{1 + \xi} \quad 5-21$$

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

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



Σχήμα 5.14 : Τάση ενός κελιού ηλεκτρολύτη PEM συναρτήσει των ωρών λειτουργίας

Η διάρκεια ζωής ενός ηλεκτρολύτη καθώς και η υποβάθμιση των λειτουργικών χαρακτηριστικών με το χρόνο αποτελεί κύρια παράμετρο για την απόδοση αλλά και την τεχνοοικονομική ανάλυση του υβριδικού συστήματος. Η τάση του ηλεκτρολύτη παρουσιάζει μία αύξηση αναλογικά με το χρόνο λειτουργίας του, όπως φαίνεται στο σχ. 5.14 [29]. Η αύξηση είναι απότομη (20-50 μV/h) τις πρώτες 2.000 ώρες λειτουργίας, αλλά στη συνέχεια ελαττώνεται (<3 μV/h). Οι κυριότεροι παράγοντες που ευθύνονται για την αύξηση είναι η εξισορρόπηση της περιεκτικότητας του νερού στη μεμβράνη και η οξειδωση

του καταλύτη και άλλων μεταλλικών μερών. Η λειτουργία της μονάδας υπό αυξημένη τάση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης.

5.4 Λειτουργικοί περιορισμοί υπερπυκνωτή

Οι υπερπυκνωτές μπορούν να υποστούν μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης δευτερολέπτων με σχετικά μικρή αλλαγή στις χαρακτηριστικές τους. Μετά από 500,000-1,000,000 κύκλους παρατηρείται υποβάθμιση της χωρητικότητας και της αντίστασης της τάξης του 10-20%.

Ο υπερπυκνωτής **δεν πρέπει να υπόκειται υπερφόρτιση ή μεγάλη εκφόρτιση**. Το επίπεδο φόρτισης του υπερπυκνωτή πρέπει να περιορίζεται σε ένα επιθυμητό διάστημα τιμών:

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad 5-22$$

όπου SOC_{\min} and SOC_{\max} είναι αντίστοιχα η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή επιπέδου φόρτισης. Το κέντρο του διαστήματος αυτού πρέπει να κυμαίνεται στο 0,7-0,75. Μέγιστη τιμή είναι κοντά στο 100% και ελάχιστη τιμή κοντά στο 50%. Ο υπερπυκνωτής απελευθερώνει το 75% της αποθηκευμένης ενέργειας, όταν εκφορτίζεται από την πλήρη φόρτιση μέχρι το 50%. Κάτω από αυτό το επίπεδο μόνο το 25% της ενέργειας μπορεί να απελευθερωθεί. Επιπλέον, κάτω από αυτό το επίπεδο η τάση λαμβάνει μικρές τιμές [36][66].

5.5 Σύνοψη

Οι περιορισμοί που αναλύθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του διαχειριστικού ελέγχου του συστήματος προκειμένου η λειτουργία του συστήματος να είναι **αποδοτική και οικονομική** τόσο από άποψη κατανάλωσης καυσίμου όσο και από την άποψη της μη επιβάρυνσης της διάρκειας ζωής των συνιστωσών.

6 Μεθοδολογίες Ελέγχου Υβριδικών Συστημάτων

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση διάφορων μεθοδολογιών ελέγχου αυτόνομων υβριδικών συστημάτων που συναντώνται στη βιβλιογραφία και χρησιμοποιούνται ώστε να επιτευχθεί η εύρυθμη λειτουργία των συστημάτων. Τέλος, παρατίθεται η μέθοδος η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την σύγκριση του ελέγχου που υλοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

6.2 Στρατηγικές ελέγχου

Η **βελτιστοποίηση της λειτουργίας** ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Στρατηγική Διαχείρισης της ενέργειας) είναι βαρύνουσα σημασίας στα υβριδικά συστήματα καθώς **καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του συστήματος**. Το υβριδικό σύστημα αποτελείται από πολλές συνιστώσες καθεμία από τις οποίες χαρακτηρίζεται από ποικιλομορφία και διαφορετικά χαρακτηριστικά. Συνεπώς, η **πολυπλοκότητα** που χαρακτηρίζει ένα τέτοιο σύστημα καθιστά δύσκολη την έννοια της βελτιστοποίησης της λειτουργίας του.

Συγκεκριμένα, σε υβριδικά συστήματα με τεχνολογίες υδρογόνου είναι ευρέως αποδεκτό πως η συχνή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε μεταβατικά φαινόμενα αυξάνει τις μηχανικές καταπονήσεις εσωτερικά της κυψέλης και συνεπώς, επιδρά αρνητικά στη διάρκεια ζωής της. Από την άλλη πλευρά η ανάγκη για συνεχή ρύθμιση των παραμέτρων ελέγχου σε σταθερή κατάσταση λειτουργίας αυξάνουν το συνολικό υπολογιστικό κόστος του συστήματος. Για το λόγο αυτό, η διαχείριση της ενέργειας σε υβριδικά συστήματα με τεχνολογίες υδρογόνου αποτελεί θέμα μείζονος σημασίας και μελετάται εκτενώς στη βιβλιογραφία.

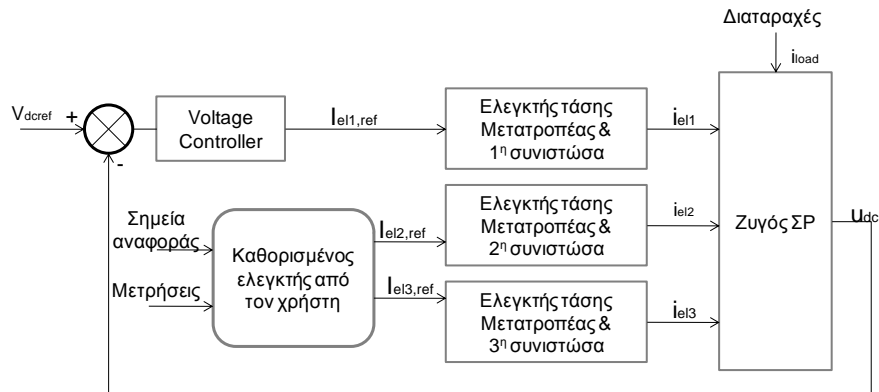
Είναι σύνηθες οι στρατηγικές ελέγχου υβριδικών συστημάτων μικρής εγκατεστημένης ισχύος (όπως το υπό μελέτη σύστημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας) που συναντώνται στη βιβλιογραφία να βασίζονται σε **μετρήσεις πραγματικού χρόνου**. Στις περισσότερες στρατηγικές δειγματοληπτείται η στιγμιαία ισχύς και αποφασίζεται στιγμιαία ποια θα είναι η λειτουργία του συστήματος στο αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα. Αντίθετα, μέθοδοι ελέγχου που βασίζονται σε παρατηρήσεις του παρελθόντος και μελλοντικές προβλέψεις τόσο των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή εγκατάστασης του συστήματος όσο και της ζήτησης φορτίου, εφαρμόζονται κυρίως για συστήματα μεγαλύτερης εγκατεστημένης ισχύος, που έχουν και την ικανότητα διασυνδεδεμένης λειτουργίας με το δίκτυο. Σε πρώτο στάδιο προγραμματίζεται η ημερήσια λειτουργία του υβριδικού σταθμού και σε δεύτερο στάδιο ποιες μονάδες θα λειτουργήσουν για να επιτευχθεί αυτή η λειτουργία [68][69].

Εντοπίζονται δύο κύριες κατηγορίες που σχετίζονται με τον έλεγχο ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας:

➤ Στην **πρώτη** κατηγορία ανήκουν οι στρατηγικές που πραγματοποιούν έλεγχο βασισμένο σε γραμμική αναλογική ολοκληρωτική προσέγγιση (PI), ή πολύπλοκους

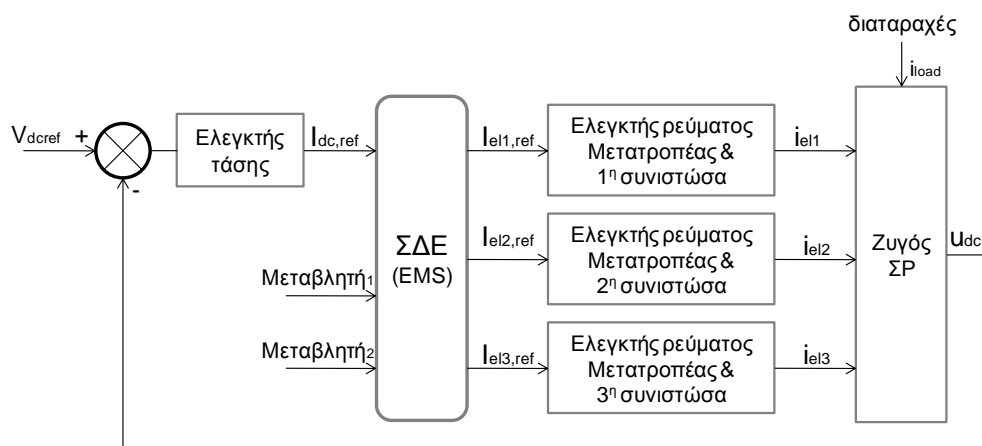
προσαρμοζόμενους ελέγχους (complex adaptive control). Οι έλεγχοι αυτοί πραγματοποιούνται κυρίως στο **επίπεδο των μετατροπέων του συστήματος**.

Σε πολλές εργασίες που συναντώνται στη βιβλιογραφία ο διαχειριστικός έλεγχος του συστήματος υλοποιείται με τον έλεγχο της τάσης του ζυγού συνεχούς ρεύματος [73][90][91]. Συνήθως υπάρχει ένας κεντρικός βρόχος ελέγχου της τάσης του ζυγού ΣΡ και για κάθε μία από τις συνιστώσες που συνδέονται στο ζυγό ΣΡ υλοποιείται ένας απλός ελεγκτής ρεύματος. Σε αυτές τις εργασίες οι ελεγκτές είναι απλοί αναλογικοί - ολοκληρωτικοί ελεγκτές PI. Στο σχ.6.1 παρατίθεται ένα σχηματικό διάγραμμα του ελέγχου αυτού.



Σχήμα 6.1 : Κλασικός βρόχος ελέγχου της τάσης του ζυγού ΣΡ.

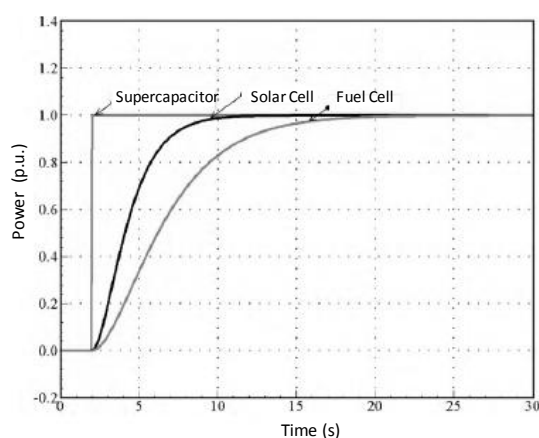
Έχουν γίνει αρκετές μελέτες, βασιζόμενες στη λογική που περιγράφεται παραπάνω, που βελτιώνουν το κεντρικό σύστημα ελέγχου της τάσης του ζυγού ΣΡ, εισάγοντας και άλλες παραμέτρους εκτός των ρευμάτων των επιμέρους συνιστωσών [92][94][95]. Μία ανάδραση τάσης του ζυγού δημιουργεί ένα ρεύμα αναφοράς το οποίο πρέπει να τροφοδοτεί το σύστημα. Στη συνέχεια αυτό το ρεύμα αναφοράς διανέμεται μέσα από ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management System - EMS) που δημιουργεί τα ρεύματα αναφοράς για όλες τις συνιστώσες του συστήματος. Ως είσοδοι στο EMS εισέρχονται και οι υπόλοιπες παράμετροι ελέγχου (συνήθως το επίπεδο φόρτισης της διάταξης βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης). Ο τρόπος διανομής του ρεύματος στις συνιστώσες εξαρτάται από το EMS το οποίο βασίζεται στη δυναμική απόκριση των επιμέρους συνιστωσών, και κυρίως των διατάξεων βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης (σχ.6.2) προκειμένου τα μεταβατικά φαινόμενα να περιορίζονται σε αυτές.



Σχήμα 6.2 : Τροποποιημένος βρόχος ελέγχου της τάσης του ζυγού ΣΡ βασισμένος στο EMS

Συνήθως, όταν εφαρμόζεται η ανωτέρω στρατηγική οι πηγές ενέργειας ταξινομούνται με βάση τη δυναμική απόκρισή τους προκειμένου να εγγυηθούν την σταθερότητα του συστήματος [90][91][73][74] (σχ. 6.3). Για το λόγο αυτό η λειτουργία του υβριδικού συστήματος πραγματοποιείται με βάση την σειρά ένταξης των μονάδων στην παραγωγή ισχύος προκειμένου να ικανοποιείται το ισοζύγιο ισχύος.

Ο υπερπυκνωτής μπορεί να αποκριθεί καλύτερα στις αλλαγές που υφίσταται το φορτίο του συστήματος κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων σε σύγκριση με τις κύριες πηγές παραγωγής ενέργειας. Αντίθετα, η κυψέλη καυσίμου πρέπει να περιορίζει τις μεγάλες διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου της προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο της απουσίας του οξυγόνου (starvation). Συνεπώς, κατά την διάρκεια μεγάλων διακυμάνσεων στο φορτίο ο υπερπυκνωτής παρέχει την ενέργεια που απαιτείται προκειμένου να ικανοποιείται το ισοζύγιο ισχύος αδιάλειπτα.



Σχήμα 6.3 : Δυναμική απόκριση συνιστωσών.

Η ανωτέρω στρατηγική ελέγχου χρησιμοποιείται σε ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα ενέργειας το οποίο αποτελείται από φ/β γεννήτρια, κυψέλες καυσίμου και υπερπυκνωτή ως αποθηκευτική διάταξη [73]. Προτεραιότητα σύνδεσης έχει η φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Εφόσον υπάρχει έλλειμμα ισχύος, τότε τίθεται σε λειτουργία η κυψέλη καυσίμου. Ο υπερπυκνωτής τροφοδοτεί τις απότομες διακυμάνσεις του φορτίου και έχει τον ρόλο του σταθεροποιητή της τάσης. Η υλοποίηση του ελέγχου βασίζεται σε βρόχους ρύθμισης της τάσης και του ρεύματος. Συγκεκριμένα, για λόγους ασφάλειας και καλύτερης δυναμικής απόκρισης οι συνιστώσες ελέγχονται με εσωτερικούς βρόχους ρύθμισης ρεύματος στους μετατροπείς τους. Η δυναμική απόκριση αυτών των βρόχων ρύθμισης ρεύματος είναι ταχύτερη από αυτή των πλέον εξωτερικών βρόχων. Οι βρόχοι αυτοί τροφοδοτούνται με τιμές αναφοράς για το ρεύμα των συνιστωσών. Οι τιμές αναφοράς προκύπτουν με βάση την διαφορική θεωρία επιπεδότητας (Differential Flatness Theory)[73][91]. Τέλος υπάρχει ο εξωτερικός βρόχος ελέγχου της τάσης του ζυγού ΣΡ.

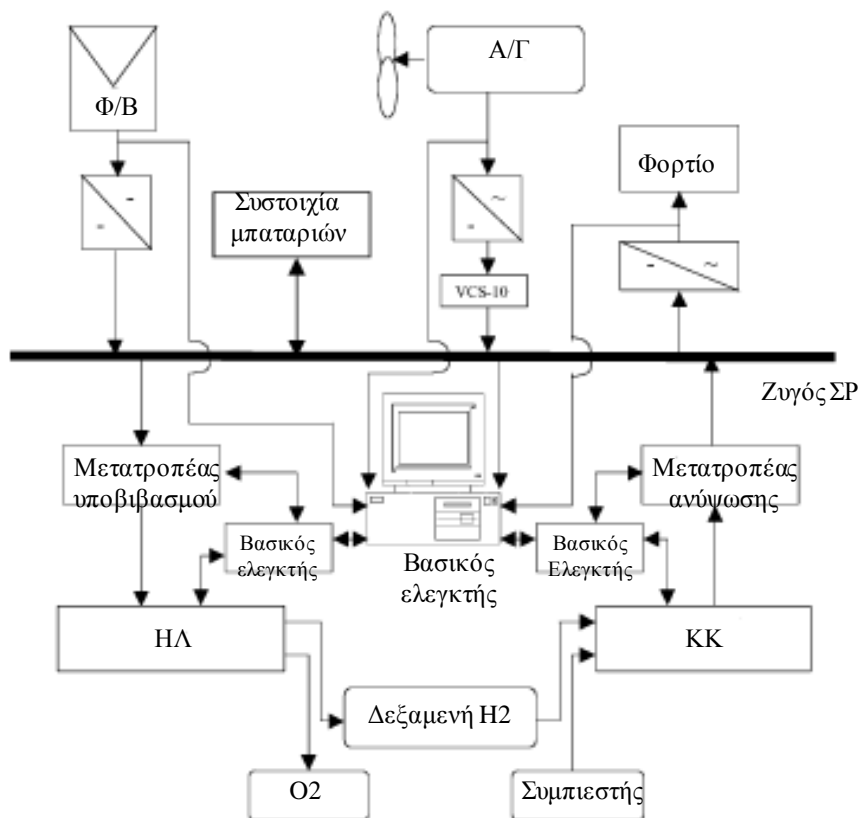
Αντίστοιχη στρατηγική ακολουθείται στο σύστημα ελέγχου του υβριδικού συστήματος που προτείνεται στο άρθρο [90] και αποτελείται από υπερπυκνωτή και μπαταρία ταυτόχρονα. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας επικεντρώνεται στην δυναμική απόκριση των στοιχείων, όπου ο υπερπυκνωτής έχει ταχύτερη απόκριση σε σύγκριση με τις μπαταρίες και ο έλεγχος γίνεται με βάση τα επίπεδα φόρτισης των συνιστωσών.

Ο διαχειριστικός έλεγχος του συστήματος που παρουσιάζεται στην αναφορά [93] ακολουθεί την ίδια λογική χρησιμοποιώντας το θεώρημα της υπέρθεσης (superposition theory) για να δημιουργήσει τις τιμές αναφοράς στο βρόχο ελέγχου της τάσης του συστήματος.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση που ακολουθείται για τον έλεγχο ενός συστήματος βασίζεται μόνο στην ικανότητα της δυναμικής απόκρισης των συνιστωσών του συστήματος. Η μέθοδος που ακολουθείται με τους ελεγκτές είναι από μία πλευρά σχετικά εύκολη να εφαρμοστεί σε ένθετα συστήματα. Ωστόσο δεν είναι κατάλληλη για πολύπλοκα συστήματα με ελέγχους πολλαπλών στόχων (multi-objective control). Επίσης οι τεχνικές που εφαρμόζονται για την εύρεση των τιμών αναφοράς είναι συνήθως πολύπλοκες και απαιτούν τη γνώση ακριβών αριθμητικών μοντέλων για να υλοποιηθούν.

➤ Στην **δεύτερη** κατηγορία ανήκουν οι στρατηγικές που βασίζονται στον **έλεγχο στην ροή ισχύος στο σύστημα (power flow control)**. Σε αυτή την περίπτωση ο έλεγχος που πραγματοποιείται στα αυτόνομα υβριδικά συστήματα ενέργειας βασίζεται κυρίως στην ικανοποίηση του ισοζυγίου ισχύος και στην σταθεροποίηση της τάσης του ζυγού ΣΡ ταυτόχρονα [70][71].

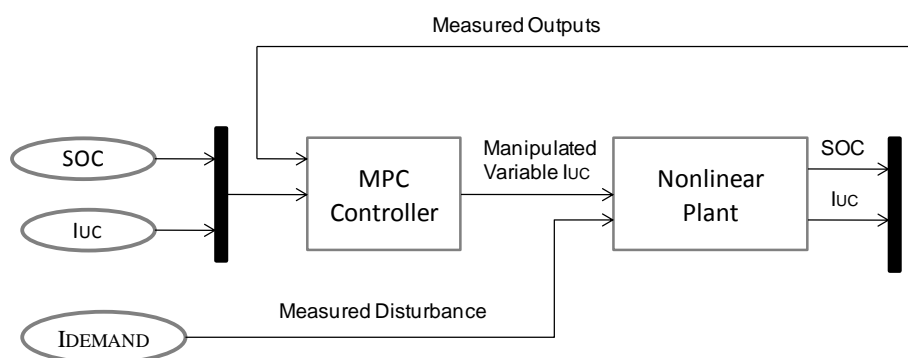
Συνήθως εφαρμόζεται **ιεραρχικός έλεγχος** του συστήματος. Δηλαδή σε πρώτο επίπεδο υπάρχει ένας βασικός ελεγκτής. Η λειτουργία την οποία επιτελεί είναι η διατήρηση του ισοζυγίου ισχύος ή κάποιος πιο περίπλοκος έλεγχος και σε δεύτερο επίπεδο υλοποιείται η λειτουργία κάθε επιμέρους υποσυστήματος - συνιστώσας με τοπικούς ελεγκτές [70][71][72][73][74]. Ένα παράδειγμα ιεραρχικού ελέγχου δίνεται στο σχ. 6.4 [72].



Σχήμα 6.4 : Ιεραρχικός έλεγχος υβριδικού συστήματος

Μία μέθοδος ελέγχου που συναντάται στη βιβλιογραφία είναι ο μοντελοποιημένος προβλεπτικός έλεγχος (Model Predictive Control - MPC), ο οποίος χρησιμοποιεί ένα μοντέλο του συστήματος για να υπολογίσει τη μελλοντική απόκρισή του ως μία συνάρτηση συγκεκριμένων εισόδων αλλά και περιορισμών που διέπουν το μοντέλο.

Στις περισσότερες αναφορές [66][75][89] η μέθοδος μελετάται μόνο για υβριδικά συστήματα κυψελών καυσίμου – υπερπυκνωτών χωρίς να συμπεριλαμβάνονται άλλες πηγές ενέργειας. Ο κυριότερος στόχος που τίθεται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία είναι η ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων του ρεύματος της κυψέλης καυσίμου καθώς χρησιμοποιούνται υπερπυκνωτές για να απορροφήσουν τα μεταβατικά φαινόμενα του φορτίου. Στην αναφορά [75] επιπλέον στόχος είναι η αποφυγή της υπερφόρτισης ή της μεγάλης εκφόρτισης των υπερπυκνωτών (σχ. 6.5). Στην αναφορά [66] η προτεινόμενη προσέγγιση εξετάζει επιπρόσθετα τον έλεγχο του καυσίμου ώστε να προστατεύσει το υβριδικό σύστημα από την έλλειψη οξυγόνου (O_2 starvation).



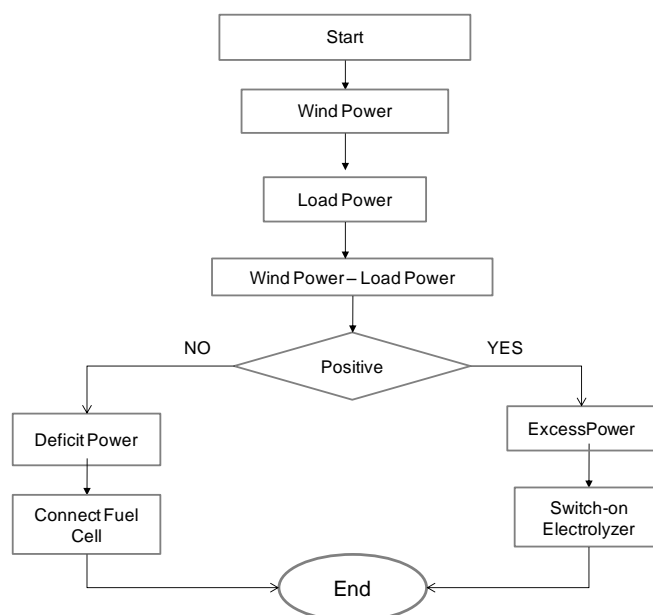
Σχήμα 6.5 : Μπλοκ διάγραμμα ελέγχου MPC

Όλοι οι ανωτέρω περιορισμοί συνθέτουν τη συνάρτηση κόστους σε κάθε περίπτωση. Ο υπολογισμός υλοποιείται με τον έλεγχο των περιορισμών στις εισόδους και την έξοδο σε πραγματικό χρόνο σε ένα καθορισμένο χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης. Η συνάρτηση κόστους σύμφωνα με την οποία δίνεται η βέλτιστη λύση, μπορεί να προσαρμοστεί με την κατάλληλη επιλογή των βαρών της συνάρτησης με τέτοιο τρόπο ώστε να καταστήσει τον ελεγκτή αποδοτικότερο.

Η συγκεκριμένη μέθοδος δίνει το πλεονέκτημα του σχεδιασμού της συνάρτησης κόστους ανάλογα με τα αποτελέσματα που είναι επιθυμητό να επιτευχθούν. Ωστόσο, η μέθοδος είναι πολύπλοκη, οπότε σε περίπτωση διαφορετικών συνθηκών φορτίου απαιτείται προσαρμογή της συνάρτησης κόστους, των βαρών της συνάρτησης ή και του χρονικού ορίζοντα πρόβλεψης τα οποία καθιστούν δύσκολη αυτή τη διαδικασία. Επιπλέον, τα συστήματα στα οποία εφαρμόζεται αυτή η μέθοδος αποτελούνται μόνο από υπερπυκνωτές και κυψέλες καυσίμου και η προσθήκη κάποιας άλλης συνιστώσας στο σύστημα δεν είναι εύκολο να ενσωματωθεί στον αλγόριθμο ελέγχου [66][75].

Στην αναφορά [74] η ροή της ισχύος επιτρέπει την κατάλληλη διασύνδεση Α/Γ, κυψέλης καυσίμου, ηλεκτρολύτη και φορτίου. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος επικεντρώνεται στην παροχή της απαραίτητης ισχύος στο φορτίο από την Α/Γ και/ή την κυψέλη καυσίμου. Οποιαδήποτε περίσσεια ενέργειας παράγεται από την Α/Γ χρησιμοποιείται για τη μετατροπή σε υδρογόνο από τον ηλεκτρολύτη ώστε να

τροφοδοτήσει μετέπειτα την κυψέλη καυσίμου, όταν αυτή είναι απαραίτητο να συνδεθεί. Το διάγραμμα της ροής ισχύος παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα (σχ. 6.6). Επιμέρους ελεγκτές σε κάθε συνιστώσα εφαρμόζουν την «απόφαση» για τη ροή της ισχύος.



Σχήμα 6.6 : Αλγόριθμος ελέγχου ροής ισχύος υβριδικού συστήματος [74]

Στο υβριδικό σύστημα που υλοποιείται στην αναφορά [72] που περιλαμβάνει ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κυψέλη καυσίμου και ηλεκτρολύτη ο κύριος στόχος της στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας είναι η ροή της ισχύος μεταξύ των πηγών, του φορτίου και του ηλεκτρολύτη να μοιράζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να δίνεται προτεραιότητα στην τροφοδότηση του φορτίου και του ηλεκτρολύτη και να αποφεύγονται οι απώλειες ενέργειας στη διάταξη βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης (μπαταρία ή υπερπυκνωτής). Σημαίνοντα ρόλο για την λειτουργία του συστήματος έχει το επίπεδο φόρτισης της διάταξης αποθήκευσης το οποίο εξαρτάται από την ενέργεια των κύριων πηγών, τη ζήτηση φορτίου και την ισχύ εξόδου της κυψέλης καυσίμου. Ο αλγόριθμος ελέγχου έχει σχεδιαστεί ώστε να μη λειτουργούν ταυτόχρονα η κυψέλη καυσίμου και ο ηλεκτρολύτης. Για το λόγο αυτό περιλαμβάνει περιορισμούς που αφορούν στο επίπεδο φόρτισης του ηλεκτρολύτη, στην ισχύ εξόδου της κυψέλης καυσίμου και στη λειτουργία του ηλεκτρολύτη:

$$SOC_{\text{start, electrolyzer}} > SOC_{\text{stop, electrolyzer}}$$

$$SOC_{\text{start, fuel cell}} > SOC_{\text{stop, fuel cell}}$$

$$SOC_{\text{stop, fuel cell}} > SOC_{\text{start, electrolyzer}}$$

Είναι γεγονός πως η προσθήκη συνιστωσών αποθήκευσης βελτιώνει την ποιότητα ισχύος και την απόδοση του υβριδικού συστήματος. Η συγκεκριμένη τεχνική ωστόσο δεν λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς σχετικά με την διάταξη βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης προκειμένου να μην επιδρά η λειτουργία της αρνητικά στη διάρκεια ζωής

υλοποιείται με τις κατάλληλες διατάξεις ισχύος. Στα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης στρατηγικής συγκαταλέγεται το γεγονός πως δεν εξετάζεται η αποδοτική και οικονομική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου καθώς επίσης και η δυνατότητα εκφόρτισης των υπερπυκνωτών χωρίς να περιορίζεται από μία ελάχιστη τιμή του επιπέδου φόρτισης, γεγονός που μπορεί να συμβάλλει στη ταχύτερη μείωση της διάρκειας ζωής των συνιστωσών.

Η ανωτέρω στρατηγική ελέγχου του συστήματος επιλέχθηκε να εφαρμοστεί στο σύστημα που υλοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία προκειμένου να πραγματοποιηθεί σύγκριση με την προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου που αναπτύσσεται στο κεφάλαιο 7. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 8.

6.3 Συμπεράσματα

Εκτός όσων αναφέρθηκαν παραπάνω, οι ανωτέρω μέθοδοι που συναντώνται στη βιβλιογραφία **δεν εξετάζουν το κόστος λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου**, το οποίο είναι επιθυμητό να μην ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο όριο κατά τη ημερήσια λειτουργία του υβριδικού συστήματος.

Ένα άλλο μειονέκτημα των ανωτέρω μεθόδων είναι **πως δεν παρέχουν τη δυνατότητα εύκολης προσαρμογής των περιορισμών που διέπουν το εκάστοτε σύστημα ελέγχου**. Για το λόγο αυτό στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται μία μέθοδος ελέγχου που βασίζεται στην ασαφή λογική. Η ασαφής λογική παρέχει έναν αξιοσημείωτα απλό τρόπο για τη σχεδίαση πολύπλοκων προβλημάτων. Αντίθετα, με την κλασική λογική που απαιτεί βαθιά γνώση του συστήματος, ακριβείς εξισώσεις και αριθμητικές τιμές, η ασαφής λογική εισάγει έναν εναλλακτικό τρόπο σκέψης ο οποίος επιτρέπει στον χρήστη να χρησιμοποιήσει την γνώση του για να περιγράψει την συμπεριφορά του συστήματος. Μια ασαφής «περιγραφή» μπορεί να μοντελοποιήσει αποτελεσματικά την αβεβαιότητα και τη μη γραμμικότητα ενός συστήματος. Αυτό είναι σημαντικό, δεδομένου είναι υπερβολικά δύσκολη, αν όχι αδύνατη, η δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου που μπορεί να περιγράψει την αβεβαιότητα, τη μη γραμμικότητα και τη μεταβλητότητα κάθε στιγμή. Η ασαφής λογική αποφεύγει όλα αυτά τα σύνθετα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στις συμβατικές μεθόδους. Επιπροσθέτως, η σχεδίαση του ελέγχου με βάση την ασαφή λογική δεν απαιτεί την ύπαρξη δεδομένων παρελθόντος γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα σε σύγκριση με άλλους τύπους «έξυπνων» ελεγκτών όπως τα νευρωνικά δίκτυα.

7 Προτεινόμενη στρατηγική διαχειριστικού ελέγχου υβριδικού συστήματος βασιζόμενη σε ασαφή λογική

7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία παρουσίαση του υβριδικού συστήματος και αναλύονται οι τεχνικές ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρυθμη λειτουργία του σε κάθε επίπεδο του συστήματος. Κύριοι στόχοι του διαχειριστικού ελέγχου είναι η ικανοποίηση των διασυνδεδεμένων φορτίων ταυτόχρονα με την ποιότητα της παραγόμενης ισχύος και την υψηλή απόδοση των υποσυστημάτων. Για την επίτευξη της ενεργειακής και οικονομικής απόδοσης των υποσυστημάτων απαιτείται να ληφθούν υπόψη οι λειτουργικοί περιορισμοί των διατάξεων που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 5. Προκειμένου να ικανοποιηθούν όλα τα παραπάνω ο διαχειριστικός έλεγχος που υλοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία διαπραγματεύεται τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος από ΑΠΕ ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες (μέθοδος MPPT), την επιμέρους διαχείριση των διαφόρων ενεργειακών πηγών και την ενσωμάτωση τους σε ένα ενιαίο αυτόνομο υβριδικό σύστημα ενέργειας.

7.2 Διάταξη και περιγραφή του συστήματος

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η διάταξη του προτεινόμενου αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία παρουσιάζεται σχηματικά στο σχ. 7.1. Η διακίνηση της ισχύος γίνεται μέσω του κοινού ζυγού ΣΡ του οποίου η τάση κυμαίνεται στα 550 V.

Αναλυτικότερα, τα χαρακτηριστικά και η σύνδεση των συνιστωσών του συστήματος στο ζυγό έχει ως εξής:

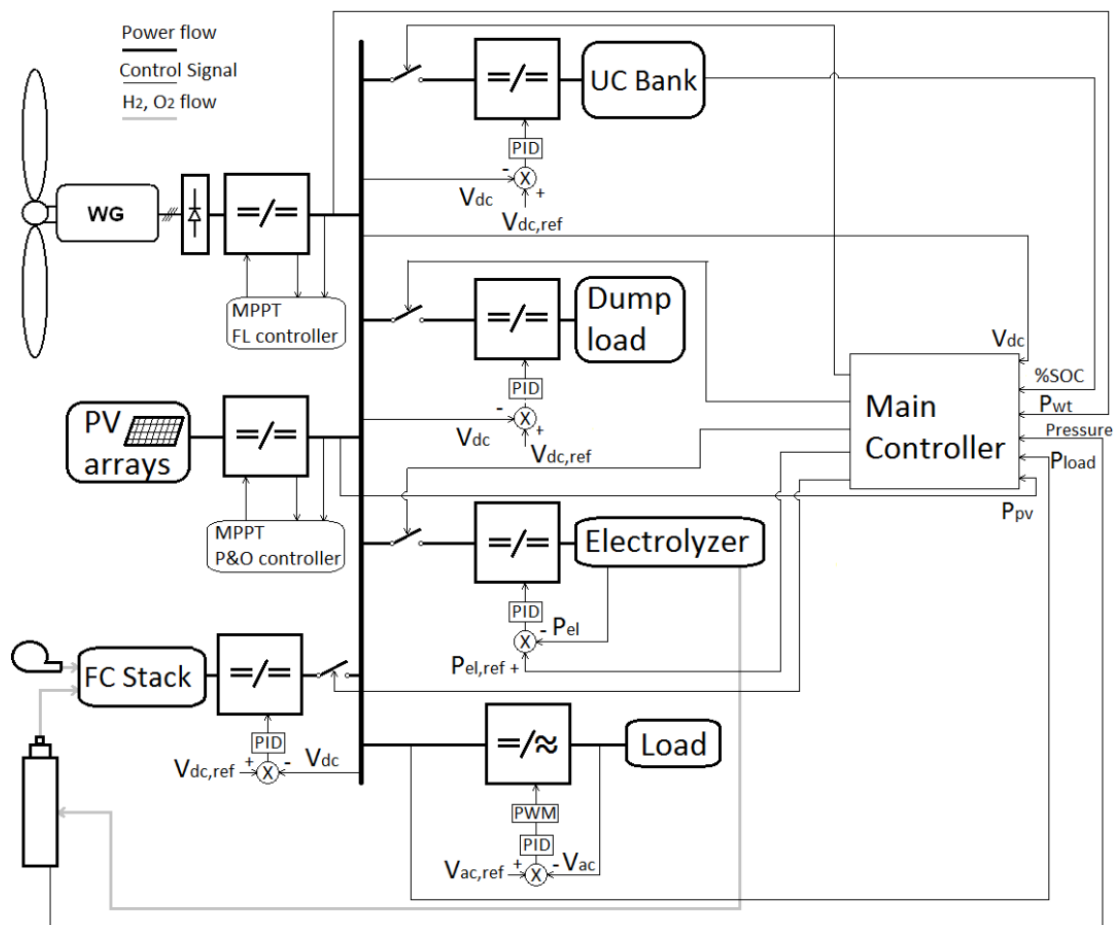
➤ Η ανεμογεννήτρια μόνιμων μαγνητών έχει ονομαστική ισχύ 20 kW και ονομαστική τάση εξόδου 400 V_{p-p}. Η τάση εξόδου της ανεμογεννήτριας ανορθώνεται μέσω μη ελεγχόμενης τριφασικής γέφυρας. Στη συνέχεια συνδέεται στο ζυγό μέσω ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης ΣΡ προκειμένου η τάση να ανυψωθεί στα 550 V. Η διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα πραγματοποιείται με έναν ελεγκτή ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος, η λειτουργία του οποίου βασίζεται στην ασαφή λογική (Fuzzy Logic – FL) που αναπτύσσεται αναλυτικά στην ενότητα 7.3.

➤ Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια αποτελείται από 10 φ/β συστοιχίες κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από 6 εν σειρά φ/β πλαίσια. Η ισχύς της φ/β γεννήτριας είναι 5 kW . Η διασύνδεσή της στο ζυγό πραγματοποιείται μέσω ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης ΣΡ ο οποίος ελέγχεται με τη μέθοδο ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος για τις διάφορες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο αλγόριθμος λειτουργίας του ελεγκτή βασίζεται στη μέθοδο συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων (Perturbation and Observation –P&O).

➤ Η μέση ισχύς της κυψέλης καυσίμου κυμαίνεται στα 5 kW. Το υδρογόνο που απαιτείται για τη λειτουργία της παρέχεται από την δεξαμενή αποθήκευσης. Η σύνδεσή της στο ζυγό πραγματοποιείται μέσω ενός μετατροπέα ανύψωσης ΣΡ που λειτουργεί με λογική σταθεροποίησης τάσης. Η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, δηλαδή η σύνδεση και η αποσύνδεσή της στο ζυγό καθώς το επίπεδο της ισχύος εξόδου της ελέγχονται από τον βασικό ελεγκτή που βασίζεται στην ασαφή λογική (Fuzzy Logic –FL). Ο αλγόριθμος ελέγχου

του συστήματος στοχεύει στην αποδοτικότερη και οικονομικότερη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου.

➤ Ο ηλεκτρολύτης έχει μέγιστη ισχύ λειτουργίας 5 kW. Συνδέεται στο ζυγό μέσω ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης ΣΡ ο οποίος τον τροφοδοτεί με διάφορα επίπεδα σταθερής ισχύος ανάλογα με την περίσσεια ισχύος στο σύστημα. Η μετάβαση από το ένα επίπεδο στο άλλο γίνεται με περιοριστές κλίσης. Το υδρογόνο που παράγεται από τον ηλεκτρολύτη οδηγείται στη δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου δημιουργώντας κλειστό βρόχο λειτουργίας με την κυψέλη καυσίμου. Η πίεση της δεξαμενής ελέγχεται από κατάλληλο ελεγκτή αποσυνδέοντας τη δεξαμενή σε περίπτωση που ξεπερνάει τις επιτρεπτές τιμές λειτουργίας.



Σχήμα 7.1 : Σχηματικό διάγραμμα υβριδικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

➤ Η συστοιχία των υπερπυκνωτών αποτελείται από 4 παράλληλα συνδεδεμένους υπερπυκνωτές. Η διασύνδεση της συστοιχίας στο ζυγό ΣΡ υλοποιείται μέσω ενός αμφίδρομου μετατροπέα ΣΡ εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο την αμφίδρομη ροή της ισχύος ώστε να είναι εφικτή η φόρτιση και η εκφόρτισή τους.

➤ Το ελεγχόμενο φορτίο χρησιμοποιείται για να απορροφήσει τυχόν περίσσεια ισχύος του συστήματος, όταν αυτή δε μπορεί να καταναλωθεί από τις υπόλοιπες συνιστώσες του συστήματος. Το φορτίο είναι ωμικού τύπου και ο έλεγχός του βασίζεται στη λογική σταθεροποίησης τάσης του ζυγού. Για τη σύνδεσή του στο ζυγό ΣΡ

χρησιμοποιείται ένας τριφασικός αντιστροφέας του οποίου ο έλεγχος βασίζεται στην σταθεροποίηση της τάσης του φορτίου.

Ο τρόπος λειτουργίας του βασικού ελεγκτή περιγράφεται σε επόμενη ενότητα. Οι τοπικοί ελεγκτές του συστήματος εκτός από τους ελεγκτές της Α/Γ και του Φ/Β είναι ελεγκτές PI και ο έλεγχος των διακοπών γίνεται με την τεχνική PWM.

7.3 Θεωρητική ανάλυση και βασικές έννοιες ασαφούς λογικής

Στην ασαφή λογική η αναπαράσταση των παραμέτρων που συνθέτουν ένα σύστημα πραγματοποιείται μέσα από «λεκτικές» μεταβλητές. Η ασάφεια σαν έννοια σχετίζεται με την **ποσοτικοποίηση της ποιοτικής πληροφορίας**. Συγκεκριμένα η ασαφής λογική παρέχει μεθοδολογία αντιστοίχισης της ποιοτικής πληροφορίας σε αριθμητική τιμή. Η ασαφής λογική προσεγγίζει τα διάφορα προβλήματα με βάση την ανθρώπινη λογική, δηλαδή όπως ο ανθρώπινος εγκέφαλος χρησιμοποιεί την συλλογιστική χωρίς «απόλυτες» τιμές και καταλήγει στην καλύτερη υποκειμενική λήψη απόφασης. Ο ασαφής ελεγκτής ουσιαστικά **αφομοιώνει την ανθρώπινη συμπεριφορά και αντίδραση**.

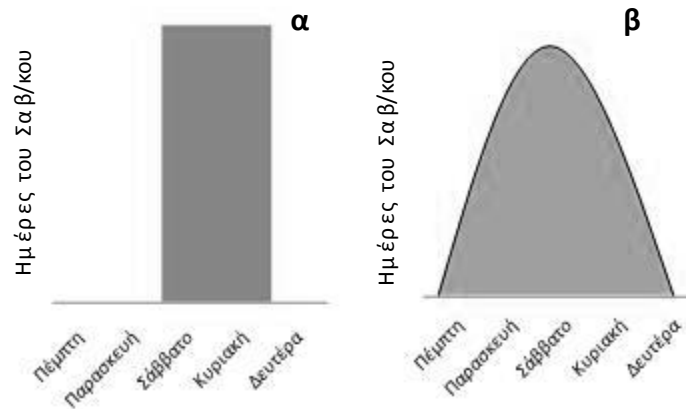
7.3.1 Ασαφές σύνολο και συνάρτηση συμμετοχής

Ένας βασικός όρος της ασαφούς λογικής είναι το ασαφές σύνολο (fuzzy set). Ένα ασαφές σύνολο είναι ένα σύνολο του οποίου τα όρια δεν είναι απόλυτα καθορισμένα και το οποίο περιέχει στοιχεία με διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής. Προκειμένου να γίνει πιο εύκολα αντιληπτό το ασαφές σύνολο, θα δοθεί ένα παράδειγμα στο οποίο θα συγκρίνεται το ασαφές σύνολο με την έννοια του κλασσικού συνόλου (crisp set) το οποίο περιλαμβάνει ή όχι ένα συγκεκριμένο στοιχείο.

Ας θεωρήσουμε το σύνολο «ημέρες του σαββατοκύριακου». Όλοι θα συμφωνήσουν ότι το Σάββατο και η Κυριακή ανήκουν στο σύνολο αυτό. Όσον αφορά στην Παρασκευή οι περισσότεροι τη θεωρούν μέρος του σαββατοκύριακου, σύμφωνα με τη λογική όμως δε θα έπρεπε να τοποθετείται σε αυτό το σύνολο. Θα μπορούσε να τοποθετηθεί η Παρασκευή στο όριο ανάμεσα στα σύνολα «ημέρες του σαββατοκύριακου» και «όχι ημέρες του σαββατοκύριακου», θεωρώντας την στοιχείο και των δύο συνόλων. Η λογική των κλασσικών συνόλων δε θα επέτρεπε μια τέτοια κατάσταση. Η ανθρώπινη εμπειρία όμως υποστηρίζει ότι το να κατατάσσεται μια έννοια στο όριο μεταξύ δύο συνόλων αποτελεί μια καθημερινή πραγματικότητα. Η ασαφής λογική είναι ουσιαστικά μια γενίκευση της δίτιμης (Boolean) λογικής. Αν αντιστοιχισθεί στο «αληθές» η αριθμητική τιμή '1' και στο «ψευδές» η τιμή '0', μπορεί να ειπωθεί πως η ασαφής λογική επιτρέπει και ενδιάμεσες τιμές όπως το '0.2' και το '0.8'. Για παράδειγμα:

- Ανήκει το Σάββατο στο σαββατοκύριακο;
- 1 (ναι ή «αληθές»).
- Ανήκει η Τρίτη στο σαββατοκύριακο;
- 0 (όχι ή «ψευδές»).
- Ανήκει η Παρασκευή στο σαββατοκύριακο;
- 0.8 (κατά το μεγαλύτερο μέρος ναι, αλλά όχι εντελώς).
- Ανήκει η Κυριακή στο σαββατοκύριακο;
- 0.95 (ναι, αλλά όχι όσο και το Σάββατο).

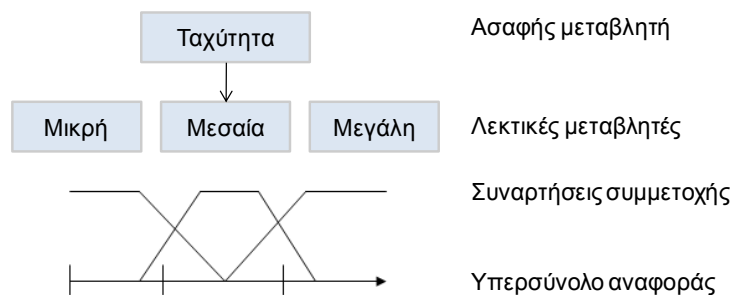
Στο σχ. 7.2 φαίνεται το διάγραμμα της συμμετοχής κάποιων ημερών της εβδομάδας στο σύνολο «ημέρες του σαββατοκύριακου» με τον κλασσικό ορισμό (α) και με τον ασαφή ορισμό (β) του συνόλου. Η καμπύλη στο διάγραμμα στα δεξιά παρουσιάζει πιο ομαλές μεταβολές και εκφράζει το γεγονός ότι η Παρασκευή και κατά ένα μικρό βαθμό και η Δευτέρα συμμετέχουν στην έννοια σαββατοκύριακο και αξίζουν ένα βαθμό συμμετοχής στο σύνολο «Ημέρες του Σαββατοκύριακου». Κατά συνέπεια είναι δυνατόν να ορισθεί ο βαθμός σύμφωνα με τον οποίο κάθε δεδομένη στιγμή ανήκει στο σαββατοκύριακο.



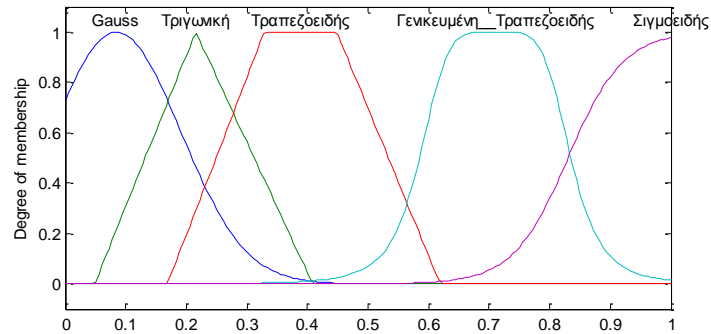
Σχήμα 7.2: Διάγραμμα συμμετοχής στο σύνολο «Ημέρες του Σαββατοκύριακου»: α) κλασσικός ορισμός, β) ασαφής ορισμός

Η καμπύλη αυτή είναι γνωστή ως συνάρτηση συμμετοχής (membership function). Μια συνάρτηση συμμετοχής, η οποία συνήθως συμβολίζεται με το γράμμα μ , είναι μια καμπύλη η οποία ορίζει σε ποιο βαθμό κάθε στοιχείο του ασαφούς συνόλου αντιστοιχίζεται σε ένα βαθμό συμμετοχής στο σύνολο ανάμεσα στο '0' και το '1'. Το σύνολο στο οποίο παίρνει τιμές η κάθε είσοδος αναφέρεται ως το υπερσύνολο αναφοράς της (universe of discourse). Το διάστημα για το οποίο η συνάρτηση συμμετοχής παίρνει θετικές τιμές ονομάζεται σύνολο στήριξης (support set) [78].

Στη συνέχεια, ακολουθεί ένα ακόμα παράδειγμα κλασσικών και ασαφών συνόλων, ώστε να εξηγηθούν καλύτερα οι βασικές έννοιες της ασαφούς λογικής. Έστω η ασαφής μεταβλητή «ταχύτητα». Αυτή μπορεί να περιγραφεί από τις λεκτικές μεταβλητές (linguistic variables) «μικρή», «μεσαία» και «μεγάλη» (σχ. 7.3). Σε κάθε μια από τις λεκτικές μεταβλητές αντιστοιχεί ένα ασαφές σύνολο που περιγράφεται από τη συνάρτηση συμμετοχής του.



Σχήμα 7.3 : Όροι της ασαφούς λογικής.



Σχήμα 7.4 : Μορφές συναρτήσεων συμμετοχής

Οι τιμές των συναρτήσεων συμμετοχής ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$. Η μορφή των συναρτήσεων συμμετοχής ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή. Οι συνηθέστερες μορφές συναρτήσεων συμμετοχής είναι η τριγωνική, η τραπεζοειδής, η σιγμοειδής και η γκαουσιανή (σχ. 7.4).

7.3.2 Πράξεις ασαφούς λογικής

Οι βασικές πράξεις της δυαδικής λογικής ισχύουν και στη θεωρία της ασαφούς λογικής και παρατίθενται παρακάτω:

- Ένωση: Η ένωση δύο ασαφών συνόλων A και B είναι ένα ασαφές σύνολο C το οποίο συμβολίζεται με $C=A \cup B$. Σχετίζεται με τη λογική πράξη OR. Η συνάρτηση συμμετοχής του C προκύπτει από τις συναρτήσεις συμμετοχής των A και B όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\mu_{A \cup B} = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad 7-1$$

- Τομή: Η τομή δύο ασαφών συνόλων A και B είναι ένα ασαφές σύνολο C το οποίο συμβολίζεται με $C=A \cap B$. Σχετίζεται με τη λογική πράξη AND. Η συνάρτηση συμμετοχής του C προκύπτει:

$$\mu_{A \cap B} = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad 7-2$$

- Συμπλήρωμα: Το συμπληρωματικό ενός ασαφούς συνόλου A είναι ένα ασαφές σύνολο A το οποίο συμβολίζεται με \bar{A} . Σχετίζεται με τη λογική πράξη NOT. Η συνάρτηση συμμετοχής προκύπτει:

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x) \quad 7-3$$

7.3.3 Ασαφείς κανόνες (fuzzy rules)

Οι πράξεις σε έναν ασαφή ελεγκτή είναι βασισμένες σε μία προγραμματιζόμενη σχηματική απεικόνιση η οποία **μιμείται τον ανθρώπινο τρόπο άντλησης πληροφοριών**. Σε αντίθεση με τη χρήση πολύπλοκων μαθηματικών σχέσεων στον ασαφή έλεγχο ως νόμοι χρησιμοποιούνται οι κανόνες IF-THEN. Ένας ασαφής κανόνας αποτελείται από δύο μέρη: την υπόθεση (if-πρόταση) και το συμπέρασμα (then-πρόταση). Η ασαφής υπόθεση μπορεί να είναι συνδυασμός πολλών απλών υποθέσεων με τη χρήση πολλών λογικών τελεστών όπως οι εξής: AND (τομή), OR (ένωση), NOT (άρνηση).

Η γενική μορφή ενός ασαφή κανόνα είναι η εξής:

If x is A and y is B then z is C

όπου x, y είναι οι ασαφείς είσοδοι του συστήματος, z η ασαφής έξοδος του συστήματος και A, B , και C είναι λεκτικές τιμές (ασαφή σύνολα).

Ο καθορισμός πολλών ασαφών κανόνων φαίνεται παρακάτω:

R_1 : If x is A_1 and y is B_1 then z is C_1

R_2 : If x is A_2 and y is B_2 then z is C_2

:

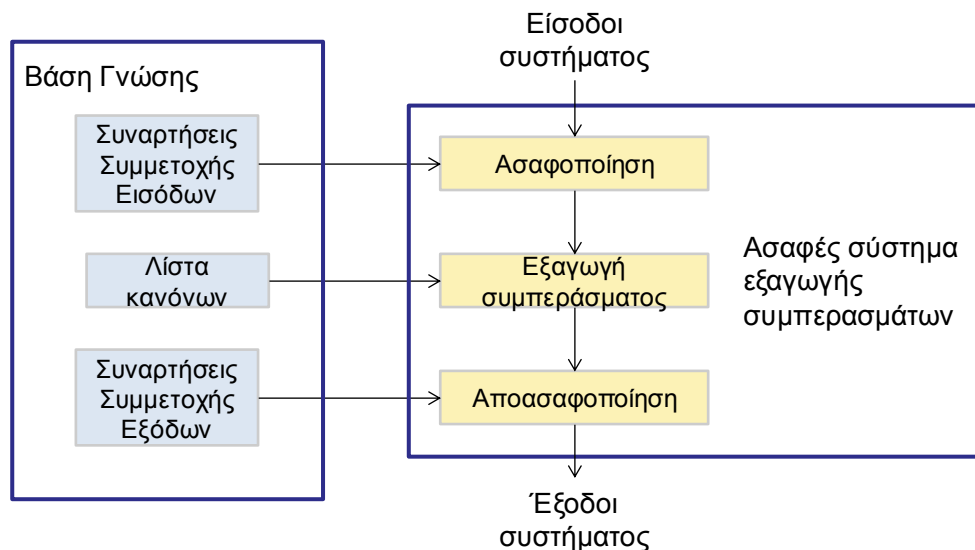
:

R_n : If x is A_n and y is B_n then z is C_n

Επειδή κάθε κανόνας χρησιμοποιεί διαφορετικές παραμέτρους για τη διαδικασία υπολογισμού, από κάθε κανόνα προκύπτει διαφορετική έξοδος.

7.3.4 Βασική δομή της ασαφούς λογικής

Μια διαδικασία ενός αλγορίθμου ελέγχου ο οποίος χρησιμοποιεί ασαφή λογική ονομάζεται Ασαφής Έλεγχος. Ο ασαφής ελεγκτής μπορεί να χωριστεί σε τρεις μονάδες όπως φαίνεται στο σχ. 7.5.



Σχήμα 7.5: Δομή του ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων

I. Ασαφοποιητής: Στο στάδιο της ασαφοποίησης (fuzzification), ο ασαφοποιητής μετατρέπει τις φυσικές μεταβλητές της διαδικασίας σε ασαφείς. Οι είσοδοι του συστήματος ασαφοποιούνται στην περιοχή ορισμού τους από προκαθορισμένα ασαφή σύνολα με λεκτικές μεταβλητές. Η συνάρτηση συμμετοχής και ο βαθμός συμμετοχής εξαρτώνται από την ακρίβεια που έχει οριστεί κατά τη σχεδίαση του συστήματος.

II. Εξαγωγή συμπερασμάτων: Η μονάδα λήψης αποφάσεων διεκπεραιώνει τις λειτουργίες εξαγωγής συμπερασμάτων στους ασαφείς κανόνες. Πραγματοποιεί μια εξονυχιστική ανίχνευση όλων των κανόνων στη βάση γνώσης, με σκοπό να υπολογίσει το βαθμό συμμετοχής (rule evaluation). Οι κανόνες με μικρό βαθμό συμμετοχής συμβάλλουν ελάχιστα στην τελική απόφαση ενώ οι κανόνες με μεγάλο βαθμό συμμετοχής είναι κυρίαρχοι. Τα τελικά ασαφή σύνολα εξόδου εξαρτώνται από τον τύπο της συνεπαγωγής που θα επιλεγεί.

Οι δημοφιλέστερες συνεπαγωγές είναι οι συνεπαγωγές του Mamdani και του Larsen και υπάρχουν επίσης και η συνεπαγωγή Sugeno η οποία παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες

με τη συνεπαγωγή Mamdani αλλά η κύρια διαφορά τους σχετίζεται με τις συναρτήσεις συμμετοχής της εξόδου.

- Συνεπαγωγή του Mamdani : χρησιμοποιεί το καρτεσιανό γινόμενο τομής.

$$\mu_R(x, y) = \mu_{A \cap B} = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad 7-4$$

- Συνεπαγωγή του Larsen: χρησιμοποιεί το καρτεσιανό αλγεβρικό γινόμενο

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y) \quad 7-5$$

• Συνεπαγωγή Sugeno: Ένας τυπικός κανόνας ασαφούς συστήματος Sugeno μηδενικής τάξεως έχει τη μορφή: Αν το x είναι A και το y είναι B, τότε το z = p*x + q*y + r όπου A και B ασαφή σύνολα και p, q και r σταθερές. Στο μοντέλο Sugeno οι συναρτήσεις μεταφοράς της εξόδου είναι γραμμικές ή σταθερές.

III. Αποασαφοποιητής: Το τελευταίο βήμα του αλγορίθμου ενός ασαφή ελεγκτή είναι η από-ασαφοποίηση (defuzzification) της ασαφούς εισόδου σε σαφή τιμή. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές από-ασαφοποίησης. Πρέπει να σημειωθεί πως στη βιβλιογραφία που αναφέρεται στην ασαφή λογική, τα ονόματα των μεθόδων ασαφοποίησης διαφέρουν από συγγραφέα σε συγγραφέα και για το λόγο αυτό στις μεθόδους από-ασαφοποίησης που αναφέρονται παρακάτω, θα πρέπει να δοθεί σημασία στον ορισμό της μεθόδου και όχι στο όνομα της. Οι συνηθέστερες μέθοδοι από-ασαφοποίησης είναι οι ακόλουθες:

- Απο-ασαφοποίηση μεγίστου (maximum defuzzifier) : Στην τεχνική αυτή εξετάζεται η σύνθετη συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου του ελεγκτή και επιλέγεται ως έξοδος η τιμή της μεταβλητής y όπου $\mu_Y(y)$ είναι μέγιστο, δηλαδή :

$$y_{max} = \max \mu_Y(y) \quad 7-6$$

Η μέθοδος δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ειδικά όταν υπάρχουν πολλαπλά μέγιστα.

- Απο-ασαφοποίηση με μέσο όρο των μεγίστων (Mean of Maxima defuzzifier)-MOM : Στην τεχνική αυτή εξετάζεται η συνάρτηση συμμετοχής $\mu_Y(y)$ για να βρεθούν οι τιμές (εφόσον υπάρχουν) του y όπου $\mu_Y(y)$ είναι μέγιστη. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών της εξόδου που αντιστοιχούν στη συνθήκη αυτή, δηλαδή:

$$y_{MOM} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \max \mu_Y(y) \quad 7-7$$

Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο ένα μέγιστο, η τεχνική αυτή συμπίπτει με την προηγούμενη.

- Απο-ασαφοποίηση κέντρου βάρους (Centre of Gravity – COG) : Στην τεχνική αυτή υπολογίζεται το κέντρο βάρους όλων των συναρτήσεων συμμετοχής των I κανόνων που έχουν ενεργοποιηθεί, σταθμισμένων με τον βαθμό εκπλήρωσης σ_i κάθε κανόνα. Το τελικό αποτέλεσμα στην περίπτωση που οι συναρτήσεις είναι συμμετρικές είναι:

$$y_{COG} = \frac{\sum_{i=1}^I \sigma_i \mu_i(y)}{\sum_{i=1}^I \mu_i(y)} \quad 7-8$$

Όλες οι παραπάνω τεχνικές έχουν στόχο την εύρεση σαφούς τιμής της εξόδου του ελεγκτή (δηλαδή της μεταβλητή ελέγχου) από τη σύνθετη συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου.

7.3.5 Πλεονεκτήματα ασαφούς λογικής

Οι συμβατικές μέθοδοι ελέγχου συστημάτων βασίζονται σε μαθηματικά μοντέλα στα οποία το σύστημα ελέγχου περιγράφεται χρησιμοποιώντας μία ή περισσότερες διαφορικές εξισώσεις οι οποίες καθορίζουν την απόκριση του συστήματος σε σχέση με τις εισόδους του. Τέτοια συστήματα συχνά υλοποιούνται με PID ελεγκτές οι οποίοι συνήθως είναι αρκετά αποτελεσματικοί. Ωστόσο, παρόλη την ανάπτυξή τους, ο ελεγκτής ασαφούς λογικής παρέχει το πλεονέκτημα πως μπορεί να εφαρμοστεί όταν το **μαθηματικό μοντέλο της διαδικασίας ελέγχου είναι πολύπλοκο, άγνωστο, δύσκολο να προκύψει ή είναι πολύ "ακριβό"** σε όρους υπολογιστικής ισχύος και μνήμης. Επιπρόσθετα, ένα σύστημα που βασίζεται σε εμπειρικούς κανόνες, όπως η ασαφής λογική, είναι συνήθως αποτελεσματικότερο.

Αντίστοιχα έχουν αναπτυχθεί σύγχρονες μέθοδοι ελέγχου, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι και τα νευρωνικά δίκτυα. Αν και αυτές οι μέθοδοι μπορούν να λειτουργούν σε πολλές περιπτώσεις με τον ίδιο τρόπο όπως η ασαφής λογική, το πλεονέκτημα της ασαφούς λογικής μπορεί να εντοπιστεί στο γεγονός πως οι χρήστες που διαχειρίζονται το σύστημα είναι σε θέση να χρησιμοποιήσουν την αντίληψη και την εμπειρία τους προκειμένου να σχεδιάσουν τον ελεγκτή. Αυτό καθιστά **ευκολότερη την αυτοματοποίηση διαδικασιών** που ήδη διεκπεραιώνονται επιτυχώς από ανθρώπους. Επιπλέον, η ασαφής λογική δεν απαιτεί δεδομένα του παρελθόντος για τα συστήματα που μελετώνται σε αντίθεση με τα νευρωνικά δίκτυα.

7.4 Διαχειριστικός έλεγχος του συστήματος

Σε αυτή την ενότητα αναλύεται ο αλγόριθμος του διαχειριστικού ελέγχου του συστήματος και η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τον σχεδιασμό του ελεγκτή σύμφωνα με την ασαφή λογική.

7.4.1 Σκοπός διαχειριστικού ελέγχου

Κύριος σκοπός του διαχειριστικού ελέγχου του συστήματος είναι η αδιάλειπτη παροχή ισχύος στο φορτίο σε αυτόνομη λειτουργία. Η απόδοση του αλγορίθμου ελέγχου θα αξιολογηθεί μελετώντας την απόκριση του συστήματος σε 24ωρη χρονική κλίμακα.

Προκειμένου να επιτευχθεί η εύρυθμη λειτουργία του συστήματος οι **κύριοι στόχοι** των ελεγκτών του συστήματος προσδιορίζονται ως 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 σύμφωνα με τους λειτουργικούς περιορισμούς που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 5 προκειμένου να επιτυγχάνεται η **ασφαλής λειτουργία** τους.

3) Η **συνολική αποθηκευμένη ενέργεια** (υδρογόνο, υπερπυκνωτές) που καταναλώνεται θα πρέπει να **αποκαθίσταται** μετά από ένα κύκλο λειτουργίας, εάν αυτό είναι δυνατό.

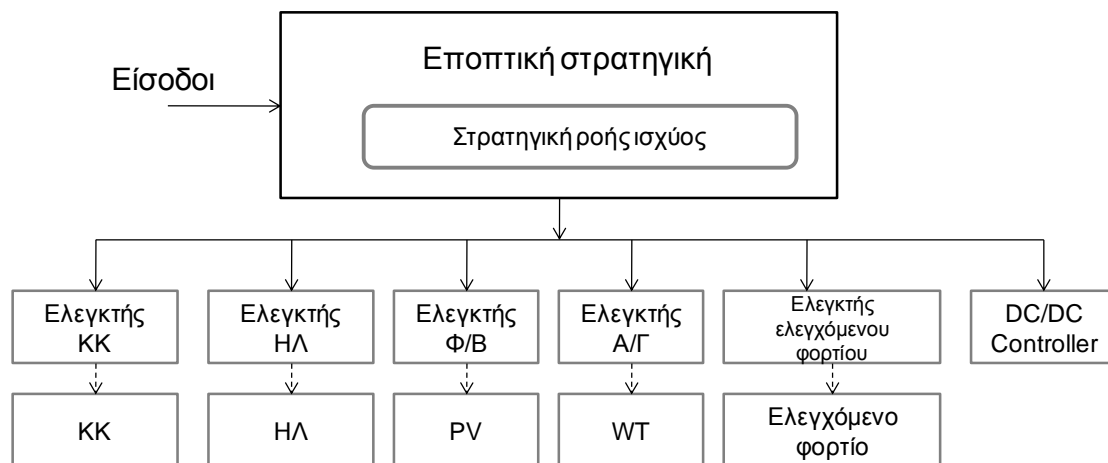
4) Η **υψηλή ποιότητα** της παραγόμενης ισχύος είναι απαραίτητη ελλείψει άλλου συστήματος σταθεροποίησης τάσης από το δίκτυο (αυτόνομη λειτουργία).

5) Η **εξοικονόμηση του κόστους** παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη προκειμένου να είναι βιώσιμη τόσο η επένδυση όσο και η λειτουργία του συστήματος.

6) Η **υψηλή απόδοση της κυψέλης καυσίμου** είναι προϋπόθεση για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος.

Συνεπώς, συνοπτικά ο γενικός στόχος της στρατηγικής διαχείρισης της ενέργειας που προτείνεται είναι η βελτιστοποίηση της ροής ισχύος μεταξύ των διαφόρων πηγών ενέργειας σε πραγματικό χρόνο ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και τους περιορισμούς του συστήματος (οικονομικούς, τεχνικούς και λειτουργικούς).

Η προτεινόμενη στρατηγική διαχειριστικού ελέγχου του αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στον **ιεραρχικό έλεγχο**. Σε πρώτο επίπεδο υλοποιείται με έναν **βασικό ελεγκτή που βασίζεται στην ασαφή λογική**, ο οποίος λαμβάνει υπόψη μεγάλο πλήθος από πιθανές καταστάσεις λειτουργίας και διαχειρίζεται τη ροή της ισχύος στο ζυγό ΣΡ [83][84]. Σε δεύτερο επίπεδο υλοποιείται η λειτουργία που αποφασίστηκε από τον βασικό ελεγκτή από **τοπικούς ελεγκτές** οι οποίοι διαχειρίζονται το κάθε υποσύστημα ξεχωριστά υπακούοντας σε συγκεκριμένους κανόνες και περιορισμούς. Σχηματικά ο προτεινόμενος έλεγχος του συστήματος παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 7.6 : Διάγραμμα ελέγχου υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας

Στο υπό μελέτη σύστημα ο σχεδιασμός του βασικού ελεγκτή βασίζεται στην ασαφή λογική καθώς η ασαφής λογική:

- αντικατοπτρίζει καλύτερα την ασάφεια που διακρίνει την ανθρώπινη λογική σε αντίθεση με άλλες μεθόδους οι οποίες απαιτούν ακριβείς εξισώσεις για να μοντελοποιήσουν τις συμπεριφορές των συστημάτων. Το κυριότερο χαρακτηριστικό της ασαφούς λογικής είναι πως παρέχει μία **διαισθητική μέθοδο** για την περιγραφή συστημάτων με ανθρώπινους όρους και ταυτόχρονα αυτοματοποιεί την μετατροπή των χαρακτηριστικών και των προδιαγραφών των συστημάτων αυτών σε μοντέλα που αποκρίνονται αποτελεσματικά [85].

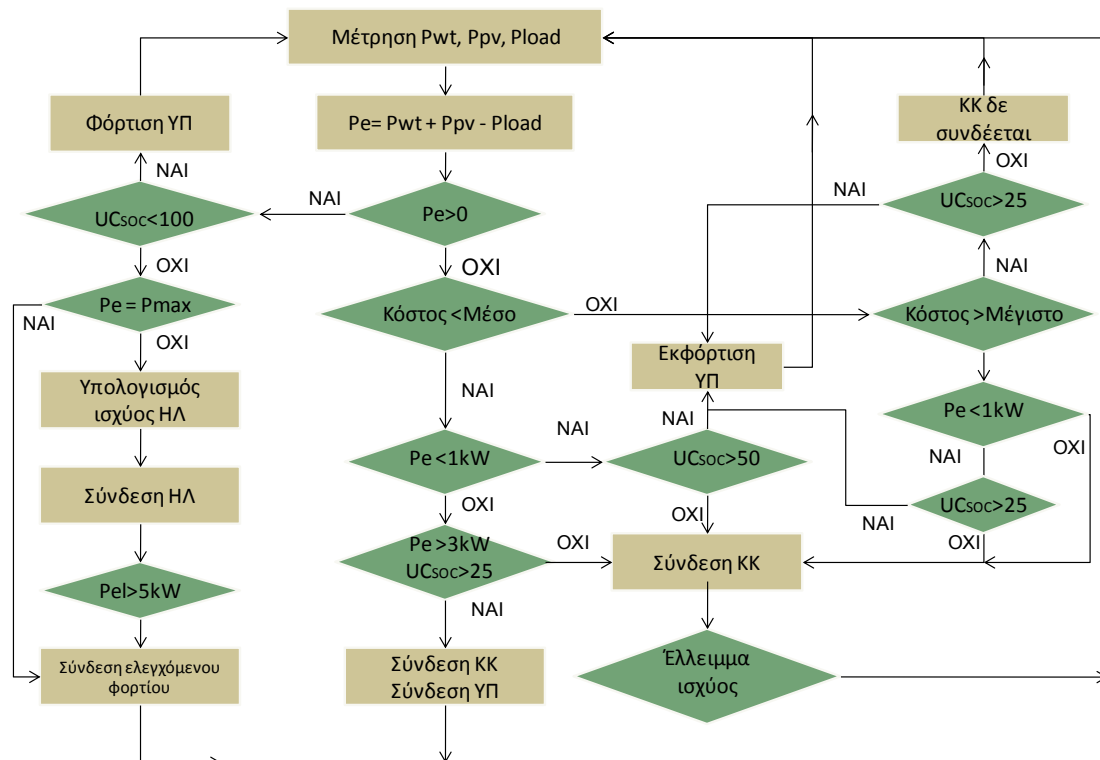
- διακρίνεται από την ικανότητα να αποκρίνεται αποτελεσματικά στις ανάγκες **μη γραμμικών συστημάτων** τα οποία χαρακτηρίζονται από **πλήθος λειτουργικών περιορισμών**. Για το λόγο αυτό αποτελεί ιδανική λύση για την υλοποίηση του ελέγχου στην

περίπτωση του αυτόνομου υβριδικού συστήματος ενέργειας καθώς αυτό αποτελείται από πολλές συνιστώσες με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά.

7.4.2 Αλγόριθμος λειτουργίας διαχειριστικού ελέγχου.

Ο αλγόριθμος λειτουργίας του διαχειριστικού ελέγχου υλοποιείται με τον βασικό ελεγκτή του συστήματος και παρουσιάζεται σχηματικά στο σχ. 7.7. Ο βασικός ελεγκτής μετράει δειγματοληπτικά την ισχύ που παράγεται από τις κύριες ενεργειακές πηγές, δηλαδή την ισχύ της ανεμογεννήτριας P_{wt} , της φ/β γεννήτριας P_{pv} , και την ισχύ του φορτίου P_{load} και υπολογίζει το έλλειμμα ή την περίσσεια ισχύος του συστήματος ως εξής:

$$P_e = P_{wt} + P_{pv} - P_{load} \quad 7-9$$



Σχήμα 7.7 : Διάγραμμα αλγορίθμου ελέγχου βασικού ελεγκτή

Στην περίπτωση που η ζήτηση ισχύος από την κυψέλη καυσίμου και τους υπερπυκνωτές είναι αρνητική, δηλαδή το φορτίο ικανοποιείται εξολοκλήρου από την ανεμογεννήτρια και τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια (**περίσσεια ισχύος**) τότε η κυψέλη καυσίμου δεν τίθεται σε λειτουργία. Εφόσον η παραγωγή ξεπερνάει την ζήτηση του φορτίου, η επιπλέον ισχύς διοχετεύεται στη συστοιχία υπερπυκνωτών έως ότου να επιτευχθεί η πλήρης φόρτισή τους. Αν το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών (SOC) είναι ήδη το μέγιστο τότε συνδέεται ο ηλεκτρολύτης για την παραγωγή υδρογόνου το οποίο οδηγείται στη δεξαμενή αποθήκευσης. 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 5.3.1. Συγκεκριμένα αντί ο ηλεκτρολύτης να χρησιμοποιείται ως φορτίο

σταθεροποίησης τροφοδοτείται με βήματα ισχύος των 500 W από 500 W έως 5000 W με περιορισμό κλίσης 125W/s. Επομένως, ανάλογα με την περίσσεια ισχύος ο βασικός ελεγκτής μεταβάλλει κατάλληλα την τιμή αναφοράς του ελεγκτή που ελέγχει την ισχύ παροχής του. Η λειτουργία του ηλεκτρολύτη συνεχίζεται έως ότου η πίεση της δεξαμενής καυσίμου να φτάσει στο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο. Εάν η περίσσεια ισχύος δεν μπορεί να απορροφηθεί πλήρως ούτε από τους υπερπυκνωτές (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.

Αν υπάρχει **έλλειμμα ισχύος**, ελέγχεται ταυτόχρονα το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών, το επίπεδο ζήτησης ισχύος και το μέσο κόστος λειτουργίας της κυψέλης.

Το κόστος λειτουργίας υπολογίζεται με βάση τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.2.3. Εφόσον το μέσο κόστος λειτουργίας είναι χαμηλό, απαιτείται να ικανοποιούνται ταυτόχρονα τα εξής:

- οι περιορισμοί λειτουργίας των υπερπυκνωτών σχετικά με το επίπεδο φόρτισης τους, όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 5.4.
- οι περιορισμοί λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου προκειμένου η απόδοσή της να μην είναι χαμηλή, όπως έχουν αναφερθεί στην ενότητα 5.2.

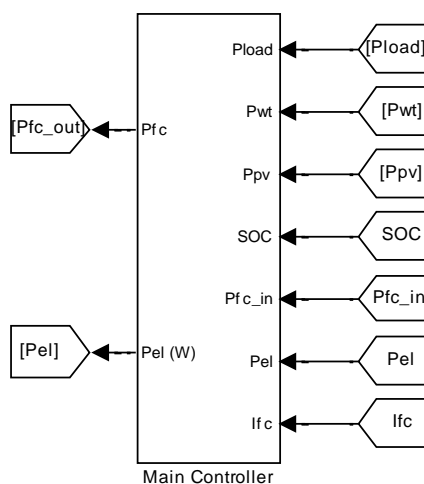
Συνεπώς, με βάση τα ανωτέρω η κυψέλη καυσίμου συνδέεται είτε όταν το επίπεδο φόρτισης της συστοιχίας των υπερπυκνωτών πέσει κάτω από 50% είτε όταν η ζήτηση ισχύος δεν είναι ιδιαίτερα χαμηλή, δηλαδή είναι μεγαλύτερη από 1000 W. Επιπρόσθετα, όταν η ζήτηση ισχύος ξεπεράσει τα 3000 W και το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών είναι μεγαλύτερο από 25%, τότε την επιπλέον ισχύ των 3000 W την παρέχουν οι υπερπυκνωτές. Συνεπώς, δίνεται προτεραιότητα στην σύνδεση των υπερπυκνωτών σε περίπτωση ελλείμματος καθώς χρησιμοποιούνται σε μεταβατικά ή χαμηλά φορτία για να καλύψουν το έλλειμμα ισχύος. Με αυτό τον τρόπο **αποφεύγεται η μη αποδοτική χρήση της κυψέλης καυσίμου** κατά το δυνατόν περισσότερο σε πολύ υψηλή ή πολύ χαμηλή ζήτηση ισχύος και επιτυγχάνεται **υψηλή ενεργειακή απόδοση** καθώς η συστοιχία υπερπυκνωτών δουλεύει σε μεγαλύτερη απόδοση (95%) σε αντίθεση με την κυψέλη καυσίμου (50%). Αν το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών είναι κάτω από 50% τότε σε χαμηλή ζήτηση ισχύος συνδέεται η κυψέλη καυσίμου, έχοντας την εντολή να παράγει λίγο παραπάνω ισχύ από την απαιτούμενη προκειμένου να φορτίζει τους υπερπυκνωτές. Αυτή η στρατηγική έχει ως αποτέλεσμα δύο πλεονεκτήματα, πρώτον να διατηρείται η συνδυασμένη απόδοση της κυψέλης καυσίμου και του μετατροπέα σε επιθυμητά επίπεδα και δεύτερον με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η μετέπειτα σύνδεση των υπερπυκνωτών (όσο υπάρχει ακόμα έλλειμμα ισχύος) όταν κρίνεται σκόπιμο σε μεταβατικά φορτία για την σταθεροποίηση της τάσης προκειμένου **το επίπεδο φόρτισης τους να μη φτάνει σε πολύ χαμηλά επίπεδα που επιδρούν αρνητικά στη διάρκεια ζωής τους**.

Εφόσον, το μέσο κόστος λειτουργίας είναι σε σχετικά υψηλά επίπεδα συνδέονται οι υπερπυκνωτές για να ικανοποιήσουν οποιοδήποτε επίπεδο ζήτησης ισχύος αν το επίπεδο φόρτισής τους είναι μεγαλύτερο από 50%. Αν το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών είναι μικρότερο του 50% αλλά μεγαλύτερο από 25% τότε οι υπερπυκνωτές συνδέονται προκειμένου να καλύψουν τη χαμηλή ζήτηση ισχύος αφού η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου κρίνεται μη συμφέρουσα. Σε περίπτωση που η ζήτηση ισχύος είναι υψηλότερη, δεν συνδέονται οι υπερπυκνωτές καθώς η κυψέλη καυσίμου θα λειτουργήσει με καλύτερη

απόδοση για να την παρέχει. Με αυτό τον τρόπο η κυψέλη καυσίμου δεν χρησιμοποιείται άσκοπα γεγονός που συμβάλλει στην **οικονομικότερη λειτουργία** της.

Στην περίπτωση που το μέσο κόστος λειτουργίας της κυψέλης έχει ξεπεράσει ένα ανώτατο όριο το οποίο καθιστά μη συμφέρουσα οικονομικά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, η κυψέλη δεν θα συνδεθεί στο σύστημα και το φορτίο θα ικανοποιηθεί μόνο από τους υπερπυκνωτές, όσο το επίπεδο φόρτισης τους ξεπερνάει το 25%.

Ο ανωτέρω αλγόριθμος που περιγράφηκε υλοποιείται στο βασικό ελεγκτή του συστήματος. Το μοντέλο του βασικού ελεγκτή δίνεται στο σχ. 6.8 (Παράρτημα Α-Μοντέλο21). Από τις εισόδους του ελεγκτή P_{load} , P_{wt} και P_{pv} υπολογίζεται η περίσσεια ή το έλλειμμα της ισχύος που υπάρχει στο σύστημα (P_e). Οι εισοδοί P_{fc_in} , P_{el} και I_{fc} χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μέσου κόστους λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου. Το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών SOC αποτελεί άμεση παράμετρος ελέγχου του διαχειριστικού ελέγχου του συστήματος. Από το βασικό ελεγκτή εξάγονται η εντολή του επιπέδου ισχύος στο οποίο πρέπει να λειτουργεί η κυψέλη καυσίμου σε περίπτωση ελλείμματος ισχύος και ο ηλεκτρολύτης σε περίπτωση περίσσειας ισχύος.

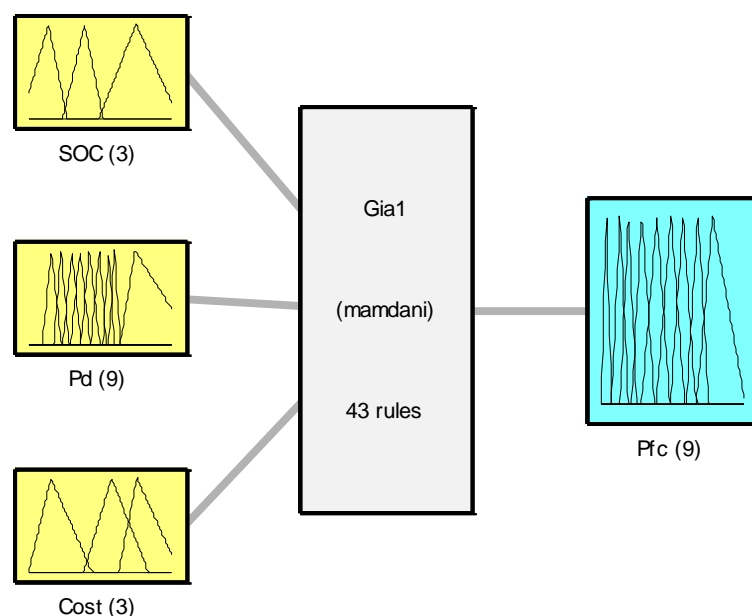


Σχήμα 7.8 : Μοντέλο βασικού ελεγκτή

Συμπερασματικά, η χρήση της ασαφούς λογικής ενδείκνυται στην περίπτωση του ελέγχου του υβριδικού συστήματος καθώς λαμβάνει υπόψη πολλές διαφορετικές παραμέτρους προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη λειτουργία του συστήματος. Παράμετροι, όπως οι λειτουργικοί περιορισμοί των διαφορετικών πηγών ενέργειας, η εξασφάλιση του ισοζυγίου ισχύος, η ποιότητα της ισχύος και το κόστος λειτουργίας του συστήματος αυξάνουν κατά πολύ την πολυπλοκότητα ελέγχου του συστήματος οδηγώντας σε πλήθος κανόνων και περιορισμών. Η **μη γραμμικότητα** του συστήματος και παράλληλα το **μεγάλο εύρος των πιθανών συνδυασμών** των παραπάνω παραμέτρων είναι δυνατό να αντιμετωπισθούν με τους ασαφείς κανόνες του ελεγκτή, με βάση τους οποίους εξάγεται η εντολή εξόδου.

7.4.3 Σχεδιασμός του βασικού ελεγκτή με βάση την ασαφή λογική

Ο αλγόριθμος διαχειριστικού ελέγχου υλοποιείται σε πρώτο επίπεδο με βάση έναν ελεγκτή ασαφούς λογικής (fuzzy logic controller):



System Gia1: 3 inputs, 1 outputs, 43 rules

Σχήμα 7.9 : Ελεγκτής ασαφούς λογικής για την στρατηγική διαχείρισης της ενέργειας

Ο ελεγκτής ασαφούς λογικής έχει **τρεις εισόδους** και **μία έξοδο**. Το επίπεδο φόρτισης του υπερπυκνωτή και επομένως η ικανότητά του να παρέχει ισχύ, το μέσο κόστος λειτουργίας του συστήματος που απαιτείται να μην ξεπερνάει κάποιο όριο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και η απαιτούμενη ζήτηση ισχύος από την κυψέλη καυσίμου και τον υπερπυκνωτή αποτελούν τις εισόδους του ελεγκτή. Η εξέταση αυτών των παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο έχει ως αποτέλεσμα την εξαγωγή της κατάλληλης εντολής σχετικά με το επίπεδο ισχύος της κυψέλης καυσίμου, που αποτελεί την έξοδο του ελεγκτή (σχ. 7.9).

Στο μοντέλο του ελεγκτή ασαφούς λογικής που υλοποιείται στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB οι μεταβλητές συμβολίζονται ως εξής:

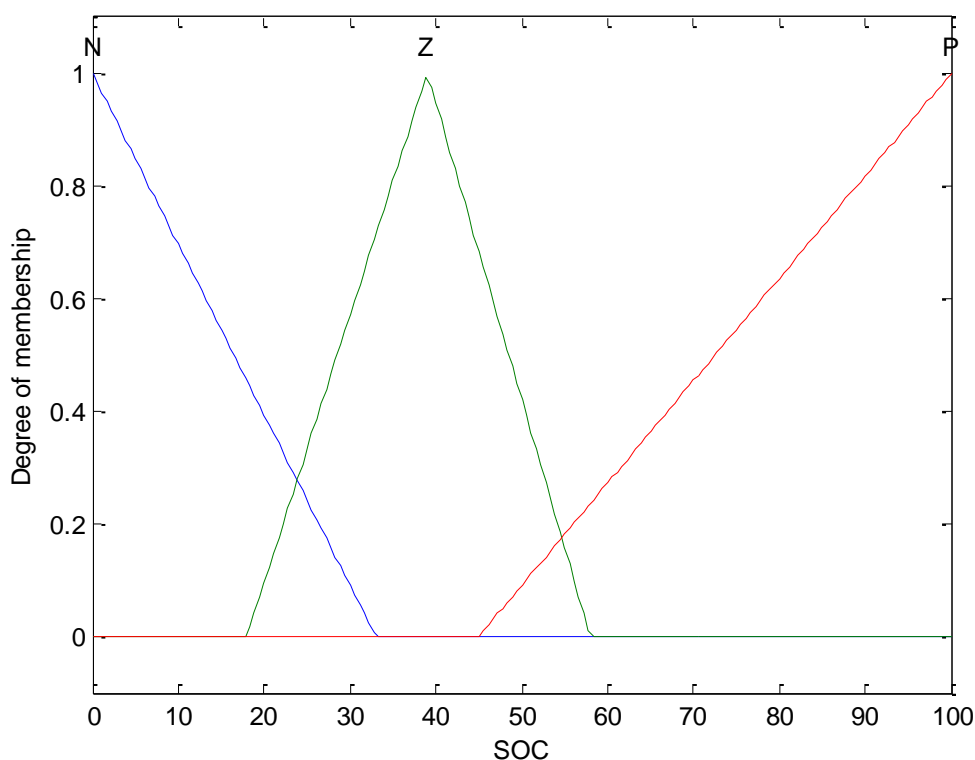
- **SOC:** το επίπεδο φόρτισης του υπερπυκνωτή,
- **Pd:** η απαιτούμενη ζήτηση ισχύος από την κυψέλη καυσίμου και τον υπερπυκνωτή,
- **Cost:** το μέσο κόστος λειτουργίας του συστήματος και
- **Pfc:** είναι η ισχύς της κυψέλης καυσίμου.

Οι Συναρτήσεις Συμμετοχής των εισόδων Pd, SOC και Cost καθώς και της εξόδου Pfc φαίνονται στα σχ. 7.10 – 7.13. Για τη συνάρτηση συμμετοχής της εισόδου SOC χρησιμοποιούνται τρία ασαφή σύνολα με τις εξής λεκτικές μεταβλητές: N (Negative), Zero, P (Positive). Για τη συνάρτηση συμμετοχής της εισόδου Pd χρησιμοποιούνται 9 ασαφή

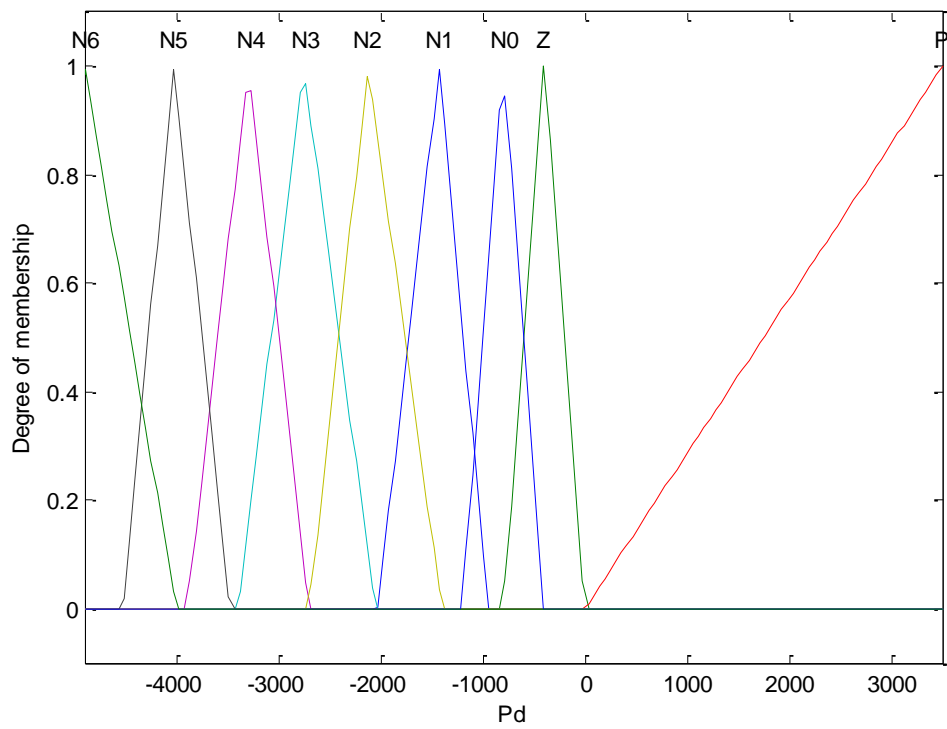
σύνολα με τις εξής λεκτικές μεταβλητές: N6, N5, N4, N3, N2, N1, N0, Z, P. Για τη συνάρτηση συμμετοχής της εισόδου Cost χρησιμοποιούνται τρία ασαφή σύνολα με τις εξής λεκτικές μεταβλητές: N (Negative), Zero, P (Positive). Τέλος για τη συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου Pfc χρησιμοποιούνται εννέα ασαφή σύνολα με τις εξής λεκτικές μεταβλητές: N, Z, P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6.

Στην παρούσα μελέτη προτιμήθηκαν οι τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής λόγω της εύκολης εφαρμογής αλλά και της γρήγορης επεξεργασίας τους. Η λογική των τριγωνικών συναρτήσεων συμμετοχής και των ασαφών συνόλων εξηγείται με βάση το σχ. 7.10. Έστω, ότι το επίπεδο φόρτισης του υπερπυκνωτή είναι 40%, τότε ανήκει αποκλειστικά στην περιοχή Zero. Αν το επίπεδο φόρτισης είναι 50%, ανήκει στην περιοχή Zero κατά 50% και στην περιοχή P κατά ένα άλλο 50%. Η αλλαγή στη δυαδική λογική (από μια περιοχή σε μια άλλη) γίνεται με τις τιμές 0 και 1. Εδώ μπορεί να ειπωθεί πως η αλλαγή περιοχής γίνεται στην τιμή 50 από Zero σε P αλλά όχι με τιμές 0 και 1 αλλά με την τιμή 50%.

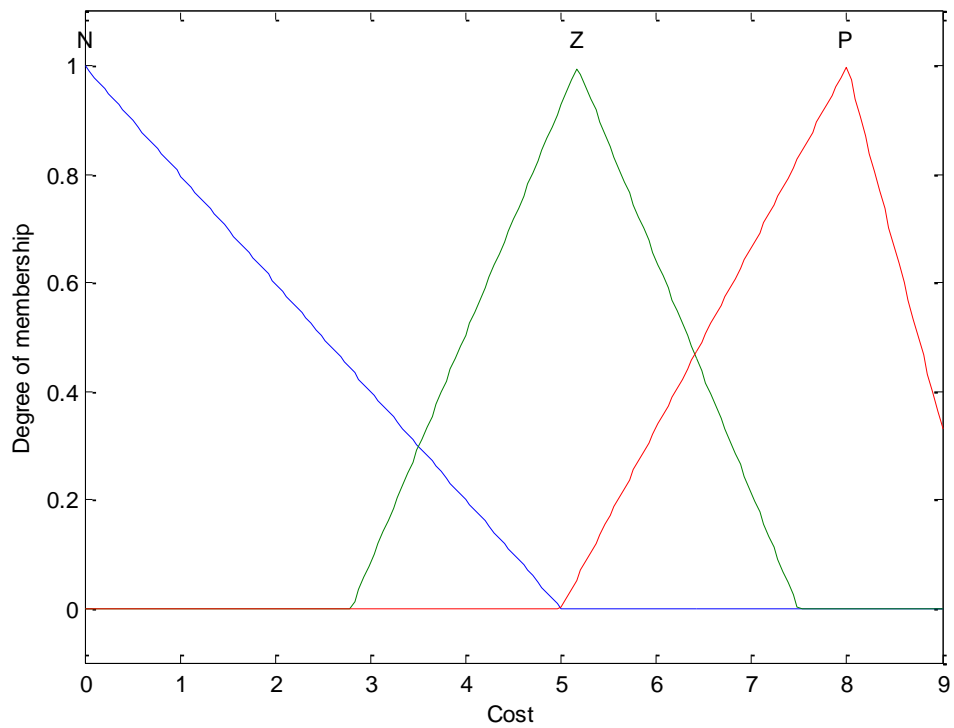
Αντίστοιχη είναι και η λογική που περιγράφει τη συνάρτηση συμμετοχής των υπόλοιπων παραμέτρων του συστήματος. Το επιλεγμένο εύρος τιμών του επιπέδου φόρτισης είναι από 0 έως 100, της απαιτούμενης ζήτησης ισχύος από την κυψέλη καυσίμου και τον υπερπυκνωτή είναι από -6000 W έως 3000 W, του μέσου κόστους λειτουργίας είναι από 0\$ έως 9\$ και της ισχύος εξόδου της κυψέλης καυσίμου από -50 έως 6500 W. Τα εύρη αυτά επιλέχθηκαν με βάση την προσομοιωμένη λειτουργία των αντίστοιχων μεγεθών του μοντέλου.



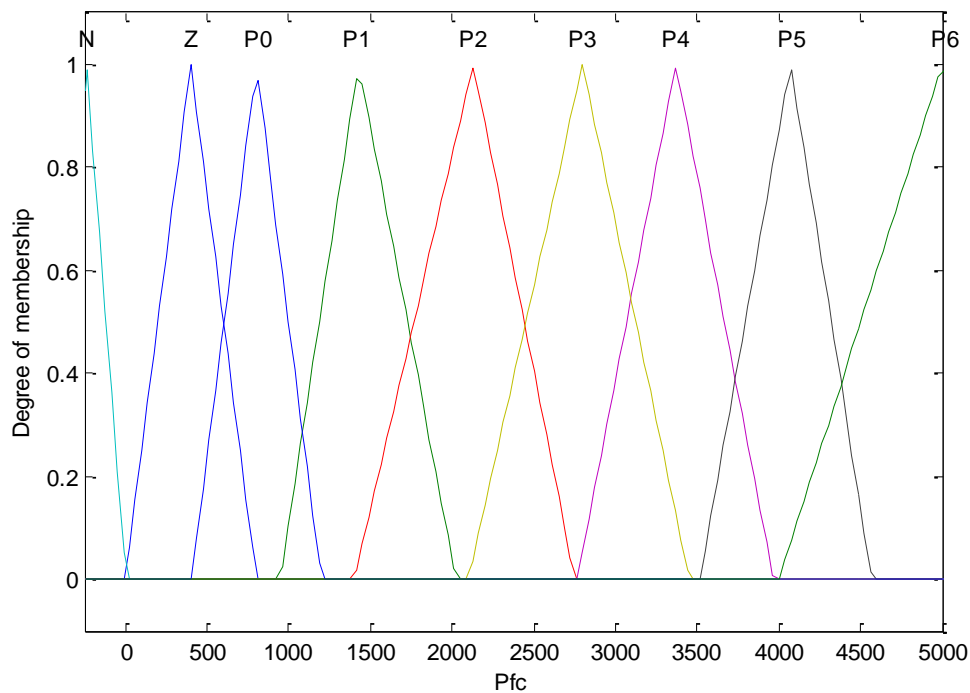
Σχήμα 7.10 : Συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς μεταβλητής εισόδου SOC



Σχήμα 7.11 : Συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς μεταβλητής εισόδου Pd



Σχήμα 7.12 : Συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς μεταβλητής εισόδου Cost



Σχήμα 7.13 :Συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς μεταβλητής εξόδου Pfc

Κατά την διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων προτιμήθηκε ο Mamdani από τον Sugeno τύπο ασαφούς ελεγκτή γιατί η συνεπαγωγή Mamdani αναμένει ώστε οι συναρτήσεις συμμετοχής της εξόδου να είναι ασαφή σύνολα. Αντίθετα, τα συστήματα Sugeno-τύπων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαμορφώσουν οποιοδήποτε σύστημα συμπεράσματος στο οποίο οι συναρτήσεις συμμετοχής της εξόδου είναι καθεμία γραμμική ή σταθερά το οποίο δεν μπορεί να εφαρμοσθεί στο παρόν σύστημα γιατί το μοντέλο είναι πολύπλοκο και μη γραμμικό.

Ο ελεγκτής ασαφούς λογικής πρέπει να αποφασίζει κάθε φορά τον καλύτερο τρόπο ελέγχου του φυσικού συστήματος. Η απόφαση λαμβάνεται με την ασαφή διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων. Βάσει του διαχειριστικού ελέγχου που αναλύθηκε ανωτέρω ο ελεγκτής ασαφούς λογικής σχετίζει την έξοδο ελέγχου με τις εισόδους χρησιμοποιώντας μία λίστα από 43 if-then ασαφείς κανόνες:

1. If (Pd is P) then (Pfc is N) (1)
2. If (SOC is P) and (Pd is Z) and (Cost is N) then (Pfc is N) (1)
3. If (SOC is P) and (Pd is N0) and (Cost is N) then (Pfc is N) (1)
4. If (SOC is P) and (Pd is N1) and (Cost is N) then (Pfc is P1) (1)
5. If (SOC is P) and (Pd is N2) and (Cost is N) then (Pfc is P2) (1)
6. If (SOC is P) and (Pd is N3) and (Cost is N) then (Pfc is P3) (1)
7. If (SOC is P) and (Pd is N4) and (Cost is N) then (Pfc is P3) (1)
8. If (SOC is P) and (Pd is N5) and (Cost is N) then (Pfc is P3) (1)
9. If (SOC is P) and (Pd is N6) and (Cost is N) then (Pfc is P3) (1)
10. If (SOC is Z) and (Pd is Z) and (Cost is N) then (Pfc is P0) (1)
11. If (SOC is Z) and (Pd is N0) and (Cost is N) then (Pfc is P1) (1)
12. If (SOC is Z) and (Pd is N1) and (Cost is N) then (Pfc is P1) (1)

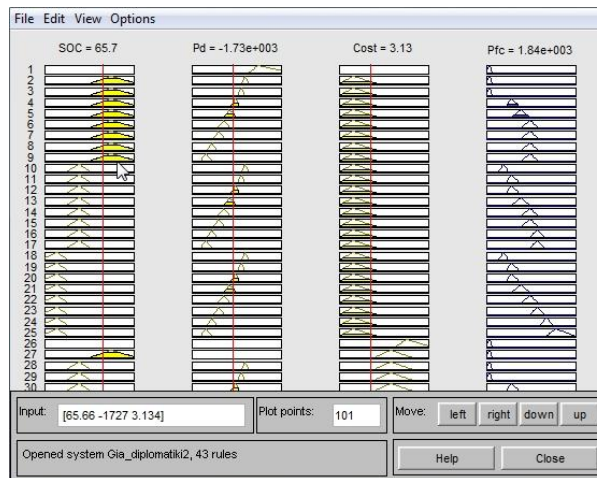
13. If (SOC is Z) and (Pd is N2) and (Cost is N) then (Pfc is P2) (1)
14. If (SOC is Z) and (Pd is N3) and (Cost is N) then (Pfc is P3) (1)
15. If (SOC is Z) and (Pd is N4) and (Cost is N) then (Pfc is P3) (1)
16. If (SOC is Z) and (Pd is N5) and (Cost is N) then (Pfc is P4) (1)
17. If (SOC is Z) and (Pd is N6) and (Cost is N) then (Pfc is P4) (1)
18. If (SOC is N) and (Pd is Z) and (Cost is N) then (Pfc is P0) (1)
19. If (SOC is N) and (Pd is N0) and (Cost is N) then (Pfc is P1) (1)
20. If (SOC is N) and (Pd is N1) and (Cost is N) then (Pfc is P1) (1)
21. If (SOC is N) and (Pd is N2) and (Cost is N) then (Pfc is P2) (1)
22. If (SOC is N) and (Pd is N3) and (Cost is N) then (Pfc is P3) (1)
23. If (SOC is N) and (Pd is N4) and (Cost is N) then (Pfc is P4) (1)
24. If (SOC is N) and (Pd is N5) and (Cost is N) then (Pfc is P5) (1)
25. If (SOC is N) and (Pd is N6) and (Cost is N) then (Pfc is P6) (1)
26. If (Cost is P) then (Pfc is N) (1)
27. If (SOC is P) and (Cost is Z) then (Pfc is N) (1)
28. If (SOC is Z) and (Pd is Z) and (Cost is Z) then (Pfc is N) (1)
29. If (SOC is Z) and (Pd is N0) and (Cost is Z) then (Pfc is N) (1)
30. If (SOC is Z) and (Pd is N1) and (Cost is Z) then (Pfc is P1) (1)
31. If (SOC is Z) and (Pd is N2) and (Cost is Z) then (Pfc is P2) (1)
32. If (SOC is Z) and (Pd is N3) and (Cost is Z) then (Pfc is P3) (1)
33. If (SOC is Z) and (Pd is N4) and (Cost is Z) then (Pfc is P3) (1)
34. If (SOC is Z) and (Pd is N5) and (Cost is Z) then (Pfc is P4) (1)
35. If (SOC is Z) and (Pd is N6) and (Cost is Z) then (Pfc is P4) (1)
36. If (SOC is N) and (Pd is Z) and (Cost is Z) then (Pfc is N) (1)
37. If (SOC is N) and (Pd is N0) and (Cost is Z) then (Pfc is N) (1)
38. If (SOC is N) and (Pd is N1) and (Cost is Z) then (Pfc is P2) (1)
39. If (SOC is N) and (Pd is N2) and (Cost is Z) then (Pfc is P2) (1)
40. If (SOC is N) and (Pd is N3) and (Cost is Z) then (Pfc is P3) (1)
41. If (SOC is N) and (Pd is N4) and (Cost is Z) then (Pfc is P4) (1)
42. If (SOC is N) and (Pd is N5) and (Cost is Z) then (Pfc is P5) (1)
43. If (SOC is N) and (Pd is N6) and (Cost is Z) then (Pfc is P6) (1)

Η απόφαση λαμβάνεται με την ασαφή διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων (σχ. 7.14). Η διαδικασία εξαγωγής συμπεράσματος με βάση τις εκάστοτε σαφείς τιμές εισόδου και τις συναρτήσεις συμμετοχής που διεγείρουν, όπως περιγράφηκαν παραπάνω, πραγματοποιείται με την πράξη \min , κατά την οποία λαμβάνεται υπόψη ο μικρότερος βαθμός εκπλήρωσης των εκάστοτε διεγερμένων συναρτήσεων συμμετοχής, ο οποίος γίνεται και τιμή διέγερσης της συνάρτησης συμμετοχής του συμπεράσματος

Η διαδικασία σύνθεσης που χρησιμοποιείται είναι η \max έτσι ώστε το τελικό αποτέλεσμα της εξόδου για κάθε συνδυασμό διεγερμένων κανόνων να προκύπτει με τον τελεστή \max .

Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος απο-ασαφοποίησης είναι μέθοδος απο-ασαφοποίησης κέντρου βάρους.

Η υλοποίηση του ασαφή ελεγκτή πραγματοποιήθηκε σε υπολογιστή με τη βοήθεια του Fuzzy Logic Toolbox του προγράμματος Simulink™ με σκοπό την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος.



Σχήμα 7.14 : Υλοποίηση της εξαγωγής της εντολής ισχύος της κυψέλης καυσίμου με βάση τις εισόδους

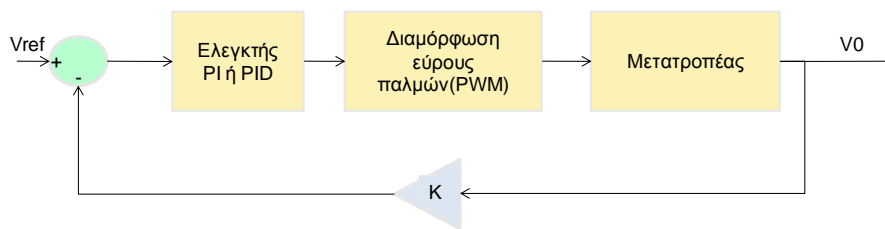
Τα **πλεονεκτήματα** που εμφανίζει ο ελεγκτής, ο οποίος είναι βασισμένος σε ασαφή λογική, για τον έλεγχο του αυτόνομου υβριδικού συστήματος είναι τα εξής:

- Λειτουργεί αποδοτικά για μη γραμμικά συστήματα όπως είναι και το υπό μελέτη αυτόνομο υβριδικό σύστημα.
- Έχει τη δυνατότητα να αποτιμήσει το πλήθος των παραμέτρων ελέγχου του συστήματος και το μεγάλο εύρος των τιμών που αυτές μπορούν να λάβουν παρουσιάζοντας ποιοτικά το εύρος αυτό.
- Οι ασαφείς κανόνες μπορούν να αντικατοπτρίσουν το μεγάλο εύρος των πιθανών συνδυασμών των παραμέτρων ελέγχου που οφείλονται στους λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος και των επιμέρους συνιστωσών και οδηγούν σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας το σύστημα.
- Συσχετίζει την έξοδο με την είσοδο, χωρίς να πρέπει να καταλάβει όλες τις μεταβλητές, επιτρέποντας τον σχεδιασμό ενός συστήματος ελέγχου που μπορεί και είναι πιο ακριβές και σταθερό από ένα αντίστοιχο συμβατικό σύστημα ελέγχου.
- Οι παράμετροι ελέγχου εξετάζονται όλες ταυτόχρονα και η λήψη απόφασης από τον ελεγκτή γίνεται σε πραγματικό χρόνο.
- Η ασαφής λογική ενώ είναι αυτοματοποιημένη ταυτόχρονα προσεγγίζει κατά πολύ την ανθρώπινη λογική σε σύγκριση με τις απλές τεχνικές ελέγχου συνεπώς, είναι ευκολότερα αντιληπτή η μέθοδος ελέγχου από τον χρήστη που διαχειρίζεται το σύστημα.
- Ο ελεγκτής ασαφούς λογικής που αναπτύχθηκε είναι σε θέση να προσαρμοστεί προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο αντίστοιχων υβριδικών συστημάτων. Αν διαφοροποιηθούν τα επίπεδα ισχύος και οι απαιτήσεις φορτίου, ο ελεγκτής μπορεί να είναι το ίδιο αποτελεσματικός, εφόσον πρώτα τροποποιηθούν κατάλληλα τα σύνολα των μεταβλητών εισόδου και εξόδου.

- Τέλος συστήματα ελέγχου που βασίζονται στην ασαφή λογική μπορούν εύκολα να βελτιστοποιηθούν προσθέτοντας νέες παραμέτρους ελέγχου ή νέους κανόνες προκειμένου να βελτιωθεί η απόκριση του συστήματος.

7.4.4 Τοπικοί ελεγκτές του συστήματος

Όπως έχει προαναφερθεί η σύνδεση και η αποσύνδεση της κυψέλης καυσίμου, των υπερπυκνωτών, του ηλεκτρολύτη και του ελεγχόμενου φορτίου στο ζυγό ΣΡ πραγματοποιούνται με ιδανικούς διακόπτες. Οι μετατροπείς ΣΡ της κυψέλης καυσίμου, των υπερπυκνωτών και του ελεγχόμενου φορτίου λειτουργούν σε λογική σταθεροποίησης τάσης. Συγκεκριμένα το σφάλμα τάσης τροφοδοτεί ένα PI ελεγκτή, ο οποίος ελέγχει το Duty Cycle του μετατροπέα με τη μέθοδο PWM (Pulse Width Modulation) σχ. 7.15. [86]



Σχήμα 7.15 : Μπλοκ διάγραμμα ελέγχου PWM σε κλειστό βρόχο σταθεροποίησης τάσης

Ο μετατροπέας συνεχούς ρεύματος του ηλεκτρολύτη λειτουργεί σε λογική σταθεροποίησης ισχύος. Ο αντίστοιχος PI ελεγκτής του μετατροπέα του ηλεκτρολύτη τροφοδοτείται από το σφάλμα ισχύος που προκύπτει από τις διαφορές τιμές αναφοράς που ορίζει ο βασικός ελεγκτής, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

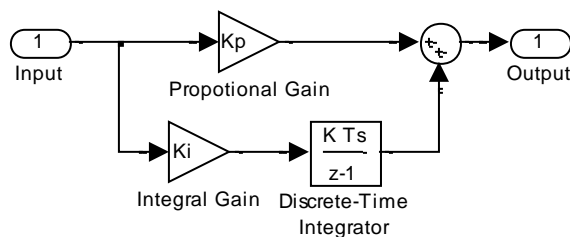
Ο αναλογικός - ολοκληρωτικός ελεγκτής PI (Proportional – Integral Controller) (σχ. 7.16) χρησιμοποιείται ευρύτατα στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Η συνάρτηση μεταφοράς του PI ελεγκτή δίνεται από την εξίσωση:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad 7-10$$

Λαμβάνοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace η έξοδος του ελεγκτή στο πεδίο του χρόνου δίνεται από την σχέση:

$$y_c(t) = K_p \cdot \Delta x_{(c)} + K_I \cdot \int_0^t \Delta x_{(c)} dt \quad 7-11$$

όπου $\Delta x_{(c)}$ το σφάλμα εισόδου, δηλαδή τη διαφορά ανάμεσα στην τιμή της επιθυμητής εισόδου και σε εκείνη της πραγματικής εξόδου.

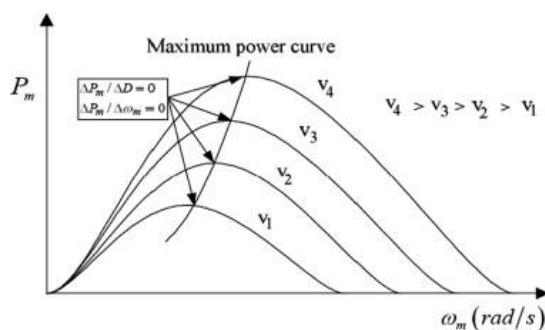


Σχήμα 7.16 : Μοντέλο PI ελεγκτή

Ο αναλογικός ελεγκτής (Proportional) πολλαπλασιάζει το σφάλμα εισόδου με το αναλογικό κέρδος K_p και έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του χρόνου ανύψωσης και την μείωση, αλλά ποτέ την εξάλειψη, του μόνιμου σφάλματος. Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής (Integral) ολοκληρώνει το σήμα εισόδου του και πολλαπλασιάζει το αποτέλεσμα με το ολοκληρωτικό κέρδος K_i . Όσο μεγαλύτερο είναι αυτό το κέρδος τόσο περισσότερο εξαλείφεται το μόνιμο σφάλμα, αλλά παράλληλα αυξάνεται και ο χρόνος απόκρισης σε μία διαταραχή του συστήματος.

7.4.4.1 Έλεγχος ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος ανεμογεννήτριας

Η ανεμογεννήτρια χαρακτηρίζεται από χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής – στροφών για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Η μέγιστη δυνατή αιολική ισχύς απορροφάται, για δεδομένη ταχύτητα ανέμου, στο σημείο της καμπύλης όπου το γινόμενο της ροπής με τις στροφές μεγιστοποιείται. Προκειμένου, το σύστημα να εκμεταλλεύεται όσο το δυνατόν περισσότερο την αιολική ισχύ είναι απαραίτητη η λειτουργία του πάνω σε μία καμπύλη η οποία αποτελείται από όλα εκείνα τα σημεία στα οποία το γινόμενο ροπής επί στροφές μεγιστοποιείται για την εκάστοτε ταχύτητα ανέμου. Για το σκοπό αυτό εφαρμόζεται μία διαδικασία ελέγχου η οποία ονομάζεται Ανεύρεση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT). [79]

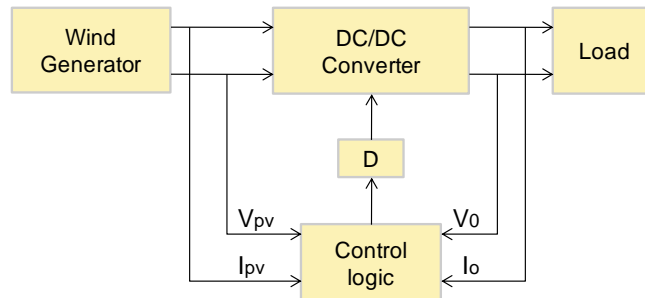


Σχήμα 7.17 : Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος στροφών και καμπύλη μέγιστης ισχύος λειτουργίας

Ο έλεγχος αυτός ουσιαστικά υλοποιείται από τους MPPT ελεγκτές βάσει κάποιων αλγόριθμων ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος. Οι αλγόριθμοι αυτοί λειτουργούν ελέγχοντας τις στροφές του ανεμοκινητήρα, έτσι ώστε να διατηρούν τα λειτουργικά σημεία του συστήματος για κάθε ταχύτητα ανέμου στο μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή C_{pmax} ο οποίος ισούται περίπου με 0.5. Για διάφορες ταχύτητες ανέμου και ανάλογα με τη λειτουργική κατάσταση του συστήματος, αν τα σημεία λειτουργίας βρίσκονται δεξιά ή αριστερά από το σημείο μέγιστης ισχύος στην καμπύλη του σχ. 7.17 [80], ο ελεγκτής θα αναλάβει την κατάλληλη δράση μειώνοντας και αυξάνοντας αντίστοιχα τις στροφές του ανεμοκινητήρα, ώστε να μετακινήσει τα λειτουργικά σημεία πάνω στην βέλτιστη καμπύλη. Με αυτή την αρχή, το σημείο λειτουργίας μπορεί να διατηρηθεί στο C_{pmax} και κατ' επέκταση ο ανεμοκινητήρας να αποδίδει μέγιστη ισχύ για κάθε ταχύτητα ανέμου.

Η διαδικασία αναζήτησης του σημείου μέγιστης ισχύος εκτελείται μέσω ρύθμισης του λόγου κατάτμησης D του ημιαγωγικού στοιχείου του οποίου η μεταβολή έχει άμεση επίδραση στο ρεύμα του ανυψωτή και άρα στην ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας και τελικά

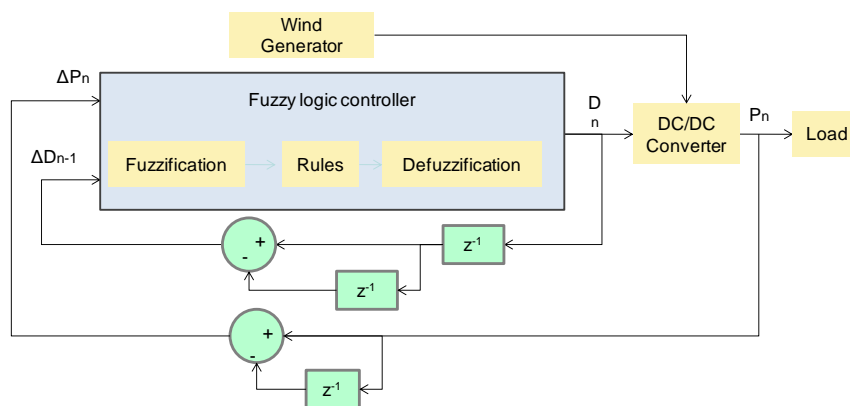
στην ισχύ εξόδου της. Για αυτό το λόγο είναι συνήθης η χρήση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, του οποίου τη λειτουργία ελέγχει ο ελεγκτής ανεύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας (σχ.7.18). Ανάλογα με το duty cycle του ημιαγωγικού στοιχείου λαμβάνεται διαφορετικό ρεύμα στην έξοδο. Η ρύθμιση αυτή του ρεύματος αντικατοπτρίζει τη ρύθμιση της ηλεκτρικής ροπής της γεννήτριας και συνεπώς επιτυγχάνεται ρύθμιση των στροφών του άξονα της ανεμογεννήτριας. [13]



Σχήμα 7.18 : Σύστημα ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος λειτουργίας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών

7.4.4.1.1 Έλεγχος MPPT ανεμογεννήτριας με ελεγκτή ασαφούς λογικής

Η αρχή λειτουργίας του ελεγκτή ασαφούς λογικής είναι η πραγματοποίηση συνεχών μεταβολών του duty cycle του μετατροπέα ανύψωσης τάσης ώστε να εντοπιστεί το σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος. Η εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος εκτελείται μέσω ρύθμισης του λόγου κατάτμησης D του ημιαγωγικού στοιχείου. Το σύστημα μετρά την ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας και την συγκρίνει με την αμέσως προηγούμενη. Αν είναι μεγαλύτερη, τότε γίνεται μια μεταβολή του λόγου κατάτμησης D προς μια κατεύθυνση (αύξηση ή μείωση), αν είναι μικρότερη, τότε η μεταβολή του D γίνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση από την αμέσως προηγούμενη. Για να βρει ο ελεγκτής ποια ήταν η κατεύθυνση που είχε πριν την εντολή, εισάγεται στο σύστημα εκτός από τη μεταβολή της ισχύος εξόδου και η μεταβολή του ανορθωμένου ρεύματος της γεννήτριας το οποίο είναι άμεσα εξαρτημένο από τον λόγο κατάτμησης D . Με αυτό τον τρόπο, ο ελεγκτής λειτουργεί σε μία λογική «αύξησης του ρεύματος, έως ότου η εντολή για αύξηση φέρει μείωση της ισχύος και μείωση του ρεύματος, μέχρι η εντολή για μείωση να φέρει πάλι μείωση της ισχύος». Παρ' όλα αυτά, η μεταβολή του D είναι αντιστρόφως ανάλογη με το ανορθωμένο ρεύμα της γεννήτριας. Συνεπώς μια εντολή για αύξηση του ρεύματος οδηγεί σε μείωση του D [81].



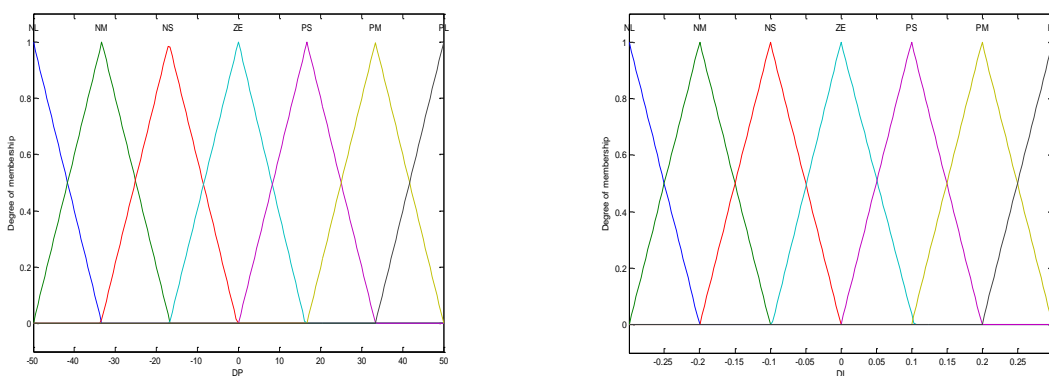
Σχήμα 7.19 : Σχηματικό διάγραμμα ελεγκτή ασαφούς λογικής A/Γ

Ο αλγόριθμος ανεύρεσης μέγιστου σημείου λειτουργίας υλοποιείται με βάση την ασαφή λογική, όπως φαίνεται στο σχ.7.19.

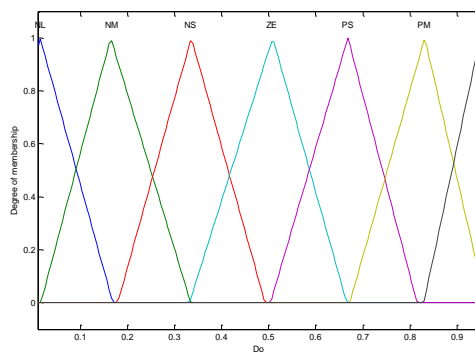
Συνοπτικά οι είσοδοι του ελεγκτή είναι οι εξής:

- η μεταβολή της ισχύος εξόδου P_g μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών στιγμών: $\Delta P_g = P_g(t) - P_g(t-1)$
- η μεταβολή του ανορθωμένου ρεύματος I: $\Delta I = I(t) - I(t-1)$
Και η έξοδος:
- D: ο λόγος κατάτμησης του DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης

Κάθε μεταβλητή εισόδου μετατρέπεται σε τιμές συμμετοχής από 0 έως 1. Οι συναρτήσεις συμμετοχής (τριγωνικές) παρατίθενται στα σχ.7.20 και 7.27.



Σχήμα 7.20 : Συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς μεταβλητής εισόδου ΔΡ και ΔΙ αντίστοιχα



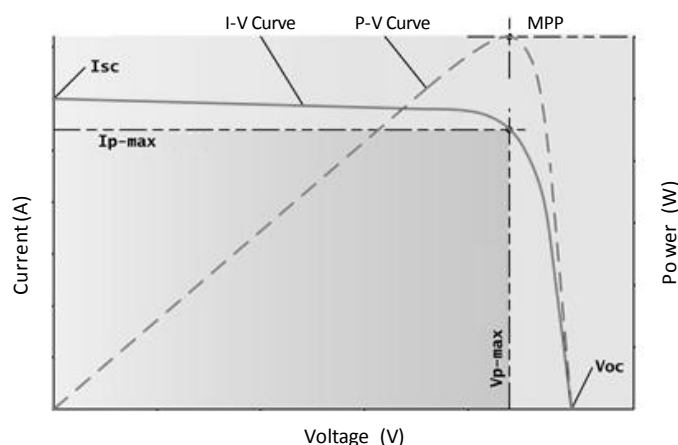
Σχήμα 7.21 : Συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς μεταβλητής εξόδου D

Στη συνέχεια ο ελεγκτής ασαφούς λογικής εξετάζει τις παραμέτρους εισόδου. Βάσει της ασαφούς διαδικασίας εξαγωγής αποτελεσμάτων και των ασαφών κανόνων λογικής if-then εξάγει την κατάλληλη εντολή για την τιμή του λόγου κατάτμησης. Τέλος, στο στάδιο της από-ασαφοποίησης λαμβάνεται η τιμή του λόγου κατάτμησης.

7.4.4.2 Έλεγχος MRPT φωτοβολταϊκής γεννήτριας

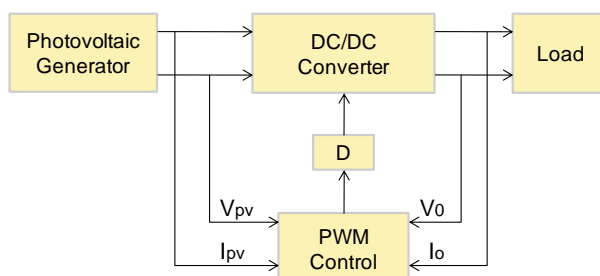
Η τάση του φ/β πλαισίου εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο. Η ένταση της ισχύος που παράγεται από ένα φ/β στοιχείο δεν είναι σταθερή αλλά

μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα σε σχέση με την τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης-έντασης το φ/β στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του σχ.7.22 [88]. Βάσει των ανωτέρω, διαπιστώνεται πως το σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point - MPP) μετατοπίζεται, καθώς αλλάζει η ηλιακή ακτινοβολία. Συνεπώς, είναι επιθυμητό η λειτουργία του φ/β στοιχείου στο ζεύγος τάσης-έντασης που αποδίδει τη μέγιστη ισχύ και όχι σε ένταση και τάση όπως αυτές θα καθορίζονταν από το φορτίο του κυκλώματος.



Σχήμα 7.22 : Καμπύλες I-V και P-V φ/β στοιχείου και εύρεση μέγιστου σημείου ισχύος

Οι ελεγκτές MPPT του φ/β υλοποιούνται με έναν ελεγχόμενο μετατροπέα ανύψωσης τάσης (σχ. 7.23). Ελέγχοντας το duty cycle του μετατροπέα, ελέγχεται το ρεύμα εξόδου του φ/β, με τέτοιο τρόπο ώστε αυτό να ανταποκρίνεται στο σημείο τάσης-έντασης μέγιστης ισχύος ανάλογα με την αλλαγή της ηλιακής ακτινοβολίας.

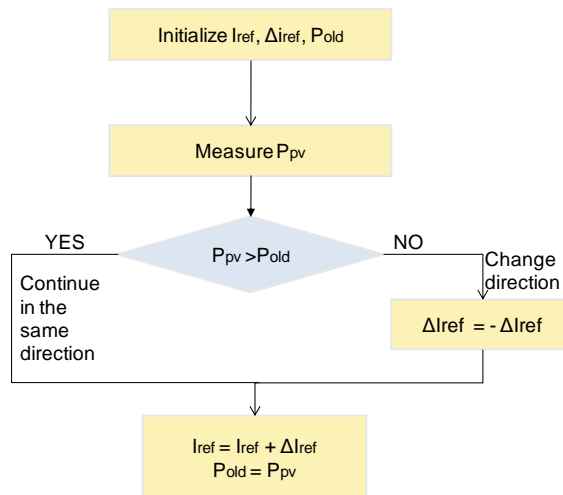


Σχήμα 7.23 : Μπλοκ διάγραμμα ελέγχου MPPT φ/β γεννήτριας

7.4.4.2.1 Έλεγχος MPPT φωτοβολταϊκής γεννήτριας μέσω μικρών μεταβολών

Η τεχνική ελέγχου για την ανεύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος που χρησιμοποιείται στο παρόν σύστημα είναι η μέθοδος ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος μέσω μικρών μεταβολών. Η εύρεση του επιθυμητού σημείου επιτυγχάνεται μέσω συνεχών αλλαγών και συγκρίσεων της ισχύος εξόδου (perturbations and observations, P&Os).

Ο αλγόριθμος ανεύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος δίνεται στο λογικό διάγραμμα που ακολουθεί (σχ. 7.24).



Σχήμα 7.24 : Λογικό διάγραμμα αλγόριθμου υλοποίησης ελεγκτή P&O

Αφού γίνει αρχικοποίηση των παραμέτρων, ακολουθεί μέτρηση της τάσης και του ρεύματος στην είσοδο του μετατροπέα ώστε να υπολογιστεί η ισχύς εξόδου του ϕ/β , P_{pv} . Η τιμή αυτή συγκρίνεται με την προηγούμενη P_{old} . Αν η P_{pv} είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη τότε το πρόσημο της μεταβολής του ρεύματος αναφοράς ΔI_{ref} παραμένει ίδιο και προστίθεται στο I_{ref} . Αντίστοιχα με τη μεταβολή ΔI_{ref} μεταβάλλεται και ο λόγος κατάτμησης ΔD . Αντίθετα, όταν η P_{pv} είναι μικρότερη από την P_{old} , τότε το πρόσημο της μεταβολής του ρεύματος αναφοράς ΔI_{ref} αλλάζει 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 συνεχίσει να συμπληρώνεται.

Η μεταβολή του λόγου κατάτμησης υπολογίζεται ως εξής:

$$D_t = D_{t-1} + C_1 \frac{\Delta P_{t-1}}{\Delta D_{t-1}} \quad 7-12$$

όπου D_t και D_{t-1} είναι οι τιμές του λόγου κατάτμησης για τις επαναλήψεις t και $t-1$ αντίστοιχα (ισχύει $0 < D_t < 1$). Ο λόγος $\Delta P_{t-1}/\Delta D_{t-1}$ αναπαριστά την κλίση της ισχύος εξόδου στην επανάληψη $(t-1)$ και C_1 είναι η σταθερά που αντιπροσωπεύει το βήμα αλλαγής.

Η λογική της λειτουργίας του ελεγκτή P&O 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 να αντιστραφεί. Οι αρχικοποιήσεις των παραμέτρων, όπως το βήμα αλλαγής και η περίοδος εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι εξαιρετικής σημασίας για τη συμπεριφορά του συστήματος. Η μέθοδος δεν ενδείκνυται για συστήματα που υπάρχει μεγάλη διακύμανση της τάσης. Ωστόσο σε ϕ/β συστήματα στα οποία δεν υπάρχει μεγάλη διακύμανση της τάσης της παραγόμενης ισχύος λόγω της ομοιόμορφης κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας και οι χρονικές καθυστερήσεις θεωρούνται αμελητέες μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Πλεονεκτήματα του ελεγκτή είναι πως δεν επηρεάζεται από ανακρίβειες της χαρακτηριστικής καμπύλης της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, καθώς και τυχόν αλλαγές αυτής με την πάροδο του χρόνου και επιπλέον το μοντέλο υλοποίησης της μεθόδου δεν είναι πολύπλοκο ως προς τον σχεδιασμό αλλά και τη λειτουργία του.

7.5 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε η σχεδίαση του διαχειριστικού ελέγχου του αυτόνομου υβριδικού συστήματος ελέγχου. Κύριοι στόχοι του ελέγχου είναι **η ικανοποίηση του ισοζυγίου ισχύος, η αξιοπιστία της παροχής ισχύος καθώς και η αποδοτική και οικονομική λειτουργία του συστήματος**. Ο βασικός ελεγκτής του συστήματος που υλοποιεί τον αλγόριθμο ελέγχου βασίζεται στην ασαφή λογική που **παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους**. Ο ασαφής ελεγκτής που σχεδιάστηκε έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε αντίστοιχο αυτόνομο υβριδικό σύστημα στα πλαίσια της βελτιστοποίησης της απόκρισης του συστήματος κατά τη χρονική διάρκεια μίας ημέρας ή μεγαλύτερων χρονικών διαστημάτων.

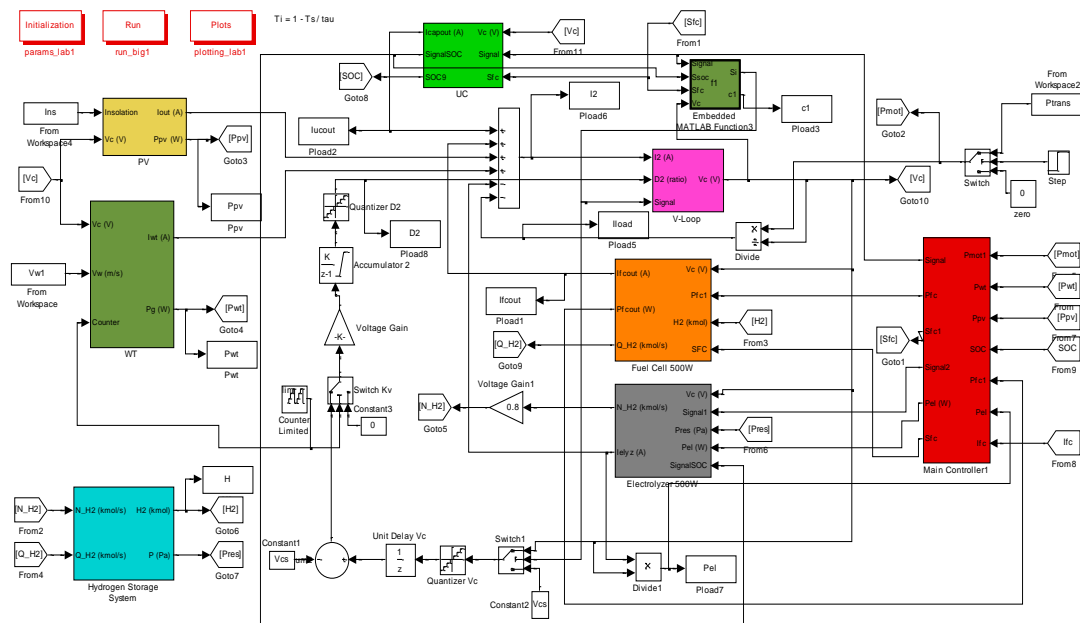
8 Προσομοίωση λειτουργίας συστήματος με τον προτεινόμενο έλεγχο και σύγκριση με υφιστάμενη τεχνική ελέγχου

8.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η προσομοίωση της λειτουργίας του αυτόνομου υβριδικού σταθμού ΑΠΕ- Υδρογόνου στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB. Στόχος είναι να μελετηθεί η απόκριση του μοντέλου του συστήματος σε φαινόμενα μεγάλης χρονικής διάρκειας, και επιπροσθέτως να αξιολογηθεί η απόκριση του παρόντος προτεινόμενου ελέγχου σε σύγκριση με υφιστάμενες τεχνικές ελέγχου που μελετώνται στην βιβλιογραφία. Αρχικά, αξιολογείται η λειτουργία του συστήματος κατά τη διάρκεια ενός 24ωρου με χρήση πραγματικών δεδομένων για τις χρονοσειρές ανέμου – ηλιακής ακτινοβολίας και την ημερήσια καμπύλη φορτίου. Στη συνέχεια, προσομοιώνεται η λειτουργία του συστήματος με βάση υφιστάμενη τεχνική ελέγχου για τα ίδια δεδομένα ζήτησης φορτίου και χρονοσειρών ανέμου – ηλιακής ακτινοβολίας και παρατίθεται συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δύο τεχνικών ελέγχου.

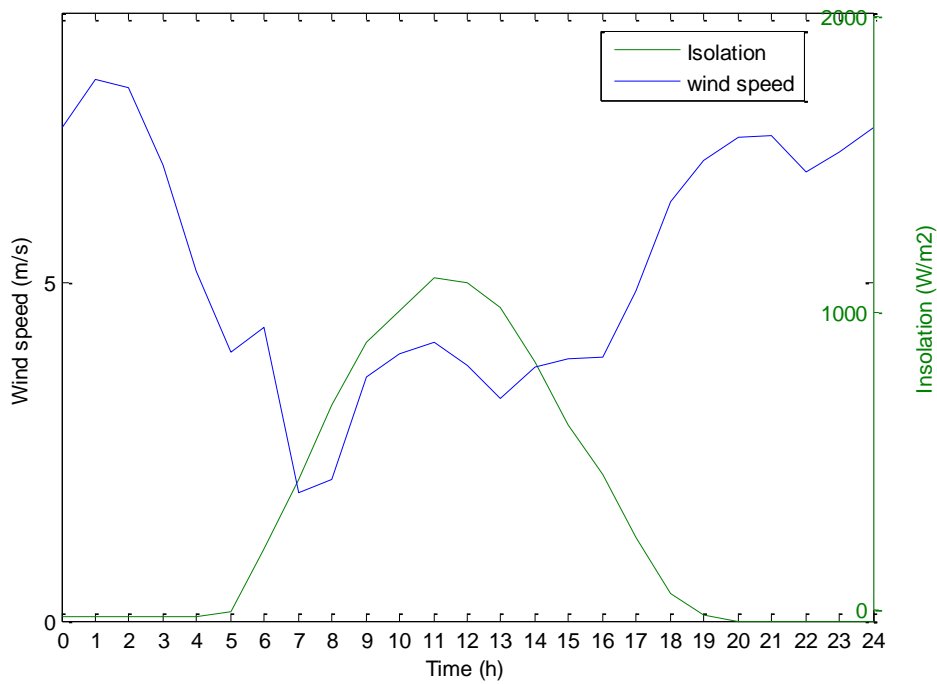
8.2 Προσομοίωση λειτουργίας υβριδικού συστήματος

Το μοντέλο του υβριδικού συστήματος που αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια και σχεδιάστηκε στο περιβάλλον SIMULINK/MATLAB παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα.

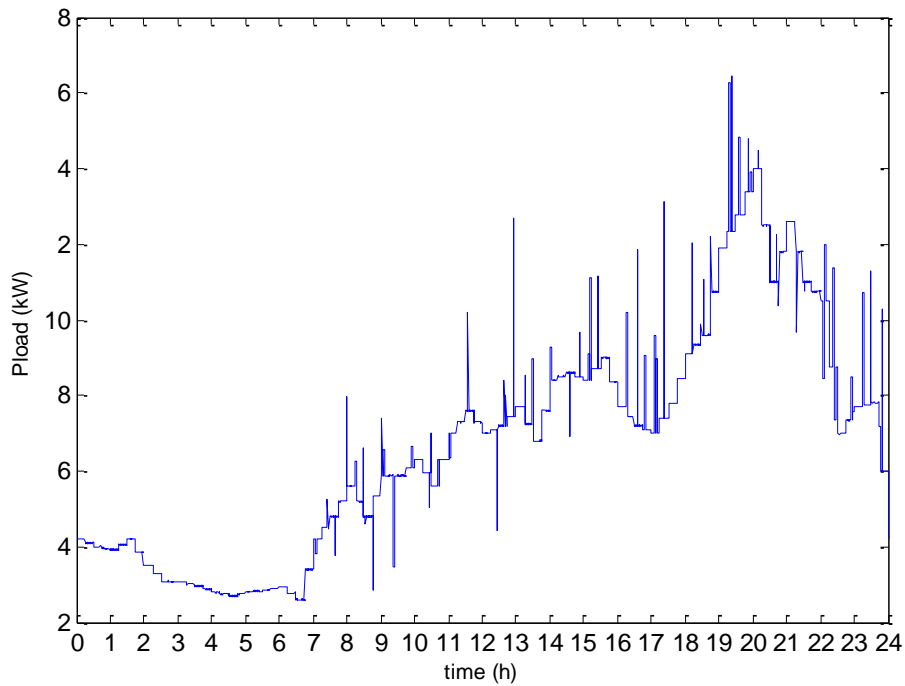


Σχήμα 8.1 : Μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος στο περιβάλλον SIMULINK.

Είσοδοι στο μοντέλο αποτελούν οι ημερήσιες χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας και η ημερήσια καμπύλη φορτίου, οι οποίες φαίνονται στα σχ. 8.2 και 8.3 αντίστοιχα.



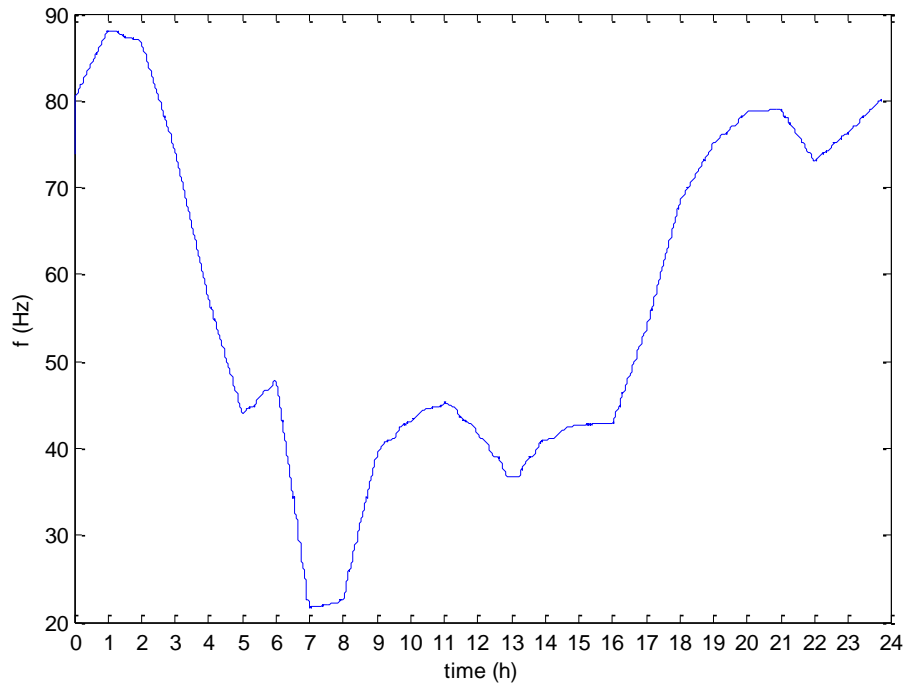
Σχήμα 8.2 : Ημερήσιες χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου – ηλιακής ακτινοβολίας



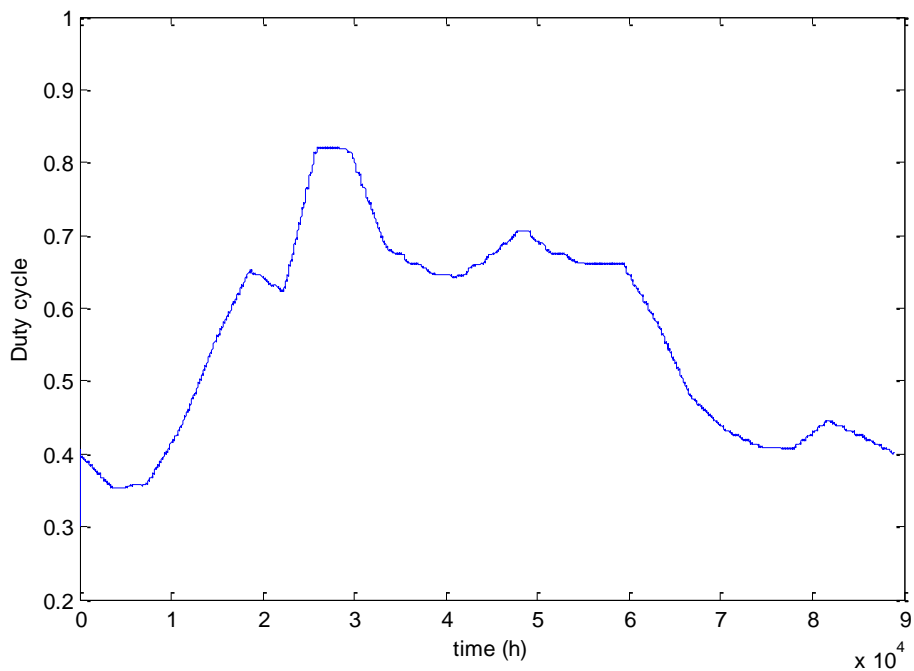
Σχήμα 8.3 : Ημερήσια καμπύλη φορτίου

Προκειμένου να μεγιστοποιείται η παραγωγή ισχύος από τις κύριες ενεργειακές πηγές (Α/Γ και Φ/Β) για τις διάφορες τιμές της ταχύτητας ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται η τεχνική του έλεγχου ανεύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT), που έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 8.

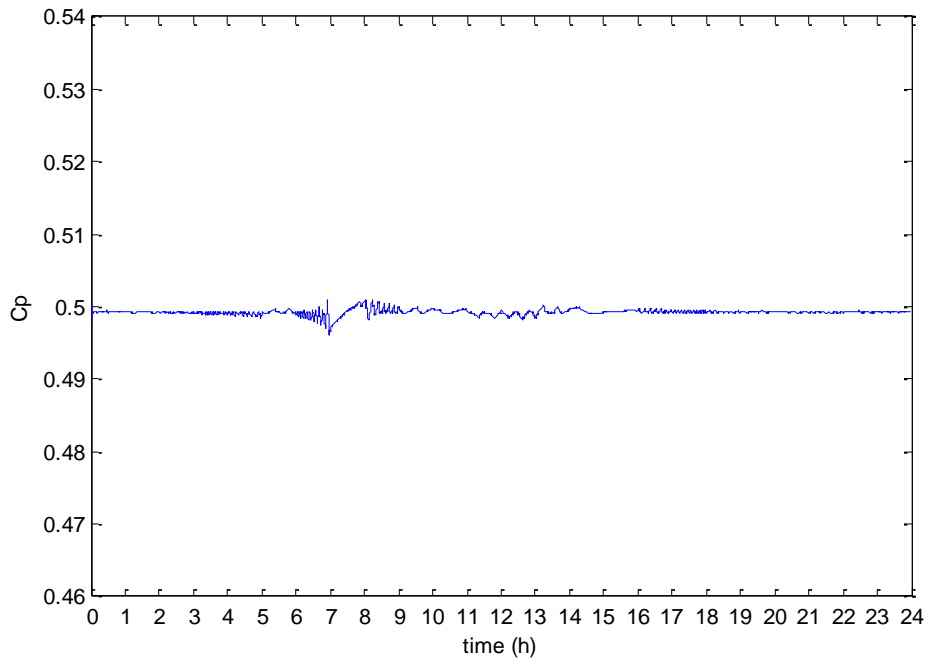
Συγκεκριμένα στο σχ. 8.4 παρατίθεται η συχνότητα περιστροφής του άξονα της Α/Γ. Το σχ.8.5 δείχνει τη μεταβολή του λόγου κατάτμησης του μετατροπέα ΣΡ με βάση τον οποίο προσαρμόζεται η ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας στις εκάστοτε ταχύτητες ανέμου. Από το σχ. 8.6 καταδεικνύεται πως ο αεροδυναμικός συντελεστής διατηρείται κοντά στην μέγιστη τιμή του (0.5) προκειμένου η Α/Γ να αποδίδει τη μέγιστη ισχύ.



Σχήμα 8.4 : Συχνότητα περιστροφής άξονα Α/Γ

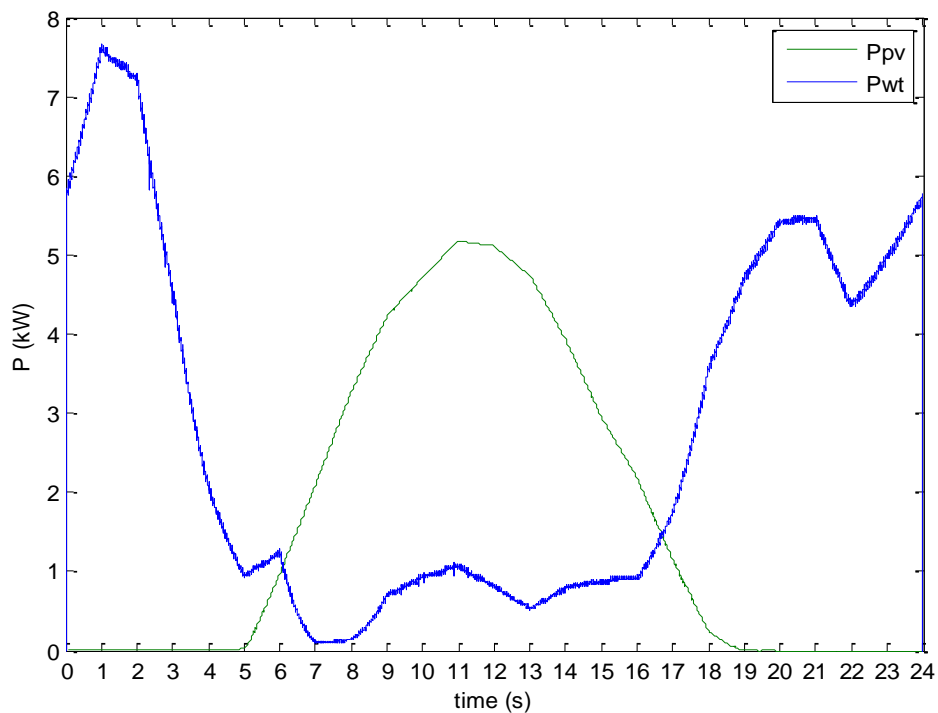


Σχήμα 8.5 : Λόγος κατάτμησης του μετατροπέα ΣΡ της Α/Γ

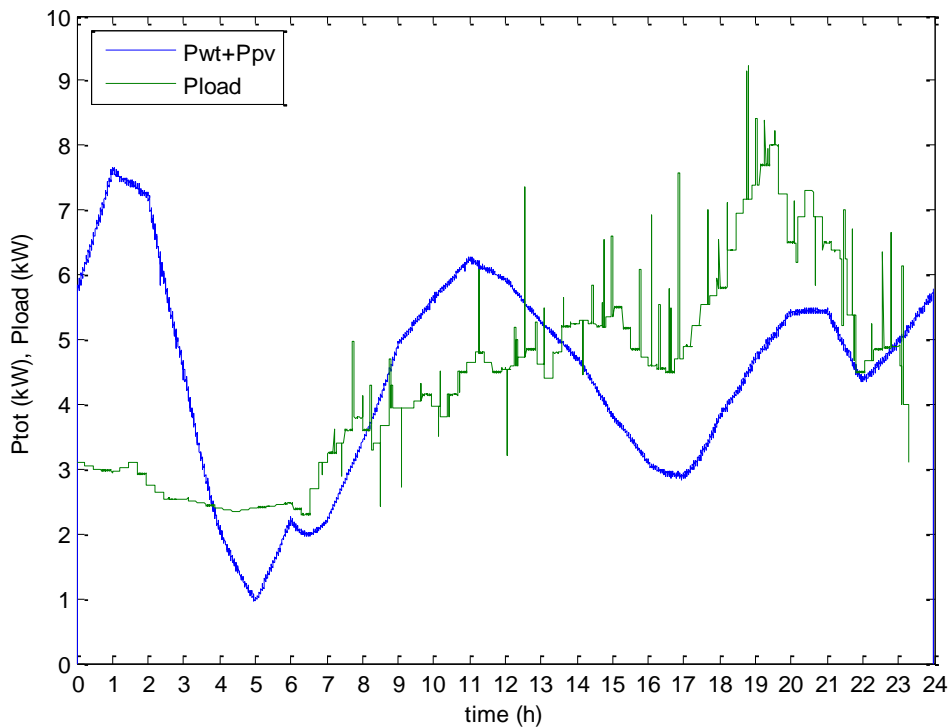


Σχήμα 8.6 : Αεροδυναμικός συντελεστής A/Γ

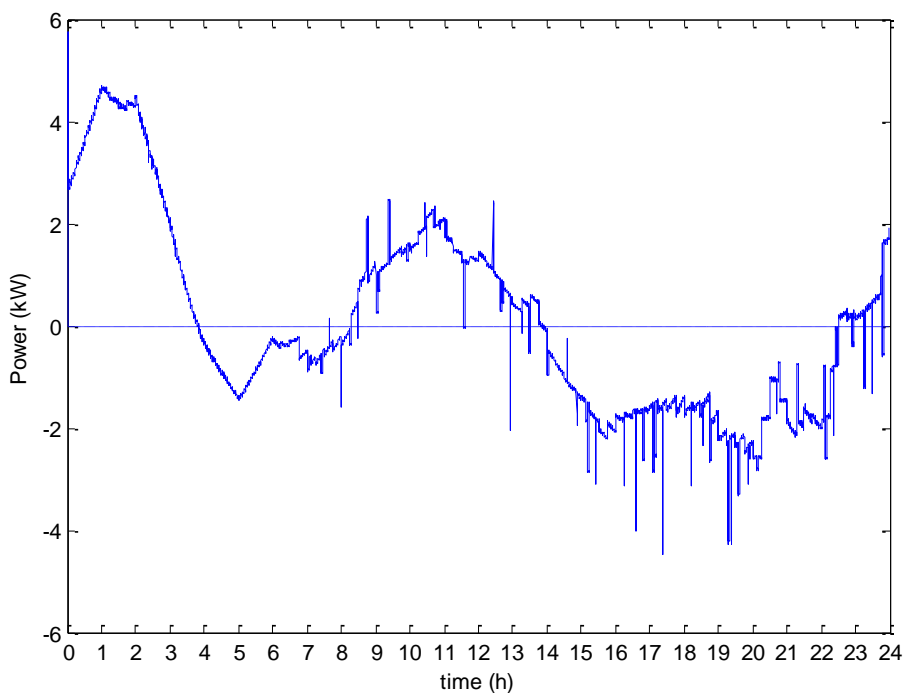
Αξιοποιώντας το μοντέλο υπολογίστηκε η παραγόμενη ισχύς από τις κύριες ενεργειακές πηγές με βάση τις χρονοσειρές ταχύτητας ανέμου – ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα στο σχ. 8.7 η παραγόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας αναπαρίστανται με τη μπλε καμπύλη και η παραγόμενη ισχύς της φωτοβολταϊκής γεννήτριας με την πράσινη. Το άθροισμα της ισχύος των κύριων ενεργειακών πηγών παρουσιάζεται μαζί με την ζήτηση φορτίου του συστήματος, με την μπλε και την πράσινη γραμμή αντίστοιχα στο σχ. 8.8.



Σχήμα 8.7 : Παραγόμενη ισχύς A/Γ (μπλε) και Φ/Β (πράσινη)



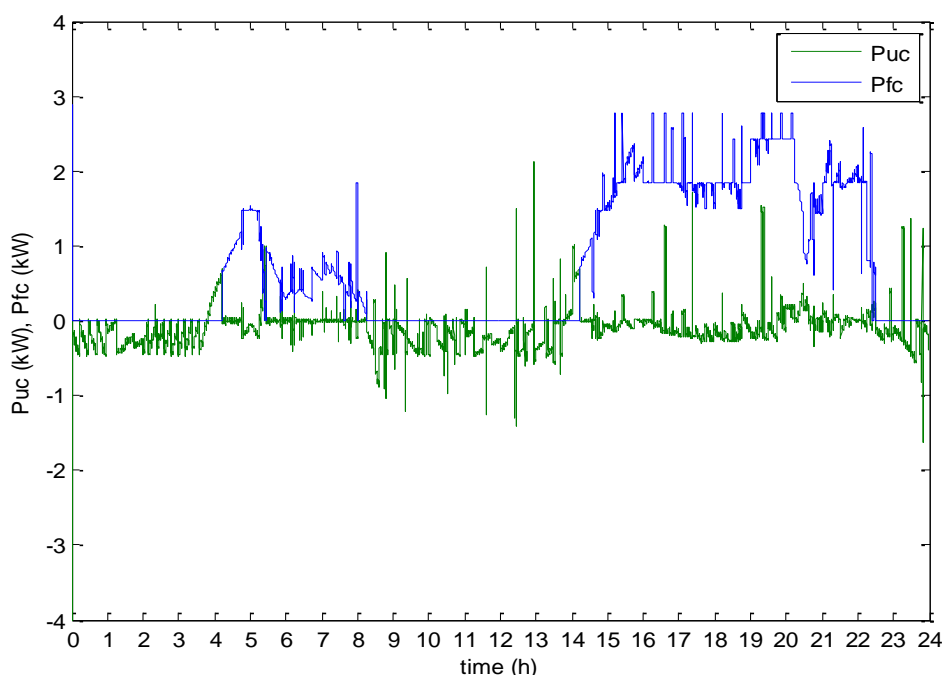
Σχήμα 8.8 : Ισχύς κύριων ενεργειακών πηγών (μπλε) και ημερήσια καμπύλη φορτίου (πράσινη)



Σχήμα 8.9 : Περίσσεια – Έλλειμμα ισχύος

Σε περίπτωση που η ζήτηση ισχύος του φορτίου ικανοποιείται εξ' ολοκλήρου από την ανεμογεννήτρια και τη Φ/Β γεννήτρια παρουσιάζεται περίσσεια ισχύος, διαφορετικά, παρουσιάζεται έλλειμμα ισχύος. Κατά τη διάρκεια του 24ωρου η περίσσεια και το έλλειμμα ισχύος εναλλάσσονται, όπως φαίνεται και στο σχ. 8.9. Συγκεκριμένα περίσσεια ισχύος

παρατηρείται σε δύο χρονικές περιόδους, μία μεγάλη περίσσεια μεταξύ 0.00h και 4.00h λόγω της παραγωγής της Α/Γ και μία μικρότερη μεταξύ 9.00h και 14.00h λόγω της παραγωγής της Φ/Β γεννήτριας. Σύμφωνα με τη λειτουργία του συστήματος, η περίσσεια αυτή θα πρέπει να αποθηκευτεί στην βραχυπρόθεσμη ή στην μακροπρόθεσμη αποθήκευση. Αντιθέτως, έλλειμμα παρατηρείται μεταξύ 4.00h και 8.00h και ένα μεγαλύτερο μεταξύ 14.00h και 22.00h λόγω της αιχμής του φορτίου κατά το απόγευμα-βράδυ. Το έλλειμμα σε κάθε περίπτωση πρέπει να ικανοποιηθεί από την κυψέλη καυσίμου και τους υπερπυκνωτές. Επίσης, παρατηρούνται μεταβατικά φαινόμενα εναλλαγής περίσσειας - ελλείμματος μεταξύ 8.00h και 9.00h, 13.00h και 14.00h και 22.00h και 24.00h.

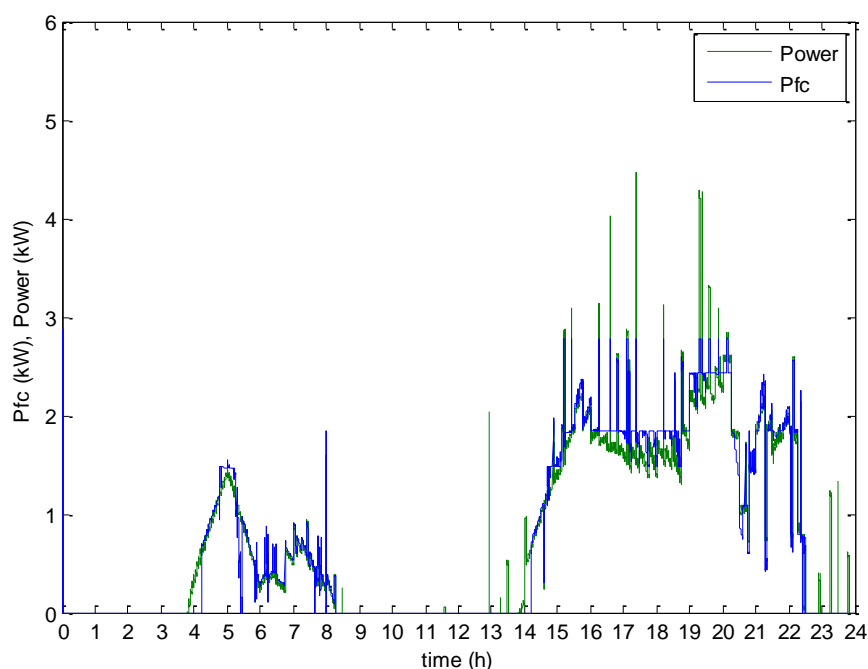


Σχήμα 8.10 : Παραγόμενη ισχύς κυψέλης καυσίμου (μπλε) και υπερπυκνωτών (πράσινο)

Στο σχ. 8.10 παρατίθενται τα διαγράμματα της ισχύος εξόδου των υπερπυκνωτών (πράσινη καμπύλη) και της κυψέλης καυσίμου (μπλε καμπύλη), οι οποίες καλύπτουν τη ζήτηση ισχύος, όταν αυτή δεν ικανοποιείται από τις κύριες ενεργειακές πηγές. Όσον αφορά στους υπερπυκνωτές οι αρνητικές τιμές υποδηλώνουν φόρτιση των υπερπυκνωτών και οι θετικές εκφόρτιση. Πρέπει να επισημανθεί πως το αρχικό επίπεδο φόρτισης ορίστηκε στο 75%. Από το σχήμα διακρίνουμε πως η κυψέλη καυσίμου ανοίγει δύο φορές τη μέρα, μεταξύ 4.00h και 8.00h και μεταξύ 14.00h-22.50h. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η χρήση της σε μεταβατικά φορτία με τη βοήθεια του αλγόριθμου διαχείρισης.

Αντίστοιχα, οι υπερπυκνωτές τροφοδοτούν τα παροδικά φορτία (8.00h-9.00h, 11.00h-14.00, 22.00h-24.00h) καθώς τα μεταβατικά αυτά φορτία διαρκούν πολύ μικρό χρονικό διάστημα (της τάξης των 2min) και ταυτόχρονα η φόρτιση των υπερπυκνωτών είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα. Συνεπώς, αποφεύγεται η ασύμφορη έναρξη της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου. Επίσης, παρατηρούμε πως όταν υπάρχει περίσσεια ισχύος, αυτή διοχετεύεται στους υπερπυκνωτές έως ότου να επιτευχθεί η πλήρης φόρτισή τους. Στα διαστήματα λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου από το διάγραμμα παρατηρείται πως οι

υπερπυκνωτές είτε φορτίζονται είτε εκφορτίζονται. Όσο το επίπεδο φόρτισής τους είναι μεγαλύτερο από 25% οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν αιχμές που δεν είναι επιθυμητό ή δεν είναι σε θέση να καλύψει η κυψέλη καυσίμου. Επιπρόσθετα, σε ορισμένα επίπεδα ζήτησης ισχύος η κυψέλη καυσίμου παράγει περισσότερη ισχύ από την απαιτούμενη καθώς με αυτό τον τρόπο δεν μειώνεται η απόδοσή της, και η πλεονάζουσα ισχύς διοχετεύεται στους υπερπυκνωτές προκειμένου να ανταποκριθούν στη συνέχεια στις αιχμές του φορτίου σύμφωνα με τον αλγόριθμο διαχείρισης.

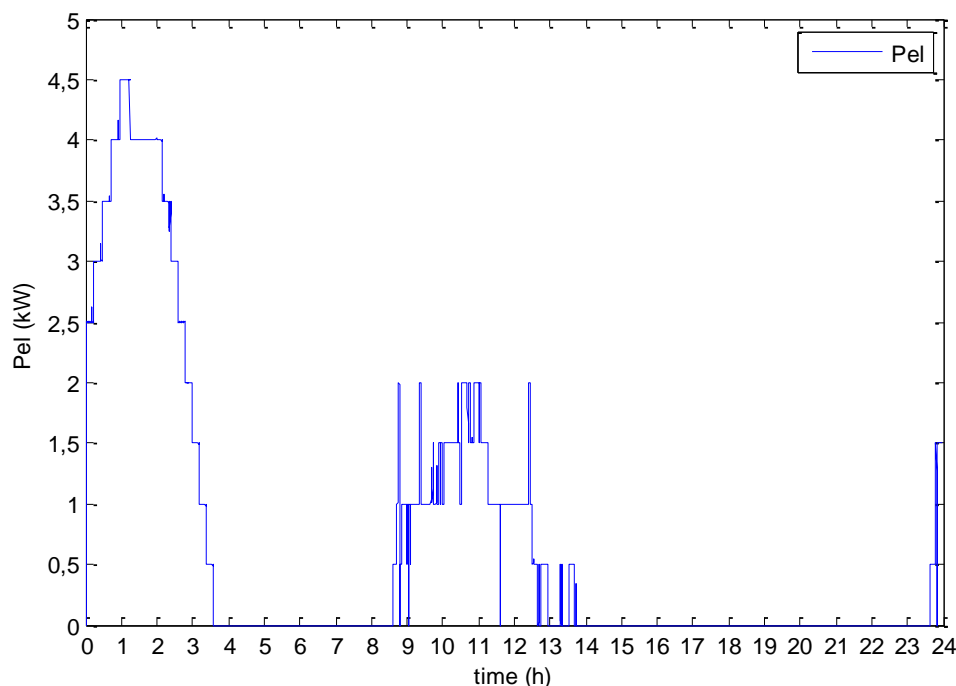


Σχήμα 8.11 : Παραγόμενη ισχύς κυψέλης καυσίμου (μπλε) και ζήτηση φορτίου (πράσινο)

Στο σχ. 8.11 παρατίθενται η ισχύς της κυψέλης καυσίμου (μπλε καμπύλη) και η απαιτούμενη ζήτηση ισχύος που πρέπει να καλυφθεί από την κυψέλη και τους υπερπυκνωτές (πράσινη καμπύλη). Από το διάγραμμα παρατηρείται πως η κυψέλη καυσίμου παρέχει ισχύ μέχρι 3kW. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του διαχειριστικού ελέγχου του συστήματος σύμφωνα με τον οποίο, όταν το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών είναι μεγαλύτερο του 25% και η ζήτηση ισχύος ξεπερνά τα 300W, τότε την επιπλέον ισχύ των 3kW την παρέχουν οι υπερπυκνωτές προκειμένου να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα η απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε πως ο έλεγχος επιτυγχάνει να μην ανοίγει η κυψέλη καυσίμου σε μεταβατικά φορτία.

Το σχ. 8.12 δείχνει την ισχύ του ηλεκτρολύτη. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο διαχείρισης, ο ηλεκτρολύτης συνδέεται σε περίπτωση που υπάρχει περίσσεια ισχύος προς αποθήκευση και οι υπερπυκνωτές είναι πλήρως φορτισμένοι. 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 125W/s, όπως έχει ήδη περιγραφεί στην ενότητα 7.4.2. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται προβλήματα υπερπίεσης ή κίνδυνοι ανάμιξης των αερίων (υδρογόνο - οξυγόνο) στο εσωτερικό του ηλεκτρολύτη. Σε αυτή τη μελέτη τα επίπεδα ισχύος διαφέρουν κατά 500W, παρόλα αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε τιμή ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Η περίσσεια ισχύος που δεν μπορεί

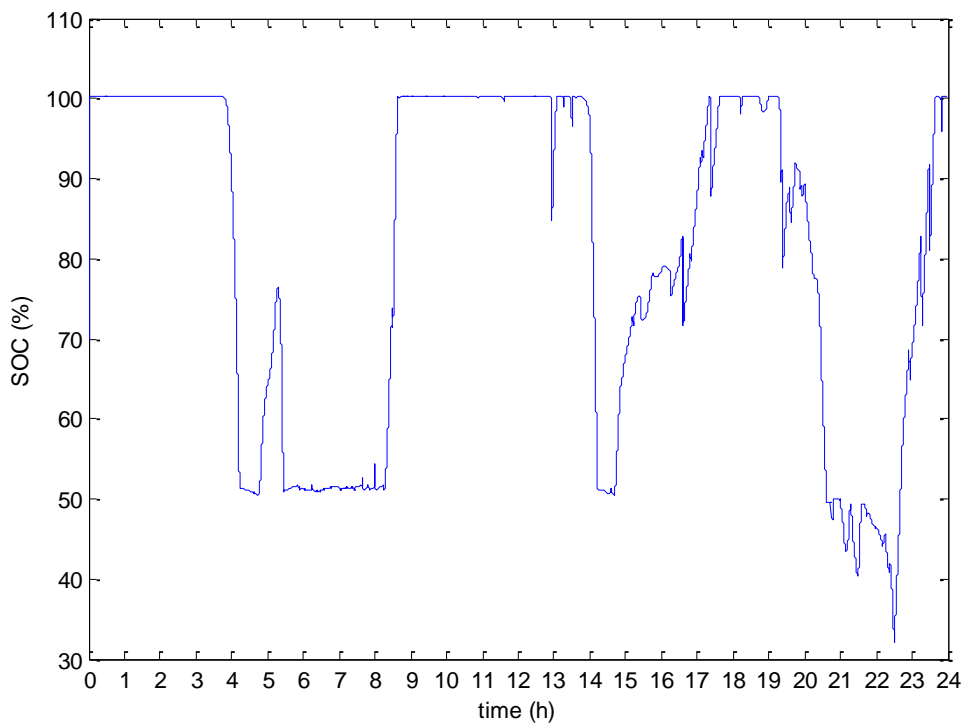
να απορροφηθεί από τον ηλεκτρολύτη λόγω του περιορισμού κλίσης καταναλώνεται στο ελεγχόμενο φορτίο.



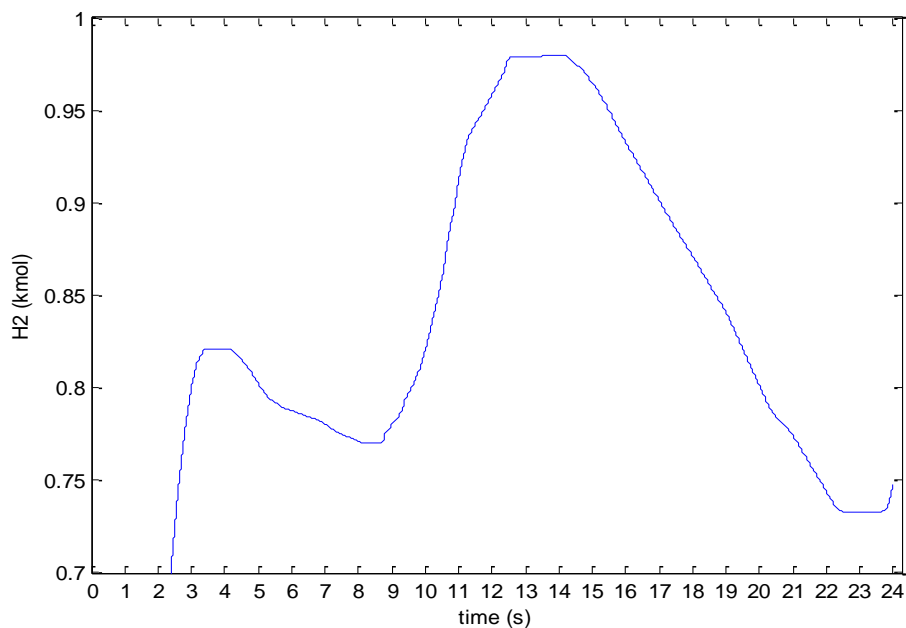
Σχήμα 8.12 : Παραγόμενη ισχύς ηλεκτρολύτη

Η ενέργεια αποθηκεύεται στο σύστημα με δύο μορφές : είτε ως ποσότητα υδρογόνου που περιέχεται στην δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου είτε ως φόρτιση των υπερπυκνωτών. Συγκεκριμένα, το σχ. 8.13 δείχνει το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών. Όπως παρατηρείται, αρχικά οι υπερπυκνωτές φορτίζονται για ένα μικρό χρονικό διάστημα μέχρι το επίπεδο φόρτισης να γίνει 100%. Μόλις παρουσιαστεί το πρώτο έλλειμμα ισχύος, οι υπερπυκνωτές εκφορτίζονται μέχρι περίπου το 50%. Στη συνέχεια, συνδέεται η κυψέλη καυσίμου. Μεταξύ 4.30h και 5.30 h (όσο υπάρχει ακόμα έλλειμμα), η κυψέλη καυσίμου παρέχει περισσότερη ισχύ από τη ζητούμενη, καθώς σε αυτά τα επίπεδα ισχύος η παροχή αυτής της επιπλέον ισχύος δεν κοστίζει ούτε σε απόδοση ούτε σε καύσιμο στην κυψέλη καυσίμου, με αποτέλεσμα η επιπλέον ισχύς να απορροφάται από τους υπερπυκνωτές και να τους φορτίζει. Αμέσως μετά οι υπερπυκνωτές εκφορτίζονται και το επίπεδο φόρτισης τους διατηρείται λίγο πάνω από το 50% για όσο χρόνο διαρκεί το πρώτο μεγάλο διάστημα ελλείμματος. Μόλις παρουσιαστεί η πρωινή περίσσεια ισχύος, οι υπερπυκνωτές ξαναφορτίζονται πλήρως και απλά χρησιμοποιούνται για την ικανοποίηση παροδικών φορτίσεων μέχρι τις 14.00. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το επόμενο μεγάλο χρονικό διάστημα ελλείμματος και επανασυνδέεται η κυψέλη καυσίμου. Κατά το διάστημα αυτό παρατηρείται πάλι φόρτιση των υπερπυκνωτών για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδότηση αιχμών του φορτίου (πάνω από 300W περίπου) προκειμένου να μην λειτουργεί η κυψέλη καυσίμου σε υψηλά φορτία και να μειώνεται η απόδοσή της. Όσο πλησιάζει το τέλος του 24ωρου και παρουσιάζονται μεταβατικά φορτία με κύρια τάση την ύπαρξη περίσσειας ισχύος (μεταξύ 22.30-24.00) οι υπερπυκνωτές φορτίζονται. Λόγω της μεγάλης διακύμανσης της τάσης των υπερπυκνωτών πρέπει να αποφεύγεται η εκφόρτιση

τους σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης. Στην παρούσα μελέτη το κατώτερο επίπεδο φόρτισης που παρατηρείται είναι περίπου 32%. Το τελικό επίπεδο φόρτισης είναι 100%, γεγονός που σημαίνει πως στο τέλος του 24ωρου υπάρχει περίσσεια αποθηκευμένης ενέργειας στους υπερπυκνωτές.



Σχήμα 8.13 : Επίπεδο φόρτισης υπερπυκνωτών



Σχήμα 8.14 : Ποσότητα αποθηκευμένου υδρογόνου στη δεξαμενή

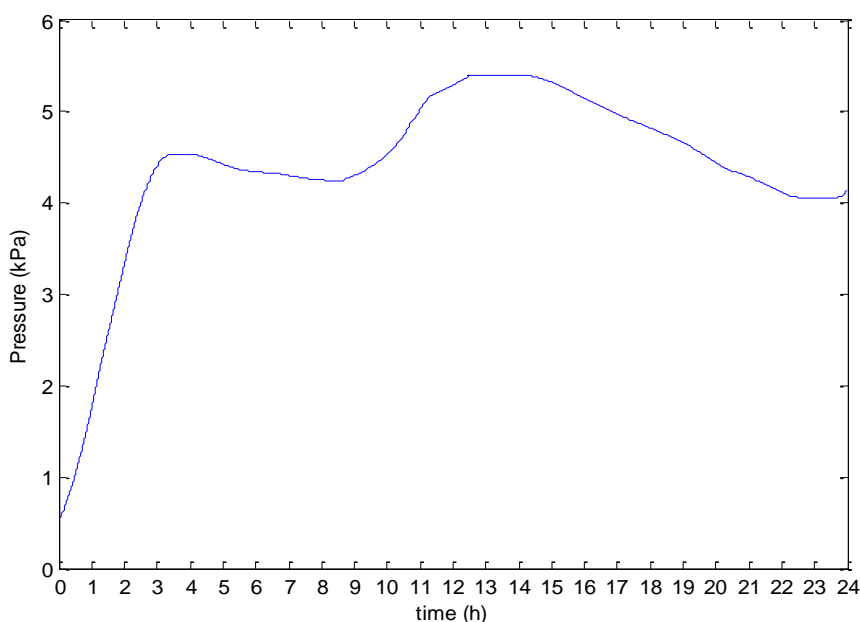
Η ποσότητα του υδρογόνου που είναι αποθηκευμένη στη δεξαμενή φαίνεται στο σχ. 8.14. Η ποσότητα του υδρογόνου στην δεξαμενή αυξάνεται για όσο χρόνο τίθεται σε

λειτουργία ο ηλεκτρολύτης. Η αύξηση πραγματοποιείται με βάση το ρυθμό παραγωγής από το νόμο του Faraday. Αντιθέτως, η ποσότητα του υδρογόνου στη δεξαμενή μειώνεται κατά τα διαστήματα λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου. Η κατανάλωση του υδρογόνου από την κυψέλη είναι ανάλογη με το ρυθμό κατανάλωσης (τη ροή του αντιδρώντος υδρογόνου) που περιγράφηκε στην ενότητα 5.2.2. Στο τέλος του 24ωρου παρατηρείται περίσσεια αποθηκευμένης ενέργειας σε υδρογόνο, γεγονός που συμβάλλει στην οικονομικότερη λειτουργία της κυψέλης.

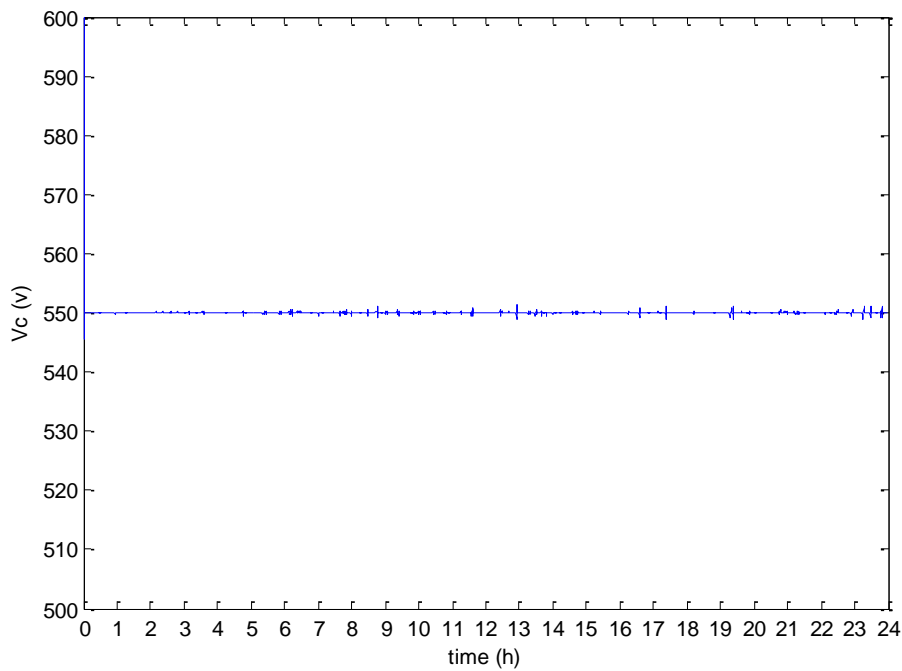
Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε πως το σύστημα **συσσωρεύει αποθηκευμένη ενέργεια** (τόσο στους υπερπυκνωτές όσο και στην δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου) στο τέλος του 24ωρου. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει η δυνατότητα κάλυψης από το σύστημα τόσο της ίδιας επαναλαμβανόμενης 24ωρου ζήτησης φορτίου όσο και ακόμα πιο απαιτητικής ζήτησης φορτίου.

Η πίεση της δεξαμενής αποθήκευσης υδρογόνου μεταβάλλεται ανάλογα με την ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου, όπως παρατηρείται από το σχ. 8.15.

Στο σχ. 8.16 παρατίθεται η τάση του ζυγού ΣΡ. Είναι προφανές πως επιτυγχάνεται σταθερότητα στην τάση καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, της οποίας η τιμή είναι στα 550V με διακυμάνσεις μηδαμινού μέτρου. Η σταθερότητα της τάσης του ζυγού ΣΡ επιβεβαιώνει τη σωστή διαχείριση του ισοζυγίου παραγωγής – ζήτησης ισχύος. Επιπλέον η σταθερότητα της τάσης αποδεικνύει πως εκτός από την ικανοποίηση του φορτίου εξασφαλίζεται και η ποιότητα ισχύος.

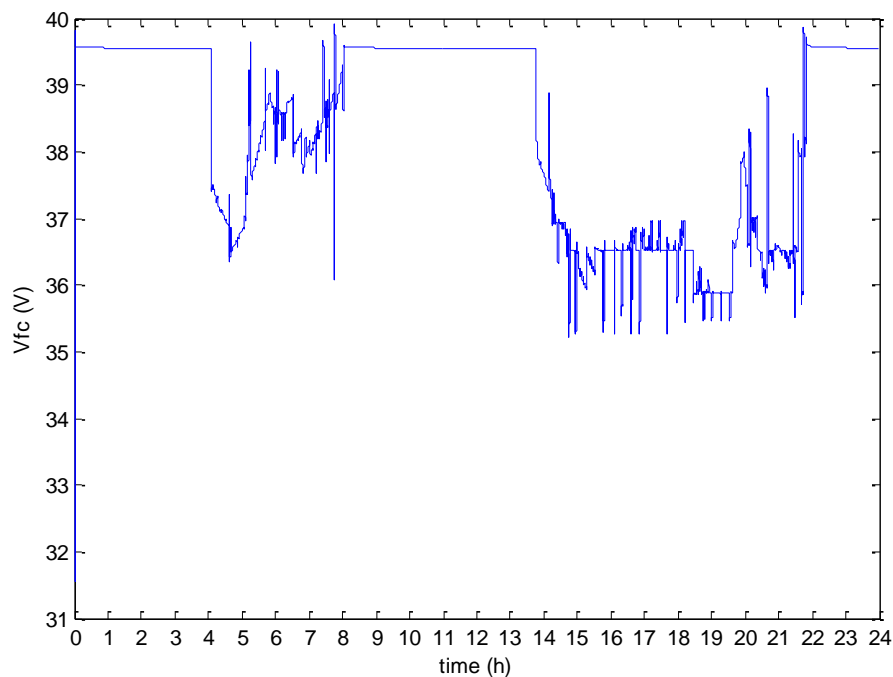


Σχήμα 8.15 : Πίεση δεξαμενής αποθήκευσης



Σχήμα 8.16 : Τάση ζυγού ΣΡ

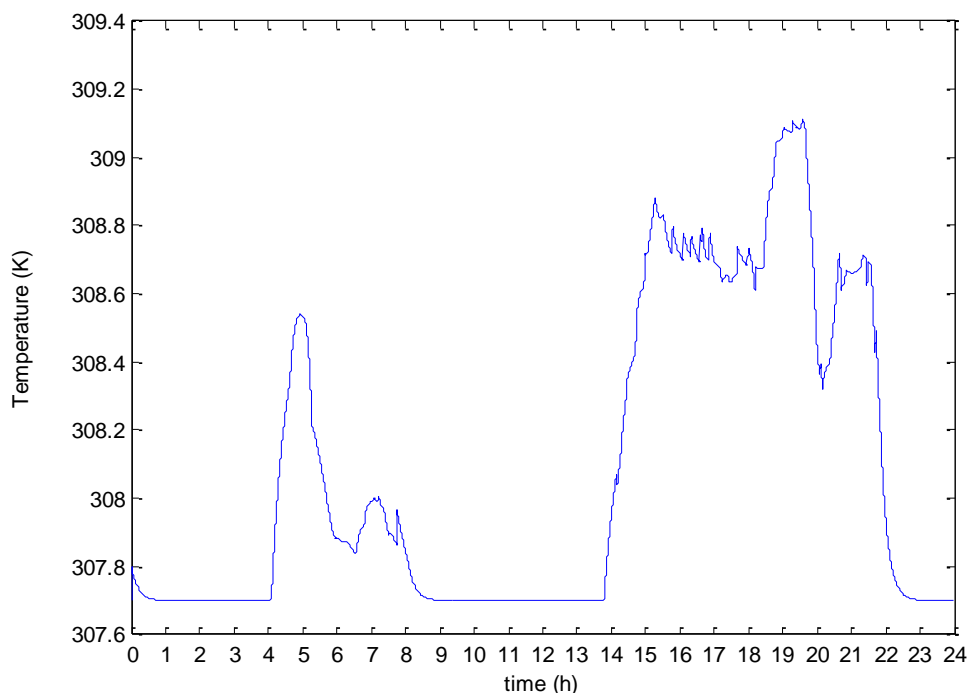
Μελετώντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κυψέλης παρατίθενται τα διαγράμματα της τάσης εξόδου της συστοιχίας και της θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης στα σχ. 8.17 και 8.18 αντίστοιχα.



Σχήμα 8.17 : Τάση εξόδου κυψέλης καυσίμου

Στο διάγραμμα που καταγράφεται η τάση εξόδου παρατηρείται πως η αύξηση του φορτίου της κυψέλης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης εξόδου. Όπως έχει προαναφερθεί η τάση της κυψέλης μειώνεται σε σχέση με την τάση μόνιμης κατάστασης

λόγω των καθυστερήσεων που υπάρχουν. Η λειτουργία της κυψέλης σε χαμηλά επίπεδα τάσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης, γεγονός που λήφθηκε υπόψη από τον έλεγχο, που υλοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Για το λόγο αυτό ανατίθεται στους υπερπυκνωτές να τροφοδοτούν τα υψηλά επίπεδα ζήτησης φορτίου, προκειμένου να διατηρείται όσο το δυνατόν υψηλότερα η τιμή της απόδοσης της κυψέλης.



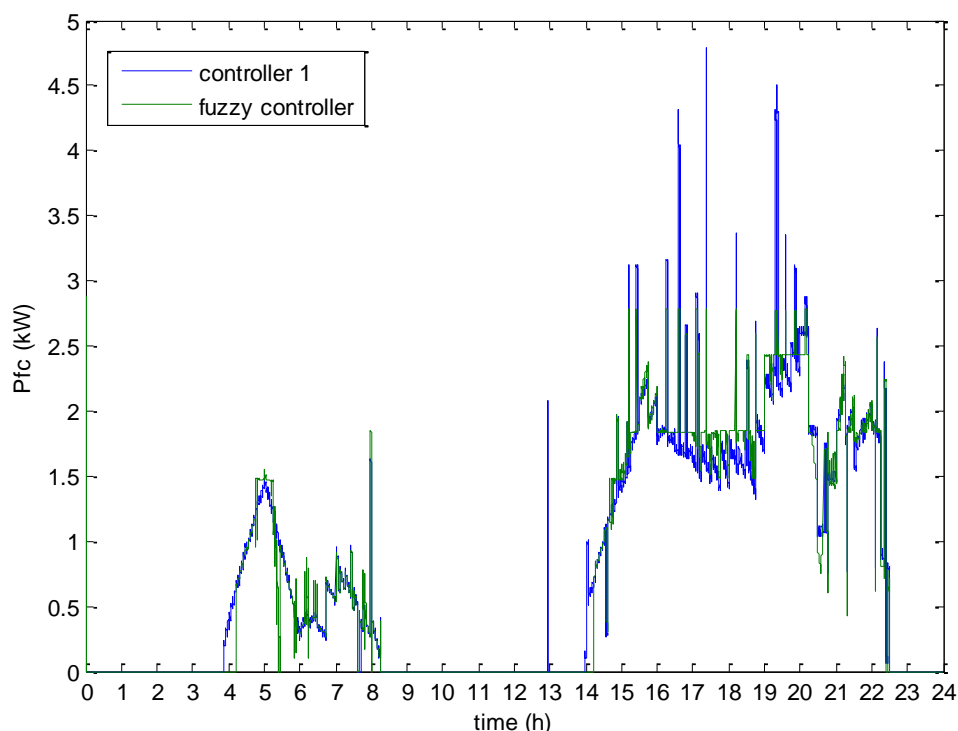
Σχήμα 8.18 : Θερμοκρασία κυψέλης καυσίμου

Από το διάγραμμα της θερμοκρασίας παρατηρείται πως η θερμοκρασία αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου της κυψέλης. Η αρχική θερμοκρασία θεωρήθηκε 307.7 K (θερμοκρασία δωματίου) ενώ από την καμπύλη της θερμοκρασίας προκύπτει πως η μέγιστη θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί η κυψέλη είναι περίπου 309.1K. Θεωρώντας πως τα επιτρεπτά όρια της θερμοκρασίας λειτουργίας είναι μεταξύ 273 και 373K προκύπτει πως η λειτουργία της κυψέλης, δεν έχει επιπτώσεις στην συγκεκριμένη φόρτιση εκτός από μία μικρή μείωση της απόδοσης στις εκκινήσεις της κυψέλης.

8.3 Σύγκριση της απόκρισης υβριδικού συστήματος με βάση υφιστάμενη ντετερμινιστική τεχνική ελέγχου

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η προσομοίωση της λειτουργίας του αυτόνομου υβριδικού συστήματος με βάση την υφιστάμενη ντετερμινιστή στρατηγική ελέγχου που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 6 και προέρχεται από την αναφορά [77]. Ο αλγόριθμος διαχείρισης του συστήματος που παρουσιάζεται στο σχ. 6.7 και επεξηγήθηκε στην αντίστοιχη ενότητα, εφαρμόζεται στο υβριδικό σύστημα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Ως δεδομένα εισόδου ελήφθησαν τα ίδια που αποτέλεσαν το αντικείμενο μελέτης για την απόκριση του συστήματος στην προηγούμενη ενότητα. Συγκεκριμένα, γίνεται αναλυτική συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δύο

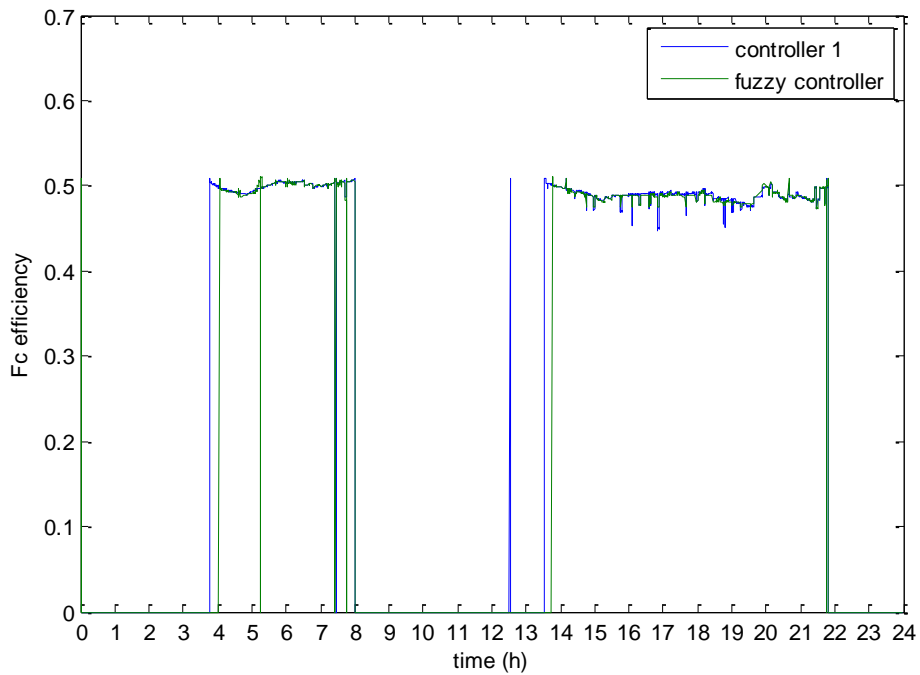
προσομοιώσεων. Η υφιστάμενη στρατηγική συμβολίζεται στα διαγράμματα ως “controller 1”.



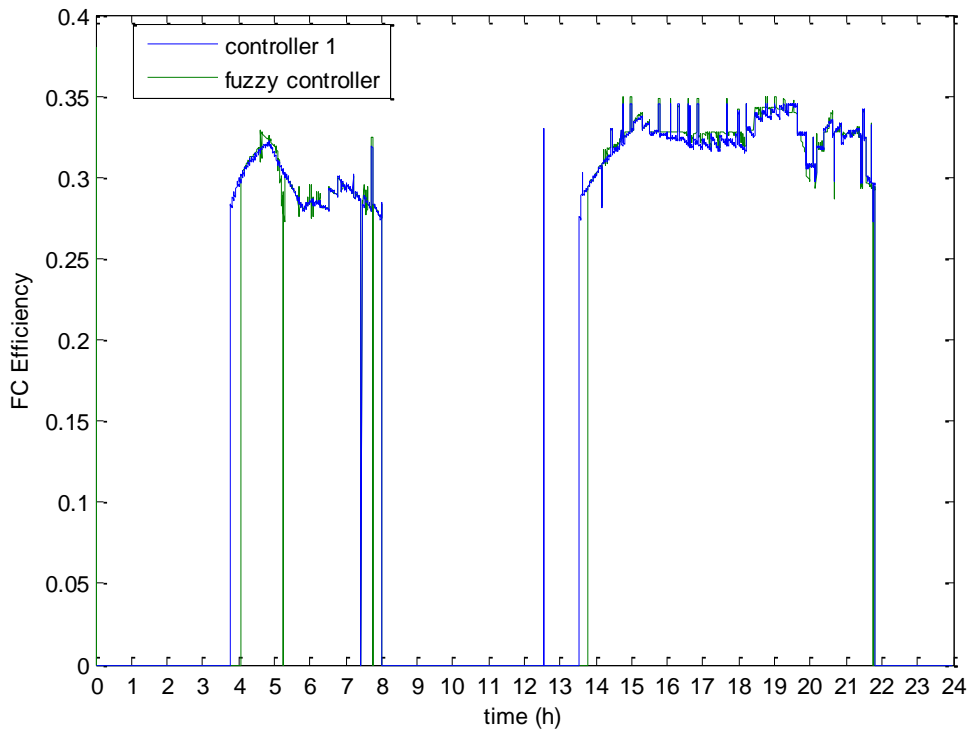
Σχήμα 8.19 : Λειτουργία της κυψέλης καυσίμου με και χωρίς την προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου

Στο σχ. 8.19 παρατίθενται τα διαγράμματα της ισχύος που παρέχει η κυψέλη καυσίμου με την προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου (πράσινη καμπύλη) και με την υφιστάμενη στη βιβλιογραφία (μπλε καμπύλη). Όπως είναι προφανές, η κυψέλη καυσίμου στην περίπτωση του συμβατικού ελέγχου ανοίγει περισσότερες φορές και για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Με την προτεινόμενη μέθοδο ελέγχου αποφεύγεται το άνοιγμα της κυψέλης για το μεταβατικό φορτίο στις 13.00h. Επίσης, η κυψέλη λειτουργεί για μικρότερο χρονικό διάστημα στην περίπτωση του ελεγκτή ασαφούς λογικής, με αποτέλεσμα να καταναλώνει λιγότερο υδρογόνο και να είναι οικονομικότερη η λειτουργία της. Παρατηρείται ακόμα πως στην περίπτωση του προτεινόμενου διαχειριστικού ελέγχου η κυψέλη καυσίμου παρέχει ισχύ μέχρι 300W. Την επιπλέον ισχύ των 300W την αποδίδουν οι υπερπυκνωτές, όπως έχει προαναφερθεί. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η μειωμένη απόδοση της κυψέλης. Παράλληλα, φαίνεται πως η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου έχει σαν αποτέλεσμα την εξομάλυνση μέχρι κάποιο βαθμό της ισχύος εξόδου της κυψέλης συγκριτικά με την ισχύ εξόδου στη λειτουργία με την ντετερμινιστική στρατηγική ελέγχου.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η απόδοση της κυψέλης καυσίμου την προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου (πράσινη καμπύλη) και με τη ντετερμινιστική στρατηγική ελέγχου (μπλε καμπύλη).



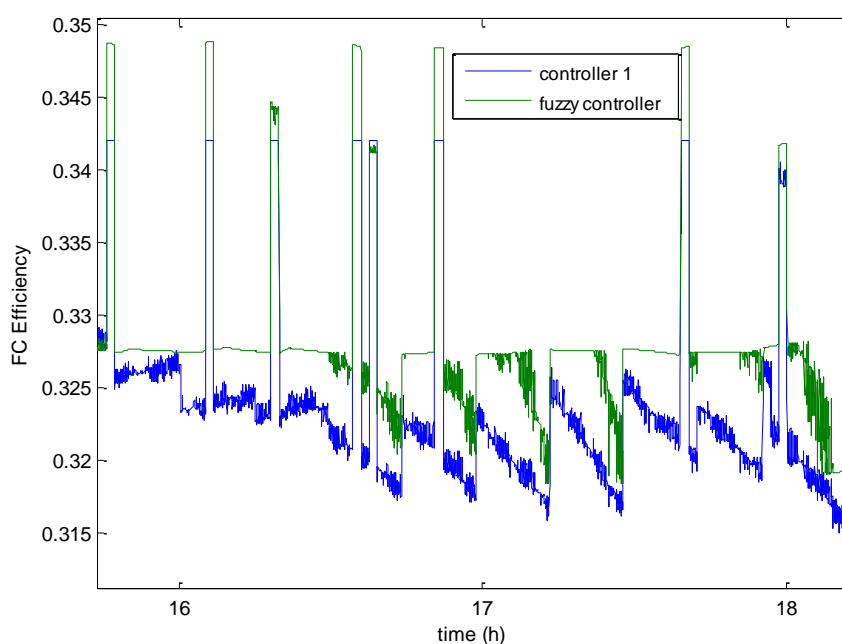
Σχήμα 8.20 : Απόδοση κυψέλης καυσίμου με και χωρίς την προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου



Σχήμα 8.21 : Συνδυασμένη απόδοση κυψέλης καυσίμου και μετατροπέα με και χωρίς την προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου

Στο σχήμα 8.21 φαίνεται η συνδυασμένη απόδοση της κυψέλης καυσίμου και του μετατροπέα με την προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου (πράσινη καμπύλη) και με τη

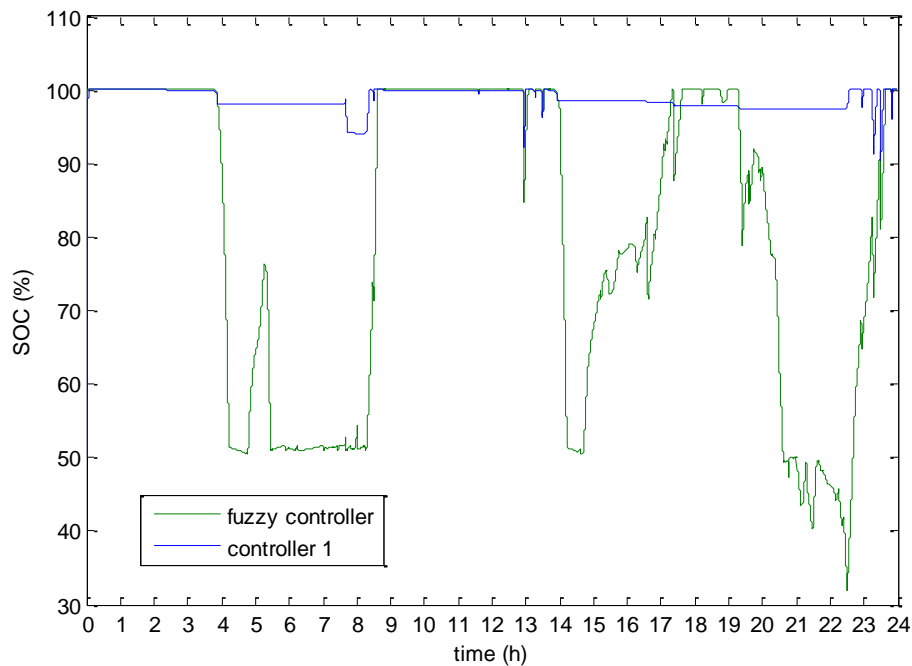
ντετερμινιστική στρατηγική ελέγχου (μπλε καμπύλη). Από τα διαγράμματα παρατηρείται πως η απόδοση λαμβάνει γενικότερα μεγαλύτερες τιμές στην περίπτωση του ελεγκτή που βασίζεται στην ασαφή λογική. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή της απόδοσης στην περίπτωση του ελεγκτή ασαφούς λογικής είναι 0,3172, ενώ η αντίστοιχη με τη ντετερμινιστική μέθοδο ελέγχου είναι 0,3141. Επομένως, η χρήση του ελεγκτή ασαφούς λογικής οδηγεί σε **αύξηση της τάξης του 0,99% όσον αφορά στη μέση απόδοση** του συστήματος κατά το χρονικό διάστημα του 24ώρου.



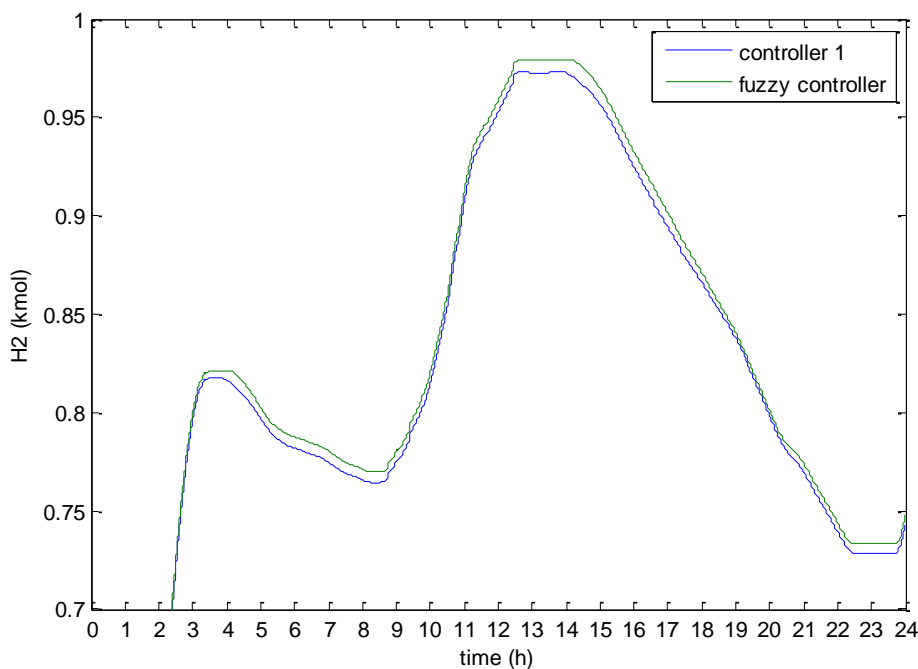
Σχήμα 8.22 : Συνδυασμένη απόδοση κυψέλης καυσίμου και μετατροπέα με και χωρίς την προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου για το χρονικό διάστημα 2 ωρών

Στο σχ. 8.22 παρατίθεται το διάγραμμα της συνδυασμένης απόδοσης της κυψέλης καυσίμου με το μετατροπέα μεταξύ 16.00-18.00. Από το ανωτέρω διάγραμμα γίνεται φανερό πως σε πολλά χρονικά διαστήματα η **αύξηση της απόδοσης φτάνει στο 2,4%** στην περίπτωση του προτεινόμενου διαχειριστικού ελέγχου με την ασαφή λογική. Η μέγιστη αύξηση που παρατηρείται στην απόδοση είναι της τάξης του 4%.

Η έξοδος του ελεγκτή ασαφούς λογικής έχει σαν προϋπόθεση τη διατήρηση του επιπέδου φόρτισης των υπερπυκνωτών σε ένα επιθυμητό διάστημα τιμών γύρω από το 75% και κάτω από το 95%. Σε αυτό το διάστημα επιτυγχάνεται η λειτουργία των υπερπυκνωτών με τη μεγαλύτερη απόδοση, όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα 5.4. Άμεση συνέπεια της λειτουργίας σε αυτό το διάστημα είναι η αύξηση της διάρκειας ζωής των υπερπυκνωτών [25][76]. Από το παρακάτω διάγραμμα (σχ. 8.23) γίνεται προφανές πως το επίπεδο φόρτισης των υπερπυκνωτών διατηρείται σε επιθυμητές τιμές στην περίπτωση του ελεγκτή ασαφούς λογικής σε αντίθεση με την απλή μέθοδο ελέγχου που το επίπεδο φόρτισης βρίσκεται κοντά στο 98% το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Το γεγονός πως πέφτει κάτω από το 50% οφείλεται στον αλγόριθμο διαχείρισης ο οποίος δίνει προτεραιότητα στην καλύτερη λειτουργία της κυψέλης.



Σχήμα 8.23 : Επίπεδο φόρτισης υπερπυκνωτών με και χωρίς την προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου



Σχήμα 8.24 : Ποσότητα αποθηκευμένου υδρογόνου με και χωρίς την προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου

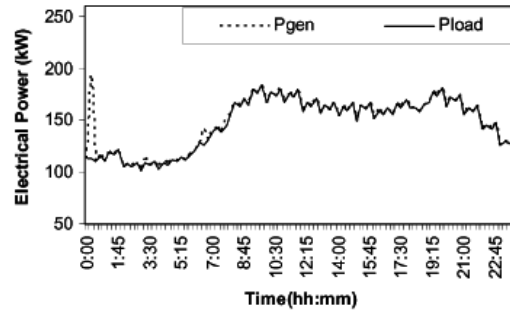
Το σχ. 8.24 δείχνει την αντίστοιχη ποσότητα του αποθηκευμένου H_2 (πράσινη καμπύλη για την ντετερμινιστική στρατηγική ελέγχου και (μπλε καμπύλη) για την προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου. Παρατηρείται πως με τον ελεγκτή ασαφούς λογικής επιτυγχάνεται μια μικρή **αύξηση στην ποσότητα του αποθηκευμένου υδρογόνου της τάξης των 0,01kmol ή 1,53%** κατά τη διάρκεια του 24ωρου. Ωστόσο, είναι φανερό πως σε συνεχή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, η διαφορά θα συσσωρεύεται και η

ποσότητα του αποθηκευμένου H₂ θα είναι αρκετά μεγαλύτερη με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση καυσίμου.

Ένας από τους κυριότερους στόχους του ελεγκτή ασαφούς λογικής αποτελεί η μείωση του μέσου κόστους λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου ώστε να είναι οικονομικά συμφέρουσα η λειτουργία της.

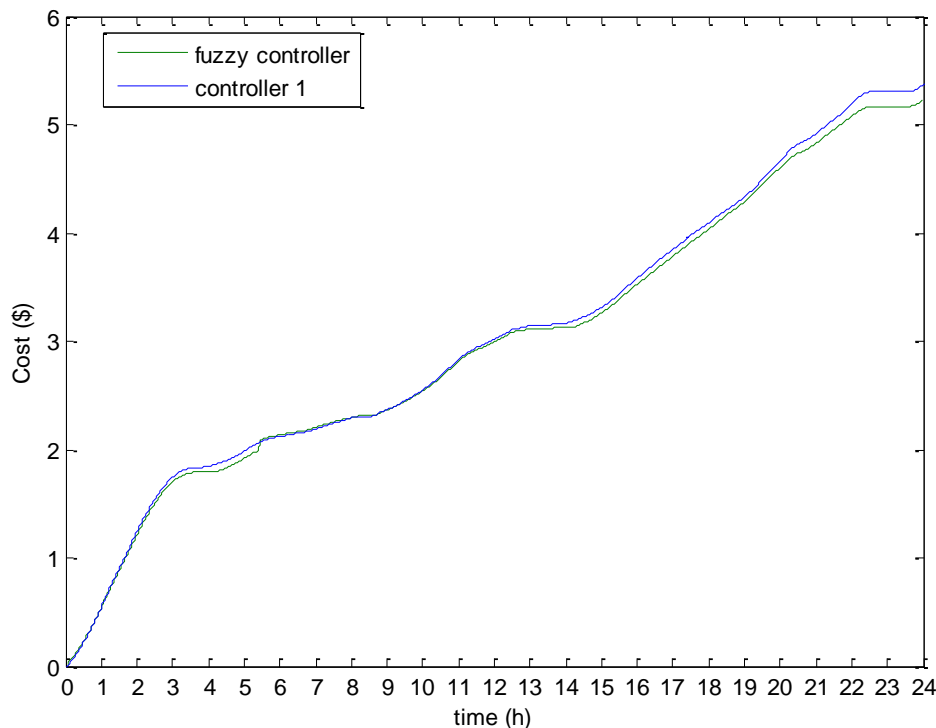
Το ημερήσιο κόστος λειτουργίας σε αντίστοιχα υβριδικά συστήματα για φορτία της τάξης εκατοντάδων kW που αναφέρονται στη βιβλιογραφία κυμαίνεται μεταξύ 500-600\$ [59] (σχ. 8.25).

Daily cost/income components (\$)	Base Case	Strategy 5 H_Selling	Strategy 6 H_Storing
Fuel cost	539.72	597.36	550.78
Purchased electricity cost	2.31	16.65	1.28
Sold electricity income	99.48	10.89	7.79
Residential natural gas cost	45.55	10.50	10.48
O&M cost	23.79	17.70	14.72
Income from sale of hydrogen	N/A	164.07	107.88
Hydrogen storing cost	N/A	14.47	16.27
Total cost	511.88	481.73	477.84
Total savings per year	0.0	11,004.75	12,424.60



Σχήμα 8.25 : Κόστος κυψέλης καυσίμου και το απαιτούμενο φορτίο

Η εφαρμογή της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου για αντίστοιχα μεγέθη φορτίου (kW) έχει ως αποτέλεσμα το ημερήσιο κόστος λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου να προκύπτει 460\$ που βρίσκεται σε παρόμοια επίπεδα με το κόστος που επιτυγχάνεται στη βιβλιογραφία.



Σχήμα 8.26 : Ημερήσιο κόστος λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου με και χωρίς την προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου

Προκειμένου να γίνει ακριβέστερη εκτίμηση σχετικά με το κόστος της κυψέλης καυσίμου, θα συγκριθούν για το φορτίο, που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική, η προτεινόμενη και η υφιστάμενη στρατηγική διαχείρισης ενέργειας. Το κόστος, που υπολογίζεται στο τέλος της ημέρας επιβεβαιώνει ότι επιτυγχάνεται εξοικονόμηση του κόστους λειτουργίας, όταν ο έλεγχος πραγματοποιείται με τον ελεγκτή ασαφούς λογικής (σχ. 8.26). Το κόστος στο τέλος της ημέρας με την προτεινόμενη μέθοδο προκύπτει 5.226\$ (πράσινη καμπύλη) σε σύγκριση με τον ντετερμινιστικό έλεγχο όπου η τιμή του κόστους 5.393 \$ (μπλε καμπύλη). Είναι προφανές πως επιτυγχάνεται μια **μείωση στο μέσο κόστος λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου της τάξης των 0,167\$ ή 3,19%** κατά τη διάρκεια της μίας ημέρας.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος που προέκυψαν με βάση τους δύο ελέγχους στο φορτίο των 24 ωρών, καθώς και η διαφορά τους σε τιμές επί τις εκατό.

Παράμετροι	Υφιστάμενος έλεγχος	Ελεγκτής ασαφούς λογικής	Διαφορά επί τις %
Μέγιστη ισχύς που αποδίδει η κυψέλη καυσίμου (W)	470	298	-
Μέσο επίπεδο φόρτισης υπερπυκνωτών - SOC (%)	78,2	98,7	-
Μέση συνδυασμένη απόδοση κυψέλης καυσίμου και μετατροπέα	0,314	0,317	0,99
Ημερήσιο κόστος λειτουργίας(\$)	5,393	5,226	3,19
Ποσότητα υδρογόνου (kmol)	0,741	0,751	1,35

Πίνακας 8.1 : Συγκριτική παρουσίαση παραμέτρων συστήματος με τις δύο στρατηγικές ελέγχου

8.4 Συμπεράσματα υλοποίησης προσομοίωσης με βάση την στρατηγική ελέγχου της παρούσας εργασίας

Η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου προορίζεται για τον έλεγχο της λειτουργίας ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο ικανοποιεί τη ζήτηση ισχύος ενός φορτίου. Η υλοποίηση της στρατηγικής ελέγχου με τον ελεγκτή ασαφούς λογικής προσφέρει αρκετές δυνατότητες, καθώς αυτοματοποιεί την μετατροπή των χαρακτηριστικών και των προδιαγραφών του συστήματος σε μοντέλο, που αποκρίνεται αποτελεσματικά.

Ο ελεγκτής ασαφούς λογικής μπορεί εύκολα να υποστεί αλλαγές τόσο στους κανόνες ασαφούς λογικής όσο και στις μεταβλητές εισόδου και εξόδου του χωρίς να «αλλοιωθεί» η λογική, σύμφωνα με την οποία σχεδιάστηκε για να λειτουργεί εύρυθμα το υβριδικό σύστημα. Συνεπώς, σε περίπτωση αλλαγής του φορτίου, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις του φορτίου μπορούν να τροποποιηθούν κατάλληλα τα σύνολα των μεταβλητών και οι κανόνες του ελεγκτή ασαφούς λογικής προκειμένου να παραμείνει το

ίδιο αποτελεσματικός. Επιπροσθέτως, παρέχεται η δυνατότητα περαιτέρω βελτίωσης της απόκρισης του συστήματος προσθέτοντας νέες παραμέτρους ελέγχου ή νέους κανόνες.

Με βάση τα παραπάνω ο ασαφής ελεγκτής που υλοποιεί τον αλγόριθμό του διαχειριστικού ελέγχου, έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε αντίστοιχο αυτόνομο υβριδικό σύστημα στα πλαίσια της βελτιστοποίησης της απόκρισης του συστήματος κατά τη χρονική διάρκεια μίας ημέρας.

Συνοπτικά η προτεινόμενη μέθοδος του ελεγκτή ασαφούς λογικής παρουσιάζει ουσιώδη πλεονεκτήματα σε σχέση με τον απλό δομημένο αλγόριθμο ελέγχου που χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία:

- **Αύξησης της απόδοσης** του συστήματος.
- Βελτίωση της λειτουργίας των διατάξεων και **αύξηση του προσδοκώμενου χρόνου ζωής τους.**
- **Παρακολούθηση του κόστους σε πραγματικό χρόνο και μείωση** του μέσου κόστους λειτουργίας του συστήματος.
- Λειτουργία του συστήματος βάσει κανόνων, οι οποίοι **προσαρμόζονται εύκολα** στις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

9 Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα

9.1 Κυριότερα συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει συνιστώσες ΑΠΕ - Υδρογόνου και προορίζεται για αυτόνομη λειτουργία. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκε η λειτουργία του συστήματος μέσω ενός δυναμικού μοντέλου διακριτού χρόνου που υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB/SIMULINK. Μία ανεμογεννήτρια και μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια αποτελούν τις κύριες ενεργειακές πηγές του συστήματος, ενώ μία κυψέλη καυσίμου σε συνδυασμό με μια συστοιχία υπερπυκνωτών χρησιμοποιούνται για να καλύψουν τη διακύμανση της παραγόμενης ισχύος. Προκειμένου να αξιοποιηθούν στο μέγιστο οι δυνατότητες του συστήματος χρησιμοποιήθηκε μία μονάδα ηλεκτρόλυσης σε συνδυασμό με μία δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου, για να απορροφήσει την περίσσεια ισχύος και να την αποθηκεύσει υπό μορφή υδρογόνου. Η διασύνδεση μεταξύ των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος και η διαχείριση της ισχύος πραγματοποιήθηκε μέσω ενός κοινού ζυγού ΣΡ.

Η διαστασιολόγηση του συστήματος βασίστηκε στη μέθοδο της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας (LPSL), χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα για την ημερήσια καμπύλη φορτίου και χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας. Εξετάστηκαν δύο σενάρια με διαφορετικό δείκτη αξιοπιστίας και πραγματοποιήθηκε ανάλυση κόστους του συστήματος. Η λύση επιλέχθηκε με βάση το κόστος της μη τροφοδοτούμενης ενέργειας. Το γεγονός πως το κόστος αυτό μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος της εφαρμογής καθιστά σαφές πως η διαστασιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος δεν είναι μονοσήμαντη. Η επιλεγθείσα διαστασιολόγηση επαληθεύθηκε με την προσομοίωση του συστήματος σε ετήσια βάση στο λογισμικό HOMER. Τέλος, έγινε μία συγκριτική μελέτη μεταξύ της τοπολογίας που έχει επιλεγεί, και δύο εναλλακτικών τοπολογιών που αφορούν σε υβριδικά συστήματα που συνθέτονται με διαφορετικό συνδυασμό συνιστωσών, όπως κυψέλες καυσίμου με μπαταρίες. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν πως η εκάστοτε τοπολογία παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, που πρέπει να ληφθούν υπόψη ανάλογα με τις επιδιώξεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Ο έλεγχος που προτάθηκε για τη λειτουργία του συστήματος περιλαμβάνει το διαχειριστικό έλεγχο του συστήματος και επιμέρους ελεγκτές για τη βέλτιστη λειτουργία των υποσυστημάτων. Η σχεδίαση του διαχειριστικού αλγορίθμου δεν είχε ως μοναδικό στόχο την ικανοποίηση του ισοζυγίου ισχύος παραγωγής – ζήτησης και την ποιότητα της ισχύος αλλά και την ασφαλή, αποδοτική και οικονομική λειτουργία των τεχνολογιών υδρογόνου. Συγκεκριμένα, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη διατήρηση της απόδοσης της κυψέλης καυσίμου σε υψηλά επίπεδα, καθώς και στην επίτευξη της οικονομικότερης λειτουργίας της. Για τους λόγους αυτούς πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφικός έλεγχος με σκοπό να καταγραφούν οι λειτουργικοί περιορισμοί των κυψελών καυσίμων, των ηλεκτρολυτών και των υπερπυκνωτών, καθώς και το οικονομικό κόστος της κυψέλης καυσίμου.

Ο διαχειριστικός έλεγχος του συστήματος υλοποιήθηκε με βάση την ασαφή λογική. Η εφαρμογή της ασαφούς λογικής στο παρόν αυτόνομο υβριδικό σύστημα ενδείκνυται καθώς:

- Είναι δυνατόν να εφαρμοστεί σε μη γραμμικά συστήματα, όπως είναι και το υπό εξέταση υβριδικό σύστημα.
- Έχει τη δυνατότητα να διαχειριστεί το μεγάλο πλήθος παραμέτρων και περιορισμών του συστήματος.
- Οι ασαφείς κανόνες μπορούν να αντικατοπτρίσουν το μεγάλο εύρος των πιθανών συνδυασμών των παραμέτρων ελέγχου, που οφείλονται στους λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος και οδηγούν σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας το σύστημα.
- Οι παράμετροι ελέγχου μπορούν να εξετάζονται ταυτόχρονα σε πραγματικό χρόνο με τον ελεγκτή ασαφούς λογικής.

Προκειμένου να αξιολογηθεί ο διαχειριστικός έλεγχος του συστήματος πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της λειτουργίας του κατά τη διάρκεια ενός 24ωρου. Αξιολογώντας τα αποτελέσματα επιτεύχθηκαν οι παρακάτω στόχοι:

- Αδιάλειπτη παροχή ισχύος στο φορτίο – επίτευξη αυτονομίας.
- Ποιότητα ισχύος στο ζυγό συνεχούς ρεύματος.
- Κάλυψη ελλειμμάτων ισχύος που οφείλονται σε καθυστερήσεις της κυψέλης καυσίμου από τους υπερπυκνωτές.
- Ασφαλής χρήση ηλεκτρολύτη.
- Ασφαλής χρήση υπερπυκνωτών.
- Αποφυγή διακοπτικής λειτουργίας κυψέλης καυσίμου.
- Αποφυγή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου σε επίπεδα ισχύος στα οποία παρουσιάζεται μειωμένη απόδοση.
- Αύξηση του επιπέδου φόρτισης του υπερπυκνωτή από 75% στην αρχή του 24ώρου σε 100% στο τέλος του.

Στη συνέχεια προσομοιώθηκε η λειτουργία του υπό μελέτη συστήματος με βάση αλγόριθμο διαχείρισης, που συναντάται στη βιβλιογραφία, προκειμένου να αξιολογηθεί περαιτέρω ο προτεινόμενος διαχειριστικός έλεγχος. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν πως ο διαχειριστικός έλεγχος που σχεδιάστηκε στην παρούσα εργασία παρουσίασε τα εξής πλεονεκτήματα:

- Αύξηση της μέσης απόδοσης του συστήματος κατά 0,99% κατά τη διάρκεια του 24ώρου και αύξηση της απόδοσης του συστήματος σε ορισμένα χρονικά διαστήματα του φορτίου έως και 4%.
- Μείωση του κόστους λειτουργίας του συστήματος κατά 3,2% στο τέλος του 24ώρου.
- Αύξηση της αποθηκευμένης ενέργειας στον ηλεκτρολύτη κατά 1,35% στο τέλος του 24ώρου.
- Βελτίωση της λειτουργίας των διατάξεων.

Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται πως το σύστημα που αναπτύχθηκε και η στρατηγική ελέγχου που εφαρμόστηκε επιδεικνύουν καλή απόκριση για την προσομοίωση στο χρονικό διάστημα μίας ημέρας. Το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μη διασυνδεδεμένες απομακρυσμένες περιοχές και αποδεικνύεται αξιόπιστο και υλοποιήσιμο.

9.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

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

- Σύγκριση της διαστασιολόγησης διαφορετικών τοπολογιών υβριδικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ανάπτυξη μοντέλου που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός ολοκληρωμένου σταθμού παραγωγής ΑΠΕ – Υδρογόνου και των απαραίτητων ελεγκτών για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος.
- Δημιουργία αλγόριθμου διαχείρισης βασιζόμενου στην ασαφή λογική με στόχους την αξιοπιστία, την ασφαλή χρήση, την αποδοτική λειτουργία και τη μείωση του κόστους των τεχνολογιών υδρογόνου.
- Παρακολούθηση του κόστους σε πραγματικό χρόνο και μείωση του μέσου κόστους λειτουργίας του συστήματος.
- Σύγκριση του προτεινόμενου αλγορίθμου διαχείρισης με υφιστάμενη τεχνική ντετερμινιστικού διαχειριστικού ελέγχου.

9.3 Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση

Με βάση τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία, προκύπτει ένας σημαντικός αριθμός πιθανών κατευθύνσεων για μελλοντική έρευνα:

- Πειραματική επιβεβαίωση των ελεγκτών που προτάθηκαν.
- Υλοποίηση του προτεινόμενου υβριδικού συστήματος.
- Ανάπτυξη μοντέλου που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός αντίστοιχου υβριδικού συστήματος, που χρησιμοποιεί μπαταρίες ως βραχυπρόθεσμη αποθήκευση και σύγκριση των δύο συστημάτων.
- Ετήσια προσομοίωση του συστήματος με πραγματικά δεδομένα για μια συγκεκριμένη θέση εγκατάστασης προκειμένου να αξιολογηθεί η διαστασιολόγηση και η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου.
- Προσομοίωση του συστήματος για διαφοροποιημένα επίπεδα ισχύος και διαφορετικά είδη φορτίου προκειμένου να αξιολογηθεί η χρησιμοποίηση της ασαφούς λογικής για την υλοποίηση του αλγορίθμου διαχείρισης.
- Βελτιστοποίηση του διαχειριστικού ελέγχου με βάση την ασαφή λογική προσθέτοντας νέες παραμέτρους ελέγχου ή νέους κανόνες για την αποδοτικότερη και οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR_2010_full_revised%20Sept2010.pdf
- [2] <http://www.newandrenewableenergy.com/2010/10/renewables-delivering-18-of-global.html>
- [3] ΔΕΣΜΗΕ, National Report RAE 2009
- [4]. WWF Ελλάδαος: <http://climate.wwf.gr/>
- [5] http://www.flowmagazine.gr/article/view/Hybrid_Energy_Systems
- [6] http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/3568/3/koutelidakisk_armycamp.pdf
- [7] O. Erdinc, M. Uzunoglu, "Recent trends in PEM fuel cell-powered hybrid systems: Investigation of application areas, design architectures and energy management approaches", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 2874–2884
- [8] Damien Paire, Marcelo G. Simoes, Jeremy Lagorse and Abdellatif Miraoui, "A real-time sharing reference voltage for hybrid generation power system", 978-1-4244-6395-4/10/\$26.00 ©2010 IEEE
- [9] ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΣΑΓΑΝΗ , «Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας – Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές», ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ , ΕΜΠ 2009
- [10] <http://www.ok4me2.net/2011/08/10/hybrid-solar-system-makes-rooftop-hydrogen/>
- [11] http://www.energysavers.gov/your_home/electricity/index.cfm/mytopic=11130
- [12] Παναγιώτης Θ. Τσάκωνας, "Έλεγχος αέργου ισχύος από ανεμογεννήτρια για την υποστήριξη τάσης δικτύου κατά τη διάρκεια σφάλματος", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2010
- [13] Μ. ΝΤΡΕΚΟ, "Ανάλυση Λειτουργίας και Έλεγχος Συστήματος Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών διασυνδεδεμένης στο δίκτυο", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2009
- [14] A. CHANIOTIS, A. KLADAS and J. TEGOPOULOS, "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.
- [15] Γ. ΚΤΕΝΙ/ΗΣ, "Μελέτη Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας των 100 kW", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2008.
- [16] Elie Laffly, Marie-Cécile P´era, Daniel Hissel, "PEMFC electrochemical reactions Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Modelling and Parameters Estimation for Ageing Consideration", 2007 IEEE
- [17] Ε. ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, "Ανάλυση - Λειτουργία Κυψελών Καυσίμου και Προσομοίωση Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEMFC) για την Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2006.
- [18] Jamew Iarminie, Andrew Dicks, "Fuel cell systems explained", Wiley, 2003
- [19] Τσαμπάς Μιχαήλ, "Ανάπτυξη μοντέλου πρωτονιακής αγωγιμότητας στηριζόμενο στο κβαντομηχανικό φαινόμενο σήραγγος και διερεύνηση του φαινομένου της ηλεκτροχημικής ενίσχυσης της κατάλυσης σε αντιδραστήρες κελίου καυσίμου υψηλών και χαμηλών θερμοκρασιών", Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010

- [20] M.J. KHAN, M.T. IQBAL, "Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system", *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 421-439, 2005.
- [21] Η. ΓΚΟΥΓΚΑΣ, "Ανάλυση λειτουργίας και ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2009.
- [22] Ιατρόπουλος, Γρηγόριος και Κοντογιάννης, Ιωάννης, "Μοντελοποίηση συστήματος διανεμημένης παραγωγής με κυψέλες καυσίμου και προσομοίωση μεταβατικών φαινομένων", ΑΠΘ, 2008
- [23] 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
- [24] Κ. Δέρβος: Εισαγωγή στα ημιαγωγικά υλικά και φωτοβολταϊκές διατάξεις. Αθήνα 2007.
- [25] Ζιώγου, Χρυσοβαλάντης, "Ρύθμιση συστήματος κυψέλης καυσίμου βασισμένη σε μαθηματικό μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου και ανίχνευση μεγίστου σημείου λειτουργίας", Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΑΠΘ, 2009
- [26] Γεώργιου Παπακωνσταντίνου, "Παρασκευή και μελέτη διμεταλλικών και τριμεταλλικών ηλεκτροκαταλυτών για κυψελίδες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης", Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστημίου Πατρών, 2010
- [27] Tsutomu Oi, Yoshinori Sakaki, "Optimum hydrogen generation capacity and current density of the PEM-type water electrolyzer operated only during the off-peak period of electricity demand", *Journal of Power Sources* 129 (2004) 229–237
- [28] H. Ito, T. Maeda, A. Nakano, Y. Hasegawa, N. Yokoi, C.M. Hwang, M. Ishid, A. Kato d, T. Yoshida , "Effect of flow regime of circulating water on a proton exchange membrane electrolyzer", *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 35, Issue 18, September 2010, Pages 9550-9560
- [29] Frano Barbir, "PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources", *Solar Energy* Volume 78, Issue 5, May 2005, Pages 661-669
- [30] O. ULLEBERG, "Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a systemsimulation approach", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 28, pp.21-33, 2003
- [31] M. UZUNOGLU, O.C. ONAR, M.S. ALAM, "Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for standalone applications", *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 509-520, Mar. 2009.
- [32] H. GORGUN, "Dynamic modeling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 31, pp. 29-38, 2006.
- [33] Yang Wang, Joan E. Carletta, Tom T. Hartley, and Robert J. Veillette, "An Ultracapacitor Model Derived Using Time-Dependent Current Profiles", 978-1-4244-2167-1/08/\$25.00 ©2008 IEEE
- [34] Andrew Burke, "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology", *Journal of Power Sources* 91_2000.37–50
- [35] Joeri Van Mierlo, Peter Van den Bossche, Gaston Maggetto, "Models of energy sources for EV and HEV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators", *Journal of Power Sources* 128 (2004) 76–89
- [36] Wes Greenwell and Ardalan Vahidi, "Predictive Control of Voltage and Current in a Fuel Cell–Ultracapacitor Hybrid", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 57, NO. 6, JUNE 2010

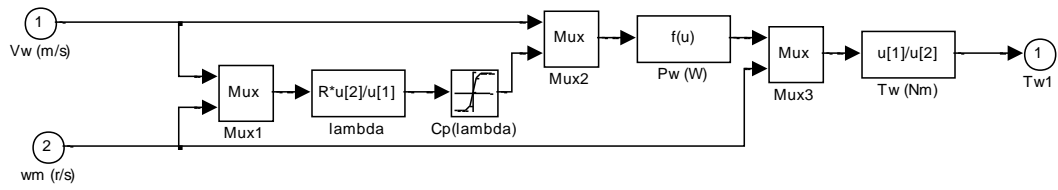
- [37] Α. ΧΑΝΙΩΤΗΣ, “Ανάπτυξη, προσομοίωση και κατασκευή συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια μόνιμων μαγνητών για απομονωμένη και διασυνδεδεμένη λειτουργία”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, 2007
- [38] ΚΟΣΜΑΣ ΧΡΗΣΤΟΥ, “Μελέτη καθορισμού των βέλτιστων σημείων λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων”, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010
- [39] T. MONAI, I. TAKANO, H. NISHIKAWA, Y. SAWADA, “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.
- [40] 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 31 (2006) 1641–1656
- [41] Hongxing Yang , Wei Zhou, Lin Lu, Zhaohong Fang, “Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar–wind system with LPSP technology by using genetic algorithm”, Solar Energy 82 (2008) 354–367
- [42] Víctor Sánchez, Juan M. Ramirez, and Gerardo Arriaga, “Optimal sizing of a hybrid renewable system”, 978-1-4244-5697-0/10/\$25.00 ©2010 IEEE
- [43] Rodolfo Dufo-Lopez, Jose L. Bernal-Agustina, Javier Contreras, “Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage”, Renewable Energy 32 (2007) 1102–1126
- [44] Ghali FMA, ADB El Aziz MM, Syam FA, “Simulation and analysis of hybrid systems using probabilistic techniques”, In: Proceedings of the power conversion conference, vol. 2, 3–6 August 1997 Nagaoka, Japan
- [45] Yang Hongxing, Zhou Wei, Lou Chengzhi, “Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar–wind power generation system”, Applied Energy 86 (2009) 163–169
- [46] Ilaria Los, Osvaldo Bertoldi, “Regulation of continuity of supply in the electricity sector and cost of energy not supplied”
- [47] Ε.Ν. ΔΙΑΛΥΝΑΣ, “Αξιοπιστία λειτουργίας συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 2007
- [48] Ε. ΒΡΕΤΤΟΣ, “Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη /ιαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών – Υδρογόνου”, /ιπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2010.
- [49] 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.
- [50] 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 Εθνικό Συνέδριο: Η Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας προς ένα Φιλόδοξο και Αξίопιστο Εθνικό Πρόγραμμα δράσης, Αθήνα, 10-12 Μαΐου, 2010.
- [51] Manuel Jesús Vasallo, José Manuel Andújar, Covadonga García, and José Javier Brey, “A Methodology for Sizing Backup Fuel-Cell/Battery/ Hybrid Power Systems”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 57, NO. 6, JUNE 2010
- [52] Dongho Seo, Junghyun Lee, Sangsun Park, Junki Rhee, Sung Won Choi, Yong-Gun Shul, "Investigation of MEA degradation in PEM fuel cell by on/off cyclic operation under different humid conditions", International journal of hydrogen energy (2010) 1 – 9

- [53] 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.
- [54] Sachin V. Puranik, Ali Keyhani, and Farshad Khorrami, "Neural Network Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 25, NO. 2, JUNE 2010
- [55] A. Hajizadeh, M. Aliakbar-Golkar, "Fuzzy Control of Fuel Cell Distributed Generation Systems ", Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, Vol. 3, Nos. 1 & 2, Jan. 2007
- [56] D. GEORGAKIS, S. PAPATHANASSIOU, "Modeling of grid-connected fuel cell plants", School of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens.
- [57] Γ. ΜΕΞΗΣ, "Τεχνικές Προσομοίωσης Συστημάτων Κυψελών Υδρογόνου", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2006.
- [58] M. Shahverdi, S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Operation of Fuel Cell Power Plant with Thermal Recovery of PEM Using Free-Model Optimization", European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.36 No.4 (2009)
- [59] M. Y. El-Sharkh, M. Tanrioven, A. Rahman, M. S. Alam, "A Study of Cost-Optimized Operation of a Grid-Parallel PEM Fuel Cell Power Plant", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 21, NO. 3, AUGUST 2006
- [60] Alireza Bagherian, S.M.Moghaddas Tafreshi, "A developed Energy Management System for a Microgrid in the Competitive Electricity Market", IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th - July 2nd
- [61] Ahmed M. Azmy and István Erlich, "Online Optimal Management of PEM Fuel Cells Using Neural Networks", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 20, NO. 2, APRIL 2005
- [62] P. Medina, M. Santarelli, "Analysis of water transport in a high pressure PEM electrolyzer", international journal of hydrogen energy 35 (2010) 5173 e5186
- [63] A. Awasthi, Keith Scott, S. Basu, "Dynamic modeling and simulation of a proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production", international journal of hydrogen energy (2011) 1 -8
- [64] C.Y. Biakua, N.V. Dalea, M.D. Manna, H. Salehfarb, A.J. Petersb, T. Hanb, "A semiempirical study of the temperature dependence of the anode charge transfer coefficient of a 6 kW PEM electrolyzer", international journal of hydrogen energy 33 (2008) 4247 – 4254
- [65] Onda K, Kyakuno T, Hattori K, Ito K., "Prediction of production power for high-pressure hydrogen by high-pressure water electrolysis", . J Power Sources 2004;132:64e70
- [66] Qihong Chen, Lijun Gaob, Roger A. Dougal, Shuhai Quan , "Multiple model predictive control for a hybrid proton exchange membrane fuel cell system", Journal of Power Sources 191 (2009) 473–482
- [67] 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
- [68] F. Katiraei and M. R. Iravani, " Power Management Strategies for a Microgrid With Multiple Distributed Generation Units", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 21, NO. 4, NOVEMBER 2006

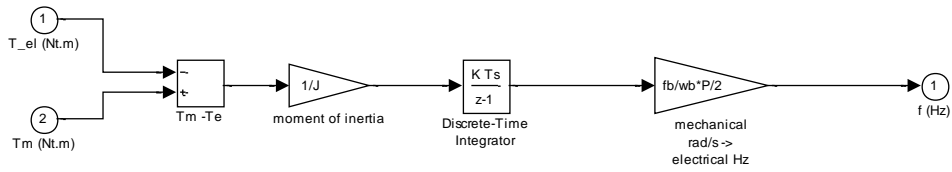
- [69] Dinghuan Zhu, *IEEE*, Rui Yang, Gabriela Hug-Glanzmann, "Managing Microgrids with Intermittent Resources: A Two-Layer Multi-Step Optimal Control Approach", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 25, NO. 3, JULY 2010
- [70] Nabil A. Ahmed, A.K. Al-Othman, M.R. AlRashidi, "Development of an efficient utility interactive combined wind/photovoltaic/fuel cell power system with MPPT and DC bus voltage regulation", *Electric Power Systems Research* 81 (2011) 1096–1106
- [71] Damien Paire Marcelo G. Simoes Jeremy Lagorse and Abdellatif Miraoui, "A real-time sharing reference voltage for hybrid generation power system", 978-1-4244-6395-4/10/\$26.00 2010 IEEE
- [72] Kodjo Agbossou, Mohanlal Kolhe, Jean Hamelin, and Tapan K. Bose, "Performance of a Stand-Alone Renewable Energy System Based on Energy Storage as Hydrogen", *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 19, NO. 3, SEPTEMBER 2004
- [73] Phatiphat Thounthong , Viboon Chunkag , Panarit Sethakul , Suwat Sikkabut , Serge Pierfederici, Bernard Davat, "Energy management of fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source", *Journal of Power Sources* 196 (2011) 313–324
- [74] Teng-Fa Tsao, Po-Hung Chen, Hung-Cheng Chen, "Dynamic Modeling and Simulation of Hybrid Power Systems Based on Renewable Energy", 2009 International Conference on Energy and Environment Technology
- [75] Wes Greenwell and Ardalan Vahidi, "Predictive Control of Voltage and Current in a Fuel Cell–Ultracapacitor Hybrid", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 57, NO. 6, JUNE 2010
- [76] M.J. Khan, M.T. Iqbal , "Analysis of a small wind-hydrogen stand-alone hybrid energy system", *Applied Energy* 86 (2009) 2429–2442
- [77] O.C. Onar, M. Uzunoglua, M.S. Alam, "Modeling, control and simulation of an autonomous wind turbine/photovoltaic/fuel cell/ultra-capacitor hybrid power system", *Journal of Power Sources* 185 (2008) 1273–1283
- [78] Ξ.ΚΟΥΤΙΒΑ «Έλεγχος διασύνδεσης ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ με μετατροπείς πηγής τάσης με σκοπό τη βελτιωμένη απόκριση αιολικού πάρκου που τροφοδοτεί ασθενές σήμα», Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστημίου Πατρών, 2007
- [79] 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.
- [80] Ying-Yi Hong, Shiue-Der Lua, Ching-Sheng Chiou, "MPPT for PM wind generator using gradient approximation", *Energy Conversion and Management* 50 (2009) 82–89
- [81] Μ. ΡΩΤΑ, "Σύγκριση Κλασσικού και Ελέγχου Βασισμένου σε Ασαφή Λογική Ανεμογεννήτριας Μονίμων Μαγνητών", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2008.
- [82] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, "A. Lazaro Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006) 1555–1578
- [83] Amin Hajizadeh, Masoud Aliakbar Golkar , "Intelligent power management strategy of hybrid distributed generation system", *Electrical Power and Energy Systems* 29 (2007) 783–795
- [84] Amin Hajizadeh, Masoud Aliakbar Golkar, "Control of hybrid fuel cell/energy storage distributed generation system against voltage sag", *Electrical Power and Energy Systems* 32 (2010) 488–497

- [85] <http://www.pacontrol.com/Fuzzy.html>
- [86] Σ.Ν. ΜΑΝΙΑΣ, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Εκδόσεις Συμμεών, 2007
- [87] M.C. Kisacikoglu, M. Uzunoglu, M.S. Alama “Load sharing using fuzzy logic control in a fuel cell/ultracapacitor hybrid vehicle”, International journal of hydrogen energy 34 (2009) 1497-1507
- [88] <http://blog.testequipmentconnection.com/do-you-need-to-check-your-pv-panelarray-performance/>
- [89] Vahidi, Stefanopoulou, Huei Peng, “Current Management in a Hybrid Fuel Cell Power System: A Model-Predictive Control Approach”, Control Systems Technology, IEEE Transactions. (2006) 1047 – 1057
- [90] Marcelo G. Simoes, Damien Paire, Jeremy Lagorse and Abdellatif Miraoui, “A real-time sharing reference voltage for hybrid generation power system”, 978-1-4244-6395-4/10/\$26.00 ©2010 IEEE
- [91] Phatiphat Thounthong, Serge Pierfederici, Jean-Philippe Martin, Melika Hinaje, and Bernard Davat,, “Modeling and Control of Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid Source Based on Differential Flatness Control”, IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 59, NO. 6, JULY 2010
- [92] Seul-Ki Kim, Jin-Hong Jeon, Chang-Hee Cho, Jong-Bo Ahn, and Sae-Hyuk Kwon, “Dynamic Modeling and Control of a Grid-Connected Hybrid Generation System With Versatile Power Transfer”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 4, APRIL 2008
- [93] Andres E. Leon, Juan Manuel Mauricio, Antonio Gómez-Expósito and Jorge Alberto Solsona, “An Improved Control Strategy for Hybrid Wind Farms”, IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, VOL. 1, NO. 3, OCTOBER 2010
- [94] Seul-Ki Kim, Jin-Hong Jeon, Chang-Hee Cho, Jong-Bo Ahn, and Sae-Hyuk Kwon, “Dynamic Modeling and Control of a Grid-Connected Hybrid Generation System With Versatile Power Transfer”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 4, APRIL 2008
- [95] O.C. Onar, M. Uzunoglu, M.S. Alam, “Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system”, Journal of Power Sources 161 (2006) 707–722

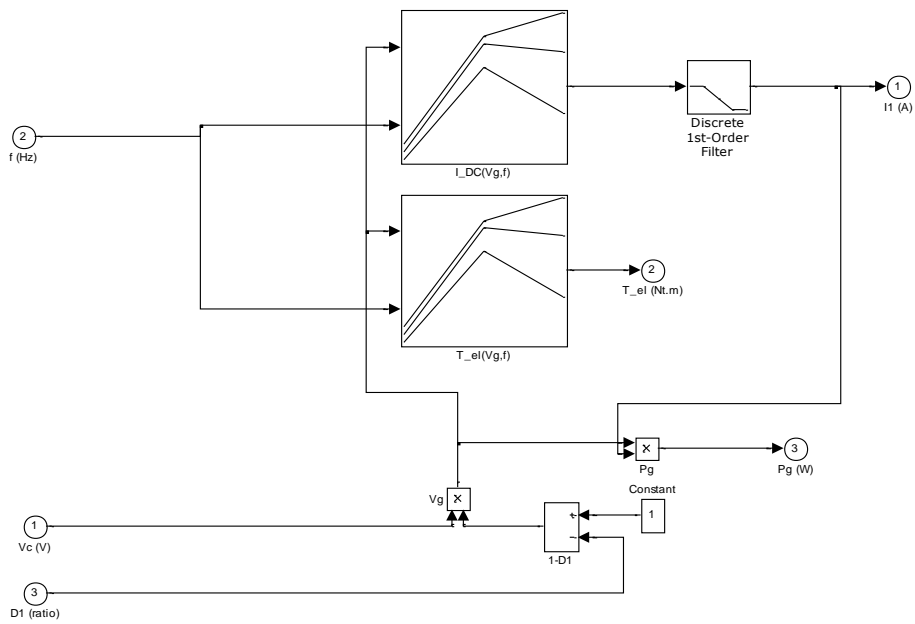
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



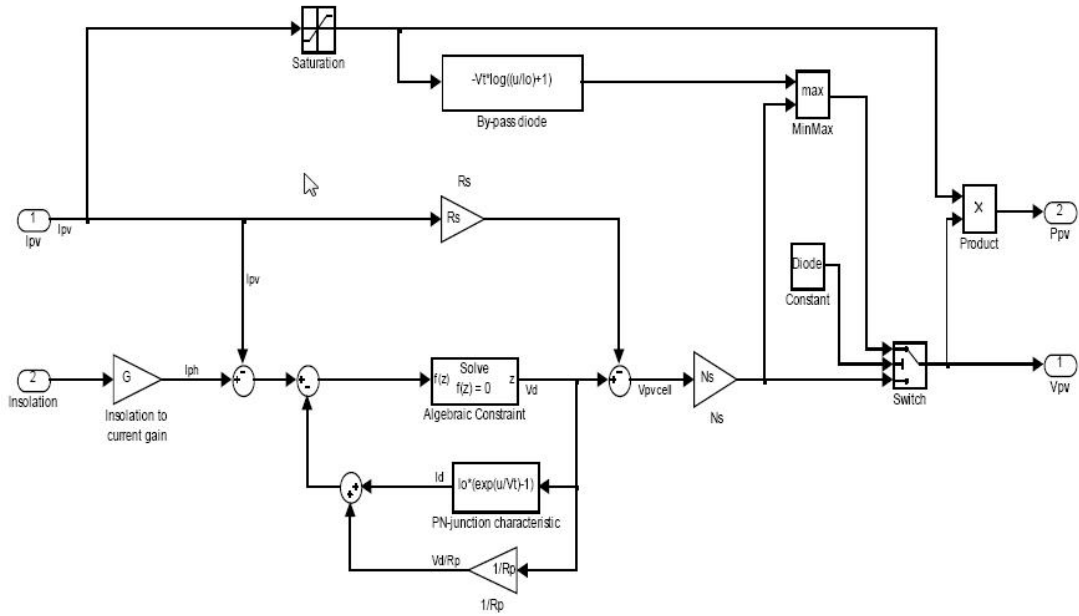
Μοντέλο 1 : Υποσύστημα Blades, αεροδυναμικό μέρος



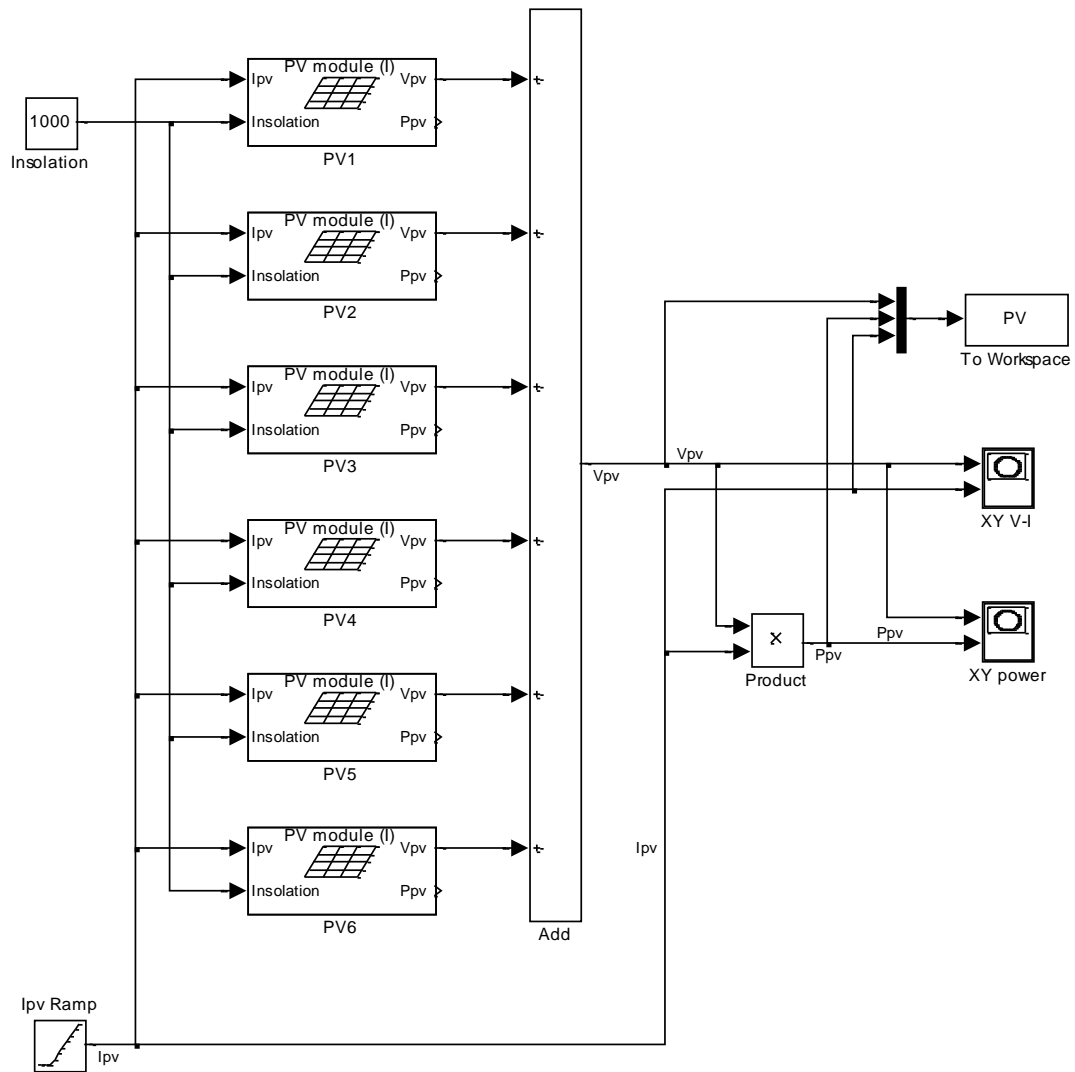
Μοντέλο 2 : Υποσύστημα Machine I



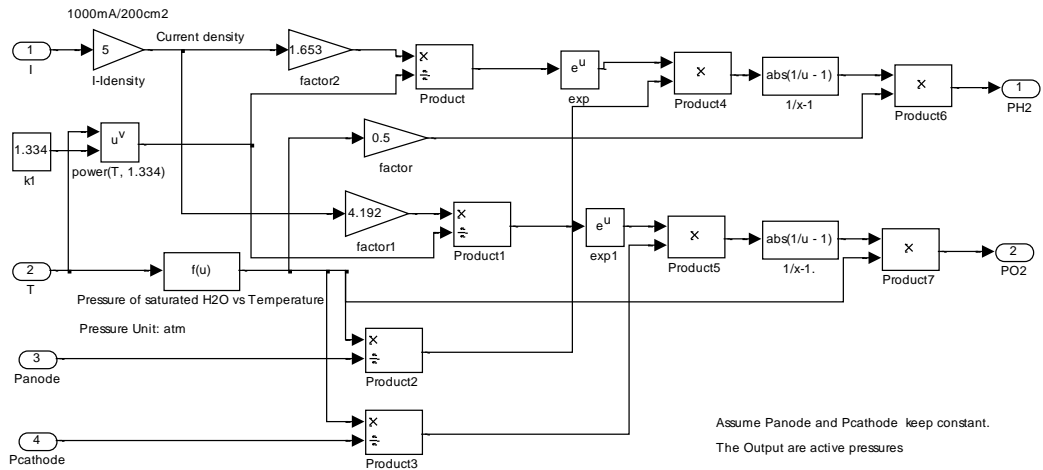
Μοντέλο 3 : Υποσύστημα Machine II



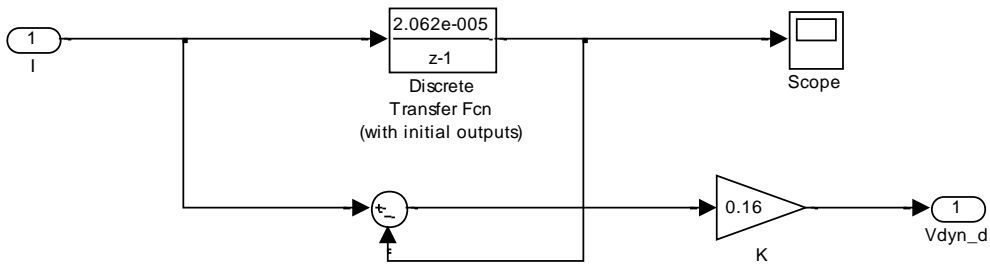
Μοντέλο 4 : Φ/β πλαίσιο



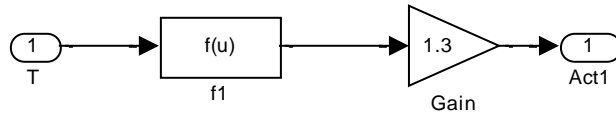
Μοντέλο 5 : Δομή φ/β συστοιχίας



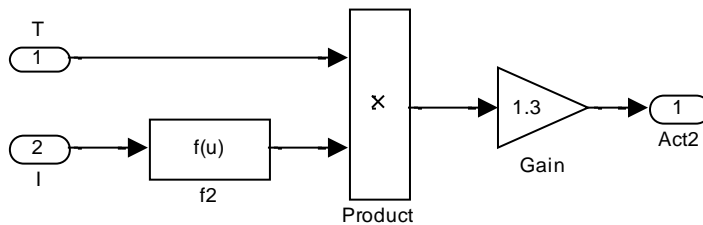
Μοντέλο 6 : Υποσύστημα Active Pressures



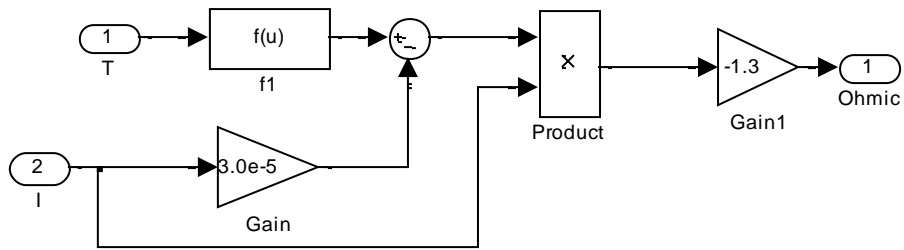
Μοντέλο 7 : Υποσύστημα Drop delay block



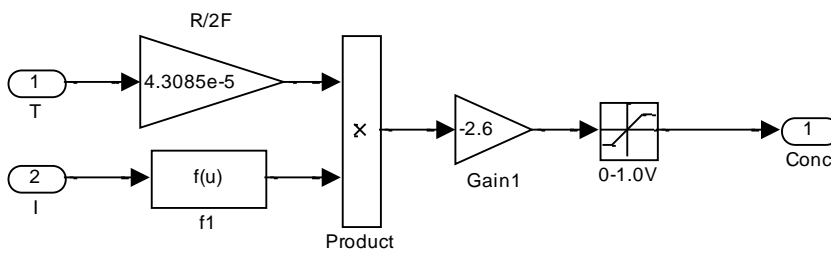
Μοντέλο 8 : Υποσύστημα Activation 1



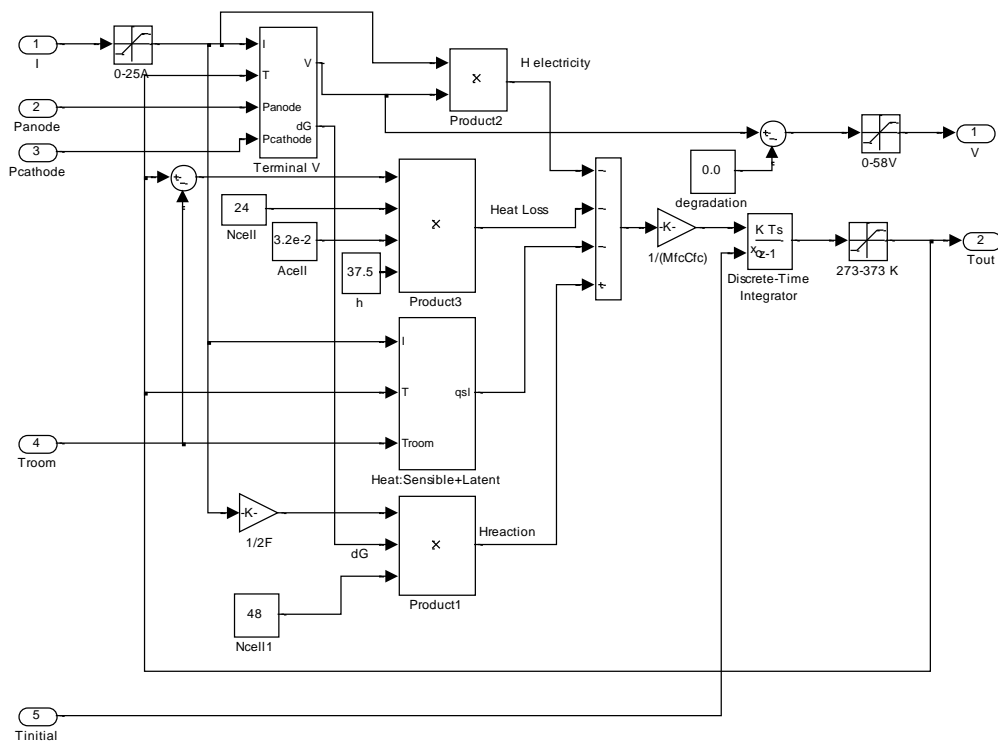
Μοντέλο 9 : Υποσύστημα Activation 2



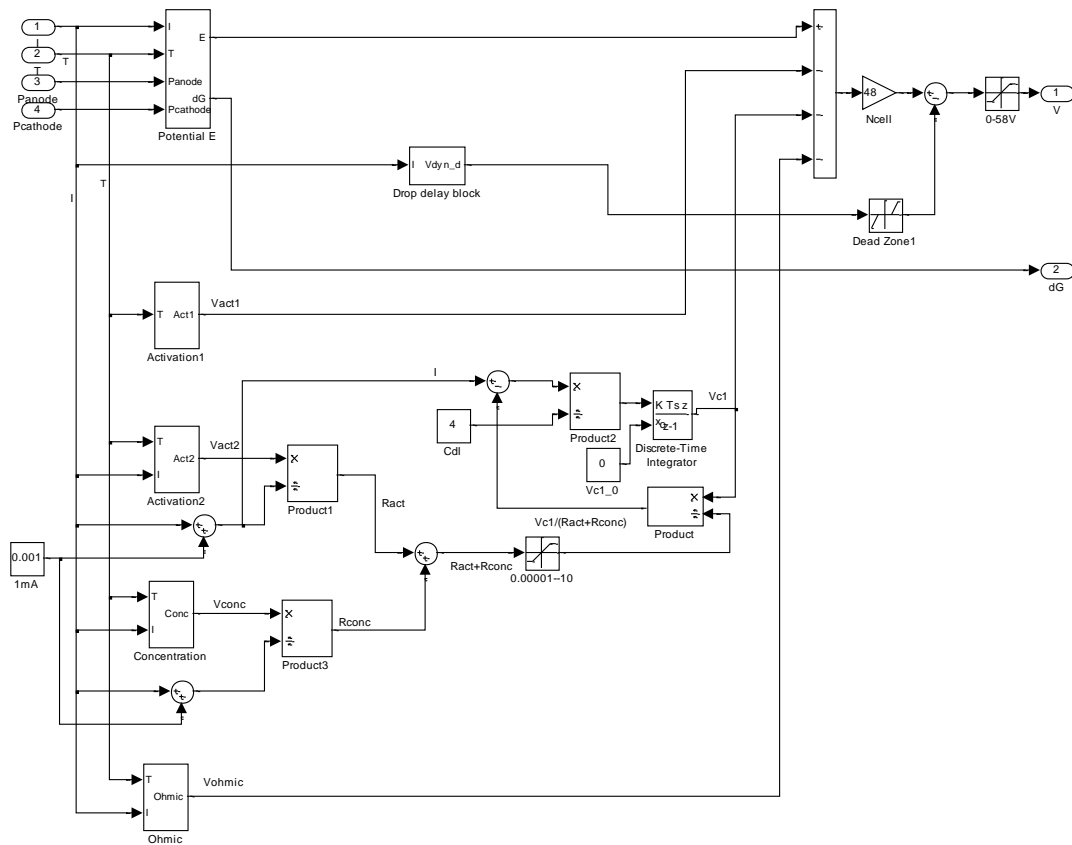
Μοντέλο 10 : Υποσύστημα Ohmic



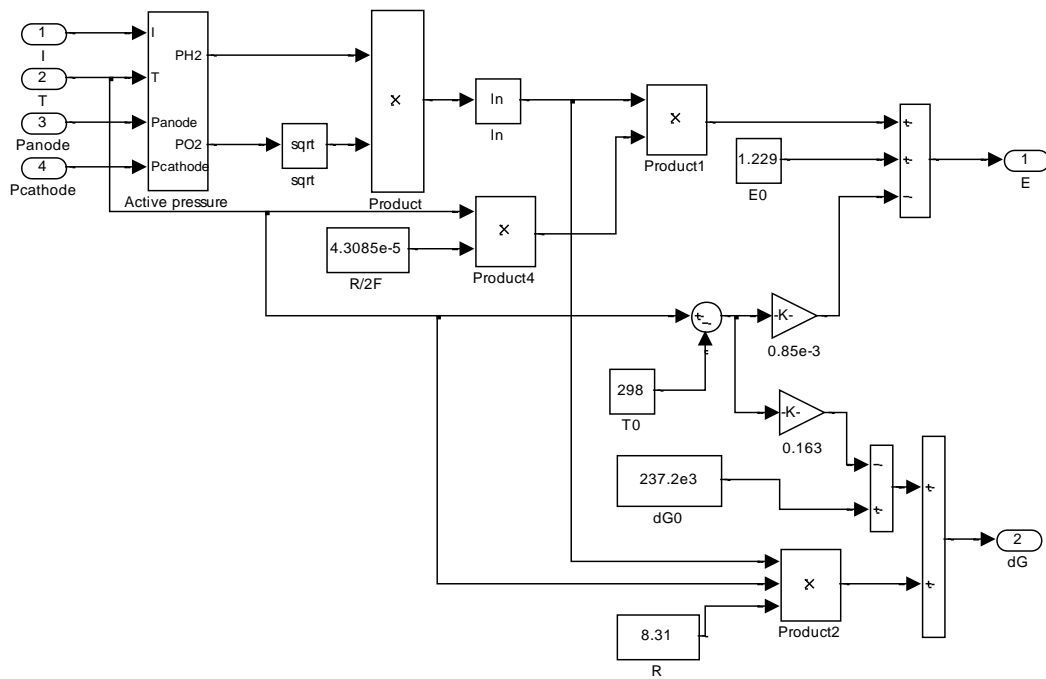
Μοντέλο 11 : Υποσύστημα Concentration



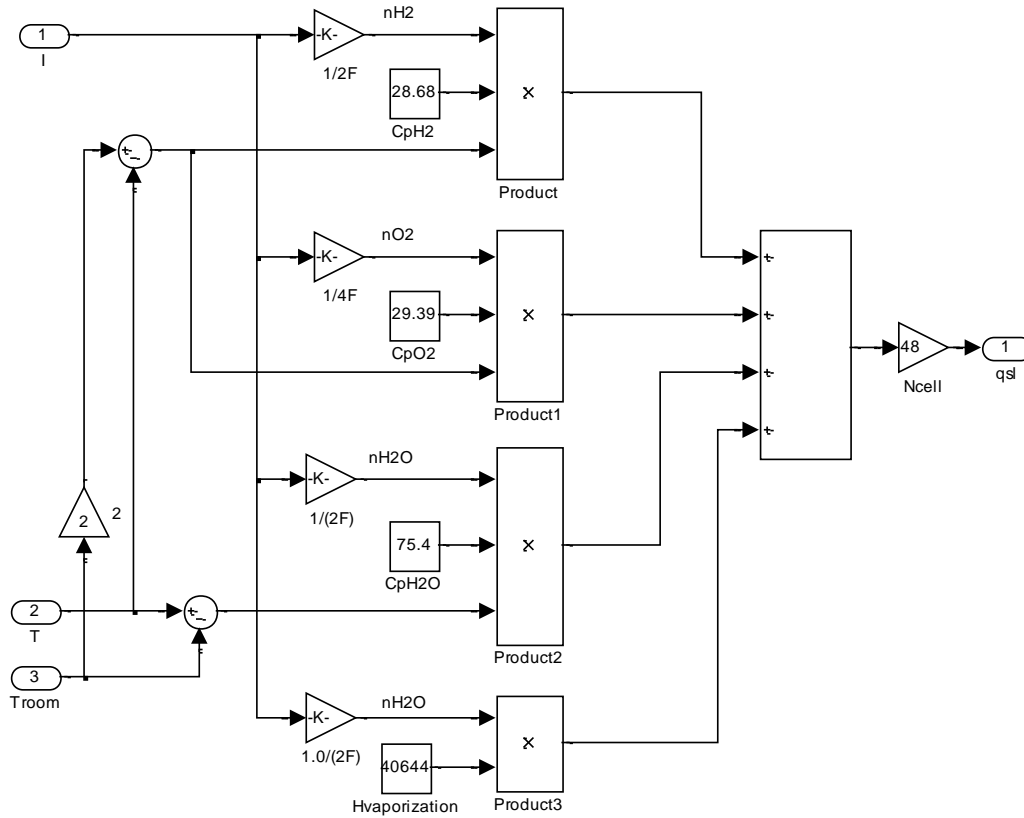
Μοντέλο 12 : Μοντέλο κυψέλης καυσίμου PEM



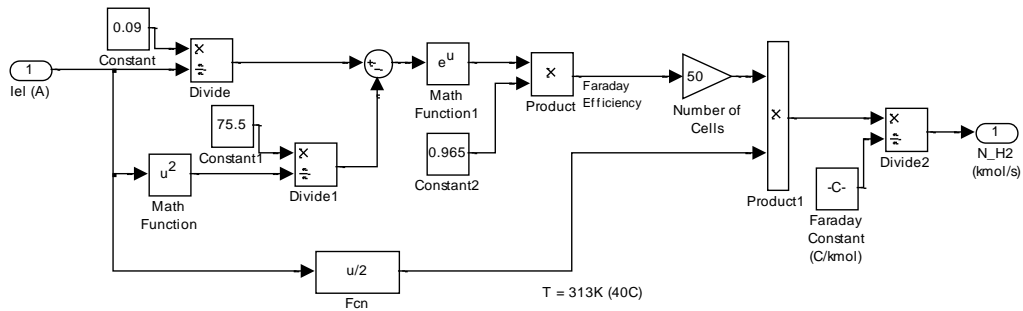
Μοντέλο 13 : Υποσύστημα Terminal V



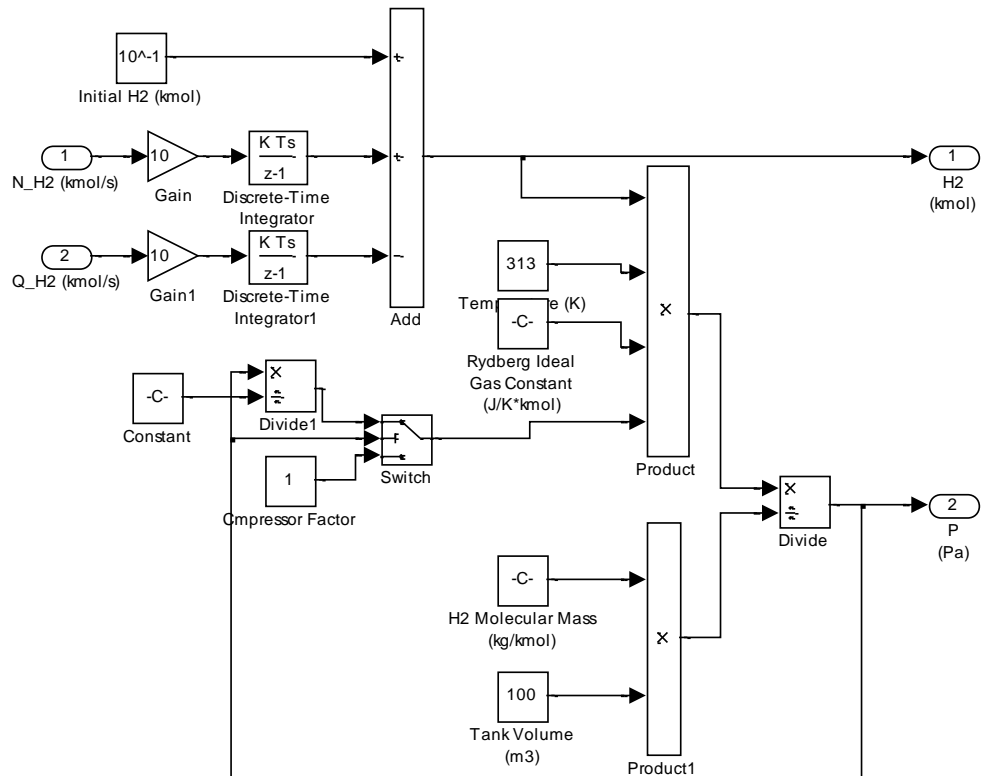
Μοντέλο 14 : Υποσύστημα Potential E



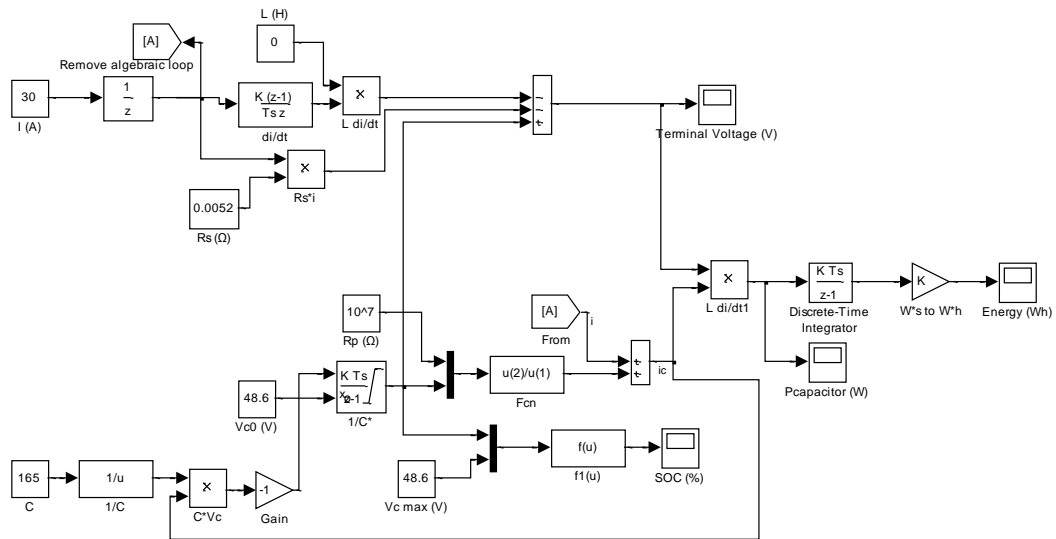
Μοντέλο 15 : Υποσύστημα Sensible+Latent Heat



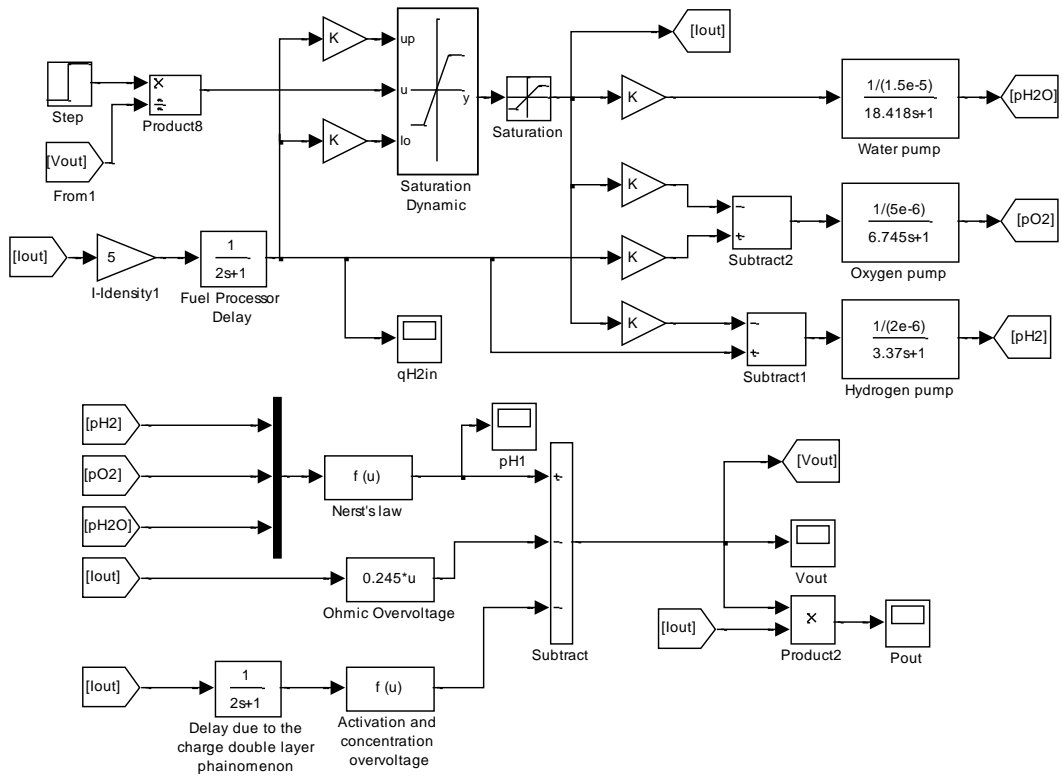
Μοντέλο 16 : Ηλεκτρολύτης PEM



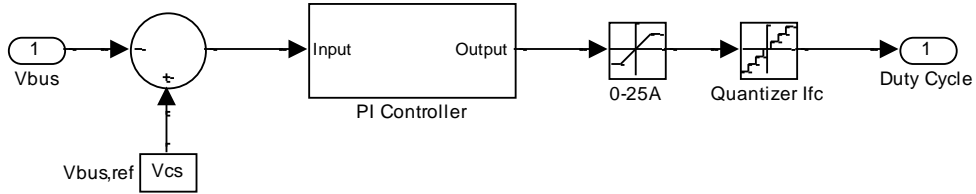
Μοντέλο 17 : Δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου



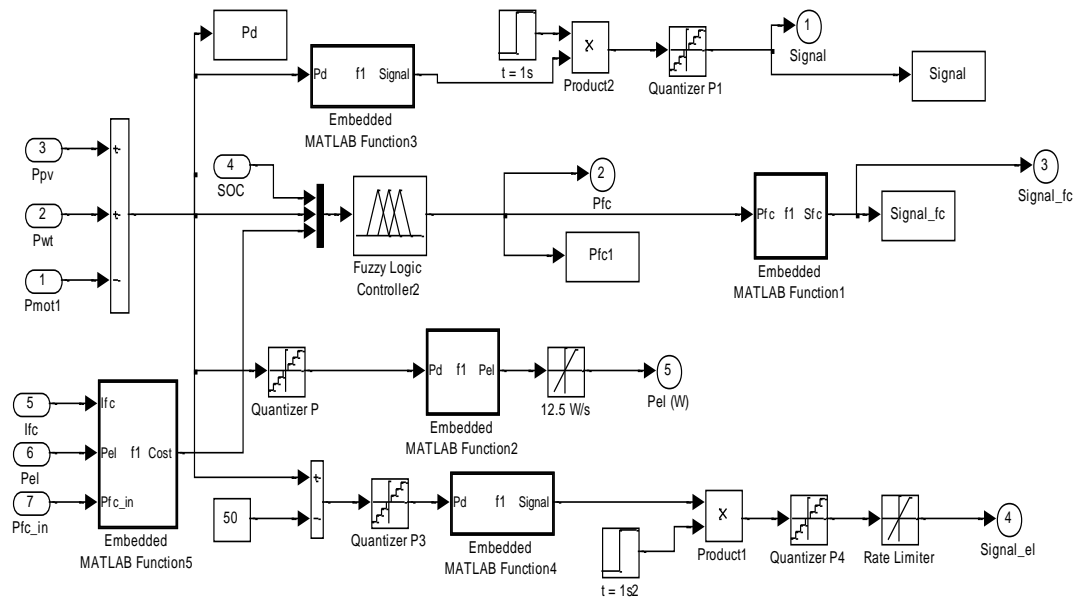
Μοντέλο 18 : Υπερπυκνωτής



Μοντέλο 19 : Μοντέλο απόκρισης ισχύος κυψέλης καυσίμου



Μοντέλο 20 : Μοντέλο ελεγκτή σταθεροποίησης τάσης



Μοντέλο 21 : Μοντέλο βασικού ελεγκτή.