



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

**Στρατηγικές ελέγχου υβριδικού τρένου υψηλής ισχύος,
τροφοδοτούμενο από κυψέλες καυσίμου, μπαταρίες και
υπερπυκνωτή**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Πέτρου Κ. Αγριόμαλλου

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟ-
ΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

**Στρατηγικές ελέγχου υβριδικού τρένου υψηλής ισχύος,
τροφοδοτούμενο από κυψέλες καυσίμου, μπαταρίες και
υπερπυκνωτή**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Πέτρου Κ. Αγριόμαλλου

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Μαρτίου 2017.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Παύλος Γεωργιάκης
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2017

...

ΠΕΤΡΟΣ Κ. ΑΓΡΙΟΜΑΛΛΟΣ

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

Copyright © Αγριόμαλλος Κ. Πέτρος, 2017

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 το συγγραφέα.

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

Περίληψη

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για καθαρότερα και φιλικότερα προς το περιβάλλον μέσα μεταφοράς, οδήγησε τον τελευταίο αιώνα σε μία προσπάθεια εξηλεκτρισμού αυτών. Εξελίξεις κυρίως στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, της ποιότητας παροχής ρεύματος από το δίκτυο, καθώς και των υπολογιστικών συστημάτων, είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση της ασφάλειας, της αυτονομίας και εν γένει ωρίμασαν την χρησιμότητα των ηλεκτρικών μέσων μεταφοράς.

Μεταξύ των πρωτοπόρων μέσων στην εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης είναι και το τρένο, του οποίου η χρήση βοήθησε σημαντικά στην εξέλιξη των πόλεων και των κοινωνιών παγκοσμίως. Στη σύγχρονη εποχή όμως, όπου η υβριδοποίηση καταλλήγει να έχει την κυρίαρχη τάση, γίνονται μελέτες για την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων των δύο παραπάνω "κόσμων", τα οποία είναι : η ανεξαρτητοποίηση των τρένων από το δημόσιο δίκτυο παροχής, μειώνοντας κατ'αυτόν τον τρόπο σε σημαντικό βαθμό τα έξοδα συντήρησης των γραμμών, καθώς και η διατήρηση της αυτονομίας των υβριδικών τρένων σε ρεαλιστικά επίπεδα.

Τα υβριδικά συστήματα τρένων, τα οποία εξετάζονται σε πειραματικό στάδιο, έχουν ως κύρια παροχή ηλεκτρικού φορτίου τις κυψέλες καυσίμου, ενώ η χρήση μπαταριών και υπερπυκνωτών, ως συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, είναι υψίστης σημασίας τόσο για την πλήρη κάλυψη του ζητούμενου φορτίου, όσο και για την ταχύτατη αποκρισιμότητα τους στις απαιτούμενες εναλλαγές του φορτίου. Οι μελέτες περιλαμβάνουν πειράματα, τα οποία γίνονται τόσο σε πραγματικές συνθήκες χρήσης ενός υβριδικού τρένου και έχουν ως σκοπό τη συλλογή της πραγματικής συμπεριφοράς των μεταβλητών, όσο και σε υπολογιστικά μοντέλα που έχουν ως σκοπό τη χρησιμοποίηση των μετρούμενων μεταβλητών στην ανάπτυξη του κατάλληλου λογισμικού για την βέλτιστη εκμετάλλευση των πηγών, πετυχαίνοντας μέγιστη δυνατή αυτονομία.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η μοντελοποίηση ενός υβριδικού συστήματος τρένου στο υπολογιστικό περιβάλλον του Simulink, καθώς και η προσομοίωση, η σύγκριση και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την αποτελεσματικότητα τριών διαφορετικών τεχνικών ελέγχου - ενδεικτικά: *Operation Mode Control (OMC)*, *Cascade Control (CC)*, *Fuzzy Logic Control (FLC)*.

Λέξεις Κλειδιά — Υβριδικό σύστημα προώθησης τρένου, κυψέλες καυσίμου, συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, μπαταρία, υπερπυκνωτής, ηλεκτρονικά ισχύος, σύστημα διαχείρισης ενέργειας, Operation Mode Control, Cascade Control, Fuzzy Logic Control

Abstract

The constantly increasing demand for cleaner and more environmentally friendly means of Transportation, motivated scientists of the past century to make innovative changes and introduce the electrification in the field of mass transport. Developments in power electronics, in the quality of electric power network, as well as in computer systems, paved the way to more secure, more relaxing and in general more mature electric means of Transportation.

The train, among the pioneers in the development of electrification, has played a significant role in the evolution of society worldwide. In the modern era, that of hybridization, studies are conducted in order to take advantage of the benefits of the -above mentioned- two "worlds", that is : the independence of electric power from power transmission lines, which will reduce - among others- the power- lines maintenance costs, as well as the preservation of a realistic mileage for the hybrid train.

The hybrid trains, which are examined in an experimental level, have fuel cells as a main power source, where the use of batteries and supercapacitors, as energy storage systems, is essential both for the sufficient supply and for the fast responsiveness of traction loads alternations. Studies include both real experiments - where sensitive variables are being controlled through a series of real life scenarios - and computational experiments, where the aforementioned variables are used for software development in order to optimise the use of the three power sources, with hydrogen consumption in particular.

The major subject of this diploma thesis is the modeling of a hybrid traction system of a train in the computational environment of Simulink, along with the simulation, the comparison and logical conclusions between three implemented energy management strategies, these are: *Operation Mode Control (OMC)*, *Cascade Control (CC)*, *Fuzzy Logic Control (FLC)*.

Keywords — Hybrid system traction for electric train, Fuel Cell, Energy Storage System, Battery, Supercapacitor, Power Electronics, Energy Management System, Operation Mode Control, Cascade Control, Fuzzy Logic Control

"I am thankful to all those who said NO to me. It's because of them, I did it myself."

Albert Einstein

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Νικόλαου Χατζηαργυρίου.

Κατ'αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Νικόλαο Χατζηαργυρίου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω διπλωματική στο εργαστήριο ΣΗΕ, καθώς και τη διδάκτορα Χριστίνα Παπαδημητρίου για την υπομονή και την καθοδήγηση της καθ'όλη τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον ερευνητή Βασίλη Κλεφτάκη για την πολύτιμη βοήθεια και τις ιδέες που μου παρείχε, διευκολύνοντας σε μεγάλο βαθμό την ολοκλήρωση της.

Ωστόσο, η προσπάθεια εκπόνησης της εργασίας αυτής, δεν θα μπορούσε να είχε ολοκληρωθεί, χωρίς την ανεκτίμητη αρωγή της οικογένειας μου. Ένα "ευχαριστώ" είναι πολύ λίγο, τόσο για τους γονείς μου, Κωνσταντίνο και Δήμητρα, όσο και για τα αδέρφια μου, Ιωάννη και Κατερίνα, οι οποίοι ανέκαθεν συντελούσαν σε εμένα προσωπικά, ως κατευθυντήριο ορίζοντα. Επίσης, ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στο θείο μου Τάκη, ο οποίος, ως φιγούρα και μόνο, αποτελεί τη μεγαλύτερη πηγή κινήτρων.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να ξεχάσω τους δύο πιο ξεχωριστούς συνοδοιπόρους μου, την Αγγελική και τον Αντώνη, για την αδιάκοπη και ανιδιοτελή συμπαράστασή τους.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	iii
Ευχαριστίες	v
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Σχημάτων	x
Κατάλογος Πινάκων	xii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Ηλεκτρικό Τρένο	1
1.2.1 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή	2
1.2.2 Βασικά δομικά στοιχεία συστήματος προώθησης ηλεκτρικού τρένου	3
1.2.3 Οικονομικοί δείκτες υποδομής και συντήρησης δικτύου	4
1.3 Υβριδικό Τρένο	6
1.3.1 Βασικά δομικά στοιχεία συστήματος προώθησης υβριδικού τρένου	7
1.3.2 Οικονομικοί δείκτες εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης υβριδικού τρένου	7
2 Αναλυτική Περιγραφή Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας	9
2.1 Κυψέλες Καυσίμου	9
2.1.1 Ηλεκτροχημική Λειτουργία	10
2.1.2 Τάση ανοιχτού κυκλώματος Κυψέλης	11
2.1.3 Απόδοση κυψέλης	13
2.1.4 Η επίδραση της συγκέντρωσης και της πίεσης	15
2.1.5 Απώλειες κατά την πραγματική λειτουργία	16
2.1.5.1 Απώλειες Ενεργοποίησης	18
2.1.5.2 Απώλειες υπερπήδησης καυσίμου και εσωτερικών ρευμάτων	19
2.1.5.3 Ωμικές Απώλειες	21
2.1.5.4 Απώλειες συγκέντρωσης και μετακίνησης μάζας αερίων	21
2.1.5.5 Απώλειες τροφοδοσίας συμπιεστή	22
2.2 Υπερπυκνωτής	23

2.2.1	Ηλεκτροχημική Λειτουργία	24
2.2.1.1	Χωρητικότητα-Τάση	25
2.2.1.2	Εσωτερική Αντίσταση – Ειδική Ενέργεια – Ειδική Αντίσταση	25
2.2.1.3	Διάρκεια Ζωής	27
2.2.2	Οικονομικά στοιχεία	28
2.3	Μπαταρία	28
2.3.1	Ηλεκτροχημική Λειτουργία	29
2.3.2	Οικονομικά στοιχεία	30
2.4	Μετατροπείς συνεχούς τάσης	32
2.4.1	Κατηγοριοποίηση μετατροπέων	32
2.4.2	Έλεγχος μετατροπέων DC-DC	33
2.4.2.1	Διαμόρφωση Εύρους Παλμών	34
2.4.2.2	Σύστημα ελέγχου (PID)	35
2.4.3	Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης	36
2.4.3.1	Όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς λειτουργίας ...	38
2.4.3.2	Μοντελοποίηση υπολογισμού των στοιχείων L,C του μετατροπέα ανύψωσης τάσης	39
2.4.4	Μετατροπέας Υποβιβασμού Τάσης	41
2.4.4.1	Μοντελοποίηση υπολογισμού των στοιχείων L,C του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης	42
2.4.5	Αμφίδρομος Μετατροπέας Ανύψωσης και Υποβιβασμού Τάσης	42
2.4.5.1	Μοντελοποίηση υπολογισμού των στοιχείων L,C αμφίδρομου μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης	43
3	Μεθοδολογία Προσομοίωσης	45
3.1	Διαμόρφωση μοντέλου προσομοίωσης	45
3.1.1	Διαστασιολόγηση πηγών και των αντίστοιχων μετατροπέων ...	48
3.1.1.1	Κυψέλη Καυσίμου	49
3.1.1.2	Υπολογισμός στοιχείων L,C μετατροπέα κυψέλης καυσίμου	50
3.1.1.3	Μπαταρία	51
3.1.1.4	Υπολογισμός στοιχείων L,C αμφίδρομου μετατροπέα μπαταρίας	52
3.1.1.5	Υπερπυκνωτής	54
3.1.1.6	Υπολογισμός στοιχείων L,C αμφίδρομου μετατροπέα υπερπυκνωτή	54
3.1.2	Ανάλυση στρατηγικών ελέγχου	57
3.1.2.1	Operation Mode Control - OMC	57
3.1.2.2	Cascade Control - CC	61
3.1.2.3	Fuzzy Logic Control - FLC	62
4	Παρουσίαση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων	65
4.1	Operation Mode Control - OMC	65
4.2	Cascade Control - CC	70
4.3	Fuzzy Logic Control - FLC	74

5	Συμπεράσματα και Μελλοντικές Τάσεις	79
5.1	Σύγκριση Στρατηγικών Ελέγχου	79
5.1.1	Διαχείριση των πηγών	79
5.1.2	Χρόνος ολοκλήρωσης προσομοίωσης	81
5.2	Μελλοντικές Τάσεις	82
	Βιβλιογραφία	85

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Εξαρτήματα Ηλεκτρικής Αμαξοστοιχίας. (Πηγή: <i>Railway Technical Web Pages</i>)	4
1.2	Δομικά Στοιχεία Υβριδικού Τρένου. (Πηγή : <i>Engineering News & Analysis - GlobalSpec</i>)	7
1.3	Κόστος παραγωγής κυψελών καυσίμου. (Πηγή : <i>CleanTechnica</i>).....	8
2.1	Ηλεκτρόλυση νερού (αριστερά), Κυψέλες Καυσίμου Υδρογόνου(δεξιά). (Πηγή : <i>Fuel Cell Systems Explained</i>)	10
2.2	Λειτουργία <i>PEM Fuel Cell</i> . (Πηγή: <i>SEFCA</i>)	11
2.3	Διαφορά φάσματος απόδοσης <i>PEM Fuel Cell</i> και μηχανών εσωτερικής καύσεως. (Πηγή: <i>The National Academies Press</i>)	14
2.4	Απώλειες πραγματικής λειτουργίας ενός <i>PEM Fuel Cell</i> . (Πηγή: <i>Electrochemistry Encyclopedia</i>)	16
2.5	Διαγράμματα Tafel για γρήγορες και αργές χημικές αντιδράσεις. (Πηγή: <i>Journal of Fuel Cell Science and Technology</i>)	18
2.6	Συμπιεστής αέρα για την αύξηση της απόδοσης της κυψέλης. (Πηγή: <i>Rotortronics Laboratory</i>)	22
2.7	Αναπαράσταση λειτουργίας υπερπυκνωτή. (Πηγή: <i>InTech</i>)	25
2.8	Εσωτερική DC αντίσταση υπερπυκνωτή. (Πηγή : <i>WikiVisually</i>).....	26
2.9	Σύγκριση ειδικής ενέργειας και ισχύς υπερπυκνωτή με άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. (Πηγή: <i>Tecate Group</i>)	26
2.10	Επίδραση της τάσης στην διάρκεια ζωής ενός υπερπυκνωτή. (Πηγή: <i>Garmanage</i>).....	27
2.11	Ατομικός αριθμός μετάλλου Λιθίου. (Πηγή: <i>ThingLink</i>).....	29
2.12	Συμπεριφορά τάσης και ρεύματος μίας μπαταρίας ιόντων-λιθίου κατά την φόρτιση. (Πηγή: <i>Battery University</i>)	30
2.13	Καμπύλη εκφόρτισης μπαταρίας ιόντων λιθίου. (Πηγή: <i>IBT Power</i>)	30
2.14	Επίδραση του κύκλου λειτουργίας στην αποδιδόμενη τάση. (Πηγή: <i>HHO 4 Free</i>)	34
2.15	Χαρακτηριστικά ενός PWM παλμού. (Πηγή: <i>Technology Robotix Society</i>)	34
2.16	Λειτουργία PWM διαμόρφωσης. (Πηγή: <i>Wikipedia</i>)	35
2.17	Διάγραμμα κλειστού βρόχου PID ελεγκτή. (Πηγή: <i>Mr. Digital</i>)	36
2.18	Μετατροπέας ανύψωσης τάσης. (Πηγή: <i>Electrical Engineering Stack Exchange</i>).....	36
2.19	Στάδια λειτουργίας μετατροπέα ανύψωσης τάσης. (Πηγή: <i>Wikipedia</i>) ..	37
2.20	Κυματομορφές ρεύματος και τάσης των στοιχείων ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης κατά τη συνεχή λειτουργία. (Πηγή: <i>Wikipedia</i>)	37
2.21	Κυματομορφές ρεύματος και τάσης των στοιχείων ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης κατά την ασυνεχή λειτουργία. (Πηγή: <i>Wikipedia</i>).....	38

2.22	Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης. (Πηγή: <i>All About Circuits</i>)	41
2.23	Στάδια λειτουργίας μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. (Πηγή: <i>Wikipedia</i>)	41
2.24	Κυματομορφές ρεύματος και τάσης των στοιχείων ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης κατά τη συνεχή λειτουργία. (Πηγή: <i>Wikipedia</i>)	41
2.25	Αμφίδρομος μετατροπέας ανύψωσης - υποβιβασμού τάσης. (Πηγή: <i>Learn About Electronics</i>)	42
2.26	Στάδια λειτουργίας αμφίδρομου μετατροπέα. (Πηγή: <i>Wikipedia</i>)	43
2.27	Κυματομορφές ρεύματος και τάσης των στοιχείων ενός αμφίδρομου μετατροπέα κατά τη συνεχή λειτουργία. (Πηγή: <i>Wikipedia</i>)	43
3.1	Μοντέλο υβριδικού τρένου	46
3.2	Διάγραμμα ισχύος και ταχύτητας για τον κύκλο λειτουργίας 4 διαδοχικών στάσεων νέος υβριδικού τρένου	47
3.3	Απλοποιημένο Μοντέλο στο Simulink.	48
3.4	Παραμετροποίηση τιμών κυψέλης καυσίμου στο Simulink.	49
3.5	Καμπύλες Τάσης, Ισχύος και Απόδοσης κυψέλης καυσίμου 150 kW – 621 V <i>Ballard's Heavy – Duty PEM FC Module</i>	50
3.6	Επιλογή τιμής πηνίου για το μετατροπέα κυψέλης καυσίμου στο Simulink.	51
3.7	Επιλογή τιμής πυκνωτή για το μετατροπέα κυψέλης καυσίμου στο Simulink.	51
3.8	Παραμετροποίηση τιμών μπαταρίας στο Simulink.	52
3.9	Επιλογή τιμής πηνίου για το μετατροπέα μπαταρίας στο Simulink.	54
3.10	Επιλογή τιμής πυκνωτή για το μετατροπέα μπαταρίας στο Simulink.	54
3.11	Παραμετροποίηση τιμών υπερπυκνωτή στο Simulink.	55
3.12	Επιλογή τιμής πηνίου για το μετατροπέα υπερπυκνωτή στο Simulink.	56
3.13	Επιλογή τιμής πυκνωτή για το μετατροπέα υπερπυκνωτή στο Simulink.	56
3.14	Τεχνικοί περιορισμοί πηγών.	57
3.15	Μοντέλο της στρατηγικής OMC στο Simulink.	57
3.16	Ο πυρήνας ελέγχου της στρατηγικής OMC	58
3.17	Κύκλοι υστέρησης για τον καθορισμό του SOC_{bat}	58
3.18	Λειτουργία Εκφόρτισης στο Simulink.	58
3.19	Λειτουργία Φόρτισης στο Simulink.	59
3.20	Λειτουργία Γρήγορης Φόρτισης στο Simulink.	59
3.21	Συγκεντρωτικό διάγραμμα στρατηγικής OMC.	60
3.22	Διαδοχικός έλεγχος (Cascade Control).	61
3.23	Μοντέλο CC στο Simulink.	61
3.24	Λογικοί κανόνες για το FLC.	63
3.25	Συναρτήσεις Συμμετοχής για τις 3 εισόδους και τις 2 εξόδους του μοντέλου στο Simulink.	63
3.26	Εξάρτηση P_{fc} από SOC_{bat} , SOC_{sc}	63
3.27	Εξάρτηση P_{fc} από P_{load} , SOC_{bat}	63
3.28	Εξάρτηση P_{fc} από P_{load} , SOC_{sc}	63
3.29	Μοντέλο FLC στο Simulink.	64
4.1	Ισχύς κυψέλης κατά την εφαρμογή του OMC.	66
4.2	Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή του OMC.	66
4.3	Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή του OMC.	66
4.4	Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή του OMC.	67

4.5	Συνολική παραγόμενη ισχύς από τις πηγές κατά την εφαρμογή του OMC.	67
4.6	Επίπεδα φόρτισης μπαταρίας και υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή του OMC.	68
4.7	Λειτουργία εκφόρτισης κατά την εφαρμογή του OMC.....	69
4.8	Λειτουργία φόρτισης κατά την εφαρμογή του OMC.	69
4.9	Λειτουργία γρήγορης φόρτισης κατά την εφαρμογή του OMC.....	69
4.10	Τάση στο φορτίο κατά την εφαρμογή του OMC.	70
4.11	Ισχύς κυψέλης κατά την εφαρμογή του CC.....	70
4.12	Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή του CC.	71
4.13	Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή του CC.	71
4.14	Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή του CC.....	72
4.15	Συνολική παραγόμενη ισχύς από τις πηγές κατά την εφαρμογή του CC.	72
4.16	Επίπεδα φόρτισης μπαταρίας και υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή του CC.....	73
4.17	Τάση στο φορτίο κατά την εφαρμογή του CC.	73
4.18	Ισχύς κυψέλης κατά την εφαρμογή του FLC.	74
4.19	Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή του FLC.	74
4.20	Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή του FLC.	75
4.21	Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή του FLC.	75
4.22	Συνολική παραγόμενη ισχύς από τις πηγές κατά την εφαρμογή του FLC.	76
4.23	Επίπεδα φόρτισης μπαταρίας και υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή του FLC.	76
4.24	Τάση στο φορτίο κατά την εφαρμογή του FLC.	77

Κατάλογος πινάκων

1.1	Κόστος Γραμμής Παροχής.	5
1.2	Κόστος γραμμής ανά τύπο και επιτρεπόμενη ταχύτητα.....	5
1.3	Κόστος Γραμμής Τροφοδοσίας Υδρογόνου.	8
1.4	Κόστος Μεταφοράς Υδρογόνου μέσω Οδικού Δικτύου.	8
2.1	Πληροφορίες για διαφόρους τύπους κυψελών καυσίμου.	9
2.2	Μεταβολή της $\Delta\bar{g}_f$ βάσει θερμοκρασίας.	12
2.3	Επίδραση της θερμοκρασίας στην $\Delta\bar{g}_f$, στην Τάση ανοιχτού κυκλώματος (OCV) και στο όριο απόδοσης.	14
2.4	Επίδραση υλικού στην πυκνότητα ρεύματος.	19
2.5	Επίδραση της επιφανειακής πυκνότητας ρεύματος στην παραγόμενη τάση της κυψέλης	20
2.6	Σύγκριση χαρακτηριστικών υπερπυκνωτή με συμβατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.....	27

2.7	Σύγκριση τεχνικών χαρακτηριστικών διαφόρων τύπων μπαταριών. ...	31
2.8	Επίδραση από τις αλλαγές των κερδών των 3 βαθμίδων στην κυματομορφή του σφάλματος.	36
5.1	Σύγκριση ενεργειακής διαχείρισης χαρακτηριστικών μεταξύ των τριών στρατηγικών (<i>OMC, CC, FLC</i>).	81

“Only electricity can give the transport sector the flexibility to switch fuels when one or more become too expensive.”

Frederick W. Smith

“Without electricity, the air would rot.”

Ralph Waldo Emerson

1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η παρούσα διπλωματική είναι δομημένη με τέτοιον τρόπο, ώστε ο αναγνώστης να εισάγεται σταδιακά στο κυρίως αντικείμενο και οποιαδήποτε τεχνική ορολογία χρησιμοποιείται, να έχει προηγουμένως επεξηγηθεί, εφόσον χρειάζεται.

1.2 Ηλεκτρικό Τρένο

Το τρένο, ως μέσο σταθερής τροχιάς, ανέκαθεν αποτελούσε ένα από τα κύρια μέσα μεταφοράς για τον άνθρωπο, εξυπηρετώντας εκατομμύρια πολίτες κάθε μέρα, παίζοντας σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της κοινωνίας. Ο εξηλεκτρισμός του βοήθησε κυρίως στη μείωση των ρυθμών, στη μείωση του θορύβου κατά την λειτουργία του, καθώς και στη μείωση των δαπανών συντήρησης. Με την πάροδο του χρόνου εξελίξεις στον χώρο των ηλεκτρονικών ισχύος, έδωσαν την δυνατότητα για αύξηση της διαθέσιμης πυκνότητας ισχύος, βελτιώνοντας παράλληλα την κατανάλωση ρεύματος. Η σύγχρονη εποχή της υβριδοποίησης αναπόφευκτα επηρεάζει και το συγκεκριμένο μέσο μετακίνησης, καθώς τα υβριδικά τρένα με κυψέλες καυσίμου, συνδυάζουν την απόδοση ενός υβριδικού τρένου με diesel μηχανές χωρίς τα έξοδα συντήρησης των εναερίων γραμμών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και τα βλαβερά για την υγεία καυσαέρια. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αντικατάστασης των εναερίων γραμμών παροχής ρεύματος με κυψέλες καυσίμου, οι οποίες έχουν τον ρόλο του κύριου παρόχου ηλεκτρικής ενέργειας στο τρένο και με τις μπαταρίες και τους υπερπυκνωτές, που αναλαμβάνουν την απόκριση στις γρήγορες και απότομες εναλλαγές του φορτίου.

Οι διαφορετικοί τύποι ηλεκτρικών τρένων μπορούν να διαχωριστούν με κριτήριο το μέσο στο οποίο είναι αποθηκευμένη η ενέργεια που παρέχει την ζητούμενη ισχύ στους κινητήρες και είναι οι εξής:

1. *Επαναφορτιζόμενα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, όπως τα τρένα τροφοδοτούμενα από μπαταρίες, υπερπυκνωτές ή συνδυασμό αυτών.

2. *Σταθερή Πηγή Τάσης*, όπως η ηλεκτροφόρα σιδηροδρομική ράγα, είτε η εναέρια γραμμή παροχής τάσης από το δημόσιο δίκτυο.
3. *Υβριδικά Συστήματα Προώθησης με χρήση ορυκτών καυσίμων*, όπως τα diesel-ηλεκτρικά συστήματα τρένων, τα οποία τροφοδοτούνται από παράλληλη χρήση μηχανών diesel και συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως μπαταρίες, υπερπυκνωτές.
4. *Υβριδικά Συστήματα Προώθησης με χρήση υδρογόνου*, όπως τα συστήματα τρένων, τα οποία συνδυάζουν τις κυψέλες καυσίμου ως κύρια παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και τις μπαταρίες και τους υπερπυκνωτές για επικουρική παροχή και κάλυψη ζήτησης φορτίου.

1.2.1 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή

Η βασικότερη μεταβλητή κατά την σχεδίαση λειτουργίας ενός ηλεκτρικού τρένου είναι η επιλογή ανάμεσα σε μηχανές εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος. Η ιστορία εξέλιξης, βάσει του [1] για κάθε μία από τις παραπάνω επιλογές παρατίθεται εν περιλήψει παρακάτω, λαμβάνοντας υπ' όψιν το γεγονός ότι στην Ευρώπη το εθνικό σιδηροδρομικό δίκτυο κάθε χώρας είναι μέρος των δημόσιων υποδομών της, ενώ στην Αμερική θεωρείται ιδιωτική επένδυση, καθώς παίζει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του μέσου:

1. Εξέλιξη ηλεκτρικών τρένων με μηχανές συνεχούς ρεύματος:
 - (α') 1837: Το πρώτο ηλεκτρικό τρένο, φτιάχτηκε από τον χημικό Robert Davidson. Το όνομα του τρένου, Galvani, προέρχεται από τα γαλβανικά κελιά μπαταριών, τα οποία τροφοδοτούσαν τις μηχανές συνεχούς ρεύματος και επαρκούσαν για να κινήσουν το 6 τόνων αμάξιωμα του κατά 2 χιλιόμετρα.
 - (β') 1875-1883: Η πρώτη επιβατική ηλεκτρική αμαξοστοιχία παρουσιάστηκε από τον Werner von Siemens στο Βερολίνο, το 1875. Αποτελούνταν από ένα κινητήριο βαγόνι και τρία επιβατικά και κινούνταν από έναν κινητήρα 2.2 kW συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς, ο οποίος τροφοδοτούνταν από μία μονωμένη σιδηροδρομική ράγα παροχής 150V DC. Η εξέλιξη αυτή ήταν ο προπομπός για το άνοιγμα της πρώτης γραμμής ηλεκτρικού τραμ σε Γερμανία και Αυστρία, το 1881 και 1883 αντίστοιχα και τροφοδοτούνταν από εναέρια γραμμές.
 - (γ') 1890: Λειτουργεί στο Λονδίνο η πρώτη ηλεκτρική υπόγεια γραμμή, που είχε ως σκοπό την αποφυγή των τοξικών αερίων των ατμομηχανών σε κλειστό χώρο.
 - (δ') 1895-1930: Φτιάχεται στο Οχάιο της Αμερικής, η πρώτη κύρια γραμμή ηλεκτρικού τρένου, μήκους 4 μιλίων, ενώνοντας την Βαλτιμόρη με την Νέα Υόρκη. Το 1904 η Νέα Υόρκη λειτουργεί για πρώτη φορά στο σιδηροδρομικό δίκτυο της ηλεκτρικά τρένα, ενώ μέχρι το 1930 ηλεκτροδοτείται ολόκληρο το σιδηροδρομικό δίκτυο της Πενσυλβάνια.
 - (ε') 1930-2000: Ενώ η ηλεκτροδότηση πολλών γραμμών στις ανατολικές ακτές της Αμερικής συνεχίζεται, από ένα χρονικό σημείο και μετά, λόγω

μεγάλου κόστους συντήρησης των γραμμών παροχής ρεύματος, προωθούνται κυρίως οι diesel μηχανές, οπότε η κύρια εξέλιξη των ηλεκτρικών τρένων πραγματοποιείται στην Ευρώπη.

2. Εξέλιξη ηλεκτρικών τρένων με μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος:

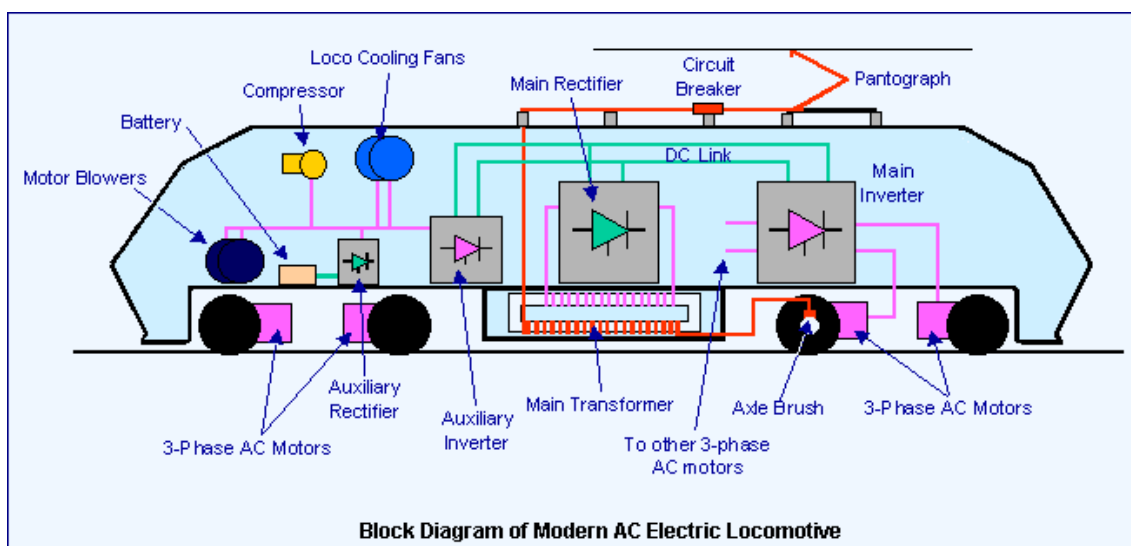
- (α') 1891: Το πρώτο λειτουργικό τρένο, τροφοδοτούμενο από κινητήρα εναλλασσομένου ρεύματος φτιάχνεται από τον Charles Brown, ο οποίος παρατήρησε την ανωτερότητα των τριφασικών κινητήρων έναντι των κινητήρων συνεχούς ρεύματος σε πυκνότητα ισχύος.
- (β') 1894-1896: Ο Kalman Kando εφευρίσκει αρχικά έναν νέο τύπο ασύγχρονης μηχανής και μετέπειτα τον κυκλικό μετατροπέα φάσης, επιτρέποντας έτσι τα ηλεκτρικά τρένα να τροφοδοτούνται μέσω μίας και μόνο εναέριας γραμμής παροχής, στη βιομηχανική συχνότητα των 50Hz.
- (γ') 1900-1930: Η εταιρία Oerlikon παράγει το πρώτο ηλεκτρικό τρένο με σύστημα πέδησης ανακτώμενης ενέργειας και είναι ιδιαιτέρως χρήσιμο σε ορεινούς δρόμους με μεγάλη κλίση. Η Ιταλία ηλεκτροδοτεί όλο το σιδηροδρομικό της δίκτυο, χρησιμοποιώντας 3 διαφορετικούς τύπους παροχής τάσης, ενώ μετά τον 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο καταλήγει στην παροχή 3kV DC.
- (δ') 1935-1960: Η συνεχής εξέλιξη στον τομέα της ηλεκτροκίνησης επέτρεψε την κυκλοφορία μεγαλύτερων και ισχυρότερων τρένων. Το 1935 η γερμανική αμαξοστοιχία των 2.8 MW ήταν ικανή για ταχύτητες 150 km/h. Το 1955 η γαλλική αμαξοστοιχία CC 7107 είχε μέγιστη ταχύτητα 331 km/h, ενώ το 1960 η Ελβετία παρήγαγε επιβατικές αμαξοστοιχίες των 7.2 MW, ταξιδεύοντας με μέση ταχύτητα 200 km/h.
- (ε') 1980-2010: Οι εξελίξεις στους τομείς των υπολογιστικών συστημάτων και των ηλεκτρονικών ισχύος επέτρεψαν πολύ καλύτερο έλεγχο στη λειτουργία των αμαξοστοιχιών, καθώς και μηχανές με μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος. Η Γαλλία και η Ιαπωνία ήταν οι πρώτες χώρες που προσέφεραν στο κοινό αμαξοστοιχίες με πολύ υψηλές ταχύτητες. Το 2006 η Siemens άρχισε να προμηθεύει επιβατικές αμαξοστοιχίες, οι οποίες μπορούσαν να αναπτύξουν 351km/h.

1.2.2 Βασικά δομικά στοιχεία συστήματος προώθησης ηλεκτρικού τρένου

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούν εν περιλήψει κάποια από τα βασικότερα εξαρτήματα του συστήματος προώθησης ενός ηλεκτρικού τρένου [2], έτσι ώστε να μπορέσει να κατανοήσει ο αναγνώστης την μετέπειτα σύγκριση με εκείνα τα εξαρτήματα που χρειάζονται για την προώθηση ενός υβριδικού τρένου.

Το σχήμα 1.1 απεικονίζει κάποια βασικά εξαρτήματα μίας τυπικής ηλεκτρικής αμαξοστοιχίας, αυτά είναι τα εξής:

1. *Κινητήρας συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος:* Στην σημερινή εποχή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με την ίδια ευκολία είτε κινητήρες AC είτε DC. Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος επιτρέπει σχεδόν οποιαδήποτε μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, σε εκμεταλλεύσιμη μορφή για τους κινητήρες.



Σχήμα 1.1: Εξαρτήματα Ηλεκτρικής Αμαξοστοιχίας. (Πηγή: *Railway Technical Web Pages*)

2. **Παντογράφος:** Πρόκειται για ένα σύστημα συλλογής του ηλεκτρικού ρεύματος από τα εναέρια ηλεκτροφόρα καλώδια του δικτύου. Παραμένει στην θέση του με την βοήθεια πεπιεσμένου αέρα και καταρρέει σε περίπτωση που αναγνωρίσει εμπόδιο.
3. **Διακόπτης ισχύος:** Διακόπτης αποκοπής παροχής σε περίπτωση σφάλματος, είτε για συντήρηση.
4. **Μετασχηματιστής:** Λειτουργεί μέσω της επαγωγής της τάσης ανάμεσα σε δύο διαφορετικά πηνία μέσα σε έναν μαγνητικό πυρήνα για την μείωση ή την αύξηση της τάσης παροχής. Η παρουσία Μ/Σ κυρίως σε τρένα με AC μηχανές είναι ιδιαίτερα σημαντική, αφού η τάση δικτύου για να είναι διαχειρίσιμη θα πρέπει να μειωθεί.
5. **Ανορθωτής:** Συσκευή ηλεκτρονικού ισχύος αποτελούμενη από θυρίστορς και διόδους για την μετατροπή AC τάσης σε DC. Η σύγχρονη αμαξοστοιχία συνήθως διαθέτει δύο ανορθωτές, έναν για το σύστημα προώθησης και έναν για τα επικουρικά κυκλώματα.

1.2.3 Οικονομικοί δείκτες υποδομής και συντήρησης δικτύου

Παρακάτω θα δοθούν ενδεικτικά κάποιοι οικονομικοί δείκτες τόσο για την εγκατάσταση και τη συντήρηση ενός ηλεκτρικού σιδηροδρόμου, όσο και για τις ηλεκτρικές αμαξοστοιχίες [3]. Δεδομένου της πολυπλοκότητας της οικονομικής ανάλυσης ενός τέτοιου έργου, οικονομικά στοιχεία που αφορούν το σύνολο της υποδομής (τοπογραφικές αναλύσεις, τηλεπικοινωνίες, υποσταθμοί και λοιπές υποδομές) προσπερνούν τον στόχο της παρούσας διπλωματικής. Θα εξεταστούν στοιχεία, όπως ο μέσος όρος του κόστους εγκατάστασης εναέριας γραμμής παροχής, καθώς και ο μέσος όρος κόστους μίας αμαξοστοιχίας, μαζί με την αντίστοιχη διάρκεια ζωής τους αλλά και το κόστος συντήρησής τους, ως ποσοστό επί του αρχικού κόστους εγκατάστασης.

1. *Εναέρια Γραμμή Παροχής Τάσης*: Στον παρακάτω πίνακα δίνονται ενδεικτικά κάποιες τιμές για διαφορετικούς τύπους παροχής ανά παρεχόμενη ισχύ σε MVA.

Πίνακας 1.1: Κόστος Γραμμής Παροχής.

Τύπος Παροχής Τάσης Δικτύου	10 ⁶ euros / MVA
AC 25kV, 50Hz or 60Hz	0.2 (0.15 to 0.3)
AC 15kV, 16 2/3 Hz	0.3 (0.2 to 0.5)
DC 3kV or 1.5 kV	0.3 (0.2 to 0.5)

Το κόστος εγκατάστασης εναέριας γραμμής παροχής εξαρτάται, όχι μόνο από τον τύπο παροχής, αλλά και από τη μέγιστη ταχύτητα που επιτρέπει στο τρένο το υλικό της γραμμής. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτό προκύπτει ο παρακάτω πίνακας, ο οποίος αποδίδει το κόστος της γραμμής σε 10⁶ euros/km για κάθε τύπο και επιτρεπόμενη ταχύτητα.

Πίνακας 1.2: Κόστος γραμμής ανά τύπο και επιτρεπόμενη ταχύτητα.

Τύπος Παροχής Τάσης Δικτύου	Μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα, km/h	
	100	300
AC 25kV, 50 or 60 Hz	0.15 (0.1 to 0.2)	0.2 (0.15 to 0.3)
AC 15kV, 16 2/3 Hz		
DC 3kV	0.17 (0.12 to 0.3)	—
DC 1.5kV		

Για να αποκτήσει ο αναγνώστης μία σφαιρική άποψη επί των οικονομικών στοιχείων θα πρέπει να δοθούν και οι αντίστοιχες διάρκειες ζωής του κάθε δομικού στοιχείου της υποδομής. Οι εναέριας γραμμής παροχής έχουν μέσο προσδόκιμο ζωής μεταξύ 30 και 50 χρόνια, ενώ ο ηλεκτρικός εξοπλισμός κάθε υποσταθμού από 20 μέχρι 50 χρόνια. Αν λάβουμε υπόψιν μας και το κόστος της τροποποίησης της χωρητικότητας, κυρίως καθ' ύψος, των υπάρχοντων τουνελ, τόσο για τις εναέριας γραμμής παροχής, όσο και για τις τηλεπικοινωνίες, αυτό ανέρχεται κυρίως στο 10⁶ euros /km, ενώ η διάρκεια ζωής της τροποποίησης κυμαίνεται μεταξύ 40 και 80 χρόνια. Για να διατηρηθεί όμως η παραπάνω διάρκεια ζωής, θα πρέπει να γίνονται τακτικοί έλεγχοι συντήρησης σε όλα τα δομικά στοιχεία της υποδομής. Ο μέσος όρος του κόστους της ετήσιας συντήρησης, τόσο της γραμμής, όσο και των υποσταθμών ανέρχεται στο 2% της αρχικής επένδυσης. Γενικά, μπορούμε να καταλήξουμε στο ότι, το συνολικό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης για κάθε δομικό στοιχείο ανέρχεται σε:

$$0.15 \times 10^6 + \sum_{i=1}^{i=A} (i \times 0.02 \times (0.15 \times 10^6)) = (1 + 0.02 \times A) \times (0.15 \times 10^6) \text{ euros}, \quad (1.1)$$

όπου A είναι η αντίστοιχη διάρκεια ζωής του, σε χρόνια.

2. *Κόστος κτήσης ηλεκτρικών αμαξοστοιχιών*: δίνεται ο ακόλουθος προσεγγιστικός τύπος καθορισμού του κόστους κτήσης μίας μονής αμαξοστοιχίας, καθώς και μία ηλεκτρικής πολλαπλής αμαξοστοιχίας, όπου P_L και P είναι ο μέσος

όρος του αρχικού κόστους μίας αμαξοστοιχίας σε $10^6 \text{euros}/\text{km}$ και W είναι η ισχύς εξόδου των ηλεκτρικών κινητήρων σε MW .

$$P_L = W/3 + 1 \quad (1.2)$$

$$P_M = 2W + 2 \quad (1.3)$$

Για παράδειγμα, ο μέσος όρος κόστους κτήσης μίας αμαξοστοιχίας των $6MW$ κυμαίνεται στα $3 * 10^6 \text{ euros}$, ενώ το αντίστοιχο κόστος για μία ηλεκτρική πολλαπλή μονάδα των $8MW$ ανέρχεται στα $18 * 10^6 \text{ euros}$, με $\pm 20\%$ σφάλμα πρόβλεψης.

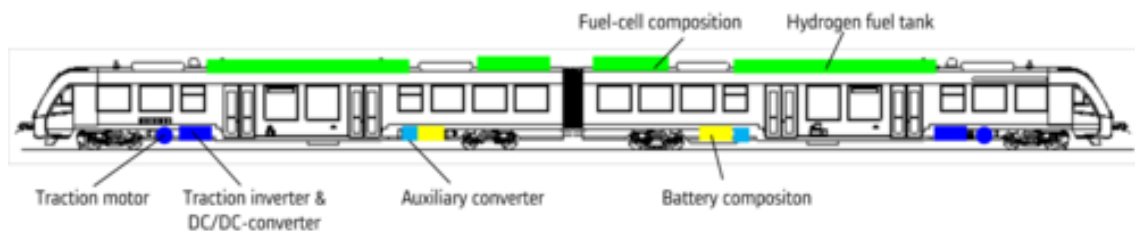
Η διάρκεια ζωής των αμαξοστοιχιών και των πολλαπλών ηλεκτρικών μονάδων κυμαίνεται μεταξύ 15 και 40 χρόνια ή από 4 έως $8 * 10^6 \text{ km}/\text{unit}$. Τέλος, το κόστος της ετήσιας συντήρησης, τόσο για την αμαξοστοιχία όσο και για την πολλαπλή ηλεκτρική μονάδα, ανέρχεται στο 20% και το 30% της αντίστοιχης αρχικής επένδυσης. Για παράδειγμα, αν μία αμαξοστοιχία αρχικά κοστίζει $P_L = 3 * 10^6 \text{ euros}$, τότε το κόστος συντήρησής της θα ανέρχεται σε $E_L = 0.2 * P_L = 0.6 * 10^6 \text{ euros}$, ενώ για μία πολλαπλή ηλεκτρική μονάδα που αρχικά κοστίζει $P_M = 18 * 10^6 \text{ euros}$, το κόστος συντήρησής της θα ανέρχεται σε $E_M = 0.3 * P_M = 5.4 * 10^6 \text{ euros}$, με $\pm 20\%$ σφάλμα πρόβλεψης.

1.3 Υβριδικό Τρένο

Ο τύπος του υβριδικού τρένου που θα εξεταστεί, τροφοδοτείται κυρίως μέσω κυψελών καυσίμου και δευτερευόντως από ένα σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελούμενο από μπαταρίες και υπερπυκνωτή. Με μία πρώτη ματιά, τα πλεονεκτήματα έναντι του ηλεκτρικού τρένου, φαίνονται να είναι κυρίως η απουσία εγκατάστασης, λειτουργίας, συντήρησης, αλλά και οπτικής ρύπανσης των εναέριων γραμμών παροχής, καθώς και της ηλεκτροφόρας σιδηροδρομικής ράγας. Επίσης πολύ σημαντικό είναι, ότι για την λειτουργία των υβριδικών τρένων δεν απαιτούνται τροποποιήσεις στο υπάρχον σιδηροδρομικό δίκτυο. Είναι όμως αυτή η τεχνολογία τόσο ελπιδοφόρα όσο παρουσιάζεται;

Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου, ενώ ακόμη δεν έχει ωριμάσει αρκετά ώστε να μπορεί να εφαρμοσθεί σε παγκόσμια κλίμακα, έχει χρησιμοποιηθεί σε πειραματικό στάδιο, σε όλους του τομείς των μέσων μεταφοράς, όπως σε αεροπλάνα, καράβια, φέρρυ μποτ, φορτηγά, αυτοκίνητα, ενώ δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι χρησιμοποιείται στα περισσότερα, αν όχι όλα, διαστημικά προγράμματα [4]. Από τις παραπάνω εφαρμογές και μελέτες έχει προκύψει ότι το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (TCO- Total Cost of Ownership), αν και υψηλότερο στις εφαρμογές με κυψέλες καυσίμου σε σχέση με τις αντίστοιχες ηλεκτρικές ή τις diesel, προβλέπεται να μειωθεί τα επόμενα χρόνια. Αιτία είναι το υψηλό κόστος παραγωγής υδρογόνου, το οποίο ουσιαστικά ακυρώνει το μικρό κόστος χρήσης και συντήρησης ενός συστήματος προώθησης με κυψέλες καυσίμου. Επομένως, η τεχνολογία αυτή αν και έχει πολλούς υποστηρικτές, είναι αρκετά δύσκολο να αρχίζει να εφαρμόζεται σε παγκόσμια κλίμακα με την παρούσα τιμή του υδρογόνου και την απουσία δικτύου ανατροφοδότησης. Τέλος, προβλέψεις όσον αφορά στην εξέλιξη της παραγωγής του υδρογόνου, δείχνουν ότι περίπου το 2045, η τιμή του θα έχει μειωθεί στο μισό ($4.2 \text{ euros}/\text{kgH}_2$), γεγονός που θα κάνει πιο ευδιάκριτα τα πλεονεκτήματα της υβριδοποίησης έναντι του ηλεκτρισμού.

1.3.1 Βασικά δομικά στοιχεία συστήματος προώθησης υβριδικού τρένου



Σχήμα 1.2: Δομικά Στοιχεία Υβριδικού Τρένου. (Πηγή : *Engineering News & Analysis - GlobalSpec*)

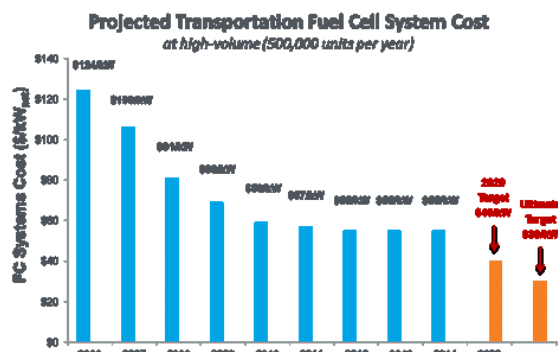
Το σχήμα 1.2 απεικονίζει κάποια από τα βασικά δομικά στοιχεία ενός υβριδικού τρένου [4], αυτά είναι τα εξής:

1. *Κυψέλες καυσίμου:* Οι κυψέλες καυσίμου, οι οποίες έχουν ως είσοδο υδρογόνο και οξυγόνο, παράγουν κατά τη λειτουργία τους ηλεκτρισμό, νερό και θερμότητα. Είναι ογκώδης διάταξη, τοποθετείται συνήθως κάτω από το τρένο για να κρατηθεί το κέντρο βάρους του χαμηλά, αλλά και για την εκμετάλλευση των καναλιών αέρα κατά την ψύξη της.
2. *Δεξαμενές Υδρογόνου:* Οι δεξαμενές περιέχουν υδρογόνο, πεπιεσμένο στα 600bar, κατασκευάζονται συνήθως από χάλυβα υψηλής αντοχής ή από ανθρακονήματα για μείωση βάρους. Τοποθετούνται, κυρίως στην οροφή του τρένου για λόγους ασφάλειας, ενώ το μικρό μικτό βάρος της κάθε δεξαμενής (περίπου 95 κιλά) έχει ελάχιστη επιρροή στο κέντρο βάρους του τρένου.
3. *Μπαταρίες:* Χρησιμοποιούνται κυρίως μπαταρίες ιόντων λιθίου, λόγω της ικανότητας τους για απορρόφηση ή απόδοση μεγάλων ποσών ενέργειας προϊόντος του χρόνου.
4. *Υπερπυκνωτές:* Με χωρητικότητα 10-100 φορές μεγαλύτερη απ'τους "κοινούς" πυκνωτές, χρησιμοποιούνται λόγω της μεγάλης ειδικής ισχύος τους, δηλαδή της ικανότητας τους να απορροφούν ή να παράγουν πολύ μεγάλη ισχύ σε απειροελάχιστο χρόνο.
5. *DC-DC Converter:* Ηλεκτρονικά ισχύος υπεύθυνα τόσο για την ανύψωση ή την μείωση της τάσης που τροφοδοτεί τους κινητήρες, όσο και για την τροποποίηση της ενέργειας, παραγόμενης κατά το φρενάρισμα, για την φόρτιση των πηγών.
6. *Κινητήρες συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος:* Συνήθης επιλογή είναι οι μηχανές AC, οι οποίες είναι απλούστερες και φθηνότερες, ενώ μπορούν να διαχειριστούν μεγαλύτερο φορτίο από τις αντίστοιχες DC. Οι DC μηχανές χρησιμοποιούνται σε ιδιαίτερες εφαρμογές, κυρίως για τα μηχανήματα συντήρησης του δικτύου.

1.3.2 Οικονομικοί δείκτες εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης υβριδικού τρένου

Στην εισαγωγή αναφέρθηκε, ότι το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας τρένων με κυψέλες καυσίμου είναι μεγαλύτερο από αυτό των ηλεκτρικών ή των diesel. Ο παραπάνω

οικονομικός δείκτης επηρεάζεται, τόσο απ'την τιμή παραγωγής του υδρογόνου, όσο και από την απόδοση των κυψελών καυσίμου, η οποία μειώνεται προϊόντος του χρόνου. Στο σχήμα 1.3 φαίνεται η πτωτική τάση του κόστους παραγωγής κυψελών καυ-



Σχήμα 1.3: Κόστος παραγωγής κυψελών καυσίμου. (Πηγή : CleanTechnica)

σίμου προϊόντος του χρόνου, παράγοντας που μπορεί να καθορίσει την μελλοντικό τρόπο μετακινήσεων. Για να έχει νόημα η σύγκριση οικονομικών δεικτών της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τις εναέριες γραμμές παροχής, θα πρέπει να εξεταστεί το κόστος μεταφοράς του υδρογόνου από το σημείο παραγωγής του, στο τερματικό σημείο [5]. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται ενδεικτικές τιμές για την εγκατάσταση ενός δικτύου παροχής υδρογόνου, όπου η στήλη "μεταφορά" αφορά το κομμάτι του αγωγού από το εργοστάσιο παραγωγής έως το σημείο διασποράς, ενώ η στήλη "διανομή" αφορά το κομμάτι του αγωγού από το σημείο διασποράς έως το τερματικό σημείο.

Πίνακας 1.3: Κόστος Γραμμής Τροφοδοσίας Υδρογόνου.

	Μεταφορά	Διανομή
Χιλιομετρική απόσταση (km)	300	50
Επένδυση (euros/km)	560000	250000

Όσον αφορά την μεταφορά του υδρογόνου μέσω του οδικού δικτύου, ο πιο αποδοτικός τρόπος να γίνει αυτό, είναι η μεταφορά του σε υγρή μορφή. Στον επόμενο πίνακα αναγράφονται ενδεικτικά κόστη για την μεταφορά υδρογόνου, αλλά και τη συντήρηση του στόλου των φορτηγών, βάσει χιλιομετρικής απόστασης και χωρητικότητας δεξαμενών.

Πίνακας 1.4: Κόστος Μεταφοράς Υδρογόνου μέσω Οδικού Δικτύου.

	Χωρητικότητα (kgH_2/day)	Αέριο Υδρογόνο	Υγρό Υδρογόνο
Ειδικό Κόστος ($euros/kgH_2/day$)	100	12935	8393
Χρήση και συντήρηση ($euros/kgH_2/day$)		18.7	9.4
Ειδικό Κόστος ($euros/kgH_2/day$)	400	4753	4004
Χρήση και συντήρηση ($euros/kgH_2/day$)		18.7	9.4
Ειδικό Κόστος ($euros/kgH_2/day$)	1000	3793	3195
Χρήση και συντήρηση ($euros/kgH_2/day$)		18.7	9.4

"I believe that fuel cells could end the 100-year reign of the internal combustion engine."

William Clay Ford, Jr.

"Everything is hard, before it is easy."

Goethe

2

Αναλυτική Περιγραφή Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί αναλυτικά η λειτουργία, καθώς και η τελική επιλογή των τριών πηγών μαζί με τους αντίστοιχους DC-DC converters του υβριδικού τρένου που είναι προς μελέτη.

2.1 Κυψέλες Καυσίμου

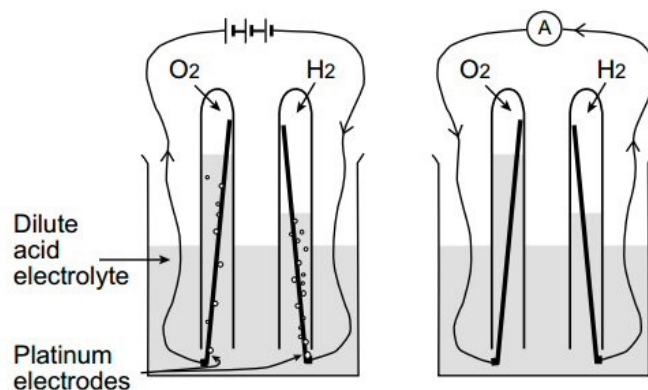
Στον πίνακα 2.1 δίνονται οι διαθέσιμοι τύποι κυψελών καυσίμου, με το αντίστοιχο στοιχείο μεταφοράς τους, το φάσμα της θερμοκρασίας λειτουργίας τους, καθώς και ενδεικτικές εφαρμογές τους. Η πρωτεύουσα πηγή ενέργειας για το υβριδικό τρένο, με το οποίο ασχολείται η παρούσα διπλωματική, θα είναι η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης μεταφοράς πρωτονίων – *Proton Exchange Membrane (PEMFC)* [6].

Πίνακας 2.1: Πληροφορίες για διαφόρους τύπους κυψελών καυσίμου.

Τύπος κυψέλης καυσίμου	Μεταφερόμενο Ιόν	Θερμοκρασία Λειτουργίας	Εφαρμογές και σημειώσεις
Alkaline (AFC)	OH^-	50 - 200°C	Used in space vehicles, e.g Apollo, Shuttle.
Proton Exchange Membrane (PEMFC)	H^+	30 - 100°C	Vehicles and mobile applications and for lower CHP systems.
Direct Methanol (DMFC)	H^+	20 - 90°C	Suitable for portable electronic systems of low power running for long times.
Phosphoric Acid (PAFC)	H^+	~ 220°C	Large number of 200-kWCHP systems in use.
Molten Carbonate (MCFC)	CO_3^{2-}	~ 650°C	Suitable for medium to large scale CHP systems, up to MW capacity.
Solid Oxide (SOFC)	O^{2-}	500 - 1000°C	Suitable for all sizes of CHP systems, 2kW to multi MW.

2.1.1 Ηλεκτροχημική Λειτουργία

Η λειτουργία μίας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου πρωτοπαρουσιάστηκε από τον William Grove το 1839, ο οποίος ουσιαστικά έδειξε την αντίστροφη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1, κατά την ηλεκτρόλυση, το νερό



Σχήμα 2.1: Ηλεκτρόλυση νερού (αριστερά), Κυψέλες Καυσίμου Υδρογόνου(δεξιά). (Πηγή : *Fuel Cell Systems Explained*)

διαχωρίζεται στα συστατικά του, υδρογόνο και οξυγόνο, με τη βοήθεια του ηλεκτρικού ρεύματος. Αντίθετα, στις κυψέλες καυσίμου, όταν ενώνονται μόρια υδρογόνου με εκείνα του οξυγόνου, παράγεται νερό, θερμότητα και ένα αρκετά ασθενές ηλεκτρικό ρεύμα. Θα μπορούσαμε να πούμε, ότι πρόκειται για μία συνεχή ηλεκτροχημική διεργασία κατά την οποία, το υδρογόνο "καίγεται", παράγοντας νερό και ηλεκτρισμό, βάσει της παρακάτω γνωστής αντίδρασης:

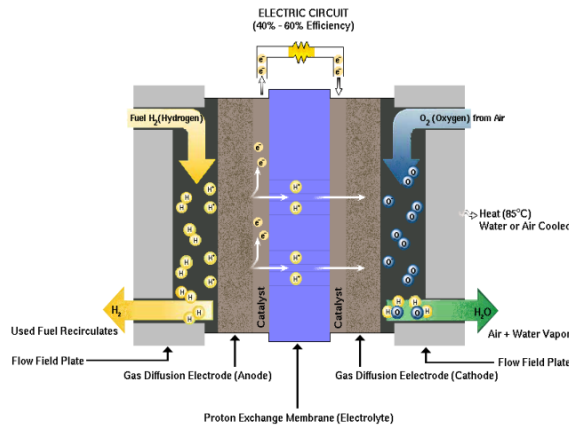


Μία τυπική κυψέλη καυσίμου αποτελείται κατά βάση, από δύο ηλεκτρόδια - την άνοδο και την κάθοδο - πάνω στα οποία γίνονται οι χημικές αντιδράσεις, καθώς και ένα στρώμα ηλεκτρολύτη - μεμβράνη που βρίσκεται ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια, το οποίο λειτουργεί σαν φίλτρο, διευκολύνοντας την διέλευση μόνο των ιόντων υδρογόνου. Το παραγόμενο ρεύμα μίας κυψέλης καυσίμου είναι ασθενές, επειδή η επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη είναι πολύ μικρή, αλλά και επειδή η απόσταση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων είναι αρκετά μεγάλη, με αποτέλεσμα ο ηλεκτρολύτης, οποίος βρίσκεται ανάμεσα τους, να λειτουργεί σαν αντίσταση στη ροή των ηλεκτρονίων. Προς επίλυση του παραπάνω προβλήματος, τα ηλεκτρόδια, το σχήμα των οποίων παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση της κυψέλης, θα πρέπει να κατασκευάζονται επίπεδα και να τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους, γεγονός που μεγιστοποιεί την επιφάνεια επαφής τους, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί την απόσταση μεταξύ τους. Για να μπορέσει όμως ο αναγνώστης να καταλάβει πως μία αντίδραση μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου μπορεί να παράξει ηλεκτρικό ρεύμα, θα πρέπει να αναλυθούν ξεχωριστά οι αντιδράσεις σε κάθε ηλεκτρόδιο.

1. Άνοδος: Στην άνοδο ενός κελιού κυψέλης καυσίμου με ηλεκτρολύτη οξέος, το υδρογόνο ιοντίζεται, με αποτέλεσμα να παραχθούν ηλεκτρόνια και ιόντα υδρογόνου, δηλαδή:



2. **Κάθοδος:** Στην κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με τα παραγόμενα ηλεκτρόνια της ανόδου και τα ιόντα υδρογόνου που διαπερνούν το στρώμα του ηλεκτρολύτη, για να σχηματιστεί νερό, δηλαδή:



Σχήμα 2.2: Λειτουργία *PEM Fuel Cell*.
(Πηγή: SEFCA)

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2, για να συνεχιστεί η απρόσκοπτη λειτουργία των παραπάνω αντιδράσεων, θα πρέπει:

1. Να καταναλώνονται 2 μόρια υδρογόνου για κάθε μόριο οξυγόνου,
2. Να παράγονται δύο ηλεκτρόνια για κάθε παραγόμενο μόριο νερού,
3. Τα ηλεκτρόνια που παράγονται στην άνοδο, να περνούν μέσω του κυκλώματος στην κάθοδο και ποτέ μέσω του ηλεκτρολύτη, καθώς έτσι θα χαθεί όλο το παραγόμενο δυναμικό και
4. Τα ιόντα υδρογόνου θα πρέπει να μπορούν να μεταβούν απ'την άνοδο στην κάθοδο, διαπερνώντας το στρώμα του ηλεκτρολύτη.

Προς διευκόλυνση της διέλευσης των ιόντων υδρογόνου, επιλέγονται μεμβράνες, οι οποίες είναι κατά βάση πολυμερή μόρια και περιέχουν στην σύστασή τους ιόντα υδρογόνου. Οι μεμβράνες αυτές, ονομάζονται μεμβράνες ανταλλαγής ιόντων (*Proton Exchange Membranes – PEM*).

2.1.2 Τάση ανοιχτού κυκλώματος Κυψέλης

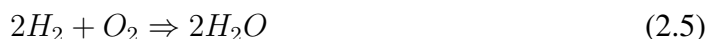
Για τη μέτρηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος, καθώς και της απόδοσης μιας κυψέλης καυσίμου, θα πρέπει πρώτα ο αναγνώστης να κατανοήσει τις ακόλουθες έννοιες:

1. **Ελεύθερη Ενέργεια Gibbs (Gibbs free energy, G_f):** Πρόκειται για τη διαθέσιμη ενέργεια (θερμοδυναμικό δυναμικό) να καταβάλει εξωτερικό έργο κάτω από σταθερές τιμές πίεσης και θερμοκρασίας. Ελαχιστοποιείται, όταν μία χημική αντίδραση φτάσει σε χημική ισοροπία.
2. **Εξέργεια (Exergy):** Το συνολικό έργο που μπορεί να παραχθεί κατά τη διάρκεια μίας αντίδρασης, συμπεριλαμβανομένου του έργου από τις αλλαγές του όγκου ή της πίεσης.
3. **Ενθαλπία Σχηματισμού (Enthalpy of Formation, H_f):** Εκφράζει θερμοδυναμικό δυναμικό για την παραγωγή έργου και αφορά κυρίως τη μεταβολή στην συνολική ενέργεια ενός συστήματος.

Για να βρεθεί η παραγόμενη ενέργεια της κυψέλης, θα πρέπει να υπολογιστεί η συνολική διαφορά της ελεύθερης ενέργειας Gibbs, $\Delta\bar{g}_f$, η οποία προκύπτει απ'την αφαίρεση της ενέργειας των προϊόντων, από την συνολική ενέργεια των αντιδρώντων, δηλαδή:

$$\Delta\bar{g}_f = (\bar{g}_f)_{Products} - (\bar{g}_f)_{Reactants} \quad (2.4)$$

Δεδομένου, ότι η βασική αντίδραση στο εσωτερικό της κυψέλης είναι η εξής:



Τότε προκύπτει, ότι η παραγόμενη ενέργεια για 1 mol H_2O , 1 mol H_2 και μισό mol O_2 δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\Delta\bar{g}_f = (\bar{g}_f)_{H_2O} - (\bar{g}_f)_{H_2} - 1/2(\bar{g}_f)_{O_2} \quad (2.6)$$

Η σχέση 2.6 δίνει την ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού Gibbs, η οποία δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται με την θερμοκρασία και την κατάσταση της (αέρια, υγρή) βάσει του πίνακα 2.3. Σημειώνεται, ότι η τιμή της ενέργειας είναι αρνητική, που σημαίνει ότι η ενέργεια εκλύεται - παράγεται.

Πίνακας 2.2: Μεταβολή της $\Delta\bar{g}_f$ βάσει θερμοκρασίας.

Κατάσταση ύλης	Θερμοκρασία (°C)	$\Delta\bar{g}_f (kJmol^{-1})$
Liquid	25	-237.2
Liquid	80	-228.2
Gas	80	-226.1
Gas	100	-225.2
Gas	200	-220.4
Gas	400	-210.3
Gas	600	-199.6
Gas	800	-188.6
Gas	1000	-177.4

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, ουσιαστικά βασίζεται σε μία συνεχή ηλεκτροχημική εναλλαγή ενέργειας. Η χημική ενέργεια της κυψέλης, δεν είναι άλλη από την ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού Gibbs και αν δεν υπήρχαν απώλειες – ή όπως συνηθίζεται να δηλώνεται στην βιβλιογραφία [6] – αν η διεργασία ήταν αναστρέψιμη (reversible), τότε όλη η ενέργεια σχηματισμού Gibbs, θα μεταλλασσόταν σε ηλεκτρική ενέργεια. Με βάση αυτόν τον συλλογισμό, για τον υπολογισμό της τάσης ανοιχτοκυκλώματος, έχουμε ότι για κάθε παραγόμενο μόριο νερού διακινούνται 2 ηλεκτρόνια, οπότε για 1 mol παραγόμενου νερού, διακινούνται $2N$ ηλεκτρόνια, όπου N είναι ο αριθμός Avogadro και $N = 6.022 \cdot 10^{23}$. Αν $-e = -1.602 \cdot 10^{-19} C$ είναι το φορτίο ενός ηλεκτρονίου, προκύπτει ότι για κάθε mol παραγόμενου νερού μετακινείται συνολικό ηλεκτρικό φορτίο ίσο με, $-2Ne = -2 F Coulombs$ (σταθερά Faraday). Τότε το συνολικό παραγόμενο ηλεκτρικό έργο (Joules) εντός της κυψέλης, θα δίνεται από την σχέση:

$$Electrical Work Done = Total charge * Voltage = -2FE \quad (2.7)$$

Το σύστημα μας θεωρείται στην ιδανική μορφή του αντιστρέψιμο (reversible) και έτσι όλο το παραγόμενο ηλεκτρικό έργο προέρχεται από την ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού Gibbs, επομένως η τάση ανοιχτού κυκλώματος μίας κυψέλης καυσίμου θα είναι:

$$\Delta\bar{g}_f = -2F * E \Rightarrow E = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{2F} \quad (2.8)$$

Για παράδειγμα, για την τάση ανοιχτού κυκλώματος μίας κυψέλης υδρογόνου, η οποία λειτουργεί στους 200°C, έχουμε απ'τον πίνακα 2.3, ότι $\Delta\bar{g}_f = -200kJ$, οπότε:

$$E = \frac{200000}{2 * 96485} \Rightarrow E = 1.14 V \quad (2.9)$$

2.1.3 Απόδοση κυψέλης

Για τον υπολογισμό της απόδοσης μίας κυψέλης καυσίμου, θα πρέπει να μπορέσουμε να μετρήσουμε το ποσό (σε mol) της θερμότητας που εκλύεται από την καύση του υδρογόνου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται θερμική αξία (calorific value) ή ενθαλπία σχηματισμού (enthalpy of formation, $\Delta\bar{h}_f$). Όπως και στην ελεύθερη ενέργεια Gibbs, έτσι και στην ενθαλπία σχηματισμού, από τη στιγμή που η θερμότητα εκλύεται, η τιμή της θα είναι αρνητική και η απόδοση της κυψέλης θα δίνεται από την εξής σχέση:

$$\frac{\text{Electrical Energy Produced Per Mole Of Fuel}}{-\Delta\bar{h}_f} \quad (2.10)$$

Το αποτέλεσμα της παραπάνω εξίσωσης εξαρτάται από την κατάσταση του νερού, δηλαδή στην περίπτωση που είναι ατμός, η ενθαλπία σχηματισμού θα είναι: $\Delta\bar{h}_f = -241.83kJmol^{-1}$ και της έχει αποδοθεί ο όρος "υψηλή θερμαντική αξία", ενώ στην περίπτωση που είναι υγρό, τότε θα είναι: $\Delta\bar{h}_f = -285.84kJmol^{-1}$ και της αποδίδεται αντίστοιχα ο όρος "χαμηλή θερμαντική αξία". Η διαφορά ανάμεσα στις δύο τιμές ενθαλπίας ($\Delta\bar{h}_f = 44.01kJmol^{-1}$), είναι η μοριακή ενθαλπία εξάτμισης. Όπως φαίνεται λοιπόν, η παραγόμενη τάση (παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια) συνδέεται άμεσα με την απόδοση της κυψέλης, οπότε στην περίπτωση όπου οι αντιδράσεις εντός τις κυψέλης είναι αναστρέψιμες, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$E = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{2F} \Rightarrow \begin{cases} E = 1.48 V & \text{if using HHV} \\ E = 1.25 V & \text{if using LHV} \end{cases} \quad (2.11)$$

Η χρησιμοποίηση του καυσίμου εντός της κυψέλης είναι ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση της και αυτό γιατί μόνο ένα κλάσμα της ποσότητας του καυσίμου που εισάγεται στην κυψέλη καταφέρνει τελικά να αντιδράσει, παράγοντας χρήσιμο έργο. Γι'αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται ο όρος "συντελεστής χρησιμοποίησης καυσίμου" (fuel utilization coefficient, μ_f) και δίνεται απ'την σχέση:

$$\mu_f = \frac{\text{Mass of Fuel Reacted in Cell}}{\text{Mass of Fuel Input in Cell}} \quad (2.12)$$

Συνολικά, η απόδοση της κυψέλης βάση θερμαντικής αξίας, δίνεται απ'την παρακάτω σχέση, όπου V_c είναι η πραγματική τάση εξόδου της κυψέλης:

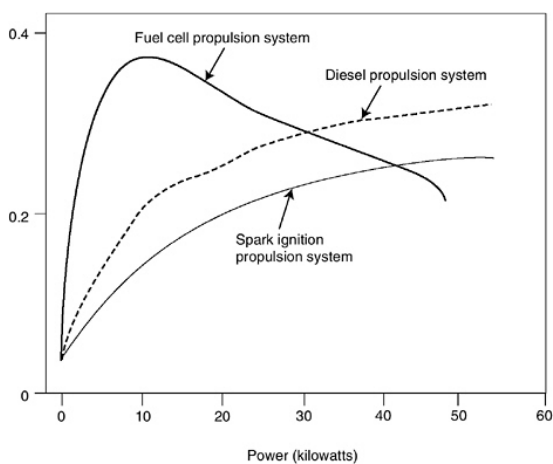
$$\eta = \begin{cases} \mu_f * \frac{V_c}{1.48} * 100\% & \text{for HHV} \\ \mu_f * \frac{V_c}{1.25} * 100\% & \text{for LHV} \end{cases} \quad (2.13)$$

Στον πίνακα 2.3 φαίνεται η αρνητική επίδραση που έχει η αύξηση της θερμοκρασίας στην τάση ανοιχτού κυκλώματος και κατ'επέκταση στην απόδοση της κυψέλης. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε τους λόγους για τους οποίους το συμπέρασμα αυτό δεν είναι απόλυτα ακριβές.

Πίνακας 2.3: Επίδραση της θερμοκρασίας στην $\Delta\bar{g}_f$, στην Τάση ανοιχτού κυκλώματος (OCV) και στο όριο απόδοσης.

Κατάσταση Υγλης	Θερμοκρασία (°C)	$\Delta\bar{g}_f$ (kJmol ⁻¹)	Max EMF (V)	Efficiency Limit (%)
Liquid	25	-237.2	1.23	83
Liquid	80	-228.2	1.18	80
Gas	100	-225.2	1.17	79
Gas	200	-220.4	1.14	77
Gas	400	-210.3	1.09	74
Gas	600	-199.6	1.04	70
Gas	800	-188.6	0.98	66
Gas	1000	-177.4	0.92	62

Οι διαφορές ανάμεσα στο φάσμα απόδοσης μίας κυψέλης καυσίμου σε σχέση με την απόδοση των μηχανών εσωτερικής καύσεως φαίνεται στο διάγραμμα 2.3. Από αυτό προκύπτουν οι ακόλουθες σημειώσεις:



Σχήμα 2.3: Διαφορά φάσματος απόδοσης PEM Fuel Cell και μηχανών εσωτερικής καύσεως. (Πηγή: *The National Academies Press*)

εσωτερικής καύσεως.

1. Παρόλο που ο πίνακας 2.3 και το διάγραμμα 2.3 δείχνουν ότι η τάση ανοιχτού κυκλώματος και η απόδοση μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο ότι οι πραγματικές απώλειες είναι πολύ μικρότερες σε υψηλότερες θερμοκρασίες και εντέλει η συνολική απόδοση της κυψέλης βελτιώνεται.
2. Η απώλεια θερμότητας από τις κυψέλες καυσίμου είναι πολύ πιο χρήσιμη όταν η κυψέλη λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες.
3. Φαίνεται ότι η απόδοση των κυψέλων καυσίμου δεν είναι πάντα μεγαλύτερη από εκείνη των μηχανών

2.1.4 Η επίδραση της συγκέντρωσης και της πίεσης

Στα προηγούμενα κεφάλαια εξετάστηκε η επιρροή της θερμοκρασίας στη μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs. Σε αυτό το σημείο θα εξετασθεί ο τρόπος με τον οποίο η τάση ανοιχτοκυκλώσεως και κατ'επέκταση η απόδοση, μεταβάλλεται με την πίεση και τη συγκέντρωση των αντιδρώντων. Ο όρος "χημική δραστηριότητα" (activity, α), όταν πρόκειται για τη λειτουργία μίας κυψέλης καυσίμου, αφορά τόσο τα αντιδρώντα όσο και τα προϊόντα στοιχεία και ορίζει το χημικό δυναμικό κάθε στοιχείου μέσα σε ένα μείγμα να καθορίσει το αποτέλεσμα μίας αντίδρασης. Είναι αδιάστατη ποσότητα και δίνεται από την σχέση:

$$\alpha = \frac{P}{P^0} \quad (2.14)$$

όπου P είναι η πίεση ή μερική πίεση του αερίου και P^0 είναι η σταθερή πίεση στα 0.1 MPa. Στην περίπτωση του παραγόμενου νερού από την κυψέλη (θα πρέπει να καθοριστεί αν είναι σε υγρή ή σε αέρια κατάσταση), η δραστηριότητα του σε αέρια κατάσταση θα είναι:

$$\alpha_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}^0} \quad (2.15)$$

Τα παραπάνω αλλάζουν την μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs κατά την διάρκεια μίας αντίδρασης ως εξής:

$$\Delta\bar{g}_f = \Delta\bar{g}_f^0 - RT \ln \left(\frac{\alpha_{H_2} \alpha_{O_2}^{1/2}}{\alpha_{H_2O}} \right) \quad (2.16)$$

όπου $\Delta\bar{g}_f^0$ είναι η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs σε συνθήκες σταθερής πίεσης. Μελετώντας την εξίσωση παρατηρεί κανείς ότι, η αύξηση της δραστηριότητας των αντιδρώντων επιφέρει αύξηση της εκλυόμενης ενέργειας, κάνοντας αρνητικότερη την $\Delta\bar{g}_f$, ενώ η αύξηση της δραστηριότητας των προϊόντων επιφέρει μείωση ενέργειας, κάνοντας θετικότερη την $\Delta\bar{g}_f$. Η τάση ανοιχτοκυκλώσεως θα μεταβάλλεται από την πίεση των αερίων, μέσω της δραστηριότητας τους, σύμφωνα με την εξίσωση Nernst:

$$E = \frac{-\Delta\bar{g}_f^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{\alpha_{H_2} \alpha_{O_2}^{1/2}}{\alpha_{H_2O}} \right) = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{\alpha_{H_2} \alpha_{O_2}^{1/2}}{\alpha_{H_2O}} \right) \quad (2.17)$$

ενώ αν εκφραστούν οι όροι των δραστηριοτήτων ως κλάσμα πιέσεων, δηλαδή:

$$\alpha_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{P_{H_2}^0}, \quad \alpha_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P_{O_2}^0}, \quad \alpha_{H_2O} = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}^0} \quad (2.18)$$

η εξίσωση 2.17 γίνεται:

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{\frac{P_{H_2}}{P_{H_2}^0} \times \left(\frac{P_{O_2}}{P_{O_2}^0} \right)^{1/2}}{\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2O}^0}}} \right) \quad (2.19)$$

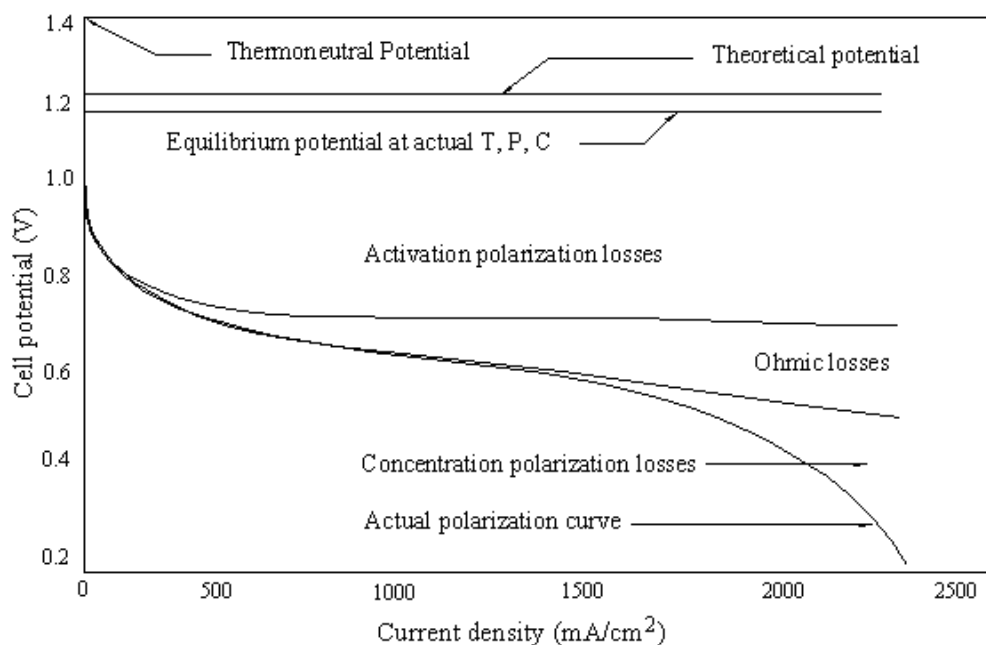
και επειδή $P^0 = 1$ η τάση ανοιχτοκυκλώματος καταλλήγει στην εξής μορφή:

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right) \quad (2.20)$$

2.1.5 Απώλειες κατά την πραγματική λειτουργία

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάστηκε η θεωρητική λειτουργία μίας κυψέλης καυσίμου, όπου έχουν αμεληθεί όλες οι απώλειες, σε αυτό το σημείο ωστόσο, θα αναλυθούν οι απώλειες που προκύπτουν κατά την πραγματική λειτουργία της. Όπως αναφέρεται και στην βιβλιογραφία [6], οι απώλειες αυτές προκαλούνται από "καταστάσεις μη αναστρέψιμες" και έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλη πτώση στην αρχικά παραγόμενη τάση. Προηγουμένως ειπώθηκε, ότι για μία κυψέλη καυσίμου, η οποία λειτουργεί κάτω από τους 100°C και σε ονομαστικές τιμές πίεσης και συγκέντρωσης, η τιμή της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως της είναι 1.2 V. Ωστόσο, από το σχήμα 2.4 βλέπει κανείς ότι:

1. Η πραγματική τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι μικρότερη από την θεωρητική τιμή της.
2. Αρχικά υπάρχει μεγάλη πτώση τάσης, στη συνέχεια όμως η κλίση γίνεται πιο ομαλή.
3. Στις μεγάλες τιμές πυκνότητας ρεύματος παρατηρείται εκ νέου ισχυρή βύθιση τάσεως.
4. Σε αντίθεση με τις χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, στις υψηλές (~ 800°C) η αρχική πτώση τάσης είναι μικρότερη και συνολικά οι απώλειες είναι περισσότερο γραμμικές.



Σχήμα 2.4: Απώλειες πραγματικής λειτουργίας ενός *PEM Fuel Cell*. (Πηγή: *Electrochemistry Encyclopedia*)

Οι συνολικές απώλειες, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογως του χρόνου εμφάνισής τους, κατά την διάρκεια της αντίδρασης στο εσωτερικό της κυψέλης και είναι οι εξής:

1. *Απώλειες Ενεργοποίησης*: προκύπτουν απ'την αρχική δυσκινησία των αντιδράσεων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Ένα κλάσμα της παραγόμενης τάσης καταναλώνεται αρχικά για την πραγματοποίηση των χημικών αντιδράσεων, μέσω των οποίων θα διακινηθούν τα ηλεκτρόνια από και προς τα ηλεκτρόδια. Η πτώση τάσης σε αυτή την περιοχή των απωλειών είναι μη γραμμική, καθώς παρουσιάζει μεγάλες κλίσεις.
2. *Απώλειες υπερπήδησης καυσίμου και εσωτερικών ρευμάτων*: οι απώλειες ενέργειας που προκύπτουν, πρώτον όταν μία μικρή μάζα καυσίμου διαπερνάει τον ηλεκτρολύτη και δεύτερον όταν τα παραγόμενα ηλεκτρόνια δεν ακολουθούν το κύκλωμα, αλλά διαπερνούν και αυτά τον ηλεκτρολύτη.
3. *Ωμικές Απώλειες*: πρόκειται για την πτώση τάσης, λόγω της αντίστασης του κυκλώματος στην ροή των ηλεκτρονίων και παρουσιάζεται λόγω του υλικού των ηλεκτροδίων, της ύπαρξης κάποιων διασυνδέσεων στο κύκλωμα, αλλά και λόγω της αντίστασης που παρουσιάζει το υλικό του ηλεκτρολύτη στην επαγωγή των ιόντων. Η πτώση τάσης στο συγκεκριμένο φάσμα απωλειών είναι ανάλογη της πυκνότητας του ρεύματος και σαφώς πιο γραμμική από τις υπολοιπες.
4. *Απώλειες συγκέντρωσης και μετακίνησης μάζας αερίων*: πρόκειται για τις απώλειες λόγω της μείωσης στη συγκέντρωση των αντιδρώντων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Όπως είδαμε και προηγουμένως, η συγκέντρωση επηρεάζει την ελεύθερη ενέργεια Gibbs και κατ'επέκταση την τάση ανοιχτοκυκλώσεως, καθώς και την απόδοση και επειδή η μείωση στη συγκέντρωση, επιφέρει αδυναμία στη διακίνηση των αντιδρώντων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, οδηγεί στην ονομασία "απώλειες μετακίνησης μάζας αερίων", αλλά και "απώλειες Nernst".
5. *Απώλειες τροφοδοσίας συμπιεστή*: πρόκειται για την παραγόμενη ενέργεια, η οποία καταναλώνεται εξωτερικά από το συμπιεστή αέρα, ο οποίος αυξάνει την πίεση του εισαγόμενου αέρα στην κυψέλη, μειώνοντας κατ'αυτόν τον τρόπο το ρυθμό απωλειών.

Οι συνολικές απώλειες θα δίνονται απ'τον παρακάτω τύπο, ενώ στα επόμενα κεφάλαια θα εξεταστεί αναλυτικότερα κάθε μία εξ αυτών :

$$V = E - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{act} - \Delta V_{trans} \Rightarrow$$

$$V = E - ir - A \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) + m \exp(ni) \quad (2.21)$$

Όπου:

- E : είναι η αναστρέψιμη τάση ανοιχτοκυκλώσεως,
- i_n : είναι τα εσωτερικά ρεύματα και οι υπερπήδησεις καυσίμου εκφρασμένα ως ισοδύναμη πυκνότητα ρεύματος,
- A : είναι η κλίση της γραμμής στο διάγραμμα *Tafel*.
- i_0 : είναι είτε η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής στην κάθοδο αν η καθοδική πτώση τάσης, είναι μεγαλύτερη απ'την ανοδική, είτε είναι συνάρτηση και των δύο πυκνοτήτων ρευμάτων ανταλλαγής.

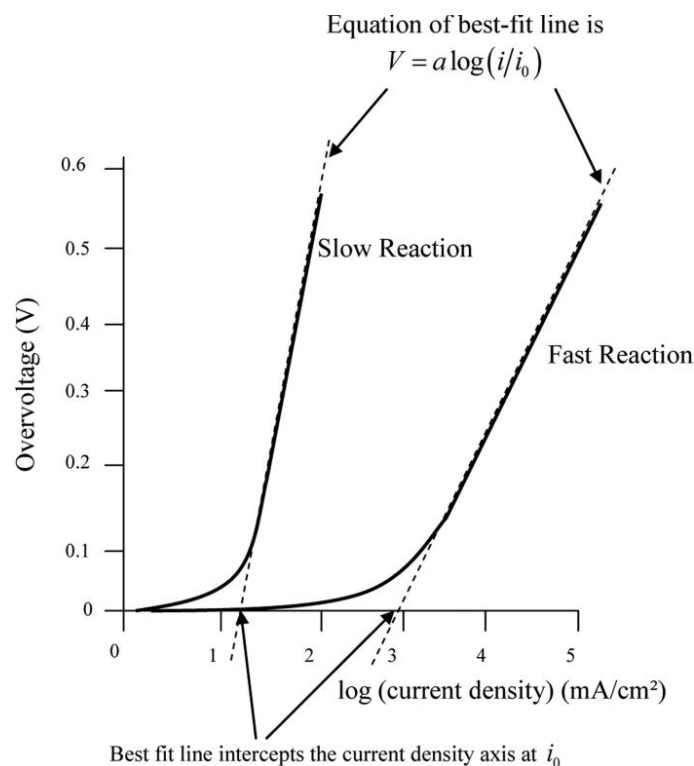
- m, n : είναι σταθερές της εξίσωσης απωλειών συγκέντρωσης.
- r : είναι η επιφανειακή ειδική αντίσταση.

2.1.5.1 Απώλειες Ενεργοποίησης

Ο Tafel, μετά από σειρά πειραμάτων σε ένα μεγάλο φάσμα αντιδράσεων παρατήρησε ότι, η πτώση τάσης στα άκρα των ηλεκτροδίων ακολουθούσε, στο σύνολό τους, παρόμοια αντίδραση. Η γενική περίπτωση, δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta V_{act} = a \times \log\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (2.22)$$

και απεικονίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα της πτώσης τάσης συναρτήσει της λογαριθμικής κλίμακας της πυκνότητας ρεύματος. Για τη σταθερά A, ισχύει ότι για



Σχήμα 2.5: Διαγράμματα Tafel για γρήγορες και αργές χημικές αντιδράσεις. (Πηγή: *Journal of Fuel Cell Science and Technology*)

μεγάλες τιμές, η ηλεκτροχημική αντίδραση γίνεται πιο αργή, ενώ για την πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής i_0 , ισχύει ότι για μεγάλες τιμές, η αντίδραση γίνεται πιο γρήγορη. Ο τύπος για τη σταθερά A μίας κυψέλης υδρογόνου, όπου για κάθε μόριο αερίου μεταφέρονται 2 ηλεκτρόνια, έχει δοθεί απ'τον McDougall το 1996 :

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (2.23)$$

Για τη μείωση των απωλειών ενεργοποίησης δίνονται οι παρακάτω λύσεις:

- **Αύξηση θερμοκρασίας κυψέλης:** Αν μία κυψέλη λειτουργεί σε θερμοκρασία κάτω των 100°C, η τιμή της πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής i_0 θα είναι

0.1 mA cm^{-2} , ενώ αν λειτουργεί σε θερμοκρασία 800°C η αντίστοιχη τιμή θα είναι 10 mA cm^{-2} , μία αύξηση δύο τάξεων μεγέθους.

- *Χρήση αποδοτικότερων καταλητών:* Η επίδραση του υλικού του ηλεκτρολύτη στην πτώση τάσης και κατ'επέκταση στις συνολικές απώλειες φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, όπου όπως αναφέρθηκε μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής, σημαίνει πιο γρήγορη χημική αντίδραση, επομένως μικρότερες απώλειες ενεργοποίησης, οι οποίες καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο κομμάτι των απωλειών μιας κυψέλης καυσίμου συνολικά. Με την πάροδο του χρόνου και

Πίνακας 2.4: Επίδραση υλικού στην πυκνότητα ρεύματος.

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

μέσα από συνεχείς ελέγχους έχει βρεθεί ότι, το καλύτερο υλικό για τον καταλύτη είναι ο λευκόχρυσος (*Pt*), του οποίου η τιμή ανέρχεται στα 10 kW^{-1} . Παλιότερα, για τη δημιουργία υψηλών προδιαγραφών κυψελών απαιτούνταν 28 mg cm^{-2} *Pt*, ενώ πρόσφατα για τον ίδιο σκοπό δεν χρειάζονται πάνω από 0.2 mg cm^{-2} , μειώνοντας κατά πολύ το κόστος παραγωγής της κυψέλης.

- *Αύξηση τραχύτητας ηλεκτροδίων:* Αυτή η τεχνική αυξάνει την πραγματική επιφάνεια και κατ'επέκταση το i_0
- *Αύξηση συγκέντρωσης αντιδρώντων:* Η χρήση καθαρού οξυγόνου αντί για αέρα, ή καθαρότερου υδρογόνου δίνει την δυνατότητα για αποδοτικότερη λειτουργία και στις δύο πλευρές του ηλεκτρολύτη, γεγονός που αυξάνει την τάση ανοιχτοκυκλώσεως.
- *Αύξηση πίεσης αντιδρώντων:* Αυξάνοντας την πίεση παροχής, μειώνεται η πιθανότητα να βρεθούν τα ηλεκτρόδια σε κατάσταση λιμοκτονίας "starvation" από τα αντιδρώντα, κάτι που θα οδηγούσε σε μείωση της παραγωγικότητας της κυψέλης.

2.1.5.2 Απώλειες υπερπήδησης καυσίμου και εσωτερικών ρευμάτων

Ιδανικά, το στρώμα του ηλεκτρολύτη, θα μπορούσαμε να πούμε ότι λειτουργεί σαν φίλτρο, το οποίο διευκολύνει μόνο τη μετακίνηση των ιόντων υδρογόνου. Κάτι τέτοιο στην πραγματικότητα δεν ισχύει, αφού πολύ μικρή ποσότητα παραγόμενων ηλεκτρονίων διαφεύγει εντός της κυψέλης, περνώντας μέσω του ηλεκτρολύτη από την άνοδο στην κάθοδο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη "σπατάλη" αυτού του παραγόμενου ηλεκτρικού δυναμικού και γι'αυτό το λόγο οι απώλειες ονομάζονται "απώλειες υπερπήδησης καυσίμου και εσωτερικών ρευμάτων". Οι δύο έννοιες θεωρούνται

ισοδύναμες. Σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας της κυψέλης, τα εσωτερικά ρεύματα είναι της τάξης των λίγων $mA\ cm^{-2}$ και γενικά δεν αμβλύνουν το πρόβλημα της μη αναστρεψιμότητας, παίζοντας μικρό ρόλο στο σύνολο των απωλειών. Ωστόσο, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, οι συγκεκριμένες απώλειες πολλαπλασιάζονται, φτάνοντας ακόμη $0.2\ V$ πτώση τάσης από τα αρχικά παραγόμενα $1.2\ V$.

$$V = E - A \times \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (2.24)$$

Ενδεικτικές τιμές για την παραπάνω σχέση είναι: $E = 1.2\ V$, $A = 0.06\ V$, $i_0 = 0.04\ mA\ cm^{-2}$. Ο πίνακας 2.5 δείχνει την επίδραση που έχει ένα ασθενές εσωτερικό ρεύμα στην παραγόμενη τάση ανοιχτοκυκλώσεως. Δεδομένης της δυσκολίας μέτρησης των εσωτερικών ρευμάτων, ένας τρόπος μέτρησης είναι αυτός της κατανάλωσης των αντιδρώντων αερίων σε τάση ανοιχτού κυκλώματος.

Πίνακας 2.5: Επίδραση της επιφανειακής πυκνότητας ρεύματος στην παραγόμενη τάση της κυψέλης .

Επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος ($mA\ cm^{-2}$)	Τάση (V)
0	1.2
0.25	1.05
0.5	1.01
1	0.97
2	0.92
3	0.90
4	0.88
5	0.87
6	0.86
7	0.85
8	0.84
9	0.83

Ο ρυθμός χρησιμοποίησης του υδρογόνου σε μία κυψέλη θα είναι:

$$Usage_{H_2} = \frac{I}{2F} \text{ (moles } s^{-1}) \Rightarrow I = Usage_{H_2} \times 2F \quad (2.25)$$

Ο νόμος του *Avogadro* αναφέρει, ότι σε συνθήκες σταθερής πίεσης και θερμοκρασίας ο όγκος που καταλαμβάνει ένα mol οποιουδήποτε αερίου θα είναι $2.43 \times 10^4\ cm^3$, οπότε ο ρυθμός χρησιμοποίησης του υδρογόνου θα είναι $1.40 \times 10^{-7}\ mol\ s^{-1}$. Έτσι, απ'τον παραπάνω τύπο παίρνουμε το εσωτερικό ρεύμα $I = 1.40 \times 10^{-7} \times 2 \times 9.65 \times 10^4 = 27\ mA$, το οποίο αντιστοιχεί στην ποσότητα καυσίμου που μένει ανεκμετάλλευτο, γιατί διαφεύγει μέσω του στρώματος του ηλεκτρολύτη στην κάθοδο. Τέλος αν i_n είναι η πυκνότητα εσωτερικού ρεύματος, τότε η σχέση για την τάση εξόδου της κυψέλης παίρνει την εξής μορφή:

$$V = E - A \times \ln\left(\frac{i + i_n}{i_0}\right) \quad (2.26)$$

2.1.5.3 Ωμικές Απώλειες

Οι απώλειες αυτές προκύπτουν απ'την αντίσταση της ροής των ηλεκτρονίων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, καθώς και από την αντίσταση στη ροή των ιόντων στο σώμα του ηλεκτρολύτη. Το μέγεθος της πτώσης τάσεως εξαρτάται απ'το μέγεθος του ρεύματος, δηλαδή:

$$V = I \times R \quad (2.27)$$

Η παραπάνω εξίσωση, για να συμπεριληφθεί στο γενικό τύπο απωλειών, θα πρέπει οι ωμικές απώλειες να εκφραστούν, συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος και της ειδικής επιφανειακής αντίστασης, δηλαδή:

$$\Delta V_{ohm} = i \times r \quad (2.28)$$

όπου i δίνεται σε $mAcm^{-2}$ και η ειδική επιφανειακή αντίσταση r δίνεται σε $k\Omega cm^{-2}$. Για τη μείωση των ωμικών απωλειών μπορούν να υλοποιηθούν τα εξής μέτρα:

1. Χρήση ηλεκτροδίων με τη μέγιστη δυνατή αγωγιμότητα.
2. Αποδοτικότερο σχέδιο κυψέλης με κατάλληλα υλικά για τις διπολικές πλάκες και τις συνδέσεις αντίστοιχα.
3. Μείωση του πάχους του στρώματος του ηλεκτρολύτη, αν και είναι αρκετά δύσκολο, μιας και το στρώμα του ηλεκτρολύτη θα πρέπει να είναι αρκετά παχύ για να διευκολύνει την κίνηση των ιόντων.

2.1.5.4 Απώλειες συγκέντρωσης και μετακίνησης μάζας αερίων

Κατά τη διάρκεια μίας αντίδρασης εντός της κυψέλης, οι συγκεντρώσεις του οξυγόνου και του υδρογόνου στην περιοχή των ηλεκτροδίων θα αρχίσουν να μειώνονται, κυρίως λόγω υδροδυναμικών αντιστάσεων. Η μείωση στη συγκέντρωση θα επιφέρει μείωση στις αντίστοιχες μερικές πιέσεις τους, αλλά ο βαθμός στον οποίον θα επηρεαστεί η απόδοση της κυψέλης καθορίζεται από παράγοντες, όπως ο χρόνος πλήρωσης της διαφοράς συγκέντρωσης, η ποιότητα κυκλοφορίας του οξυγόνου και του υδρογόνου γύρω από την περιοχή της καθόδου και της ανόδου αντίστοιχα, καθώς και η αποδοτική διαχείριση του παραγόμενου νερού. Οι αλλαγές στην πίεση των αντιδρώντων επιφέρουν αλλαγές και στην παραγόμενη τάση, μέσω του τύπου:

$$\Delta V_{trans} = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (2.29)$$

Αν θεωρήσουμε i_1 τη μέγιστη πιθανή πυκνότητα ρεύματος, η οποία προκύπτει κατά τη μέγιστη παροχή καυσίμου στην κυψέλη, τότε η αντίστοιχη πίεση (P_1) θα είναι μηδέν και οποιαδήποτε πυκνότητα ρεύματος μικρότερη από τη μέγιστη, θα έχει πίεση P_2 που θα δίνεται απ'την εξής σχέση:

$$P_2 = P_1 \left(1 - \frac{i}{i_1} \right) \quad (2.30)$$

Οπότε καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση, η οποία μας δίνει την πτώση της τάσης λόγω απωλειών συγκέντρωσης στη μάζα των αερίων:

$$\Delta V_{trans} = -\frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_1} \right) \quad (2.31)$$

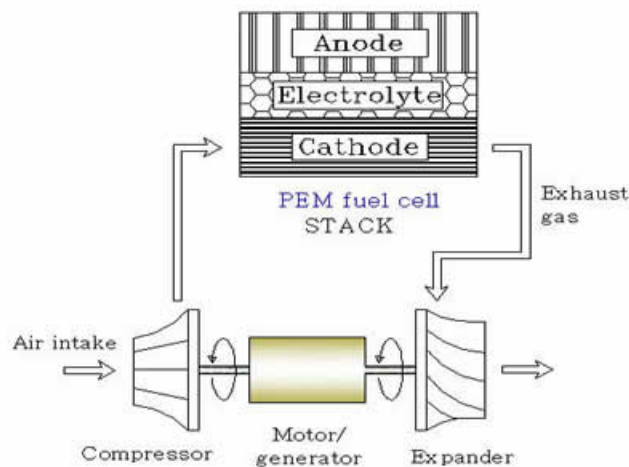
Ένας εμπειρικός τύπος που προσεγγίζει την παραπάνω σχέση είναι και ο εξής:

$$\Delta V_{trans} = m \exp(ni) \quad (2.32)$$

Με $m = 3 * 10^{-5} V$ και $n = 8 * 10^{-3} cm^2mA^{-1}$

2.1.5.5 Απώλειες τροφοδοσίας συμπιεστή

Όπως είδαμε και παραπάνω, η πίεση τροφοδοσίας του υδρογόνου και του οξυγόνου στην κυψέλη, έχει μεγάλη σημασία για τη μείωση της επίδρασης των απωλειών κατά τη λειτουργία της. Ένας τρόπος να αυξηθεί η πίεση παροχής είναι μέσω του συμπιεστή αέρα, ο οποίος τροφοδοτείται πρωτευόντως από ηλεκτρική ενέργεια και δευτερευόντως από τα "καυσαέρια" της κυψέλης. Ο κυριότερος λόγος χρήσης του, είναι το σχετικό κέρδος που προκύπτει από την ειδική αύξηση της ισχύος μίας μηχανής σε σχέση με τη χρήση μίας μεγαλύτερης μηχανής – όπως και στην περίπτωση μίας μηχανής εσωτερικής καύσεως. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6, δεδομένου της αποθήκευσης του υδρογόνου σε συμπιεσμένη μορφή, δεν χρειάζεται συμπιεστή στην πλευρά της ανόδου. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί η διτή πλευρά χρήσης ενός συμπιεστή: Η ενέργεια που χρησιμοποιεί ο κινητήρας του συμπιεστή για την αύξηση της απόδοσης της κυψέλης, προέρχεται από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια της κυψέλης, μειώνοντας τελικά την τάση εξόδου της και συνολικά την απόδοσή της. Επομένως, επειδή ο ρόλος του συμπιεστή δεν είναι ευδιάκριτο αν είναι θετικός



Σχήμα 2.6: Συμπιεστής αέρα για την αύξηση της απόδοσης της κυψέλης. (Πηγή: Rotortronics Laboratory)

ή αρνητικός στην απόδοση της κυψέλης, το παραπάνω πρόβλημα θα χρειαστεί να ποσοτικοποιηθεί.

Κατ'αρχήν, όπως έχει αναλυθεί και προηγουμένως, η διαφορά της παραγόμενης τάσης της κυψέλης ΔV , εξαρτάται απ'τη λογαριθμική διαφορά της πίεσης των αντιδρώντων. Αν λοιπόν υπάρχει αύξηση της αρχικής πίεσης P_1 σε P_2 , τότε το κέρδος στην τάση υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\Delta V_{gain} = \frac{RT}{4F} \times \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad \text{Volts} \quad (2.33)$$

Όπου $C = \frac{RT}{4F} = 0.03$ μέχρι 0.06 . Το παραπάνω κέρδος τάσης μεταφράζεται σε συνολικό κέρδος ισχύος, υποθέτοντας ρεύμα κυψέλης I και αριθμό κελιών n .

$$Power\ gain = C \times \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \times I \times n \quad Watts \quad (2.34)$$

Ωστόσο, το κέρδος ισχύος έρχεται με το αντίστοιχο "κόστος", το οποίο είναι η ισχύς που καταναλώνει ο συμπιεστής. Αυτή θα υπολογίζεται συναρτήσει της απόδοσης του συμπιεστή η_c και της απόδοσης του κινητήρα η_m , της εισαγόμενης σ' αυτόν θερμοκρασίας T_1 , καθώς και του λόγου αύξησης της πίεσης παροχής αέρα $\frac{P_2}{P_1}$.

$$Power\ lost = c_p \times \frac{T_1}{\eta_c \eta_m} \times \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \times \dot{m} \quad Watts \quad (2.35)$$

Στην παραπάνω εξίσωση \dot{m} είναι ο ρυθμός παροχής αέρα, ο οποίος συνδέεται με την ισχύ εξόδου της κυψέλης, τη μέση παραγόμενη τάση της και τη στοιχειομετρία του αέρα, μέσω της σχέσης:

$$\dot{m} = 3.58 \times 10^{-7} \times \lambda \times \frac{P_e}{V_c} \quad kg\ s^{-1} \quad (2.36)$$

Για $\gamma = 1.4$, $c_p =$ και $P_e = nIV_C$, προκύπτει η τελική μορφή της σχέσης για την απώλεια ισχύος:

$$Power\ lost = 3.58 \times 10^{-4} \times \frac{T_1}{\eta_m \eta_c} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.286} - 1 \right) \times \lambda \times I \times n \quad Watts \quad (2.37)$$

Με αντίστοιχο τρόπο προκύπτει η σχέση για την απώλεια τάσης:

$$\Delta V_{lost} = 3.58 \times 10^{-4} \times \frac{T_1}{\eta_m \eta_c} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.286} - 1 \right) \times \lambda \quad Volts \quad (2.38)$$

Με την παραπάνω ποσοτικοποιημένη προσέγγιση, μπορεί κάποιος να αποφανθεί αν μία αύξηση στην πίεση παροχής του αέρα έχει θετική ή αρνητική επίδραση στην παραγόμενη τάση της κυψέλης, μέσω της σχέσης:

$$Net\ \Delta V = \Delta V_{gain} - \Delta V_{loss} \quad (2.39)$$

2.2 Υπερπυκνωτής

Ο υπερπυκνωτής ή αλλιώς ηλεκτρικός πυκνωτής διπλού στρώματος – *electric double layer capacitor (EDLC)*, είναι ένας ηλεκτροχημικός πυκνωτής μεγάλης χωρητικότητας, πολύ μεγαλύτερης από εκείνη ενός συμβατικού πυκνωτή, με μικρότερα όμως όρια τάσης, ο οποίος ενώνει το χάσμα μεταξύ μπαταριών και ηλεκτρολυτικών πυκνωτών. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Ικανότητα απόδοσης ή απορρόφησης μεγάλων ποσών ισχύος σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

- Μεγάλη διάρκεια ζωής (>100000 κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης) και αυξημένη απόδοση κατά τη διάρκεια αυτών, χωρίς εμφανή σημεία κόπωσης.
- Πολύ καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες, που το καθιστά ιδανικό υποστηρικτικό μέσο αποθήκευσης σε υβριδικό σύστημα με κυψέλες καυσίμου.

Πρόκειται για μία τεχνολογία περίπου 100 χρόνων, βελτιωμένη με μοντέρνα υλικά, όπως για παράδειγμα, τα ηλεκτρόδια πορώδους άνθρακα. Παρόλο που δεν υποστηρίζει AC εφαρμογές, χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων τόσο σε μεγάλη, όσο και σε μικρή κλίμακα:

1. Μεγάλη κλίμακα εφαρμογής:

- Στα μέσα μαζικής μεταφοράς, ως δευτερεύον μέσο αποθήκευσης σε υβριδικά συστήματα ανάκτησης ενέργειας τρένων-λεωφορίων, αλλά και σε βιομηχανικό εξοπλισμό (π.χ clark).
- Ως μέσο εκκίνησης μηχανών εσωτερικής καύσεως, αλλά και ως μέσο παροχής ενέργειας έκτακτης ανάγκης σε αεροπλάνα και πλοία.
- Ως μέσο παροχής ενέργειας για τον έλεγχο "pitch" των ανεμογεννητριών, αλλά και σε φωτοβολταϊκά συστήματα (π.χ φώτα οδικού δικτύου με ηλιακούς συλλέκτες).
- Ως μέσο εξισορρόπησης ποιότητας ενέργειας στο δίκτυο (Grid Power Buffer) ή ως μέσο εξισορρόπησης τάσης (Voltage Stabilizer).

2. Μικρή κλίμακα εφαρμογής:

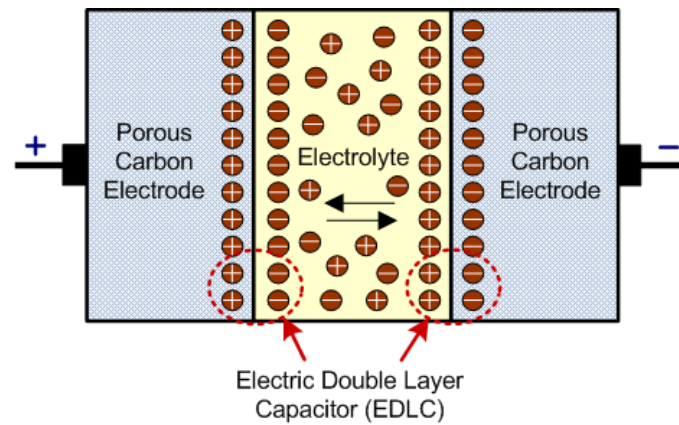
- Για την παροχή ενέργειας σε ψηφιακά συστήματα με μεγάλη διακύμανση ενέργειας, όπως laptops, φωτογραφικές μηχανές, GPS, PDAs, ηλεκτρικά εργαλεία, φακούς LED, μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα.
- Ως μέσο παροχής ενέργειας σε μνήμες ram, μικροεπεξεργαστές και ρομποτικά συστήματα.
- Στον ιατρικό τομέα, ως μέσο παροχής ενέργειας σε φορητούς απινιδωτές.

2.2.1 Ηλεκτροχημική Λειτουργία

Οι υπερπυκνωτές [7], αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια, τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους από μία μεμβράνη διαπερατότητας ιόντων. Ανάμεσά τους υπάρχει ένα στρώμα ηλεκτρολύτη, το οποίο τα συνδέει ιοντικά και αποτελείται ένα μείγμα θετικών και αρνητικών ιόντων διαλυμένα σε νερό.

Όταν εφαρμόζεται τάση στα άκρα του υπερπυκνωτή, τα ηλεκτρόδια πολώνονται, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται στρώματα αντίθετου φορτίου στην εξωτερική επιφάνεια αυτών. Για παράδειγμα, κατά την πόλωση των θετικών ηλεκτροδίων, θα σχηματιστεί ένα στρώμα αρνητικών ιόντων, στην εξωτερική επιφάνεια μεταξύ ηλεκτροδίου - ηλεκτρολύτη. Για τους υπερπυκνωτές υπάρχουν δύο αρχές αποθήκευσης:

1. *Χωρητικότητα διπλού στρώματος*: πρόκειται για ηλεκτροστατική αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία επιτυγχάνεται μέσω του διαχωρισμού φορτίου σε ένα διπλό στρώμα Helmholtz.
2. *Ψευδοχωρητικότητα*: πρόκειται για ηλεκτροχημική αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία επιτυγχάνεται μέσω οξυδοαναγωγικής αντίδρασης με παράλληλη μεταφορά φορτίου.



Σχήμα 2.7: Αναπαράσταση λειτουργίας υπερπυκνωτή. (Πηγή: *InTech*)

2.2.1.1 Χωρητικότητα-Τάση

Η συνολική χωρητικότητα του υπερπυκνωτή δίνεται από τον υπολογισμό των χωρητικότητων των δύο ηλεκτροδίων, τα οποία βρίσκονται σε παραλληλία, δηλαδή:

$$C_{Total} = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.40)$$

Για παράδειγμα, αν και τα δύο ηλεκτρόδια έχουν την ίδια χωρητικότητα C , δηλαδή είναι συμμετρικά, τότε η συνολική χωρητικότητα του υπερπυκνωτή θα είναι $C_{Total} = 0.5 \times C$, ενώ αν είναι ασύμμετρα, δηλαδή $C_1 \gg C_2$, τότε η συνολική χωρητικότητα θα είναι $C_{Total} \approx C_2$. Η μέγιστη ποσότητα αποθηκευμένου φορτίου ανά μονάδα τάσης είναι συνάρτηση του μεγέθους του ηλεκτροδίου A , της διαπερατότητας των υλικών απ'τα οποία απαρτίζονται τα ηλεκτρόδια ϵ , καθώς και της απόστασης μεταξύ τους d :

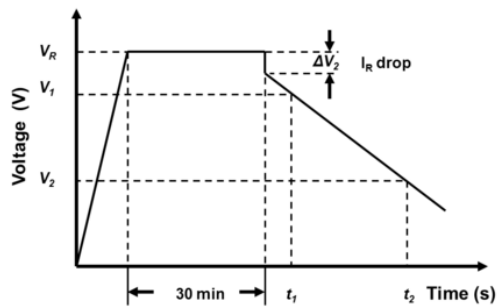
$$C = \epsilon \times \frac{A}{d} \quad (2.41)$$

Όσον αφορά στην τάση ενός υπερπυκνωτή, αυτή είναι αρκετά χαμηλή, από 2.1 V μέχρι 4 V και θα πρέπει να διατηρείται εντός ορίων, διαφορετικά στην τάση διάσπασης, ο ηλεκτρολύτης, του οποίου βασικό συστατικό είναι το νερό, διασπάται σε μόρια υδρογόνου και οξυγόνου. Για την επίτευξη μεγαλύτερης τάσης, χρειάζεται συστοιχία υπερπυκνωτών συνδεδεμένων σε σειρά. Τέλος, το επίπεδο της τάσης του υπερπυκνωτή επηρεάζει και το χρονικό διάστημα στο οποίο μπορεί να αποδώσει ή να απορροφήσει ρεύμα I , μέσω της σχέσης:

$$t = \frac{C \times (U_{charge} - U_{min})}{I} \quad (2.42)$$

2.2.1.2 Εσωτερική Αντίσταση – Ειδική Ενέργεια – Ειδική Αντίσταση

Τόσο η φόρτιση, όσο και η εκφόρτιση ενός υπερπυκνωτή ως έννοια, είναι συνυφασμένη με την κίνηση των ιόντων μέσα από το στρώμα του ηλεκτρολύτη, στα δύο ηλεκτρόδια. Κατά τη διάρκεια αυτής της κίνησης υπάρχουν απώλειες, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν ως εσωτερική DC αντίσταση.



Η συνολική εσωτερική αντίσταση αυξάνεται με την αύξηση της διείσδυσης των ιόντων στο πορώδες υλικό των ηλεκτροδίων και επειδή εξαρτάται και από τον χρόνο, αυξάνεται με την αύξηση της πτώσης τάσης ΔV_2 κατά τη διάρκεια φόρτισης-εκφόρτισης:

$$R_i = \frac{\Delta V_2}{I_{discharge}} \quad (2.43)$$

Σχήμα 2.8: Εσωτερική DC αντίσταση υπερπυκνωτή. (Πηγή : WikiVisually)

Η αντίσταση R_i , η οποία **δεν** είναι η ισοδύναμη αντίσταση σειράς – *Equivalent Series Resistance (ESR)*, καθορίζει τα χαρακτηριστικά του υπερπυκνωτή, καθώς πε-

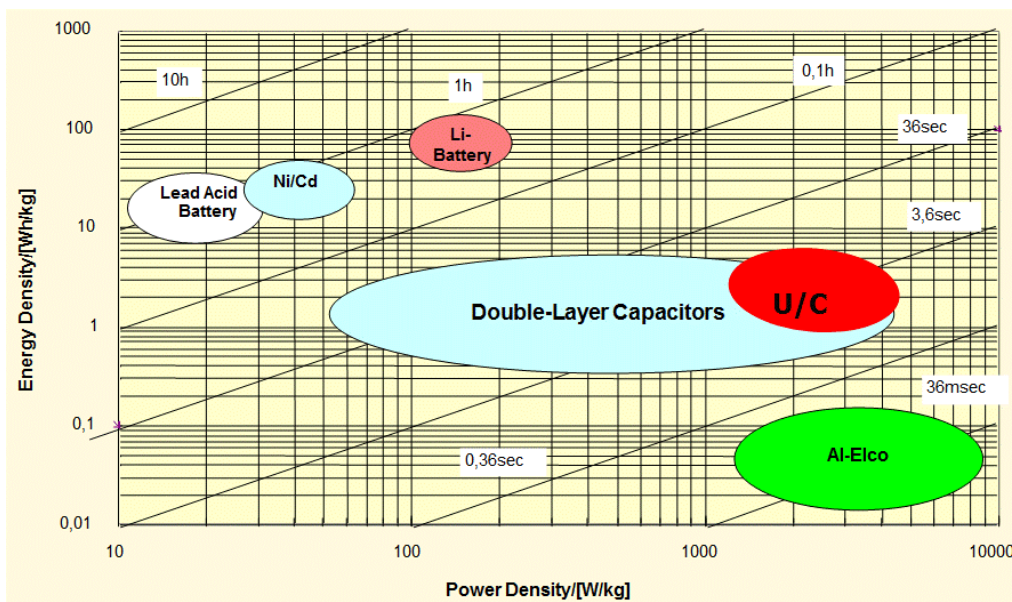
ριορίζει το μέγιστο ρεύμα φόρτισης - εκφόρτισης, αλλά και τον χρόνο φόρτισης - εκφόρτισης μέσω της σχέσης:

$$\tau = R_i \times C \quad (2.44)$$

Για παράδειγμα, για έναν υπερπυκνωτή 1000 F, με εσωτερική αντίσταση 5 mΩ, έχει σταθερά χρόνου $\tau = 0.05 \times 100 = 5$ s. Οι εσωτερικές ωμικές απώλειες ενός υπερπυκνωτή εξαρτώνται απ'το τετράγωνο του ρεύματος φόρτισης - εκφόρτισης μέσω της σχέσης:

$$P_{loss} = R_i \times I^2 \quad (2.45)$$

Η ειδική ενέργεια είναι το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα μάζας του υπερπυκνωτή και μετριέται σε Wh/kg. Οι υπερπυκνωτές μπορούν να αποθηκεύσουν από 10 έως 100 φορές περισσότερη ενέργεια από τους συμβατικούς πυκνωτές, υπολείπονται όμως έναντι των μπαταριών, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.9.



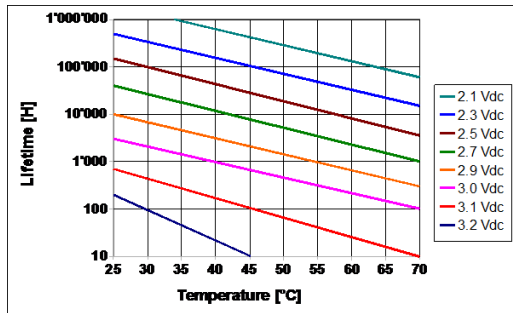
Σχήμα 2.9: Σύγκριση ειδικής ενέργειας και ισχύς υπερπυκνωτή με άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. (Πηγή: Tecate Group)

Το σημείο στο οποίο υπερέχουν οι υπερπυκνωτές έναντι των υπολοίπων συστημάτων αποθήκευσης, είναι η ειδική ισχύς, η οποία περιγράφει την ταχύτητα με την

οποία η ενέργεια μπορεί να αποδοθεί ή να απορροφηθεί από το φορτίο. Αυτή είναι 10 με 100 φορές μεγαλύτερη από εκείνη των μπαταριών και μπορεί να αγγίξει τα 15 kW/kg . Η μέγιστη καθώς και η ονομαστική ισχύς ενός υπερπυκνωτή θα δίνεται από τις σχέσεις:

$$P_{max} = \frac{1}{4} \times \frac{V^2}{R_i} \quad P_{eff} = \frac{1}{8} \times \frac{V^2}{R_i} \quad (2.46)$$

2.2.1.3 Διάρκεια Ζωής



Σχήμα 2.10: Επίδραση της τάσης στην διάρκεια ζωής ενός υπερπυκνωτή. (Πηγή: Garmanage)

Ο ηλεκτρολύτης ενός υπερπυκνωτή είναι σε υγρή μορφή, οπότε είναι ευαίσθητος σε τυχόν εξάτμιση με την αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία είναι συνάρτηση τόσο της θερμοκρασίας λειτουργίας, όσο και εκείνης του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, για κάθε μείωση 10°C , η διάρκεια ζωής διπλασιάζεται, μέσω της σχέσης:

$$L_x = L_0 \times 2^{\frac{T_0 - T_x}{10}} \quad (2.47)$$

Όπου L_x είναι η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής, L_0 η επίσημα δοσμένη από τον κατασκευαστή διάρκεια ζωής, T_0 η θερμοκρασία για την οποία έχει υπολογιστεί η επίσημη

διάρκεια ζωής, T_x η πραγματική θερμοκρασία λειτουργίας.

Η διάρκεια ζωής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.10, εξαρτάται επίσης από την τάση λειτουργίας, επειδή η εξέλιξη των αερίων στο σώμα του ηλεκτρολύτη επηρεάζουν τη δομή του, οπότε μικρότερη τάση λειτουργίας, σημαίνει μικρότερη ποσότητα αερίων στο ηλεκτρολύτη, επομένως μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Συνολικά, ο παρακάτω πίνακας συγκρίνει τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός υπερπυκνωτή έναντι συμβατικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως η μπαταρία και ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής.

Πίνακας 2.6: Σύγκριση χαρακτηριστικών υπερπυκνωτή με συμβατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Διαθέσιμη απόδοση	Μπαταρία μολύβδου	Υπερπυκνωτής	Πυκνωτής
Χρόνος Φόρτισης	1 to 5 hrs	0.3 to 30 s	10^{-3} to 10^{-6} s
Χρόνος Εκφόρτισης	0.3 to 3 hrs	0.3 to 30 s	10^{-3} to 10^{-6} s
Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	10 to 100	1 to 10	< 0.1
Ειδική Ισχύς (W/kg)	< 1000	< 10.000	100.000
Κύκλοι Φόρτισης	1000	> 500.000	> 500.000
Απόδοση φόρτισης – εκφόρτισης	0.7 to 0.85	0.85 to 0.98	> 0.95

2.2.2 Οικονομικά στοιχεία

Το κόστος του υπερπυκνωτή το 2006, ανερχόταν στα $0.01\$/F$ ή $2.85\$/kJ$, ενώ το 2008 υποχώρησε κάτω απ'την αναφερθείσα τιμή. Η αγορά για τους υπερπυκνωτές είναι εξελισσόμενη, κυρίως λόγω της ανάπτυξης υβριδικών μέσων μεταφοράς. Ενδεικτικά, ενώ το 2010 οι παγκόσμιες πωλήσεις σε υπερπυκνωτές ανέρχονταν σε 400 million \$ και των μπαταριών σε 95 billion \$, οι προβλέψεις του 2012, για το 2020 είναι στα 3.5 billion \$, μία αύξηση της τάξης του 900% μέσα σε 10 χρόνια. Αν δεν υπήρχε η συνεχώς αυξανόμενη αγορά των "πράσινων" μέσων μεταφοράς, είχε προβλεφθεί ότι το αντίστοιχο μερίδιο των υπερπυκνωτών θα αυξανόταν μόνο κατά 30%.

2.3 Μπαταρία

Υπάρχουν πολλοί τύποι μπαταριών, όπως οι Νικελίου-Καδμίου, οι Νικελίου-Υβριδίου του Μετάλλου, καθώς και οι μπαταρίες μολύβδου. Στην παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε με τη μπαταρία ιόντων-λιθίου (*lithium – ion or Li – ion Battery or LIB*) [8]. Οι κυριότεροι λόγοι επιλογής του συγκεκριμένου τύπου, είναι οι εξής:

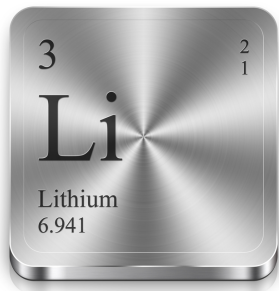
- Η μεγαλύτερη πυκνότητα ειδικής ενέργειας σε σχέση με άλλους τύπους, η οποία δίνει τη δυνατότητα στην αποθήκευση της ενέργειας σε μικρότερες μπαταρίες τόσο ογκομετρικά όσο και βαρομετρικά ($676Wh/L$ ή $265Wh/kg$).
- Μηδενική ανάγκη από συντήρηση σε αντίθεση με τον ανταγωνισμό.
- Πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής (500 – 1000 κύκλους).
- Ο μικρότερος χρόνος φόρτισης στην αγορά της μπαταρίας, που καθιστά τη λειτουργία των υβριδικών μέσων μεταφοράς απρόσκοπτη.
- Πολύ μικρό ποσοστό μηνιαίας αυτό-εκφόρτισης ($< 10\%$).
- Η ικανότητα παραγωγής διπλάσιας τάσης ανά κελί σε σχέση με τον ανταγωνισμό.
- Τα υλικά από τα οποία παράγεται είναι τα λιγότερο τοξικά σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα των μπαταριών ιόντων λιθίου σε σχέση με τον ανταγωνισμό, είναι τα εξής:

- Μηδενική ανοχή στην υπέρταση.
- Λόγω έφλευκτων υλικών του ηλεκτρολύτη, είναι επιτακτική η προσθήκη εξωτερικού κυκλώματος προστασίας από υπερθέρμανση ή υπέρταση.

Παρακάτω θα αναλυθούν, η λειτουργία της μπαταρίας ιόντων λιθίου, μαζί με τα κυριότερα χαρακτηριστικά της. Στο τέλος της συγκεκριμένης ενότητας, στον πίνακα 2.7, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και συγκρίνονται μερικά από τα χαρακτηριστικά των αναφερθέντων τύπων μπαταριών με εκείνα της μπαταρίας ιόντων-λιθίου.

2.3.1 Ηλεκτροχημική Λειτουργία

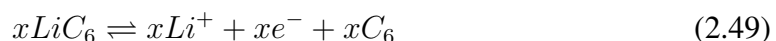
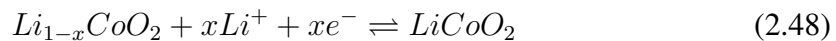


Σχήμα 2.11: Ατομικός αριθμός μετάλλου Λιθίου. (Πηγή: ThingLink)

Το λίθιο είναι το πιο ελαφρύ μέταλλο, έχει το μεγαλύτερο ηλεκτροχημικό δυναμικό και διαθέτει τη μεγαλύτερη ειδική ενέργεια ανά μονάδα βάρους. Αυτά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά συντελούν στο λόγο που ο συγκεκριμένος τύπος μπαταρίας παράγει σχεδόν τη διπλάσια τάση ανά κελί και αυτό οδηγεί στην αυξημένη πυκνότητα ειδικής ενέργειας.

Η μπαταρία ιόντων λιθίου αποτελείται από ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο, καθώς και από ένα στρώμα ηλεκτρολύτη, το οποίο λειτουργεί σαν μέσο επαγωγής ιόντων λιθίου μεταξύ των 2 ηλεκτροδίων. Τα ιόντα λιθίου μπορούν να μετακινούνται από και προς το εσωτερικό και των δύο ηλεκτροδίων, ενώ από τη μετακίνησή τους αυτή εξάγεται ηλεκτρικό έργο.

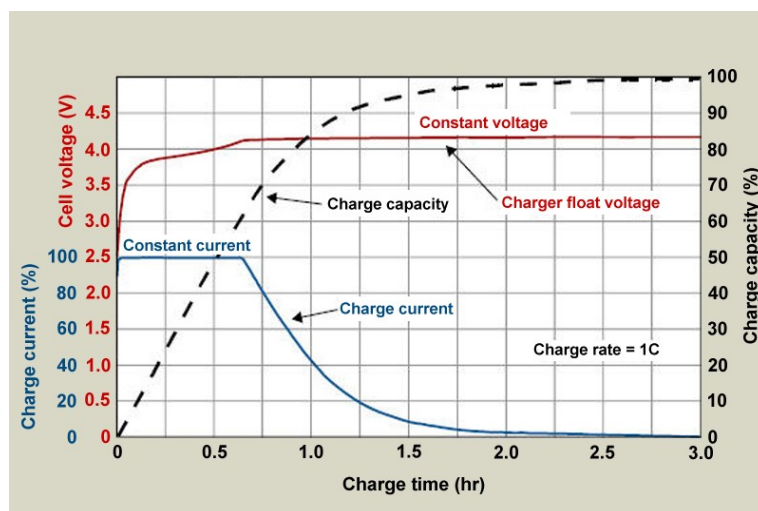
Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης το θετικό ιόν λιθίου (Li^+) μεταφέρει το ρεύμα μέσα στη μπαταρία, από το αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο είναι φτιαγμένο από γραφίτη (C_6) προς το εσωτερικό του θετικού, το οποίο είναι φτιαγμένο από μίγμα λιθίου, μέσω του ηλεκτρολύτη. Αντίστοιχα, κατά τη διαδικασία της φόρτισης συμβαίνει το αντίθετο. Οι παρακάτω εξισώσεις δείχνουν την ηλεκτροχημική αντίδραση στο καθοδικό (αρνητικό) και στο ανοδικό (θετικό) ηλεκτρόδιο αντίστοιχα. Η διαδικασία της εκφόρτισης λαμβάνει μέρος μέσω της οξειδωσης του μετάλλου (π.χ κοβαλτίου, Co), στο $Li_{1-x}CoO_2$ από Co^{3+} σε Co^{4+} . Όσον αφορά την ενέργεια που εξάγεται από κάθε κελί, αυτή ανέρχεται στα $41.7kJ$ ανά γραμμάριο λιθίου ή αλλιώς $11.6kWh/kg$ όταν η μπαταρία λειτουργεί στα $3V$.



Το σχήμα 2.12 δείχνει τα διαφορετικά στάδια φόρτισης μίας μπαταρίας ιόντων λιθίου. Η παραγόμενη τάση ανα κελί κυμαίνεται μεταξύ $4.10V$ και $4.30V$. Αν αυξηθεί το ρεύμα φόρτισης, παρόλο που η μέγιστη τάση προκύπτει σε λιγότερο χρόνο, το στάδιο κορεσμού θα διαρκέσει περισσότερο. Συνολικά, ισχυρότερο ρεύμα φόρτισης σημαίνει ταχύτερη ολοκλήρωση του 70% της διαδικασίας φόρτισης.

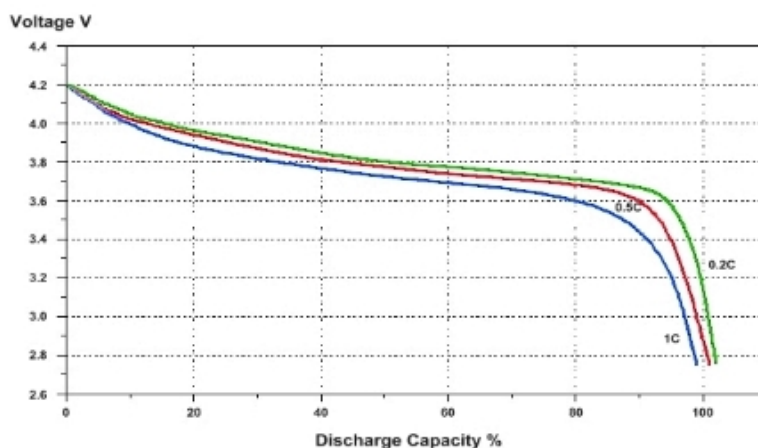
Όπως και σε κάθε άλλο τύπο μπαταρίας, όπου με την πάροδο του χρόνου προκύπτει σταδιακή αποδόμηση των υλικών, έτσι και στη μπαταρία ιόντων λιθίου προκύπτει μείωση της πυκνότητας των ιόντων, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας. Για να διατηρηθεί η αρχική τιμή της χωρητικότητας σε μία μπαταρία, χρειάζεται αύξηση της παραγόμενης τάσης ανά κελί. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε στην αρχή, ο συγκεκριμένος τύπος έχει σχεδόν μηδενική ανοχή στην υπέρταση, η οποία μπορεί να είναι το πολύ $50mV/cell$, οπότε μία αύξηση στην παραγόμενη τάση άνω των επιτρεπτών ορίων θα διαταράξει το επίπεδο ασφαλείας. Αυτός είναι και ο λόγος που οι κατασκευαστές προτείνουν η φόρτιση της μπαταρίας να μην φτάνει στο 100%, αλλά γύρω στο 70%, καθώς κάτι τέτοιο δοκιμάζει τα όρια της συνοχής του ηλεκτρολύτη και συνολικά την ασφάλεια της μπαταρίας.

Όσον αφορά την εκτίμηση του επιπέδου φόρτισης (SoC) μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου μέσω της παραγόμενης τάσης της, αυτή δεν θεωρείται ενδεδειγμένη λύση, γιατί



Σχήμα 2.12: Συμπεριφορά τάσης και ρεύματος μίας μπαταρίας ιόντων-λιθίου κατά την φόρτιση. (Πηγή: *Battery University*)

όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.13, το επίπεδο της τάσης δεν μεταβάλλεται σε μεγάλο βαθμό με τη μείωση του επιπέδου φόρτισης, οποιοδήποτε και αν είναι το φορτίο που τροφοδοτεί.



Σχήμα 2.13: Καμπύλη εκφόρτισης μπαταρίας ιόντων λιθίου. (Πηγή: *IBT Power*)

2.3.2 Οικονομικά στοιχεία

Το κόστος της μπαταρίας μικραίνει, καθώς η ζήτηση για ολοένα ισχυρότερες μπαταρίες αυξάνεται. Ενδεικτικά, το 2015, η τιμή της ανερχόταν στα 300 – 500 \$/kwh, ενώ το 2016 έπεσε στα 145 \$/kwh. Το 1994, το κόστος παραγωγής μίας μπαταρίας 18650 κελιών και χωρητικότητας 1100mAh, ανερχόταν στα 15\$, ενώ το 2001 για την παραγωγή των ίδιων κελιών, χωρητικότητας 1900mAh, η αντίστοιχη τιμή έπεσε κάτω από τα 3\$. Σήμερα, όπου για τα ίδια κελιά η χωρητικότητα έχει αυξηθεί στα 3000mAh, το κόστος παραγωγής έχει περαιτέρω μειωθεί. Με την εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης και τη διείσδυσή της σε όλα τα μέσα μαζικής μεταφοράς, η τιμή ανά χωρητικότητα κάθε μπαταρίας προβλέπεται να φτάσει σε ιστορικά χαμηλά επίπεδα.

Πίνακας 2.7: Σύγκριση τεχνικών χαρακτηριστικών διαφόρων τύπων μπαταριών.

<i>Τεχνικά Χαρακτηριστικά</i>	<i>Lead Acid</i>	<i>NiCd</i>	<i>NiMH</i>	<i>Li-ion</i>		
				<i>Cobalt</i>	<i>Manganeses</i>	<i>Phosphate</i>
Πυκνότητα Ειδικής Ενέργειας (<i>Wh/kg</i>)	30 – 50	45 – 80	60 – 120	150 – 190	100 – 135	90 – 120
Εσωτερική Αντίσταση (<i>mΩ</i>)	< 100	100 – 200	200 – 300	150 – 300	25 – 75	25 – 50
Διάρκεια Ζωής (Κύκλοι)	200 – 300	1000	300 – 500	500 – 1000	500 – 1000	1000 – 2000
Χρόνος Γρήγορης Φόρτισης	8 – 16 <i>h</i>	1 <i>h</i>	2 – 4 <i>h</i>	2 – 4 <i>h</i>	1 <i>h or less</i>	1 <i>h or less</i>
Ανοχή Υπέρτασης	High	Moderate	Low	Low		
Μηνιαία αυτό-εκφόρτιση	5%	20%	30%	< 10%		
Ονομαστική Τάση Κελιού	2 <i>V</i>	1.2 <i>V</i>	1.2 <i>V</i>	3.6 <i>V</i>	3.8 <i>V</i>	3.3 <i>V</i>
Τάση Αποκοπής Φόρτισης <i>V/cell</i>	2.4	Full charge detection by voltage signature		4.2		3.6
Τάση Αποκοπής Εκφόρτισης <i>V/cell</i>	1.75	1.00		2.5 – 3.00		2.80
Μέγιστο Ρεύμα Φορτίου	5 <i>C</i>	20 <i>C</i>	5 <i>C</i>	> 3 <i>C</i>	> 30 <i>C</i>	> 30 <i>C</i>
Θερμοκρασία Φόρτισης	–20 to 50°C	0 to 45°C		0 to 45°C		
Θερμοκρασία Εκφόρτισης	–20 to 50°C	–20 to 65°C		–20 to 60°C		

2.4 Μετατροπείς συνεχούς τάσης

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή ($DC - DC$ converter) είναι ηλεκτρικά κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για να μετατρέπουν την εισαγόμενη σ'αυτά συνεχή τάση σε εξαγώμενη συνεχή τάση μικρότερης ή μεγαλύτερης τιμής. Βασικό δομικό στοιχείο τους είναι τα ελεγχόμενα ημιαγώγιμα στοιχεία, όπως τα τρανζίστορ IGBT και MOSFET, τα θυρίστορ κ.α. Αυτά τα στοιχεία λειτουργούν κυρίως ως διακόπτες, οπότε οι καταστάσεις στις οποίες μπορούν να βρεθούν είναι δύο, εκείνη της αγωγής και εκείνη της αποκοπής. Η μετάβαση μεταξύ των καταστάσεων συνήθως επιτυγχάνεται μέσω παλμών εναύσεως.

Οι μετατροπείς είναι αναπόσπαστο κομμάτι σε όλο το φάσμα του ενεργειακού κλάδου, γιατί επιτρέπει οποιαδήποτε μετατροπή μορφών ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέγιστη δυνατή απόδοση. Παρακάτω δίνονται μερικές από τις εφαρμογές του:

- Στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και σε μικρότερης κλίμακας συστήματα, όπου το βάρος και το μέγεθος των διατάξεων είναι κρίσιμος παράγοντας.
- Στα φωτοβολταϊκά συστήματα.
- Στα συστήματα τηλεπικοινωνιών.
- Σε οικιακές συσκευές.
- Σε ηλεκτρονικές συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές.
- Σε συστήματα ελέγχου ταχύτητας ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρικά τρένα, τραμ, μετρό, ηλεκτρικά αυτοκίνητα και γενικότερα ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς
- Σε βιομηχανικό εξοπλισμό, καθώς και σε αμυντικά συστήματα.

2.4.1 Κατηγοριοποίηση μετατροπέων

Οι μετατροπείς DC-DC μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις ακόλουθες περιπτώσεις, είτε ανάλογα με το αν η τάση εισόδου είναι γαλβανικά απομονωμένη από την τάση εξόδου, είτε ανάλογα με το αν η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση εισόδου.

- *Γαλβανική απομόνωση*: στις γαλβανικά απομονωμένες συνδεσμολογίες χρησιμοποιείται μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας, όπου με την κατάλληλη επιλογή λόγου πρωτεύοντος δευτερεύοντος καθορίζεται η ανύψωση ή ο υποβιβασμός της τάσης εισόδου.
- *Μη γαλβανική απομόνωση*: οι μη γαλβανικά απομονωμένες τοπολογίες είναι λιγότερο ογκώδεις, λόγω της έλλειψης του μετασχηματιστή απομόνωσης και χρησιμοποιούνται στις αυτόνομες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, οι οποίες συνδέονται με DC κινητήρα άντλησης νερού ή και φορτιστή μπαταριών.
- *Μετατροπείς υποβιβασμού τάσης – Buck Converter*: οι μετατροπείς αυτοί αποδίδουν στην έξοδό τους τάση μικρότερη από αυτή που εφαρμόζεται στην είσοδό τους.

- *Μετατροπείς ανύψωσης τάσης – Boost Converter*: οι μετατροπείς αυτοί αποδίδουν στην έξοδό τους τάση μεγαλύτερη από αυτή που εφαρμόζεται στην είσοδό τους.
- *Μεικτοί μετατροπείς υποβιβασμού και ανύψωσης τάσης – Buck Boost Converter*: οι μετατροπείς αυτοί έχουν τη δυνατότητα να αποδώσουν στην έξοδό τους τάση, είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη, από αυτή που εφαρμόζεται στην είσοδό τους.
- *Μετατροπείς Cuk – Cuk Converter*: οι μετατροπείς αυτοί έχουν την ίδια λειτουργία με τους μεικτούς μετατροπείς υποβιβασμού και ανύψωσης τάσης, με τη διαφορά ότι διαθέτουν επιπλέον ένα πηνίο και έναν πυκνωτή, τα οποία λειτουργούν ως φίλτρα σε παρασιτικές τάσεις.
- *Μετροπείς πλήρους γέφυρας – Full Bridge Converter*: οι μετατροπείς αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές υψηλής ισχύος, όταν απαιτούνται υψηλές DC τάσεις, είτε όταν πρέπει να παρέχουν απομόνωση στη διάταξη.

Επίσης οι μετατροπείς, ανάλογα με την κατεύθυνση της ενέργειας που διαχειρίζονται, κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- *Μονής κατεύθυνσης – Unilateral*: οι μετατροπείς στους οποίους η μεταφορά ισχύος γίνεται από την είσοδο προς την έξοδο.
- *Αμφίδρομοι – Bilateral*: οι μετατροπείς στους οποίους η μεταφορά ισχύος γίνεται τόσο από την είσοδο προς την έξοδο όσο και ανάποδα.

Στην παρούσα διπλωματική, από τους παραπάνω τύπους μετατροπέων θα χρησιμοποιηθούν μονής κατεύθυνσης για την κυψέλη καυσίμου, αλλά και αμφίδρομοι για την μπαταρία και τον υπερπυκνωτή.

2.4.2 Έλεγχος μετατροπέων DC-DC

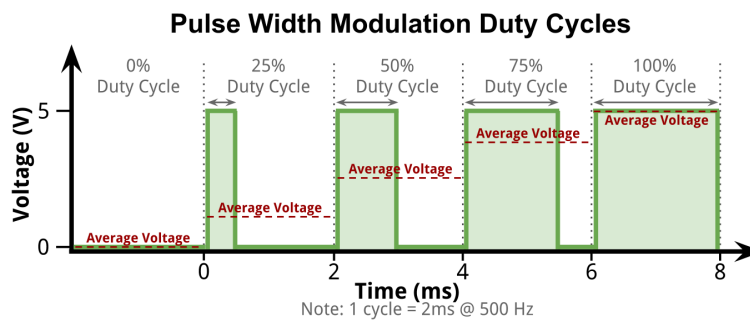
Οι μετατροπείς πρέπει να έχουν την ικανότητα να ελέγχουν την τάση εξόδου τους, έτσι ώστε αυτή να βρίσκεται πάντα στην επιθυμητή τιμή. Αυτό επιτυγχάνεται με παλμούς εναύσεως και συγκεκριμένα από το χρόνο που τα τρανζίστορ βρίσκονται στην κατάσταση αγωγής (t_{on}) ή στην κατάσταση αποκοπής (t_{off}). Υπάρχουν δύο μέθοδοι ελέγχου της τάσης εξόδου:

1. Ο έλεγχος με σταθερή συχνότητα μετάβασης, επομένως σταθερή περίοδο, $T_s = t_{on} + t_{off}$. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse-Width Modulation) και ελέγχει το χρόνο που τα τρανζίστορ του μετατροπέα θα βρίσκονται στην κατάσταση αγωγής (t_{on}) ή στην κατάσταση αποκοπής (t_{off}).
2. Ο έλεγχος με μεταβαλλόμενη συχνότητα και περίοδο αγωγής ή αποκοπής και χρησιμοποιείται από μετατροπείς DC-DC με θυρίστορ.

Παρακάτω θα αναλυθεί η λειτουργία της διαμόρφωσης εύρους παλμών καθώς και τα δομικά στοιχεία ελέγχου της, όπως οι PID ελεγκτές.

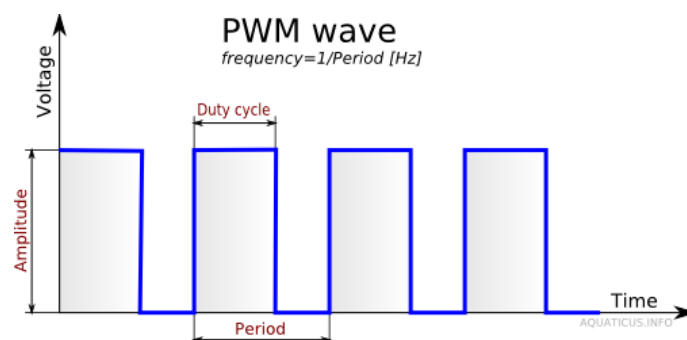
2.4.2.1 Διαμόρφωση Εύρους Παλμών

Η διαμόρφωση εύρους παλμών είναι μία τεχνική κωδικοποίησης ενός μηνύματος σε ένα παλλόμενο σήμα και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της παρεχόμενης ισχύς από το δίκτυο ή την πηγή σε ηλεκτρικές συσκευές και κυρίως σε αδρανειακά φορτία όπως οι ηλεκτρικοί κινητήρες [9]. Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, η μέση τιμή της τάσης (και του ρεύματος) που αποδίδεται στο φορτίο ελέγχεται από την κατάσταση των τρανζίστορ, που λειτουργούν ως διακοπτικά στοιχεία σε υψηλές συχνότητες για την ελάχιστη δυνατή απώλεια ισχύος. Έτσι όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.14 όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος αγωγής σε σχέση με αυτόν της αποκοπής, τόσο μεγαλύτερη ισχύς παραδίδεται στο φορτίο. Η συχνότητα παίζει σημαντικό ρόλο καθώς από αυτή



Σχήμα 2.14: Επίδραση του κύκλου λειτουργίας στην αποδιδόμενη τάση. (Πηγή: HHO 4 Free)

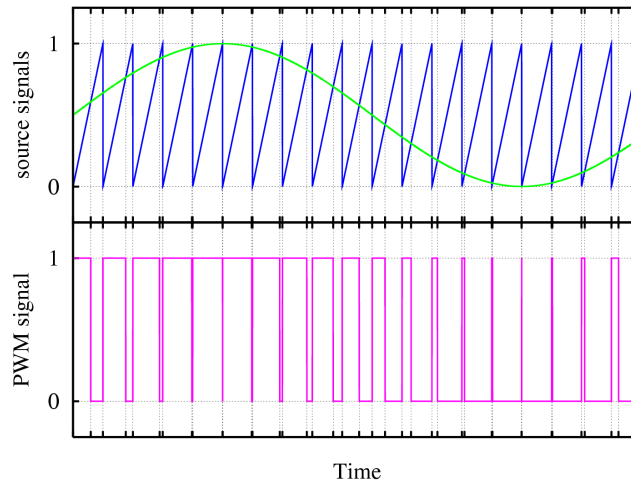
εξαρτάται πόσο απρόσκοπτα παραδίδεται η ισχύς στο φορτίο. Για παράδειγμα, ένας ροοστάτης λάμπας θα πρέπει να λειτουργεί στα 120 Hz , ένας ηλεκτρικός κινητήρας σε δεκάδες $k\text{Hz}$, ενώ οι ενισχυτές ήχου και υπολογιστικά συστήματα σε εκατοντάδες $k\text{Hz}$. Ο όρος "κύκλος λειτουργίας" (duty cycle) που χρησιμοποιήθηκε στο παραπάνω σχήμα περιγράφει την αναλογία του χρόνου αγωγής (t_{on}) σε σχέση με τον ολικό χρόνο ($t_s = t_{on} + t_{off}$).



Σχήμα 2.15: Χαρακτηριστικά ενός PWM παλμού. (Πηγή: Technology Robotix Society)

Κατά τη λειτουργία της PWM διαμόρφωσης λαμβάνεται συνεχώς το επίπεδο της τάσης εξόδου, το οποίο ελέγχεται με το επίπεδο της επιθυμητής τιμής μέσω ενός συγκριτή, ο οποίος παράγει ένα σφάλμα. Αυτό θα είναι θετικό σε περίπτωση που η τάση εξόδου είναι μικρότερη της επιθυμητής και αρνητικό στην αντίθετη περίπτωση. Στη συνέχεια, το σήμα του σφάλματος, τροφοδοτείται σε έναν ελεγκτή, τον PID ελεγκτή (θα περιγραφεί παρακάτω), ο οποίος ελέγχει και καθορίζει την αντίδραση του σφάλματος με στόχο τη συντομότερη εξάλειψη του. Στο τέλος, αυτό το σήμα συγκρίνεται εκ νέου με ένα σήμα ελέγχου περιοδικής κυματομορφής σταθερού πλάτους (πριονωτή,

παλμική, ημιτονική) και η έξοδος του τροφοδοτείται στην είσοδο του τρανζίστορ και θα καθοριστεί αναλόγως αν χρειάζεται να βρεθεί σε κατάσταση αγωγής ή αποκοπής για την επίτευξη της επιθυμητής τιμής τάσης ή ισχύος. Η συχνότητα της διαμόρφωσης καθορίζεται από τη συχνότητα της περιοδικής κυματομορφής, η οποία περιγράφει την ταχύτητα ελέγχου του επιπέδου σφάλματος. Οι καταστάσεις του τρανζίστορ καθορίζονται από τη σύγκριση του επιπέδου του σήματος εξόδου του PID ελεγκτή με το αντίστοιχο πλάτος του σήματος της κυματομορφής. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.16, όταν το πλάτος της κυματομορφής είναι μεγαλύτερο από εκείνο του σήματος του ελεγκτή, τότε ο διακόπτης μεταβαίνει στην κατάσταση αγωγής, ενώ στην αντίθετη περίπτωση μεταβαίνει στην κατάσταση αποκοπής. Η διάρκεια αγωγής μπορεί



Σχήμα 2.16: Λειτουργία PWM διαμόρφωσης. (Πηγή: Wikipedia)

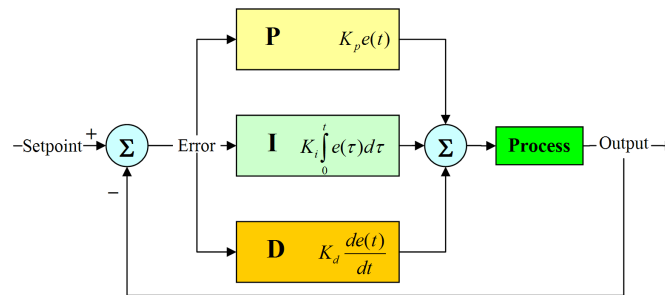
να περιγραφεί και από την εξής σχέση:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (2.50)$$

2.4.2.2 Σύστημα ελέγχου (PID)

Πρόκειται για ένα μηχανισμό ελέγχου με σύστημα ανάδρασης, ο οποίος βρίσκεται εφαρμογή κυρίως στο βιομηχανικό κλάδο, καθώς και στα αυτόνομα μέσα μεταφοράς όπως αεροπλάνα, καράβια και αυτοκίνητα. Αποτελείται από τρία διαφορετικά σκέλη ελέγχου, το αναλογικό (Proportional), το ολοκληρωτικό (Integral) και το διαφορικό (Derivative). Υπάρχουν πολλές παραλλαγές του συγκεκριμένου ελεγκτή, όπως οι P, PI, PD, PID, αλλά εδώ θα αναλυθεί η τελευταία και πιο περίπλοκη παραλλαγή [10]. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.17, το πρώτο στάδιο του PID ελεγκτή, είναι ο συνεχής υπολογισμός του σφάλματος $e(t)$, το οποίο προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ του σήματος εξόδου με το σήμα της επιθυμητής τιμής. Έπειτα το σήμα $e(t)$ τροφοδοτείται στις επιμέρους βαθμίδες του ελεγκτή, από όπου προκύπτει η αναλογική, η ολοκληρωτική και η διαφορική ενίσχυση του, με τα αντίστοιχα κέρδη της κάθε βαθμίδας: K_p , K_i , K_d . Το παραγόμενο σήμα τροφοδοτείται εκ νέου στην είσοδο του συγκριτή, επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία μέχρι τον εκμηδενισμό του σφάλματος. Η μαθηματική έκφραση του μηχανισμού PID ελέγχου δίνεται παρακάτω:

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \int_0^t e(\tau) + K_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (2.51)$$



Σχήμα 2.17: Διάγραμμα κλειστού βρόχου PID ελεγκτή. (Πηγή: Mr. Digital)

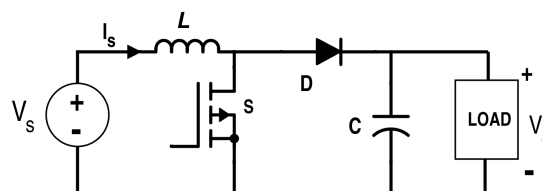
Η ρύθμιση ενός PID ελεγκτή γίνεται μέσω των βάρων των βαθμίδων. Η αύξηση του K_p έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του χρόνου ανύψωσης, καθώς και τη μείωση του μόνιμου σφάλματος. Η αύξηση του K_i έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη του μόνιμου σφάλματος και την παράλληλη χειροτέρευση της μεταβατικής συμπεριφοράς του συστήματος, δηλαδή τον αριθμό των ταλαντώσεων μέχρι την τελική ισορροπία του. Η αύξηση του K_d έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της σταθερότητας του συστήματος, μειώνοντας την υπερύψωση και βελτιώνοντας τη μεταβατική συμπεριφορά του.

Πίνακας 2.8: Επίδραση από τις αλλαγές των κερδών των 3 βαθμίδων στην κυματομορφή του σφάλματος.

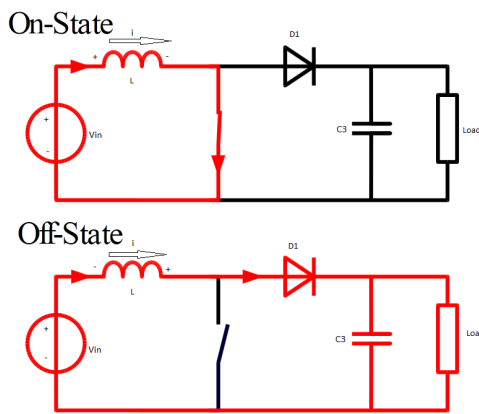
Κέδος Βαθμίδας Ελεγκτή	Χρόνος Ανύψωσης	Υπερύψωση	Χρόνος Αποκατάστασης	Μόνιμο Σφάλμα
K_p	Μείωση	Αύξηση	Μικρή Αλλαγή	Μείωση
K_i	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Εξάλειψη
K_d	Μικρή Αλλαγή	Μείωση	Μείωση	Μικρή Αλλαγή

2.4.3 Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης

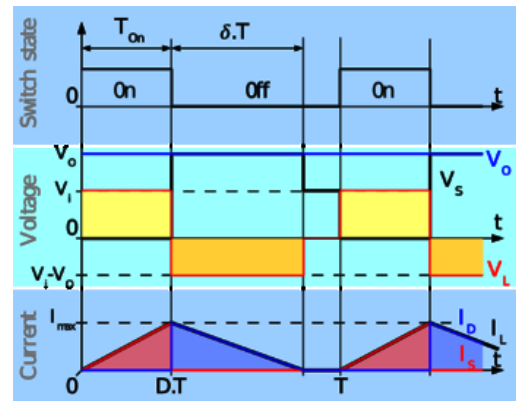
Ο μετατροπέας ανύψωσης (Boost Converter) είναι ένας μετατροπέας συνεχούς ρεύματος, ο οποίος ενισχύει την τάση εισόδου του και βασικοί δομικοί του λίθοι είναι διακοπτικά ημιαγώγιμα στοιχεία, όπως η διόδος και το τρανζίστορ (MOSFET, IGBT), καθώς και στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας, όπως ο πυκνωτής και το πηνίο [11]. Η ενέργεια θα πρέπει να διατηρείται, οπότε από τη στιγμή που η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου, το ρεύμα εξόδου θα πρέπει να είναι μικρότερο από αυτό της εισόδου, για να ισχύει $P_{out} = VI = P_{in}$.



Σχήμα 2.18: Μετατροπέας ανύψωσης τάσης. (Πηγή: Electrical Engineering Stack Exchange)



Σχήμα 2.19: Στάδια λειτουργίας μετατροπέα ανύψωσης τάσης. (Πηγή: Wikipedia)



Σχήμα 2.20: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης των στοιχείων ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης κατά τη συνεχή λειτουργία. (Πηγή: Wikipedia)

Η λειτουργία του μετατροπέα βασίζεται στη "ροπή" του πηνίου να αντιστέκεται σε μεταβολές του ρεύματος δημιουργώντας ή καταστρέφοντας μαγνητικό πεδίο γύρω του. Οι φάσεις λειτουργίας του, όπως φαίνεται και στα σχήματα 2.19 και 2.20, είναι δύο :

1. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός για χρονικό διάστημα $0 < t < DT$, το ρεύμα διαπερνάει το πηνίο, οπότε αυτό αποθηκεύει μαγνητική ενέργεια. Η πολικότητα είναι θετική στην αριστερή πλευρά του πηνίου, η τάση στα άκρα του είναι $V_L = V_{in}$ και θα αυξάνεται γραμμικά με κλίση V_{in}/L αυξάνοντας έτσι και την αποθηκευόμενη μαγνητική ενέργειά του. Η τάση κατά μήκος της διόδου είναι $V_d = -V_0$ και η διάδος είναι ανάστροφα πολωμένη, οπότε το ρεύμα που περνάει από το διακόπτη ισούται με το ρεύμα του πηνίου.
2. Όταν ο διακόπτης ανοίξει στο χρόνο $t = DT$, η πολικότητα του πηνίου θα αλλάξει για να διατηρήσει την κατεύθυνση του ρεύματος, οπότε λειτουργεί σαν μία πηγή ρεύματος. Επειδή η διάδος είναι τώρα ορθά πολωμένη, η τάση στα άκρα του πηνίου θα είναι $V_L = V_{in} - V_0 < 0$, οπότε το ρεύμα του θα μειώνεται με κλίση $(V_{in} - V_0)/L$ και θα τροφοδοτείται στον πυκνωτή και το φορτίο μέσω της διόδου.

Η συχνότητα της εναλλαγής του διακόπτη, μαζί με τις τιμές των στοιχείων του μετατροπέα θα καθορίσουν το όριο μεταξύ της *συνεχούς* και της *ασυνεχούς λειτουργίας*, όπου στην ασυνεχή λειτουργία το πηνίο και ο πυκνωτής εκφορτίζονται πλήρως. Η συνάρτηση μεταφοράς για τη συνεχή λειτουργία προκύπτει ως εξής:

- Όσο ο διακόπτης είναι κλειστός ($0 < t < DT$), η τάση εισόδου V_{in} εμφανίζεται στα άκρα του πηνίου, το οποίο αυξάνει το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο βάσει της σχέσης:

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{V_{in}}{L} \quad (2.52)$$

Στο τέλος της κατάστασης αγωγής το ρεύμα στο πηνίο θα είναι:

$$\Delta I_{L_{On}} = \frac{1}{L} \times \int_0^{DT} V_{in} dt = \frac{DT}{L} \times V_{in} \quad (2.53)$$

- Όταν ο διακόπτης ανοίξει το ρεύμα του πηνίου που θα τροφοδοτήσει μέσω της διόδου το φορτίο θα δίνεται από την σχέση:

$$V_{in} - V_0 = L \times \frac{dI_L}{dt} \quad (2.54)$$

Στο τέλος της κατάστασης αποκοπής το ρεύμα στο πηνίο θα είναι:

$$\Delta I_{L_{off}} = \int_{DT}^T \frac{V_{in} - V_0}{L} dt = \frac{(V_{in} - V_0)(1 - D)T}{L} \quad (2.55)$$

- Από τη στιγμή που διατηρείται η αποθηκευόμενη ενέργεια των στοιχείων του μετατροπέα, το ρεύμα του πηνίου θα πρέπει να είναι ίδιο στο τέλος κάθε εναλλαγής του διακόπτη, δηλαδή το συνολικό ρεύμα θα είναι μηδέν.

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0 \rightarrow \frac{V_{in}DT}{L} + \frac{(V_{in} - V_0)(1 - D)T}{L} = 0 \quad (2.56)$$

Το οποίο δίνει τη συνάρτηση μεταφοράς συναρτήσει της τάσης :

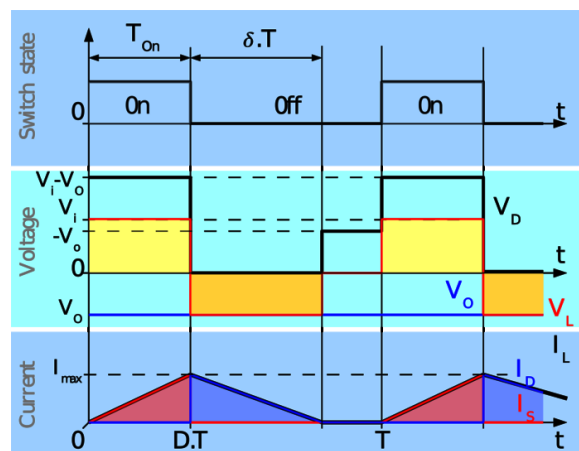
$$M_V = \frac{V_0}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \rightarrow D = 1 - \frac{V_0}{V_{in}} = 1 - \frac{1}{M_V} \quad (2.57)$$

Ενώ η συνάρτηση μεταφοράς συναρτήσει του ρεύματος θα είναι:

$$M_I = \frac{I_0}{I_{in}} = 1 - D \rightarrow D = 1 - \frac{I_0}{I_{in}} = 1 - M_I \quad (2.58)$$

2.4.3.1 Όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς λειτουργίας

Στο σημείο αυτό, θα καθορισθεί το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς κατάστασης λειτουργίας. Κατά τη διάρκεια της ασυνεχούς λειτουργίας το ρεύμα του πηνίου εκμηδενίζεται πριν αρχίσει ο καινούριος κύκλος φόρτισής του.



Σχήμα 2.21: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης των στοιχείων ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης κατά την ασυνεχή λειτουργία. (Πηγή: Wikipedia)

- Όσο ο διακόπτης παραμένει κλειστός το ρεύμα στο πηνίο θα αυξάνεται, μέχρι τη χρονική τιμή DT όπου ανοίγει ο διακόπτης και το ρεύμα έχει τη μέγιστη τιμή του, που θα δίνεται από τη σχέση:

$$I_{L_{Max}} = \frac{V_{in}DT}{L} \quad (2.59)$$

Όπου αν αντικατασταθεί το $T = \frac{1}{f_s}$ και το $V_{in} = \frac{V_0}{M_V} = V_0 \times (1 - D)$ γίνεται:

$$I_{L_{Max}} = \frac{V_0 D(1 - D)}{f_s L} \quad (2.60)$$

- Κατά τη διάρκεια της περιόδου αποκοπής το ρεύμα του πηνίου θα εκμηδενιστεί στη χρονική στιγμή δT .

$$I_{L_{Max}} + \frac{(V_{in} - V_0)}{L} \times \delta T = 0 \quad (2.61)$$

Και στο όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς λειτουργίας το ρεύμα θα είναι:

$$I_L = \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_0 D(1 - D)}{2f_s L} \quad (2.62)$$

το οποίο λαμβάνει μέγιστη τιμή για $D = 0.5$. Το αντίστοιχο ρεύμα εξόδου στο όριο συνεχούς-ασυνεχούς λειτουργίας θα δίνεται από τη σχέση:

$$I_{out} = I_L \times (1 - D) = \frac{V_0 D(1 - D)^2}{2f_s L} \quad (2.63)$$

και η αντίσταση φορτίου θα είναι:

$$R = \frac{V_0}{I_{out}} = \frac{2f_s L}{D(1 - D)^2} = \frac{2f_s M_V^3}{M_V - 1} \quad (2.64)$$

2.4.3.2 Μοντελοποίηση υπολογισμού των στοιχείων L,C του μετατροπέα ανύψωσης τάσης

Για τον υπολογισμό της μέγιστης τιμής ρεύματος εξόδου, εξισώνεται η παράγωγος της 2.64 με το μηδέν, δηλαδή:

$$\frac{dI_{out}}{dD} = 0 \rightarrow \frac{V_0}{2f_s L} \times (1 - 4D + 3D^2) = 0 \quad (2.65)$$

Η παραπάνω εξίσωση βρίσκει λύση για $D = 1/3, D = 0, D = 1$. Για $D = 1$ έχουμε τάση εισόδου ίδια με τάση εξόδου, ενώ για $D = 0$ έχουμε μηδενικές τάσεις εισόδου και εξόδου, επομένως η μόνη δεκτή λύση είναι η $D = 1/3$, για την οποία προκύπτει $M_V = 1.5$, και η αντικατάστασή της στον τύπο 2.63 θα δώσει την εξής σχέση για το μέγιστο ρεύμα εξόδου:

$$I_{out_{max}} = \frac{2}{27} \times \frac{V_0}{f_s L_{min}} \quad (2.66)$$

Η ελάχιστη αντίσταση φορτίου εξόδου στο όριο θα δίνεται από τη σχέση:

$$R_{min} = \frac{V_0}{I_{out_{max}}} = 13.5 \times f_s \times L_{min} \quad (2.67)$$

Από την εξίσωση 2.66 μπορεί να βρεθεί η ελάχιστη τιμή της αυτεπαγωγής L του πηνίου, για την οποία εξασφαλίζεται ότι ο μετατροπέας ανύψωσης βρίσκεται σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας μέσω της σχέσης:

$$L_{min} = \frac{2}{27} \times \frac{V_0}{f_s I_{out_{Max}}} = \frac{2}{27} \times \frac{R_{min}}{f_s} \quad (2.68)$$

Η παραπάνω σχέση είναι για $D = 1/3$. Για τις υπόλοιπες τιμές του D , υπάρχουν οι εξής περιπτώσεις:

- Αν $D_{max} < 1/3$ τότε:

$$I_{out_{max}} = \frac{V_0 D_{max} (1 - D_{max})^2}{2 f_s L_{min}} \rightarrow L_{min} = \frac{R_{L_{max}} D_{max} (1 - D_{max})^2}{2 f_s} \quad (2.69)$$

- Αν $D_{min} > 1/3$ τότε:

$$I_{out_{max}} = \frac{V_0 D_{min} (1 - D_{min})^2}{2 f_s L_{min}} \rightarrow L_{min} = \frac{R_{L_{max}} D_{min} (1 - D_{min})^2}{2 f_s} \quad (2.70)$$

Επιπλέον, πρέπει να βρεθεί η ελάχιστη τιμή του πυκνωτή, ώστε ο μετατροπέας να λειτουργεί σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας. Η μέγιστη τιμή από κορυφή σε κορυφή (peak to peak) του ρεύματος του πυκνωτή θα δίνεται από τη σχέση:

$$I_{C_{PP}} \approx I_{max} = \frac{I_{out_{max}}}{1 - D_{max}} \quad (2.71)$$

Επομένως, η τιμή από κορυφή σε κορυφή της τάσης του πυκνωτή θα είναι:

$$V_{r_{C_{PP}}} = r_C \times I_{C_{PP}} \approx r_c \times \frac{I_{out_{max}}}{1 - D_{max}} \quad (2.72)$$

Για την από κορυφή σε κορυφή τάση κυμάτωσης της εξόδου V_r , ισχύει ότι $V_r = 1\% V_0$, επομένως η μέγιστη τιμή της από κορυφή σε κορυφή τάσης κατά μήκος του πυκνωτή C , θα δίνεται από τη σχέση:

$$V_{C_{PP}} \approx V_r - V_{r_{C_{PP}}} \quad (2.73)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές προκύπτει η σχέση:

$$V_{C_{PP}} = \frac{I_{out_{max}} D_{max} T}{C_{min}} = \frac{V_0 D_{max}}{f_s R_{min} C_{min}} \quad (2.74)$$

Αναδιατάσσοντας τον παραπάνω τύπο προκύπτει η σχέση που δίνει την ελάχιστη τιμή του πυκνωτή στο όριο, ώστε να βρίσκεται ο μετατροπέας σε συνεχή λειτουργία:

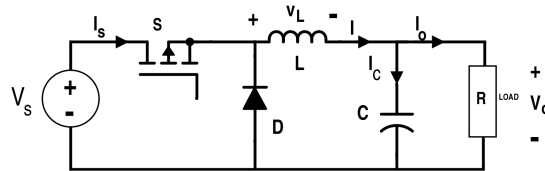
$$C_{min} = \frac{I_{out_{max}} D_{max}}{f_s V_{C_{PP}}} = \frac{V_0 D_{max}}{f_s R_{min} V_{C_{PP}}} \quad (2.75)$$

Και η ελάχιστη συχνότητα του φίλτρου εξόδου είναι:

$$f_{min} = \frac{1}{2\pi C R_{max}} \quad (2.76)$$

2.4.4 Μετατροπέας Υποβιβασμού Τάσης

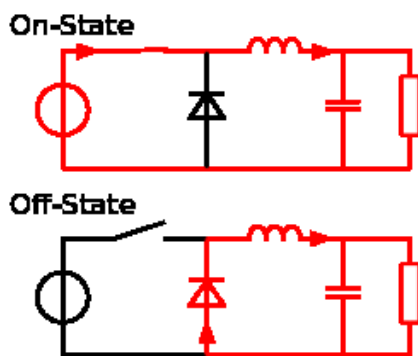
Ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (Buck Converter) είναι ένας μετατροπέας συνεχούς ρεύματος, ο οποίος υποβιβάζει την τάση εισόδου του και οι δομικοί του λίθοι, όπως και στο μετατροπέα ανύψωσης τάσης, είναι διακοπτικά ημιαγώγιμα στοιχεία, όπως η διάοδος και το τρανζίστορ (MOSFET, IGBT), καθώς και στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας, όπως ο πυκνωτής και το πηνίο [12]. Και σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει η ενέργεια να διατηρείται, επομένως $P_{out} = VI = P_{in}$ και το ρεύμα εξόδου θα είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα εισόδου. Το διάγραμμα ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης δίνεται παρακάτω:



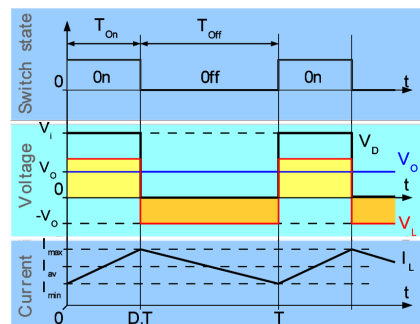
Σχήμα 2.22: Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης. (Πηγή: All About Circuits)

Η λειτουργία του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης βασίζεται στις ίδιες αρχές με εκείνες του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, οπότε σημαντικό ρόλο θα παίζει η "ροπή" του πηνίου να αντιστέκεται στις μεταβολές του ρεύματος αποθηκεύοντας ή καταναλώνοντας μαγνητική ενέργεια. Η λειτουργία του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, όπως φαίνεται και στα σχήματα 2.26 και 2.27 είναι η εξής:

- Όταν ο διακόπτης είναι αρχικά κλειστός (on state) για χρονικό διάστημα $0 < t < DT$, το ρεύμα στο πηνίο θα αρχίσει να αυξάνεται λόγω της ανάστροφης πολωμένης διάοδος, με αποτέλεσμα το πηνίο να αποθηκεύει μαγνητική ενέργεια και η τάση που δημιουργείται στα άκρα του να παίρνει την τιμή $V_L = V_i - V_o$.
- Όταν ο διακόπτης ανοίξει (off state), η πηγή τάσης αποκόπτεται από το κύκλωμα, η διάοδος πολώνεται ορθά και το πηνίο λειτουργεί ως πηγή ρεύματος, καταναλώνοντας την αποθηκευμένη μαγνητική ενέργειά του, τροφοδοτώντας το φορτίο. Η τάση στα άκρα του πηνίου τώρα θα είναι $V_L = -V_o$ και το ρεύμα του θα μειώνεται μέχρι ο διακόπτης να μεταβεί στην κατάσταση αγωγής.



Σχήμα 2.23: Στάδια λειτουργίας μετατροπέα υποβιβασμού τάσης. (Πηγή: Wikipedia)



Σχήμα 2.24: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης των στοιχείων ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης κατά τη συνεχή λειτουργία. (Πηγή: Wikipedia)

2.4.4.1 Μοντελοποίηση υπολογισμού των στοιχείων L,C του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Για να παραμείνει ο μετατροπέας σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας θα πρέπει οι εναλλαγές του διακόπτη να είναι τέτοιες, ώστε το ρεύμα στο πηνίο να μην μηδενίζεται ή να μεγιστοποιείται ποτέ. Περαιτέρω ανάλυση ξεπερνάει τα όρια της παρούσας διπλωματικής, οπότε με αντίστοιχη ανάλυση όπως εκείνη της μοντελοποίησης υπολογισμού των στοιχείων L,C του μετατροπέα ανύψωσης προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις για τις ελάχιστες τιμές L_{min} , C_{min} που μπορούν να έχουν το πηνίο και ο πυκνωτής, έτσι ώστε να παραμείνει ο μετατροπέας σε συνεχή λειτουργία:

$$L_{min_buck} = \frac{R_{max}(1-D)}{2f_s} \quad (2.77)$$

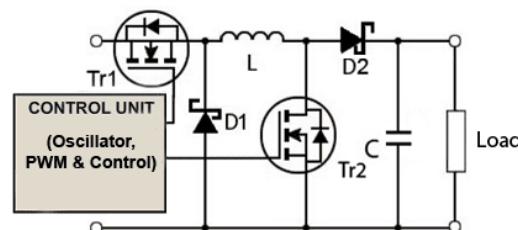
$$C_{min_buck} = \frac{D}{2f_s r_{cm}} \quad (2.78)$$

Όπου:

- $r_{cm} = \frac{V_r}{\Delta I_{max}}$
- $V_r = 0.01V_0$ (κυμάτωση τάσης 1%)
- $\Delta I_{max} = \frac{V_0(1-D)}{f_s L_{min}}$

2.4.5 Αμφίδρομος Μετατροπέας Ανύψωσης και Υποβιβασμού Τάσης

Ο αμφίδρομος μετατροπέας ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης (buck-boost converter), είναι μία διάταξη που μπορεί με την κατάλληλη παλμοδότηση να συμπεριφερθεί είτε ως μετατροπέας υποβιβασμού, είτε ως μετατροπέας ανύψωσης τάσης [11]. Το φάσμα τάσης εξόδου είναι το άθροισμα των επιμέρους φάσμάτων των μετατροπέων ανύψωσης και υποβιβασμού.

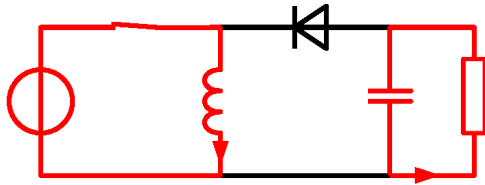


Σχήμα 2.25: Αμφίδρομος μετατροπέας ανύψωσης - υποβιβασμού τάσης. (Πηγή: *Learn About Electronics*)

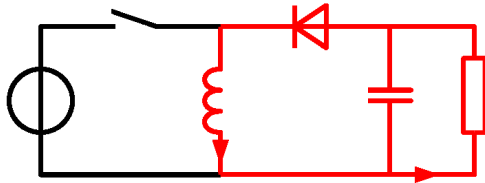
Η συνεχής λειτουργία ενός αμφίδρομου μετατροπέα είναι η εξής:

- Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός (On state), για $0 < t < DT$, η ανάστροφα πολωμένη δίοδος εμποδίζει τη διέλευση του ρεύματος, οπότε η πηγή τάσης συνδέεται σε σειρά με το πηνίο, αυξάνοντας το ρεύμα που το διαρρέει, οπότε το πηνίο αποθηκεύει μαγνητική ενέργεια. Παράλληλα, ο πυκνωτής εκφορτίζεται τροφοδοτώντας το φορτίο.
- Όταν ο διακόπτης ανοίξει (Off state), $DT < t < T$, η πηγή αποκόπτεται από το κύκλωμα και το πηνίο τροφοδοτεί, τόσο τον πυκνωτή όσο και το φορτίο.

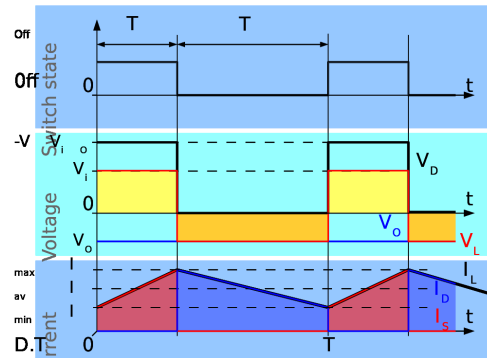
On-State



Off-State



Σχήμα 2.26: Στάδια λειτουργίας αμφίδρομου μετατροπέα. (Πηγή: Wikipedia)



Σχήμα 2.27: Κυματομορφές ρεύματος και τάσης των στοιχείων ενός αμφίδρομου μετατροπέα κατά τη συνεχή λειτουργία. (Πηγή: Wikipedia)

2.4.5.1 Μοντελοποίηση υπολογισμού των στοιχείων L,C αμφίδρομου μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης

Για την εύρεση των ελάχιστων τιμών L_{min} , C_{min} του πηνίου και του πυκνωτή, για τις οποίες ο αμφίδρομος μετατροπέας παραμένει εντός συνεχούς λειτουργίας, λαμβάνουμε τη μέγιστη τιμή των υπολογισμένων στοιχείων των επιμέρους μετατροπέων ανύψωσης και υποβιβασμού, δηλαδή για το πηνίο ισχύει η σχέση:

$$L_{min} = \max \left(L_{min_boost}, L_{min_buck} \right) \quad (2.79)$$

και για τον πυκνωτή αντίστοιχα:

$$C_{min} = \max \left(C_{min_boost}, C_{min_buck} \right) \quad (2.80)$$

Μέχρι αυτό το σημείο, έχουν αναλυθεί σε θεωρητικό στάδιο τα κυριότερα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν μετέπειτα στη μοντελοποίηση του πειράματος του υβριδικού τρένου με κυψέλες καυσίμου. Στα επόμενα κεφάλαια θα αναλυθεί το πειραματικό σκέλος της διπλωματικής, ξεκινώντας από τη μεθοδολογία της προσομοίωσης, συνεχίζοντας στην αναλύση των 3 στρατηγικών ελέγχου παρουσιάζοντας τα αντίστοιχα αποτελέσματά τους, ενώ στο τέλος θα γίνει σύγκριση μεταξύ των στρατηγικών και θα αναφερθούν τα συμπεράσματα που θα προκύψουν.

” *There are no shortcuts in evolution.* ”

Louis D.Brandeis

” *It’s hardware that makes a machine fast. It’s software that makes a fast machine slow.* ”

Craig Bruce

3

Μεθοδολογία Προσομοίωσης

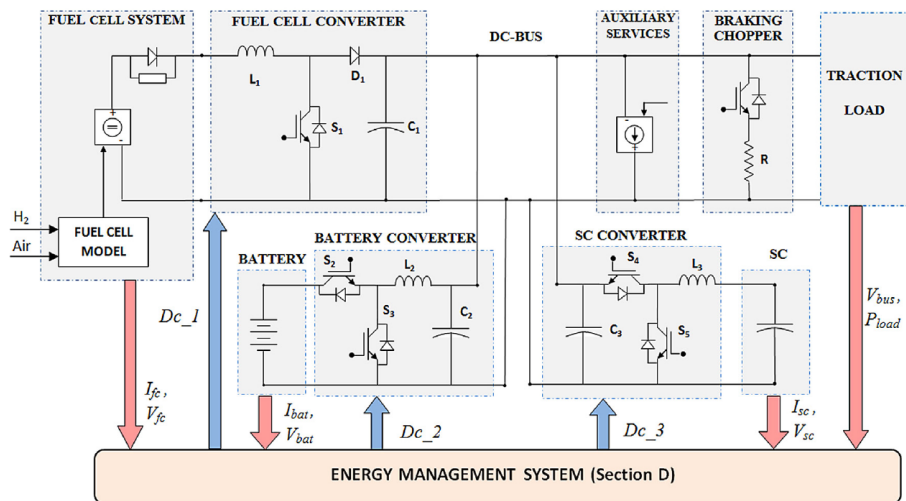
Έχοντας ήδη αναλύσει στα προηγούμενα κεφάλαια τα βασικότερα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν στη μοντελοποίηση ενός υβριδικού τρένου, σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί το μοντέλο, καθώς και οι κυριότερες παραδοχές που έχουν γίνει κατά την υλοποίησή του στο προσομοιωτικό περιβάλλον του *Simulink*. Στη συνέχεια θα δοθεί η διαστασιολόγηση των τριών πηγών μαζί με τα αντίστοιχα στοιχεία L,C των μετατροπέων τους, ενώ θα αναλυθούν σε θεωρητικό στάδιο οι τρεις διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου του συστήματος.

Σκοπός των παραπάνω αναλύσεων, είναι ο αναγνώστης να αποκτήσει την απαιτούμενη θεωρητική γνώση για τη λειτουργία του μοντέλου, έτσι ώστε να μπορεί να αντιληφθεί με ορθό τρόπο τα αποτελέσματα των τριών ελέγχων, καθώς και τη σύγκριση μεταξύ αυτών που θα ακολουθήσουν στο επόμενο κεφάλαιο. Συνολικά, η προσομοίωση των τριών διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου, γίνεται για να διαπιστωθεί κατά πόσον οι έλεγχοι αυτοί έχουν ορθή λειτουργία και μπορούν, αν υλοποιηθούν, να λύσουν το πρόβλημα της διαχείρισης των πηγών, γεγονός το οποίο θα διευκολύνει τη μετάβαση από τα ηλεκτρικά σε υβριδικά τρένα.

3.1 Διαμόρφωση μοντέλου προσομοίωσης

Το βασικό σχέδιο του μοντέλου του υβριδικού τρένου που θα προσομοιωθεί στο υπολογιστικό περιβάλλον του *Simulink* δίνεται μέσω του [13] στο σχήμα 3.1. Τα βασικά λειτουργικά στοιχεία του, όπως φαίνονται στο σχήμα 3.1 είναι τα εξής:

- *Σύστημα αποθηκευσης ενέργειας (Energy Storage System)*: Το τρένο τροφοδοτείται από 3 πηγές ενέργειας. Η κύρια πηγή θεωρείται η κυψέλη καυσίμου, οι μπαταρίες έχουν το δευτερεύοντα ρόλο της συμπλήρωσης της απαιτούμενης ενέργειας, καθώς και την κάλυψη μεταβατικών φαινομένων κατά την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση του τρένου, ενώ οι υπερπυκνωτές αναλαμβάνουν τη διατήρηση της τάσης στο φορτίο, μέσω της απορρόφησης ή της απόδοσης απότομων μεταβατικών φορτίων, τα οποία αδυνατεί να ακολουθήσει η μπαταρία.



Σχήμα 3.1: Μοντέλο υβριδικού τρένου

- Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (DC-DC Converters):** Οι μετατροπείς είναι αναγκαίοι για τη μετατροπή της παραγόμενης τάσης στη ζητούμενη μορφή, την ελαχιστοποίηση της διαστασιολόγησης των πηγών, αλλά και την εξάλειψη παρασιτικών ρευμάτων και τάσεων που αποδίδονται από τις πηγές. Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν έναν μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, ενώ οι μπαταρίες και οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούν έναν αμφίδρομο μετατροπέα ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης.
- Εξωτερικός αντιστάτης (Braking Chopper):** Ο εξωτερικός αντιστάτης παρεμβάλλεται στην περίπτωση που οι πηγές, κατά τη διάρκεια του φρεναρίσματος, δεν μπορούν να απορροφήσουν την επιπλέον ισχύ, οπότε εκείνη καταναλώνεται με τη μορφή θερμότητας.
- Δευτερεύοντα φορτία (Auxiliary Services):** Πρόκειται για τα πάγια φορτία ενός τρένου, όπως ο φωτισμός, η θέρμανση, ο κλιματισμός, τροφοδοσία οθονών ένδειξης διαδρομής, κ.α, τα οποία συμπεριλαμβάνονται στο συνολικό υπολογισμό της ζητούμενης ισχύς.
- Φορτίο Κίνησης (Traction Load):** Πρόκειται για τη βασική ζητούμενη ισχύ καθ'όλη τη διάρκεια της διαδρομής του τρένου. Για το συγκεκριμένο μοντέλο θα δοθούν τα διαγράμματα της ταχύτητας και της ζητούμενης ισχύς για το σύνολο της διαδρομής.
- Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management System):** Πρόκειται για τον εγκέφαλο του μοντέλου, γιατί διαχειρίζεται την παραγόμενη ενέργεια βάσει της ζητούμενης ισχύος, καθώς και τους περιορισμούς των τεχνικών χαρακτηριστικών των πηγών, πετυχαίνοντας τη μέγιστη δυνατή απόδοση του συστήματος ή αλλιώς την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση υδρογόνου. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τις παρακάτω 3 στατηγικές ελέγχου:

 - 1. Operation Mode Control (OMC)**
 - 2. Cascade Control (CC)**
 - 3. Fuzzy Logic Control (FLC)**

Στο προσομοιωτικό περιβάλλον του Simulink έχουν υλοποιηθεί 2 μοντέλα, το αναλυτικό και το απλοποιημένο. Το αναλυτικό περιέχει τις πηγές και τους μετατροπείς, ενώ στο απλοποιημένο αυτά έχουν αντικατασταθεί με πηγές ρεύματος και τάσης. (Οι παραδοχές που έχουν γίνει δίνονται αναλυτικά παρακάτω). Ο κύριος λόγος ύπαρξης του απλοποιημένου μοντέλου, είναι η μεγάλη ζήτηση του αναλυτικού σε υπολογιστικούς πόρους και σε χρόνο για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, οι οποίοι δεν ήταν διαθέσιμοι για να αποδοθούν. Στην παρούσα εργασία, θα αναλυθεί **μόνο** το απλοποιημένο μοντέλο.

Οι παραδοχές που έχουν γίνει κατά την υλοποίηση της προσομοίωσης είναι οι εξής:

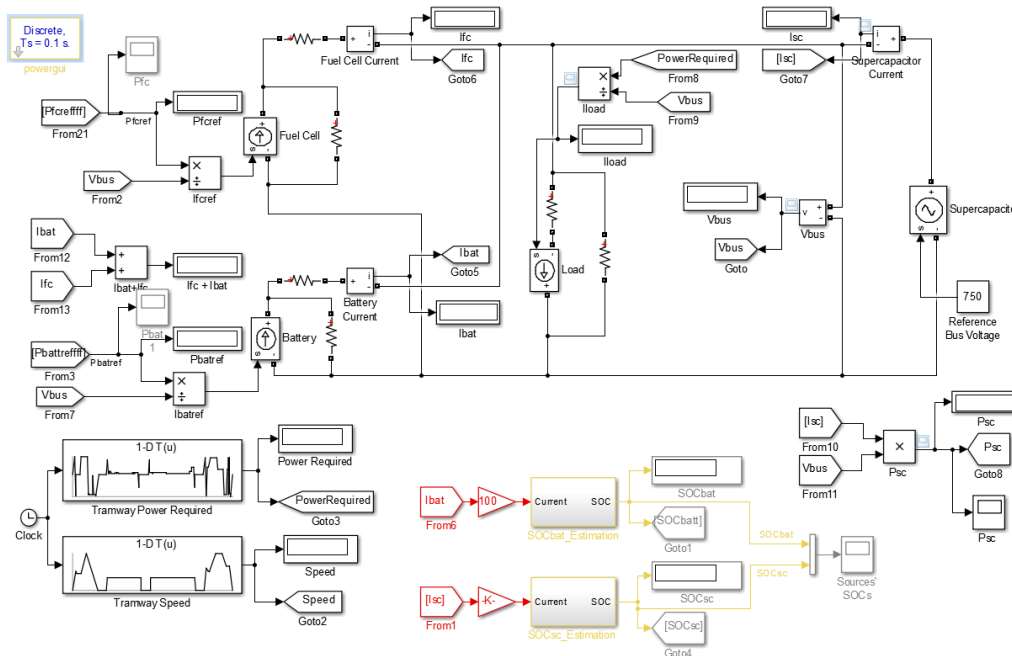
- Στο απλοποιημένο μοντέλο, η κυψέλη καυσίμου και η μπαταρία μαζί με τους αντίστοιχους μετατροπείς, έχουν αντικατασταθεί με ελεγχόμενες πηγές ρεύματος. Το ρεύμα το οποίο ακολουθούν, προέρχεται από τη διαίρεση της ισχύος αναφοράς, η οποία προκύπτει από τις στρατηγικές ελέγχου και την τάση στο φορτίο.
- Ο υπερπυκνωτής έχει αντικατασταθεί με μία ελεγχόμενη πηγή τάσης, η οποία ακολουθεί το σήμα αναφοράς τάσης που του δίνει ο χρήστης και στη συγκεκριμένη προσομοίωση η τάση στο φορτίο πρέπει να διατηρείται σταθερή στα 750 V.
- Το φορτίο έχει αντικατασταθεί με μία ελεγχόμενη πηγή ρεύματος, η οποία ακολουθεί το ρεύμα που προκύπτει από τη διαίρεση του ζητούμενου φορτίου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2 και της τάσης σ'αυτό. Η ζητούμενη ισχύς και η ταχύτητα του τρένου δίνονται στο μοντελο της προσομοίωσης μέσω look up tables. Όπως φαίνεται στο σχήμα, μέγιστη θετική ζητούμενη ισχύς είναι τα 400 kW, ενώ μέγιστη αρνητική τα -420 kW. Απότομη θετική αύξηση ισχύος σημαίνει επιτάχυνση, ενώ απότομη μείωση, σημαίνει επιβράδυνση. Σταθερή πορεία το τρένο κάνει, όταν το φορτίο κυμαίνεται στα 60 kW.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ισχύος και ταχύτητας για τον κύκλο λειτουργίας 4 διαδοχικών στάσεων νέος υβριδικού τρένου

- Για την εκτίμηση του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή έχει εισαχθεί ένα σύστημα, το οποίο έχει ως είσοδο το ρεύμα της κάθε πηγής και ως έξοδο το επίπεδο φόρτισής του.

Στο σχήμα 3.3 δίνεται το απλοποιημένο μοντέλο στο Simulink.



Σχήμα 3.3: Απλοποιημένο Μοντέλο στο Simulink.

Παρόλο που στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μόνο το απλοποιημένο μοντέλο, όπου η κυψέλη καυσίμου, η μπαταρία, ο υπερπυκνωτής, καθώς και οι μετατροπείς έχουν αντικατασταθεί από ισοδύναμες πηγές ρεύματος και τάσης, κρίνεται χρήσιμο για την ολοκλήρωση της θεωρητικής ανάλυσης της προσομοίωσης να παρουσιαστεί η διαστασιολόγηση των πηγών και των στοιχείων των L,C, όπως αυτή υπολογίστηκε για το αναλυτικό μοντέλο.

3.1.1 Διαστασιολόγηση πηγών και των αντίστοιχων μετατροπών

Το μοντέλο υβριδικού τρένου που θα μελετηθεί [13], αφορά μία υβριδική αμαξοστοιχία στη Σαραγόσα της Ισπανίας, με όνομα *Urbos 3*, της οποίας η συνολική διαδρομή περιλαμβάνει 4 στάσεις, συνολικής απόστασης 12.8 χιλιομέτρων, ενώ έχει μέγιστη ταχύτητα τα 50 km/h και χωρητικότητα 275 θέσεων. Για την ορθή ενεργειακή διαστασιολόγηση του τρένου, θα πρέπει να εισαχθεί ο όρος "Βαθμός Υβριδοποίησης" (Degree of Hybridization – DOH). Ο Βαθμός Υβριδοποίησης, $0 \leq DOH \leq 1$, μετράει το ποσοστό της ισχύος των κυψελών καυσίμου του τρένου σε σχέση με τη συνολική παρεχόμενη ισχύ και από τις 3 πηγές. Προκύπτουν λοιπόν οι εξής περιπτώσεις:

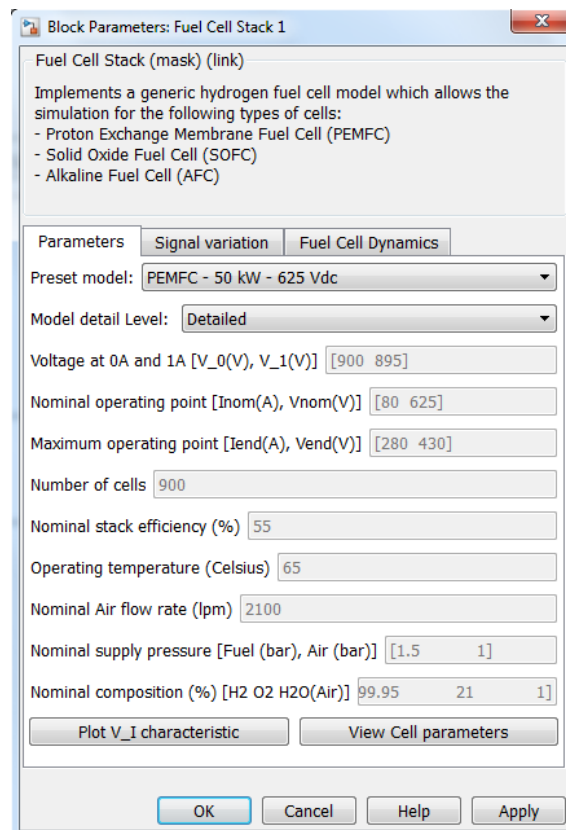
- Αν η τιμή είναι 1, τότε το τρένο θεωρείται αμοιγώς τρένο υδρογόνου. Όσο υψηλότερος είναι ο βαθμός, τόσο μικρότερο θα είναι το μέγεθος του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage System), αλλά ταυτόχρονα θα υπάρχει μεγαλύτερη κατανάλωση υδρογόνου, λόγω της μειούμενης αποθηκευόμενης ενέργειας.

- Αν η τιμή είναι 0, τότε το τρένο θεωρείται αμοιγώς ηλεκτρικό. Όσο χαμηλότερος είναι ο βαθμός, τόσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, παράλληλα όμως ελαχιστοποιείται η κατανάλωση υδρογόνου και μαζί με αυτή το κόστος του συνολικού τρένου.

Στην προκειμένη περίπτωση ο βαθμός υβριδοποίησης είναι σχεδόν $DOH = 0.5$, δηλαδή πρόκειται για ένα ηλεκτρικό τρένο με μεγάλη υποβοήθηση από τις κυψέλες καυσίμου. Έχοντας επιλέξει το βαθμό υβριδοποίησης, σειρά έχει η επιλογή της διαστασιολόγησης των πηγών.

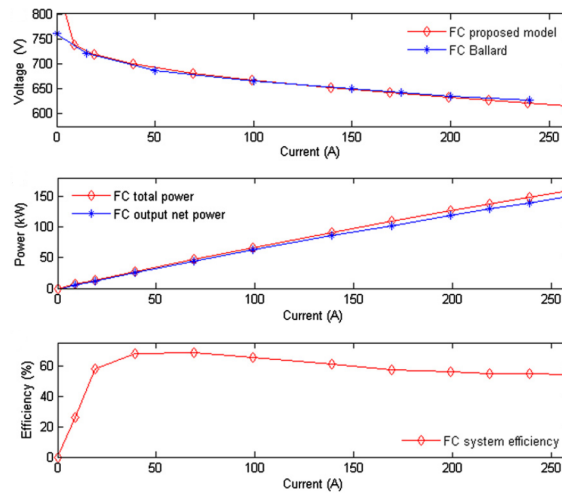
3.1.1.1 Κυψέλη Καυσίμου

Η βασική επιλογή για την κυψέλη καυσίμου του υπό μελέτη υβριδικού τρένου είναι μία κυψέλη των $150\text{ kW} - 621\text{ V}$ *Ballard's Heavy-Duty PEM FC Module* [14]. Κατ'αρχήν, ανάμεσα σε άλλους τύπους κυψελών καυσίμου επιλέχτηκε μία PEM (Proton Exchange Membrane), λόγω της υψηλής πυκνότητας ισχύος της, της ειδικής ισχύος, της χαμηλής θερμοκρασίας κατά τη λειτουργία της, της υψηλής απόδοσής της, της μακροζωίας της και της σχετικής ικανότητας να "ακολουθεί" τις γρήγορες μεταβολές στο φορτίο. Τέλος, τα περιφερειακά του συστήματος αυτού (κομπρέσορας, δεξαμενές ανθρακονημάτων, αφυγραντήρες, ψύχτρες), έχουν συνεχώς μειούμενο κόστος, καθιστώντας τελικώς την επιλογή αρκετά ανταγωνιστική. Για την προσομοίωση της παραπάνω κυψέλης, επιλέχτηκε στο *Simulink* ένα σύστημα από 3 κυψέλες καυσίμου των $50\text{ kW} - 625\text{ V}_{dc}$ συνδεδεμένες παράλληλα. Κάθε μία από τις 3 κυψέλες καυσίμου, έχει τις εξής τιμές:



Σχήμα 3.4: Παραμετροποίηση τιμών κυψέλης καυσίμου στο Simulink.

Ενώ οι καμπύλες Τάσης, Ισχύος και Απόδοσης της πραγματικής κυψέλης συναρτήσει του ρεύματος, δίνονται στο σχήμα 3.5:



Σχήμα 3.5: Καμπύλες Τάσης, Ισχύος και Απόδοσης κυψέλης καυσίμου 150 kW – 621 V Ballard's Heavy – Duty PEM FC Module.

3.1.1.2 Υπολογισμός στοιχείων L,C μετατροπέα κυψέλης καυσίμου

Η παραγόμενη τάση της κυψέλης είναι 625 V, ενώ η τάση στο φορτίο θα πρέπει να είναι 750 V. Για τον λόγο αυτό θα χρησιμοποιηθεί ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης, με συχνότητα λειτουργίας $f_s = 20 \text{ kHz}$, του οποίου τα στοιχεία L,C υπολογίζονται ως εξής [19]:

- Υπολογισμός τιμής πηνίου:

Η θεωρητικά μέγιστη προσφερόμενη ισχύς των κυψελών καυσίμου είναι $P_{max} = 150 \text{ kW}$, ενώ η τάση εξόδου του μετατροπέα θα είναι $V_{out_fc} = 750 \text{ V}$. Επομένως, το μέγιστο καθώς και το ελάχιστο ρεύμα εξόδου του μετατροπέα είναι το εξής:

$$I_{max_fc} = \frac{P_{max_fc}}{V_{out_fc}} = \frac{150 \times 10^3}{750} = 200 \text{ A} \quad I_{min_fc} = 0.05 \times I_{max_fc} = 10 \text{ A} \quad (3.1)$$

Η μέγιστη και η ελάχιστη αντίσταση δίνονται από τις εξής σχέσεις:

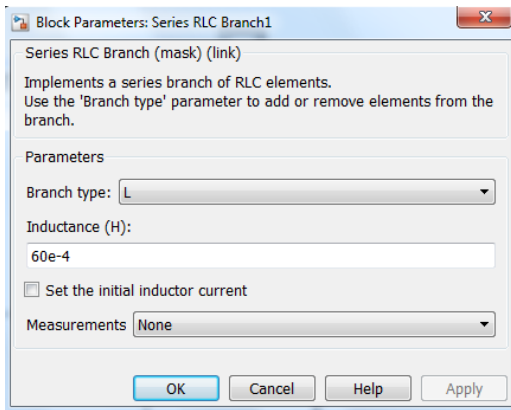
$$R_{max_L} = \frac{V_{out}}{I_{min_fc}} = \frac{750}{10} = 75 \Omega \quad R_{min_L} = \frac{V_{out}}{I_{max_fc}} = \frac{750}{200} = 3.75 \Omega \quad (3.2)$$

Γνωρίζοντας τις τάσεις εισόδου και εξόδου του μετατροπέα, υπολογίζεται ο λόγος κατάταμής του ως εξής:

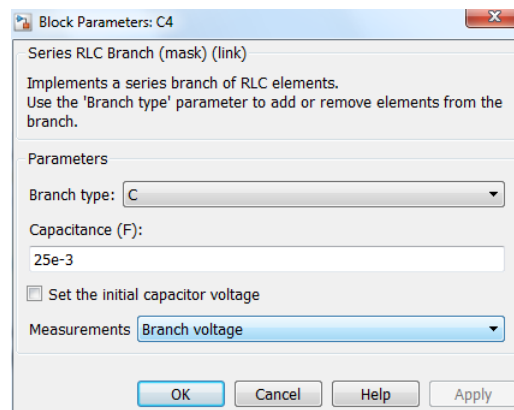
$$D_{min} = 1 - \frac{625}{750} \approx 0.17 \quad (3.3)$$

$$D_{nom} = 1 - \frac{600}{750} = 0.2 \quad (3.4)$$

$$D_{max} = 1 - \frac{525}{750} = 0.3 \quad (3.5)$$



Σχήμα 3.6: Επιλογή τιμής πηνίου για το μετατροπέα κυψέλης καυσίμου στο Simulink.



Σχήμα 3.7: Επιλογή τιμής πυκνωτή για το μετατροπέα κυψέλης καυσίμου στο Simulink.

Οι παραπάνω τιμές είναι αποδεκτές, καθώς $0 < D < 1$, όμως για να έχουμε συνεχή λειτουργία του μετατροπέα, θα πρέπει $D > 1/3$, οπότε επιλέγουμε $D = 0.4$. Η ελάχιστη τιμή του πηνίου για συνεχή λειτουργία είναι:

$$L_{min_fc} = \frac{R_{max_L} \times D(1 - D)^2}{2f_s} = \frac{75 \times 0.4 \times 0.36}{2 \times 15 \times 10^3} = 3.6 \times 10^{-4} H = 0.36 mH \quad (3.6)$$

- Υπολογισμός τιμής πυκνωτή:

Για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής του πυκνωτή, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η κυμάτωση της τάσης εξόδου, δηλαδή: $V_{cnp} = V_r - V_{rcnp} = 3.75 V$, όπου: $V_r = 0.01 \times V_{out} = 7.5 V$ και $V_{rcnp} = \frac{V_r}{2} = 3.75$. Με βάση τα παραπάνω, η ελάχιστη τιμή του πυκνωτή είναι:

$$C_{min_fc} = \frac{V_{out} \times D}{V_{cnp} \times f_s \times R_{min_L}} = \frac{750 \times 0.4}{15 \times 10^3 \times 3.75 \times 3.75} \approx 1.4 mF \quad (3.7)$$

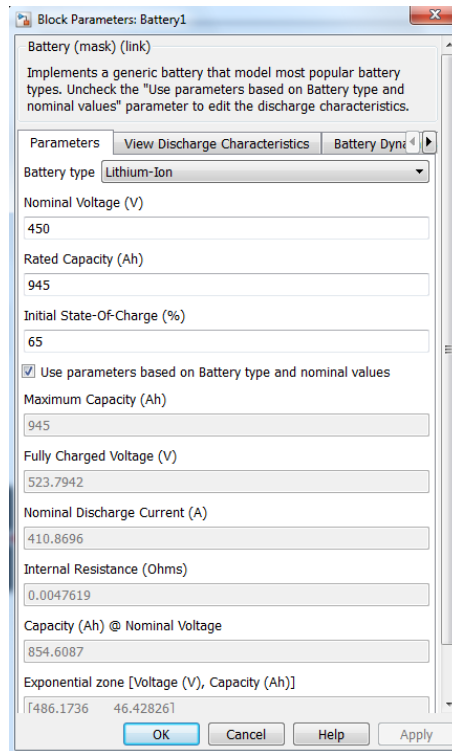
Στα σχήματα 3.6 και 3.7 δίνονται οι επιλεγθείσες τιμές L και C για το μοντέλο της προσομοίωσης στο Simulink.

3.1.1.3 Μπαταρία

Για τη διαστασιολόγηση του υβριδικού τρένου *Urbos 3*, επιλέχθηκε μία συστοιχία 340 μπαταριών, τύπου 90 Ah, 4.25 V *Thundersky's Li-ion Batteries* συνδεδεμένες σε σειρά [15]. Για το μοντέλο του Simulink, η μπαταρία που επιλέχθηκε βάσει των ακόλουθων τεχνικών περιορισμών:

- Μέγιστη απορροφούμενη ισχύς: $P_{bat_char}^{max} = -400 kW$,
- Μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς: $P_{bat_disc}^{max} = 425 kW$,
- Μέγιστο ρεύμα φόρτισης: $I_{bat_char}^{max} = -500 A$,
- Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης: $I_{bat_disc}^{max} = 460 A$

όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.8 έχει ονομαστική τάση τα 450 V και χωρητικότητα $C = \frac{P_{bat}^{max}}{V_{nom}} = \frac{425 \times 10^3}{450} = 945 Ah$:



Σχήμα 3.8: Παραμετροποίηση τιμών μπαταρίας στο Simulink.

3.1.1.4 Υπολογισμός στοιχείων L,C αμφίδρομου μετατροπέα μπαταρίας

Για τον υπολογισμό των ελάχιστων τιμών L,C ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία, όπου πρώτα υπολογίζονται οι τιμές για κάθε μετατροπέα ξεχωριστά και στο τέλος λαμβάνονται οι μέγιστες τιμές για τα L,C [19].

1. Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης - Boost Converter

- Υπολογισμός τιμής πηνίου:

Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή ρεύματος εξόδου του μετατροπέα είναι:

$$I_{max_bat} = \frac{P_{max_bat}}{V_{out_bat}} = \frac{425 \times 10^3}{750} \approx 567A \quad I_{min_bat} = 0.05 \times I_{max_bat} \approx 28.3A \quad (3.8)$$

Η μέγιστη και η ελάχιστη αντίσταση δίνονται απ'τις σχέσεις:

$$R_{max_L} = \frac{V_{out}}{I_{min_bat}} = \frac{750}{28.3} = 26.47\Omega \quad R_{min_L} = \frac{V_{out}}{I_{max_bat}} = \frac{750}{567} \approx 1.32\Omega \quad (3.9)$$

Γνωρίζοντας τις τάσεις εισόδου και εξόδου του μετατροπέα, υπολογίζεται ο λόγος κατάτησής του ως εξής:

$$D_{min} = 1 - \frac{523}{750} \approx 0.3 \quad (3.10)$$

$$D_{nom} = 1 - \frac{450}{750} = 0.4 \quad (3.11)$$

$$D_{max} = 1 - \frac{350}{750} \approx 0.53 \quad (3.12)$$

Οι τιμές είναι αποδεκτές, καθώς $0 < D < 1$, όμως για να έχουμε συνεχή λειτουργία του μετατροπέα, θα πρέπει $D > 1/3$, οπότε επιλέγουμε $D = 0.4$. Η ελάχιστη τιμή του πηνίου για συνεχή λειτουργία είναι η εξής:

$$L_{min_bat}^{boost} = \frac{R_{max_L} \times D(1-D)^2}{2f_s} = \frac{26.47 \times 0.4 \times 0.36}{2 \times 15 \times 10^3} = 0.127 \text{ mH} \quad (3.13)$$

- Υπολογισμός τιμής πυκνωτή:

Αρχικά υπολογίζεται η τάση κυμάτωσης του πυκνωτή εξόδου: $V_{cpp} = V_r - V_{rcpp} = 0.01 \times V_{out} - \frac{V_r}{2} = 3.75 \text{ V}$. Η ελάχιστη τιμή του πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

$$C_{min_bat}^{boost} = \frac{V_{out} \times D}{V_{cpp} \times f_s \times R_{min_L}} = \frac{750 \times 0.4}{15 \times 10^3 \times 3.75 \times 1.32} \approx 4 \text{ mF} \quad (3.14)$$

2. Μετατροπέας Υποβιβασμού Τάσης - Buck Converter

- Υπολογισμός τιμής πηνίου:

Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή ρεύματος εξόδου του μετατροπέα είναι:

$$I_{max_bat} = \frac{P_{max_bat}}{V_{in_bat}} = \frac{425 \times 10^3}{450} \approx 944 \text{ A} \quad I_{min_bat} = 0.05 \times I_{max_bat} \approx 47.2 \text{ A} \quad (3.15)$$

Η μέγιστη και η ελάχιστη αντίσταση δίνονται απ' τις σχέσεις:

$$R_{max_L} = \frac{V_{in_bat}}{I_{min_bat}} = \frac{450}{47.2} \approx 9.53 \Omega \quad R_{min_L} = \frac{V_{in}}{I_{max_bat}} = \frac{450}{944} \approx 0.48 \Omega \quad (3.16)$$

Για τον λόγο κατάτμησης του μετατροπέα ισχύει ότι $M_{Vdc} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_{low}}{V_{high}} = \frac{450}{750} = 0.6$. Οπότε $D = \frac{M_{Vdc}}{0.95} \approx 0.63$. Οι τιμές είναι αποδεκτές, καθώς $0 < D < 1$, όμως για να έχουμε συνεχή λειτουργία του μετατροπέα, θα πρέπει $D > 1/3$, οπότε επιλέγουμε $D = 0.63$. Η ελάχιστη τιμή του πηνίου για συνεχή λειτουργία είναι η εξής:

$$L_{min_bat}^{buck} = \frac{R_{max_L} \times (1-D)}{2f_s} = 0.118 \text{ mH} \quad (3.17)$$

- Υπολογισμός τιμής πυκνωτή:

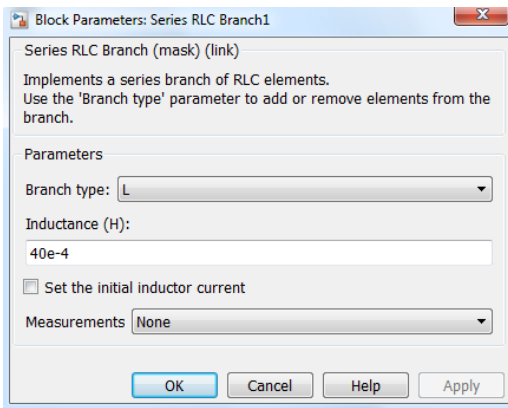
Για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής πυκνωτή, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η κυμάτωση τάσης πυκνωτή εξόδου, δηλαδή: $V_r = 0.01 \times V_{out} = 4.5 \text{ V}$ και $\Delta I_{max} = \frac{V_{out} \times (1-D)}{f_s L_{min_bat}^{buck}} = 94.43$, $r_{cm} = \frac{V_r}{\Delta I_{max}} \approx 0.048 \Omega$. Η ελάχιστη τιμή του πυκνωτή για αυτόν τον μετατροπέα θα είναι :

$$C_{min_bat}^{buck} = \frac{D}{2f_s r_{cm}} \approx 0.44 \text{ mF} \quad (3.18)$$

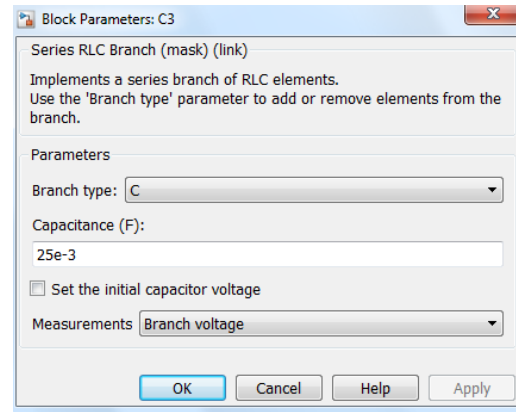
Οι τελικές τιμές L,C δίνονται παρακάτω και οι επιλεγθείσες τιμές του μοντέλου στο Simulink φαίνονται στα σχήματα 3.9 και 3.10:

$$L_{min} = \max\left(L_{min_bat}^{boost}, L_{min_bat}^{buck}\right) = \max(0.127 \text{ mH}, 0.118 \text{ mH}) = 0.127 \text{ mH} \quad (3.19)$$

$$C_{min} = \max\left(C_{min_bat}^{boost}, C_{min_bat}^{buck}\right) = \max(4 \text{ mF}, 0.44 \text{ mF}) = 4 \text{ mF} \quad (3.20)$$



Σχήμα 3.9: Επιλογή τιμής πηνίου για το μετατροπέα μπαταρίας στο Simulink.



Σχήμα 3.10: Επιλογή τιμής πυκνωτή για το μετατροπέα μπαταρίας στο Simulink.

3.1.1.5 Υπερπυκνωτής

Η ολοκλήρωση της διαστασιολόγησης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας του υβριδικού τρένου *Urbos 3* γίνεται με την επιλογή μίας συστοιχίας 5 υπερπυκνωτών, τύπου *63 F, 125 V Maxwell's BMOD0063 – P125 UC modules* συνδεδεμένες σε σειρά [16]. Για το μοντέλο του Simulink, ο υπερπυκνωτής επιλέχθηκε βάσει των ακόλουθων τεχνικών περιορισμών:

- Μέγιστη απορροφούμενη ισχύς : $P_{scchar}^{max} = -175 \text{ kW}$,
- Μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς: $P_{scdisc}^{max} = 175 \text{ kW}$,
- Μέγιστο ρεύμα φόρτισης: $I_{scchar}^{max} = -400 \text{ A}$,
- Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης: $I_{scdisc}^{max} = 400 \text{ A}$

Στο σχήμα 3.11 φαίνεται η παραμετροποίηση των τιμών του υπερπυκνωτή για το μοντέλο του Simulink:

3.1.1.6 Υπολογισμός στοιχείων L,C αμφίδρομου μετατροπέα υπερπυκνωτή

Για τον υπολογισμό των ελάχιστων τιμών L,C ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία, όπου πρώτα υπολογίζονται οι τιμές για κάθε μετατροπέα ξεχωριστά και στο τέλος λαμβάνονται οι μέγιστες τιμές για τα L,C [19].

1. Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης - Boost Converter

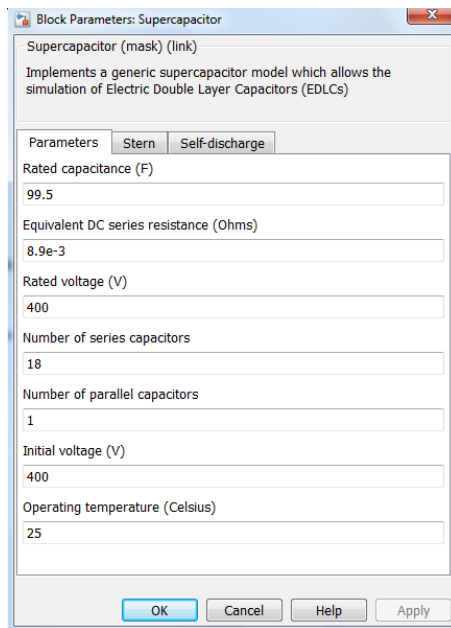
- Υπολογισμός τιμής πηνίου:

Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή ρεύματος εξόδου του μετατροπέα είναι:

$$I_{max_sc} = \frac{P_{max_sc}}{V_{out_sc}} = \frac{175 \times 10^3}{750} \approx 233 \text{ A} \quad I_{min_sc} = 0.05 \times I_{max_sc} \approx 11.7 \text{ A} \quad (3.21)$$

Η μέγιστη και η ελάχιστη αντίσταση δίνονται απ'τις σχέσεις:

$$R_{max_L} = \frac{V_{out}}{I_{min_sc}} = \frac{750}{11.7} = 64.3 \Omega \quad R_{min_L} = \frac{V_{out}}{I_{max_sc}} = \frac{750}{233} \approx 3.2 \Omega \quad (3.22)$$



Σχήμα 3.11: Παραμετροποίηση τιμών υπερπυκνωτή στο Simulink.

Γνωρίζοντας τις τάσεις εισόδου και εξόδου του μετατροπέα, υπολογίζεται ο λόγος κατάτησής του ως εξής:

$$D_{min} = 1 - \frac{450}{750} \approx 0.4 \quad (3.23)$$

$$D_{nom} = 1 - \frac{400}{750} = 0.47 \quad (3.24)$$

$$D_{max} = 1 - \frac{350}{750} \approx 0.53 \quad (3.25)$$

Οι τιμές είναι αποδεκτές, καθώς $0 < D < 1$, όμως για να έχουμε συνεχή λειτουργία του μετατροπέα, θα πρέπει $D > 1/3$, οπότε επιλέγουμε $D = 0.4$. Η ελάχιστη τιμή του πηνίου για συνεχή λειτουργία είναι η εξής:

$$L_{min_sc}^{boost} = \frac{R_{max_L} \times D(1-D)^2}{2f_s} = \frac{64.3 \times 0.4 \times 0.36}{2 \times 15 \times 10^3} = 0.308 \text{ mH} \quad (3.26)$$

- Υπολογισμός τιμής πυκνωτή:

Αρχικά υπολογίζεται η τάση κυμάτωσης του πυκνωτή εξόδου: $V_{cpp} = V_r - V_{rcpp} = 0.01 \times V_{out} - \frac{V_r}{2} = 3.75 \text{ V}$. Η ελάχιστη τιμή του πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

$$C_{min_sc}^{boost} = \frac{V_{out} \times D}{V_{cpp} \times f_s \times R_{min_L}} = \frac{750 \times 0.4}{15 \times 10^3 \times 3.75 \times 3.2} \approx 1.67 \text{ mF} \quad (3.27)$$

2. Μετατροπέας Υποβιβασμού Τάσης - Buck Converter

- Υπολογισμός τιμής πηνίου:

Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή ρεύματος εξόδου του μετατροπέα είναι:

$$I_{max_sc} = \frac{P_{max_sc}}{V_{in_sc}} = \frac{175 \times 10^3}{400} \approx 438 \text{ A} \quad I_{min_sc} = 0.05 \times I_{max_sc} \approx 21.9 \text{ A} \quad (3.28)$$

Η μέγιστη και η ελάχιστη αντίσταση δίνονται απ'τις σχέσεις:

$$R_{max_L} = \frac{V_{in_sc}}{I_{min_sc}} = \frac{400}{21.9} \approx 18.3\Omega \quad R_{min_L} = \frac{V_{in}}{I_{max_sc}} = \frac{400}{944} \approx 0.91\Omega \quad (3.29)$$

Για τον λόγο κατάτμησης του μετατροπέα ισχύει ότι $M_{Vdc} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_{low}}{V_{high}} = \frac{400}{750} = 0.53$. Οπότε $D = \frac{M_{Vdc}}{0.95} \approx 0.56$. Οι τιμές είναι αποδεκτές, καθώς $0 < D < 1$, όμως για να έχουμε συνεχή λειτουργία του μετατροπέα, θα πρέπει $D > 1/3$, οπότε επιλέγουμε $D = 0.56$. Η ελάχιστη τιμή του πηνίου για συνεχή λειτουργία είναι η εξής:

$$L_{min_sc}^{buck} = \frac{R_{max_L} \times (1 - D)}{2f_s} = 0.27 \text{ mH} \quad (3.30)$$

- Υπολογισμός τιμής πυκνωτή:

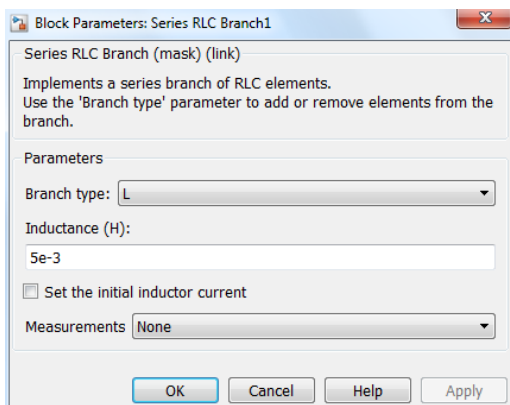
Για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής πυκνωτή, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η κυμάτωση τάσης πυκνωτή εξόδου, δηλαδή: $V_r = 0.01 \times V_{out} = 4 \text{ V}$ και $\Delta I_{max} = \frac{V_{out} \times (1-D)}{f_s L_{min_sc}^{buck}} = 43.85$, $r_{cm} = \frac{V_r}{\Delta I_{max}} = 0.0912 \Omega$. Η ελάχιστη τιμή του πυκνωτή για αυτόν τον μετατροπέα θα είναι :

$$C_{min_sc}^{buck} = \frac{D}{2f_s r_{cm}} \approx 0.2 \text{ mF} \quad (3.31)$$

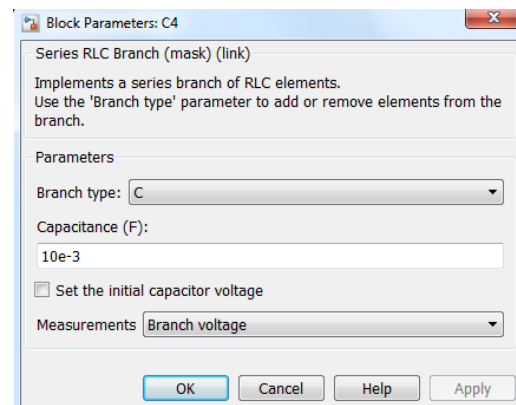
Οι τελικές τιμές L,C δίνονται παρακάτω και οι επιλεγθείσες τιμές του μοντέλου στο Simulink φαίνονται στα σχήματα 3.12 και 3.13:

$$L_{min} = \max\left(L_{min_bat}^{boost}, L_{min_bat}^{buck}\right) = \max(0.308 \text{ mH}, 0.27 \text{ mH}) = 0.308 \text{ mH} \quad (3.32)$$

$$C_{min} = \max\left(C_{min_bat}^{boost}, C_{min_bat}^{buck}\right) = \max(1.67 \text{ mF}, 0.2 \text{ mF}) = 1.67 \text{ mF} \quad (3.33)$$



Σχήμα 3.12: Επιλογή τιμής πηνίου για το μετατροπέα υπερπυκνωτή στο Simulink.



Σχήμα 3.13: Επιλογή τιμής πυκνωτή για το μετατροπέα υπερπυκνωτή στο Simulink.

3.1.2 Ανάλυση στρατηγικών ελέγχου

Οι στρατηγικές ελέγχου, όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, διαχειρίζονται τις πηγές τηρώντας τους τεχνικούς περιορισμούς τους, οι οποίοι δίνονται συγκεντρωτικά στο σχήμα 3.14, ούτως ώστε να παρέχεται με απρόσκοπτο τρόπο η ζητούμενη ισχύς στο φορτίο. Συνολικά, έχουν υλοποιηθεί τρεις στρατηγικές ελέγχου,

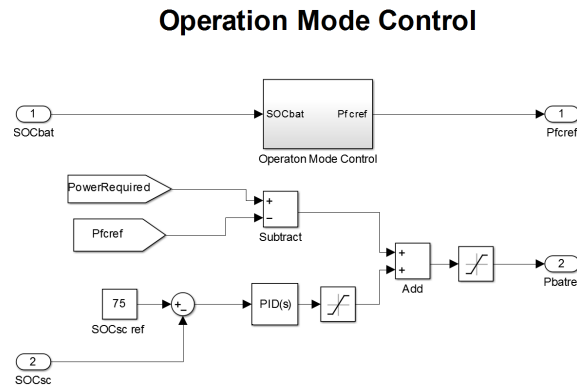
Parameter	Value	Parameter	Value
P_{fc}^{max}	145 kW	$I_{sc, char}$	-400 A
P_{fc}^{min}	12.5 kW	SOC_{bat}^{ref}	65%
$P_{bat, char}^{max}$	400 kW	SOC_{sc}^{ref}	75%
$P_{bat, disc}^{max}$	-425 kW	V_{bus}^{ref}	750 V
P_{aux}	57.47 kW	P_{extra}	270 kW
P_{fc}^{eff}	65 kW	ΔP_{fc}	60 kW/s
$I_{bat, disc}$	460 A	τ_{bat}	0.3 s
$I_{bat, char}$	-500 A	τ_{fc}	0.5 s
$I_{sc, disc}$	400 A	τ_{sc}	0 s

Σχήμα 3.14: Τεχνικοί περιορισμοί πηγών.

κάθε μία εξ'αυτών έχει ως εισόδους το ζητούμενο φορτίο, που δίνεται ως διάγραμμα ισχύος στο σχήμα 3.2, καθώς και το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή (SOC_{bat} , SOC_{sc}), ενώ ως έξοδο, παράγουν τις ιδανικές τιμές ισχύος για τις 3 πηγές ξεχωριστά (P_{fc}^{opt} , P_{bat}^{opt} , P_{sc}^{opt}). Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά κάθε μία εκ των τριών στρατηγικών.

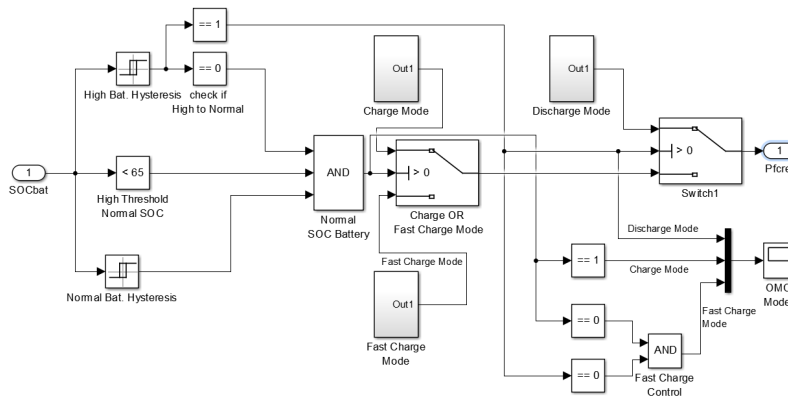
3.1.2.1 Operation Mode Control - OMC

Το μοντέλο της στρατηγικής του OMC στο Simulink απεικονίζεται στο σχήμα 3.15, ενώ ακολούθως αναλύεται η λειτουργία της, παραθέτοντας κάθε φορά τα αντίστοιχα μοντέλα στο Simulink [17]. Ουσιαστικά, ο έλεγχος αυτός παράγει τις τιμές αναφοράς ισχύος για τις τρεις πηγές, χρησιμοποιώντας ως κύριο κριτήριο το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας.



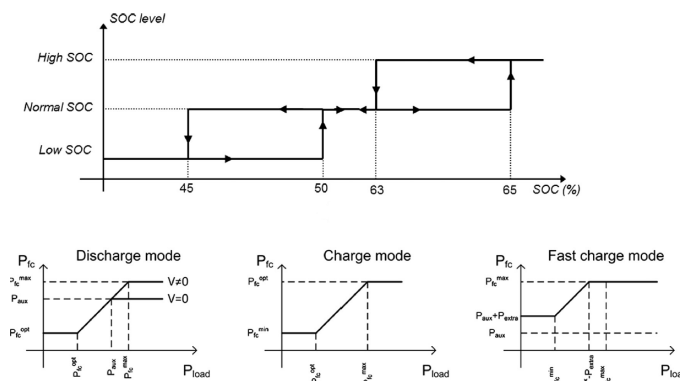
Σχήμα 3.15: Μοντέλο της στρατηγικής OMC στο Simulink.

1. Αρχικά, λαμβάνεται η τιμή του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας (SOC_{bat}), η οποία τροφοδοτείται στον "πυρήνα" της λήψης αποφάσεων του ελέγχου, το περιεχόμενο του οποίου φαίνεται στο σχήμα 3.16. Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας έχει κωδικοποιηθεί σε 3 βαθμίδες, την *Υψηλή*, την *Φυσιολογική* και την *Χαμηλή*. Η εναλλαγή ανάμεσα στις 3 βαθμίδες γίνεται μέσω κύκλων υστέρησης,



Σχήμα 3.16: Ο πυρήνας ελέγχου της στρατηγικής OMC

οι οποίοι φαίνονται στο διάγραμμα 3.17 και ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας, πυροδοτείται κάθε φορά μία εκ των ακόλουθων τριών λειτουργιών: *Εκφόρτιση*, *Φόρτιση*, *Γρήγορη Φόρτιση*.

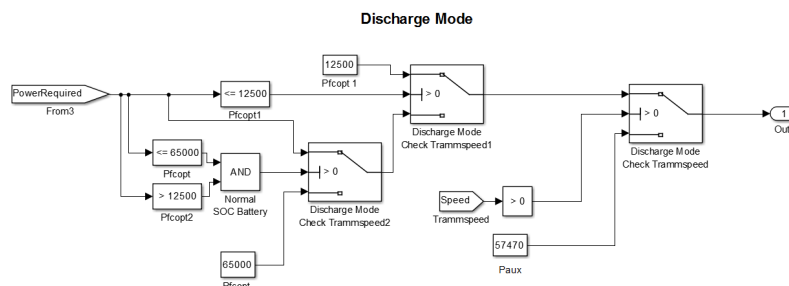


Σχήμα 3.17: Κύκλοι υστέρησης για τον καθορισμό του SOC_{bat}

- **Λειτουργία Εκφόρτισης:** Επιλέγεται όταν το επίπεδο της μπαταρίας είναι *Υψηλό*. Στην περίπτωση που το τρένο κινείται, η αποδιδόμενη ισχύς της κυψέλης προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του φορτίου, τηρώντας τα παρακάτω όρια λειτουργίας:

$$P_{fc}^{min} \leq P_{fc}^{opt} \leq P_{fc}^{nom} \text{ or } P_{aux} \rightarrow 12.5kW \leq P_{fc}^{opt} \leq 65kW \text{ or } 57.47kW \quad (3.34)$$

Στην περίπτωση που το τρένο βρίσκεται εν στάσει, η κυψέλη καυσίμου,



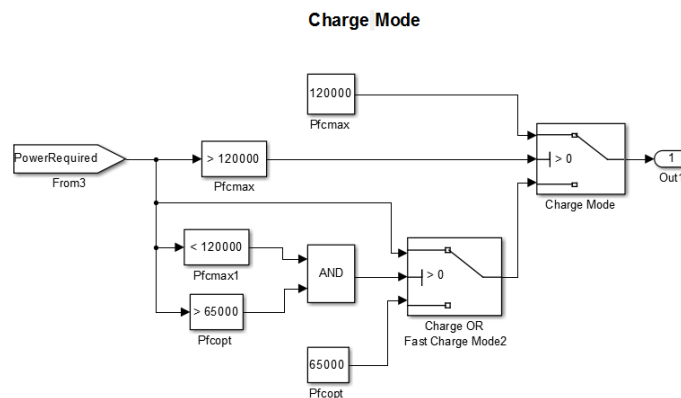
Σχήμα 3.18: Λειτουργία Εκφόρτισης στο Simulink.

παρέχει την ισχύ του δευτερεύοντος φορτίου $P_{aux} = 57.47kW$.

- **Λειτουργία Φόρτισης:** Επιλέγεται όταν το επίπεδο της μπαταρίας είναι *Φυσιολογικό*. Η αποδιδόμενη ισχύς της κυψέλης προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του φορτίου, τηρώντας τα παρακάτω όρια λειτουργίας:

$$P_{fc}^{nom} \leq P_{fc}^{opt} \leq P_{fc}^{max} \rightarrow 65kW \leq P_{fc}^{opt} \leq 145kW \quad (3.35)$$

Στην περίπτωση που το ζητούμενο φορτίο είναι μικρότερο από P_{fc}^{opt} , τότε η υπολειπόμενη ισχύς της κυψέλης χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της μπαταρίας, οδηγώντας τελικά σε αύξηση του SOC_{bat} . Στην περίπτωση όμως που το φορτίο είναι μεγαλύτερο από τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ της κυψέλης (P_{fc}^{max}), η ζήτηση καλύπτεται από τη μπαταρία, οπότε εκείνη εκφορτίζεται και το SOC_{bat} μειώνεται.

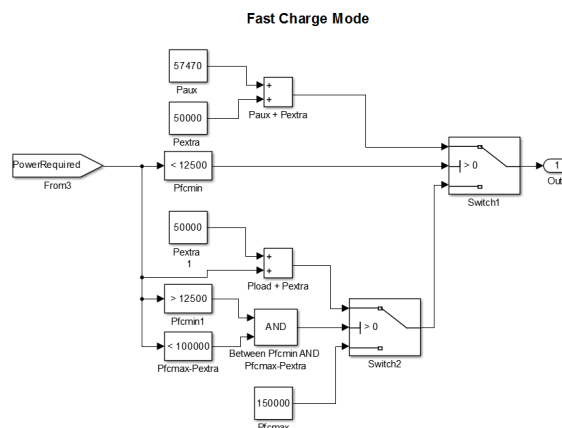


Σχήμα 3.19: Λειτουργία Φόρτισης στο Simulink.

- **Λειτουργία Γρήγορης Φόρτισης:** Επιλέγεται όταν το επίπεδο της μπαταρίας είναι *Χαμηλό*. Η αποδιδόμενη ισχύς της κυψέλης προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του φορτίου, τηρώντας τα παρακάτω όρια λειτουργίας:

$$P_{fc}^{opt} = P_{fc}^{max} \rightarrow P_{fc}^{opt} = 145kW \quad (3.36)$$

Στην περίπτωση που το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι πολύ χα-



Σχήμα 3.20: Λειτουργία Γρήγορης Φόρτισης στο Simulink.

μηλό και το τρένο βρίσκεται εν στάσει, η κυψέλη καλύπτει το δευτερεύον φορτίο P_{aux} και με την υπολειπόμενη ισχύ $P_{fc}^{max} - P_{aux}$ καλύπτει την φόρτιση της μπαταρίας.

3.1 Διαμόρφωση μοντέλου προσομοίωσης

2. Στη συνέχεια, η ιδανική τιμή ισχύος κυψέλης καυσίμου αφαιρείται από το συνολικά ζητούμενο φορτίο για να προκύψει η τιμή αναφοράς ισχύος για τη μπαταρία. Η τιμή αυτή προστίθεται στο σήμα ισχύος που προκύπτει από τη διατήρηση του επίπεδου φόρτισης του υπερπυκνωτή και η τελική τιμή που προκύπτει είναι η ιδανική ισχύς της μπαταρίας, η οποία τροφοδοτείται στο μετατροπέα, τηρώντας τον ακόλουθο ενεργειακό περιορισμό:

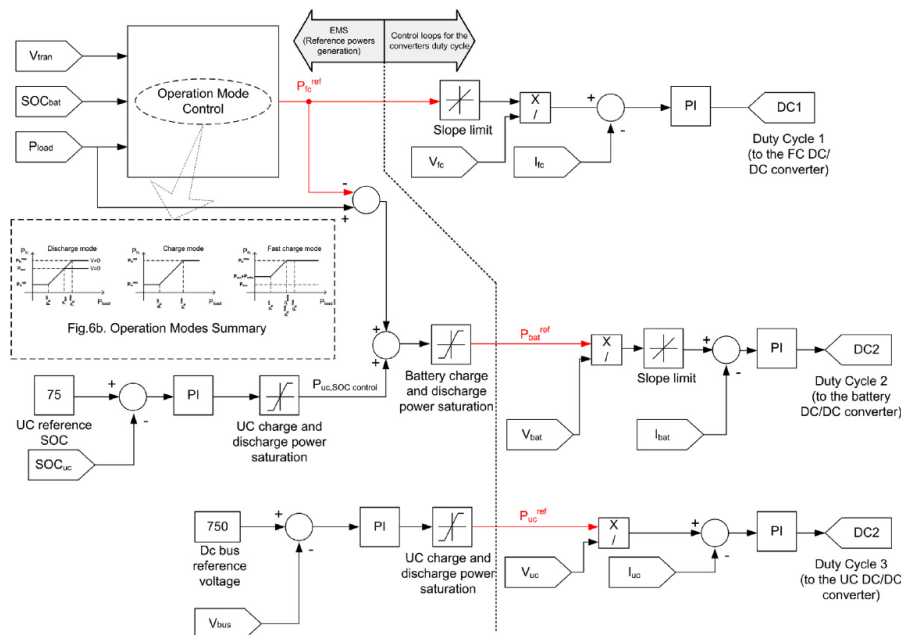
$$P_{bat}^{char} \leq P_{bat} \leq P_{bat}^{disc} \rightarrow -400 \times 10^3 \leq P_{bat} \leq 425 \times 10^3 \quad (3.37)$$

3. Ο ρόλος του υπερπυκνωτή είναι η διατήρηση της τάσης των 750 V στο φορτίο, τηρώντας παράλληλα τους εξής ενεργειακούς περιορισμούς:

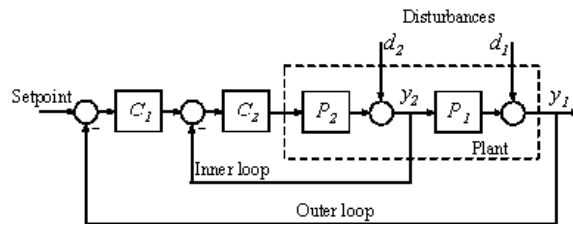
$$P_{sc}^{char} \leq P_{sc} \leq P_{sc}^{disc} \rightarrow -175 \times 10^3 \leq P_{sc} \leq 175 \times 10^3 \quad (3.38)$$

4. Οι ιδανικές τιμές ισχύος των πηγών P_{fc}^{opt} , P_{bat}^{opt} , P_{sc}^{opt} τροφοδοτούνται στους αντίστοιχους μετατροπείς και αφού διαιρεθούν με την τάση εισόδου των μετατροπέων V_{fc_in} , V_{bat_in} , V_{sc_in} , προκύπτει το ιδανικό ρεύμα που πρέπει να διαρέει τους μετατροπείς I_{fc}^{ref} , I_{bat}^{ref} , I_{sc}^{ref} . Στη συνέχεια, το ιδανικό ρεύμα αφαιρείται απ'το μετρούμενο ρεύμα εισόδου των μετατροπέων και το σήμα που προκύπτει, τροφοδοτείται μέσω PI ελεγκτών, στις γεννήτριες PWM των τρανζίστορ, καθορίζοντας έτσι τον κύκλο λειτουργίας (duty cycle) που πρέπει να έχουν οι μετατροπείς για να αποδώσουν τις δωθείσες ιδανικές τιμές.

Τέλος, δίνεται ένα συγκεντρωτικό σχήμα που εμπεριέχει όλα τα παραπάνω στάδια του OMC, από τον έλεγχο των πηγών μέχρι εκείνον του κύκλου λειτουργίας των τρανζίστορ των μετατροπέων.



Σχήμα 3.21: Συγκεντρωτικό διάγραμμα στρατηγικής OMC.



Σχήμα 3.22: Διαδοχικός έλεγχος (Cascade Control).

3.1.2.2 Cascade Control - CC

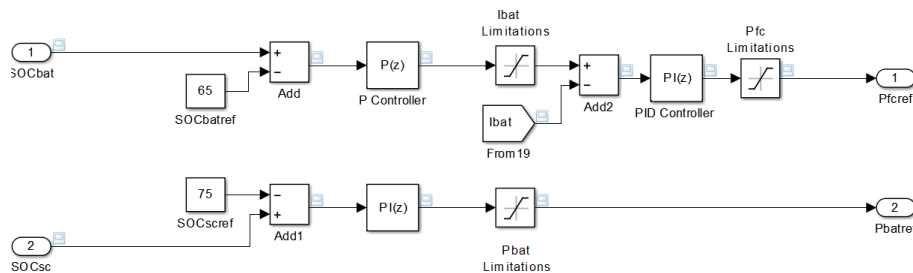
Ο διαδοχικός έλεγχος (*Cascade Control*) χρησιμοποιείται κυρίως για την εξάλειψη του σφάλματος μεταξύ των σημάτων εξόδου και της τιμής αναφοράς, προτού τα σφάλματα αυτά διαδοθούν σε στοιχεία του βασικού μοντέλου.

Ο βασικός άξονας λειτουργίας του είναι οι βρόγχοι ελέγχου με αναλογικούς - ολοκληρωτικούς (PI) ελεγκτές. Το πιο απλό σύστημα διαδοχικού ελέγχου, περιέχει δύο τέτοιους βρόγχους, τον εσωτερικό και τον εξωτερικό και φαίνεται στο σχήμα 3.22. Συγκεκριμένα, η λειτουργία του είναι η εξής:

- Ο ελεγκτής C_1 στον εξωτερικό βρόγχο ελέγχου, είναι ο πρωταρχικός ελεγκτής, ο οποίος ρυθμίζει την ελεγχόμενη μεταβλητή y_1 , μέσω της εξωτερικής τιμής αναφοράς (setpoint).
- Το παραγόμενο σήμα, είναι μια τιμή αναφοράς, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στον εσωτερικό βρόγχο απ'τον δευτερεύοντα ελεγκτή C_2 , ο οποίος θα εξαλείψει τοπικά οποιαδήποτε διακύμανση d_2 , πριν εκείνη μεταφερθεί στο στοιχείο P_1 .

Για τη σωστή υλοποίηση του διαδοχικού ελέγχου, θα πρέπει η αποκρισιμότητα του εσωτερικού βρόγχου να είναι μεγαλύτερη από εκείνη του εξωτερικού. Στην περί-

Cascade Control



Σχήμα 3.23: Μοντέλο CC στο Simulink.

πτωση του μοντέλου στο Simulink (σχήμα 3.23) υπάρχουν δύο διαφορετικοί βρόγχοι ελέγχου, ένας για τον υπολογισμό της ιδανικής τιμής ισχύος κυψέλης καυσίμου (P_{fc}^{opt}) και ένας για τον υπολογισμό της ιδανικής τιμής ισχύος μπαταρίας (P_{bat}^{opt}):

- Για τον υπολογισμό του P_{fc}^{opt} , ο εξωτερικός βρόγχος ελέγχου υπολογίζει την διαφορά του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας (SOC_{bat}) από την τιμή αναφοράς ($setpoint = SOC_{bat}^{ref} = 65\%$) και παράγει ένα σήμα αναφοράς για την τιμή ρεύματος της μπαταρίας (I_{bat}^{opt}) μέσω PI ελεγκτών. Έπειτα το σήμα αυτό ρυθμίζεται βάσει τεχνικών περιορισμών της μπαταρίας ($-500A \leq I_{bat}^{opt} \leq 460A$).

- Το σήμα αναφοράς του ρεύματος μπαταρίας (I_{bat}^{opt}) τροφοδοτείται στον εσωτερικό βρόγχο, όπου αφαιρείται από το μετρούμενο ρεύμα μπαταρίας (I_{bat}) για να προκύψει μέσω ενός νέου PI ελεγκτή, το σήμα της ισχύος κυψέλης καυσίμου. Αυτό το σήμα ρυθμίζεται βάσει τεχνικών περιορισμών της κυψέλης καυσίμου ($12.5kW \leq P_{fc}^{opt} \leq 160kW$) για να προκύψει η ιδανική τιμή ισχύος της κυψέλης (P_{fc}^{opt}).
- Για τον υπολογισμό της ιδανικής τιμής ισχύος της μπαταρίας (P_{bat}^{opt}), μετριέται η διαφορά του επιπέδου φόρτισης του υπερπυκνωτή (SOC_{sc}) από την τιμή αναφοράς ($setpoint = SOC_{sc}^{ref} = 75\%$), απ'όπου παράγεται μέσω ενός PI ελεγκτή ένα σήμα αναφοράς, το οποίο όταν ρυθμιστεί βάσει τεχνικών περιορισμών της μπαταρίας ($-425kW \leq P_{bat}^{opt} \leq 400kW$) θα δώσει την ιδανική τιμή ισχύος της.

Παρακάτω δίνονται οι τιμές των τριών PI ελεγκτών, οι οποίες προέκυψαν μέσω ρύθμισης (*PID Tuning*) στο Simulink.

- *PI ελεγκτής 1ου εξωτερικού βρόχου:*

$$P : 959.596244544942 \quad I : 3.96100952089742 \quad (3.39)$$

- *PI ελεγκτής 1ου εσωτερικού βρόχου:*

$$P : 218.54235998217 \quad I : 0.371205832883168 \quad (3.40)$$

- *PI ελεγκτής 2ου βρόχου:*

$$P : 2417066.29396723 \quad I : 39477.285855024 \quad (3.41)$$

3.1.2.3 Fuzzy Logic Control - FLC

Η στρατηγική ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic Control - FLC) χρησιμοποιεί δύο βασικούς άξονες για τη λειτουργία της. Ο πρώτος είναι η κβαντοποίηση των σημάτων εισόδου και εξόδου μέσω συναρτήσεων συμμετοχής (*Membership Functions*) και ο δεύτερος είναι η διαχείριση των σημάτων αυτών μέσω λογικών κανόνων, οι οποίοι για κάθε διαφορετικό σενάριο εισόδων παράγουν ένα σενάριο εξόδων.

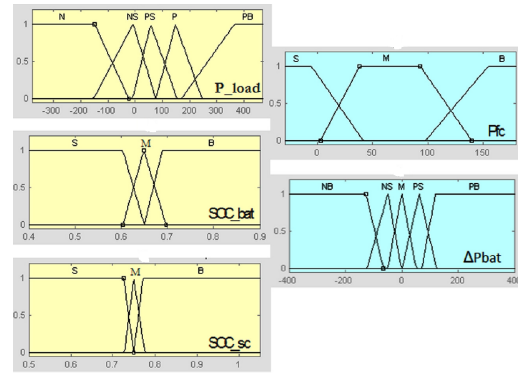
Στην προκειμένη περίπτωση [18], υπάρχουν τα εξής τρία σήματα εισόδου: τα επίπεδα φόρτισης μπαταρίας - υπερπυκνωτή (SOC_{bat} , SOC_{sc}), και το ζητούμενο φορτίο (P_{load}), ενώ τα σήματα εξόδου είναι τα εξής δύο: η ιδανική ισχύς της κυψέλης καυσίμου (P_{fc}) και η τιμή αναφοράς διακύμανσης ισχύος της μπαταρίας (ΔP_{bat}). Οι λογικοί κανόνες καθώς και οι συναρτήσεις συμμετοχής που υλοποιήθηκαν στο μοντέλο του Simulink δίνονται στα σχήματα 3.24 και 3.25.

Η συμπεριφορά της στρατηγικής FLC οπτικοποιείται καλύτερα στα διαγράμματα επιφάνειας 3.26, 3.27 και 3.28. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι:

- Στην περίπτωση που το ζητούμενο φορτίο έχει θετική τιμή, τότε όσο το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας ή του υπερπυκνωτή είναι κάτω των φυσιολογικών τιμών ($SOC_{bat} = 0.65\%$, $SOC_{sc} = 0.75\%$), η κυψέλη καυσίμου αναλαμβάνει την τροφοδοτήσή του αυξάνοντας γραμμικά την ισχύ της μέχρι τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή (P_{fc}^{max}).

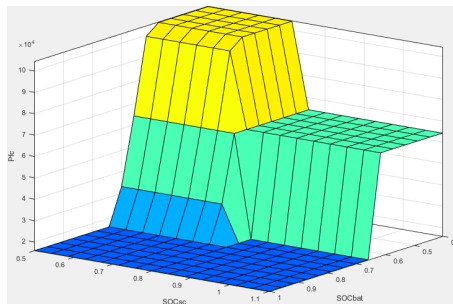
SOC_{bat}	SOC_{sc}						
	S		M		B		
	P_{fc}	ΔP_{bat}	P_{fc}	ΔP_{bat}	P_{fc}	ΔP_{bat}	
$P_{load} = N$	S	M	NS	S	NS	S	NB
	M	S	NS	S	NS	S	NS
	B	S	NS	S	NS	S	NS
$P_{load} = NS$	S	M	NS	S	NS	S	NS
	M	S	M	S	NS	S	NS
	B	S	M	S	M	S	NS
$P_{load} = PS$	S	B	M	M	NS	M	NS
	M	M	M	M	M	S	M
	B	S	PS	S	PS	S	M
$P_{load} = P$	S	B	M	M	M	M	M
	M	M	PS	M	M	M	M
	B	M	PS	S	PS	S	PS
$P_{load} = PB$	S	B	PS	M	PS	M	M
	M	B	PS	M	PS	M	M
	B	M	PS	S	PB	S	PS

Σχήμα 3.24: Λογικοί κανόνες για το FLC.

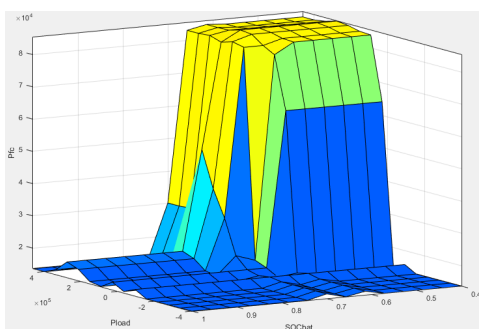


Σχήμα 3.25: Συναρτήσεις Συμμετοχής για τις 3 εισόδους και τις 2 εξόδους του μοντέλου στο Simulink.

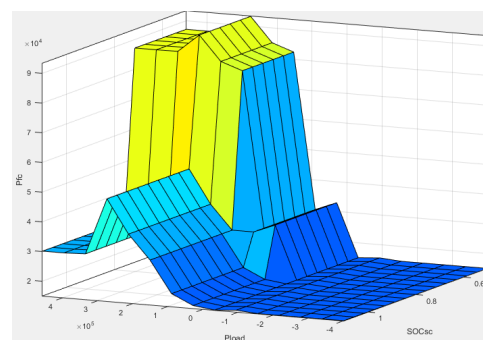
- Όσο το επίπεδο φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας είναι άνω των φυσιολογικών ορίων, γίνεται ο κύριος πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την κατανάλωση υδρογόνου.
- Στην περίπτωση που το φορτίο έχει αρνητική τιμή, αυτό απορροφάται από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, αυξάνοντας το επίπεδο φόρτισής του.



Σχήμα 3.26: Εξάρτηση P_{fc} από SOC_{bat} , SOC_{sc} .



Σχήμα 3.27: Εξάρτηση P_{fc} από P_{load} , SOC_{bat} .

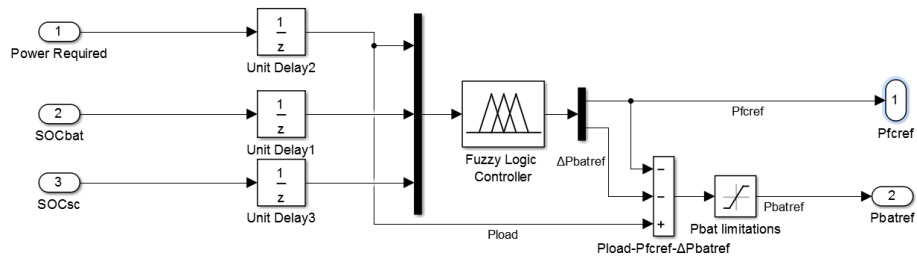


Σχήμα 3.28: Εξάρτηση P_{fc} από P_{load} , SOC_{sc} .

Το συνολικό μοντέλο του Simulink δίνεται στο σχήμα 3.29, απ' όπου φαίνεται ότι οι τιμές εξόδου του ασαφούς ελέγχου (P_{fc}^{opt} , ΔP_{bat}) αφαιρούνται από τη συνολική ζητούμενη ισχύ στο φορτίο, πράξη απ'την οποία προκύπτει η ιδανική τιμή ισχύος της

3.1 Διαμόρφωση μοντέλου προσομοίωσης

μπαταρίας (P_{bat}^{opt}). Τέλος, οι ιδανικές τιμές κυψέλης και μπαταρίας τροφοδοτούνται στους αντίστοιχους μετατροπείς, για την παραγωγή του βέλτιστου κύκλου λειτουργίας τους.



Σχήμα 3.29: Μοντέλο FLC στο Simulink.

" You may not be interested in Strategy, but Strategy is interested in you."

Leon Trotsky

" If opportunity doesn't knock, build a door "

Milton Berle

4

Παρουσίαση και Ανάλυση Αποτελεσμάτων

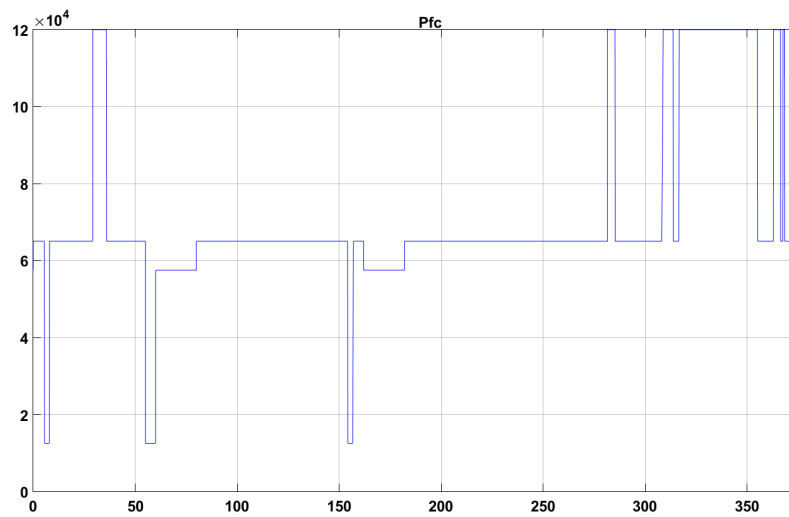
Στο παρών κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για κάθε τεχνική ελέγχου ξεχωριστά. Στόχος είναι να αποδειχθεί η ορθότητα της λειτουργίας των ελέγχων, η οποία εξαρτάται από τον τρόπο που διαχειρίζονται οι έλεγχοι τις πηγές για να αποδώσουν τη ζητούμενη ισχύ στο φορτίο, διατηρώντας την τάση στο φορτίο σταθερή στα 750 V. Αφού έχει προσομοιωθεί το απλοποιημένο μοντέλο στο σύνολο της διαδρομής (375 sec) για κάθε στρατηγική ελέγχου ξεχωριστά, τα αποτελέσματα δίνονται με τον εξής τρόπο:

- Οι γραφικές παραστάσεις, τόσο για την ισχύ της κάθε πηγής, όσο και για τις τρεις μαζί, προς όφελος της εποπτείας επί των αποτελεσμάτων.
- Η γραφική παράσταση της αθροιστικής παραγόμενης ισχύς από τις πηγές, η οποία χρησιμεύει για την επαλήθευση πιθανών απωλειών.
- Οι γραφικές παραστάσεις των επιπέδων φόρτισης της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή.
- Επιμέρους γραφικές παραστάσεις που δείχνουν τα στάδια λειτουργίας του κάθε ελέγχου.

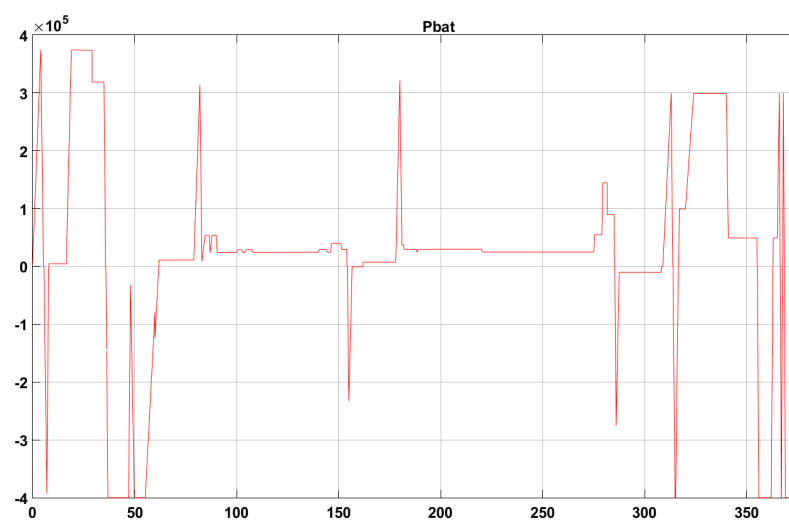
4.1 Operation Mode Control - OMC

Από την προσομοίωση του απλοποιημένου μοντέλου, καθοδηγούμενο από το *Operation Mode Control*, προκύπτουν οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις, ταξινομημένες με τον τρόπο που περιγράφηκε στην εισαγωγή:

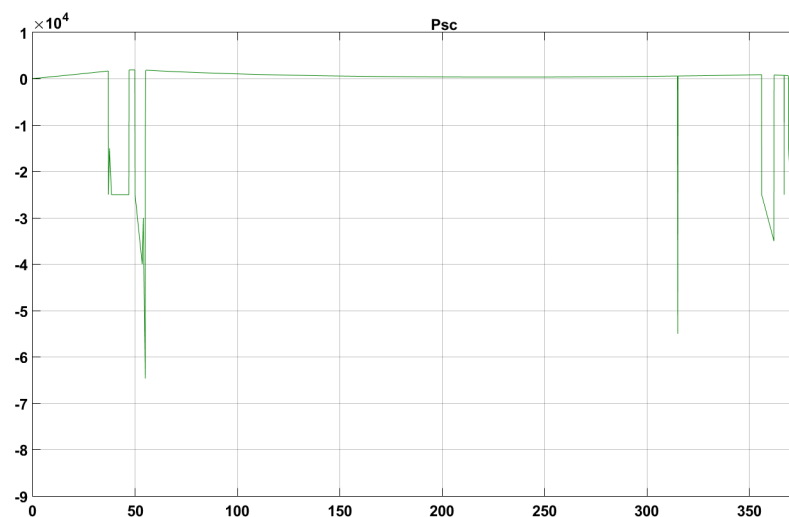
- *Ισχύς πηγών:* Η παραγόμενη ισχύς για την κυψέλη καυσίμου (οριζόντιος άξονας 0 – 120 kW, κάθετος 0 – 375 sec), της μπαταρίας (οριζόντιος άξονας –400 έως 400 kW, κάθετος 0 – 375 sec) και του υπερπυκνωτή (οριζόντιος άξονας –90 έως 10 kW, κάθετος 0 – 375 sec), δίνεται στα σχήματα 4.1, 4.2 και 4.3



Σχήμα 4.1: Ισχύς κυψέλης κατά την εφαρμογή του OMC.



Σχήμα 4.2: Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή του OMC.

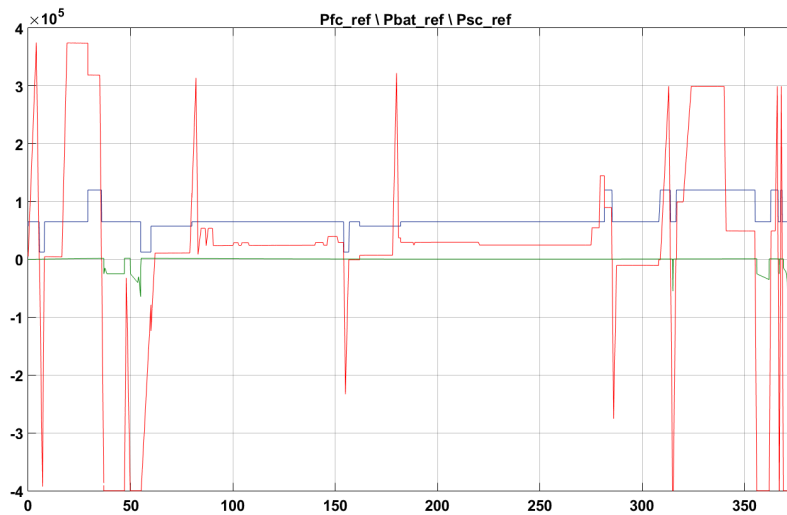


Σχήμα 4.3: Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή του OMC.

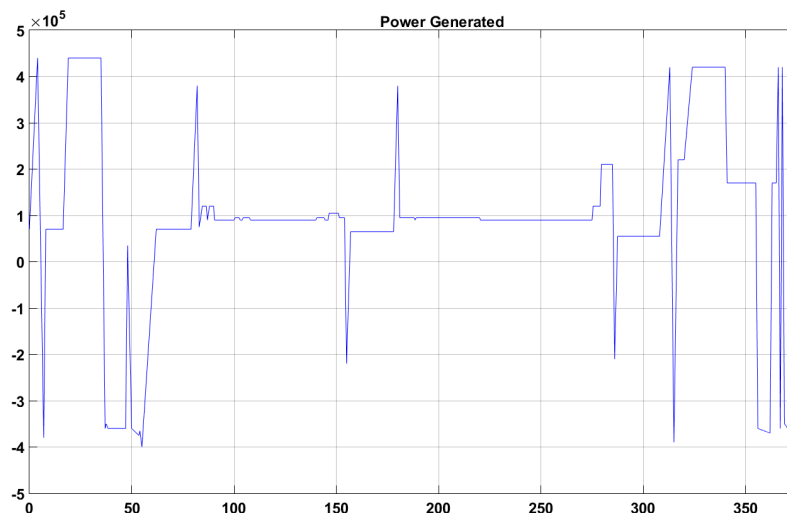
Η κυψέλη καυσίμου ακολουθεί κατά κύριο λόγο τη μπαταρία και αυτό φαίνεται, γιατί αποδίδει τη μέγιστη ισχύ ($P_{fc}^{max} = 120 \text{ kW}$) όταν η μπαταρία έχοντας απο-

δώσει μέγιστη ισχύ για κάποιο χρονικό διάστημα, έχει εκφορτιστεί, γεγονός που αποδεικνύει την προσπάθεια της κυψέλης να την φορτίσει. Αντίστοιχα, ελάχιστο φορτίο ($P_{fc}^{min} = 12.5 \text{ kW}$) αποδίδει μόνο τις χρονικές στιγμές όπου το ζητούμενο φορτίο είναι μέγιστο αρνητικό, οπότε η μπαταρία φορτίζεται απορροφώντας την εκλυόμενη ενέργεια κατά το φρενάρισμα. Στο μεγαλύτερο χρόνο της διαδρομής η κυψέλη αποδίδει ονομαστική τιμή ισχύος ($P_{fc}^{opt} = 65 \text{ kW}$). Η μπαταρία ακολουθεί τη ζήτηση στο φορτίο, καθώς η ζητούμενη ισχύς αποδίδεται ή απορροφάται με την απαιτούμενη αποκρισιμότητα. Ο υπερπυκνωτής επεμβαίνει μόνο κατά τη μέγιστη αρνητική ζήτηση του φορτίου να απορροφήσει όση ισχύ δεν καλύπτεται από την μπαταρία.

- *Συνολική Παραγόμενη Ισχύς:* Στο σχήμα 4.4 (οριζόντιος άξονας -400 έως 400 kW , κάθετος $0-375 \text{ sec}$) δίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές αναφοράς ισχύος και για τις 3 πηγές, ενώ η συνολική παραγόμενη ισχύς τους δίνεται στο σχήμα 4.5 (οριζόντιος άξονας -400 έως 400 kW , κάθετος $0-375 \text{ sec}$).



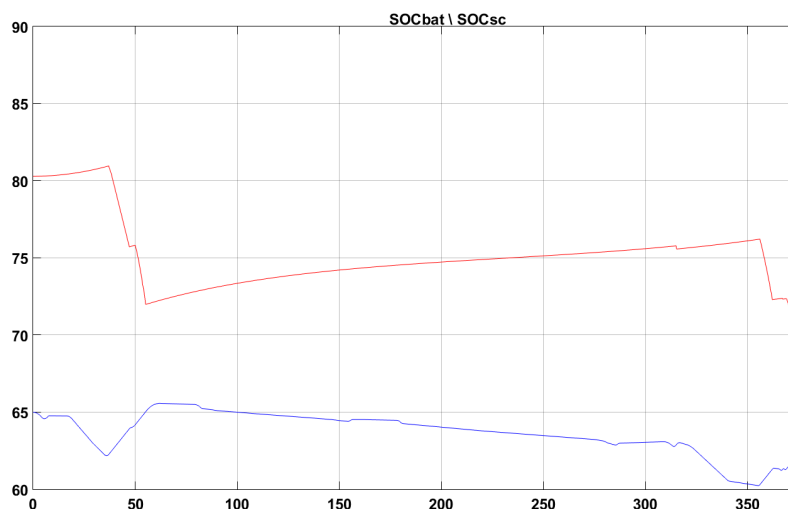
Σχήμα 4.4: Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή του OMC.



Σχήμα 4.5: Συνολική παραγόμενη ισχύς από τις πηγές κατά την εφαρμογή του OMC.

Από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα ισχύος παρατηρούμε ότι το ζητούμενο φορτίο καλύπτεται συνεχώς απ'την αθροιστική ισχύ και των τριών πηγών, χωρίς να υπάρχουν απώλειες ή ασυνέχειες στην παροχή του, οπότε ο έλεγχος θεωρητικά είναι ορθός. Επίσης, παρατηρούμε ότι ο κύριος πάροχος του φορτίου είναι η μπαταρία με την κυψέλη καυσίμου να την συνοδεύει. Η κυψέλη είναι ενεργή σε όλη την διάρκεια της διαδρομής, για την αποφυγή απώλειων ενεργοποίησης της, ενώ ο υπερπυκνωτής είναι ανενεργός, μέχρι τη στιγμή που θα χρειαστεί να παρέμβει, κυρίως για την απορρόφηση της πλεονάζουσας ισχύος, ούτως ώστε να διατηρήσει την τάση σταθερή στο φορτίο.

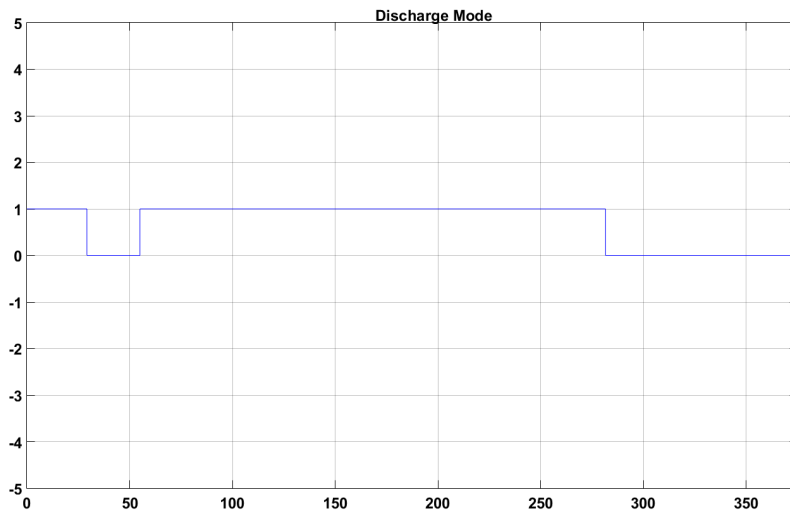
- *Επίπεδο φόρτισης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας:* Για τα επίπεδα φόρτισης των πηγών του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας δίνεται η παρακάτω γραφική παράσταση (οριζόντιος άξονας 0 έως 100 kW, κάθετος 0 – 375 sec):



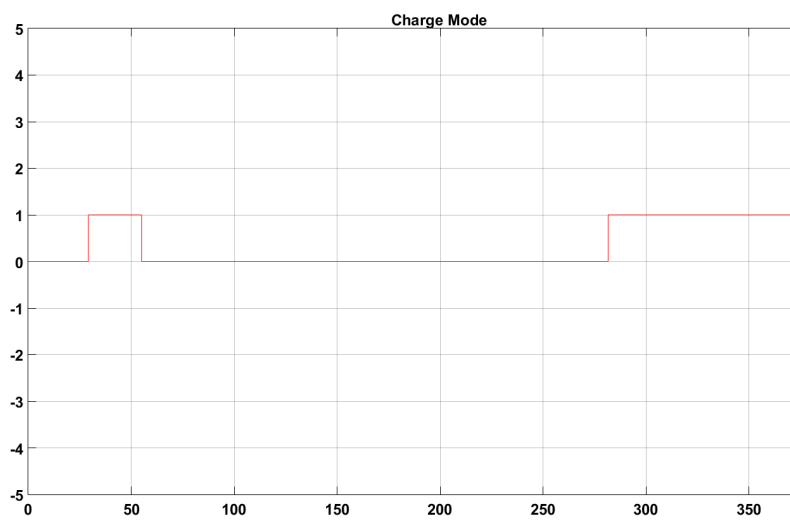
Σχήμα 4.6: Επίπεδα φόρτισης μπαταρίας και υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή του OMC.

Τα επίπεδα φόρτισης της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή, διατηρούνται στα ονομαστικά τους επίπεδα. Η διαστασιολόγηση της μπαταρίας της επιτρέπει να απορροφάει και να αποδίδει ισχύ στο φορτίο, με ελάχιστη διακύμανση στο επίπεδο φόρτισής της, το οποίο κυμαίνεται στο 5% του συνολικού ποσοστού φόρτισης. Ο υπερπυκνωτής, καταφέρνει να διατηρεί την τάση στο φορτίο στα 750 V, απορροφώντας την πλεονάζουσα ισχύ, χωρίς μεγάλη διακύμανση στα επίπεδα φόρτισής του, η οποία κυμαίνεται στο 7%.

- Στα σχήματα 4.7, 4.8 και 4.9 (οριζόντιος άξονας 0 – 1 kW, κάθετος 0 – 375 sec) δίνεται η χρονική στιγμή, αλλά και η διάρκεια της κάθε λειτουργίας (*Εκφόρτιση, Φόρτιση, Γρήγορη Φόρτιση*) στην οποία βρίσκεται το μοντέλο εκτελώντας την διαδρομή των 375 sec. Όσον αφορά στους τρόπους λειτουργίας (*Operation Modes*) του μοντέλου, παρατηρούμε ότι ο έλεγχος δεν χρειάστηκε ποτέ να εισέλθει στην κατάσταση *Γρήγορης Φόρτισης*, αφού τα επίπεδα φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας κυμάνθηκαν εντός ονομαστικών ορίων. Επομένως, λόγω της στρατηγικής OMC, αλλά και της διαστασιολόγησης των πηγών, το μοντέλο καταφέρνει και διαχειρίζεται τη διαθέσιμη ενέργεια, αλλά και τις απαιτήσεις των πηγών, χωρίς την ανάγκη της εξωτερικής παρέμβασης ή την ακινητοποίηση του τρένου για την φόρτιση αυτών. Ένα ακόμη στοι-



Σχήμα 4.7: Λειτουργία εκφόρτισης κατά την εφαρμογή του OMC.



Σχήμα 4.8: Λειτουργία φόρτισης κατά την εφαρμογή του OMC.

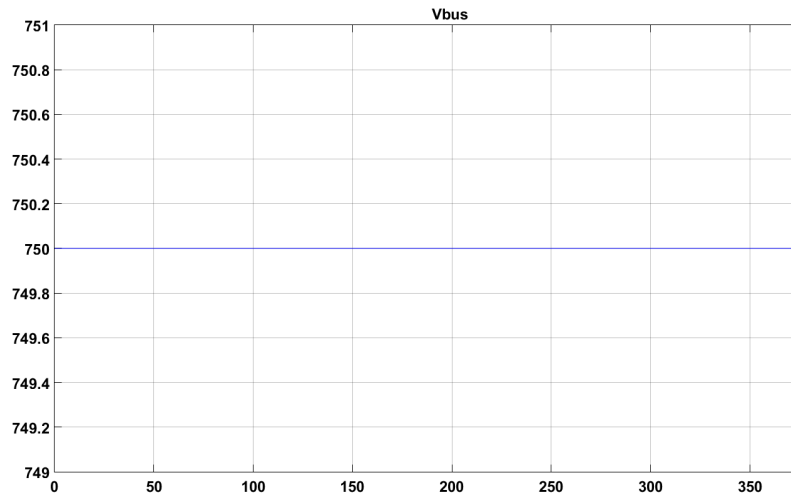


Σχήμα 4.9: Λειτουργία γρήγορης φόρτισης κατά την εφαρμογή του OMC.

χείο που παρατηρείται είναι ο σχετικός χρόνος της λειτουργίας *Εκφόρτισης* σε σχέση με εκείνον της *Φόρτισης*. Συγκεκριμένα ο συνολικός χρόνος, που το μο-

ντέλο βρίσκεται σε λειτουργία Εκφόρτισης κυμαίνεται στα 250 *sec*, δηλαδή καταλαμβάνει τα 2/3 του συνολικού χρόνου της διαδρομής, ενώ αντίστοιχος χρόνος λειτουργίας Φόρτισης κυμαίνεται στο 1/3 του συνολικού χρόνου. Η σχέση 2 προς 1 της λειτουργίας Εκφόρτισης σε σχέση με εκείνη της Φόρτισης, πιθανόν να οφείλεται στη διαστασιολόγηση της μπαταρίας, της οποίας η χωρητικότητα επιλέχτηκε με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης.

- *Τάση φορτίου:* Στο σχήμα 4.10 δίνεται η τάση στο φορτίο, όπου φαίνεται ότι διατηρείται σταθερή στα 750 *V*, το οποίο είναι ένα ακόμη στοιχείο για την ορθότητα του ελέγχου.

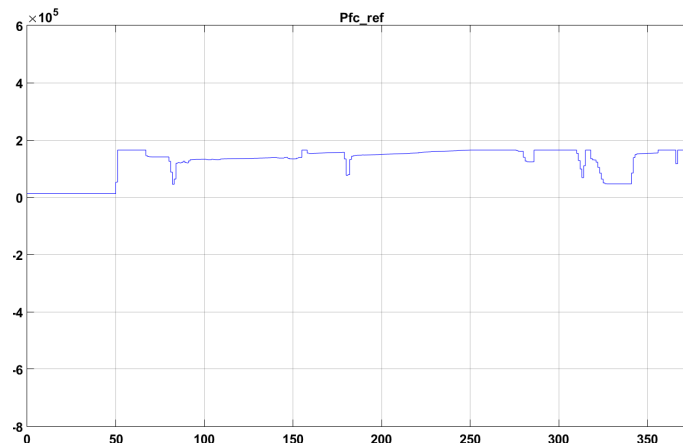


Σχήμα 4.10: Τάση στο φορτίο κατά την εφαρμογή του OMC.

4.2 Cascade Control - CC

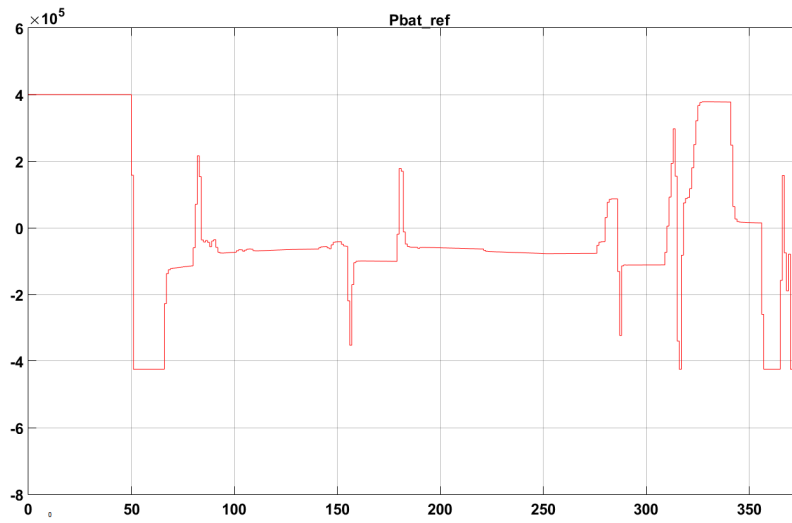
Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του διαδοχικού ελέγχου (*Cascade Control*).

- *Ισχύς πηγών:* Η παραγόμενη ισχύς για την κυψέλη καυσίμου (οριζόντιος άξονας 0 – 120 *kW*, κάθετος 0 – 375 *sec*) δίνεται στο σχήμα 4.11:

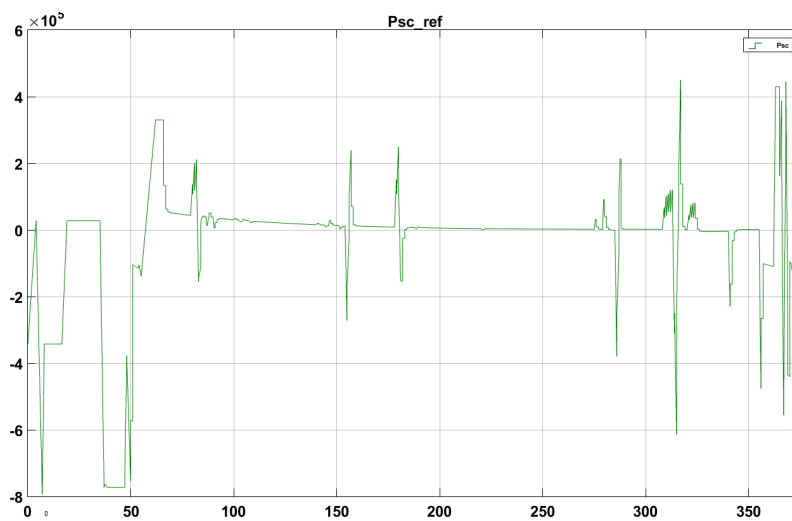


Σχήμα 4.11: Ισχύς κυψέλης κατά την εφαρμογή του CC.

Η ισχύς αναφοράς της μπαταρίας (οριζόντιος άξονας -400 έως 400 kW , κάθετος $0 - 375$ sec) και του υπερπυκνωτή όπως αποδίδεται από τον έλεγχο (οριζόντιος άξονας -90 έως 10 kW , κάθετος $0 - 375$ sec), δίνεται στα σχήματα 4.12 και 4.13:



Σχήμα 4.12: Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή του CC.

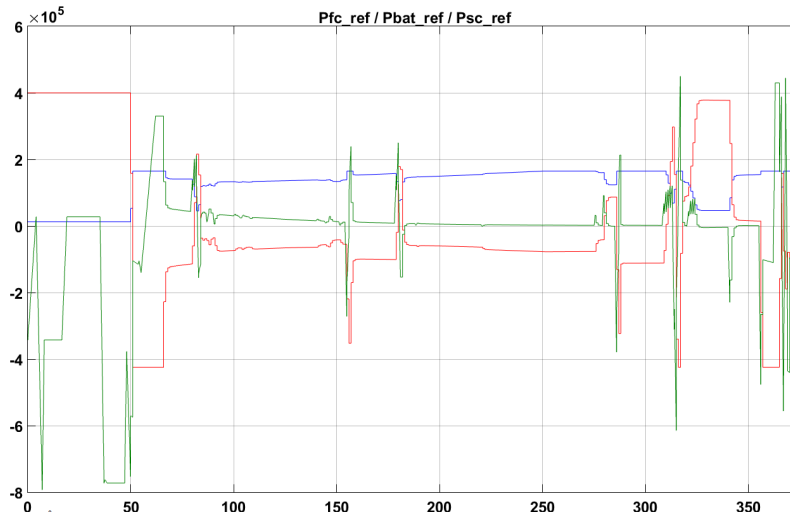


Σχήμα 4.13: Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή του CC.

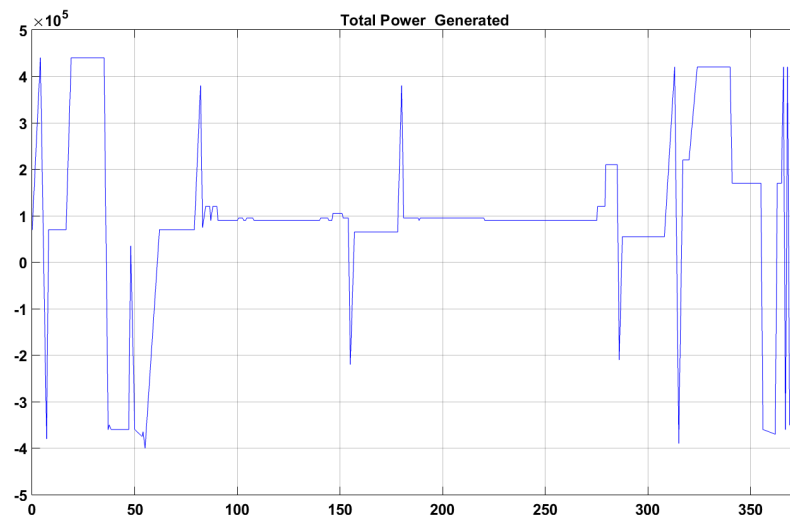
Η ισχύς της κυψέλης καυσίμου ακολουθεί τη ζητούμενη ισχύ του φορτίου, έχοντας πάντα συμπληρωματικό ρόλο στην παροχή ισχύος στο φορτίο. Πέρα από τα πρώτα 50 sec , στη μεγαλύτερη διάρκεια της διαδρομής αποδίδει ισχύ κοντά στη μέγιστη τιμή της (150 kW). Αυτό εξηγείται εν μέρει απ'την αρχική εκφόρτιση της μπαταρίας, η οποία στη συνέχεια φορτίζεται μέσω της κυψέλης και του υπερπυκνωτή. Η μπαταρία, φαίνεται στα πρώτα 50 sec να αποδίδει "τυφλά" τη μέγιστη ισχύ της στο φορτίο, με αποτέλεσμα το επίπεδο φόρτισής της να φτάσει στο 55% , όπου η κυψέλη αναλαμβάνει τη φόρτισή της, μέχρις ότου αυτό να ξεπεράσει το 65% . Αυτό είναι αποτέλεσμα της φυσιογνωμίας των ελέγχων PI, οι οποίοι εκμεταλλεύονται πλήρως τα όρια της κάθε πηγής. Επίσης, μετά τα 50 sec , η αποδιδόμενη ισχύς της κυμαίνεται κυρίως σε αρνητικές τιμές και

αυτό ίσως οφείλεται στο γεγονός ότι, οι ελεγκτές PI χρησιμοποιούν την κυψέλη και τον υπερπυκνωτή για την κάλυψη της ισχύος, με τη μπαταρία να έχει ένα ρόλο εξισσορόπησης της ισχύος στο κύκλωμα, καθώς και την παροχή ισχύος σε σημεία όπου αδυνατούν οι άλλες δύο πηγές να αποδώσουν.

- *Συνολική Παραγόμενη Ισχύς:* Στη γραφική παράσταση 4.14 (οριζόντιος άξονας -400 έως 400 kW, κάθετος $0 - 375$ sec) δίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές αναφοράς ισχύος και για τις 3 πηγές, ενώ η συνολική παραγόμενη ισχύς από τις πηγές που αποδίδεται στο φορτίο δίνεται στο σχήμα 4.15 (οριζόντιος άξονας -400 έως 400 kW, κάθετος $0 - 375$ sec):



Σχήμα 4.14: Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή του CC.

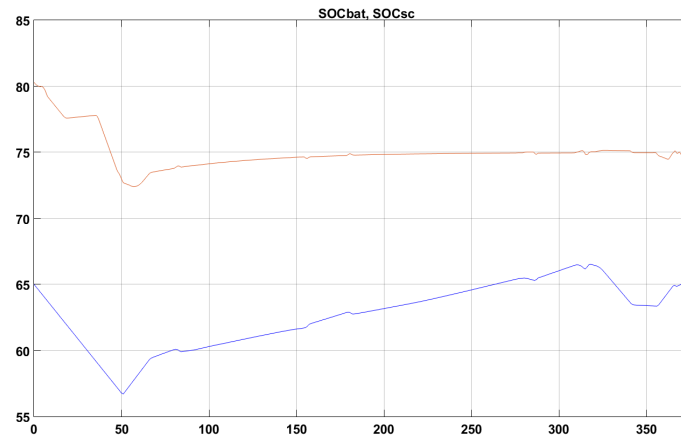


Σχήμα 4.15: Συνολική παραγόμενη ισχύς από τις πηγές κατά την εφαρμογή του CC.

Για την ισχύ των τριών πηγών συγκεντρωτικά παρατηρούμε, ότι η στρατηγική αυτή χρησιμοποιεί κάθε μία εξ'αυτών μέχρι τα όρια τους. Αυτό δικαιολογείται, από το γεγονός ότι οι PI ελεγκτές χρησιμοποιούν όλο το φάσμα της διαθέσιμης απόδοσης. Επομένως, στην αρχή χρησιμοποιείται η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς της μπαταρίας, ενώ η ισχύς στην κυψέλη έχει ελαχιστοποιηθεί και ο υπερπυκνωτής προσπαθεί να διαχειριστεί την πλεονάζουσα ισχύ από τη μπαταρία για

να διατηρήσει την τάση στο ζυγό. Στη συνέχεια, και αφού η μπαταρία φτάσει στα κατώτατα όρια φόρτισής της, αναλαμβάνει η κυψέλη καυσίμου τη φόρτισή της, αποδίδοντας τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ. Επειδή όμως αυτή δεν είναι αρκετή για την κάλυψη του φορτίου, ο υπερπυκνωτής παρέχει την υπόλοιπη ισχύ.

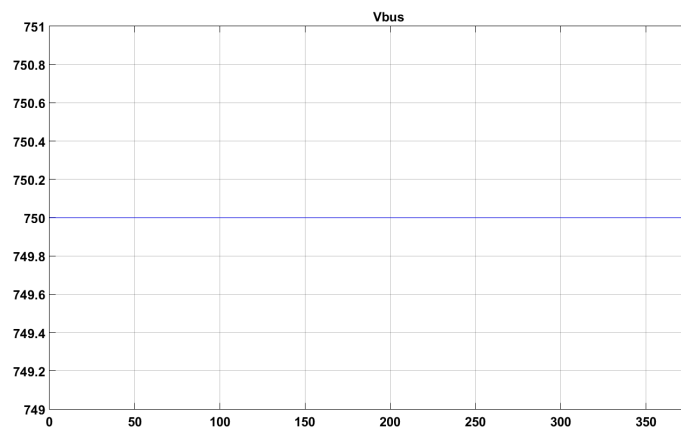
- *Επίπεδο φόρτισης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας:* Για τα επίπεδα φόρτισης των πηγών του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας δίνεται η παρακάτω γραφική παράσταση (οριζόντιος άξονας 0 έως 100 kW, κάθετος 0 – 375 sec):



Σχήμα 4.16: Επίπεδα φόρτισης μπαταρίας και υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή του CC.

Τα επίπεδα φόρτισης των πηγών του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, παραμένουν εντός των ορίων, παρουσιάζοντας διακύμανση της τάξης του 10% για τη μπαταρία και 5% για τον υπερπυκνωτή. Η γραφική παράστασή τους επαληθεύει το γεγονός, ότι η στρατηγική ελέγχου στα πρώτα 50 sec της διαδρομής χρησιμοποιεί ως κύρια παροχή ισχύος το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, μέχρι αυτό να διακοπεί απ'τους τεχνικούς περιορισμούς των πηγών και να αναλάβει η κυψέλη καυσίμου τη φόρτισή τους.

- *Τάση φορτίου:* Στο σχήμα 4.17 δίνεται η τάση στο φορτίο, όπου φαίνεται ότι διατηρείται σταθερή στα 750 V.

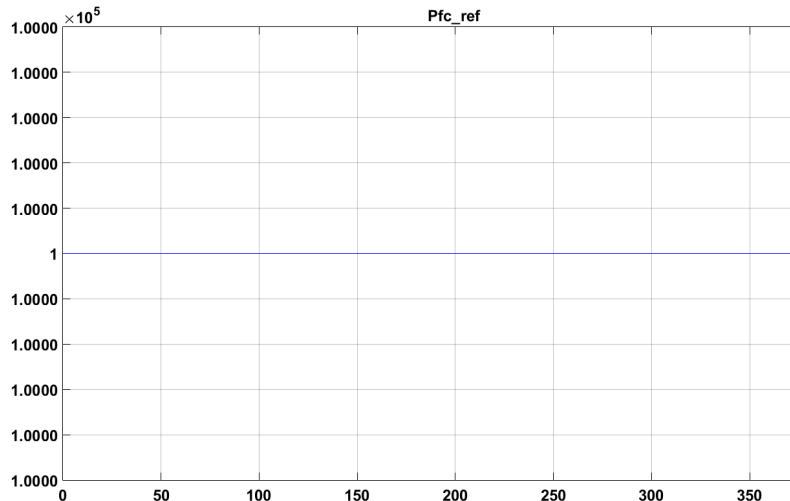


Σχήμα 4.17: Τάση στο φορτίο κατά την εφαρμογή του CC.

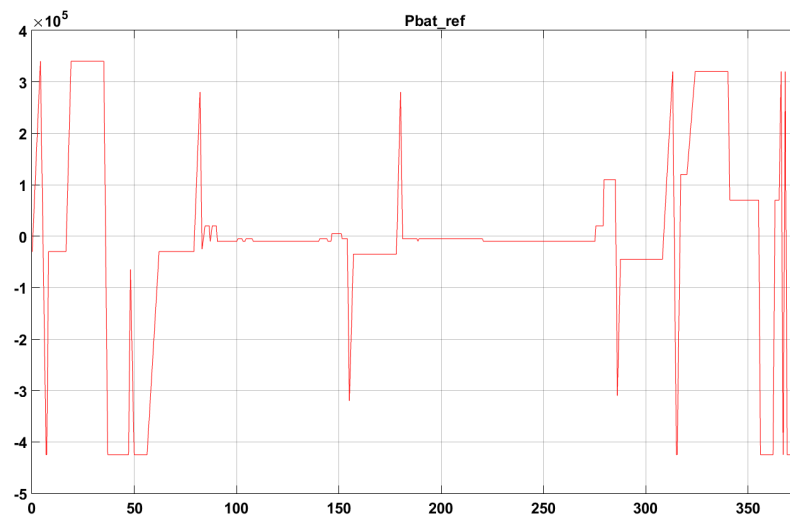
4.3 Fuzzy Logic Control - FLC

Από την προσομοίωση του απλοποιημένου μοντέλου, καθοδηγούμενο από τον ασαφή έλεγχο (*Fuzzy Logic Control*)[18], προκύπτουν οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις, ταξινομημένες με τον τρόπο που περιγράφηκε στην εισαγωγή:

- *Ισχύς πηγών:* Η παραγόμενη ισχύς για την κυψέλη καυσίμου (οριζόντιος άξονας 0 – 120 kW, κάθετος 0 – 375 sec), της μπαταρίας (οριζόντιος άξονας –400 έως 400 kW, κάθετος 0 – 375 sec) και του υπερπυκνωτή (οριζόντιος άξονας –90 έως 10 kW, κάθετος 0 – 375 sec), δίνεται στα σχήματα 4.18, 4.19 και 4.20. Η κυψέλη καυσίμου αποδίδει ισχύ σταθερή ίση με 100 kW, γεγονός το οποίο

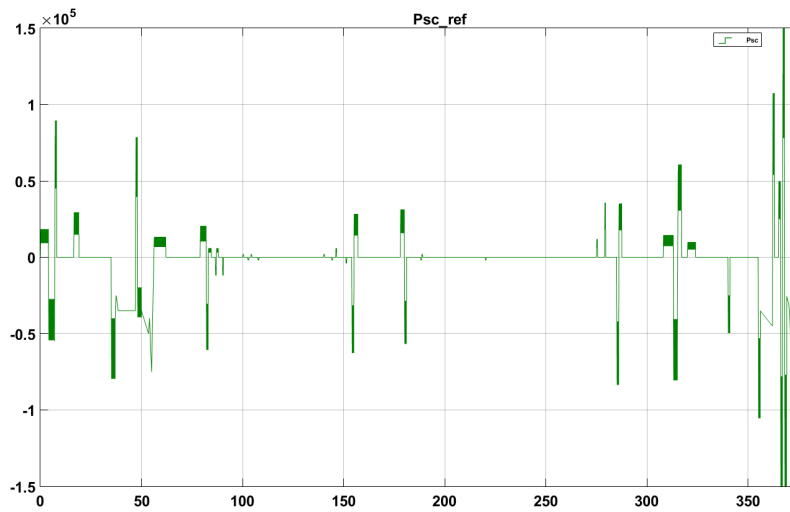


Σχήμα 4.18: Ισχύς κυψέλης κατά την εφαρμογή του FLC.



Σχήμα 4.19: Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή του FLC.

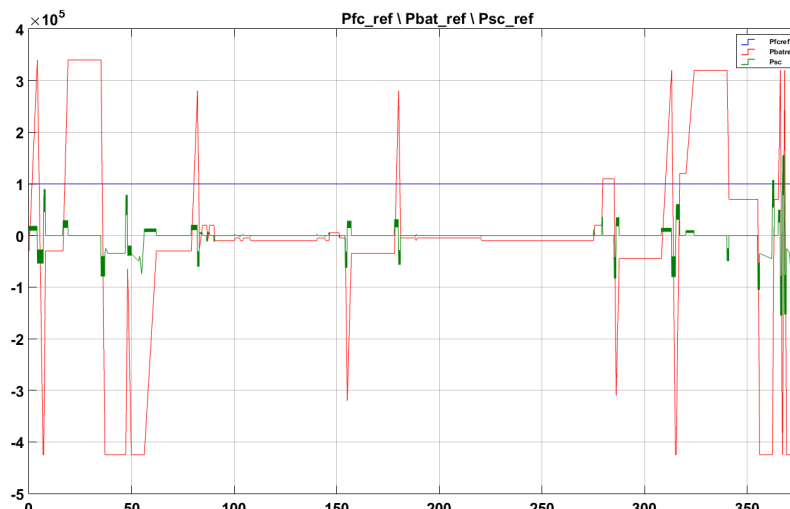
δεν επαληθεύεται από τους λογικούς κανόνες του ασαφούς ελέγχου, μιας και το P_{fc} εναλλάσσεται μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης ισχύος. Ωστόσο πέρα απ'την κάλυψη του φορτίου, έχει αναλάβει και τη φόρτιση των πηγών, οπότε η ισχύς του δεν θεωρείται ότι ξοδεύεται. Η μπαταρία, ως ο κύριος πάροχος ισχύος, ακολουθεί τη ζήτηση του φορτίου, με την απαιτούμενη αποκρισημότητα. Ο υπερπυκνωτής, κατά τον ασαφή έλεγχο, καταφέρνει και απορροφάει την πλεονάζουσα



Σχήμα 4.20: Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή του FLC.

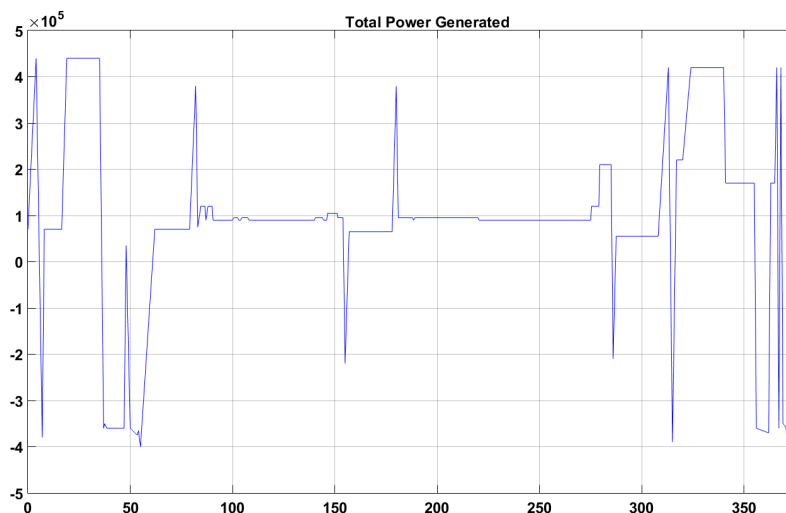
ισχύ ή αποδίδει την υπολειπόμενη ισχύ στο φορτίο, διατηρώντας την τάση στο φορτίο σταθερή.

- *Συνολική Παραγόμενη Ισχύς:* Στη γραφική παράσταση 4.21 (οριζόντιος άξονας -400 έως 400 kW , κάθετος $0 - 375 \text{ sec}$) δίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές αναφοράς ισχύος και για τις 3 πηγές, ενώ η συνολική παραγόμενη ισχύς από τις πηγές που αποδίδεται στο φορτίο δίνεται στο σχήμα 4.22 (οριζόντιος άξονας -400 έως 400 kW , κάθετος $0 - 375 \text{ sec}$):



Σχήμα 4.21: Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή του FLC.

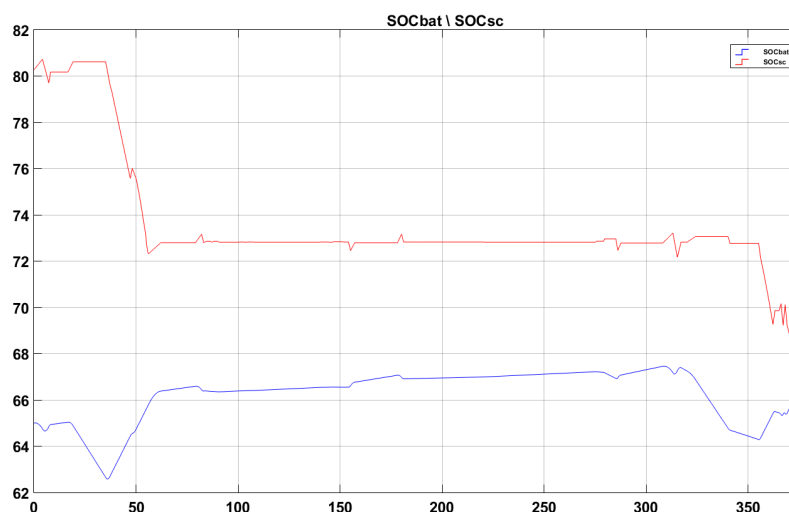
Από τη γραφική παράσταση της συνολικής παραγόμενης ισχύος από τις πηγές, παρατηρούμε ότι όση ισχύς ζητείται από το φορτίο, αποδίδεται από τις πηγές, οπότε δεν υπάρχουν καποιες απώλειες ή ασυνέχειες, τουλάχιστον ως προς το θεωρητικό κομμάτι του ελέγχου. Από τη γραφική παράσταση με τις ισχύς των τριών πηγών συγκεντρωτικά, εξάγεται ότι ο κύριος πάροχος ισχύος και σε αυτό τον έλεγχο είναι η μπαταρία με τις άλλες δύο πηγές να αναλαμβάνουν επικουρικό ρόλο. Ο λόγος που αυτό συμβαίνει, πιθανόν να είναι η διαστασιολόγηση της μπαταρίας, η οποία της επιτρέπει την κάλυψη υψηλού φορτίου, με μικρό αντίκτυπο στο επίπεδο φόρτισής της, το οποίο κάθε φορά που ξεφεύγει εκτός



Σχήμα 4.22: Συνολική παραγόμενη ισχύς από τις πηγές κατά την εφαρμογή του FLC.

των φυσιολογικών ορίων, ο έλεγχος προσπαθεί να το διατηρήσει σταθερό, φορτίζοντας τη μπαταρία μέσω των άλλων πηγών.

- *Επίπεδο φόρτισης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας:* Για τα επίπεδα φόρτισης των πηγών του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας δίνεται η παρακάτω γραφική παράσταση (οριζόντιος άξονας 0 έως 100 kW, κάθετος 0 – 375 sec):

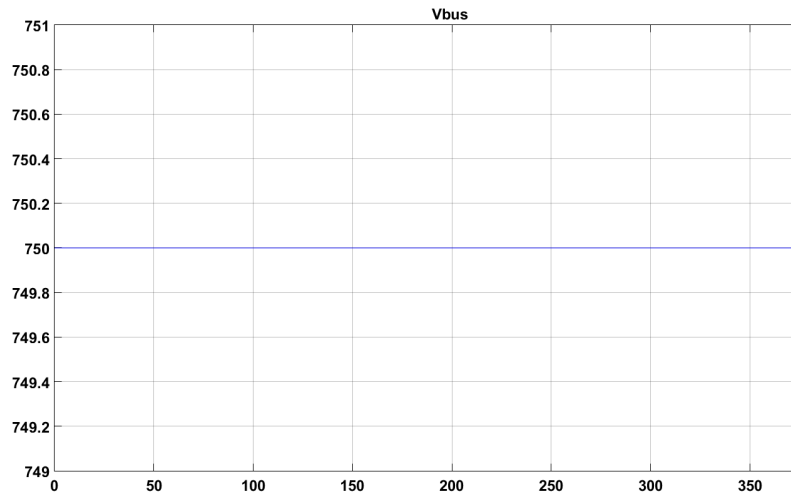


Σχήμα 4.23: Επίπεδα φόρτισης μπαταρίας και υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή του FLC.

Το προφίλ του επιπέδου φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, αποτυπώνει καθαρότερα τη συμπεριφορά των πηγών κατά την εφαρμογή του FLC. Η μπαταρία, παρουσιάζει διακύμανση 3% στο επίπεδο φόρτισής της, ενώ για τον υπερπυκνωτή παρατηρούμε ότι όσο το ζητούμενο φορτίο παραμένει μέγιστο αρνητικό και η μπαταρία απορροφάει τη ζητούμενη ισχύ, ο υπερπυκνωτής προσπαθεί να κρατήσει την τάση στο φορτίο σταθερή, αποδίδοντας ισχύ στο κύκλωμα για την ενεργειακή του εξισορρόπηση, με αποτέλεσμα να εκφορτίζεται ραγδαία. Εν αντιθέσει με τα παραπάνω, όσο οι μεταβολές στο φορτίο

δεν είναι ακραίες (από μέγιστο θετικό σε μέγιστο αρνητικό σε λίγα msec), το επίπεδο φόρτισής του διατηρείται σταθερό, χωρίς να μεταβάλλεται η συμπεριφορά του. Συνολικά η διακύμανσή του κυμαίνεται στο 10%.

- *Τάση φορτίου:* Στο σχήμα 4.24 δίνεται η τάση στο φορτίο, όπου φαίνεται ότι διατηρείται σταθερή στα 750 V.



Σχήμα 4.24: Τάση στο φορτίο κατά την εφαρμογή του FLC.

“The science of today is the technology of tomorrow.”

Edward Teller

“If you control the code, you control the world. This is the future that awaits us.”

Marc Goodman

5

Συμπεράσματα και Μελλοντικές Τάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό, έχοντας παρουσιάσει τα αποτελέσματα για κάθε στρατηγική ελέγχου, θα συγκριθούν οι στρατηγικές μεταξύ τους, με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης.

5.1 Σύγκριση Στρατηγικών Ελέγχου

Η σύγκριση των τριών στρατηγικών (*OMC*, *CC*, *FLC*) θα γίνει βάσει των παρακάτω χαρακτηριστικών:

1. Διαχείριση των πηγών
2. Διαχείριση τάσης φορτίου
3. Χρόνος ολοκλήρωσης προσομοίωσης

5.1.1 Διαχείριση των πηγών

Η λογική κάθε ελέγχου επιτρέπει διαφορετική προσέγγιση στη διαχείριση των πηγών. Παρακάτω εξάγονται συμπεράσματα ως προς την αποτελεσματικότητα κάθε ελέγχου:

- Όσον αφορά στην κυψέλη καυσίμου, η βέλτιστη στρατηγική θα πρέπει να συνδυάζει την απρόσκοπτη τροφοδότηση του φορτίου με τη μικρότερη δυνατή διαστασιολόγηση της κυψέλης.
 1. Στον *OMC* έλεγχο, παρατηρούμε ότι η κυψέλη λειτουργεί στις ονομαστικές τιμές της (65 kW) το 80% του συνολικού χρόνου, ενώ το μέγιστο φορτίο (160 kW) το αποδίδει μόνο κατά το 18% του συνολικού χρόνου, με το 2% να αποδίδει το ελάχιστο 12.5 kW.
 2. Στον *CC* έλεγχο, η κυψέλη αποδίδει άνω των 120 kW στο 73% του συνολικού χρόνου με την ελάχιστη ισχύ να την αποδίδει στο 14% του συνολικού

χρόνου, ενώ το υπόλοιπο χρονικό διάστημα βρίσκεται σε συνθήκη ονομαστικής ισχύος.

3. Στον *FLC* έλεγχο αποδίδεται από την κυψέλη τυφλά στο 100% του χρόνου ισχύς 100 *kW*.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε, ότι οι ποιοτικές διαφορές των στρατηγικών, στη διαχείριση ισχύος της κυψέλης είναι μικρές. Διαλέγουμε όμως ως τη βέλτιστη για τον έλεγχο της κυψέλης, τον *OMC*, γιατί πετυχαίνει την καλύτερη σχέση κατανάλωσης - απόδοσης.

- Όσον αφορά στη μπαταρία, βέλτιστη στρατηγική είναι εκείνη που της επιτρέπει να ακολουθεί τόσο τη ζήτηση του φορτίου, όσο και τις διακυμάνσεις αυτού, ενώ παράλληλα να διατηρεί τα επίπεδα φόρτισής της εντός φυσιολογικών ορίων.
 1. Τόσο ο *OMC* όσο και ο *CC* έλεγχος καταφέρνουν να διατηρήσουν τα επίπεδα φόρτισης εντός φυσιολογικών ορίων. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι ο *OMC* ακολουθεί ακριβώς τη ζήτηση στο φορτίο, μέσω αφαίρεσης της τιμής ισχύος της κυψέλης από τη ζητούμενη ισχύ, ενώ ο *CC* καθορίζει την ισχύ της μπαταρίας προσεγγιστικά, λόγω του υπολογισμού της παραπάνω διαφοράς μέσω *PI* ελεγκτών.
 2. Ο *FLC* έλεγχος παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με τον *OMC* στην αποκρισιμότητα της πηγής, διαφέρουν όμως στα επίπεδα της αποδιδόμενης ισχύος της μπαταρίας, αφού ο *FLC* έχει αρνητική μέση τιμή ισχύος. Αυτός είναι και ο λόγος που το επίπεδο φόρτισης σε αυτή τη στρατηγική βρίσκεται σε καλύτερα επίπεδα απ' ό,τι στις άλλες δύο.

Απ' την παραπάνω σύγκριση αποδεικνύεται ότι για τον έλεγχο της μπαταρίας η στρατηγική *OMC*, παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά, αφού συνδυάζει ακολουθία στο επίπεδο ζήτησης του φορτίου, ικανοποιητική αποκρισιμότητα και φυσιολογικά επίπεδα φόρτισης.

- Για τον υπερπυκνωτή, η στρατηγική θα πρέπει να του επιτρέπει να απορροφάει την πλεονάζουσα ισχύ και να συμπληρώνει την υπολειπόμενη ισχύ, κρατώντας την τάση στο φορτίο σταθερή, ενώ παράλληλα διατηρώντας το επίπεδο φόρτισής του εντός φυσιολογικών ορίων.
 1. Ο *OMC* χρησιμοποιεί τον υπερπυκνωτή μόνο για την απορρόφηση της πλεονάζουσας ισχύος και συνολικά πολύ λιγότερο, σε σχέση με τον *CC*, ο οποίος του δίνει ενεργότερο ρόλο, στη διατήρηση της τάσης. Αυτό αποτυπώνεται και στη μεγαλύτερη σταθερότητα που παρουσιάζει στο επίπεδο φόρτισης κατά την εφαρμογή του *CC*, έναντι του *OMC*.
 2. Ο *FLC* χρησιμοποιεί καλύτερα από κάθε άλλη στρατηγική τον υπερπυκνωτή, έχοντας ίδια αποτελέσματα με την προσομοίωση των Garcia και Torreglosa, καταφέροντας παράλληλα να διατηρήσει το επίπεδο της φόρτισης σταθερό.

Η σύγκριση των στρατηγικών ελέγχου για την διαχείριση του υπερπυκνωτή, δείχνει κυρίως την ανωτερότητα των *FLC* και *CC*, με τον *CC* να παρουσιάζει οριακά υψηλότερα επίπεδα φόρτισης.

Συνολικά, είδαμε ότι όλες οι στρατηγικές ελέγχου αποδίδουν τη ζητούμενη ισχύ στο φορτίο, χωρίς ασυνέχειες. Η τάση στο φορτίο διατηρείται σταθερή και στις τρεις στρατηγικές. Επιπλέον, παρατηρήσαμε ότι η ενεργειακή κατεύθυνση, καθώς και η φύση του ελέγχου καθορίζουν τον τρόπο διαχείρισης των πηγών. Ο λόγος που η στρατηγική *OMC* κάνει τη βέλτιστη διαχείριση στην κυψέλη, είναι ότι τα διαφορετικά *modes* λειτουργιών καθορίζουν με βηματικό τρόπο τη στάθμη ισχύος της κυψέλης, ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας. Η στρατηγική *CC* χρησιμοποιεί μέσω των αναλογικών - ολοκληρωτικών ελεγκτών της, τις πηγές κοντά στα τεχνικά όρια τους, ακολουθώντας διαφορετική συμπεριφορά απ' τις υπόλοιπες στρατηγικές στην παροχή της ζητούμενης ισχύος, διατηρώντας το επίπεδο φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε φυσιολογικά επίπεδα. Η στρατηγική *FLC*, χρησιμοποιεί με το λιγότερο αποδοτικό τρόπο την κυψέλη για να πετύχει την καλύτερη διαχείριση μεταξύ των ελέγχων στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Τα παραπάνω συμπεράσματα, δίνονται περιληπτικά στον παρακάτω πίνακα, όπου ✓ σημαίνει "οριακά ικανοποιητική συμπεριφορά", ✓✓ σημαίνει "αρκετά καλή συμπεριφορά" και ✓✓✓ σημαίνει "πολύ καλή συμπεριφορά":

Πίνακας 5.1: Σύγκριση ενεργειακής διαχείρισης χαρακτηριστικών μεταξύ των τριών στρατηγικών (*OMC*, *CC*, *FLC*).

Χαρακτηριστικά	Operation Mode Control	Cascade Control	Fuzzy Logic Control
Διαχείριση Ισχύος Κυψέλης	✓✓✓	✓✓	✓
Διαχείριση Ισχύος Μπαταρίας	✓✓✓	✓✓	✓✓✓
Διαχείριση Ισχύος Υπερπυκνωτή	✓	✓✓✓	✓✓✓
Επίπεδο Φόρτισης Μπαταρίας	✓✓	✓	✓✓✓
Επίπεδο Φόρτισης Υπερπυκνωτή	✓✓	✓✓✓	✓
Διαχείριση Τάσης	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
Συνολική Παραγόμενη Ισχύς	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
Κατανάλωση Καυσίμου	✓✓✓	✓✓	✓
Σύνολο	20 (✓)	19 (✓)	18 (✓)

Η σύγκριση της ενεργειακής διαχείρισης των χαρακτηριστικών του μοντέλου, δείχνει πόσο μικρές είναι οι διαφορές μεταξύ των τριών στρατηγικών ελέγχου. Ωστόσο, η βέλτιστη στρατηγική από τη σκοπιά της ενεργειακής διαχείρισης είναι το *Operation Mode Control*.

5.1.2 Χρόνος ολοκλήρωσης προσομοίωσης

Ο χρόνος προσομοίωσης είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για την επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής ελέγχου, καθώς σε πραγματικές συνθήκες ένας ταχύτερος έλεγχος μπορεί να λάβει καίριες αποφάσεις, προλαμβάνοντας προβλήματα ή επιλύοντας κάποιο πριν αυτό μεγιστοποιηθεί. Βάσει της παραπάνω λογικής, πάρθηκαν μετρήσεις για τη συνολική χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της προσομοίωσης για κάθε στρατηγική και δίνονται παρακάτω:

- *Operation Mode Control*: $t_{sim} = 2574 \text{ sec}$

- *Cascade Control*: $t_{sim} = 2693 \text{ sec}$
- *Fuzzy Logic Control*: $t_{sim} = 3173 \text{ sec}$

Όπως και στα αποτελέσματα που προέκυψαν στο πείραμα των Garcia και Torreglosa [13], οι "απλές" στρατηγικές OMC, CC παρουσιάζουν καλύτερους χρόνους από την πολύπλοκη FLC. Απλές θεωρούνται εκείνες οι στρατηγικές, οι οποίες λειτουργούν μέσω αναλογικών - ολοκληρωτικών (PI) ελεγκτών, ενώ πολύπλοκη θεωρείται εκείνη η οποία λαμβάνει αποφάσεις μέσω λογικών κανόνων και συναρτήσεων μεταφορών. Απ'τις παραπάνω τιμές διακρίνουμε μέγιστη επιτάχυνση (speedup) της τάξης του 18.9%, όταν συγκρίνουμε το OMC με το FLC, ενώ οριακά πιο μικρή απόκλιση παρατηρείται ανάμεσα στις CC και FLC, με επιτάχυνση 17.8%.

Δεδομένου ότι το (**Operation Mode Control**) παρουσιάζει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες στρατηγικές, συνδυάζοντας ταχύτητα αποφάσεων, καθώς και ευκολία μεταφερσιμότητας και βελτιστοποίησης σε οποιοδήποτε μοντέλο, επιλέγεται ως η βέλτιστη στρατηγική ελέγχου για το σύστημα προώθησης του υβριδικού τρένου.

5.2 Μελλοντικές Τάσεις

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου είναι γνωστή πάνω από 100 χρόνια και ο βασικότερος άξονας ανάπτυξής της είναι ο τομέας των υλικών, γιατί είναι εκείνος που επιφέρει συνεχή αύξηση της πυκνότητας ισχύος και της μείωσης του όγκου. Τα ακριβά υλικά όμως που χρησιμοποιούνται στο στρώμα του ηλεκτρολύτη (Παλλάδιο, Λευκόχρυσος), καθώς και η ανάγκη αντικατάστασής τους μετά από κάποιο χρονικό διάστημα εμποδίζουν την ευρεία χρήση του. Για την πραγματική εξέλιξη της κυψέλης καυσίμου, είναι πολύ σημαντική η έρευνα προς την κατεύθυνση εύρεσης καινούριων μετάλλων, τα οποία θα πρέπει να παράγονται με σχετικό μικρό κόστος, να αντέχουν περισσότερο τη φθορά και να διευκολύνουν την κίνηση μεγαλύτερου ηλεκτρικού φορτίου.

Όσον αφορά τη μπαταρία, βλέπουμε ότι γίνονται πολλές προσπάθειες αύξησης της πυκνότητας ενέργειάς τους, ακόμη και από αυτοκινητοβιομηχανίες, όπως η Tesla Motors, έχοντας ήδη φτάσει σε υποσχόμενα αποτελέσματα, όμως ακόμη δεν έχει προχωρήσει η βιομηχανοποίησή τους. Οποιαδήποτε νέα τεχνολογία προσπεράσει αυτό το εμπόδιο και φτάσει στα χέρια των καταναλωτών αυτομάτως, αυξάνει τη χρησιμοποίηση των υβριδικών μέσων μεταφοράς έναντι των συμβατικών.

Οι υπερπυκνωτές είναι σχετικά νέα τεχνολογία και γνώρισε καθολική αποδοχή, κυρίως λόγω της ικανότητάς τους να αποδίδουν ακαριαία μεγάλα ποσά ισχύος. Έχουν ένα αρνητικό και αυτό είναι η χρήση συστατικών τους, τα οποία είναι φτιαγμένα από άνθρακα, το οποίο παρόλο που είναι το πιο φθηνό υλικό, χρειάζεται μεγάλα ποσά ισχύος και χημικών για την επεξεργασία του. Μετά από έρευνες σε συλλογικό επίπεδο, εφευρέθηκε νέα τάξη υλικών, και συγκεκριμένα υλικά με μεταλλο - οργανικό σκελετό (*Metal - Organic Framework - MOFs*), τα οποία συνδυάζουν επιφάνεια πολλών πόρων και μεγάλου εμβαδού, αλλά το κύριο πλεονέκτημά τους, είναι η πλήρη προσαρμογή των χημικών χαρακτηριστικών τους, επιτρέποντας ηλεκτρική αγωγιμότητα μεγαλύτερη εκείνης του άνθρακα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι πολλά υποσχόμενα, αφού χωρίς καμία βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών των νέων υλικών και ενώ η μετρούμενη αγωγιμότητά τους ήταν πολύ μικρότερη του άνθρακα, οι νέοι υπερπυκνωτές πέτυχαν απόδοση ισάξια - αν όχι καλύτερη - με τους "συμβατικούς".

Τέλος, εξελίξεις υπάρχουν και στον τομέα του ελέγχου. Συγκεκριμένα έχουν προταθεί στρατηγικές ελέγχου με πρόβλεψη επόμενων καταστάσεων (Model Predictive Control), καθώς και τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούν εκμάθηση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Networks) με σκοπό τη μέγιστη δυνατή διαχείριση της διαθέσιμης ενέργειας.

Βιβλιογραφία

- [1] Wikipedia. *Electric locomotive* — *Wikipedia, the free encyclopedia*. 2014. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_locomotive.
- [2] Μ. Μίχαλος. Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα Τρένων. Master's thesis, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, 2010.
- [3] P. J. Baumgartner. *Prices and costs in the railway sector*. Tech. rep., January 2001. URL <http://litep.epfl.ch/>.
- [4] A.R.Miller, K.S.Hess, D.L.Barnes and T.L.Erickson. *System design of a large fuel cell hybrid locomotive*. Journal of Power Sources, 2007.
- [5] K. L. Hubert. *Economic and technical assessment of hydrogen and fuel cells opportunities in the norwegian transport sector*. Tech. rep., June 2005.
- [6] J. Larminie and A. Dicks. *Fuel Cell System Explained*. Wiley, 2nd ed., 2003.
- [7] Wikipedia. *Supercapacitor* — *Wikipedia, the free encyclopedia*. 2014. URL <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>.
- [8] Wikipedia. *Lithium-ion battery* — *Wikipedia, the free encyclopedia*. 2014. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery.
- [9] F.Vasca and L.Iannelli. *Dynamics and Control of Switched Electronic Systems*. Springer - Verlag London Limited, January 2012. ISBN 978-1-4471-2884-7.
- [10] Wikipedia. *Pid controller* — *Wikipedia, the free encyclopedia*. 2012. URL https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller.
- [11] Wikipedia. *Buck–boost converter* — *Wikipedia, the free encyclopedia*. 2014. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Buck%E2%80%93boost_converter.
- [12] Wikipedia. *Buck converter* — *Wikipedia, the free encyclopedia*. 2014. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter.
- [13] P. Garcia, J. Torreglosa, L. M.Fernandez and F. Jurado. *Control strategies for high-power electric vehicles powered by hydrogen fuel cell, battery and supercapacitor*. Elsevier, vol. 40(12):pp. 4791–4804, 2013. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2013.02.028>.

- [14] rp. FC-Velocity-HD6. Ballard Power Systems, Inc., 9000 Glenlyon Parkway / Burnaby, British Columbia / Canada, V5J 5J8. URL <http://ballard.com/power-products/motive-modules/light-rail/Velocity.aspx>.
- [15] rp. TS-LFP90AHA. ThunderSky, Inc.. URL http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp100aha?category_id=176.
- [16] rp. BMOD0063 P125 B04. Maxwell Technologies, Inc., Global Headquarters, 3888 Calle Fortunata, San Diego, CA 92123, USA. URL <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/125v-tran-modules/documents>.
- [17] P. Garcia, J. Torreglosa, L. M.Fernandez and F. Jurado. *Operation mode control of a hybrid power system based on fuel cell/battery/ultracapacitor for an electric tramway*. Elsevier, vol. 39(7):pp. 1993–2004, 2013. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.compeleceng.2013.04.022>.
- [18] H. Hemi, J. Ghouili and A. Cheriti. *A real time fuzzy logic power management strategy for a fuel cell vehicle*. Elsevier, vol. 80:pp. 63–70, 2014. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.040>.
- [19] Α. Πετράκη. Κατασκευή DC-DC μικροδικτύου σε περιβάλλον Matlab/Simulink και μελέτη τεχνικών ελέγχου. Master's thesis, National Technical University of Athens, 2015.
- [20] N. Mohan. *Power Electronics and Drives*. MNPERE, 1st ed., 2003.
- [21] A. M. et al. *Design and analysis of high frequency dc-dc converters for fuel cell and super-capacitor used in electrical vehicle*. Elsevier, vol. 39(3):pp. 1580–1592, 2014. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.04.086>.
- [22] K. W. Suh. *Modeling, Analysis and Control of Fuel Cell Hybrid Power Systems*. Master's thesis, University of Mishigan, 2011.
- [23] Wikipedia. *Fuel cell — Wikipedia, the free encyclopedia*. 2013. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell.
- [24] Abdul-Hawa. *Investigation of control problems of the PEM fuel cell for variable power demand*. Ph.D. thesis, Coventry University, 2011.
- [25] F. M. et al. *Pemfc system simulation in matlab-simulink enviroment*. Elsevier, vol. 36(13):pp. 8045–8052, 2010. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.093>.