



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη και προσομοίωση της
χρήσης κυψελών καυσίμου για
την τροφοδοσία συστήματος
ισχύος έκτακτης ανάγκης
αεροσκαφών

Συγγραφέας:
Γεώργιος Καρτσωνάκης

Επιβλέπων:
Σταυρακάκης Γεώργιος

Εξεταστική επιτροπή:
Σταυρακάκης Γεώργιος
Κουτρούλης Ευτύχιος
Κανέλλος Φώτιος

Χανιά Ιούνιος, 2022

Περίληψη

Στις μέρες μας η διαχείριση της ενέργειας και η μείωση του περιβαλλοντικού κόστους αποτελούν μία από τις μεγαλύτερες ανησυχίες παγκοσμίως. Οι επιπτώσεις από την καύση των συμβατικών καυσίμων, μαζί με την εξαντλησιμότητα των καυσίμων, δικαιολογημένα καθιστούν επιτακτική την ανάγκη έρευνας και ανάπτυξης νέων καυσίμων καθώς και την αξιοποίηση διαφορετικών μορφών ενέργειας. Η συνεχόμενη ανάπτυξη τομέων όπως των ηλεκτρονικών ισχύων, των μέσων ενεργειακής αποθήκευσης κτλ σε συνδυασμό με την αλματώδη ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων ωρίμασαν τις προϋποθέσεις για την χρήση ηλεκτρικών μέσων μεταφοράς.

Στον τομέα των μεταφορών, η προοπτική αντικατάστασης των κινητήρων εσωτερικής καύσης με εναλλακτικές τεχνολογίες παροχής ενέργειας-ισχύος αποτελεί τις τελευταίες δεκαετίες αντικείμενο δεκάδων ερευνών. Μία από τις πιο πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες ως προς την καλύτερη μελλοντική αντικατάσταση των κινητήρων εσωτερικής καύσης αποτελούν οι κυψέλες καυσίμου (FCs), των οποίων το μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε συνδυασμό με την υψηλή αποτελεσματικότητα τους αποσκοπούν στο άμεσο μέλλον στην ευρεία χρήση τους σε λεωφορεία, τρένα, πλοία και αεροσκάφη.

Στο τομέα των αεροσκαφών η προοπτική αντικατάστασης των προωθητικών τους συστημάτων με ηλεκτρικής φύσεως συστήματα αποτελεί εξαιτίας της πολυπλοκότητας των απαιτήσεων μια ιδιαίτερη πρόκληση. Σε πρώτο στάδιο η προσπάθεια αντικατάστασης της τροφοδοσίας των μη προωθητικών συστημάτων των αεροσκαφών με συστήματα που βασίζονται στην χρήση ηλεκτρικής ενέργειας έχει ήδη αρχίσει να εμφανίζεται στον τομέα των αερομεταφορών. Υβριδικά συστήματα βασισμένα σε τεχνολογία κυψελών καυσίμου έχουν τραβήξει το ενδιαφέρον των ερευνητών. Η υβριδοποίηση των συστημάτων κυψελών καυσίμου με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως είναι οι μπαταρίες και οι υπερπυκνωτές, κρίνεται αναγκαία για την αύξηση της αποτελεσματικότητας τους, της οικονομίας καυσίμου και την ταχύτατη αποκρισιμότητα του συστήματος στις απαιτούμενες μεταβολές του φορτίου ζήτησης. Προκειμένου να γίνουν εμφανή τα πλεονεκτήματα της υβριδοποίησης ο σχεδιασμός αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας (EMS) των οποίων σκοπός αποτελεί η σωστή κατανομή της απαιτούμενης ισχύς μεταξύ των κυψελών καυσίμου και των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να προτείνει έναν εναλλακτικό τρόπο τροφοδοσίας των μη προωθητικών συστημάτων των αεροσκαφών πέρα από τον συμβατικό που μέχρι στιγμής στηρίζεται στην τροφοδοσία από τους κύριους κινητήρες. Συγκεκριμένα στο περιβάλλον Simulink του Matlab μοντελοποιείται ένα

υβριδικό σύστημα ενέργειας κυψελών καυσίμου σε συνδυασμό με μπαταρία και υπερπυκνωτή με σκοπό την προοπτική της αντικατάστασης της τροφοδοσίας του συστήματος ισχύος έκτακτης ανάγκης των αεροσκαφών, το οποίο αποτελείται από έναν συμβατικό αεροστρόβιλο εμβόλου είτε από μια γεννήτρια αέρος. Η σύγκριση και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα των εφαρμοζόμενων στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας ως προς την εξοικονόμηση του καυσίμου, την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, το ποσοστό συμμετοχής της κάθε πηγής στην κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου, η συνολική αποτελεσματικότητα και η τήρηση των τεχνικών περιορισμών του συστήματος, αποτελεί ένα ακόμη αντικείμενο έρευνας την παρούσας εργασίας.

Λέξεις Κλειδιά— Υβριδικό σύστημα ισχύος, κυψέλη καυσίμου, μπαταρία, υπερπυκνωτής, μετατροπείς τάσης, στρατηγική διαχείρισης ενέργειας, State Machine Control Strategy, Classical PI Control Strategy, Rule-Based Fuzzy Logic Strategy, Equivalent Consumption Minimization Strategy, External Energy Maximization Strategy

ABSTRACT

Nowadays energy management and reduction of environmental costs is one of the biggest concerns worldwide. The effects of burning conventional fuels, together with the exhaustibility of fuels, justifiably make the need for research and development of new fuels as well as the utilization of different forms of energy imperative. The continuous development of sectors such as electronic power, energy storage media, etc., combined with the rapid development of computer systems, have matured the conditions for the use of electric means of transport.

In the field of transportation, the prospect of replacing internal combustion engines with alternative energy-power supply technologies has been the subject of dozens of researches in recent decades. One of the most promising technologies for the best future replacement of internal combustion engines are fuel cells (FCs), whose zero environmental footprint combined with their high efficiency aim for their widespread use in the near future on buses, trains, ships and planes.

In the aircraft sector, the prospect of replacing their propulsion systems with electrical systems is a particular challenge due to the complexity of the requirements. In the first stage, the attempt to replace the power supply of the non-propulsion systems of aircraft with systems based on the use of electrical energy has already begun to appear in the aviation sector. Hybrid systems based on fuel cell technology have attracted the interest of researchers. The hybridization of fuel cell systems with energy storage systems such as batteries and supercapacitors is considered necessary to increase their efficiency, fuel economy and the rapid responsiveness of the system to the required changes in demand load. In order to realize the advantages of hybridization, the design of efficient energy management strategies (EMS) whose purpose is the correct distribution of the required power between fuel cells and energy storage systems, is a necessary condition.

The **purpose** of this thesis is to propose an alternative way of powering the non-propulsion systems of aircraft beyond the conventional one that so far relies on powering from the main engines. Specifically a hybrid fuel cell electrical energy system combined with battery and supercapacitor is modeled through Matlab's Simulink environment with a view to replacement of power supply of aircraft emergency power system, which consists of a piston air turbine either of an air generator. The comparison and the drawing of conclusions regarding the efficient of the applied energy management strategies in terms of saving fuel, battery state of charge, the percentage of each source participation in covering the required load, the overall efficiency

and observance of system technical limitations, is one more subject of research in this paper.

Keywords—Hybrid power system, fuel cell, battery, supercapacitor, voltage converters, energy management strategy, State Machine Control Strategy, Classical PI Control Strategy, Rule-Based Fuzzy Logic Strategy, Equivalent Consumption Minimization Strategy, External Energy Maximization Strategy

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης μαζί με όλο το προσωπικό που το στελεχώνει για την κατάρτιση γνώσεων και την εκπαίδευση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια αλλά και για την χάραξη της έναρξης της επαγγελματικής μου σταδιοδρομίας.

Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στον Καθηγητή μου Γεώργιο Σταυρακάκη, για την ευκαιρία που μου παρείχε να εκπονήσω μαζί του την διπλωματική εργασία και σαφώς για την αμέριστη υποστήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχε ανά πάσα ώρα και στιγμή έως την ολοκλήρωση της εργασίας. Ένα ευχαριστώ στους γονείς μου, Μανώλη και Φιλοθέη είναι το ελάχιστο για την πάσης φύσεως προσφορά τους στο πρόσωπο μου μέχρι και σήμερα.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να ξεχάσω τα τέσσερα ξεχωριστά για εμένα φιλαράκια και συνοδοιπόρους μου Γιάννη, Γιώργο, Νικόλα και Στέφανο για την αδιάκοπη και ανιδιοτελή συμπαράστασή τους.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	2
1.1	Κυψέλες Καυσίμου	3
1.1.1	Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου	4
1.1.2	Είδη κυψελών καυσίμου	5
1.2	Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας	6
1.2.1	Μπαταρία	6
1.2.1.1	Μπαταρίες Μολύβδου-Οξέος (Lead-Acid Battery)	7
1.2.1.2	Μπαταρία Νικελίου-Καδμίου (Ni-Cd)	7
1.2.1.3	Μπαταρία Νικελίου-Υδριδίου Μετάλλου (Ni-MH)	7
1.2.1.4	Μπαταρία ιόντων λιθίου (Lithium-ion)	8
1.3	Υπερπυκνωτής	9
1.4	Μετατροπείς ισχύος	11
1.4.1	Έλεγχος DC-DC μετατροπέων	11
1.4.2	Σύστημα ελέγχου (PID)	12
1.4.3	Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης	13
1.4.4	Μετατροπέας ανύψωσης τάσης	14
1.4.5	Μετατροπέας DC to AC (Inverter)	16

2 Αρχιτεκτονική & Μοντελοποίηση Υβριδικού Συστήματος Ισχύος

Έκτακτης Ανάγκης Αεροσκάφους	17
2.1 Αρχιτεκτονική Υβριδικού Συστήματος Τροφοδοσίας Συστήματος Ισχύος Έκτακτης Ανάγκης Αεροσκάφους	17
2.2 Μοντελοποίηση Υβριδικού Συστήματος Τροφοδοσίας Συστήματος Ι- σχύος Έκτακτης Ανάγκης Αεροσκάφους	20
2.2.1 Μοντέλο Κυψέλης Καυσίμου & DC-DC Μετατροπέα Τάσης . .	20
2.2.1.1 Μοντέλο Κυψέλης Καυσίμου	20
2.2.1.2 Μοντέλο DC-DC Μετατροπέα Ανύψωσης Τάσης Κυ- ψέλης Καυσίμου	28
2.2.2 Μοντέλο Μπαταρίας & DC-DC Μετατροπέα Ανύψωσης και Υ- ποβιβασμού Τάσης Μπαταρίας	30
2.2.2.1 Μοντέλο Μπαταρίας	32
2.2.2.2 DC-DC Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης και Υποβιβα- σμού Τάσης Μπαταρίας	36
2.2.3 Μοντέλο Υπερπυκνωτή	40
2.2.4 DC-AC μετατροπέας τάσης DC δίαυλου	44
2.2.5 Σύστημα Προγραμματιζόμενου DC-AC Φορτίου	46
2.2.6 Στρατηγικές Διαχείρισης Ενέργειας	48
2.2.6.1 Στρατηγική Ελέγχου Συγκεκριμένου Αριθμού Κατα- στάσεων (State Machine Control Strategy)	50
2.2.6.2 Στρατηγική ελέγχου κλασσικού PI ελεγκτή (Classical PI Control Strategy)	53
2.2.6.3 Στρατηγική Ελέγχου Ασαφούς Λογικής βασισμένη σε κανόνες (Rule-Based Fuzzy Logic Strategy)	54
2.2.6.4 Στρατηγική ελέγχου ισοδύναμης ελαχιστοποίησης κα- τανάλωσης (Equivalent Consumption Minimization Strategy-ECMS)	58
2.2.6.5 Στρατηγική ελέγχου μεγιστοποίησης εξωτερικής ενέρ- γειας (External Energy Maximization Strategy-EEMS).	59

3 Παρουσίαση Ανάλυση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	63
3.1 State Machine Control Strategy	63
3.1.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων State Machine Control Strategy .	63
3.1.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων State Machine Control Strategy . .	68
3.1.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων State Machine Control Strategy .	71
3.2 Classical PI Control Strategy	73
3.2.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Classical PI Control Strategy . .	73
3.2.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Classical PI Control Strategy	77
3.2.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Classical PI Control Strategy . .	78
3.3 Rule-Based Fuzzy Logic Strategy	79
3.3.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Rule-Based Fuzzy Logic Strategy	79
3.3.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Rule-Based Fuzzy Logic Strategy . .	83
3.3.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Rule-Based Fuzzy Logic Strategy	84
3.4 Equivalent Consumption Minimization Strategy	85
3.4.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Equivalent Consumption Mini- mization Strategy	85
3.4.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Equivalent Consumption Minimization Strategy	89
3.4.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Equivalent Consumption Mini- mization Strategy	90
3.5 External Energy Maximization Strategy	91
3.5.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων External Energy Maximization Strategy	91
3.5.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων External Energy Maximization Strat- egy	95
3.5.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων External Energy Maximization Strategy	96

3.6	Σύγκριση Στρατηγικών Διαχείρισης Ενέργειας Υβριδικού Συστήματος Τροφοδοσίας Συστήματος Ισχύος Αεροσκάφους	97
3.6.1	Σύγκριση στρατηγικών ως προς το ποσοστό συμμετοχής της κάθε πηγής στην κάλυψη του φορτίου ζήτησης	97
3.6.2	Σύγκριση στρατηγικών ως προς τον βαθμό εκφόρτισης της μπαταρίας	100
3.6.3	Σύγκριση στρατηγικών ως προς την διατήρηση της τάσης του DC δίαυλου	102
3.6.4	Σύγκριση στρατηγικών ως προς την οικονομία της κατανάλωσης καυσίμου.	103
3.6.5	Σύγκριση ως προς την συνολική αποτελεσματικότητα (Overall Efficiency) στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας.	106
4	Συμπεράσματα-Μελλοντικές Προοπτικές	109
4.1	Συμπεράσματα	109
4.2	Μελλοντικές Προοπτικές	110

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Δομή κυψέλης καυσίμου.	4
1.2	Δομή στοίβας κυψέλης καυσίμου.	4
1.3	Διάγραμμα κλειστού βρόχου PID ελεγκτή.	12
1.4	Δομή μετατροπέα υποβιβασμού τάσης	13
1.5	Δομή μετατροπέα ανύψωσης τάσης	15
1.6	Δομή μετατροπέα πλήρους γέφυρας	16
2.1	Καμπύλη ισχύος ενός τυπικού σεναρίου προσγείωσης έκτακτης ανάγκης.	18
2.2	Συνολικό σχήμα συστήματος.	18
2.3	Λεπτομερές μοντέλο στοίβας κυψέλης καυσίμου.	21
2.4	Χαρακτηριστική τάσης V_S ρεύματος, ισχύος V_S ρεύματος στοίβας κυψέλης καυσίμου.	26
2.5	Χαρακτηριστική ισχύος V_S απόδοσης στοίβας κυψέλης καυσίμου.	27
2.6	Υλοποίηση του μοντέλου της στοίβας κυψέλης καυσίμου στο περιβάλλον Simulink.	27
2.7	Αποτελέσματα διακοπτικού μοντέλου και μοντέλο μέσου όρου.	29
2.8	Απεικόνιση κυκλώματος μοντέλου μετατροπέα ανύψωσης τάσης μέσης τιμής.	29
2.9	Κύκλωμα και λειτουργία DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης μέσου όρου.	31

2.10	Υλοποίηση του μοντέλου DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης στο περιβάλλον Simulink.	31
2.11	Υποσύστημα ρυθμιστή ρεύματος μετατροπέα ανύψωσης τάσης στο περιβάλλον Simulink.	32
2.12	Γενικό μοντέλο μπαταρίας ιόντων-λιθίου	34
2.13	Μοντέλο μπαταρίας στο περιβάλλον Simulink.	34
2.14	Παραμετροποίηση τιμών μπαταρίας στο Simulink.	36
2.15	Χαρακτηριστικές εκφόρτισης μπαταρίας για ρεύματα εκφόρτισης 17.3913 A (ονομαστικό), 20 A και 80 A	37
2.16	Απεικόνιση κυκλώματος μοντέλου μετατροπέα υποβιβασμού μέσης τιμής.	38
2.17	Κύκλωμα και λειτουργία DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης μέσου όρου.	39
2.18	Υλοποίηση του μοντέλου DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης στο περιβάλλον Simulink.	39
2.19	Υποσύστημα ρυθμιστή ρεύματος μετατροπέα υποβιβασμού στο περιβάλλον Simulink.	40
2.20	Γενικό μοντέλο υπερπυκνωτή.	41
2.21	Μοντέλο υπερπυκνωτή στο περιβάλλον Simulink.	41
2.22	Παραμετροποίηση τιμών υπερπυκνωτή στο Simulink.	44
2.23	Χαρακτηριστικές εκφόρτισης υπερπυκνωτή για ρεύματα εκφόρτισης 10 A, 20 A, 100 A και 500 A.	44
2.24	Κύκλωμα και λειτουργία DC-AC τριφασικού ανορθωτή τάσης μέσου όρου.	45
2.25	Υλοποίηση του μοντέλου DC-AC τριφασικού ανορθωτή τάσης στο περιβάλλον Simulink.	45
2.26	Παραμετροποίηση τιμών ημιτονοειδούς σήματος στο Simulink.	46
2.27	Καμπύλη ισχύς φορτίου.	47
2.28	Συνολικό μοντέλο υβριδικού συστήματος τροφοδοσίας συστήματος ισχύος έκτακτης ανάγκης αεροσκάφους στο Simulink.	48
2.29	DC-Bus Voltage Controller Schematic	50

2.30 Κοινό υποσύστημα του DC-Bus Voltage Controller στο Simulink. . . .	50
2.31 Σχέση αποτελεσματικότητας VS εξόδου ισχύος στοίβας κυψέλης καυσίμου.	52
2.32 State Machine Control Strategy.	53
2.33 State Machine Control Strategy στο Simulink.	53
2.34 Classical PI Control Strategy Schematic.	54
2.35 Classical PI Control Strategy στο Simulink.	54
2.36 Rule-Based Fuzzy Logic Strategy Schematic. [1ζμ]	56
2.37 Rule-Based Fuzzy Logic Strategy στο Simulink.	56
2.38 Συναρτήσεις μέλους (MFs) εισόδων και εξόδων συστήματος ασαφούς λογικής.	56
2.39 Εξάρτηση P_{fc} από τα SOC και P_{load}	57
2.40 Equivalent Consumption Minimization Strategy Schematic.	60
2.41 Equivalent Consumption Minimization Strategy στο Simulink.	60
2.42 External Energy Maximization Strategy Schematic.	62
2.43 External Energy Maximization Strategy στο Simulink.	62
3.1 Ισχύς κυψέλη καυσίμου κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.	64
3.2 Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.	65
3.3 Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.	65
3.4 Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.	66
3.5 Συνολική παραγόμενη ισχύς πηγών κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.	66
3.6 Επίπεδο φόρτισης μπαταρίας κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.	67

3.7	Τάση και ρεύμα μπαταρίας κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.	67
3.8	Τάση DC διαύλου κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.	68
3.9	Μεγεθυμένη απεικόνιση της ισχύος πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy στο χρονικό διάστημα $t = 0 - 110 s$	68
3.10	Μεγεθυμένη απεικόνιση της ισχύος πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή του State Machine Control Strategy στο χρονικό διάστημα $t = 110 - 350 s$	70
3.11	Ισχύς κυψέλη καυσίμου κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.	74
3.12	Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.	74
3.13	Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.	74
3.14	Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.	75
3.15	Συνολική παραγόμενη ισχύς πηγών κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.	75
3.16	Επίπεδο φόρτισης μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.	76
3.17	Τάση και ρεύμα μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.	76
3.18	Τάση DC διαύλου κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.	77
3.19	Ισχύς κυψέλη καυσίμου κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.	80
3.20	Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.	80
3.21	Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.	80
3.22	Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.	81

3.23	Συνολική παραγόμενη ισχύς πηγών κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.	81
3.24	Επίπεδο φόρτισης μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.	82
3.25	Τάση και ρεύμα μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.	82
3.26	Τάση DC διαύλου κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.	83
3.27	Ισχύς κυψέλη καυσίμου κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.	86
3.28	Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.	86
3.29	Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.	86
3.30	Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.	87
3.31	Συνολική παραγόμενη ισχύς πηγών κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.	87
3.32	Επίπεδο φόρτισης μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.	88
3.33	Τάση και ρεύμα μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.	88
3.34	Τάση DC διαύλου κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.	89
3.35	Ισχύς κυψέλη καυσίμου κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.	91
3.36	Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.	92
3.37	Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.	92
3.38	Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.	93

3.39 Συνολική παραγόμενη ισχύς πηγών κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.	93
3.40 Επίπεδο φόρτισης μπαταρίας κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.	94
3.41 Τάση και ρεύμα μπαταρίας κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.	94
3.42 Τάση DC διαύλου κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.	95
3.43 Σύγκριση ισχύος κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιώντας διαφορετικές στρατηγικές.	98
3.44 Σύγκριση ισχύος μπαταρίας χρησιμοποιώντας διαφορετικές στρατηγικές.	99
3.45 Σύγκριση ισχύος υπερπυκνωτή χρησιμοποιώντας διαφορετικές στρατηγικές.	99
3.46 Ποσοστά προσφοράς της κάθε πηγής ενέργειας στην συνολική κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου για κάθε στρατηγική.	100
3.47 Σύγκριση SOC μπαταρίας χρησιμοποιώντας διαφορετικές στρατηγικές.	101
3.48 Ποσοστά εκφόρτισης μπαταρίας για κάθε στρατηγική.	101
3.49 Σύγκριση τάσης DC διαύλου χρησιμοποιώντας διαφορετικές στρατηγικές.	102
3.50 Ποσοστά μεταβολής τάσης του DC διαύλου για κάθε στρατηγική.	103
3.51 Ροή υδρογόνου και κατανάλωση καυσίμου της State Machine στρατηγικής.	103
3.52 Ροή υδρογόνου και κατανάλωση καυσίμου της Classical PI στρατηγικής.	104
3.53 Ροή υδρογόνου και κατανάλωση καυσίμου της Rule-Based Fuzzy Logic στρατηγικής.	104
3.54 Ροή υδρογόνου και κατανάλωση καυσίμου της ECMS στρατηγικής.	104
3.55 Ροή υδρογόνου και κατανάλωση καυσίμου της EEMS στρατηγικής.	105
3.56 Κατανάλωση καυσίμου για κάθε στρατηγική ελέγχου.	105
3.57 Συνολική αποτελεσματικότητα για κάθε στρατηγική ελέγχου.	106
3.58 Συνολική αποτελεσματικότητα για κάθε στρατηγική ελέγχου.	107

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Πρώτος πίνακας σύνοψης βασικών χαρακτηριστικών κυψελών καυσίμου.	5
1.2	Συνέχεια πρώτου πίνακα σύνοψης βασικών χαρακτηριστικών κυψελών καυσίμου.	5
1.3	Τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών.	9
1.4	Σύγκριση χαρακτηριστικών υπερπυκνωτή με συμβατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.	10
1.5	Επίδραση από τις αλλαγές των κερδών K_p , K_i και K_d	13
2.1	Παραμετροποίηση τιμών κυψέλης καυσίμου στο Simulink.	26
2.2	Παραμετροποίηση τιμών μπαταρίας στο Simulink.	36
2.3	Παραμετροποίηση τιμών μπαταρίας στο Simulink.	43
2.4	Καταστάσεις λειτουργίας State Machine Control Strategy	51
2.5	Ασαφείς κανόνες συστήματος ασαφούς λογικής (τύπου Mamdani).	57
3.1	Πίνακας σύνοψης κριτηρίων σύγκρισης στρατηγικών.	108

Σύνοψη κεφαλαίων

Η παρούσα εργασία έχει δομηθεί ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή ως προς την χρήση των κυψελών καυσίμου σε υβριδικά συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης στον τομέα των μεταφορών και γίνεται μια σύντομη αναφορά στα δομικά στοιχεία τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε για την σχεδίαση και την μοντελοποίηση τους συστήματος μας.
- Στο Κεφάλαιο 2 πρόκειται να περιγραφεί η αρχιτεκτονική του υβριδικού συστήματος τροφοδοσίας του συστήματος ισχύος έκτακτης ανάγκης του αεροσκάφους και θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκε κάθε βασικό στοιχείο του υβριδικού συστήματος στο προσομοιωτικό περιβάλλον του Simulink προκειμένου να επιτύχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.
- Στο Κεφάλαιο 3 πρόκειται να παρουσιαστούν, να αναλυθούν και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του υβριδικού συστήματος τροφοδοσίας του συστήματος ισχύος έκτακτης ανάγκης του αεροσκάφους για συγκεκριμένο προφίλ φορτίου, για κάθε μία από τις πέντε εξεταζόμενες στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας.
- Στο κεφάλαιο 4 γίνεται μια εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς τα αποτελέσματα που πήραμε και αναφέρονται ορισμένα από τα εμπόδια που παρουσιάζονται σχετικά με την εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου και προτείνονται ορισμένες βελτιώσεις και μελλοντικές έρευνες που μπορούν να γίνουν ως συνέχεια της παρούσας εργασίας.

1 Εισαγωγή

Δεκάδες έρευνες στον τομέα των μεταφορών έχουν επικεντρωθεί τα τελευταία χρόνια στη χρήση κυψελών καυσίμου σε υβριδικά συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης προκειμένου να μειωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Ένα υβριδικό σύστημα πρόωσης κυψελών καυσίμου το οποίο συνδυάζει μία κυψέλη καυσίμου ως κύρια πηγή ισχύος και μια μπαταρία και έναν υπερπυκνωτή ως δευτερεύουσες πηγές ισχύος, παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα :

1. παροχή γρήγορης και πρόσθετης ισχύος κατά την αιχμή ζήτησης φορτίου όπως κατά την διάρκεια εκκινήσεων και επιταχύνσεων, δεδομένου ότι η κυψέλη καυσίμου έχει αργό χρόνο ανταπόκρισης και περιορισμένη ισχύ εξόδου.
2. μείωση του συνολικού μεγέθους του συστήματος καθώς οι μπαταρίες είναι γενικά φθηνότερες από τις κυψέλες καυσίμου σε σύγκριση ανά κιλοβάτ.
3. δίνεται η δυνατότητα εφαρμογής στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας προκειμένου να διασφαλιστεί η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε περιοχές λειτουργίας με υψηλότερες αποδόσεις προκειμένου να επιτευχθεί για παράδειγμα μεγαλύτερη εξοικονόμηση καυσίμου.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί αρκετές παραλλαγές υβριδικών συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης για χρήση στις μεταφορές. Στην έρευνα που έγινε στην [1] εξετάζεται η χρήση υβριδικού συστήματος κυψελών καυσίμου σε συνδυασμό με μπαταρία στις θαλάσσιες μεταφορές για την πρόωση πλοίου. Μια ακόμη έρευνα που αφορά τις χερσαίες μεταφορές και έγινε στην [2] πραγματεύεται τον σχεδιασμό, την μοντελοποίηση και τον έλεγχο ενός υβριδικού συστήματος κυψέλης καυσίμου με μπαταρίες για την πρόωση τραμ στην Σεβίλη της Ισπανίας.

Οι προσπάθειες της βιομηχανίας των αεροσκαφών σχετικά με την βελτιστοποίηση της απόδοσης των αεροσκαφών, την μείωση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης καθώς και της μείωσης των εκπομπών καυσαερίων τις ωθούν στο εγχείρημα ενός υβριδικού ηλεκτρικού αεροσκάφους. Με τον όρο του ηλεκτρικού αεροσκάφους εννοούμε την χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για την τροφοδοσία σε πρώτη φάση των μη προωθητικών συστημάτων αεροσκαφών (αντλίες καυσίμου, ηλεκτρικές γεννήτριες, κινητήρες στροβίλου, αντιπαγοποιητές φτερών, ενεργοποιητές ελέγχου πτήσης, φρένα συστήματος προσγείωσης, φωτισμός κ.τ.λ) που μέχρι στιγμής τροφοδοτούνται από την κύρια

μηχανή του αεροσκάφους [3]. Τα περισσότερα επομένως από τα υδραυλικά και μηχανικά εξαρτήματα του αεροσκάφους αντικαθίστανται με ηλεκτρικά, με αποτέλεσμα ένα πιο αξιόπιστο και ελαφρύτερο αεροσκάφος οδηγώντας εκτός των άλλων σε σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου και χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτείνεται ένας εναλλακτικός τρόπος τροφοδοσίας του συστήματος ισχύος έκτακτης ανάγκης των αεροσκαφών, το οποίο αποτελείται από έναν συμβατικό αεροστρόβιλο εμβόλου είτε από μια γεννήτρια αέρος [4]. Θα μοντελοποιηθεί στο Simulink του Matlab ένα υβριδικό σύστημα ενέργειας κυψελών καυσίμου σε συνδυασμό με μπαταρία και υπερπυκνωτή με στόχο την κάλυψη του φορτίου ζήτησης για δεδομένο αντιπροσωπευτικό προφίλ φορτίου προσγείωσης έκτακτης ανάγκης του αεροσκάφους. Τέλος εφαρμόζονται και εξετάζονται ως προς την αποτελεσματικότερη κατανομή ενέργειας μεταξύ των πηγών οι παρακάτω στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας, State Machine Control Strategy, Classical PI Control Strategy, Rule-Based Fuzzy Logic Strategy, Equivalent Consumption Minimization Strategy, External Energy Maximization Strategy. Η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα των παραπάνω πέντε στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας ως προς την εξοικονόμηση του καυσίμου, την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, το ποσοστό συμμετοχής της κάθε πηγής στην κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου, την συνολική αποτελεσματικότητα και η τήρηση των τεχνικών περιορισμών του συστήματος αποτελεί αντικείμενο έρευνας της παρούσας εργασίας.

1.1 Κυψέλες Καυσίμου

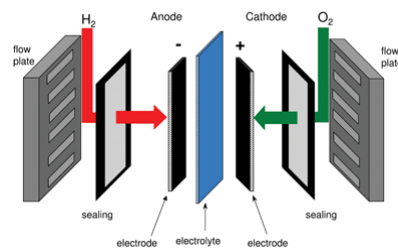
Η ιστορία της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου ξεκινάει ήδη από το μακρινό 1839 όπου εφευρέθηκαν για πρώτη φορά από τον Ουαλό επιστήμονα William Robert Grove και μέχρι τη δεκαετία του 1960 δεν είχαν χρησιμοποιηθεί εμπορικά. Ως μέρος του έργου Gemini, το οποίο έλαβε μέρος το 1962-1966, η NASA χρησιμοποίησε τις κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ενέργειας για ανιχνευτές, δορυφόρους και διαστημικές κάψουλες. Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν την χημική ενέργεια του υδρογόνου ή άλλων καυσίμων για την παραγωγή καθαρής και αποτελεσματικής ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες οι οποίες βασίζονται στην καύση και συναντώνται στις μονάδες παραγωγής ενέργειας και στα οχήματα, οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα. Συνοπτικά μπορούν να λειτουργούν με υψηλότερες αποδόσεις από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης και μπορούν να μετατρέψουν την χημική ενέργεια του καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια με αποδόσεις ικανές να ξεπερνούν το 60%. Επίσης παρουσιάζουν χαμηλότερες ή μηδενικές εκπομπές ρύπων σε σύγκριση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης καθώς οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου εκπέμπουν μόνο νερό και όχι διοξειδίου του άνθρακα, συμβάλλοντας έτσι στην αποτελεσματική αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προκλήσεων. Τέλος οι κυψέλες καυσίμου είναι ανθόρυβες κατά τη λειτουργία τους και αποτελούνται από λίγα κινούμενα μέρη.

1.1.1 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

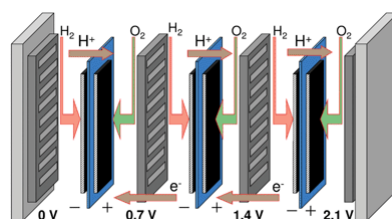
Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν ηλεκτροχημικές διατάξεις οι οποίες μετατρέπουν την χημική ενέργεια του καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος (και θερμότητα) χωρίς να μεσολαβήσει ενδιάμεσα η διαδικασία της καύσης. Η βασική αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου είναι η αντίστροφη ηλεκτρόλυση, δηλαδή υδρογόνο και οξυγόνο ανασυνδυάζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η κύρια επιλογή του υδρογόνου ως καύσιμο οφείλεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο καταλύτη είναι εξαιρετικά αντιδραστικό, μπορεί να παραχθεί από ένα μεγάλο εύρος ενεργειακών πηγών και κυρίως έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα.

Η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από ένα αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο την άνοδο (Anode) και ένα θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο την κάθοδο (Cathode), οι οποίες όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1 [5] διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη (Electrolyte). Το καύσιμο όπως το υδρογόνο τροφοδοτείται στην άνοδο ενώ ο αέρας τροφοδοτείται στην κάθοδο. Στην άνοδο και στην κάθοδο περιέχεται επίσης και ένας καταλύτης (Catalyst) για την επιτάχυνση των ηλεκτροχημικών διεργασιών.



Σχήμα 1.1: Δομή κυψέλης καυσίμου.

Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται ανάμεσα στην διπολική πλάκα της ανόδου και σε αυτή της καθόδου ιδανικά αγγίζει το 1 Volt, στην πραγματικότητα όμως κυμαίνεται κοντά στα 0.7 Volt και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες συμπεριλαμβανομένου του τύπου της κυψέλης καυσίμου, το καύσιμο που χρησιμοποιείται, το μέγεθος της κυψέλης, την θερμοκρασία και την πίεση στην οποία λειτουργεί κ.τ.λ. Επομένως αυτή η τάση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολύ μικρές εφαρμογές και για τον λόγο αυτό η ένωση πολλών κυψελών καυσίμου σε σειρά μας δίνει την δυνατότητα να παράγεται περισσότερη τάση και ισχύ για τις ανάγκες μεγαλύτερων εφαρμογών. Μία τέτοια στοίβα (fuel cell stack) φαίνεται στο σχήμα 1.2 [5].



Σχήμα 1.2: Δομή στοίβας κυψέλης καυσίμου.

1.1.2 Είδη κυψελών καυσίμου

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου που χαρακτηρίζονται κυρίως από το καύσιμο που χρησιμοποιούν, τον τύπο του ηλεκτρολύτη, την θερμοκρασία λειτουργίας τους, το μέγεθος ή την εφαρμογή τους. Αναλόγως τον τύπο οι κυψέλες καυσίμου μπορεί τροφοδοτούνται είτε από καθαρό υδρογόνο είτε από καύσιμα που περιέχουν υδρογόνο όπως είναι η μεθανόλη, το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), το υγραέριο (LPG), η μεθανόλη (Methanol) ή το πετρέλαιο (Diesel). Ορισμένες κυψέλες καυσίμου μπορούν να λειτουργήσουν απευθείας με υδρογονούχα καύσιμα χωρίς πρώτα το καύσιμο να υποστεί επεξεργασία, ενώ ορισμένες άλλες πρέπει πρώτα να προηγηθεί η διαδικασία της αναμόρφωσης. Με την διαδικασία της αναμόρφωσης το υδρογόνο διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα στοιχεία του καυσίμου και στη συνέχεια η κυψέλη καυσίμου τροφοδοτείται με καθαρό υδρογόνο. Στον πίνακα 1.1 και 1.2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά για κάθε καθένα τύπο των κυψελών καυσίμου.

Πίνακας 1.1: Πρώτος πίνακας σύνοψης βασικών χαρακτηριστικών κυψελών καυσίμου.

Τεχνολογία	Ιόν μεταφοράς	Σχετικό κόστος	Παραγωγή ισχύος (kW)	Χρόνος ζωής	Καύσιμο
Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC)	OH^-	χαμηλό	> 500 kW	μέτρια	υψηλής ποιότητας υδρογόνο
Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)	H^+	μέτριο	100 – 400 kW	πολύ καλή	LNG , μεθανόλη, πετρέλαιο, υδρογόνο
Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFC)	CO_3^{2-}	υψηλό	> 500 kW	χαμηλή	LNG , μεθανόλη, πετρέλαιο, υδρογόνο
Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)	O^{2-}	υψηλό	20 – 60 kW	χαμηλή	LNG , μεθανόλη, πετρέλαιο, υδρογόνο
Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)	H^+	χαμηλό	> 120 kW	καλή	υδρογόνο
Κυψέλη καυσίμου με παροχή άμεσης μεθανόλης (DMFC)	H^+	μέτριο	> 5 kW	καλή	μεθανόλη

Πίνακας 1.2: Συνέχεια πρώτου πίνακα σύνοψης βασικών χαρακτηριστικών κυψελών καυσίμου.

Βαθμός ωρίμανσης	Μέγεθος	Ευαισθησία σε ακαθαρσίες καυσίμου	Εκπομπές	Ζητήματα ασφαλείας	Αποτελεσματικότητα
Υψηλή, πλοία	μικρό	υψηλή	όχι	υδρογόνο	50 – 60 % (ηλεκτρική)
Υψηλή	μεγάλο	μέτρια	CO_2 , χαμηλά επίπεδα NO_x στην περίπτωση άνθρακα	> 200°C Υδρογόνο και CO στη μονάδα αναμόρφωσης	40% (ηλεκτρική), 80% (ανάκτηση θερμότητας)
Υψηλή, πλοία	μεγάλο	χαμηλή	χαμηλά επίπεδα NO_x στην περίπτωση άνθρακα	600 – 700°C Υδρογόνο και CO στην κυψέλη από εσωτερική αναμόρφωση	50% (ηλεκτρική), 85% (ανάκτηση θερμότητας)
Μέτρια, πλοία	μέτριο	χαμηλή	χαμηλά επίπεδα NO_x στην περίπτωση άνθρακα	600 – 700°C Υδρογόνο και CO στην κυψέλη από εσωτερική αναμόρφωση	60% (ηλεκτρική), 85% (ανάκτηση θερμότητας)
Υψηλή, πλοία	μικρό	μέτρια	όχι	υδρογόνο	50 – 60 % (ηλεκτρική)
Υπό ανάπτυξη	μικρό	χαμηλή	CO_2	μεθανόλη	20% (ηλεκτρική)

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την λειτουργία του κάθε τύπου των κυψελών καυσίμου, των υλικών που είναι φτιαγμένα τα δομικά τους στοιχεία, τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν μέρος καθώς και τις απώλειες που παρουσιάζουν κατά την λειτουργία τους μπορούν να βρεθούν στις [6], [7],[8],[9].

1.2 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Τα ενεργειακά συστήματα παίζουν σημαντικό ρόλο στην συλλογή ενέργειας από διάφορες πηγές (ορυκτά, ανανεώσιμες κ.τ.λ) και στην μετατροπή της στις μορφές ενέργειας που απαιτούνται για εφαρμογές σε διάφορους τομείς, π.χ. βιομηχανία, μεταφορές κ.τ.λ. Πηγές ενέργειας όπως για παράδειγμα τα ορυκτά καύσιμα ή οι ανανεώσιμες πηγές στις περιπτώσεις όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται σε πλεονασμό σε σχέση με την απαιτούμενη ζήτηση, πρέπει να αποθηκευτεί διαφορετικά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα και έτσι το κόστος παραγωγής για αυτήν την ενέργεια πάει χαμένο.

Δεδομένου επίσης ότι σε ένα σύστημα ενέργειας η κύρια πηγή ενέργειας μπορεί να μην είναι πάντα επαρκής προκειμένου να ικανοποιήσει την ζήτηση φορτίου όσον αφορά την εκκίνηση, την επιτάχυνση ή την μεταβολή φορτίου, ο συνδυασμός της με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως είναι οι μπαταρίες και οι υπερπυκνωτές κρίνεται αναγκαίος. Επίσης ζητήματα που αφορούν την βελτίωση της ποιότητας και της αξιοπιστίας ισχύος, την βελτίωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος, την εξοικονόμηση καυσίμου καθώς και η αύξηση του χρόνου ζωής και η μείωση των καταπονήσεων της κύριας πηγής και πολλών άλλων, έχει ωθήσει τους ερευνητές στον συνδυασμό των πηγών παραγωγής ισχύος με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, δηλαδή στην υβριδοποίηση των συστημάτων.

Σε αυτήν την ενότητα θα ασχοληθούμε και θα περιγράψουμε στοιχεία που αφορούν την αποθήκευση ηλεκτρικής, ηλεκτροχημικής ενέργειας όπως είναι η μπαταρία και ο υπερπυκνωτής τα οποία λόγω των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν θα τα επιλέξουμε για την σχεδίαση και την μοντελοποίηση του υβριδικού μας συστήματος.

1.2.1 Μπαταρία

Οι μπαταρίες είναι συσκευές οι οποίες αποθηκεύουν χημική ενέργεια και την μετατρέπουν σε ηλεκτρική, φαινόμενο γνωστό και ως ηλεκτροχημεία. Η μπαταρία μπορεί να αποτελείται από πολλαπλά ηλεκτροχημικά κελιά συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα ή και τα δύο προκειμένου να ληφθεί η επιθυμητή τάση και χωρητικότητα. Όπως γνωρίζουμε ο ηλεκτρισμός είναι μία μορφή ενέργειας που παράγεται από την κίνηση των ηλεκτρονίων. Κάθε ηλεκτροχημικό κελί αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια αγωγών τα οποία διαχωρίζονται από τον ηλεκτρολύτη, τοποθετημένα μαζί σε ένα ειδικό σφραγισμένο δοχείο και συνδεδεμένο σε εξωτερική πηγή ή φορτίο. Ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει την ανταλλαγή ιόντων μεταξύ των ηλεκτροδίων, τα οποία ιόντα παράγονται εξαιτίας των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν σε κάθε ηλεκτρόδιο. Τα ηλεκτρόνια που θα παραχθούν από τις χημικές αντιδράσεις στην άνοδο του κελιού θα κινηθούν μέσω ενός

εξωτερικού κυκλώματος προς την κάθοδο. Αυτή η ροή επομένως των ηλεκτρονίων θα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά ορισμένα από τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των πιο διαδεδομένων τύπων μπαταρίας.

1.2.1.1 Μπαταρίες Μολύβδου-Οξέος (Lead-Acid Battery)

Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, μέτρια απόδοση, υψηλές απαιτήσεις συντήρησης με μεγάλη διάρκεια ζωής και χαμηλό κόστος σε σύγκριση με άλλους τύπους μπαταριών. Είναι κατάλληλες για αποθήκευση ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Κάθοδος : διοξείδιο του μολύβδου (PbO_2)

Άνοδος : σπόγγος μολύβδου (Pb)

Ηλεκτρολύτης : αραιό διάλυμα θειικού οξέος (H_2SO_4)

1.2.1.2 Μπαταρία Νικελίου-Καδμίου (Ni-Cd)

Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου είναι μια επαναφορτιζόμενη τύπου μπαταρία οι οποίες παρουσιάζουν καλά χαρακτηριστικά ως προς την μεγάλη διάρκεια ζωής και τις χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης. Κυριότερο μειονέκτημα το κόστος τους καθώς μπορεί να φτάσει έως και 10 φορές πιο πάνω συγκριτικά με το κόστος μιας μπαταρίας τύπου μολύβδου-οξέος.

Κάθοδος : είδη νικελίου και είδη καδμίου

Άνοδος : είδη νικελίου και είδη καδμίου

Ηλεκτρολύτης : υδροξείδιο του καλίου (KOH)

1.2.1.3 Μπαταρία Νικελίου-Υδριδίου Μετάλλου (Ni-MH)

Οι μπαταρίες Νικελίου-Υδριδίου Μετάλλου είναι ένας επαναφορτιζόμενος τύπος μπαταρίας και είναι πολύ παρόμοιες με τις μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου όσον αφορά την τάση, τη χωρητικότητα και την εφαρμογή. Ευρεία χρήση σε ηλεκτρονικές συσκευές και υβριδικά-ηλεκτρικά οχήματα προηγούμενης γενιάς.

Κάθοδος : υδροξείδιο του νικελίου

Άνοδος : διαμεταλλικές ενώσεις όπως το Βανάδιο (V), Τιτάνιο (Ti), Ζιρκόνιο (Zr), Νικέλιο (Ni), Χρώμιο (Cr), Κοβάλτιο (Co), Σίδηρος (Fe)

Ηλεκτρολύτης : υδροξείδιο του καλίου (KOH)

1.2.1.4 Μπαταρία ιόντων λιθίου (Lithium-ion)

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν καταλάβει το μεγαλύτερο μέρος της αγοράς και χρησιμοποιούνται εκτενώς σε μικρές εφαρμογές όπως κινητά τηλέφωνα και φορητές ηλεκτρονικές συσκευές. Ο συγκεκριμένος τύπος μπαταριών τραβάει το ενδιαφέρον του τομέα της τεχνολογίας υλικών και άλλων τομέων στην προσπάθεια τους να επιτευχθούν συσκευές υψηλής ισχύος που χρησιμοποιούνται σε τομείς όπως σταθερή αποθήκευση ενέργειας και τα ηλεκτρικά οχήματα.

Κάθοδος : οξείδιο του κοβαλτίου λίθιο ($LiCoO_2$) ή οξείδιο του μαγγανίου λίθιο ($LiMn_2O_4$)

Άνοδος : γραφίτης και άλλα υλικά άνθρακα, αν και χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο νεότερα υλικά με βάση το πυρίτιο

Ηλεκτρολύτης : μη υδατικό οργανικό υγρό όπως ο ανθρακικός διμεθυλεστέρας (DMC) ο οποίος περιλαμβάνει διαλυμένα άλατα λιθίου όπως υπερχλωρικό λίθιο ($LiClO_4$)

Πλεονεκτήματα μπαταριών ιόντων-λιθίου

Αρχικά να αναφέρουμε ότι το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα πράγμα που οφείλεται στο γεγονός ότι το λίθιο όντας μικρό και ελαφρύ, μεγάλη ποσότητα λιθίου μπορεί να "παρεμβληθεί" και στα δύο ηλεκτρόδια. Συγκριτικά με τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου να αναφέρουμε ότι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν την διπλάσια ενεργειακή πυκνότητα πράγμα που σημαίνει ότι μια μπαταρία ιόντων λιθίου έχοντας το μισό μέγεθος από αυτό μιας νικελίου-καδμίου θα δώσει την ίδια ισχύ. Το χαμηλό τους βάρος και το γεγονός ότι είναι συμπαγής τις κάνουν πιο ευέλικτες στην χρήση σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές. Επίσης ένα μόνο κελί μπαταρίας ιόντων λιθίου μπορεί να παράγει τάση ίση με 3,6 Volt ή μεγαλύτερη, ανάλογα με υλικά της καθόδου. Ένα τυπικό αλκαλικό στοιχείο παράγει μόνο περίπου 1,5 Volt. Από τα παραπάνω καταλαβαίνουμε την υπεροχή της μπαταρίας ιόντων-λιθίου έναντι των άλλων τύπων. Ως απόρροια επομένως της υψηλής ενεργειακής της πυκνότητας και της ελαφρότητας της, η στοίβαξη πολλών στοιχείων ιόντων λιθίου παράγει μια μπαταρία πολύ ελαφρύτερη και πιο συμπαγή από τις στοίβες άλλων τύπων μπαταριών. Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να καταλάβουμε το πόσο ευέλικτες και χρήσιμες είναι στην περίπτωση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Παραλλαγές μπαταριών ιόντων-λιθίου

Όσον αφορά το υλικό που χρησιμοποιείται για την κάθοδο υπάρχουν αρκετές παραλλαγές κατασκευασμένες από συνδυασμό λιθίου, οξυγόνου και κάποιου είδους μετάλλου όπως είναι οι μπαταρίες οξειδίου του κοβαλτίου λιθίου (Lithium cobalt oxide- $LiCoO_2$),

οι μπαταρίες λιθίου φωσφορικού σιδήρου (Lithium iron phosphate- $LiFePO_4$), οι μπαταρίες οξειδίου του μαγγανίου λιθίου (Lithium manganese oxide- $LiMn_2O_4$).

Στον πίνακα 1.3 [10] [11] παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για λόγους σύγκρισης τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών που αναφέραμε.

Πίνακας 1.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών.

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion-Cobaltd	Li-ion-Manganeses	Li-ion-Phosphate
Πυκνότητα Ειδικής Ενέργειας (Wh/kg)	30 – 50	45 – 80	60 – 120	150 – 190	100 – 135	90 – 120
Εσωτερική αντίσταση ($m\Omega$)	< 100	100 – 200	200 – 300	150 – 300	25 – 75	25 – 50
Διάρκεια Ζωής (Κύκλοι)	200 – 300	1000	300 – 500	500 – 1000	500 – 1000	100 – 2000
Χρόνος Γρήγορης Φόρτισης	8 – 16 h	1 h	2 – 4 h	2 – 4 h	$\leq 1 h$	$\leq 1 h$
Ανοχή Υπέρτασης	High	Moderate	Low	Low	Low	Low
Μηνιαία Αυτοεκφόρτιση	5 %	20 %	30 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Ονομαστική Τάση Κελιού	2 V	1.2 V	1.2 V	3.6 V	3.8 V	3.3 V
Τάση Αποκοπής Φόρτισης $V/cell$	2.4	Full charge detection by voltage signature	Full charge detection by voltage signature	4.2	4.2	3.6
Τάση Αποκοπής Εκφόρτισης $V/cell$	1.75	1.00	1.00	2.5 – 3.00	2.5 – 3.00	2.80
Μέγιστο ρεύμα φορτίου	5 C	20 C	5 C	> 3 C	> 30 C	> 30 C
Θερμοκρασία φόρτισης	-20 – 50°C	0 – 45°C	0 – 45°C	0 – 45°C	0 – 45°C	0 – 45°C
Θερμοκρασία εκφόρτισης	-20 – 50°C	-20 – 65°C	-20 – 65°C	-20 – 60°C	-20 – 60°C	-20 – 60°C

Στις [12],[13] εξετάζονται οι παραπάνω τύποι μπαταριών ενώ στην [14] γίνεται μια αναλυτική περιγραφή του τύπου της μπαταρίας ιόντων λιθίου τον οποίο πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε στην μοντελοποίηση του υβριδικού μας συστήματος.

1.3 Υπερπυκνωτής

Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να είναι μια εξαιρετικά ευέλικτη μορφή ενέργειας αλλά έχει ένα μεγάλο μειονέκτημα, είναι σχετικά δύσκολο να αποθηκευτεί γρήγορα. Από την μία οι μπαταρίες μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, αλλά απαιτούνται ώρες για την φόρτιση τους. Οι πυκνωτές από την άλλη φορτίζονται σχεδόν

αμέσως αλλά μπορούν να αποθηκεύσουν μόνο μικρές ποσότητες ενέργειας. Εδώ είναι που θα εμφανιστούν και θα δώσουν λύση οι υπερπυκνωτές γνωστοί και ως ultracapacitors ή ηλεκτρικοί πυκνωτές διπλής στρώσης (electrical double layer capacitors - EDLC) των οποίων η δομή είναι αρκετά παρόμοια με αυτή ενός κανονικού ηλεκτρολυτικού πυκνωτή.

Οι υπερπυκνωτές ως τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας διαθέτουν εξαιρετικές επιδόσεις ως προς την υψηλή ικανότητα αποθήκευσης φορτίου, γεγονός που μας δείχνει την ευελιξία τους ως προς την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα ισχύος και χωρητικότητας συγκριτικά με έναν απλό ηλεκτρολυτικό πυκνωτή. Προκειμένου να καταλάβουμε την μεγάλη υπεροχή τους ως προς τους απλούς ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές, οι υπερπυκνωτές μπορούν να αποθηκεύσουν 10 έως 100 φορές περισσότερη ποσότητα ενέργειας φτάνοντας ένα μόνο μεμονωμένο κελί να παρέχει χωρητικότητα εύρους 100-500 *Farads*. Διαθέτουν επίσης χαμηλή αντίσταση ισοδύναμης σειράς (*ESR*), επιτρέποντάς τους έτσι να παρέχουν και να απορροφούν υψηλά ρεύματα. Συγκριτικά με τις μπαταρίες να αναφέρουμε ότι οι υπερπυκνωτές αναλόγως την εφαρμογή που απαιτείται προτιμούνται στη θέση των μπαταριών εξαιτίας της ικανότητας τους να φορτίζουν με ταχύτερο ρυθμό και επιτρέπουν γρήγορη και απλή φόρτιση χωρίς την ανάγκη συντήρησης.

Στον πίνακα 1.4 [15] γίνεται μία ενδεικτική σύγκριση στα βασικά χαρακτηριστικά του υπερπυκνωτή *vs* συμβατικού πυκνωτή *vs* μπαταρίες:

Πίνακας 1.4: Σύγκριση χαρακτηριστικών υπερπυκνωτή με συμβατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Χαρακτηριστικά	Μπαταρίες	Υπερπυκνωτής	Πυκνωτής
Χρόνος φόρτισης	1 μέχρι 5 <i>hrs</i>	0.3 μέχρι 30 <i>s</i>	10^{-6} μέχρι 10^{-3}
Χρόνος εκφόρτισης	0.3 to 3 <i>hrs</i>	0.3 μέχρι 30 <i>s</i>	10^{-6} μέχρι 10^{-3}
Ειδική Ενέργεια (<i>Whr/kg</i>)*	10 μέχρι 100	1 μέχρι 10	< 0.1
Ειδική Ισχύς (<i>W/kg</i>)**	< 1000	< 10.000	< 100.000
Κύκλοι Φόρτισης	1000	> 500.000	> 500.000
Απόδοση φόρτισης-εκφόρτισης	0.7 μέχρι 0.85	0.85 μέχρι 0.98	> 0.95
Θερμοκρασία λειτουργίας	-20 έως 100°C	-40 έως 65°C	-20 έως 65°C

* Ένας τρόπος να εκφραστεί η ενεργειακή πυκνότητα (η ικανότητα να αποθηκευτεί ενέργεια) μιας συσκευής είναι μέσω της ειδικής ενέργειας ή όπως αλλιώς ονομάζεται βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα. Η ειδική ενέργεια είναι ένα μέτρο για να εκφράσουμε την ποσότητα ενέργειας που περιέχει μία συσκευή όπως μία μπαταρία ή ένας πυκνωτής σε σύγκριση με το βάρος της και εκφράζεται σε *Watt – hours/kg (Whr/kg)*.

** Η ειδική ισχύς ή αλλιώς βαρυμετρική πυκνότητα ισχύος υποδηλώνει την ικανότητα παροχής ισχύς της συσκευής και εκφράζεται σε *Watt/kg (W/kg)*.

Στις [16], [17] αναφέρονται πληροφορίες σχετικά με την δομή και την αρχή λειτουργίας των υπερπυκνωτών ενώ στην [18] μπορούν να βρεθούν πληροφορίες σχετικά με τις αρχές αποθήκευσης, την χωρητικότητα, την τάση και τις απώλειες των υπερπυκνωτών.

1.4 Μεταροπείς ισχύος

Η χρήση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ισχύος αφορά την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας από την μια μορφή στην άλλη χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικές συσκευές. Η λειτουργία τους βασίζεται στον έλεγχο ημιαγωγικών στοιχείων ως διακόπτες, ελέγχοντας ή τροποποιώντας με αυτόν τον τρόπο μια τάση ή το ρεύμα. Ο σχεδιασμός του εξοπλισμού μετατροπής ισχύος περιλαμβάνει πολλούς κλάδους από τον τομέα των ηλεκτρολόγων μηχανικών όπως η θεωρία κυκλωμάτων, η θεωρία ελέγχου κ.α.

Οι κύριες εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύων περιλαμβάνουν τις παρακάτω κατηγορίες μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας :

- Μετατροπή εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές ρεύμα (Μετατροπείς AC-DC ή αλλιώς ανορθωτής-rectifier).
- Μετατροπή συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα (Μετατροπείς DC-AC ή αλλιώς αντιστροφέας-inverter).
- Μετατροπή μη ρυθμισμένης τάσης συνεχούς ρεύματος σε ρυθμισμένης τάσης συνεχούς ρεύματος (Μετατροπείς DC-DC).
- Μετατροπή εναλλασσόμενου ρεύματος από ένα πλάτος και συχνότητα σε εναλλασσόμενο διαφορετικού πλάτους και συχνότητας (Μετατροπείς AC-AC).

Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρει μόνο η δεύτερη και η τρίτη κατηγορία, οι inverters και οι DC-DC μετατροπείς δηλαδή τους οποίους θα χρησιμοποιήσουμε για την υλοποίηση και την προσομοίωση του υβριδικού μας συστήματος.

1.4.1 Έλεγχος DC-DC μετατροπέων

Προκειμένου οι μετατροπείς να μπορούν να ρυθμίζουν την τάση εξόδου τους στην επιθυμητή τιμή θα πρέπει να ελέγχουν την κατάσταση όπου τα τρανζίστορ βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής t_{on} ή σε κατάσταση αποκοπής t_{off} μέσω παλμών εναύσεως. Επομένως σε έναν DC-DC μετατροπέα στην περίπτωση μας η μέση τιμή της τάσης (και του ρεύματος) που θα τροφοδοτείται στο φορτίο θα ελέγχεται με την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση των διακοπών μεταξύ της πηγής και του φορτίου, δηλαδή από τους χρόνους t_{on} και t_{off} .

Μία από τις μεθόδους που εφαρμόζουμε για να ρυθμίσουμε την μέση τιμή της τάσης είναι 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-PWM) και χρησιμοποιείται συνδυαστικά με βρόχους ανάδρασης, PID ελεγκτών και ενός σήματος ελέγχους περιοδικής κυματομορφής σταθερού πλάτους

(παλμική, πριονωτή, ημιτονική). Σκοπός της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελεί ο έλεγχος του χρόνου όπου τα διακοπτικά στοιχεία όπως τα τρανζίστορ βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής t_{on} ή σε κατάσταση αποκοπής t_{off} . Σε αυτό το σημείο θα ορίσουμε την έννοια του Duty Cycle (D) το οποίο περιγράφει την αναλογία του χρόνου που ο διακόπτης άγει t_{on} , προς την περίοδο T_s .

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = t_{on}f \quad (1.1)$$

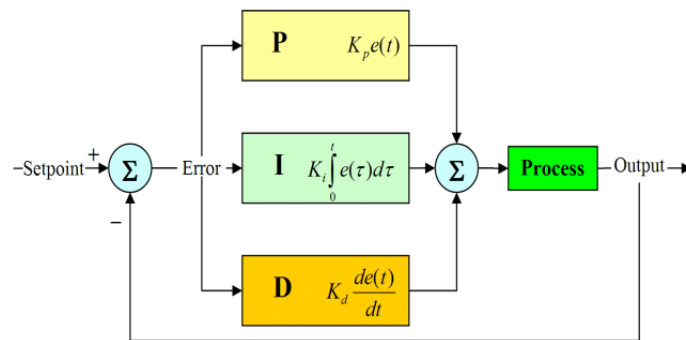
όπου f είναι η διακοπτική συχνότητα

Το Duty Cycle εκφράζεται σε ποσοστό %. Χαμηλή τιμή Duty Cycle αντιστοιχεί σε χαμηλή ισχύ προς το φορτίο καθώς ο διακόπτης θα είναι σε λειτουργία αποκοπής τον περισσότερο διάστημα του T_s , επομένως στον χρόνο αυτό η πηγή θα είναι αποκομμένη από το φορτίο. Τα διακοπτικά στοιχεία θα πρέπει να λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες για την ελάχιστη δυνατή απώλεια ισχύος. Όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος αγωγής σε σχέση με αυτόν της αποκοπής, τόσο μεγαλύτερη ισχύς παραδίδεται στο φορτίο.

1.4.2 Σύστημα ελέγχου (PID)

Οι PID ελεγκτές είναι ελεγκτές γενικής χρήσης που συνδυάζουν τους τρεις βασικούς τρόπους ελέγχου, δηλαδή τον αναλογικό (P), τον διαφορικό (D) και τον ολοκληρωτικό (I). Αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του βιομηχανικού κλάδου και ενδεικτικά χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της θερμοκρασίας, της πίεσης, στην αυτοκινητοβιομηχανία και γενικά σε αμέτρητες εφαρμογές. Αυτός ο τύπος ελεγκτή συναντάται με πολλές παραλλαγές όπως είναι οι ελεγκτές P, PI, PD, PID.

Η δομή ενός PID ελεγκτή περιλαμβάνει τρία στοιχεία ελέγχου τον αναλογικό, τον ολοκληρωτικό και τον διαφορικό έλεγχο όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3 [19].



Σχήμα 1.3: Διάγραμμα κλειστού βρόχου PID ελεγκτή.

Αυτοί οι τρεις ελεγκτές χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μιας συνδυασμένης εξόδου που θα χρησιμοποιηθεί για να σχηματιστεί μία στρατηγική έλεγχου που θα διαχειρίζεται την εκάστοτε συσκευή αναλόγως την εφαρμογή. Ορίζοντας ως $u(t)$ την έξοδο του ελεγκτή, η τελική μαθηματική έκφραση του PID ελεγκτή είναι η εξής :

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d * \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (1.2)$$

K_p : το αναλογικό κέρδος

K_i : το ολοκληρωτικό κέρδος

K_d : το διαφορικό κέρδος

$e(t) = SP - PV$: το σφάλμα

t : ο στιγμιαίος χρόνος (το παρόν)

τ : η μεταβλητή της ολοκλήρωσης

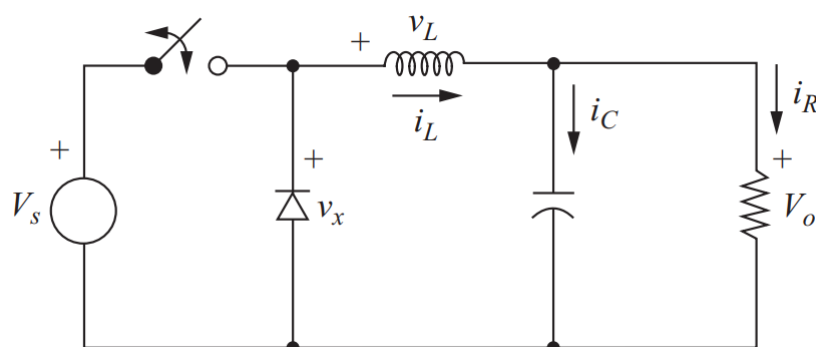
Τα αποτελέσματα της αύξησης καθεμιάς από τις παραμέτρους του ελεγκτή K_p , K_i και K_d μπορούν να συνοψιστούν στον πίνακα 1.5 [20].

Πίνακας 1.5: Επίδραση από τις αλλαγές των κερδών K_p , K_i και K_d .

Κέρδος	Χρόνος ανύψωσης	Υπερύψωση	Χρόνος Αποκατάστασης	Σφάλμα Σταθερής Κατάστασης
K_p	Μείωση	Αύξηση	Μικρή Αλλαγή	Μείωση
K_i	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Εξάλειψη
K_d	Μικρή Αλλαγή	Μείωση	Μείωση	Μικρή Αλλαγή

1.4.3 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης

Ένας τυπικός μετατροπέας υποβιβασμού τάσης αποτελείται από ημιαγώγιμα στοιχεία όπως η διόδος και το τρανζίστορ (MOSFET, IGBT) τα οποία χρησιμοποιούνται ως διακόπτες καθώς και από στοιχεία αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας όπως το πηνίο και ο πυκνωτής. Στο σχήμα 1.4 [21] φαίνεται η δομή ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.



Σχήμα 1.4: Δομή μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Η λειτουργία του μετατροπέα βασίζεται στην ιδιότητα του πηνίου να αντιστέκεται σε οποιαδήποτε μεταβολή του ρεύματος και στην δημιουργία μαγνητικού πεδίου γύρω από αυτό. Λόγω της ύπαρξης των διακοπών, ο μετατροπέας υποβιβασμού λειτουργεί σε δύο φάσεις. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός (on-state) και όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός (off-state). Πληροφορίες σχετικά με την αρχή λειτουργίας του μετατροπέα υποβιβασμού μπορούν να βρεθούν στην [21] στην οποία γίνεται μια εκτεταμένη ανάλυση

σε κάθε ένα από τους τύπους των μετατροπέων. Η βασική σχέση που εξάγεται η οποία συνδέει τον κύκλο λειτουργίας του μετατροπέα υποβιβασμού για μια δεδομένη τάση εισόδου με την τάση εξόδου περιγράφεται από την παρακάτω:

$$D = \frac{V_O}{V_S} \quad (1.3)$$

Από την (1.3) φαίνεται ότι η τάση εξόδου του μετατροπέα υποβιβασμού ποικίλλει γραμμικά με τον κύκλο λειτουργίας για μια δεδομένη τάση εισόδου. Καθώς ο κύκλος λειτουργίας D ισούται $D = \frac{t_{on}}{T}$ με t_{on} ο χρόνος που ο διακόπτης είναι κλειστός, δεν μπορεί να είναι περισσότερο από 1. Επομένως $V_O \leq V_S$. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο αυτός ο μετατροπέας αναφέρεται ως μετατροπέας υποβιβασμού τάσης.

Υπολογισμός παραμέτρων I_L , $I_{L_{max}}$, $I_{L_{min}}$, L_{min} , L , C_{min} μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Με βάση την ανάλυση της [21] για συνεχόμενη λειτουργία ρεύματος πηνίου παραθέτουμε τις βασικές εξισώσεις που απαιτούνται για τον σχεδιασμό ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης σε συνεχόμενη λειτουργία ρεύματος πηνίου, δηλαδή για συνεχόμενη ροή ρεύματος (πάντα θετικό) στο πηνίο καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου μεταγωγής (switching cycle):

$$I_L = I_R = \frac{V_O}{R} \quad (1.4)$$

$$I_{L_{max}} = V_O \left(\frac{1}{R} + \frac{1-D}{2Lf} \right) \quad (1.5)$$

$$I_{L_{min}} = V_O \left(\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf} \right) \quad (1.6)$$

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (1.7)$$

$$L = \frac{V_O(1-D)}{\Delta I_L f} \quad (1.8)$$

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (1.9)$$

$$C = \frac{1-D}{8L \left(\frac{\Delta V_O}{V_O} \right) f^2} \quad (1.10)$$

R : αντίσταση του φορτίου

ΔI_L : μεταβολή ρεύματος πηνίου

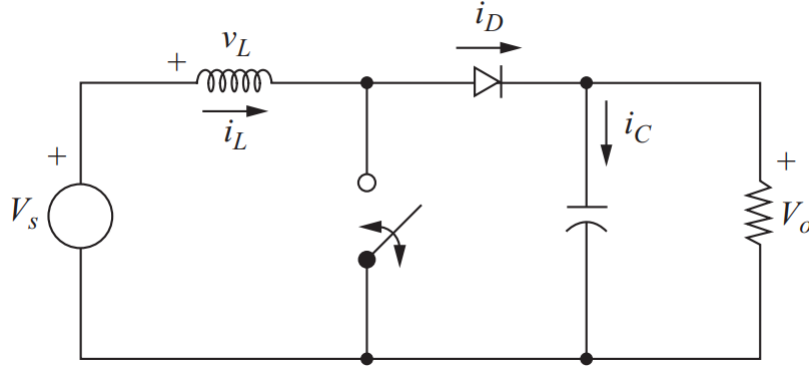
$f = \frac{1}{T}$: διακοπτική συχνότητα

ΔV_O : διακύμανση (ripple) τάσης πυκνωτή

1.4.4 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης

Ένας τυπικός μετατροπέας ανύψωσης τάσης αποτελείται από ημιαγώγιμα στοιχείο όπως η διόδος και το τρανζίστορ (MOSFET, IGBT) τα οποία χρησιμοποιούνται ως διακόπτες, καθώς και από στοιχεία αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας όπως το πηνίο και ο πυκνωτής. Στο σχήμα 1.5 [21] φαίνεται η δομή ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

Η λειτουργία του μετατροπέα βασίζεται και σε αυτήν την περίπτωση στην ιδιότητα του πηνίου να αντιστέκεται σε οποιαδήποτε μεταβολή του ρεύματος και στην δημιουργία και την κατάρρευση του μαγνητικού πεδίου γύρω από αυτό. Λόγω της ύπαρξης των



Σχήμα 1.5: Δομή μετατροπέα ανύψωσης τάσης

διακοπών ο μετατροπέας υποβιβασμού λειτουργεί σε δύο φάσεις. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός (on-state) και όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός (off-state). Πληροφορίες σχετικά με την αρχή λειτουργίας του μετατροπέα υποβιβασμού μπορούν να βρεθούν από την [21]. Η βασική σχέση που εξάγεται η οποία συνδέει τον κύκλο λειτουργίας του μετατροπέα υποβιβασμού για μια δεδομένη τάση εισόδου με την τάση εξόδου περιγράφεται από την παρακάτω :

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{1 - D} \quad (1.11)$$

Η εξίσωση (1.11) δείχνει ότι η τάση εξόδου είναι πάντα υψηλότερη από την τάση εισόδου καθώς ο κύκλος λειτουργίας D παίρνει τιμές από 0 σε 1. Αύξηση του D προκαλεί αύξηση της τάσης εξόδου V_O .

Υπολογισμός παραμέτρων I_L , $I_{L_{\max}}$, $I_{L_{\min}}$, L_{\min} , L , C_{\min} μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Με βάση την ανάλυση της [21] για συνεχόμενη λειτουργία ρεύματος πηνίου παραθέτουμε τις βασικές εξισώσεις που απαιτούνται για τον σχεδιασμό ενός μετατροπέα υποβιβασμού σε συνεχόμενη λειτουργία ρεύματος πηνίου, δηλαδή για συνεχόμενη ροή ρεύματος (πάντα θετικό) στο πηνίου καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου μεταγωγής (switching cycle):

$$I_L = \frac{V_O I_O}{V_S} \quad (1.12)$$

$$I_{L_{\max}} = \frac{V_S}{(1 - D)^2 R} + \frac{V_S D T}{2L} \quad (1.13)$$

$$I_{L_{\min}} = \frac{V_S}{(1 - D)^2 R} - \frac{V_S D T}{2L} \quad (1.14)$$

$$L_{\min} = \frac{D(1 - D)^2 R}{2f} \quad (1.15)$$

$$L = \frac{V_S D}{\Delta I_L f} \quad (1.16)$$

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} = \frac{D}{RCf} \quad (1.17)$$

$$C = \frac{D}{R(\frac{\Delta}{V_O})f} \quad (1.18)$$

R : αντίσταση του φορτίου

ΔI_L : μεταβολή ρεύματος πηνίου

$f = \frac{1}{T}$: διακοπτική συχνότητα

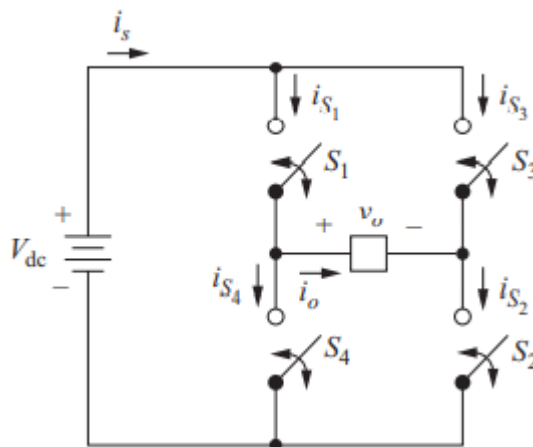
ΔV_0 : διακύμανση (ripple) τάσης πυκνωτή

1.4.5 Μετατροπέας DC to AC (Inverter)

Οι μετατροπείς DC to AC (Inverter) είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα που μετατρέπουν το DC ρεύμα σε AC. Πιο συγκεκριμένα οι Inverter μεταφέρουν ενέργεια από μία πηγή συνεχούς (DC) ρεύματος σε ένα φορτίο εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος.

Μετατροπέας Πλήρους Γέφυρας (FULL-BRIDGE CONVERTER)

Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας που φαίνεται στο σχήμα 1.6 αποτελεί το βασικό κύκλωμα για την μετατροπή συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα. Από την DC πηγή ανοιγοκλείνοντας του διακόπτες με την κατάλληλη ακολουθία παράγεται μία εναλλασσόμενη έξοδος ρεύματος. Η τάση εξόδου V_o μπορεί να είναι είτε $+V_{dc}$ είτε $-V_{dc}$, είτε 0 αναλόγως τους διακόπτες που κλείνουν.



Σχήμα 1.6: Δομή μετατροπέα πλήρους γέφυρας

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την αρχή λειτουργίας των ανορθωτών, του ανορθωτή Πλήρους Γέφυρας Τετραγωνικού Κύματος καθώς και του τριφασικού ανορθωτή έξι βημάτων που μας ενδιαφέρει στην περίπτωση μας μπορούν να βρεθούν στην [21].

2 Αρχιτεκτονική & Μοντελοποίηση Υβριδικού Συστήματος Ισχύος Έκτακτης Ανάγκης Αεροσκάφους

Στο παρόν κεφάλαιο πρόκειται να περιγραφεί η αρχιτεκτονική του υβριδικού συστήματος ισχύος έκτακτης ανάγκης του αεροσκάφους και θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάστηκε και μοντελοποιήθηκε κάθε βασικό στοιχείο του υβριδικού συστήματος στο προσομοιωτικό περιβάλλον του Simulink προκειμένου να επιτύχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

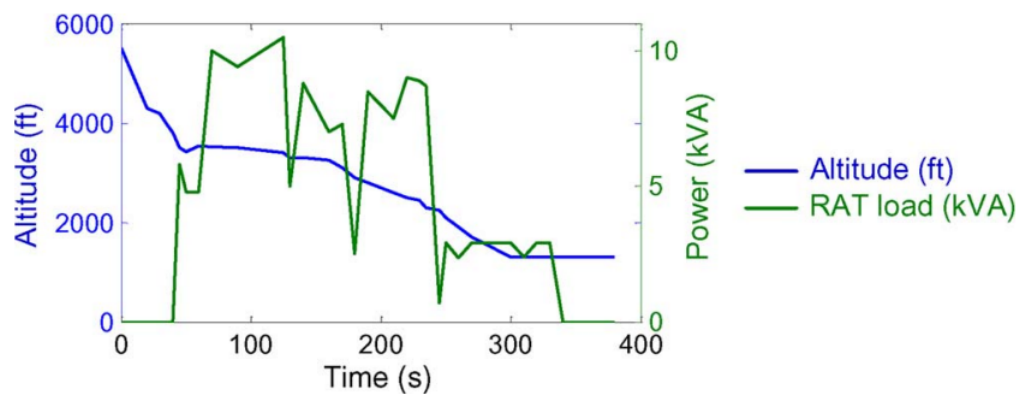
2.1 Αρχιτεκτονική Υβριδικού Συστήματος Τροφοδοσίας Συστήματος Ισχύος Έκτακτης Ανάγκης Αεροσκάφους

Στην παρούσα ενότητα πρόκειται να περιγραφεί η αρχιτεκτονική του υβριδικού συστήματος τροφοδοσίας του συστήματος ισχύος έκτακτης ανάγκης του αεροσκάφους και τα βασικά εξαρτήματα που το συνθέτουν, ώστε να μπορεί να κατανοηθεί από τον αναγνώστη πρώτον η λειτουργία και ο σκοπός χρησιμοποίησης του καθενός και δεύτερον ο τρόπος με τον οποίο θα μοντελοποιηθεί συνολικά το σύστημα στο προσομοιωτικό περιβάλλον σε δεύτερο χρόνο. Θα ακολουθηθούν παρόμοιες προσεγγίσεις και τεχνικές με αυτές της [22].

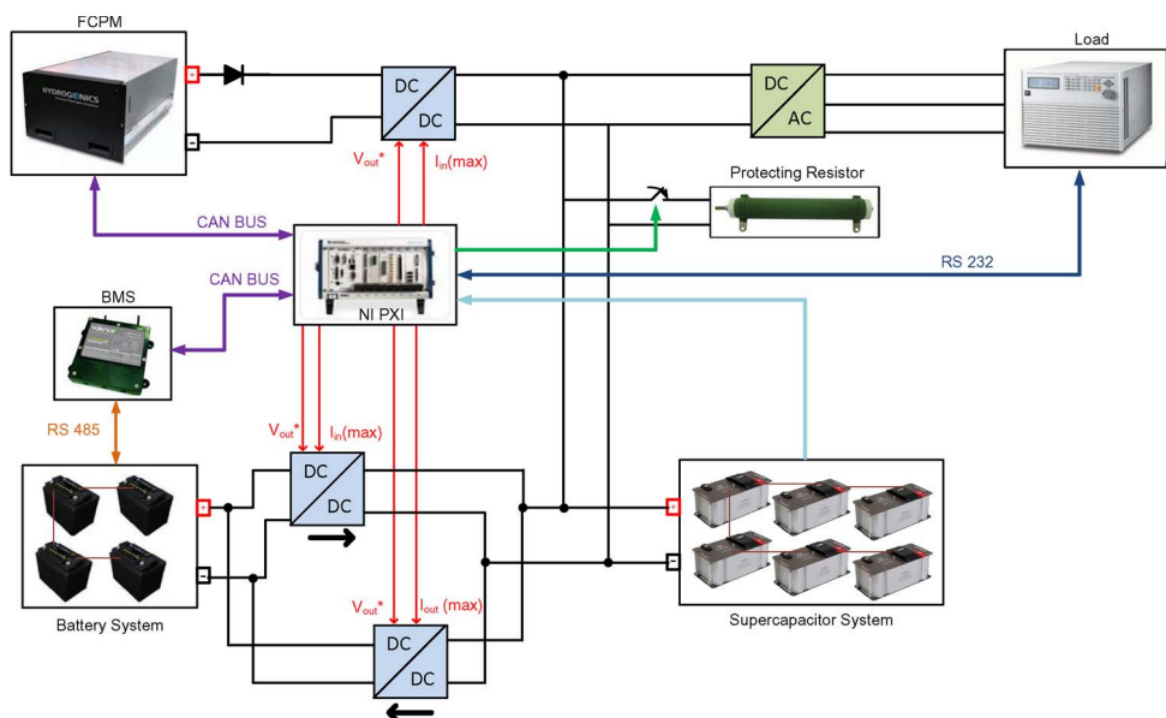
Το υβριδικό σύστημα ισχύος έκτακτης ανάγκης θα πρέπει να σχεδιαστεί κατάλληλα για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων ενός τυπικού σεναρίου προσγείωσης έκτακτης ανάγκης του αεροσκάφους για έναν αντιπροσωπευτικό κύκλο προσγείωσης ο οποίος παρέχεται από την κατασκευαστική εταιρεία αεροσκαφών Bombardier Aerospace. Η καμπύλη ισχύος φαίνεται στο σχήμα 2.1 και θα θεωρηθεί η ίδια σε όλο το στάδιο της ανάλυσης.

Η συνολική αρχιτεκτονική του υβριδικού συστήματος φαίνεται στο σχήμα 2.3.

2.1. Αρχιτεκτονική Υβριδικού Συστήματος Τροφοδοσίας Συστήματος Ισχύος Έκτακτης Ανάγκης Αεροσκάφους



Σχήμα 2.1: Καμπύλη ισχύος ενός τυπικού σεναρίου προσγείωσης έκτακτης ανάγκης.



Σχήμα 2.2: Συνολικό σχήμα συστήματος.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής του υβριδικού συστήματος ισχύος κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- **Σύστημα Κυψέλης Καυσίμου :** Το σύστημα κυψέλης καυσίμου (FCPM) αποτελεί την κύρια πηγή ενέργειας του συστήματος και έχει σχεδιαστεί για να ανταποκρίνεται στην μέση ζήτηση ισχύος του φορτίου. Επιλέγεται μία κυψέλη καυσίμου τύπου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) με μέγιστη κάλυψη ισχύος στα 12.5 kW και εύρος συνεχούς τάσης εξόδου 39.2 – 52.5 V_{dc}. Εντός του συστήματος υπάρχει ένας ρυθμιστής για τον έλεγχο της ροής τροφοδοσίας του υδρογόνου και του αέρα της κυψέλης καυσίμου.
- **Σύστημα DC-DC Μετατροπέα Τάσης Κυψέλης Καυσίμου :** Απο-

τελείται από έναν DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης με τάση εισόδου εύρους 39.2 – 52.5 V και 270 V τάση εξόδου, με σκοπό την παροχή σταθερής και ανυψωμένης τάσης στο φορτίο ζήτησης. Μέσω του DC-DC μετατροπέα ανύψωση θα ελέγχεται η ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου.

- **Μπαταρία** : Επιλέγεται μια μπαταρία τύπου ιόντων λιθίου ονομαστικής τάσης 51.2 V και 40 Ah χωρητικότητα. Σκοπός της μπαταρίας είναι η παροχή έξτρα ενέργειας προκειμένου να βοηθάει το σύστημα της κυψέλης καυσίμου στην κάλυψη του φορτίου κατά την διάρκεια αιχμής ζήτησης.
- **Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών** : Το σύστημα διαχείρισης μπαταριών θα αποτελείται από PI ελεγκτές οι οποίοι θα είναι υπεύθυνοι να κρατάνε το σύστημα μπαταριών ασφαλές από υπερβολικές τάσεις φόρτισης (overcharge) και εκφορτίσεις πέρα από τα επιτρεπτά όρια (overdischarge) με βάση τους τεχνικούς περιορισμούς.
- **Σύστημα DC-DC Μετατροπέα Τάσης Μπαταριών** : Αποτελείται από ένα DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης με τάση εξόδου στα 270 V. Επίσης αποτελείται από έναν DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης με τάση εξόδου στα 48 V. Οι παραπάνω μετατροπείς έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τον DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης του συστήματος κυψέλης καυσίμου και έχουν σκοπό την παροχή σταθερής και ανυψωμένης ή υποβιβασμένης τάσης στο φορτίο ή το σύστημα μπαταριών αντίστοιχα. Οι DC-DC μετατροπείς ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης θα ελέγχουν την ισχύ που παρέχει ή απορροφά αντίστοιχα η μπαταρία.
- **Υπερπυκνωτής** : Επιλέγεται ένας υπερπυκνωτής ονομαστικής τάσης 291.6 V και 14.67 F χωρητικότητα. Σκοπός του υπερπυκνωτή είναι η άμεση παροχή βοηθητικής ισχύος λόγω της γρήγορης δυναμικής τους για την κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου ζήτησης κυρίως όταν το φορτίο παρουσιάζει απότομες μεταβολές.
- **Σύστημα ανορθωτή** : Αποτελείται από έναν ανορθωτή τάσης 5 kV A με τάση εξόδου 200 V και 400 Hz συχνότητα AC ρεύματος.
- **Προγραμματιζόμενο DC-AC Φορτίου** : Αποτελείται από ρυθμιζόμενα φορτία.
- **Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας** : Αποτελεί τον κύριο ελεγκτή του υβριδικού συστήματος και σκοπός του αποτελεί ο έλεγχος της ενέργειας του συστήματος της κυψέλης καυσίμου και των μπαταριών παράγοντας τα κατάλληλα σήματα αναφοράς των μετατροπέων. Συγκεκριμένα κάθε χρονική στιγμή ο ελεγκτής λαμβάνει δεδομένα από το σύστημα μέσω των αισθητήρων τάσης και ρεύματος που είναι τοποθετημένοι σε κάθε είσοδο και έξοδο των μετατροπέων και αναλόγως την επιλεγμένη στρατηγική διαχείρισης ενέργειας (Energy Management System) παράγονται όπως φαίνεται και από το σχήμα 2.3 τα κατάλληλα σήματα αναφοράς τάσης εξόδου και μέγιστων τιμών ρεύματος εισόδου και εξόδου των DC-DC μετατροπέων τάσης.

Ακολουθεί η μοντελοποίηση όλων των προαναφερθέντων εξαρτημάτων τα οποία περιγράφονται αναλυτικότερα.

2.2 Μοντελοποίηση Υβριδικού Συστήματος Τροφοδοσίας Συστήματος Ισχύος Έκτακτης Ανάγκης Αεροσκάφους

Για την σχεδίαση και την μελέτη της αποτελεσματικότητας των διάφορων στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας που πρόκειται να πραγματοποιηθούν σε επόμενο εδάφιο, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί ένα αρκετά ακριβές και πλήρες μοντέλο για κάθε ένα από τα υποσυστήματα του υβριδικού μας συστήματος.

Στην παρούσα ενότητα θα προσπαθήσουμε να μοντελοποιήσουμε τα βασικά προαναφερθέντα υποσυστήματα τα οποία απαρτίζουν το σύστημα μας και θα δείξουμε σταδιακά τον τρόπο με τον οποίο καταφέραμε να μοντελοποιήσουμε συνολικά το σύστημα μας στο Simulink.

2.2.1 Μοντέλο Κυψέλης Καυσίμου & DC-DC Μετατροπέα Τάσης

2.2.1.1 Μοντέλο Κυψέλης Καυσίμου

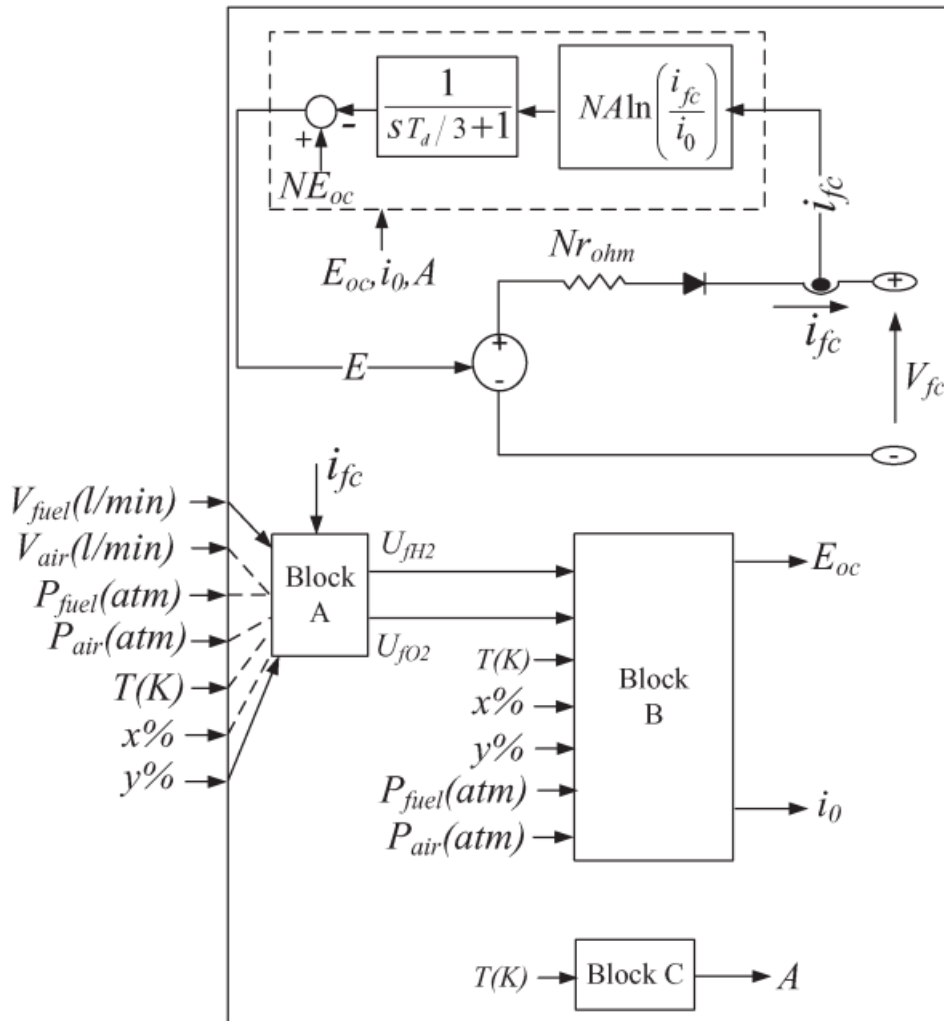
Για την μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου του υπό εξέταση υβριδικού συστήματος αρχικά να αναφέρουμε ότι επιλέγεται μία κυψέλη τύπου Proton Exchange Membrane-PEM λόγω των πολυάριθμων πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει μεταξύ άλλων υψηλή πυκνότητα ισχύος, χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας, υψηλή απόδοση, υψηλό προσδόκιμο ζωής και λόγω της ικανότητας της να ανταποκρίνεται σχετικά γρήγορα στις απότομες μεταβολές φορτίου.

Για την μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιήθηκε ένα γενικό μοντέλο που αναπτύχθηκε και επικυρώθηκε στην αναφορά [23] με απόκλιση $\pm 1\%$ από τις μετρήσεις με βάση πειραματικά δεδομένα και το οποίο παρέχεται από την βιβλιοθήκη του λογισμικού SimPowerSystems του προσομοιωτικού περιβάλλοντος Simulink. Το συγκεκριμένο μοντέλο αναπαριστά την λειτουργία της στοιβάς τόσο σε σταθερή όσο και σε δυναμική κατάσταση λαμβάνοντας υπόψιν τον χρόνο απόκρισης της κυψέλης καυσίμου. Επίσης λαμβάνει υπόψιν του τα ηλεκτρικά και χημικά χαρακτηριστικά που διέπουν τις κυψέλες καυσίμου για μια περισσότερο αξιόπιστη αναπαράσταση της λειτουργίας της. Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται το εν λόγω μοντέλο στοιβάς κυψέλης καυσίμου [23].

Να αναφέρουμε ότι στο συγκεκριμένο μοντέλο θεωρούνται οι παρακάτω παραδοχές και περιορισμοί λόγω απλοποίησης.

Παραδοχές μοντέλου:

- Η στοιβά κυψέλης καυσίμου τροφοδοτείται με υδρογόνο και αέρα και τα αέρια



Σχήμα 2.3: Λεπτομερές μοντέλο στοίβας κυψέλης καυσίμου.

θεωρούνται ιδανικά.

- Η στοίβα κυψέλης καυσίμου είναι εξοπλισμένη με σύστημα ψύξης το οποίο διατηρεί σταθερή την θερμοκρασία στην έξοδο της καθόδου και της ανόδου και ίση με την θερμοκρασία της στοίβας, δηλαδή λειτουργεί σε σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας.
- Η στοίβα είναι εξοπλισμένη με σύστημα διαχείρισης νερού για να διατηρείται η υγρασία στο εσωτερικό της κυψέλης στο κατάλληλο επίπεδο σε οποιοδήποτε φορτίο.
- Οι πτώσεις πίεσης* στα κανάλια ροής είναι αμελητέες.
- Οι πτώσεις τάσεις στα κελιά της στοίβας οφείλονται στο γεγονός ότι οι περισσότερες κυψέλες καυσίμου δεν λειτουργούν στην λεγόμενη mass transport** περιοχή.
- Η αντίσταση του των κελιών της στοίβας είναι σταθερή σε οποιαδήποτε κατάσταση λειτουργίας.

* ως πτώση πίεσης ορίζεται η διαφορά στη συνολική πίεση μεταξύ δύο σημείων ενός δικτύου μεταφοράς ρευστού.

**με τον όρο mass transport εννοούμε την μαζική κίνηση αερίων ή υγρών προς μία κατεύθυνση, συνήθως μέσω ενός συστήματος δοχείων και σωλήνων. Τα συστήματα mass transport βοηθούν στη γρήγορη μεταφορά ουσιών από τη μια τοποθεσία ανταλλαγής στην άλλη.

Περιορισμοί μοντέλου:

- Η ροή των αερίων ή του νερού μέσω της μεμβράνης δεν λαμβάνονται υπόψη.
- Η επίδραση της θερμοκρασίας και της υγρασίας της μεμβράνης δεν λαμβάνεται υπόψη στην αντίσταση της στοιβάς.

Εν συνεχεία της ανάλυσης μας να αναφέρομε ότι επιλέξαμε το λεπτομερές μοντέλο μιας στοιβάς κυψέλης καυσίμου έναντι του απλοποιημένου της [23] προκειμένου να προσεγγίσουμε σε μεγαλύτερο βαθμό την λειτουργία της κυψέλης καυσίμου όταν οι παράμετροι όπως οι πιέσεις, η θερμοκρασία, οι συνθέσεις και ο ρυθμός ροής του καυσίμου και του αέρα ποικίλλουν, πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει στο απλοποιημένο. Παρατηρώντας το σχήμα 2.3, βλέπουμε ότι το λεπτομερές μοντέλο μιας στοιβάς κυψέλης καυσίμου προσομοιώνεται με μια ελεγχόμενη πηγή τάσης εν σειρά με μια σταθερή αντίσταση και τρία μπλοκ των οποίων η λειτουργία είναι ο υπολογισμός εκ νέου των τιμών E_{oc} , i_o και A στις περιπτώσεις μεταβολής των προαναφερθέντων παραμέτρων.

Η ελεγχόμενη πηγή τάσης E περιγράφεται από την εξής εξίσωση :

$$E = E_{oc} - V_{act} \quad (2.1)$$

με

$$V_{act} = A \ln\left(\frac{i_{fc}}{i_o}\right) \frac{1}{sT_d/3 + 1} \text{ οι απώλειες ενεργοποίησης} \quad (2.2)$$

Η τάση εξόδου κελιού της στοιβάς περιγράφεται από την εξής εξίσωση :

$$V = E - V_{ohm} \quad (2.3)$$

με

$$V_{ohm} = R_{ohm} i_{fc} \text{ οι ωμικές απώλειες} \quad (2.4)$$

Η συνολική τάση εξόδου της στοιβάς κυψελών καυσίμου, δηλαδή πολλαπλές κυψέλες καυσίμου σε σειρά υπολογίζεται ως εξής :

$$V_{fc} = NV \quad (2.5)$$

όπου

E_{oc} = τάση ανοιχτού κυκλώματος σε V

N = ο αριθμός κελιών της στοίβας

A = κλίση Tafel

i_o = ρεύμα εξ επαγωγής σε A

T_d = ο χρόνος απόκρισης (στο 95% της τελικής τιμής)

R_{ohm} = εσωτερική αντίσταση σε Ω

i_{fc} = ρεύμα κυψέλης καυσίμου σε A

V_{fc} = τάση κυψέλης σε V

Να αναφέρουμε ότι η εξίσωση (2.1) αναπαριστά την τάση της κυψέλης θεωρώντας μόνο τις απώλειες ενεργοποίησης (απώλειες λόγω της βραδύτητας των χημικών αντιδράσεων στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων), οι οποίες ηλεκτρικά μπορούν να μοντελοποιηθούν από έναν παράλληλο RC κλάδο. Επομένως σε μια ξαφνική αλλαγή στο ρεύμα της στοίβας η τάση της κυψέλης θα παρουσιάσει μία καθυστέρηση η οποία είναι περίπου 3 φορές την σταθερά χρόνου ($\tau = RC$) πριν από ισορροπία. Αυτό το φαινόμενο αναπαρίσταται στην εξίσωση (2.1) καθυστερώντας τις απώλειες ενεργοποίησης με μια συνάρτηση μεταφοράς πρώτου βαθμού $Aln(\frac{i_{fc}}{i_o})\frac{1}{sT_d/3+1}$, με το T_d να είναι ο χρόνος αποκατάστασης.

Στο λεπτομερές μοντέλο στοίβας κυψέλης καυσίμου συγκριτικά με το απλοποιημένο, η τάση ανοιχτού κυκλώματος E_{oc} , το ρεύμα εξ επαγωγής i_o καθώς και ο συντελεστής κλίσης Tafel A όπως φαίνεται και από το αντίστοιχο σχήμα θα πρέπει να υπολογίζονται εκ νέου από τα μπλοκ A , B και C σε οποιαδήποτε μεταβολή στις πιέσεις ή στους ρυθμούς ροής εισόδου του υδρογόνου και του αέρα ή στην μεταβολή θερμοκρασίας της στοίβας ως εξής :

$$E_{oc} = k_c E_n \quad (2.6)$$

$$i_o = \frac{zFk(P_{H_2} + P_{O_2})}{Rh} e^{-\frac{\Delta G}{RT}} \quad (2.7)$$

$$A = \frac{RT}{z\alpha f} \quad (2.8)$$

όπου

$$R = 8.3145 \text{ J/(molK)}$$

$$F = 96485 \text{ A s/mol}$$

$$z = \text{αριθμός κινούμενων ηλεκτρονίων (} z = 2 \text{)}$$

$$E_n = \text{τάση Nerst σε } V$$

$$\alpha = \text{συντελεστής μεταφοράς φορτίου}$$

$$P_{H_2} = \text{μερική πίεση υδρογόνου στο εσωτερικό της κυψέλης σε atm}$$

$$P_{O_2} = \text{μερική πίεση οξυγόνου στο εσωτερικό της κυψέλης σε atm}$$

$$k = 1.38 * 10^{-23} \text{ J/K σταθερά Boltzmann's}$$

$$h = 6.626 * 10^{-34} \text{ Js σταθερά Plank}$$

$$\Delta G = \text{ενεργειακό φράγμα ενεργοποίησης σε } J$$

$$T = \text{Θερμοκρασία λειτουργίας σε } K$$

$$K_c = \text{σταθερά τάσης στην ονομαστική τάση λειτουργίας}$$

Συγκεκριμένα οι ρυθμοί μετατροπής υδρογόνου (Uf_{H_2}) και οξυγόνου (Uf_{O_2}) υπολογίζονται από το μπλοκ A βάση των σχέσεων :

$$V_{fuel} = \frac{60000RTNi_{fc}}{zFP_{fuel}Uf_{H_2}x\%} \quad (2.9)$$

$$V_{air} = \frac{60000RTNi_{fc}}{2zFP_{air}Uf_{O_2}y\%} \quad (2.10)$$

με

$$P_{fuel} = \text{απόλυτη πίεση τροφοδοσίας καυσίμου σε atm}$$

$$P_{air} = \text{απόλυτη πίεση τροφοδοσίας αέρα σε atm}$$

$$V_{fuel} = \text{ρυθμός ροής καυσίμου σε l/min}$$

$$V_{air} = \text{ρυθμός ροής καυσίμου σε l/min}$$

$$N = \text{αριθμός κελιών}$$

$$x = \% \text{ ποσοστό υδρογόνου στο καύσιμο}$$

$$y = \% \text{ ποσοστό οξυγόνου στο μέσο οξείδωσης}$$

Στην συνέχεια οι μερικές πιέσεις υδρογόνου (P_{H_2}) και οξυγόνου (P_{O_2}) και η τάση Nerst (E_n) προσδιορίζονται στο μπλοκ B ως εξής :

$$P_{H_2} = (1 - U f_{H_2})x\%P_{fuel} \quad (2.11)$$

$$P_{O_2} = (1 - U f_{O_2})y\%P_{air} \quad (2.12)$$

$$P_{H_2O} = (w + 2y\%U f_{O_2})P_{air} \quad (2.13)$$

Ο υπολογισμός της τιμής E_n έχει ως εξής :

$$E_n = \begin{cases} 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln(P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}), & \text{για } T \leq 373K \\ 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}}\right), & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (2.14)$$

όπου P_{H_2O} = μερική πίεση υδρατμών σε atm

w = % ποσοστό υδρατμών στο μέσο οξείδωσης

Γνωρίζοντας τις μερικές πιέσεις των αερίων και την τάση *Nernst*, οι νέες τιμές της τάσης ανοιχτού κυκλώματος E_{oc} και του ρεύματος εξ επαγωγής i_o μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2.6) και (2.7). Τέλος το μπλοκ C υπολογίζει τη νέα τιμή της κλίσης Tafel A χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.8).

Για την μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου επιλέχθηκε μια στοίβα κυψέλης καυσίμου τύπου PEM με ονομαστική τιμή ισχύος στα 10.3 kW, ονομαστική τάση τα 41 V και $N = 65$ κελιά. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων της κυψέλης καυσίμου.

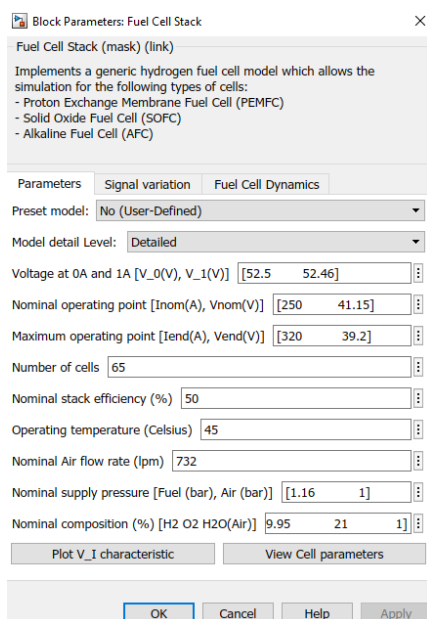
Οι χαρακτηριστικές τάσης VS ρεύματος, ισχύος VS ρεύματος και ισχύος VS απόδοσης της στοίβας κυψέλης καυσίμου φαίνονται στο σχήμα 2.4β' και 2.5 αντίστοιχα.

Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζουμε την υλοποίηση του μοντέλου της στοίβας κυψέλης καυσίμου στο περιβάλλον Simulink.

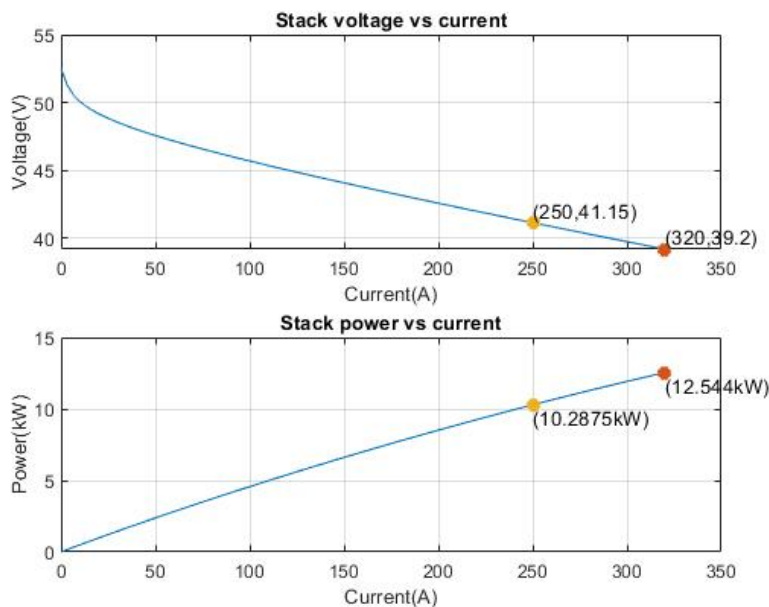
Στο σχήμα 2.6 φαίνεται η στοίβα κυψέλης καυσίμου και ο αντίστοιχος Controller σκοπός του οποίου είναι να ρυθμίζει συνεχώς την ροή του υδρογόνου (Fuel Flow Rate) και του αέρα (Air Flow Rate) που εισάγονται στην κυψέλη. Αναλυτικότερα, το ρεύμα που παράγεται κάθε χρονική στιγμή από την κυψέλη καυσίμου θα εισέρχεται ως είσοδο στον Controller, ο οποίος με την σειρά του αναλόγως την τιμή του ρεύματος εισόδου και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.9) και (2.10) θα υπολογίζει την απαιτούμενη ροή του υδρογόνου και του αέρα σε liter/minute στην κυψέλη για την διατήρηση του επιθυμητού ρεύματος και επομένως της επιθυμητής ισχύος.

Πίνακας 2.1: Παραμετροποίηση τιμών κυψέλης καυσίμου στο Simulink.

Voltage at 0 A and 1 A [V_0 (V), V_1 (V)]	[52.5 , 52.46]
Nominal operating point [I_{nom} (A), V_{nom} (V)]	[250 , 41.15]
Maximum operating point [I_{end} (A), V_{end} (V)]	[320 , 39.2]
Number of cells	65
Nominal stack efficiency (%)	50
Operating temperature (Celsius)	45
Nominal Air flow rate (lpm)	732
Nominal supply pressure [F_{fuel} (bar), Air (bar)]	[1.16 , 1]
Nominal composition (%) [H_2 O_2 H_2O (Air)]	[99.95 , 21]
Fuel Cell response time (sec)	1
Peak O_2 utilization (%)	60
Voltage undershoot (V) @ peak O_2 utilization	2

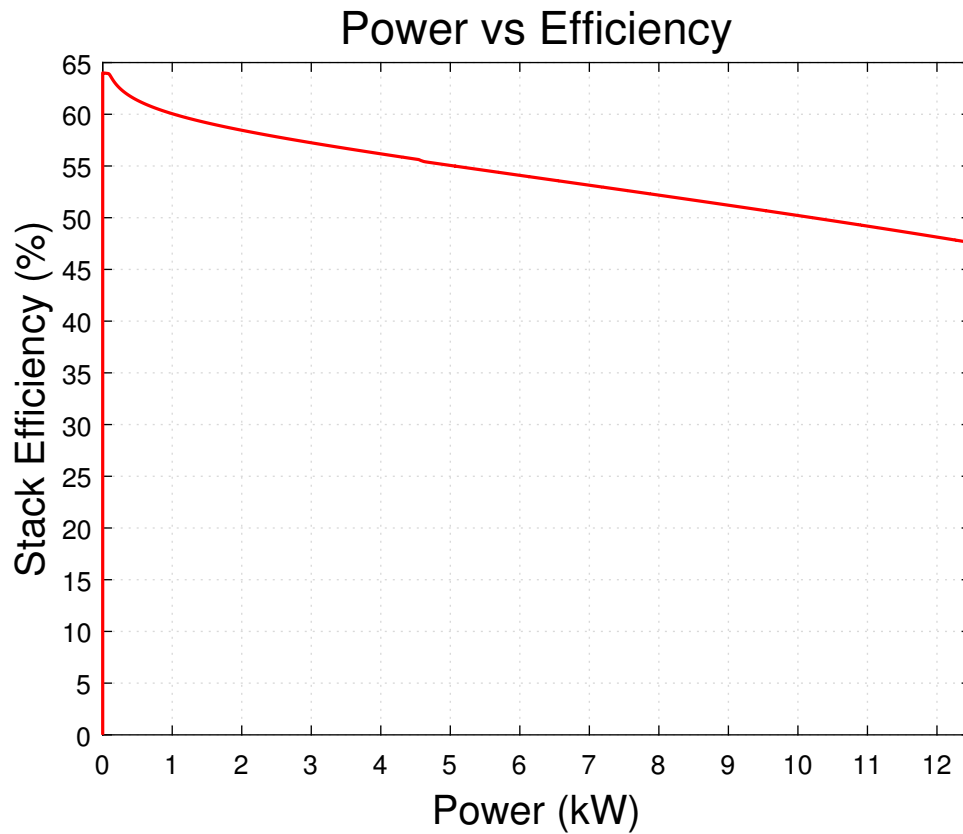


(α') Παραμετροποίηση τιμών κυψέλης καυσίμου στο Simulink.

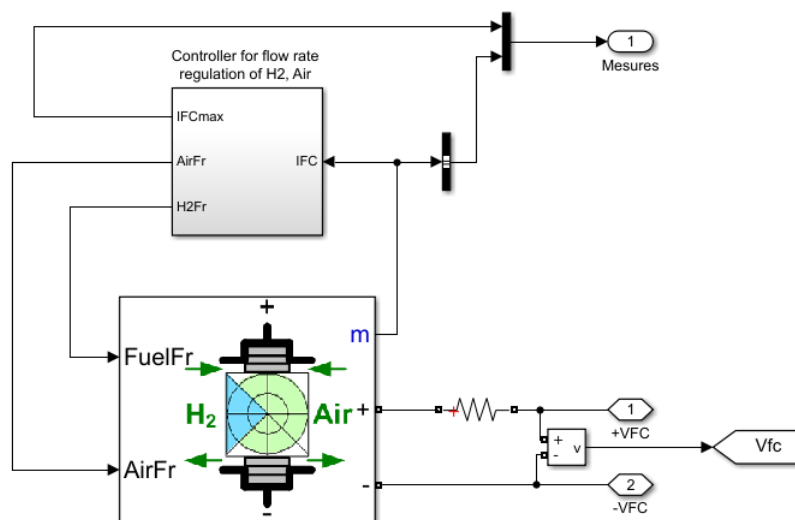


(β') Τάση V_S ρεύμα επάνω. Ισχύς V_S ρεύμα κάτω.

Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστική τάσης V_S ρεύματος, ισχύος V_S ρεύματος στοίβας κυψέλης καυσίμου.



Σχήμα 2.5: Χαρακτηριστική ισχύος VS απόδοσης στοίβας κυψέλης καυσίμου.



Σχήμα 2.6: Υλοποίηση του μοντέλου της στοίβας κυψέλης καυσίμου στο περιβάλλον Simulink.

2.2.1.2 Μοντέλο DC-DC Μετατροπέα Ανύψωσης Τάσης Κυψέλης Καυσίμου

Η τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου του υβριδικού μας συστήματος θα ποικίλει ανάλογα την απαιτούμενη ισχύ κάθε χρονική στιγμή. Είναι επομένως απαραίτητη η ύπαρξη ενός DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης ανάμεσα στην κυψέλη και στον DC δίαυλο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1, ο οποίος θα ανυψώνει και θα σταθεροποιεί την τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου.

Οι DC-DC μετατροπείς τάσης μπορούν να αναπαρασταθούν από δύο τύπους μοντέλων, το διακοπτικό μοντέλο (switching models) και το μοντέλο μέσου όρου (average-value model). Τα διακοπτικά μοντέλα των οποίων η θεωρία και ο τρόπος λειτουργίας τους αναλύθηκε σε προγενέστερο εδάφιο, χρησιμοποιούνται κυρίως για σχεδιαστικούς σκοπούς και για την διερεύνηση διαφόρων τύπων διαμόρφωσης εύρους παλμών (switching models) σχετικά με τις αρμονικές μεταγωγής και τις απώλειες. Αντίθετα τα μοντέλα μέσου όρου χρησιμοποιούνται για την διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς του μετατροπέα όταν υπόκειται σε αλλαγές στις παραμέτρους λειτουργίας του όπως η διακύμανση της τάσης εισόδου. Μια τέτοια ανάλυση είναι απαραίτητη όταν η έξοδος του μετατροπέα ρυθμίζεται μέσω ενός βρόχου ανάδρασης όπως και στην δικιά μας περίπτωση, προκειμένου να διατηρείται σταθερή η έξοδος μεταβάλλοντας το Duty Cycle του διακόπτη ώστε να προσαρμόζεται σύμφωνα με τις διακυμάνσεις της πηγής ή του φορτίου ζήτησης. Επίσης σε αντίθεση με τα διακοπτικά μοντέλα τα οποία απαιτούν χαμηλό χρόνο δειγματοληψίας, προκειμένου να παρατηρηθούν όλες οι εναλλαγές των διακοπών, γεγονός που καθιστά την προσομοίωση πολύ χρονοβόρα, τα μοντέλα μέσου όρου είναι λιγότερα χρονοβόρα στην προσομοίωση καθώς οι διακόπτες αντικαθίστανται από ελεγχόμενες πηγές τάσης και ρεύματος. Σε αυτήν την περίπτωση δεν αναπαρίστανται οι αρμονικές μεταγωγής όμως ολόκληρη η δυναμική του μετατροπέα διατηρείται γεγονός που κάνει τα μοντέλα μέσου όρου ελκυστικά καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερος χρόνος δειγματοληψίας και επομένως να μειωθεί σημαντικά ο χρόνος προσομοίωσης.

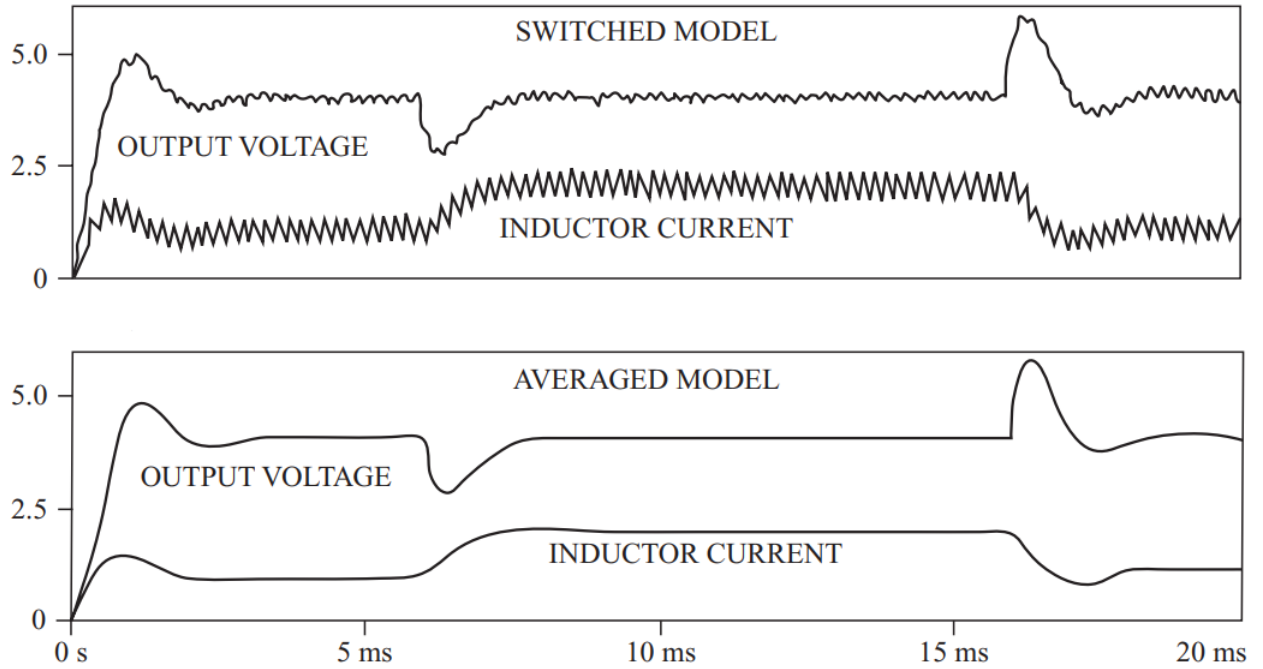
Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τάσης εξόδου του και του ρεύματος του πηνίου ενός μετατροπέα που έχει σχεδιαστεί με τους προαναφερθέντες τύπους μοντέλων, το διακοπτικό δηλαδή μοντέλο και το μοντέλο μέσων τιμών [21].

Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται η απεικόνιση κυκλώματος του μοντέλου μετατροπέα ανύψωσης μέσης τιμής [21].

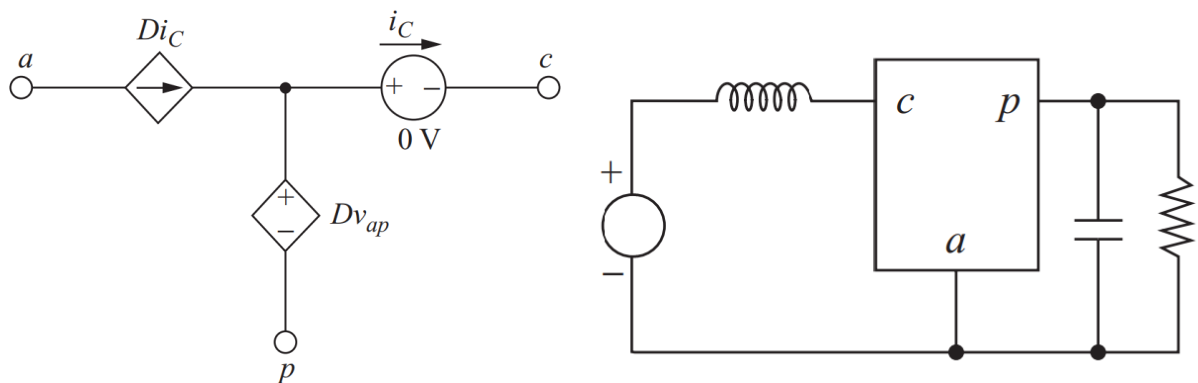
Οι σχέσεις μεταξύ των ρευμάτων εισόδου/εξόδου, των τάσεων εισόδου/εξόδου και του Duty Cycle του μετατροπέα ανύψωσης τάσης προκύπτουν από την θεωρητική ανάλυση που έγινε στο αντίστοιχο εδάφιο ως εξής :

$$\frac{V_L}{V_H} = \frac{I_H}{I_L} = 1 - D \quad (2.15)$$

Προκειμένου η τάση εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης και η τιμή ισχύος εξόδου του μετατροπέα η οποία αφορά ουσιαστικά στην ισχύ εξόδου της κυψέλης καυσίμου



Σχήμα 2.7: Αποτελέσματα διακοπτικού μοντέλου και μοντέλο μέσου όρου.



(α') Μοντέλο μέσης τιμής διόδου και (β') Μοντέλο μετατροπέα ανύψωσης τάσης μέσης τιμής.

Σχήμα 2.8: Απεικόνιση κυκλώματος μοντέλου μετατροπέα ανύψωσης τάσης μέσης τιμής.

του υπό εξέταση υβριδικού συστήματος, να βρίσκονται κάθε στιγμή στην επιθυμητή τιμή θα πρέπει το Duty Cycle του διακόπτη και οι τιμές τάσης και ρεύματος των ελεγχόμενων πηγών να μεταβάλλονται κατάλληλα κάθε χρονική στιγμή. Το παραπάνω επιτυγχάνεται μέσω ενός κλειστού βρόγχου ανάδρασης όπως φαίνεται και από το σχήμα 2.9. Συγκεκριμένα η επιθυμητή τιμή τάσης εξόδου (V_H^*) καθώς και η τιμή μέγιστου ρεύματος εισόδου ($I_{L(max)}^*$) του μετατροπέα θα εισέρχονται στον βρόγχο ανάδρασης ως σήματα αναφοράς όπου με την χρήση ενός ρυθμιστή τάσης (Voltage Regulator) και ενός ρυθμιστή ρεύματος (Current Regulator) με την μορφή PI ελεγκτών θα υπολογίζεται η κατάλληλη τιμή του κύκλου λειτουργίας D . Κατόπιν εφαρμόζοντας την σχέση (2.15) θα παράγονται τα κατάλληλα σήματα ελέγχου (τιμή τάσης, ρεύματος)

των ελεγχόμενων πηγών.

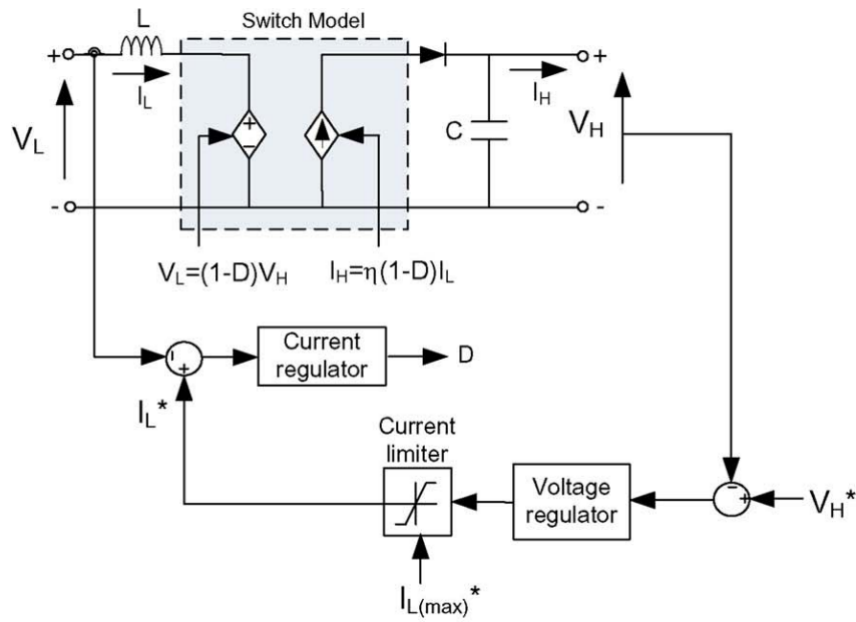
Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζεται η υλοποίηση του μοντέλου DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης στο περιβάλλον Simulink. Η συγκεκριμένη υλοποίηση αφορά την μοντελοποίηση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης μέσου όρου του σχήματος 2.9. Να αναφέρουμε ότι οι τιμές χωρητικότητας του πυκνωτή και αυτεπαγωγής του πηνίου εφαρμόζοντας την θεωρητική ανάλυση που έγινε στο αντίστοιχο εδάφιο και κατόπιν δοκιμών για την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν οι τιμές $800e^{-6} F$ για την χωρητικότητα πυκνωτή και $100e^{-6} H$ για την αυτεπαγωγή του πηνίου. Επίσης θεωρήθηκε $n = 90\%$ η απόδοση του μετατροπέα.

Η λειτουργία του μετατροπέα στηρίζεται στην συνεχή καταγραφή των τιμών τάσης και ρεύματος στην είσοδο και έξοδο του μετατροπέα όπως φαίνεται από το σχήμα 2.10. Κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται το σφάλμα μεταξύ των τιμών καταγραφής και των επιθυμητών τιμών, το οποίο περνώντας στην συνέχεια ως είσοδο στους PI ελεγκτές που βρίσκονται στο εσωτερικό των αντίστοιχων ρυθμιστών τάσης και ρεύματος υπολογίζεται η κατάλληλη τιμή του Duty Cycle και εν τέλει τα σήματα ελέγχου των ελεγχόμενων πηγών τάσης και ρεύματος.

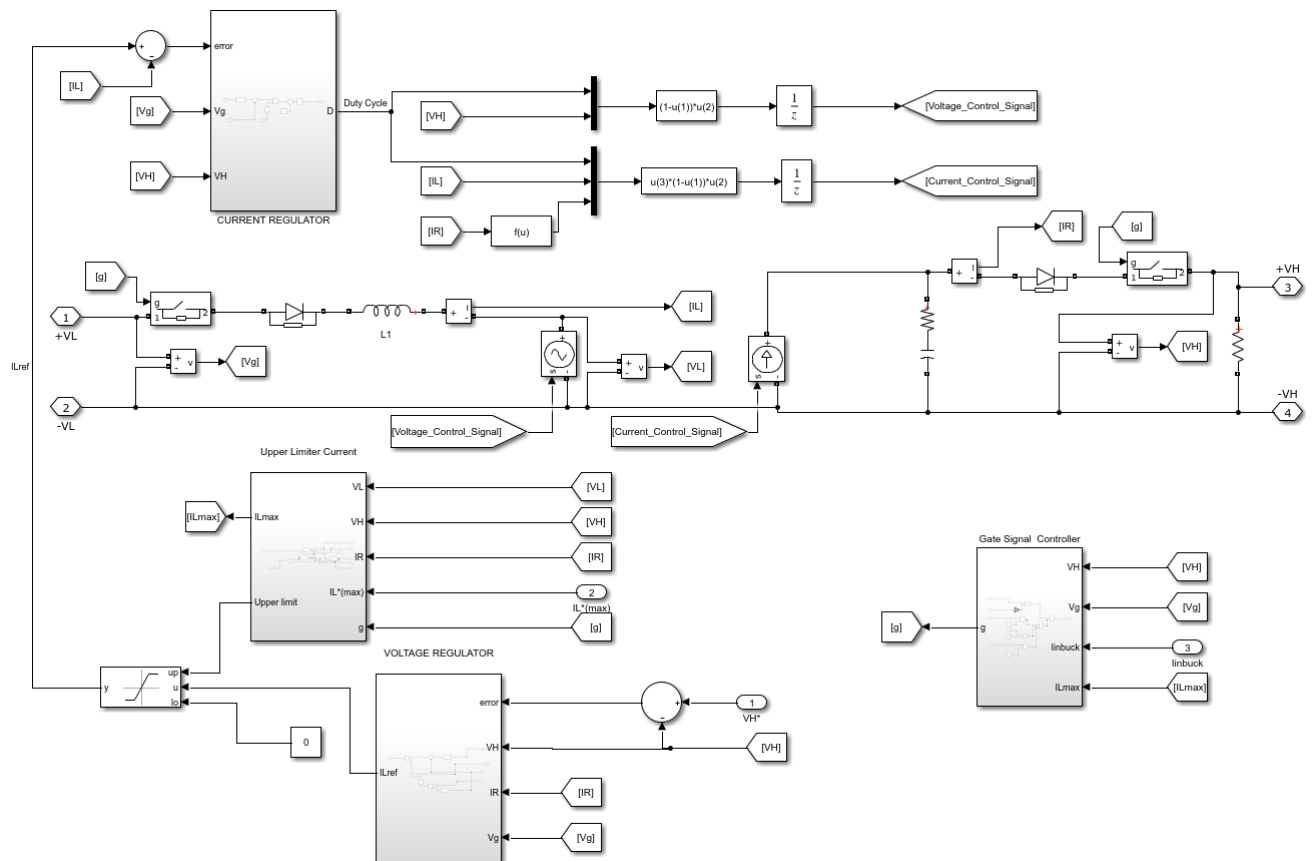
Ενδεικτικά παρουσιάζουμε στο σχήμα 2.11 το υποσύστημα του ρυθμιστή ρεύματος (Current Regulator) του συστήματος του μετατροπέα. Το συγκεκριμένο υποσύστημα παίρνει ως είσοδο το σφάλμα (error) μεταξύ του ρεύματος την συγκεκριμένη χρονική στιγμή στην είσοδο του μετατροπέα και του ρεύματος αναφοράς/επιθυμητού, το οποίο έχει υπολογιστεί από τον ρυθμιστή τάσης (Voltage Regulator), το οποίο σφάλμα κατόπιν εισέρχεται στον PI ελεγκτή σκοπός του οποίου είναι η σταθεροποίηση της τιμής του ρεύματος αναφοράς στην επιθυμητή τιμή κάθε χρονική στιγμή. Στην συνέχεια εφαρμόζοντας την σχέση $1 - \frac{V_g}{V_H}$ της εξίσωσης (2.15) με V_g , V_H η τάση εισόδου και εξόδου του μετατροπέα αντίστοιχα, υπολογίζεται η κατάλληλη τιμή του Duty Cycle. Τέλος εφαρμόζοντας την σχέση $(1 - D)V_H$ της εξίσωσης (2.15) καθορίζεται το σήμα ελέγχου της ελεγχόμενης πηγής τάσης, το επίπεδο δηλαδή της τάσης που θα πρέπει η πηγή να παράγει. Παρόμοια, εφαρμόζοντας την σχέση $n(1 - D)I_L$ της εξίσωσης (2.15), με n , D , I_L η απόσδοη, το Duty Cycle και το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα αντίστοιχα, υπολογίζεται το σήμα ελέγχου της ελεγχόμενης πηγής ρεύματος το επίπεδο δηλαδή του ρεύματος που θα πρέπει η πηγή να παράγει. Να αναφέρουμε ότι οι τιμές των κερδών k_p και k_i του PI ελεγκτή επιλέχθηκαν να είναι $k_p = 2.90295885 * 10^{-5}$ και $k_i = 0.004214857929$. Η ρύθμιση (tuning) των PI ελεγκτών έγινε με την βοήθεια του εργαλείου *PID Tuner* που προσφέρει το Matlab.

2.2.2 Μοντέλο Μπαταρίας & DC-DC Μετατροπέα Ανύψωσης και Υποβιβασμού Τάσης Μπαταρίας

Το σύστημα μπαταριών του υβριδικού μας συστήματος θα χρησιμοποιηθεί ως συσκευή αποθήκευσης ενέργειας και θα αποτελεί δευτερεύουσα πηγή ενέργειας για το σύστημα μας, με σκοπό την διατήρηση σταθερής τάσης των $270 V$ στον DC δίαυλο και την παροχής βοηθητικής ενέργειας όταν η κυψέλη καυσίμου δεν δύναται να καλύψει την απαιτούμενη ενέργεια του φορτίου. Η διαχείριση της ενέργειας της μπαταρίας, δηλαδή

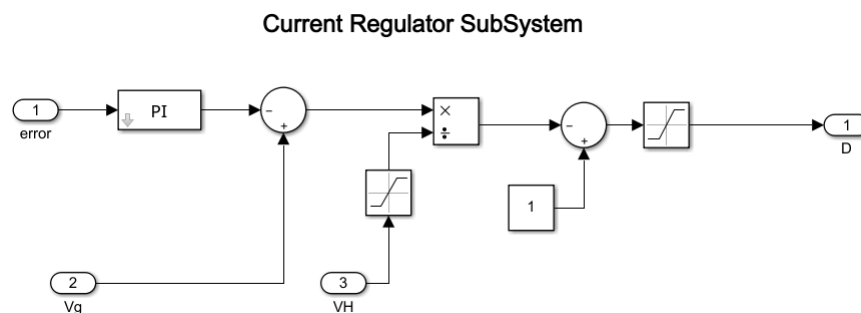


Σχήμα 2.9: Κύκλωμα και λειτουργία DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης μέσου όρου.



Σχήμα 2.10: Υλοποίηση του μοντέλου DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης στο περιβάλλον Simulink.

το πότε η μπαταρία θα παρέχει ισχύ στο σύστημα (εκφόρτιση) και πότε θα δέχεται ενέργεια από αυτό (φόρτιση) θα ελέγχεται μέσω του DC-DC μετατροπέα ανύψωσης



Σχήμα 2.11: Υποσύστημα ρυθμιστή ρεύματος μετατροπέα ανύψωσης τάσης στο περιβάλλον Simulink.

τάσης για την κατάσταση εκφόρτισης, και του DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης για την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας.

2.2.2.1 Μοντέλο Μπαταρίας

Για την μοντελοποίηση του συστήματος μπαταρίας του υπό εξέταση υβριδικού συστήματος αρχικά να αναφέρουμε ότι επιλέγεται μια μπαταρία τύπου ιόντων λιθίου καθώς η υψηλή πυκνότητα ενέργειας, το υψηλό προσδόκιμο ζωής, η υψηλή αποτελεσματικότητα συγκριτικά με άλλους τύπους μπαταριών (μολύβδου-οξέος, νικελίου-καδμίου-*NiCd*, νικελίου-υδριδίου μετάλλου-*NiMH*) και το σχετικά χαμηλό ποσοστό αυτο-εκφόρτισης τους τις κάνει περισσότερο ελκυστικές για εφαρμογές αυτοκινήτων ή αεροσκαφών.

Για την μοντελοποίηση του συστήματος μπαταριών χρησιμοποιήθηκε ένα γενικό μοντέλο που αναπτύχθηκε και επικυρώθηκε στην αναφορά [24] το οποίο αναπαριστά την λειτουργία της μπαταρίας τόσο σε σταθερή όσο και σε δυναμική κατάσταση λαμβάνοντας υπόψιν τον χρόνο απόκρισης της μπαταρίας. Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει τέσσερις τύπους μπαταρίας που είναι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, νικελίου-καδμίου, ιόντων λιθίου και νικελίου-υδριδίου μετάλλου. Οι παραπάνω τύποι μπαταριών παρουσιάζουν μέγιστη απόκλιση $\pm 5\%$, ωστόσο όμως η απόκλιση μπορεί να φτάσει έως και $\pm 10\%$ όταν η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (*SOC*) πέσει κάτω από το 20% γι'αυτό δεν συνιστάται να εκφορτίζεται πλήρως η μπαταρία. Στο σχήμα 2.12 παρουσιάζεται το εν λόγω μοντέλο μπαταρίας κυκλωματικά [22] και στο περιβάλλον Simulink.

Να αναφέρουμε ότι στο συγκεκριμένο μοντέλο θεωρούνται οι παρακάτω παραδοχές και περιορισμοί λόγω απλοποίησης.

Παραδοχές μοντέλου:

- Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας διατηρείται σταθερή κατά την διάρκεια των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης και δεν μεταβάλλεται ανάλογα με το πλάτος του ρεύματος.
- Οι παράμετροι του μοντέλου προκύπτουν από την χαρακτηριστική της εκφόρτισης

που παρέχεται από τον κατασκευαστή και θεωρούνται ότι είναι ίδιες και για την φόρτιση.

- Η χωρητικότητα της μπαταρίας δεν αλλάζει με το πλάτος του ρεύματος, δεν παίρνει μέρος δηλαδή το φαινόμενο Peukert.
- Η θερμοκρασία δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του μοντέλου.
- Η αυτοεκφόρτιση της μπαταρίας δεν λαμβάνεται υπόψιν.
- Η μπαταρία δεν παρουσιάζει το φαινόμενο μνήμης (memory effect).

Περιορισμοί μοντέλου:

- Η ελάχιστη τάση μπαταρίας χωρίς φορτίο είναι $0V$ και η η μέγιστη τάση της μπαταρίας δεν περιορίζεται.
- Η ελάχιστη χωρητικότητα της μπαταρίας είναι $0Ah$ και η η μέγιστη χωρητικότητα της δεν περιορίζεται. Επομένως, η μέγιστη τιμή της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας (SOC) μπορεί να φτάσει παραπάνω από 100% εάν η μπαταρία υπερφορτιστεί.

Η τάση της μπαταρίας V_{batt} υπολογίζεται ως εξής :

$$V_{batt} = E - R_{batt}I_{batt} \quad (2.16)$$

$$\mu \epsilon E = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A_{batt} \exp(-Bit) \quad (2.17)$$

Συνολικά από 2.16, 2.17 έχουμε :

$$V_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} i^* - k \frac{Q}{Q - it} it + A_{batt} \exp(-Bit) - R_{batt}I_{batt} \quad (2.18)$$

όπου

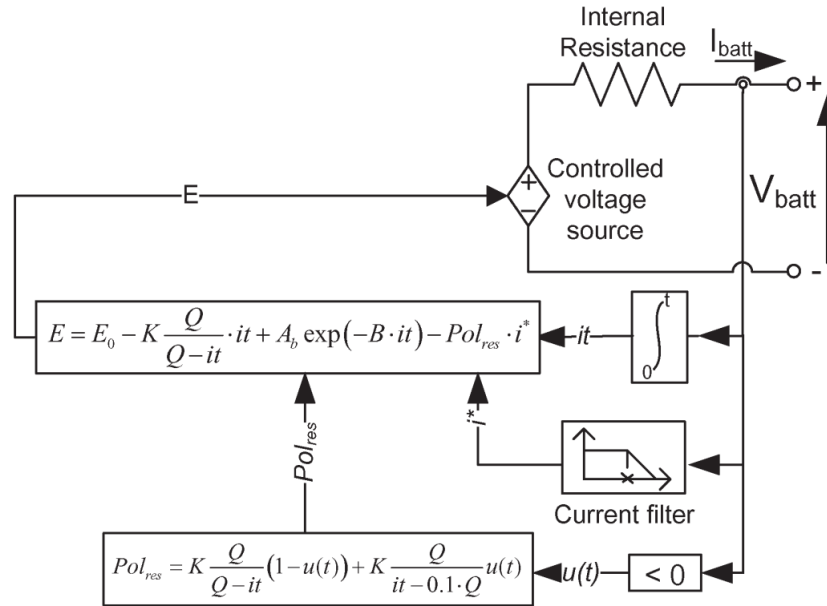
V_{batt} = τάση μπαταρίας σε V

R_{batt} = εσωτερική αντίσταση μπαταρίας σε Ω

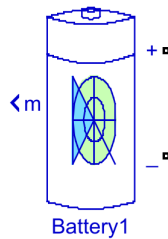
I_{batt} = ρεύμα μπαταρίας σε A

Q = χωρητικότητα μπαταρίας σε Ah

E = τάση χωρίς φορτίο σε V



Σχήμα 2.12: Γενικό μοντέλο μπαταρίας ιόντων-λιθίου



Σχήμα 2.13: Μοντέλο μπαταρίας στο περιβάλλον Simulink.

E_0 = σταθερά τάσης μπαταρίας τάση σε V

K = τάση πόλωσης σε V/Ah

it = πραγματική φόρτιση μπαταρίας σε Ah

i^* = φιλτραρισμένο ρεύμα μπαταρίας σε A

A_{batt} = πλάτος της εκθετικής ζώνης σε V

B = αντίστροφη χρονική σταθερά εκθετικής ζώνης σε $(Ah)^{-1}$

Ο όρος $K \frac{Q}{Q-it} it$ της σχέσης (2.18) αναφέρεται ως τάση πόλωσης ενώ ο όρος $K \frac{Q}{Q-it}$ ως αντίσταση πόλωσης Pol_{res}

Κατά την διάρκεια φόρτισης, η τάση της μπαταρίας αυξάνεται απότομα μετά που θα φορτιστεί πλήρως. Το φαινόμενο αυτό αντιπροσωπεύεται με μια τροποποίηση της αντίστασης πόλωσης (μόνο κατά τη φόρτιση) ως εξής :

$$Pol_{res} = K \frac{Q}{it - 0.1Q} \quad (2.19)$$

Η κατάσταση φόρτισης (SOC) της μπαταρίας υπολογίζεται ως εξής:

$$Q(t) = Q(0) - \int_0^t I_{batt} dt \quad (2.20)$$

Ο ρυθμός C της μπαταρίας (C rate) χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον ρυθμό φόρτισης ή αποφόρτιση της μπαταρίας. Παραδείγματος χάριν μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία $10Ah$ η οποία αποφορτίζεται με ρυθμό $1C$ σημαίνει ότι παρέχει 10 Amperes με σταθερό ρυθμό για περίοδο 1 ώρας. Η ίδια μπαταρία όταν αποφορτίζεται με ρυθμό $0,5C$ θα παρέχει 10 Amps μέσα σε 2 ώρες κτλ. Ορίζεται ως:

$$C_{rate} = \frac{I_{batt}}{Q/h} \quad (2.21)$$

Έστω μια μπαταρία $2300mAh = 2.3Ah$ εκφορτίζεται με ρυθμό $0.5C$. Αυτό σημαίνει ότι θα εκφορτιστεί σε $\frac{1}{0.5C} = 2\text{ hours}$ ή 30 minutes . Από την (2.21) θα έχουμε ότι :

$$I_{batt} = C_{rate} * \frac{Q}{h} = 0.5 \frac{2.3Ah}{h} = 1.15\text{ A διαθέσιμο ρεύμα} \quad (2.22)$$

Η ισχύς και η ενέργεια που αντλούνται από την μπαταρία υπολογίζονται ως εξής :

$$Power_{batt} = V_{batt} I_{batt} \quad (2.23)$$

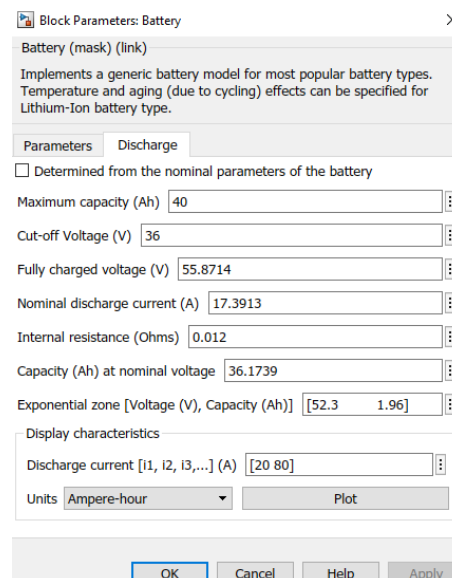
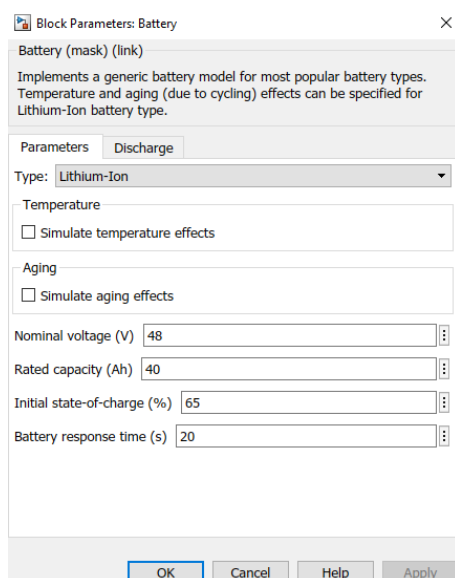
$$Energy_{batt} = \int Power_{batt} dt \quad (2.24)$$

Για την μοντελοποίηση της μπαταρίας επιλέχθηκε μια μπαταρία τύπου ιόντων λιθίου (Lithium-Ion) με ονομαστική τάση $48V$ και $40Ah$ χωρητικότητα. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων της μπαταρίας.

Στο σχήμα 2.14 φαίνεται η παραμετροποίηση τιμών μπαταρίας στο Simulink ενώ στο 2.15 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές εκφόρτισης της μπαταρίας για ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης $17.3913A$ και για ρεύμα εκφόρτισης $20A$ και $80A$.

Πίνακας 2.2: Παραμετροποίηση τιμών μπαταρίας στο Simulink.

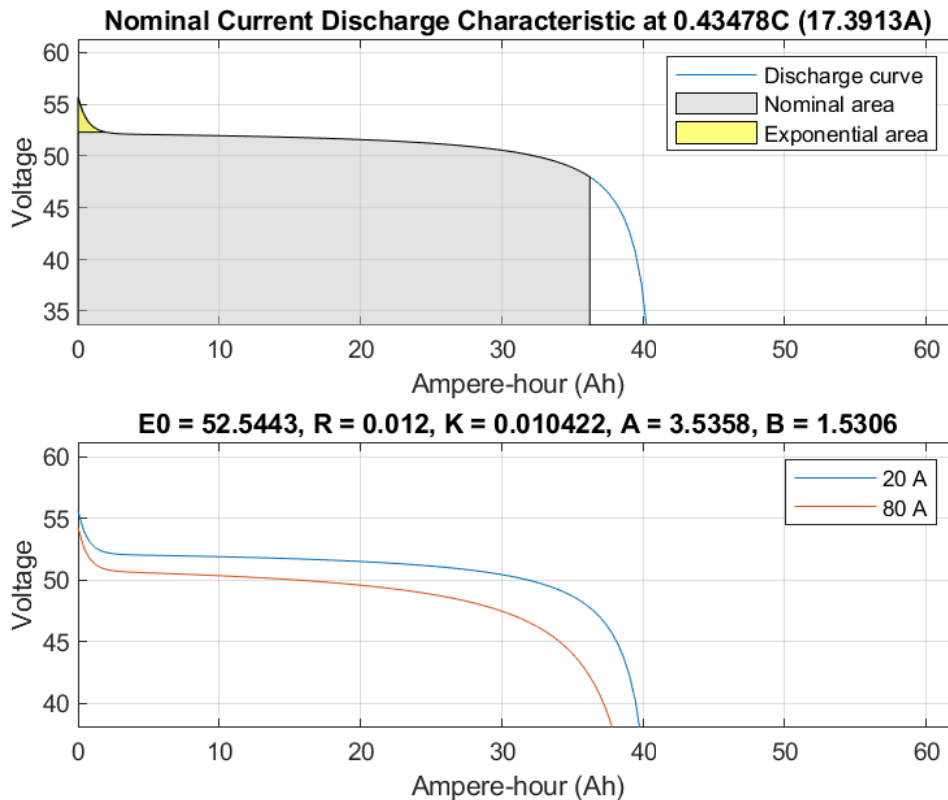
Nominal voltage (V)	48
Rated capacity (Ah)	40
Maximum capacity (Ah)	40
Fully charged voltage (V)	55.8714
Nominal discharge current (A)	17.3913
Internal resistance (Ohms)	0.012
Capacity (Ah) at nominal voltage	36.1739
Exponential zone ([Voltage(V), Capacity(Ah)])	[52.31.96]
Battery response time (s)	20
Initial state-of-charge (%)	65



Σχήμα 2.14: Παραμετροποίηση τιμών μπαταρίας στο Simulink.

2.2.2.2 DC-DC Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης και Υποβιβασμού Τάσης Μπαταρίας

Η τάση εξόδου της μπαταρίας του υβριδικού μας συστήματος θα ποικίλει ανάλογα το απαιτούμενο ρεύμα κάθε χρονική στιγμή. Είναι επομένως απαραίτητη η ύπαρξη ενός DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης ανάμεσα στην μπαταρία και στον DC δίαυλο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1, ο οποίος θα ανυψώνει και θα σταθεροποιεί στην τιμή αναφοράς των 270 V την τάση εξόδου της μπαταρίας. Επίσης κάθε φορά που η μπαταρία θα τίθεται σε κατάσταση φόρτισης, δηλαδή όταν θα απορροφά περισσευούμενη ενέργεια από το σύστημα θα πρέπει η τάση και το ρεύμα του DC δίαυλου εκείνη την χρονική στιγμή να ρυθμίζονται στις κατάλληλες τιμές που απαιτούνται για την φόρτιση της μπαταρίας. Επομένως η ύπαρξη ενός DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης ανάμεσα στην μπαταρία και στον DC δίαυλο ο οποίος θα ρυθμίζει την τάση και το ρεύμα φόρτισης



Σχήμα 2.15: Χαρακτηριστικές εκφόρτισης μπαταρίας για ρεύματα εκφόρτισης 17.3913 A (ονομαστικό), 20 A και 80 A .

της μπαταρίας είναι απαραίτητος. Οι DC-DC μετατροπείς τάσης θα μοντελοποιηθούν και σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιώντας το μοντέλο μέσου όρου (average-value model) για τα λόγους που αναφέραμε στην περίπτωση του DC-DC μετατροπέα τάσης της κυψέλης καυσίμου.

DC-DC Μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης Μπαταρίας

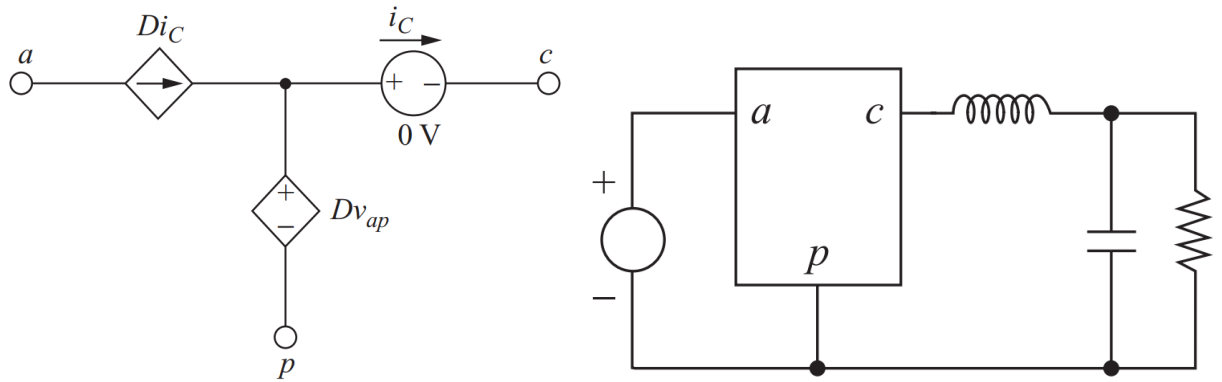
Για την μοντελοποίηση DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια φιλοσοφία και μεθοδολογία με τον DC-DC μετατροπέα τάσης της κυψέλης καυσίμου, ο οποίος περιγράφηκε αναλυτικά.

DC-DC Μετατροπέας Υποβιβασμού Τάσης Μπαταρίας

Για την μοντελοποίηση του DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια φιλοσοφία και μεθοδολογία με τον DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης της κυψέλης καυσίμου, με διαφορές που αφορούν την τοπολογία και τις εξισώσεις που διέπουν το κύκλωμα

Στο σχήμα 2.16 παρουσιάζεται η απεικόνιση κυκλώματος του μοντέλου μετατροπέα ανύψωσης μέσης τιμής [21].

Οι σχέσεις μεταξύ των ρευμάτων εισόδου/εξόδου, των τάσεων εισόδου/εξόδου



(α') Μοντέλο μέσης τιμής διόδου και (β') Μοντέλο μετατροπέα υποβιβασμού
διακοπών. μέσης τιμής.

Σχήμα 2.16: Απεικόνιση κυκλώματος μοντέλου μετατροπέα υποβιβασμού μέσης τιμής.

και του Duty Cycle του μετατροπέα ανύψωσης τάσης προκύπτουν από την θεωρητική ανάλυση που έγινε στο αντίστοιχο εδάφιο ως εξής :

$$\frac{V_L}{V_H} = \frac{I_H}{I_L} = D \quad (2.25)$$

όπου

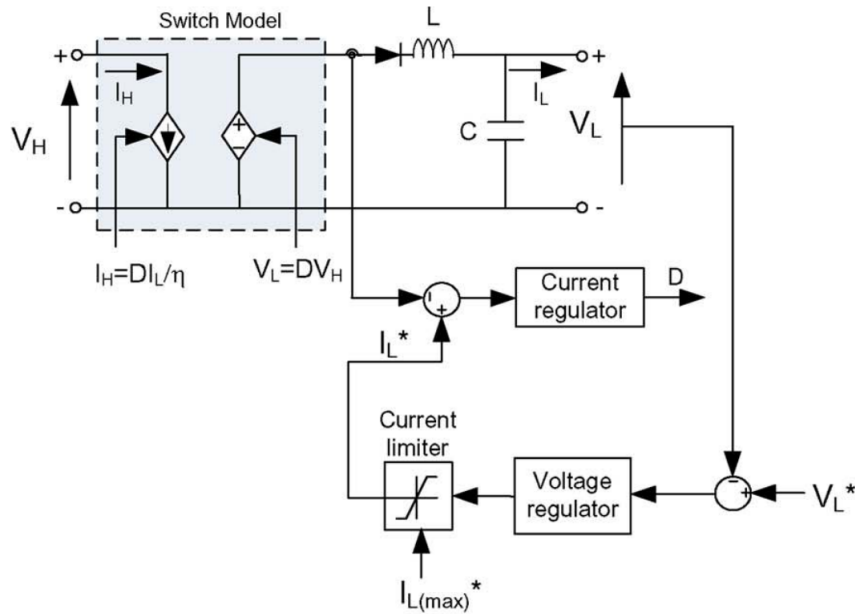
V_L η τάση εξόδου του μετατροπέα

V_H η τάση εισόδου του μετατροπέα

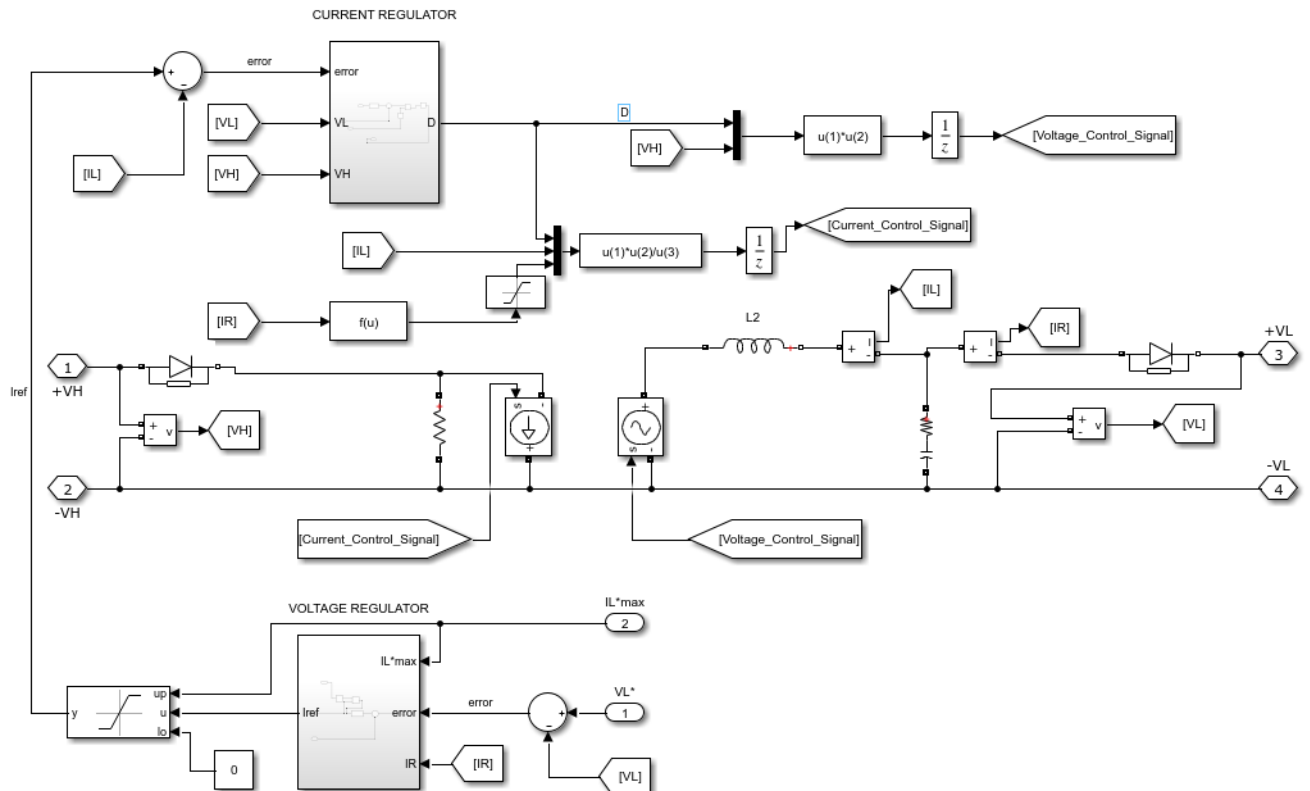
Προκειμένου η τάση εξόδου του μετατροπέα υποβιβασμού του υπό εξέταση υβριδικού συστήματος καθώς και η τιμή της ισχύος εξόδου του που αφορά στον έλεγχο της ενέργειας που προσφέρεται από τον DC δίαυλο προς την μπαταρία να βρίσκονται κάθε στιγμή στην επιθυμητή τιμή, θα πρέπει το Duty Cycle του διακόπτη και οι τιμές τάσης και ρεύματος των ελεγχόμενων πηγών να μεταβάλλονται κατάλληλα κάθε χρονική στιγμή. Το παραπάνω επιτυγχάνεται μέσω ενός κλειστού βρόγχου ανάδρασης όπως φαίνεται και από το σχήμα 2.17. Συγκεκριμένα η επιθυμητή τιμή τάσης εξόδου (V_L^*) καθώς και η τιμή μέγιστου ρεύματος εισόδου ($I_{L(max)}^*$) του μετατροπέα θα εισέρχονται στον βρόγχο ανάδρασης ως σήματα αναφοράς όπου με την χρήση ενός ρυθμιστή τάσης (Voltage Regulator) και ενός ρυθμιστή ρεύματος (Current Regulator) με την μορφή PI ελεγκτών θα υπολογίζεται η κατάλληλη τιμή του κύκλου λειτουργίας D . Κατόπιν εφαρμόζοντας την σχέση (2.25) θα παράγονται τα κατάλληλα σήματα ελέγχου (τιμή τάσης, ρεύματος) των ελεγχόμενων πηγών.

Στο σχήμα 2.18 παρουσιάζεται η υλοποίηση του μοντέλου DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης στο περιβάλλον Simulink. Η συγκεκριμένη υλοποίηση αφορά την μοντελοποίηση του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης μέσου όρου του σχήματος 2.17. Να αναφέρουμε ότι οι τιμές χωρητικότητας του πυκνωτή και αυτεπαγωγής του πηνίου

εφαρμόζοντας την θεωρητική ανάλυση που έγινε στο αντίστοιχο εδάφιο και κατόπιν δοκιμών για την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν οι τιμές $800e^{-6} F$ για την χωρητικότητα πυκνωτή και $100e^{-3} H$ για την αυτεπαγωγή του πηνίου. Επίσης θεωρήθηκε $n = 90\%$ η απόδοση του μετατροπέα.



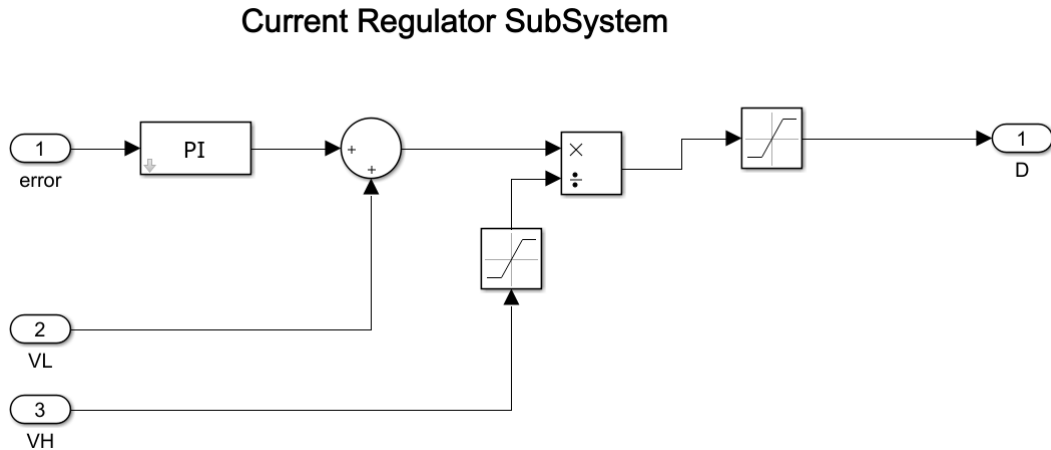
Σχήμα 2.17: Κύκλωμα και λειτουργία DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης μέσου όρου.



Σχήμα 2.18: Υλοποίηση του μοντέλου DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης στο περιβάλλον Simulink.

Η λειτουργία του μετατροπέα στηρίζεται στην συνεχή καταγραφή των τιμών τάσης και ρεύματος στην είσοδο και έξοδο του όπως φαίνεται από το σχήμα 2.18. Κάθε χρονική στιγμή υπολογίζεται το σφάλμα μεταξύ των τιμών καταγραφής και των επιθυμητών τιμών το οποίο περνώντας στην συνέχεια ως είσοδο στους PI ελεγκτές που βρίσκονται στο εσωτερικό των αντίστοιχων ρυθμιστών τάσης και ρεύματος, υπολογίζεται η κατάλληλη τιμή του Duty Cycle και εν τέλει τα σήματα ελέγχου των ελεγχόμενων πηγών τάσης και ρεύματος.

Ενδεικτικά παρουσιάζουμε στο σχήμα 2.21 το υποσύστημα του ρυθμιστή ρεύματος (Current Regulator) του συστήματος του μετατροπέα. Το συγκεκριμένο υποσύστημα παίρνει ως είσοδο το σφάλμα (error) μεταξύ του ρεύματος την συγκεκριμένη χρονική στιγμή στην είσοδο του μετατροπέα και του ρεύματος αναφοράς/επιθυμητού, το οποίο έχει υπολογιστεί από τον ρυθμιστή τάσης (Voltage Regulator), το οποίο σφάλμα κατόπιν εισέρχεται στον PI ελεγκτή σκοπός του οποίου είναι η σταθεροποίηση της τιμή του ρεύματος αναφοράς στην επιθυμητή τιμή κάθε χρονική στιγμή. Στην συνέχεια εφαρμόζοντας την σχέση $\frac{V_L}{V_H}$ της εξίσωσης (2.25), με V_L , V_H η τάση εξόδου και εισόδου του μετατροπέα αντίστοιχα, υπολογίζεται η κατάλληλη τιμή του Duty Cycle. Τέλος εφαρμόζοντας την σχέση DV_H της εξίσωσης (2.25) καθορίζεται το σήμα ελέγχου της ελεγχόμενης πηγής τάσης, το επίπεδο δηλαδή της τάσης που θα πρέπει η πηγή να παράγει. Παρόμοια, εφαρμόζοντας την σχέση $D\frac{I_L}{n}$ της εξίσωσης (2.25) με n , D , I_L η απόδοση, το Duty Cycle και το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα αντίστοιχα, υπολογίζεται το σήμα ελέγχου της ελεγχόμενης πηγής ρεύματος, το επίπεδο δηλαδή του ρεύματος που θα πρέπει η πηγή να παράγει. Να αναφέρουμε ότι οι τιμές των κερδών k_p και k_i του PI ελεγκτή επιλέχθηκαν να είναι $k_p = 46.03147087$ και $k_i = 5350.613142$. Η ρύθμιση (tuning) των PI ελεγκτών έγινε με την βοήθεια του εργαλείου *PID Tuner* που προσφέρει το Matlab.



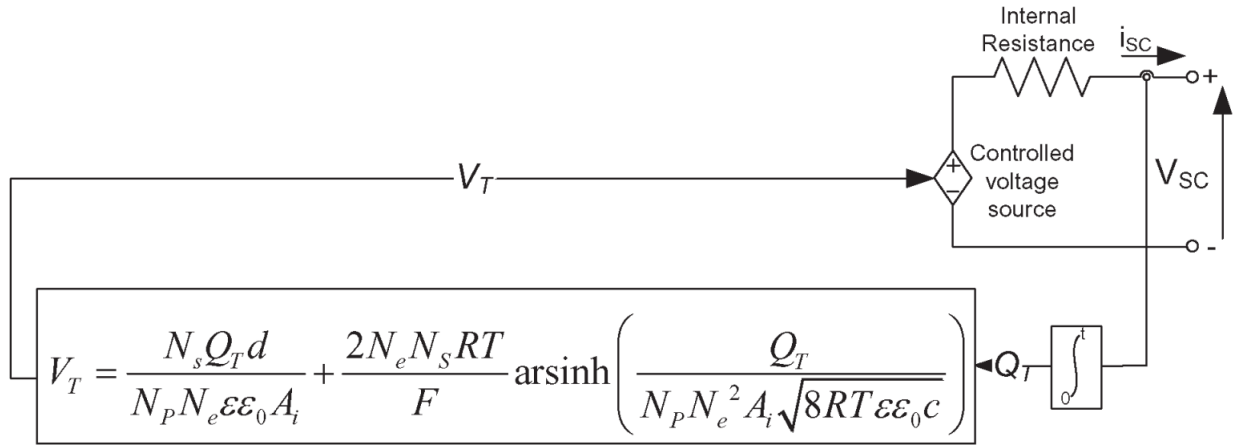
Σχήμα 2.19: Υποσύστημα ρυθμιστή ρεύματος μετατροπέα υποβιβασμού στο περιβάλλον Simulink.

2.2.3 Μοντέλο Υπερπυκνωτή

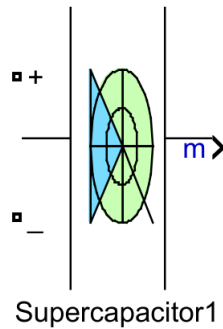
Οι υπερπυκνωτές ή οι πυκνωτές διπλής στρώσης όπως αλλιώς ονομάζονται, όπως αναφέραμε και στο θεωρητικό κομμάτι είναι παρόμοιοι με τους συμβατικούς ηλεκτρο-

λυτικούς πυκνωτές με το επιπλέον πλεονέκτημα της ικανότητας τους να αποθηκεύουν και να απελευθερώνουν περισσότερη ενέργεια εξαιτίας της υψηλότερης χωρητικότητας τους. Στο υβριδικό μας σύστημα ο υπερπυκνωτής χρησιμοποιείται ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας και αποτελεί δευτερεύουσα πηγή παροχής ενέργειας. Όπως φαίνεται από το σχήμα 2.1 ο υπερπυκνωτής συνδέεται απευθείας στον DC δίαυλο του συστήματος και σκοπός της χρησιμοποίησης του αποτελεί η παροχή ακαριαίας λόγω της γρήγορης δυναμικής του, βοηθητικής ενέργειας στο σύστημα στην περίπτωση απότομης εναλλαγής στο φορτίο καθώς η ισχύς της κύριας πηγής της κυψέλης καυσίμου δηλαδή, αυξάνεται με αργό ρυθμό.

Για την μοντελοποίηση του υπερπυκνωτή χρησιμοποιήθηκε ένα γενικό μοντέλο υπερπυκνωτή που προσφέρει το Simulink και στηρίζεται στο μοντέλο Stern το οποίο αποτελεί συνδυασμό των Gouy–Chapman και Helmholtz μοντέλων [25]. Το εν λόγω μοντέλο παρουσιάζεται κυκλωματικά και στο περιβάλλον Simulink στο σχήμα 2.20 και 2.21 αντίστοιχα.



Σχήμα 2.20: Γενικό μοντέλο υπερπυκνωτή.



Σχήμα 2.21: Μοντέλο υπερπυκνωτή στο περιβάλλον Simulink.

Η χωρητικότητα του υπερπυκνωτή υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$C = \left[\frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_{GC}} \right]^{-1} \quad (2.26)$$

με

$$C_H = \frac{N_e \epsilon \epsilon_0 A_i}{d} \quad (2.27)$$

$$C_{GC} = \frac{F Q_c}{2 N_e R T} \sinh\left(\frac{Q_c}{N_e^2 A_i \sqrt{8 R T \epsilon \epsilon_0 c}}\right) \quad (2.28)$$

όπου

C_H : *Helmholtz χωρητικότητα σε F*

C_{GC} : *Gouy–Chapman χωρητικότητα σε F*

N_e : *ο αριθμός των στρωμάτων ηλεκτροδίων*

ϵ : *η τιμή διαπερατότητας του υλικού του ηλεκτρολύτη σε Farad/meter*

ϵ_0 : *η τιμή διαπερατότητας του ελεύθερου χώρου σε Farad/meter*

A_i : *η διεπιφανειακή περιοχή μεταξύ των ηλεκτροδίων και ηλεκτρολύτη σε m²*

d : *το μήκος του στρώματος Helmholtz (ή μοριακή ακτίνα) σε m*

Q_c : *το ηλεκτρικό φορτίο του κυττάρου σε Coulomb*

c : *η μοριακή συγκέντρωση σε mol m⁻³*

T : *η θερμοκρασία λειτουργίας σε mol K*

R : *ιδανική σταθερά αερίου*

F : *σταθερά Faraday*

R_{sc} : *η συνολική αντίσταση σε ohms*

i_{sc} : *ρεύμα υπερπυκντή σε A*

Η συνολική χωρητικότητα υπερπυκνωτή N_S κελιών εν σειρά και N_P κελιών εν παραλληλία ορίζεται ως εξής:

$$C_T = \frac{N_P}{N_S} C \quad (2.29)$$

Η τάση εξόδου του υπερπυκνωτή όπως φαίνεται και από το σχήμα 2.20 υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 V_{SC} &= \frac{\int i_{sc} dt}{C_T} - R_{sc} i_{sc} \\
 &= \frac{Q_T}{C_T} - R_{sc} i_{sc} \\
 &= \frac{N_P Q_C}{C_T} - R_{sc} i_{sc} \\
 &= \frac{N_s Q_T d}{N_p N_e \epsilon \epsilon_0 A_i} + \frac{2 N_e N_s R T}{F} \operatorname{arsinh}\left(\frac{Q_T}{N_P N_e^2 A_i \sqrt{8 R T \epsilon \epsilon_0 C}}\right) - R_{sc} i_{sc}
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

όπου

Q_T : ηλεκτρικό φορτίο σε *Coulomb*

N_P : ο αριθμός των υπερπυκνωτών εν παραλληλία

N_S : ο αριθμός των υπερπυκνωτών εν σειρά

C_T : συνολική χωρητικότητα υπερπυκνωτή σε *F*

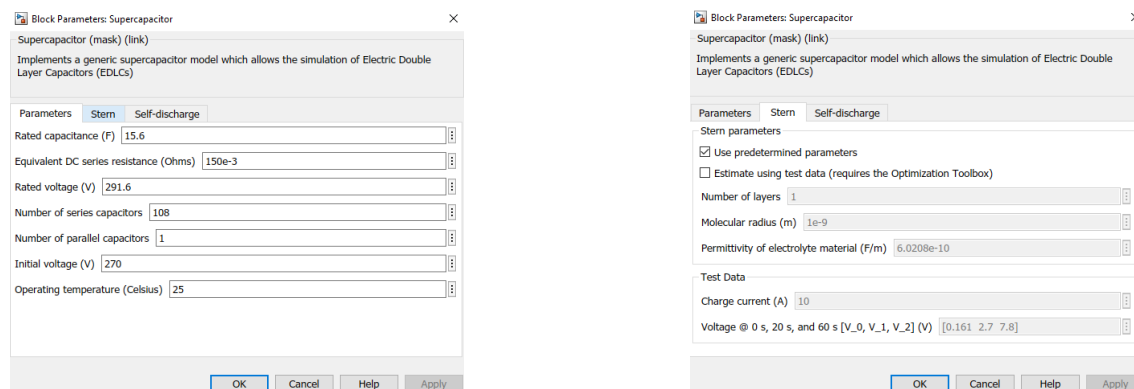
Για την μοντελοποίηση του υπερπυκνωτή επιλέχθηκε υπερπυκνωτής χωρητικότητας 15,6 *F* (Rated Capacitance) 291.6 *V* (Rated Voltage). Στον πίνακα 2.3 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων του υπερπυκνωτή.

Πίνακας 2.3: Παραμετροποίηση τιμών μπαταρίας στο Simulink.

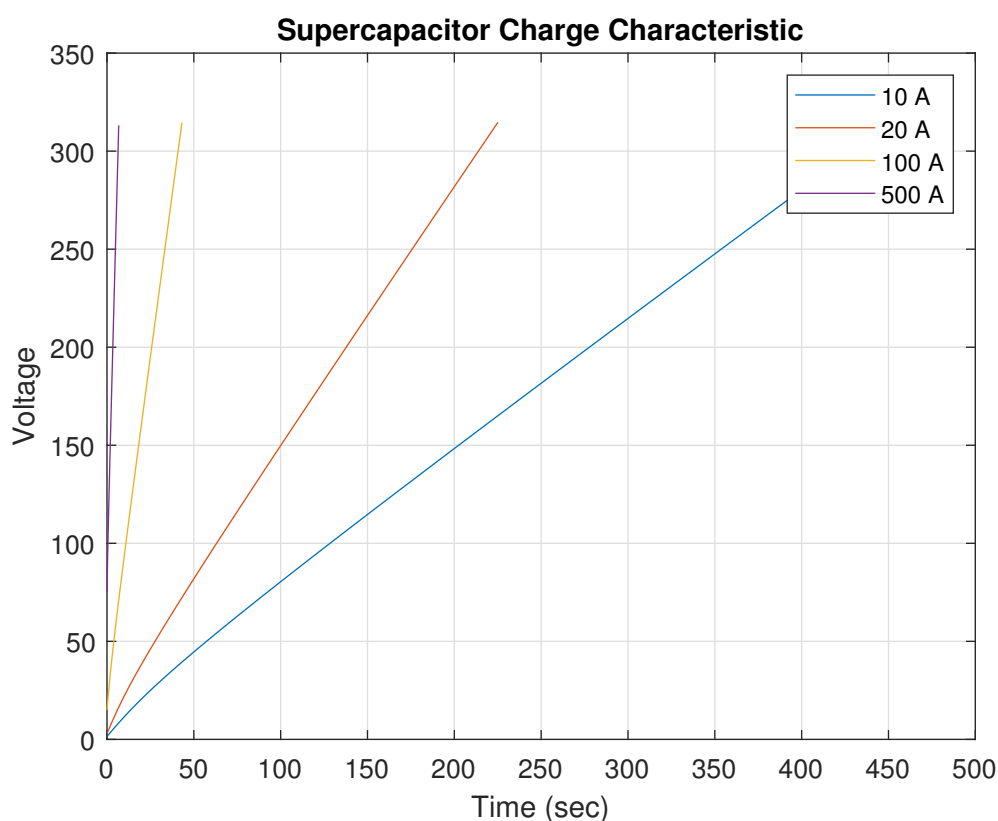
Rated capacitance (<i>F</i>)	15.6
Equivalent DC series resistance (<i>Ohms</i>)	150e−3
Rated voltage (<i>V</i>)	291.6
Number of series capacitors	108
Number of parallel capacitors	1
Number of layers	1
Molecular radius (<i>m</i>)	1e−9
Operating temperature (<i>Celsius</i>)	25
Initial voltage (<i>V</i>)	270

Στο σχήμα 2.22 φαίνεται η παραμετροποίηση των τιμών του υπερπυκνωτή στο Simulink ενώ στο σχήμα 2.23 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εκφόρτισης του υπερπυκνωτή για ρεύμα εκφόρτισης 10 *A*, 20 *A*, 100 *A* και 500 *A*.

2.2. Μοντελοποίηση Υβριδικού Συστήματος Τροφοδοσίας Συστήματος Ισχύος Έκτακτης Ανάγκης Αεροσκάφους



Σχήμα 2.22: Παραμετροποίηση τιμών υπερπυκνωτή στο Simulink.



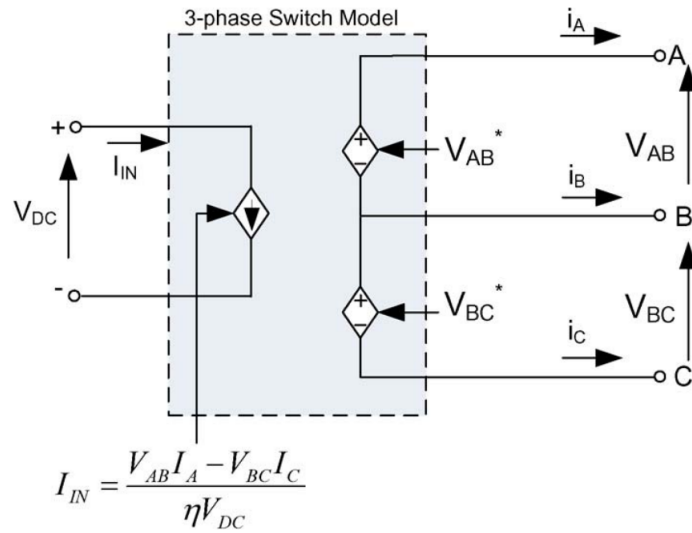
Σχήμα 2.23: Χαρακτηριστικές εκφόρτισης υπερπυκνωτή για ρεύματα εκφόρτισης 10 A, 20 A, 100 A και 500 A.

2.2.4 DC-AC μετατροπέας τάσης DC δίαυλου

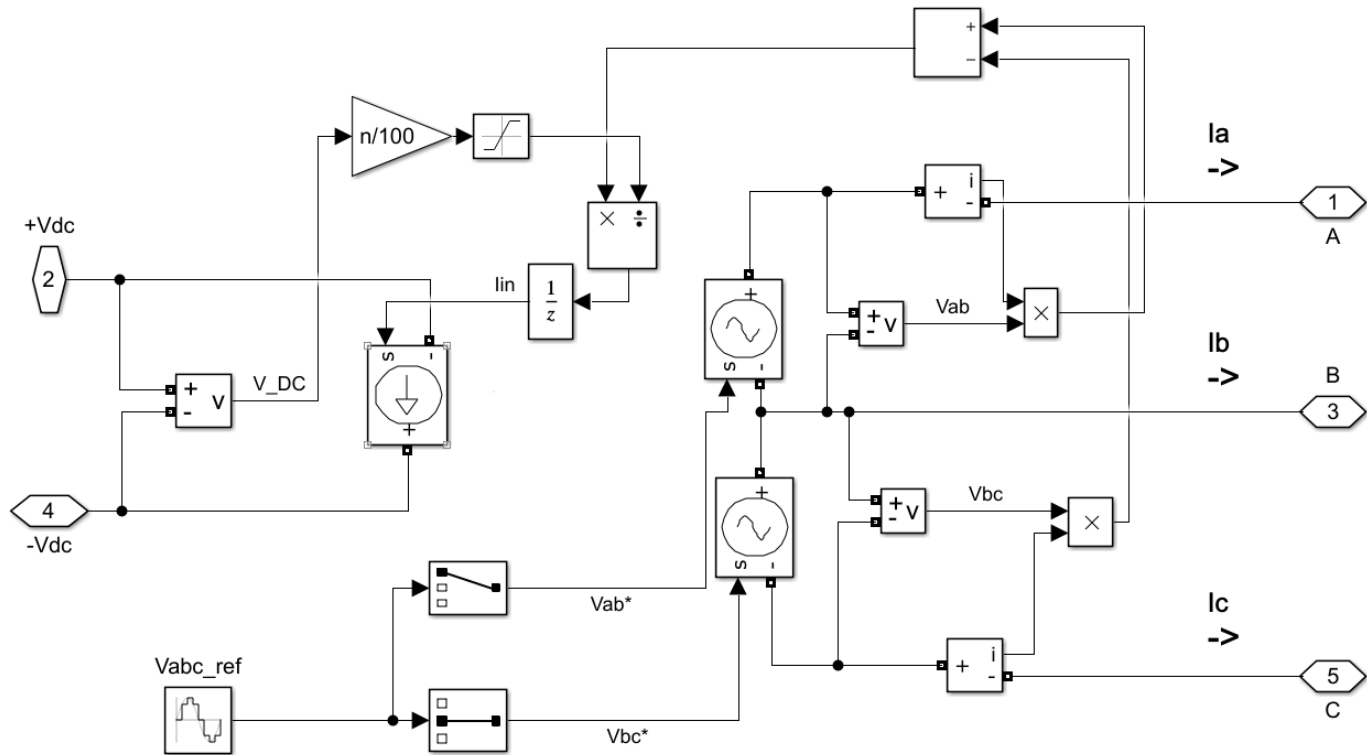
Το φορτίο του υβριδικού μας συστήματος θα αποτελεί ένα τριφασικό φορτίο. Οι πηγές ισχύος του υβριδικού μας συστήματος η κυψέλη καυσίμου δηλαδή, η μπαταρία όσο και υπερπυκνωτής αποτελούν πηγές DC ρεύματος και τάσης. Η χρησιμοποίηση επομένως ενός τριφασικού ανορθωτή τάσης ο οποίος θα μετατρέπει κάθε χρονική στιγμή το συνεχές (DC) ρεύμα του δίαυλου σε εναλλασσόμενο τριφασικό (AC), είναι αναγκαία. Ο DC-AC μετατροπέας τάσης θα μοντελοποιηθεί και σε αυτήν την περίπτω-

ση χρησιμοποιώντας το μοντέλο μέσου όρου (average-value model) για τα λόγους που αναφέραμε στην περίπτωση των προηγούμενων DC-DC μετατροπέων τάσης.

Στο σχήμα 2.25 παρουσιάζεται η υλοποίηση του μοντέλου DC-AC μετατροπέα τάσης στο περιβάλλον Simulink. Η συγκεκριμένη υλοποίηση αφορά την μοντελοποίηση του DC-AC μετατροπέα τάσης μέσου όρου του σχήματος 2.24. Ένα τριφασικό σήμα τάσης $200\text{ V } 400\text{ Hz}$ είναι το σήματα αναφοράς για τις ελεγχόμενες πηγές τάσης.

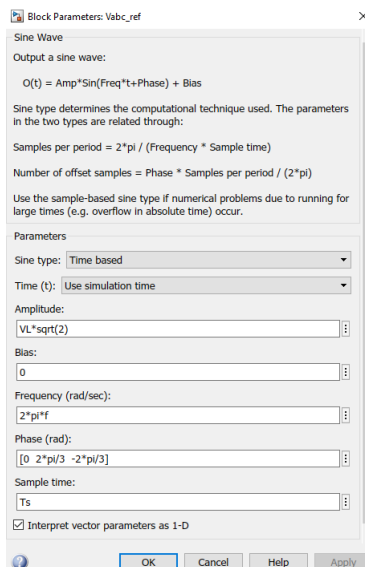


Σχήμα 2.24: Κύκλωμα και λειτουργία DC-AC τριφασικού ανορθωτή τάσης μέσου όρου.



Σχήμα 2.25: Υλοποίηση του μοντέλου DC-AC τριφασικού ανορθωτή τάσης στο περιβάλλον Simulink.

Τα σήματα αναφοράς τάσης V_{AB}^* και V_{BC}^* των ελεγχόμενων πηγών τάσης τα δημιουργήσαμε χρησιμοποιώντας ένα ημιτονοειδές σήμα της μορφής $V = 200\sqrt{2}\sin(2\pi 400t + phase)$ όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.26.



Σχήμα 2.26: Παραμετροποίηση τιμών ημιτονοειδούς σήματος στο Simulink.

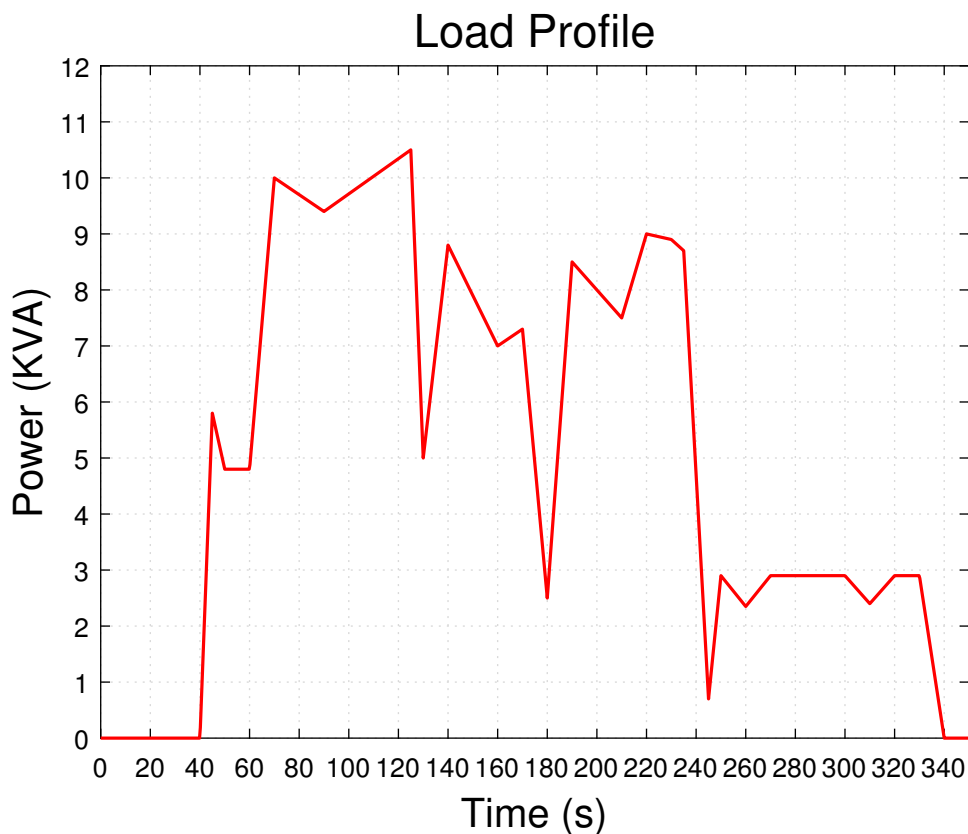
Την τιμή του πεδίου *phase* την ορίσαμε ως $[0 \ 2\pi/3 \ -2\pi/3]$ δηλαδή 0 για την φάση A, $2\pi/3$ για την φάση B και $-2\pi/3$ για την φάση C, καθώς όπως γνωρίζουμε από την θεωρία σε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα οι τάσεις και τα ρεύματα των τριών φάσεων έχουν ίσα μέτρα, ενώ οι γωνίες τους διαφέρουν κατά 120° . Κατόπιν εφαρμόζοντας την σχέση $\frac{V_{AB}I_A - V_{BC}I_C}{nV_{DC}}$ υπολογίζουμε την τιμή αναφοράς του ρεύματος I_{IN} της ελεγχόμενης πηγής ρεύματος όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.24, με V_{AB} η τάση μεταξύ της φάσης A και B, V_{BC} η τάση μεταξύ της φάσης B και C, I_A το ρεύμα της φάσης A, I_C το ρεύμα της φάσης C, V_{DC} η DC τάση εισόδου του ανορθωτή και $n = 97\%$ η απόδοση του ανορθωτή, κάθε χρονική στιγμή.

2.2.5 Σύστημα Προγραμματιζόμενου DC-AC Φορτίου

Το φορτίο ζήτησης που πρόκειται να τροφοδοτείται από το υβριδικό μας σύστημα ακολουθεί την καμπύλη που φαίνεται στο σχήμα στην 2.27. Ο χρόνος διάρκειας του φορτίου έκτακτης ανάγκης για λόγους προσομοίωσης τέθηκε ίσος με 350 s και αποτελεί ένα σενάριο φορτίου το οποίο προσομοιώνει τις απαιτήσεις του αεροσκάφους σε ισχύ κατά την διάρκεια μιας έκτακτης προσγείωσης στην περίπτωση που οι κινητήρες του τεθούν αναπάντεχα εκτός λειτουργίας. Σημαντικές χρονικές στιγμές της καμπύλης φορτίου εμφανίζονται τις παρακάτω χρονικές στιγμές.

- για $t = 40 \text{ sec}$ όλοι οι κινητήρες του αεροσκάφους βγαίνουν εκτός λειτουργίας ξεκινώντας έτσι η λειτουργία του υβριδικού συστήματος ισχύος έκτακτης ανάγκης για την παροχή της απαιτούμενης ισχύος του φορτίου εξού και η εκκίνηση της καμπύλης του φορτίου.

- για $t = 60\text{ s}$ η εκκίνηση μιας υδραυλικής αντλίας έκτακτης ανάγκης προκαλεί την απότομη αύξηση του φορτίου.
- για $t = 130\text{ s}$ η εκκίνηση μιας δεύτερης υδραυλικής αντλίας έκτακτης ανάγκης προκαλεί επίσης μια απότομη αύξηση του φορτίου.
- για $t = 180\text{ s}$ το φορτίο αυξάνεται ξαφνικά λόγω της κίνησης των πτερυγίων του αεροσκάφους.
- για $t = 250\text{ s}$ γίνεται η τροχοδρόμηση του αεροσκάφους.
- για $t = 330\text{ s}$ οι επιβάτες έχουν εξέλθει από το αεροσκάφος και η ισχύς φορτίου πέφτει στο μηδέν.

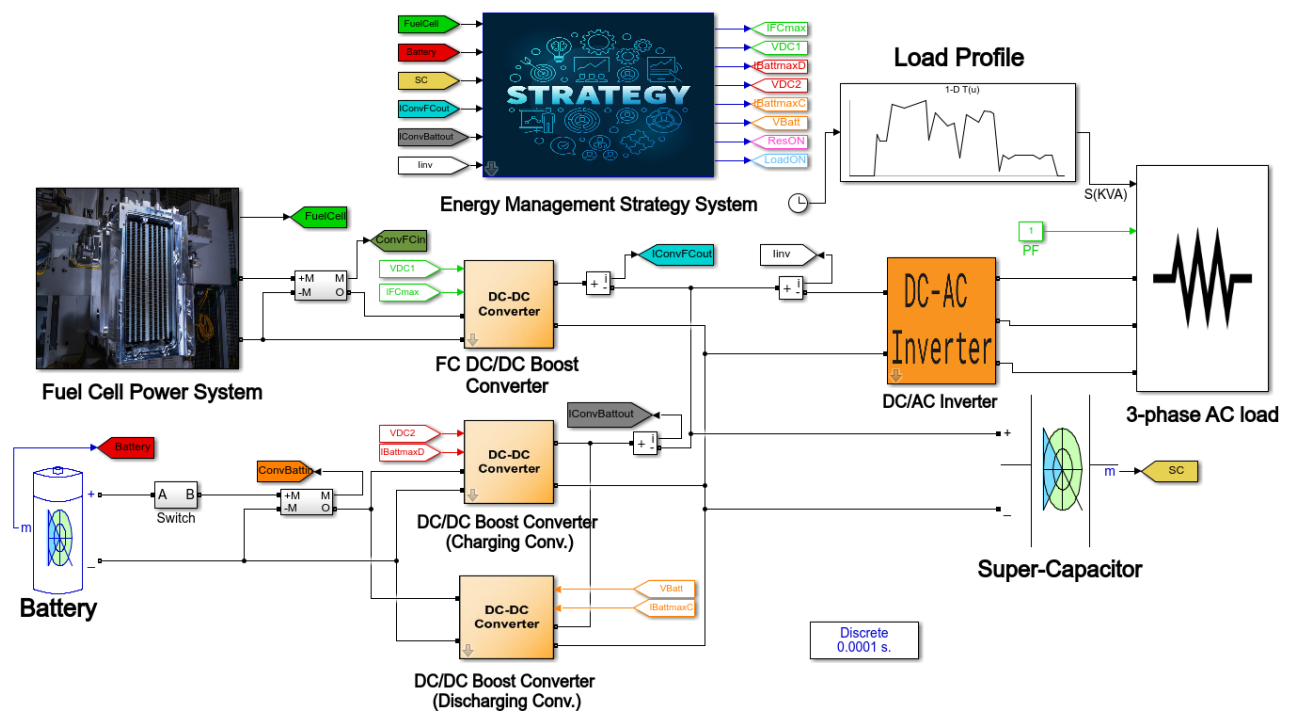


Σχήμα 2.27: Καμπύλη ισχύς φορτίου.

Για την μοντελοποίηση του φορτίου έκτακτης ανάγκης στο περιβάλλον Simulink χρησιμοποιήθηκε μια τριφασική ελεγχόμενη πηγή ρεύματος, όπου η τιμή του ρεύματος φορτίου εξαρτάται κάθε χρονική στιγμή από την φαινόμενη τριφασική ισχύ του προφίλ του φορτίου, τον συντελεστή ισχύος (power factor) και την τάση γραμμής. Στην παρούσα εργασία θεωρούμε $PF = 1$ θεωρώντας την ύπαρξη μόνο ωμικών και όχι επαγωγικών και χωρητικών στοιχείων.

Στο σχήμα 2.28 απεικονίζεται το συνολικό μοντέλο σε περιβάλλον Simulink.

2.2. Μοντελοποίηση Υβριδικού Συστήματος Τροφοδοσίας Συστήματος Ισχύος Έκτακτης Ανάγκης Αεροσκάφους



Σχήμα 2.28: Συνολικό μοντέλο υβριδικού συστήματος τροφοδοσίας συστήματος ισχύος έκτακτης ανάγκης αεροσκάφους στο Simulink.

2.2.6 Στρατηγικές Διαχείρισης Ενέργειας

Το σύστημα στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας (Energy Management Strategies-EMS) αποτελεί τον πυρήνα ή με όπωσ αλλιώς μπορούμε να το παρομοιάσουμε τον “έγκέφαλο” ενός ενεργειακού ηλεκτρικού συστήματος. Αποτελεί ένα από τα πιο μεγάλης σημασίας τμήματα της αρχιτεκτονικής ενός ηλεκτρικού ή υβριδικού συστήματος καθώς οι στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας που εφαρμόζονται είναι απαραίτητες για την βέλτιστη κατανομή του φορτίου ζήτησης ανάμεσα στις πηγές ισχύος, την κυψέλη καυσίμου, την μπαταρία και του υπερπυκνωτή στην περίπτωση μας, για την επίτευξη στόχων όπως:

- εξοικονόμηση καυσίμου.
- περιορισμένη μεταβολή στην κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή.
- αύξηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος.
- αύξηση της διάρκειας ζωής των πηγών κτλ.

Τα παραπάνω επιτυγχάνονται με τον κατάλληλο έλεγχο των αποκρίσεων ισχύος της κάθε πηγής (μέσω των αντίστοιχων μετατροπών) από την εκάστοτε εφαρμοζόμενη στρατηγική διαχείρισης ενέργειας λαμβάνοντας υπόψιν τα όρια λειτουργίας της κάθε πηγής.

Αρκετοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας σε υβριδικά ενεργειακά συστήματα. Στην παρούσα εργασία θα εξετάσουμε ορισμένες από τις πιο συνηθισμένες στρατηγικές ελέγχου που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές οχημάτων κυψελών καυσίμου οι οποίες είναι οι εξής :

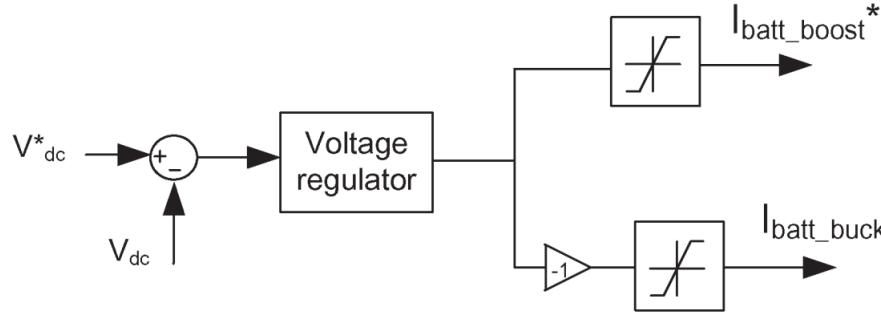
- στρατηγική ελέγχου συγκεκριμένου αριθμού καταστάσεων (state machine control strategy).
- στρατηγική ελέγχου κλασσικού PI ελεγκτή (classical PI control strategy).
- στρατηγική ελέγχου ασαφούς λογικής βασισμένη σε κανόνες (rule-based fuzzy logic strategy).
- στρατηγική ελέγχου ισοδύναμης ελαχιστοποίησης κατανάλωσης (equivalent consumption minimization strategy-ECMS).
- στρατηγική ελέγχου μεγιστοποίησης εξωτερικής ενέργειας (external energy maximization strategy-EEMS).

Η κύρια διαφορά των παραπάνω στρατηγικών ελέγχου συναντάται σχετικά με τον τρόπο απόκτησης της ισχύος αναφοράς της κυψέλης καυσίμου όπως θα δειχθεί και στην συνέχεια.

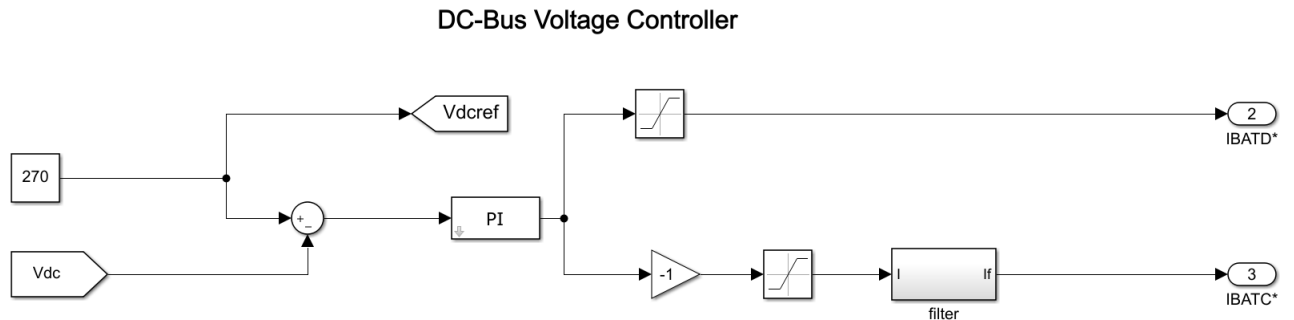
Επιπλέον σε όλες τις στρατηγικές ελέγχου διαχείρισης ενέργειας συναντάται το κοινό υποσύστημα του DC-Bus Voltage Controller του οποίου η σχηματική απεικόνιση και η μοντελοποίηση στο περιβάλλον Simulink φαίνονται στο σχήμα 2.29 και 2.30 αντίστοιχα και αφορά την διατήρηση της τάσης του DC διαύλου στην επιθυμητή τιμή των 270 V. Η λειτουργία του αφορά στην παραγωγή των κατάλληλων σημάτων αναφοράς ρεύματος φόρτισης ή εκφόρτισης των μετατροπέων ανύψωσης και υποβιβασμού της μπαταρίας αντίστοιχα, μέσω των οποίων πραγματοποιείται ο έλεγχος της ενέργειας της μπαταρίας που αποδίδεται ή απορροφά από το σύστημα.

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 2.30 το υποσύστημα του DC-Bus Voltage Controller καθορίζει εάν η μπαταρία θα τίθεται σε κατάσταση εκφόρτισης, δηλαδή η μπαταρία θα παρέχει ισχύ στο σύστημα μέσω του DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης (μετατροπέας εκφόρτισης) προκειμένου να αυξηθεί η τάση του DC διαύλου στα 270 V στην περίπτωση που η τάση του DC διαύλου έχει κατέβει κάτω της τάσης αναφοράς, ή σε κατάσταση φόρτισης δηλαδή η μπαταρία θα απορροφά ισχύ από το σύστημα μέσω του DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (μετατροπέας φόρτισης) προκειμένου να μειωθεί η τάση του DC διαύλου στα 270 V στην περίπτωση που η τάση του DC διαύλου έχει υπερβεί την τάση αναφοράς. Συγκεκριμένα κάθε χρονική στιγμή θα υπολογίζεται η διαφορά error μεταξύ της τάσης αναφοράς των 270 V και της τάσης V_{dc} εκείνης της στιγμής του DC διαύλου. Στην συνέχεια το error που υπολογίστηκε θα εισέρχεται σε έναν PI ελεγκτή και αναλόγως την τιμή του σφάλματος διακρίνονται οι εξής δύο περιπτώσεις:

- $error > 0$. Στην περίπτωση όπου το σφάλμα είναι θετικό σημαίνει ότι η τάση V_{dc} του DC διαύλου εκείνη την στιγμή είναι μικρότερη από την τάση αναφοράς



Σχήμα 2.29: DC-Bus Voltage Controller Schematic



Σχήμα 2.30: Κοινό υποσύστημα του DC-Bus Voltage Controller στο Simulink.

των 270 V , όποτε η μπαταρία θα πρέπει να παρέχει ισχύ στο σύστημα έως ότου η τάση DC δίαυλου φτάσει την τάση αναφοράς. Η απόκριση του ελεγκτή αναλόγως το σφάλμα εισόδου κάθε φορά θα εξάγει την τιμή αναφοράς του ρεύματος εκφόρτισης της μπαταρίας του αντίστοιχου μετατροπέα, το οποίο σύμφωνα με τις προδιαγραφές της μπαταρίας δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 80 A .

- $error < 0$. Στην περίπτωση όπου το σφάλμα είναι αρνητικό σημαίνει ότι η τάση V_{dc} του DC δίαυλου εκείνη την στιγμή είναι μεγαλύτερη από την τάση αναφοράς των 270 V , όποτε η μπαταρία θα απορροφά ισχύ από σύστημα, δηλαδή θα βρίσκεται σε κατάσταση φόρτισης έως ότου η τάση του DC δίαυλου μειωθεί και φτάσει την τάση αναφοράς. Η απόκριση του ελεγκτή αναλόγως το σφάλμα εισόδου κάθε φορά θα εξάγει την τιμή αναφοράς του ρεύματος φόρτισης της μπαταρίας του αντίστοιχου μετατροπέα, το οποίο σύμφωνα με τις προδιαγραφές της μπαταρίας δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 20 A .

Παρακάτω περιγράφεται λεπτομερώς η υλοποίηση κάθε μιας από τις στρατηγικές ελέγχου διαχείρισης ενέργειας στο περιβάλλον Simulink.

2.2.6.1 Στρατηγική Ελέγχου Συγκεκριμένου Αριθμού Καταστάσεων (State Machine Control Strategy)

Η προτεινόμενη στρατηγική διαχείρισης ενέργειας εφαρμόζεται για τον έλεγχο της ροής ενέργειας μεταξύ της κύριας πηγής ισχύος που είναι η κυψέλη καυσίμου και των

δευτερευόντων πηγών, δηλαδή της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή. Ο συγκεκριμένος έλεγχος ροής ενέργειας ο οποίος ουσιαστικά αφορά τον προσδιορισμό της τιμής αναφοράς ισχύος εξόδου της κυψέλης P_{FC}^* εξαρτάται από τις καταστάσεις λειτουργίας (*states*) που βρίσκεται κάθε χρονική στιγμή το υβριδικό σύστημα, με τον προσδιορισμό των καταστάσεων να εξαρτάται από την απαιτούμενη ισχύς του φορτίου (P_{Load}), την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SOC) και των σημείων λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου (P_{FCmin} , P_{FCmax} , P_{FCopt}). Οι καταστάσεις λειτουργίας του υβριδικού συστήματος προέκυψαν χρησιμοποιώντας παρόμοια προσέγγιση με αυτή που προτάθηκε στην [26] και απεικονίζονται στο πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4: Καταστάσεις λειτουργίας State Machine Control Strategy .

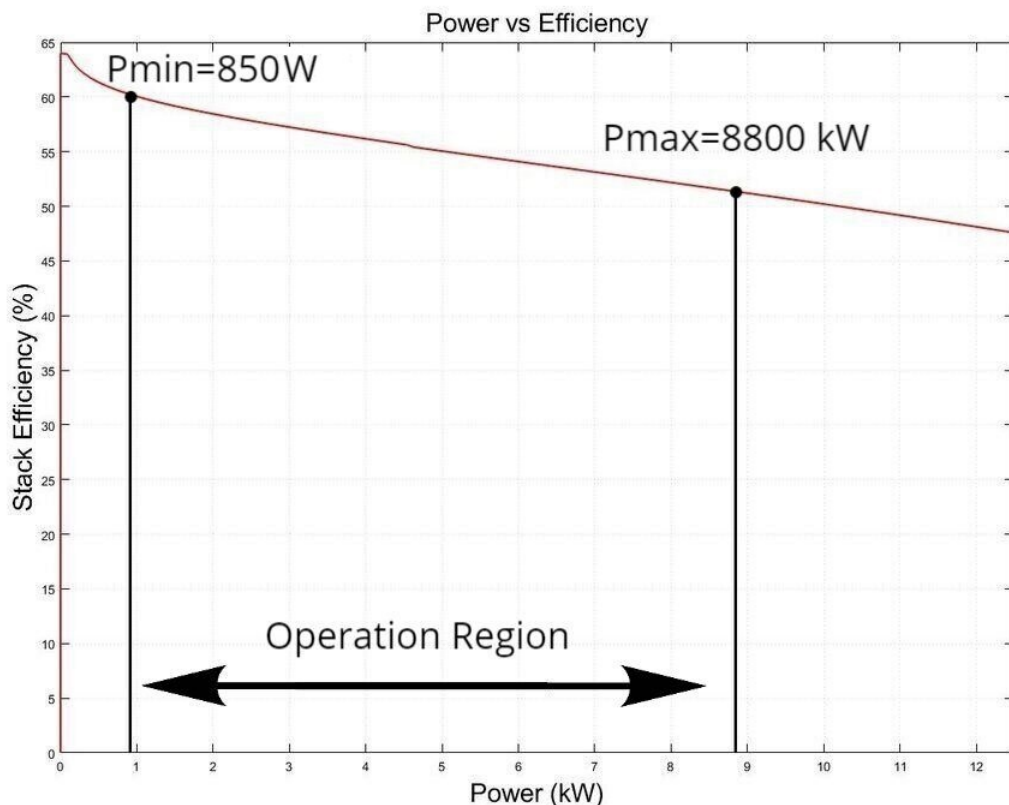
<i>SOC</i> of Battery	State	Power of load	Reference power of FC
High	1	$P_{Load} < P_{FCmin}$	$P_{FC}^* = P_{FCmin}$
High	2	$P_{Load} \in [P_{FCmin} P_{FCmax}]$	$P_{FC}^* = P_{FCLoad}$
High	3	$P_{Load} \geq P_{FCmax}$	$P_{FC}^* = P_{FCmax}$
Normal	4	$P_{Load} < P_{FCopt}$	$P_{FC}^* = P_{FCopt}$
Normal	5	$P_{Load} \in [P_{FCopt} P_{FCmax}]$	$P_{FC}^* = P_{FCLoad}$
Normal	6	$P_{Load} \geq P_{FCmax}$	$P_{FC}^* = P_{FCmax}$
Low	7	$P_{Load} < P_{FCmax}$	$P_{FC}^* = P_{FCLoad} + P_{FCchar}$
Low	8	$P_{Load} \geq P_{FCmax}$	$P_{FC}^* = P_{FCmax}$

Παραμετροποίηση τιμών πίνακα 2.4 :

Στο σχήμα 2.31 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ της αποτελεσματικότητας και της εξόδου ισχύος της στοίβας κυψέλης καυσίμου. Παρατηρείτε ότι η στοίβα μπορεί να λειτουργήσει με απόδοση μεγαλύτερη από 50% σε ένα μεγάλο εύρος ισχύος. Η λειτουργία της στοίβας θα αποφεύγεται σε χαμηλές εξόδους ισχύος καθώς σε αυτήν την περίπτωση η απαίτηση ισχύος του φορτίου θα καλύπτεται από τις δευτερεύουσες πηγές καθώς επίσης και για μεγάλες ισχύς εξόδου καθώς παρατηρείται μείωση της απόδοσης της. Οι παραπάνω δύο περιορισμοί θα συντελέσουν στην επίτευξη καλύτερης οικονομίας καυσίμου της στοίβας. Στην περίπτωση μας προκειμένου να κρατήσουμε την απόδοση της κυψέλης καυσίμου σε ένα εύρος περίπου 51 % – 60 % ορίζουμε την ελάχιστη ισχύ εξόδου της στοίβας P_{FCmin} στα **850 W** με απόδοση περίπου **60 %** και την μέγιστη ισχύ εξόδου της στοίβας P_{FCmax} στα **8.800 W** με απόδοση περίπου **51 %**, ενώ ως βέλτιστη ισχύ στοίβας P_{FCopt} ορίζεται στα **1500 W**. Λόγω προδιαγραφών της μπαταρίας ορίζουμε ως $P_{battcharge} = -P_{battcharge,min} = -1500 W$.

Για τα όρια της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας να αναφέρουμε ότι επιλέχθηκαν οι τιμές $SOC_{min} = 60\%$ και $SOC_{max} = 90\%$ προκειμένου να παραταθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας όπως προτείνεται στην [27]. Συγκεκριμένα έχουμε :

- **SOC High** όταν $SOC > SOC_{max} = 90$
- **SOC Normal** όταν $SOC \in [SOC_{nom1}, SOC_{nom2}] = [60.1, 85]$

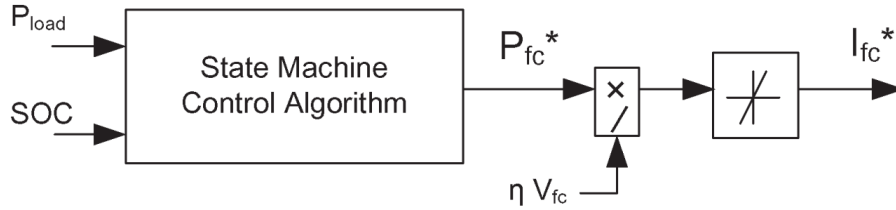


Σχήμα 2.31: Σχέση αποτελεσματικότητας VS εξόδου ισχύος στοίβας κυψέλης καυσίμου.

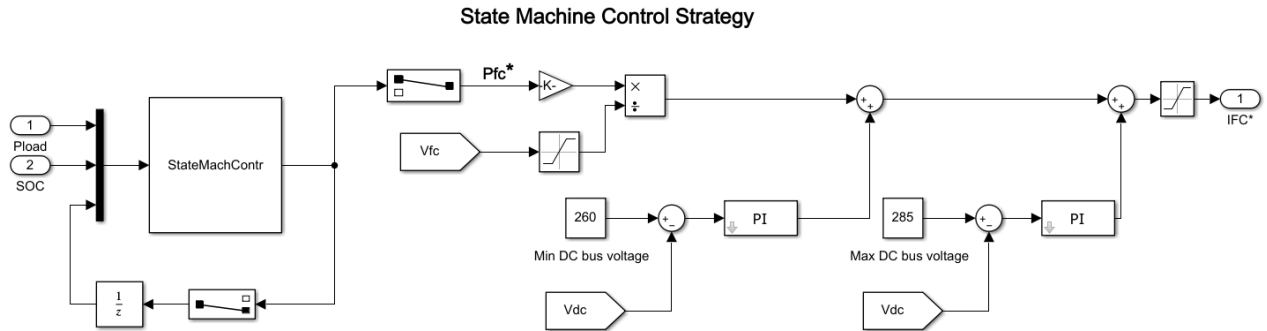
- **SOC Low** όταν $SOC > SOC_{min} = 60$

Η σχηματική απεικόνιση και η μοντελοποίηση της συγκεκριμένης στρατηγικής στο περιβάλλον Simulink φαίνονται στο σχήμα 2.32 και 2.33 αντίστοιχα. Η υλοποίηση του State Machine Control Strategy έγινε με την βοήθεια του μπλοκ *StateMachContr*, το οποίο υλοποιεί μια S-Function που παρέχει το Simulink γραμμένη σε κώδικα Matlab. Όπως βλέπουμε από το σχήμα 2.33 αναλόγως την τιμή της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας SOC και του φορτίου P_{Load} που εισέρχονται ως είσοδοι στο μπλοκ *StateMachContr* υπολογίζεται η τιμή αναφορά ισχύος εξόδου της κυψέλης καυσίμου P_{FC}^* σύμφωνα με τον πίνακα 2.4. Στην συνέχεια διαιρώντας την τιμή P_{FC}^* με την τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου V_{fc} υπολογίζεται η τιμή αναφοράς του ρεύματος της κυψέλης καυσίμου I_{fc}^* , το οποίο θα αποτελέσει σήμα αναφοράς για τον μετατροπέα ανύψωσης της κυψέλης καυσίμου μέσω του οποίου θα πραγματοποιείται ο έλεγχος ροής της ενέργειας της.

Να αναφέρουμε ότι το πιο ουσιαστικό μειονέκτημα του State Machine Control Strategy είναι ότι εξαιτίας των καταστάσεων λειτουργίας απαιτείται έλεγχος υστέρησης για την εναλλαγή των καταστάσεων από την μία κατάσταση στην άλλη, γεγονός που επηρεάζει την απόκριση της συγκεκριμένης στρατηγικής στις μεταβολές ζήτησης του φορτίου.



Σχήμα 2.32: State Machine Control Strategy.

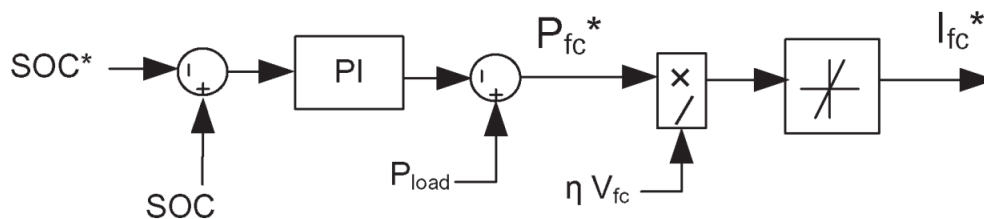


Σχήμα 2.33: State Machine Control Strategy στο Simulink.

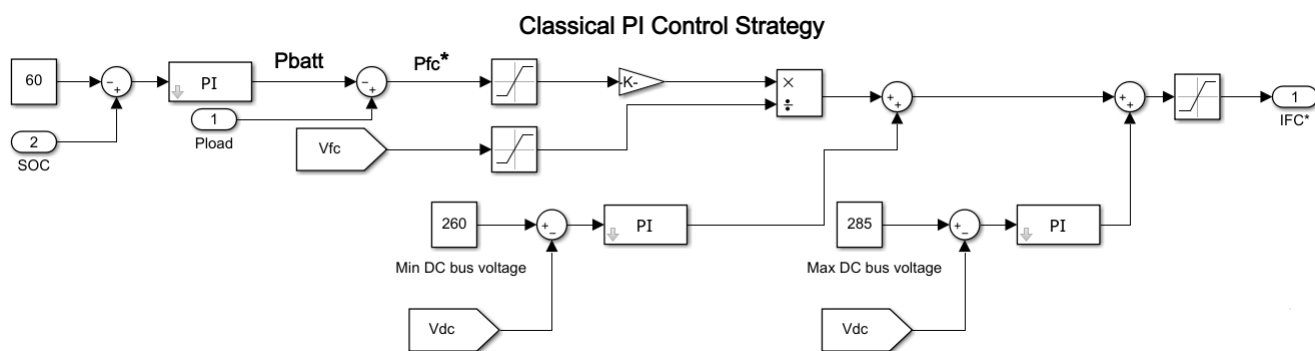
2.2.6.2 Στρατηγική ελέγχου κλασσικού PI ελεγκτή (Classical PI Control Strategy)

Παρά το γεγονός ότι οι ελεγκτές PID συναντώνται κυρίως σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, η χρήση τους είναι πολύ δημοφιλής και σε εφαρμογές όπως στην περίπτωση μας. Αυτό γιατί οι PI ελεγκτές δίνουν μια πολύ ικανοποιητική απόδοση με σχετικά απλή υλοποίηση και εύκολο συντονισμό παραμέτρων (κέρδη). Ωστόσο το μειονέκτημα που παρουσιάζουν σχετικά με την χρήση της παραγώγου, δηλαδή της δράσης της παραμέτρου D (Derivate), είναι η γρήγορη αντίδραση σε οποιεσδήποτε αλλαγές στο σφάλμα του συστήματος το οποίο με τη σειρά του θα προκαλέσει μεγάλου βαθμού ανεπιθύμητης ταλαντευόμενης απόκρισης. Εξαιτίας του παραπάνω σε πολλές εφαρμογές όπως και στην δική μας περίπτωση προτιμάται η χρήση PI ελεγκτών έναντι PID ελεγκτών.

Όπως φαίνεται από την σχηματική απεικόνιση της Classical PI Control Strategy του σχήματος 2.34 και της αντίστοιχης υλοποίησης της στο περιβάλλον Simulink του σχήματος 2.35, δεδομένης της γνώσης της κατάστασης φόρτισης SOC της μπαταρίας κάθε χρονική στιγμή η συγκεκριμένη στρατηγική υπολογίζει την ισχύ της μπαταρίας P_{batt} κάνοντας χρήση ενός PI ελεγκτή. Στην συνέχεια η υπολογιζόμενη ισχύ της μπαταρίας P_{batt} αφαιρείται από την απαιτούμενη ισχύ του φορτίου P_{Load} προκειμένου να υπολογιστεί η τιμή αναφοράς της ισχύος εξόδου P_{FC}^* της κυψέλης καυσίμου. Κατόπιν διαιρώντας την τιμή P_{FC}^* με την τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου V_{fc} υπολογίζεται η τιμή αναφοράς του ρεύματος της κυψέλης καυσίμου I_{fc}^* , το οποίο θα αποτελέσει σήμα αναφοράς για τον μετατροπέα ανύψωσης της κυψέλης καυσίμου, μέσω του οποίου θα πραγματοποιείται ο έλεγχος ροής της ενέργειας της.



Σχήμα 2.34: Classical PI Control Strategy Schematic.



Σχήμα 2.35: Classical PI Control Strategy στο Simulink.

Να αναφέρουμε το εξής. Όταν η τιμή της κατάστασης φόρτισης SOC της μπαταρίας είναι πάνω από την τιμή αναφορά $SOC^* = 60$ η ισχύς της κυψέλης καυσίμου είναι χαμηλή και η μπαταρία παρέχει την πλήρη ισχύ της, ενώ όταν το SOC της μπαταρίας είναι κάτω από την τιμή αναφοράς $SOC^* = 60$ η κυψέλη καυσίμου θα παρέχει σχεδόν την ισχύ του φορτίου.

2.2.6.3 Στρατηγική Ελέγχου Ασαφούς Λογικής βασισμένη σε κανόνες (Rule-Based Fuzzy Logic Strategy)

Η ασαφής λογική (Fuzzy Logic-FL) προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Zadeh το 1965 και θεωρείται ως μία επέκταση της συμβατικής δυαδικής λογικής. Η δυαδική λογική έχει να κάνει με τις δυαδικές τιμές 0 και 1 ενώ η ασαφής λογική είναι μια λογική πολλών τιμών. Για παράδειγμα στην δυαδική λογική η θερμοκρασία έχει μόνο δύο συνθήκες, ζεστό όταν η τιμή της θερμοκρασίας είναι πάνω από την θερμοκρασία αναφοράς και κρύο όταν η τιμή της θερμοκρασίας είναι κάτω από την θερμοκρασία αναφοράς. Στην ασαφής λογική η θερμοκρασία μπορεί να είναι πολύ χαμηλή, χαμηλή, κανονική, υψηλή, πολύ υψηλή. Επίσης μπορεί να αντιμετωπίσει περιπτώσεις όπως αβέβαιων, ασαφών ή με θόρυβο δεδομένα.

Η ασαφής λογική μετά την ανακάλυψη της αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία στη μοντελοποίηση και τον έλεγχο. Η ασαφής λογική αποτελείται από τα εξής τρία διαδοχικά στάδια ή φάσεις ονομαζόμενα ως :

1. ασαφοποίηση (fuzzification)

2. σύστημα διεπαφής (interface system) το οποίο περιέχει το σύστημα της βάσης των κανόνων
3. διαδικασίες αποασαφοποίησης (defuzzification processes)

Το βήμα της **ασαφοποίησης** (βήμα 1) είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή της τιμής της εισόδου από την κανονική κατάσταση στην αντιστοιχισμένη ασαφή τιμή τους. Η αντιστοίχιση κάθε μεταβλητής εισόδου είτε εξόδου, γίνεται μέσω συναρτήσεων μέλους (Membership functions -MFs) ασαφούς ιδιότητας ώστε να περιγραφεί ο βαθμός συμμετοχής της καθεμιάς από αυτές τις μεταβλητές σε αυτές τις συναρτήσεις μελών στην περιοχή $[0, 1]$. Η τιμή 1 υποδηλώνει ότι η μεταβλητή ανήκει πλήρως σε μια συνάρτηση-μελών ενώ το 0 σημαίνει ότι η τιμή αυτής της μεταβλητής δεν ανήκει καθόλου σε αυτήν την συνάρτηση μέλους.

Υπάρχουν δύο μορφές **ασαφών κανόνων** (βήμα 2). Η πρώτη είναι τύπου Mamdani η δεύτερη είναι τύπου Takagi-Sugeno-Kang. Ένα παράδειγμα ενός ασαφούς μοντέλου τύπου Mamdani που περιλαμβάνει σύστημα 2 εισόδων και 1 εξόδου μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

IF a is Low and b is Medium THEN c is High

Ενώ το ασαφές μοντέλο τύπου Takagi-Sugeno-Kang διατυπώνεται ως εξής:

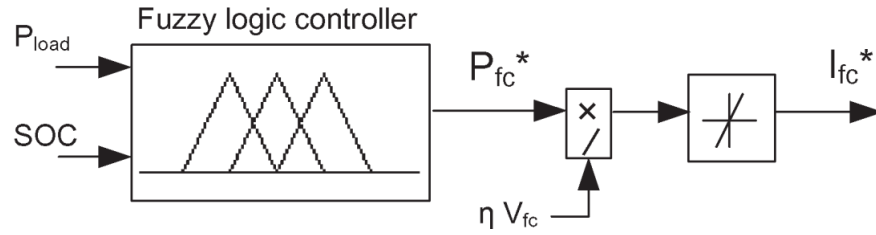
F a is Low and b is Medium THEN $c = g(a, b)$.

Οι τιμές εισόδου αναπαρίστανται από το a και b και η έξοδος του συστήματος από το c . Το Low, το Medium και το High αντιπροσωπεύουν τις συναρτήσεις μέλους, ενώ το $g = (a, b)$ αναφέρεται στην έξοδο της συνάρτησης του κανόνα.

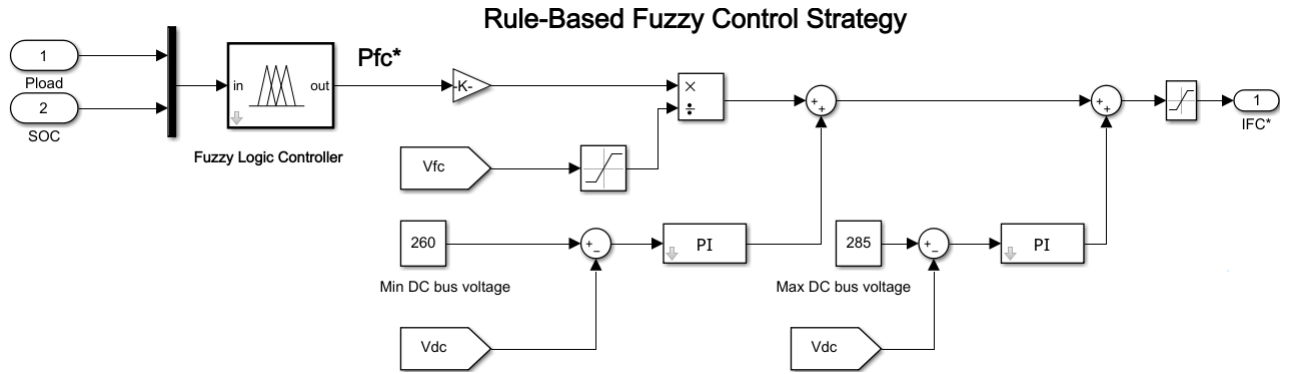
Ο σχεδιασμός της ασαφής λογικής έγινε ακολουθώντας μια προσέγγιση παρόμοια με την [28]. Στην παρούσα εργασία η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας SOC και η απαιτούμενη ισχύς του φορτίου P_{Load} θα αποτελούν τις εισόδους του συστήματος ασαφούς λογικής, ενώ ως έξοδος του συστήματος θα είναι η τιμή αναφοράς της ισχύος εξόδου P_{FC}^* της κυψέλης καυσίμου όπως φαίνεται από το σχήμα 2.36 και 2.37, στα οποία φαίνεται η σχηματική απεικόνιση της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy και της αντίστοιχης υλοποίησης της στο περιβάλλον Simulink.

Στο σχήμα 2.38 φαίνονται οι συναρτήσεις μέλους των εισόδων και εξόδων του συστήματος ασαφούς λογικής. Συγκεκριμένα οι είσοδοι του συστήματος P_{load} , SOC και η έξοδος του συστήματος P_{fc} αναπαρίστανται από 4, 3 και 4 τραπεζοειδείς συναρτήσεις μέλους αντίστοιχα. Οι κανόνες ασαφούς λογικής βασίστηκαν στο μοντέλο τύπου Mamdani και προέκυψαν από τις αποφάσεις ελέγχου που φαίνονται στον πίνακα 2.5, ενώ για την **αποασαφοποίηση** (βήμα 3) χρησιμοποιήθηκε η κεντροειδή μέθοδος (centroid method). Ο σχεδιασμός της ασαφούς λογικής έγινε με την βοήθεια του Fuzzy Logic Toolbox που παρέχει του Matlab τον οποίο ρυθμίσαμε κατάλληλα σύμφωνα με τις παραπάνω προδιαγραφές προκειμένου να πάρουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

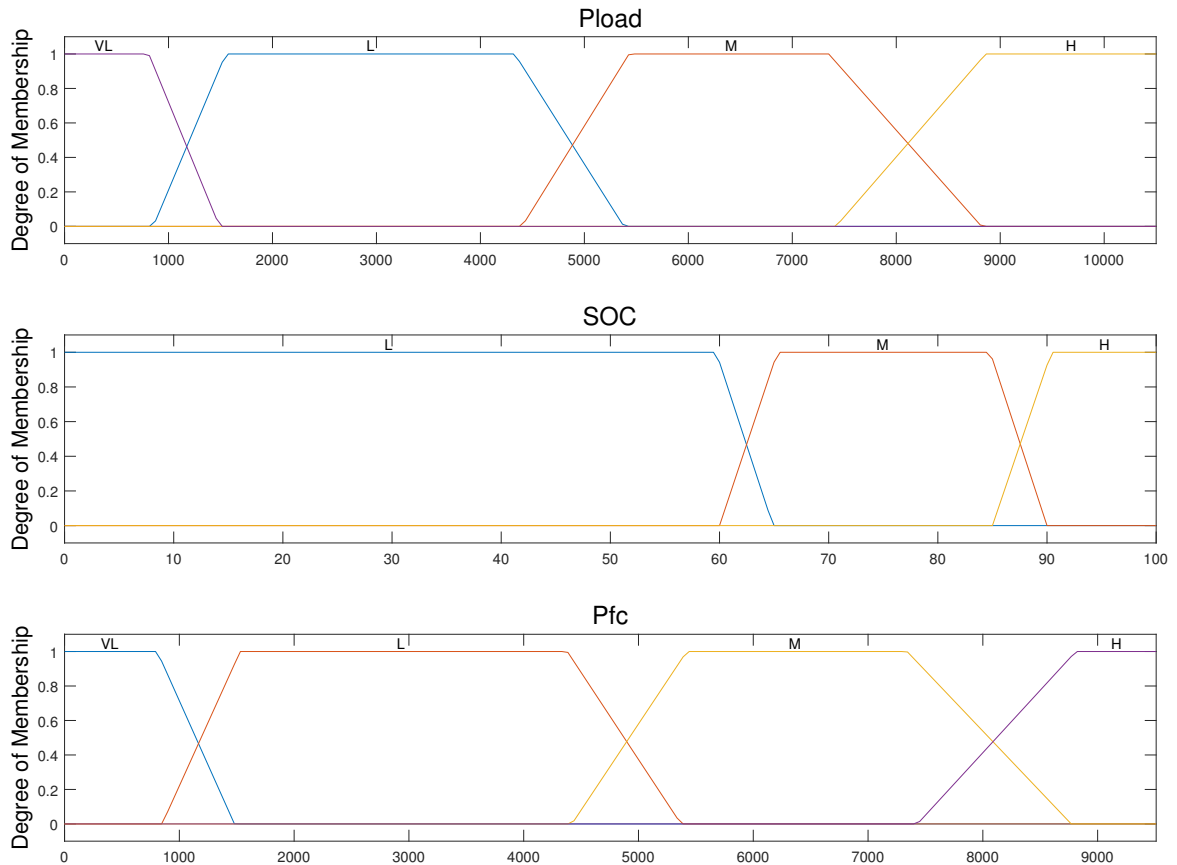
Στο σχήμα 2.39 φαίνεται η εξάρτηση του σήματος εξόδου P_{fc} από τα SOC και



Σχήμα 2.36: Rule-Based Fuzzy Logic Strategy Schematic.



Σχήμα 2.37: Rule-Based Fuzzy Logic Strategy στο Simulink.

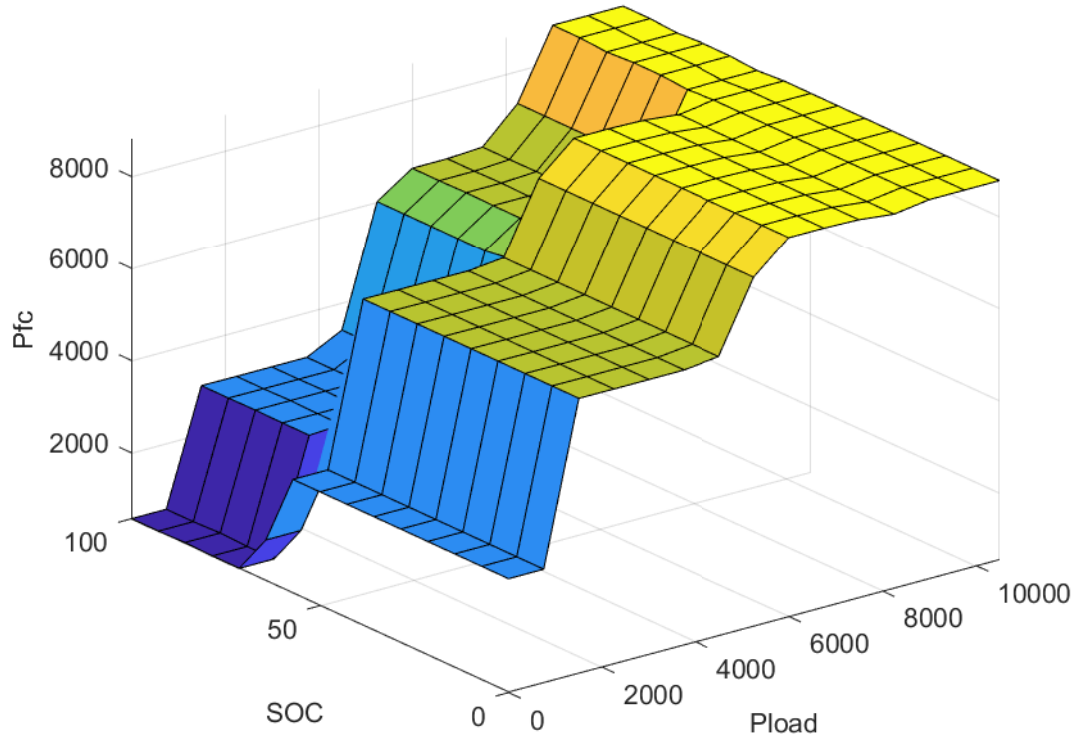


Σχήμα 2.38: Συναρτήσεις μέλους (MFs) εισόδων και εξόδων συστήματος ασαφούς λογικής.

Πίνακας 2.5: Ασαφείς κανόνες συστήματος ασαφούς λογικής (τύπου Mamdani).

If SOC H & P_{load} VL	$P_{FC}^* = VL$
If SOC H & P_{load} L	$P_{FC}^* = L$
If SOC H & P_{load} M	$P_{FC}^* = M$
If SOC M & P_{load} H	$P_{FC}^* = H$
If SOC M & P_{load} VL	$P_{FC}^* = VL$
If SOC M & P_{load} L	$P_{FC}^* = L$
If SOC M & P_{load} M	$P_{FC}^* = M$
If SOC H & P_{load} H	$P_{FC}^* = H$
If SOC L & P_{load} VL	$P_{FC}^* = L$
If SOC L & P_{load} L	$P_{FC}^* = M$
If SOC L & P_{load} M	$P_{FC}^* = H$
If SOC L & P_{load} H	$P_{FC}^* = H$

P_{load} σήματα εσόδου.



Σχήμα 2.39: Εξάρτηση P_{fc} από τα SOC και P_{load} .

2.2.6.4 Στρατηγική ελέγχου ισοδύναμης ελαχιστοποίησης κατανάλωσης (Equivalent Consumption Minimization Strategy-ECMS)

Η στρατηγική ελέγχου ισοδύναμης ελαχιστοποίησης κατανάλωσης (Equivalent Consumption Minimization Strategy-ECMS) είναι μια στρατηγική βελτιστοποίησης βασισμένη σε μια συνάρτηση κόστους. Στοχεύει στην μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου που χρησιμοποιείται από την κυψέλη καυσίμου αλλά και του ισοδύναμου καυσίμου που απαιτείται για τη διατήρηση της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας. Επομένως η συγκεκριμένη στρατηγική εστιάζει στον υπολογισμό της βέλτιστης ισχύος της κυψέλης καυσίμου P_{fc} που ελαχιστοποιεί την κατανάλωση υδρογόνου του υβριδικού συστήματος, η οποία υπολογίζεται ως το άθροισμα της κατανάλωσης του υδρογόνου της κυψέλης και της ισοδύναμης κατανάλωσης της μπαταρίας. Ακολουθήθηκε η ίδια προσέγγιση με αυτήν της [27].

Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης ανέρχεται στο εξής πρόβλημα:

Εύρεση της βέλτιστης λύσης :

$$x = [P_{fc}, \alpha, P_{batt}] \quad (2.31)$$

η οποία ελαχιστοποιεί την εξίσωση:

$$F = [P_{fc} + \alpha P_{batt}] \Delta T \quad (2.32)$$

Με τους ισοδύναμους περιορισμούς του προβλήματος βελτιστοποίησης να είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} P_{load} &= P_{fc} + P_{batt} \\ \alpha &= 1 - 2\mu \frac{(SOC - 0.5(SOC_{max} + SOC_{min}))}{SOC_{max} + SOC_{min}} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Με τα όρια των μεταβλητών απόφασης να περιγράφονται ως εξής:

$$\begin{aligned} P_{fc_{min}} &\leq P_{fc} \leq P_{fc_{max}} \\ P_{batt_{min}} &\leq P_{batt} \leq P_{batt_{max}} \\ 0 &\leq \alpha \leq 100 \end{aligned} \quad (2.34)$$

όπου

P_{fc} και P_{batt} η ισχύς της κυψέλης καυσίμου και της μπαταρίας αντίστοιχα

α : ο συντελεστής ποινής ο οποίος τροποποιεί προς τα πάνω ή προς τα κάτω την αντίστοιχη κατανάλωση καυσίμου της μπαταρίας ανάλογα με την απόκλιση από τον στόχο του SOC

μ : υποδηλώνει τον συντελεστή ισορροπίας του SOC της μπαταρίας, προσαρμοσμένος στα 0,6 για καλύτερο έλεγχο του SOC της μπαταρίας

ΔT : ο χρόνος δειγματοληψίας

P_{fcmin} και P_{fcmax} η ελάχιστη και η μέγιστη ισχύς της κυψέλης καυσίμου αντίστοιχα

$P_{battmin}$ και $P_{battmax}$ η ελάχιστη και η μέγιστη ισχύς της μπαταρίας αντίστοιχα

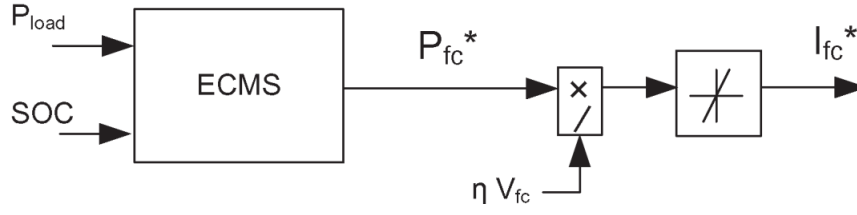
SOC_{min} και SOC_{max} η ελάχιστη και η μέγιστη κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας αντίστοιχα

Να αναφέρουμε ότι στην περίπτωση μας η τάση του DC διαύλου ελέγχεται μέσω των μετατροπέων της μπαταρίας επομένως στη διαδικασία βελτιστοποίησης η ισχύς του υπερπυκνωτή δεν λαμβάνεται υπόψη. Όταν ο υπερπυκνωτής θα αποφορτίζεται, θα επαναφορτίζεται μέσω της μπαταρίας. Επομένως σε ένα δεδομένο κύκλο φορτίου μόνο η κυψέλη καυσίμου και η μπαταρία μπορεί να χειριστεί την συνολική ενέργεια του φορτίου.

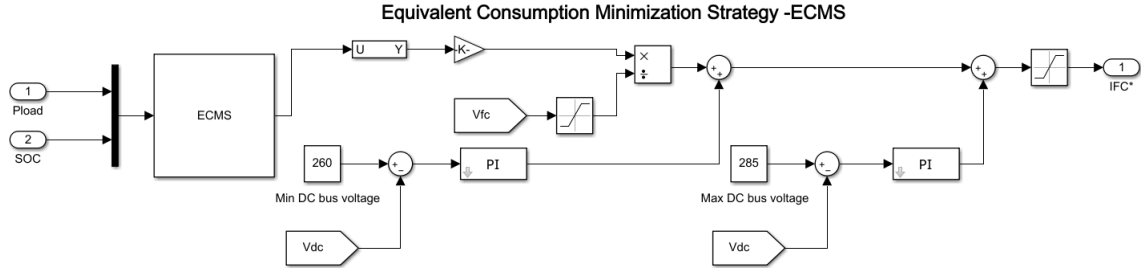
Η σχηματική απεικόνιση και η μοντελοποίηση της συγκεκριμένης στρατηγικής στο περιβάλλον Simulink φαίνονται στο σχήμα 2.40 και 2.41 αντίστοιχα. Η υλοποίηση της Equivalent Consumption Minimization Strategy έγινε με την βοήθεια του μπλοκ *ECMS* το οποίο υλοποιεί μια συνάρτηση τύπου S-Function του Simulink γραμμένη σε κώδικα Matlab. Να αναφέρουμε ότι η υλοποίηση της συνάρτησης έγινε κάνοντας χρήση της συνάρτησης *optimoptions* του Matlab η οποία υπολογίζει βέλτιστες λύσεις του δεδομένου προβλήματος καθώς και της συνάρτησης *fmincon* η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ελαχίστου της περιορισμένης μη γραμμικής πολυμεταβλητής συνάρτησης. Όπως βλέπουμε από το σχήμα 2.41 αναλόγως την τιμή της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας SOC και του φορτίου P_{Load} που εισέρχονται ως είσοδοι στο μπλοκ *ECMS* υπολογίζεται η τιμή αναφοράς ισχύος εξόδου της κυψέλης καυσίμου P_{FC}^* . Στην συνέχεια διαιρώντας την τιμή P_{FC}^* με την τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου V_{fc} υπολογίζεται η τιμή αναφοράς του ρεύματος της κυψέλης καυσίμου I_{fc}^* , το οποίο θα αποτελέσει σήμα αναφοράς για τον μετατροπέα ανύψωσης της κυψέλης καυσίμου μέσω του οποίου πραγματοποιείται ο έλεγχος ροής της ενέργειας της.

2.2.6.5 Στρατηγική ελέγχου μεγιστοποίησης εξωτερικής ενέργειας (External Energy Maximization Strategy-EEMS).

Η στρατηγική ελέγχου μεγιστοποίησης εξωτερικής ενέργειας (External Energy Maximization Strategy-EEMS) είναι μια στρατηγική βελτιστοποίησης βασισμένη σε μια συνάρτηση κόστους της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή. Η συγκεκριμένη στρατηγική στοχεύει στην μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου ενός συστήματος μέσω της αύξησης της απαίτησης ισχύος από την μπαταρία και τον υπερπυκνωτή, ενώ δουλεύουν



Σχήμα 2.40: Equivalent Consumption Minimization Strategy Schematic.



Σχήμα 2.41: Equivalent Consumption Minimization Strategy στο Simulink.

εντός των ορίων λειτουργίας τους. Ακολουθήθηκε παρόμοια προσέγγιση με αυτήν της [29].

Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης EEMS πρέπει να προσδιοριστούν η ισχύς της μπαταρίας και η τάση φόρτισης/εκφόρτισης του υπερπυκνωτή. Η αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να μεγιστοποιηθεί είναι η ενέργεια που παρέχεται μέσω του υπερπυκνωτή και της μπαταρίας εντός ενός καθορισμένου χρονικού διαστήματος. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης ανέρχεται στο εξής πρόβλημα:

Εύρεση της βέλτιστης λύσης :

$$x = [P_{batt}, \Delta V] \quad (2.35)$$

η οποία μεγιστοποιεί την εξίσωση:

$$F = -[P_{batt}\Delta T + \frac{1}{2}C_r\Delta V^2] \quad (2.36)$$

Με τους ισοδύναμους περιορισμούς του προβλήματος βελτιστοποίησης να είναι οι εξής:

$$P_{batt}\Delta T \leq (SOC - SOC_{min})V_{batt}Q \quad (2.37)$$

Με τα όρια των μεταβλητών απόφασης να περιγράφονται ως εξής:

$$\begin{aligned} P_{batt_{min}} &\leq P_{batt} \leq P_{batt_{max}} \\ V_{dc_{min}} - V_{dc} &\leq \Delta V \leq V_{dc_{max}} - V_{dc} \end{aligned} \quad (2.38)$$

όπου

$|F|$ ισοδυναμεί με τη μέγιστη εξωτερική ενέργεια κατά την διάρκεια του χρόνου δειγματοληψίας

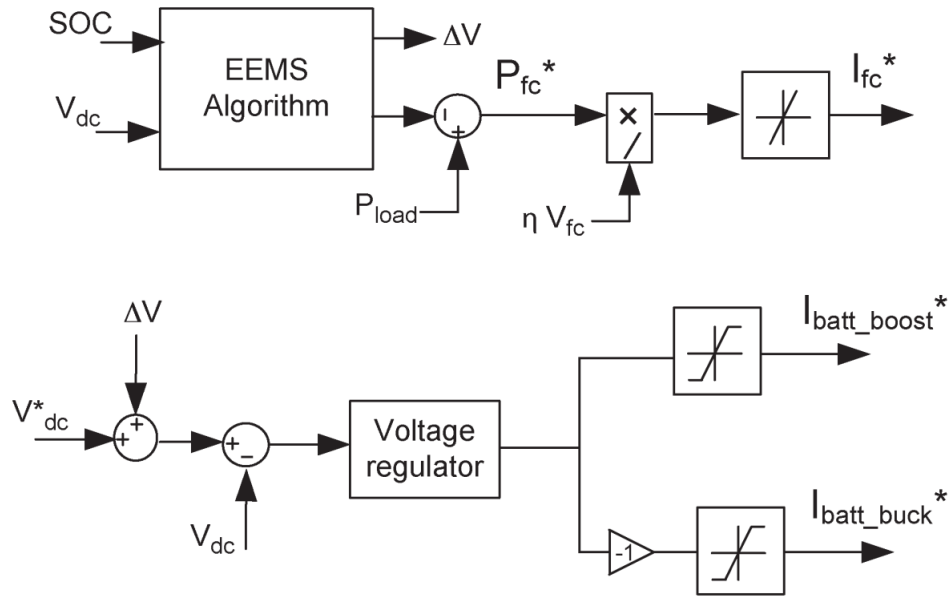
ΔV η τάση φόρτισης/εκφόρτισης του υπερπυκνωτή

C_r είναι η ονομαστική χωρητικότητα του υπερπυκνωτή

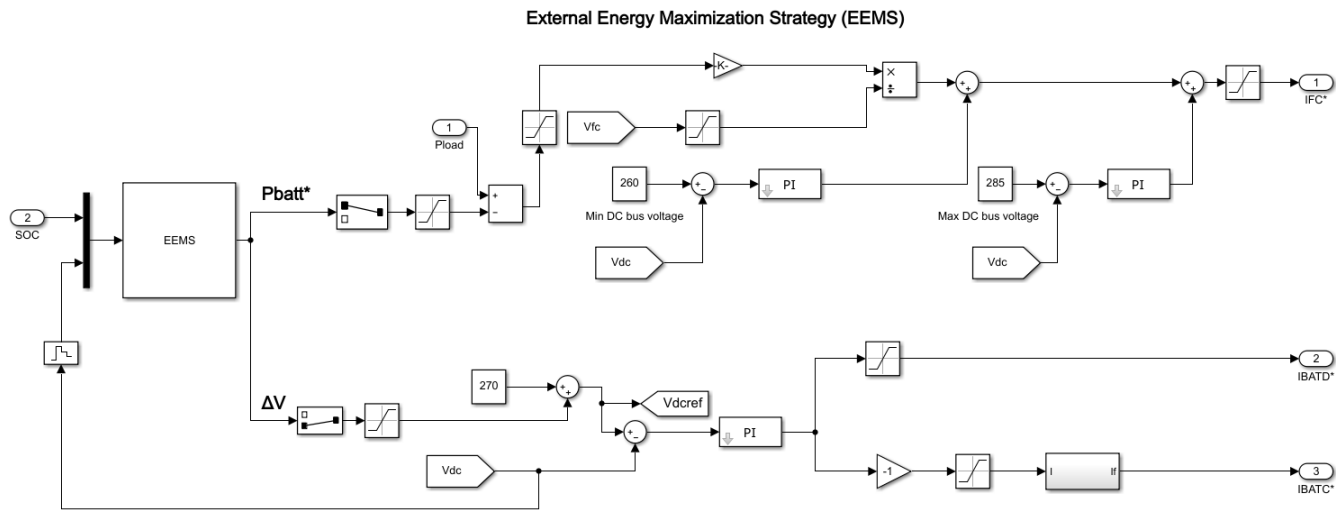
$V_{dc_{min}}$ και $V_{dc_{max}}$ η ελάχιστη και η μέγιστη τάση του DC διαύλου

V_{batt} και Q είναι η ονομαστική τάση και χωρητικότητα της μπαταρίας

Η σχηματική απεικόνιση και η μοντελοποίηση της συγκεκριμένης στρατηγικής στο περιβάλλον Simulink φαίνονται στο σχήμα 2.42 και 2.43 αντίστοιχα. Η υλοποίηση της External Energy Maximization Strategy έγινε με την βοήθεια του μπλοκ *EEMS*, το οποίο υλοποιεί μια συνάρτηση τύπου S-Function του Simulink γραμμένη σε κώδικα Matlab. Να αναφέρουμε ότι η υλοποίηση της συνάρτησης έγινε κάνοντας χρήση της συνάρτησης *optimoptions* του Matlab η οποία υπολογίζει βέλτιστες λύσεις ενός δεδομένου προβλήματος καθώς και της συνάρτησης *fmincon* η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ελαχίστου της περιορισμένης μη γραμμικής πολυμεταβλητής συνάρτησης. Όπως βλέπουμε από το σχήμα 2.43 οι είσοδοι του EEMS αλγορίθμου είναι η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας *SOC* και η τιμή της τάσης του DC διαύλου, ενώ οι έξοδοι του EEMS αλγορίθμου είναι η τιμή αναφοράς ισχύος της μπαταρίας P_{batt}^* και η τάση φόρτισης/εκφόρτισης του πυκνωτή ΔV . Στην συνέχεια η ισχύς αναφοράς της μπαταρίας αφαιρείται από την ισχύ του φορτίου προκειμένου να ληφθεί η αναφορά ισχύος της κυψέλης καυσίμου P_{FC}^* . Στην συνέχεια διαιρώντας την τιμή P_{FC}^* με την τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου V_{fc} υπολογίζεται η τιμή αναφοράς του ρεύματος της κυψέλης καυσίμου I_{fc}^* , το οποίο θα αποτελέσει σήμα αναφοράς για τον μετατροπέα ανύψωσης της κυψέλης καυσίμου μέσω του οποίου πραγματοποιείται ο έλεγχος ροής της ενέργειας της. Η τάση φόρτισης/εκφόρτισης του πυκνωτή ΔV προστίθεται στην τάση αναφοράς του DC διαύλου ώστε να αναγκάσει το σύστημα υπερπυκνωτών για φόρτιση ή εκφόρτιση.



Σχήμα 2.42: External Energy Maximization Strategy Schematic.



Σχήμα 2.43: External Energy Maximization Strategy στο Simulink.

3 Παρουσίαση Ανάλυση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο πρόκειται να παρουσιαστούν, να αναλυθούν και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του υβριδικού μας συστήματος τροφοδοσίας του συστήματος ισχύος έκτακτης ανάγκης του αεροσκάφους για το προφίλ φορτίου που παρουσιάσαμε διάρκειας 350 s, για κάθε μία από τις πέντε εξεταζόμενες στρατηγικές ελέγχου διαχείρισης ενέργειας. Το παραπάνω έχει σκοπό την διευκόλυνση της κατανόησης και της αξιολόγησης της συμπεριφοράς του μοντελοποιημένου υβριδικού συστήματος ισχύος. Συγκεκριμένα για κάθε μία από τις εξεταζόμενες στρατηγικές ελέγχου ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

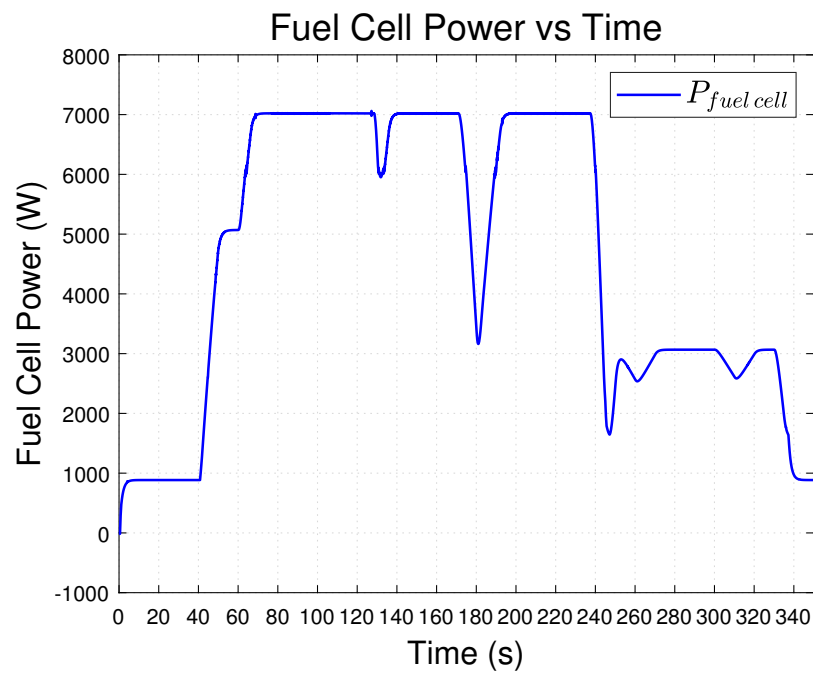
- Πρώτον γίνεται η **παρουσίαση των αποτελεσμάτων** όπου παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της παραγόμενης ισχύος κάθε πηγής χωριστά, η παραγόμενη ισχύς συγκεντρωτικά και για τις τρεις πηγές μαζί, η αθροιστική παραγόμενη ισχύς των πηγών, η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, η τάση του DC διαύλου και τέλος οι γραφικές παραστάσεις ρεύματος και τάσης της μπαταρίας κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.
- Δεύτερον ακολουθεί η **ανάλυση των αποτελεσμάτων** κατά την οποία γίνεται μια σύντομη ανάλυση της συμπεριφοράς και των αποκρίσεων του συστήματος.
- Τρίτον γίνεται μια **αξιολόγηση των αποτελεσμάτων** προκειμένου να διαπιστωθούν τυχόν σφάλματα ή μη επιθυμητές συμπεριφορές του συστήματος.

3.1 State Machine Control Strategy

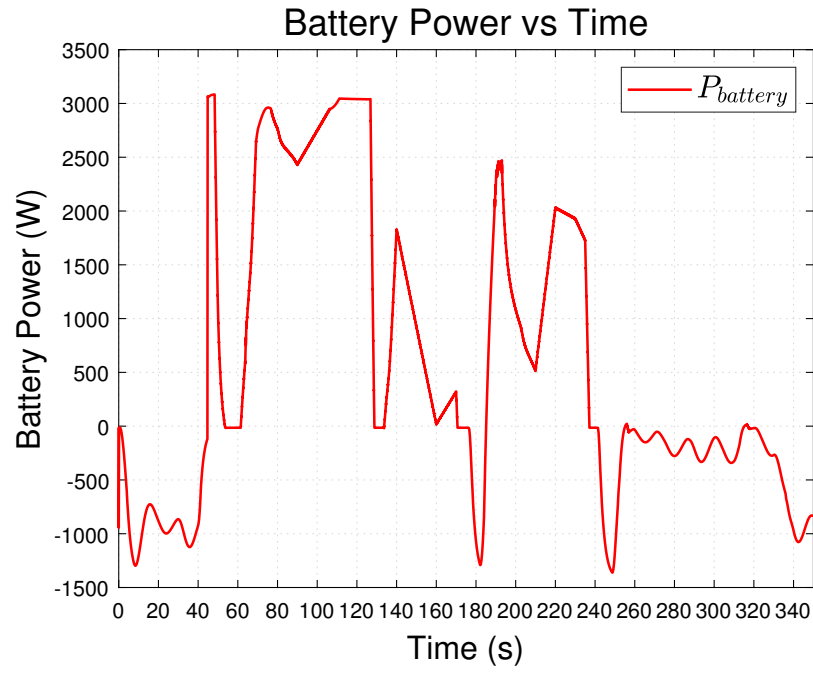
3.1.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων State Machine Control Strategy

Προσομοιώνοντας το υβριδικό σύστημα ισχύος εφαρμόζοντας την στρατηγική διαχείρισης ενέργειας State Machine Control Strategy, λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

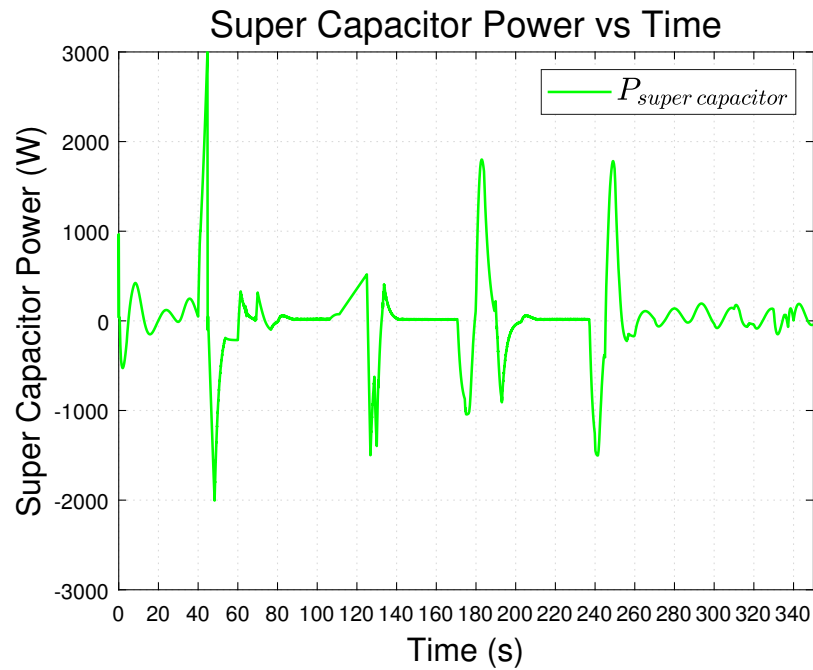
- **Ισχύς πηγών:** Η ισχύς της κυψέλης καυσίμου, της μπαταρίας και του υπερ-πυκνωτή φαίνονται στα σχήματα 3.1, 3.2 και 3.3 αντίστοιχα για το προφίλ του φορτίου μας:



Σχήμα 3.1: Ισχύς κυψέλη καυσίμου κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.

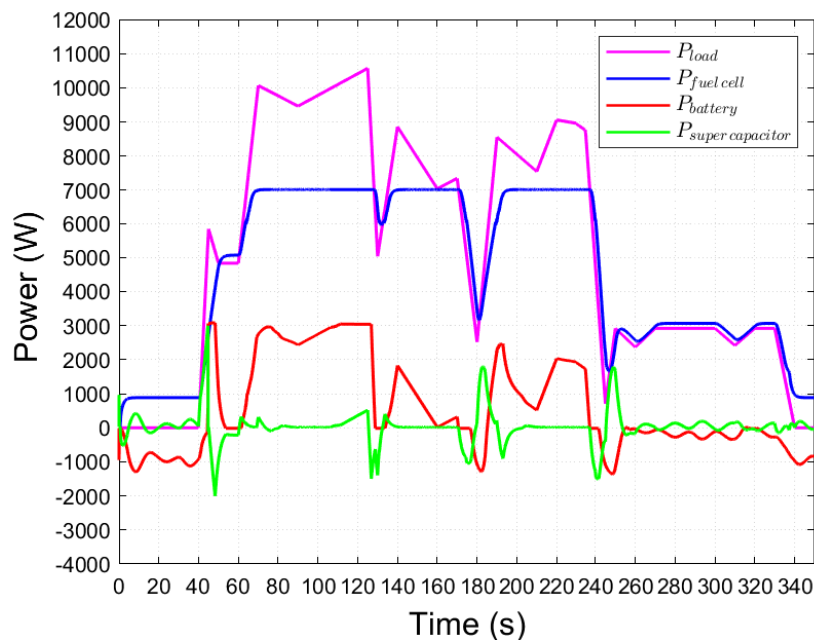


Σχήμα 3.2: Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.

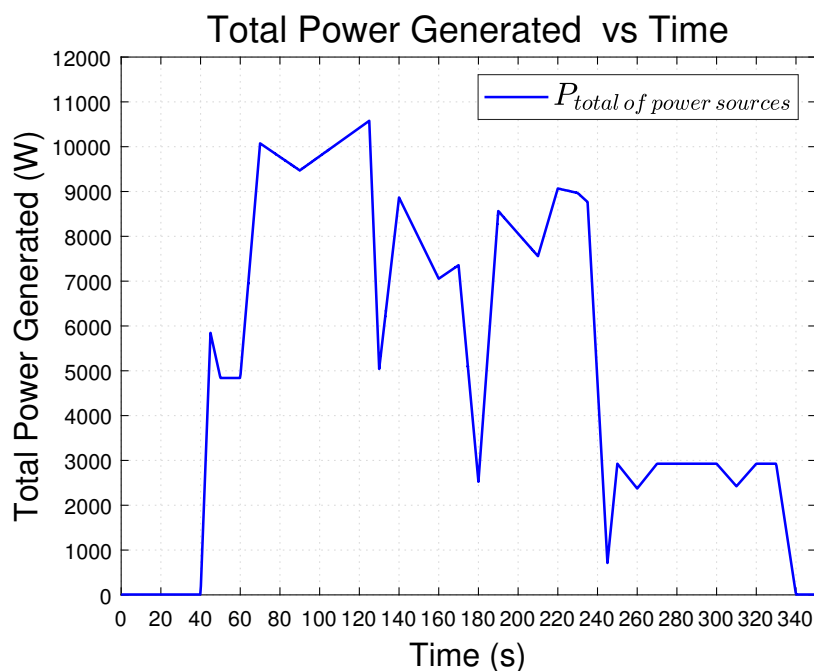


Σχήμα 3.3: Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.

- **Συνολική Παραγόμενη Ισχύς:** Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές ισχύος και για τις 3 πηγές, ενώ η συνολική παραγόμενη ισχύς τους δίνεται στο σχήμα 3.5

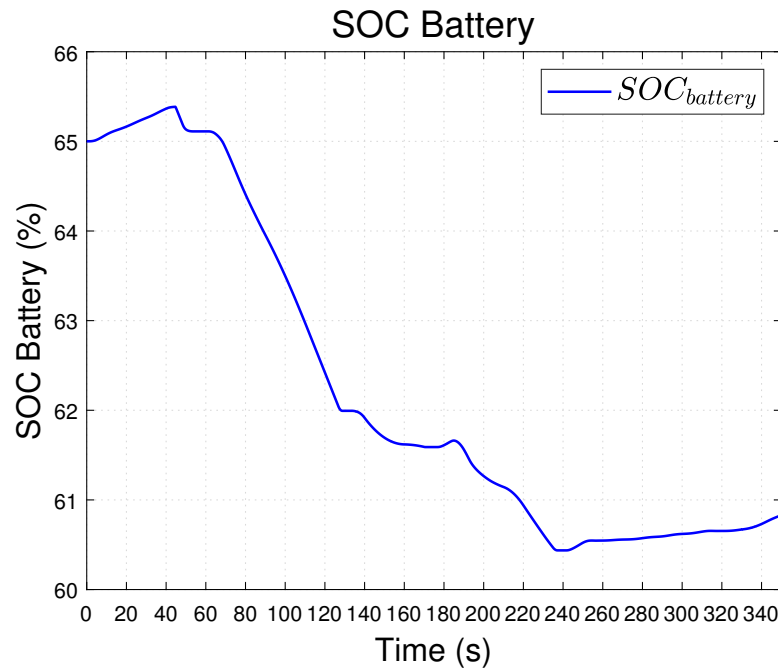


Σχήμα 3.4: Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.



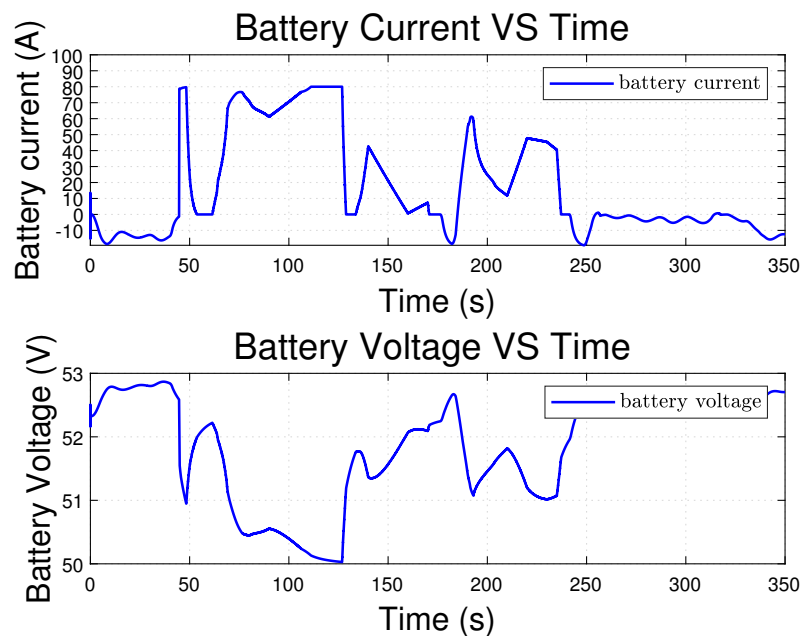
Σχήμα 3.5: Συνολική παραγόμενη ισχύς πηγών κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.

- Επίπεδο φόρτισης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας:



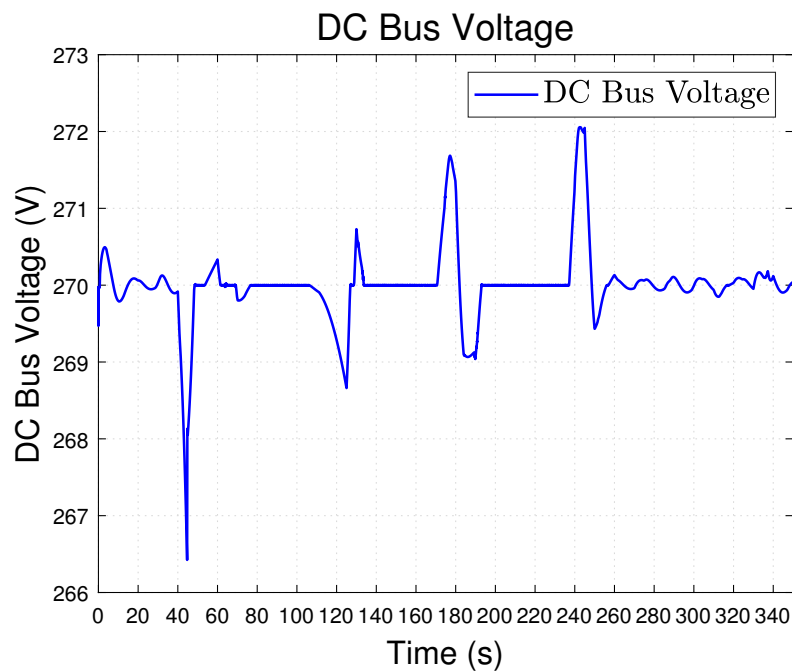
Σχήμα 3.6: Επίπεδο φόρτισης μπαταρίας κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.

- Ρεύμα και τάση μπαταρίας:

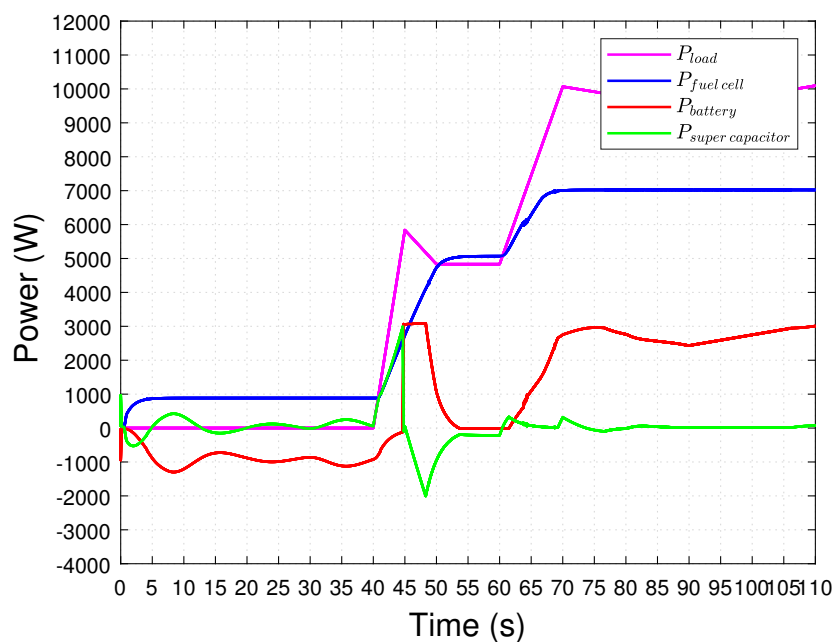


Σχήμα 3.7: Τάση και ρεύμα μπαταρίας κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.

- Τάση DC διαύλου:



Σχήμα 3.8: Τάση DC διαύλου κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy.



Σχήμα 3.9: Μεγεθυμένη απεικόνιση της ισχύος πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή της State Machine Control Strategy στο χρονικό διάστημα $t = 0 - 110\text{ s}$.

3.1.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων State Machine Control Strategy

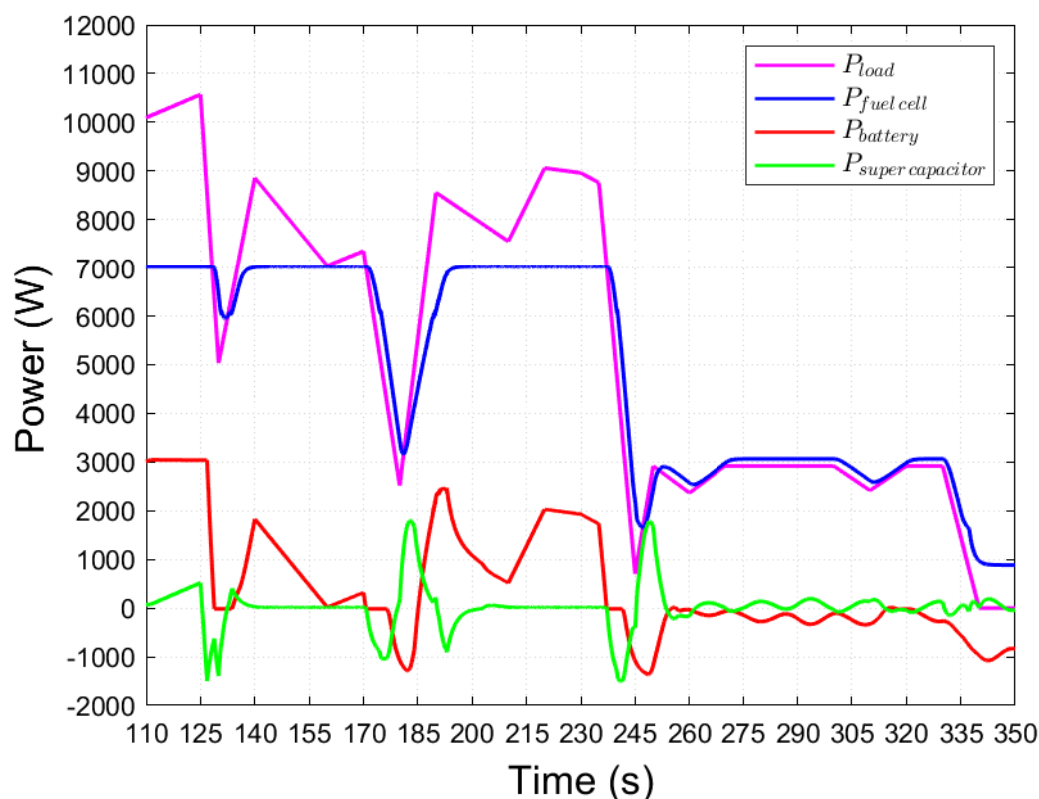
Εστιάζουμε στα γραφήματα των σχημάτων 3.4, 3.6, 3.8 στα οποία απεικονίζονται η ισχύς των πηγών συγκεντρωτικά μαζί με το απαιτούμενο φορτίο ζήτησης, το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας και η τάση του DC διαύλου αντίστοιχα κατά την εφαρμογή της

State Machine Control Strategy. Το παραπάνω καθώς από τις τιμές του απαιτούμενο φορτίου P_{load} , του SOC (επίπεδο φόρτισης) της μπαταρίας και της V_{dc} (τάση του DC διαύλου) κάθε χρονική στιγμή σε συνδυασμό με την εφαρμοζόμενη στρατηγική ελέγχου διαχείρισης ενέργειας εξαρτάται η εξαγωγή (με τον τρόπο που αναλύσαμε παραπάνω) των σημάτων αναφοράς των μετατροπέων της κυψέλης καυσίμου και της μπαταρίας μέσω των οποίων πραγματοποιείται η διαχείριση της ενέργειας εξόδου των πηγών του υβριδικού μας συστήματος. Εξηγούμε ακολούθως τι συμβαίνει κατά τη διάρκεια των 5 λεπτών του σεναρίου προσομοίωσης έκτακτης προσγείωσης.

Στο σχήμα 3.9 εστιάζουμε στην χρονική περίοδο $t = 0 - 110\text{ s}$ με σκοπό την καλύτερη ανάλυση της απόκρισης του υβριδικού μας συστήματος

- την $t = 0\text{ s}$ το απαιτούμενο φορτίο ζήτησης καλύπτεται από τις κύριες γεννήτριες του αεροσκάφους και η κυψέλη καυσίμου ενεργοποιείται ώστε να είναι προετοιμασμένη για ένα απρόοπτο σενάριο έκτακτης προσγείωσης του αεροσκάφους αποδίδοντας την ελάχιστη ισχύ της (850 W).
- χρονικό διάστημα $t = 0 - 40\text{ s}$: η κυψέλη καυσίμου αποδίδει την ελάχιστη ισχύ της των 850 W όπου σε συνδυασμό με την συμπλήρωση ισχύος από τον υπερπυκνωτή φορτίζεται η μπαταρία (αρχική κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας $SOC_{initial} = 60\%$) με την με τη βέλτιστη ισχύ φόρτισης περίπου των 1 kW .
- την $t = 40\text{ s}$ οι κινητήρες του αεροσκάφους βγαίνουν εκτός λειτουργίας \rightarrow η καμπύλη φορτίου αρχίζει να αυξάνεται απότομα οπότε η κυψέλη καυσίμου αναλαμβάνει την κάλυψη του βασικού φορτίου ενώ το έξτρα φορτίο που απαιτείται εξαιτίας του αργού χρόνου ανταπόκρισης της κυψέλης καυσίμου στην αλλαγή του φορτίου παρέχεται αχαριαία από τον υπερπυκνωτή λόγω της γρήγορης δυναμικής του.
- την $t = 45\text{ s}$ η τάση του του DC διαύλου ή αλλιώς του υπερπυκνωτή πέφτει κάτω από την τάση αναφορά των 270 V οπότε η μπαταρία σταματάει να απορροφά την περισσευούμενη ενέργεια από το σύστημα και ξεκινάει να παρέχει ισχύ στον υπερπυκνωτή προκειμένου να επαναφέρει την τάση του DC διαύλου στα 270 V .
- την $t = 48.5\text{ s}$ η τάση του του DC διαύλου ή αλλιώς του υπερπυκνωτή φτάνει την τάση αναφοράς των 270 V και η μπαταρία μειώνει σταδιακά την ισχύ φόρτισης της στο 0. Η ισχύς εξόδου της κυψέλης καυσίμου καλύπτει πλήρως την ζήτηση του φορτίου ενώ η περίσσεια ενέργειας απορροφάται για την επαναφόρτιση του υπερπυκνωτή.
- την $t = 60\text{ s}$ η εκκίνησή μια υδραυλικής αντλίας έκτακτης ανάγκης προκαλεί την απότομη αύξηση του φορτίου. Λόγω της αργής δυναμικής της κυψέλης καυσίμου ο υπερπυκνωτής παρέχει την έξτρα ισχύ που απαιτείται.
- την $t = 61.5\text{ s}$ η μπαταρία αρχίζει ξανά να παρέχει ισχύ στο σύστημα ώστε η τιμή της τάσης του DC διαύλου να επανέλθει στα 270 V , ενώ ταυτόχρονα βοηθάει την κυψέλη καυσίμου στην κάλυψη της ισχύος.
- την $t = 70\text{ s}$ η κυψέλη καυσίμου φτάνει στην μέγιστη ισχύ εξόδου της και η μπαταρία αναλαμβάνει την κάλυψη του έξτρα φορτίου.

Η ανάλυση μας συνεχίζεται για το χρονικό διάστημα $t = 110 - 350$ s. Στο σχήμα 3.10 εστιάζουμε στην χρονική περίοδο $t = 110 - 350$ s με σκοπό την καλύτερη ανάλυση της απόκρισης του υβριδικού μας συστήματος.



Σχήμα 3.10: Μεγεθυμένη απεικόνιση της ισχύος πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή του State Machine Control Strategy στο χρονικό διάστημα $t = 110 - 350$ s.

- την $t = 110$ s η κυψέλη συνεχίζει να αποδίδει την μέγιστη ισχύ της, η μπαταρία φτάνει την μέγιστη ισχύ εξόδου της και ο υπερπυκνωτής αποδίδει την έξτρα ενέργεια που υπολείπεται για την κάλυψη του φορτίου.
- την $t = 125$ s η ισχύς ζήτησης του φορτίου μειώνεται απότομα κάτω από την μέγιστη ισχύ εξόδου της κυψέλης καυσίμου. Εξαιτίας της αργής δυναμικής της κυψέλης καυσίμου στις μεταβολές του φορτίου, η περίσσεια ενέργεια που παράγεται κατά την διάρκεια του εν λόγω μεταβατικού φαινομένου του φορτίου ζήτησης απορροφάται από τον υπερπυκνωτή.
- την $t = 126$ s η τάση του DC διαύλου επανέρχεται στα 270 V και η ισχύς εκφόρτισης της μπαταρίας μειώνεται στο 0.
- την $t = 130$ s μια δεύτερη υδραυλική αντλία έκτακτης ανάγκης ενεργοποιείται και η ζήτηση του φορτίου αυξάνεται. Η κυψέλη καυσίμου συμπεριφέρεται όπως και στην περίπτωση για $t = 60$ s
- το χρονικό διάστημα $t = 130 - 170$ s η κυψέλη καυσίμου συνεχίζει την κάλυψη της ζήτησης του βασικού φορτίου με την μπαταρία να εκφορτίζεται παρέχοντας ισχύ για την κάλυψη του έξτρα φορτίου.

- την $t = 175\text{ s}$ η ζήτηση του φορτίου μειώνεται κάτω από την μέγιστη ισχύ εξόδου της κυψέλης καυσίμου, ενώ η περίσσεια ενέργειας απορροφάται τόσο από την μπαταρία όσο και από τον υπερπυκνωτή.
- την $t = 180\text{ s}$ το φορτίο αυξάνεται ξαφνικά λόγω της κίνησης των πτερυγίων του αεροσκάφους. Ο υπερπυκνωτής για ακόμη μια φορά ανταποκρινόμενος, παρέχει άμεσα ισχύ ενώ ταυτόχρονα συνεχίζεται η απορρόφηση ισχύος της μπαταρίας.
- την $t = 185\text{ s}$ η τάση του DC διαύλου βρίσκεται κάτω από την τάση αναφοράς των 270 V και η μπαταρία ξεκινάει να αποφορτίζεται προκειμένου να επαναφέρει την τάση του DC διαύλου στην τάση αναφοράς.
- την $t = 193\text{ s}$ η τάση του DC διαύλου επανέρχεται στην τάση αναφοράς οπότε η μπαταρία αναλαμβάνει την βοήθεια της κυψέλης καυσίμου στην κάλυψη του φορτίου με την παροχή έξτρα ενέργειας.
- το χρονικό διάστημα $t = 193 - 235\text{ s}$ η κάλυψη του φορτίου πραγματοποιείται από την κυψέλη καυσίμου σε συνδυασμό με την μπαταρία η οποία συνεχίζει να συμπληρώνει την υπολειπόμενη ισχύ για την κάλυψη του φορτίου.
- την $t = 235\text{ s}$ το αεροσκάφος έχει προσγειωθεί και η ισχύς του απαιτούμενου φορτίου μειώνεται ραγδαία, με την περισσευούμενη ενέργεια που προκύπτει από την αργή ανταπόκριση της κυψέλης καυσίμου στην ξαφνική μεταβολή του φορτίου να απορροφάται τόσο από την μπαταρία όσο και από τον υπερπυκνωτή.
- την $t = 245\text{ s}$ η αύξηση στην ζήτηση του φορτίου προκαλεί την γρήγορη ανταπόκριση του υπερπυκνωτή για την συμπλήρωση της έξτρα ισχύος.
- την $t = 250\text{ s}$ το αεροσκάφος τροχοδρομεί. Από την χρονική στιγμή $t = 251.5\text{ s}$ και έπειτα η κυψέλη καυσίμου αναλαμβάνει την πλήρη κάλυψη του φορτίου.
- το χρονικό διάστημα $t = 250 - 330\text{ s}$ γίνεται προσπάθεια να απορροφηθεί η περίσσεια ενέργεια από την μπαταρία ενώ ταυτόχρονα η μπαταρία προσπαθεί να ρυθμίσει την τάση του DC διαύλου στην τάση αναφοράς, εξού και οι διακυμάνσεις στις ισχύς της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή.
- την $t = 330\text{ s}$ οι επιβάτες έχουν εξέλθει από το αεροσκάφος και η ζήτηση του φορτίου μειώνεται στο 0. Η ισχύς της κυψέλης ανταποκρίνεται αργά στην μεταβολή του φορτίου και σταθεροποιείται στην παραγωγή της ελάχιστης ισχύος εξόδου της, επαναφορτίζοντας την μπαταρία.

3.1.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων State Machine Control Strategy

Από την παραπάνω ανάλυση επιβεβαιώνουμε την ορθότητα του αρχικού μας σχεδιασμού του υβριδικού μας συστήματος. Συγκεκριμένα σχετικά με την χρήση της κυψέλης καυσίμου σκοπός αποτελούσε η κάλυψη των βασικών φορτίων ζήτησης δουλεύοντας εντός των ορίων λειτουργίας της. Επίσης η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται ενεργοποιημένη

από την αρχή για την ετοιμότητα του υβριδικού μας συστήματος και την φόρτιση της μπαταρίας. Σχετικά με την μπαταρία η χρήση της στόχευε στον έλεγχο της διατήρησης της τάσης του DC διαύλου στην τάση αναφοράς ενώ παράλληλα να παρέχει ή να απορροφάει ενέργεια όταν υπάρχει αδυναμία κάλυψης του φορτίου από την κυψέλη ή στην περίπτωση παραγωγή πλεονάζουσας ενέργειας αντίστοιχα. Τέλος επιβεβαιώνεται ο σκοπός χρήσης του υπερπυκνωτή ο οποίος αφορούσε στο πλεονέκτημα της γρήγορης δυναμικής του, δηλαδή να παρέχει κατευθείαν την έξτρα ενέργεια που απαιτείτο όποτε η κυψέλη καυσίμου αργούσε να ανταποκριθεί εξαιτίας της χαμηλής δυναμικότητας της στις σχετικά απότομες μεταβολές του φορτίου ζήτησης.

Από την σύγκριση των γραφήματα των σχημάτων 3.4, 3.5 στα οποία απεικονίζεται η ισχύς για κάθε μια από τις τρεις πηγές συγκεντρωτικά και της αθροιστικής παραγωγής ισχύος των πηγών αντίστοιχα, συμπεραίνουμε ότι το φορτίο ζήτησης καλύπτεται συνεχώς από την αθροιστική ισχύ των τριών πηγών χωρίς να υπάρχουν ασυνέχειες είτε απώλειες, γεγονός που σηματοδοτεί ότι ο έλεγχος μας θεωρητικά είναι ορθός.

Σχετικά με την τάση του DC διαύλου σκοπός αποτελούσε η διατήρηση του στην τάση αναφοράς των 270 V μέσω της μπαταρίας, η οποία αποτελεί τον ρυθμιστή τάσης του DC διαύλου. Από την απεικονιζόμενη τάση του DC διαύλου του γραφήματος 3.8, συμπεραίνουμε πρώτον την επίτευξη της διατήρησης της τάσης του στην κατά κύριο λόγο τάση των 270 V και δεύτερον επιβεβαιώνεται η επίδραση της μπαταρίας στην διατήρηση αλλά και στην επαναφορά της τάσης του στην τάση αναφοράς στις περιπτώσεις όπου έτεινε να παρεκκλίνει. Το παραπάνω σηματοδοτεί τον σωστό σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου της τάσης του DC διαύλου. Η αποκλίσεις από την τάση αναφοράς συμβαίνουν τις χρονικές στιγμές τις οποίες ο υπερπυκνωτής προσφέρει ή απορροφά ενέργεια από το σύστημα. Για παράδειγμα παρατηρώντας το σχήμα 3.4 λόγω ότι η αρχική αναφορά ισχύος της κυψέλης καυσίμου είναι χαμηλή έχει σαν αποτέλεσμα τη χρονική στιγμή $t = 40$ όπου προκαλείται απότομη αύξηση του φορτίου ζήτησης, ο υπερπυκνωτής να αποφορτιστεί προκειμένου να βοηθήσει στην κάλυψη του φορτίου και έτσι η τιμή του DC διαύλου να πέσει κάτω από την τιμή αναφοράς όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.8.

Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας όπως φαίνεται και από το αντίστοιχο γράφημα του σχήματος 3.6 παραμένει εντός των ορίων που θέσαμε. Όπως παρατηρούμε η μπαταρία φορτίστηκε από την κυψέλη καυσίμου ως έναν βαθμό τα πρώτα 40 s. Από εκεί και έπειτα έως την χρονική στιγμή $t = 235$ s λόγω της προσφοράς της στην κάλυψη του φορτίου και στην διατήρηση της τάσης του DC διαύλου στην τάση αναφοράς, η μπαταρία κατά κύριο λόγο αποφορτίζεται συνεχώς. Την χρονική στιγμή $t = 235$ s η μείωση του φορτίου δίνει την δυνατότητα κάλυψης του απαιτούμενου φορτίου από την κυψέλη καυσίμου και την φόρτισης της μπαταρίας με την πλεονάζουσα ενέργεια. Τέλος από το γράφημα του σχήματος 3.7 στο οποίο παρουσιάζεται το ρεύμα και η τάση της μπαταρίας, παρατηρούμε ότι τηρούμε τους τεχνικούς περιορισμούς της μπαταρίας που θέσαμε σχετικά με το ρεύμα φόρτισης (αρνητικό ρεύμα) και το ρεύμα εκφόρτισης (θετικό ρεύμα) της μπαταρίας. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται, το ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας δεν ξεπερνάει τον τεχνικό περιορισμό που θέσαμε των 20 A, όμοια και το ρεύμα εκφόρτισης της μπαταρίας τον τεχνικό περιορισμό των 80 A. Το παραπάνω οφείλεται στον αποτελεσματικό σχεδιασμό για την εξαγωγή των σημάτων αναφοράς ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης του DC μετατροπέα υποβιβασμού (μετατροπέας φόρτισης) και του

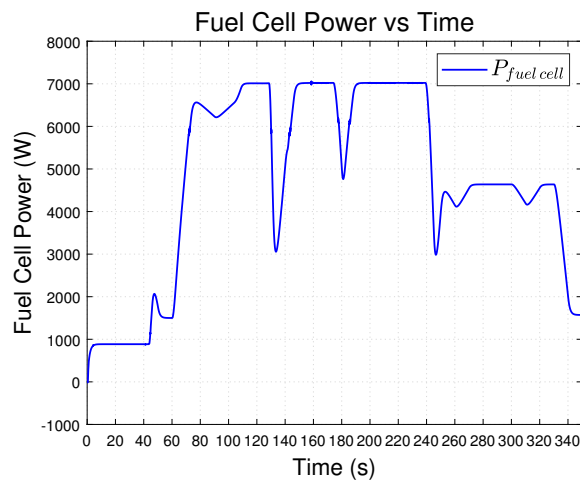
DC μετατροπέα ανύψωσης (μετατροπέας εκφόρτισης) αντίστοιχα, μέσω των οποίων γίνεται η διαχείριση ενέργειας της μπαταρίας.

3.2 Classical PI Control Strategy

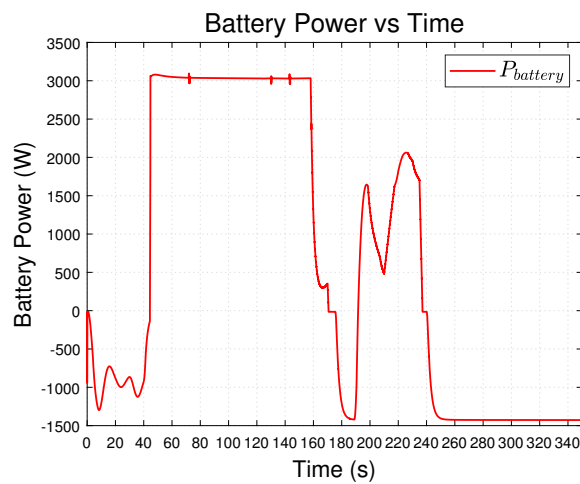
3.2.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Classical PI Control Strategy

Προσομοιώνοντας το υβριδικό μας σύστημα ισχύος έκτακτης ανάγκης χρησιμοποιώντας την στρατηγική διαχείρισης ενέργειας Classical PI Control Strategy λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

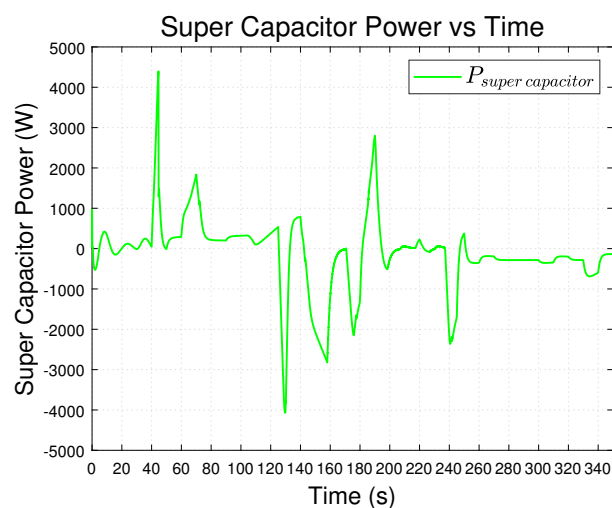
- **Ισχύς πηγών:** Η ισχύς της κυψέλης καυσίμου, της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή φαίνονται στα σχήματα 3.11, 3.12 και 3.13 αντίστοιχα για το προφίλ του φορτίου μας.
- **Συνολική Παραγόμενη Ισχύς:** Στο σχήμα 3.14 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές ισχύος και για τις 3 πηγές, ενώ η συνολική παραγόμενη ισχύς τους δίνεται στο σχήμα 3.15



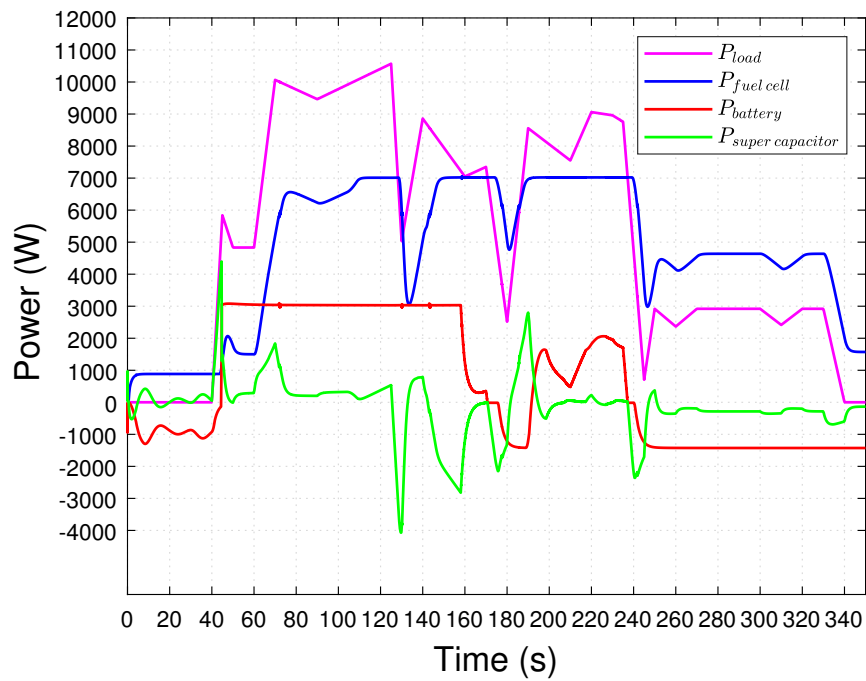
Σχήμα 3.11: Ισχύς κυψέλη καυσίμου κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.



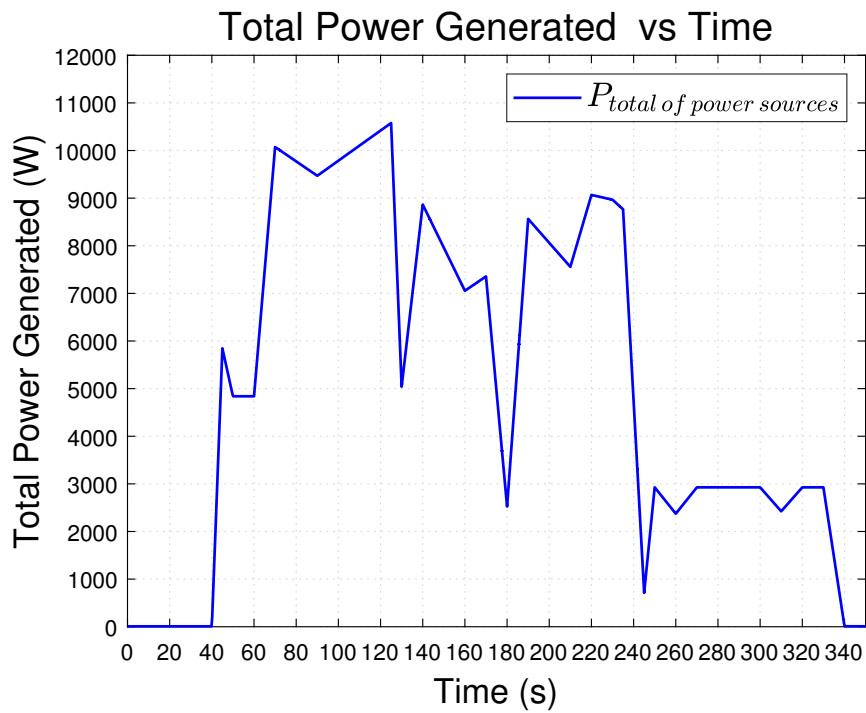
Σχήμα 3.12: Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.



Σχήμα 3.13: Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.

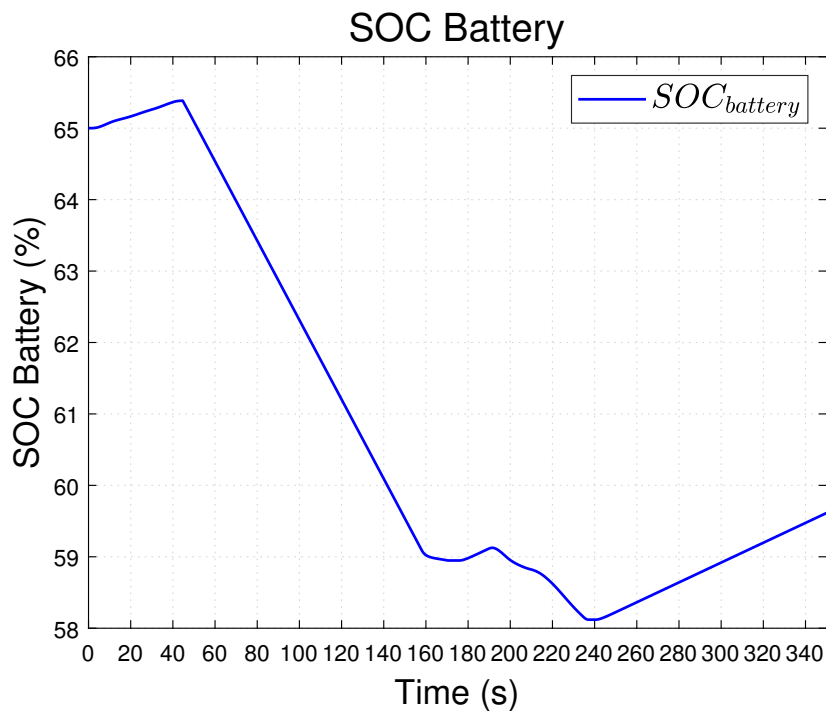


Σχήμα 3.14: Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.



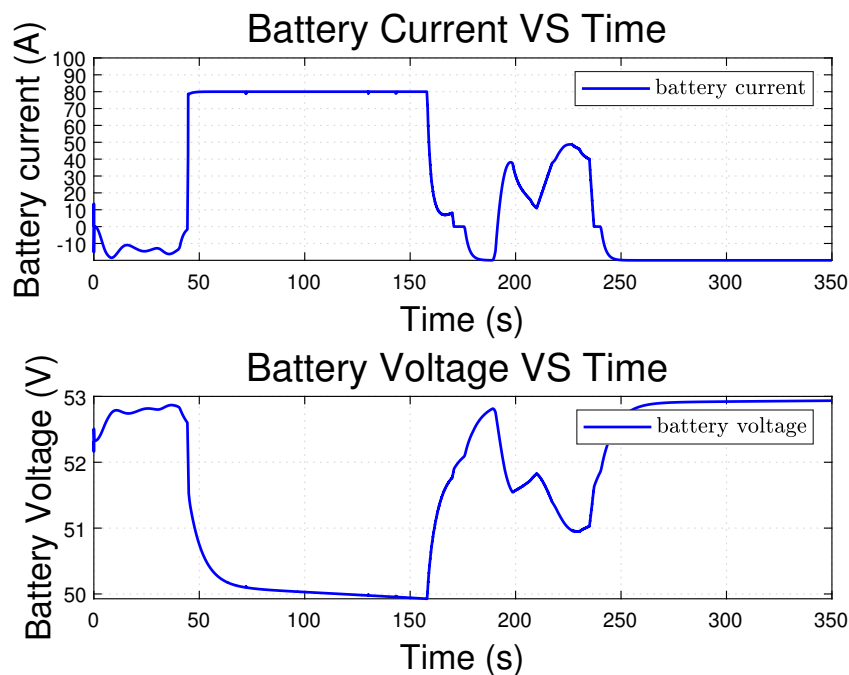
Σχήμα 3.15: Συνολική παραγόμενη ισχύς πηγών κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.

- Επίπεδο φόρτισης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας:



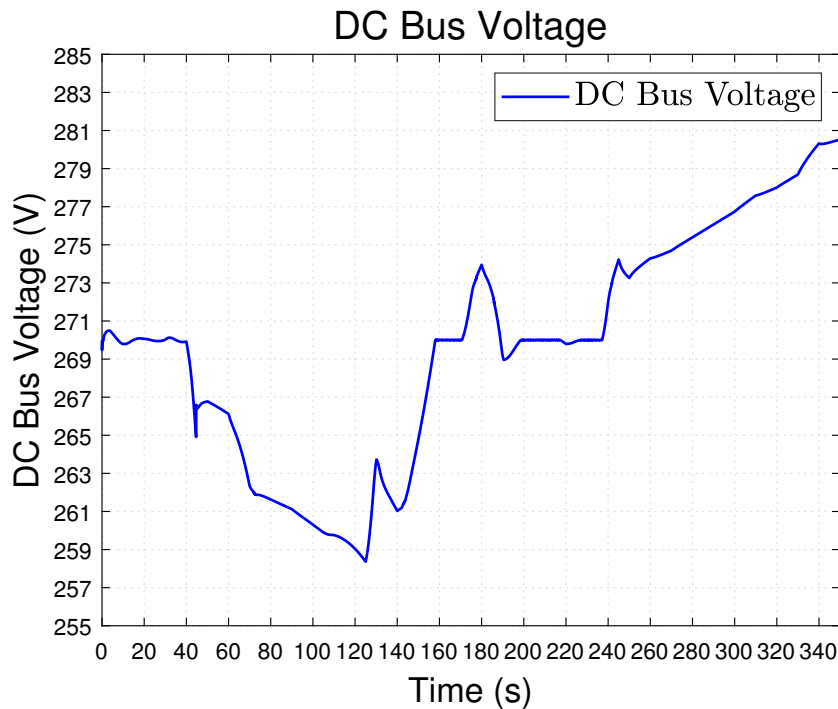
Σχήμα 3.16: Επίπεδο φόρτισης μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.

- Ρεύμα και τάση της μπαταρίας:



Σχήμα 3.17: Τάση και ρεύμα μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.

- Τάση DC διαύλου:



Σχήμα 3.18: Τάση DC διαύλου κατά την εφαρμογή της Classical PI Control Strategy.

3.2.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Classical PI Control Strategy

Εστιάζοντας στο γράφημα του σχήματος 3.14 στο οποίο απεικονίζεται η ισχύς των πηγών του υβριδικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου, παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές ακολουθείται η ίδια ροή γεγονότων και η ίδια απόκριση με αυτήν της προηγούμενης στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας, με διαφορές που εντοπίζονται κυρίως στην διάρκεια του χρόνου ανταπόκρισης των πηγών στον οποίο συμπεριφέρονται είτε παρέχοντας ισχύ στο φορτίο είτε απορροφώντας ενέργεια από το σύστημα. Συγκεκριμένα και σε αυτήν την περίπτωση η κυψέλη καυσίμου αναλαμβάνει την βασική κάλυψη της ζήτησης του φορτίου με την μπαταρία και τον υπερπυκνωτή να βοηθούν στην κάλυψη του φορτίου όποτε αυτό απαιτείται. Ο υπερπυκνωτής και σε αυτήν την περίπτωση λόγω της γρήγορης δυναμικής του ανταποκρίνεται απευθείας όταν η κυψέλη καυσίμου εξαιτίας του αργού χρόνου ανταπόκρισης αδυνατεί να καλύψει πλήρως το φορτίο. Από την άλλη, η μπαταρία όπως φαίνεται παρέχει την έξτρα ενέργεια όταν η μέγιστη ισχύς της κυψέλης καυσίμου δεν επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης του φορτίου.

Θα μπορούσαμε να σχολιάσουμε ένα γεγονός που συμβαίνει στην συγκεκριμένη στρατηγική διαχείρισης ενέργειας και οφείλεται στο γεγονός ότι η τιμή αναφοράς της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας του PI ελεγκτή ισούται με $SOC^* = 60\%$, ενώ η αρχική κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας ισούται με $SOC_{initial} = 65\%$. Το παραπάνω έχει σαν αποτέλεσμα η μπαταρία να εκφορτίζεται γρηγορότερα προκειμένου να φτάσει

την τιμή αναφοράς της. Η προσφορά ισχύος της μπαταρίας συνεχίζεται μέχρι την χρονική στιγμή $t = 235\text{ s}$, όπου από την $t = 235\text{ s}$ και έπειτα παρόλο που η χαμηλή ζήτηση του φορτίου μπορεί να καλυφθεί πλήρως από την κυψέλη καυσίμου, το γεγονός ότι η τιμή SOC της μπαταρίας έχει φτάσει σχεδόν την τιμή αναφοράς του 60%, όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.16, η απόκριση του PI ελεγκτή οδηγεί σε πλεονάζουσα παραγωγή ισχύος της κυψέλης καυσίμου ώστε να υπάρχει αρκετή περίσσεια ενέργειας για την φόρτιση της μπαταρίας με την βέλτιστη φόρτισης ισχύος ($P_{battery\ charge} = 1500\text{ W}$).

3.2.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Classical PI Control Strategy

Από την παραπάνω ανάλυση επιβεβαιώνουμε την ορθότητα του σχεδιασμού του υβριδικού μας συστήματος. Συγκεκριμένα σχετικά με την χρήση της κυψέλης καυσίμου σκοπός αποτελούσε η κάλυψη των βασικών φορτίων ζήτησης δουλεύοντας εντός των ορίων λειτουργίας της. Επίσης η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται ενεργοποιημένη από την αρχή για την ετοιμότητα του υβριδικού μας συστήματος και την φόρτιση της μπαταρίας. Σχετικά με την μπαταρία, η χρήση της στοχεύει στην διατήρησης της τάσης του DC διαύλου στην τάση αναφοράς ενώ παράλληλα να παρέχει ή να απορροφάει ενέργεια όταν υπάρχει αδυναμία κάλυψης του φορτίου από την κυψέλη είτε στην περίπτωση παραγωγή πλεονάζουσας ενέργειας αντίστοιχα. Τέλος επιβεβαιώνεται ο σκοπός χρήσης του υπερπυκνωτή ο οποίος αφορούσε στο πλεονέκτημα της γρήγορης δυναμικής του, δηλαδή να παρέχει κατευθείαν την έξτρα ενέργεια που απαιτείτο όποτε η κυψέλη καυσίμου αργούσε να ανταποκριθεί εξαιτίας της χαμηλής δυναμικότητας της στις σχετικά απότομες μεταβολές του φορτίου ζήτησης ισχύος.

Από την σύγκριση των γραφήματα των σχημάτων 3.14, 3.15 στα οποία απεικονίζονται η ισχύς της κάθε μια από τις τρεις πηγές συγκεντρωτικά και της αθροιστικής παραγωγής ισχύος των πηγών αντίστοιχα, συμπεραίνουμε ότι το φορτίο ζήτησης καλύπτεται συνεχώς από την αθροιστική ισχύ των τριών πηγών χωρίς να υπάρχουν ασυνέχειες είτε απώλειες, γεγονός που σηματοδοτεί ότι ο έλεγχος μας θεωρητικά είναι ορθός.

Σχετικά με την τάση του DC διαύλου σκοπός αποτελούσε η διατήρηση του στην τάση αναφοράς των 270 V μέσω της μπαταρίας η οποία αποτελούσε τον ρυθμιστή τάσης του DC διαύλου. Από την απεικονιζόμενη τάση του DC διαύλου του γραφήματος 3.18 παρατηρούμε ότι επιτυγχάνεται η διατήρησης της τάσης του στην τάση των 270 V με μια μικρή απόκλιση $\pm 4\%$, πράγμα που σηματοδοτεί τον σωστό σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου της τάσης του DC διαύλου. Η αποκλίσεις από την τάση αναφοράς συμβαίνουν τις χρονικές στιγμές τις οποίες ο υπερπυκνωτής προσφέρει ή απορροφά ενέργεια από το σύστημα. Για παράδειγμα παρατηρώντας το σχήμα 3.4 λόγω ότι κατά τη χρονική περίοδο $t = 40 - 125$ ο υπερπυκνωτής αποφορτίζεται συνεχώς προκειμένου να βοηθήσει στην κάλυψη του φορτίου, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τιμή του DC διαύλου στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα να πέφτει κάτω από την τιμή αναφοράς όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.8. Παρόμοια, κατά τη χρονική περίοδο $t = 250 - 350$ ο υπερπυκνωτής απορροφάει συνεχώς την περίσσεια ενέργεια από το σύστημα, δηλαδή

φορτίζεται με αποτέλεσμα η τιμή του DC διαύλου στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα να υπερβεί την τιμή αναφοράς.

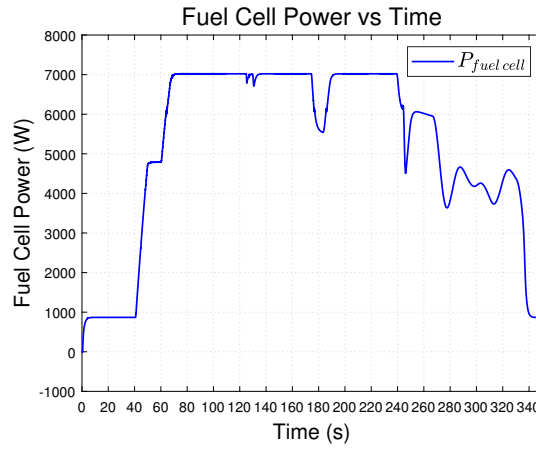
Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας όπως φαίνεται και από το αντίστοιχο γράφημα του σχήματος 3.16 παραμένει εντός των ορίων που θέσαμε γεγονός που υποδεικνύει την σωστή ρύθμιση του PI ελεγκτή. Όπως παρατηρούμε, η μπαταρία φορτίστηκε από την κυψέλη καυσίμου ως έναν βαθμό τα πρώτα 40 s. Από εκεί και έπειτα έως την χρονική στιγμή $t = 235$ s λόγω της προσφοράς της στην κάλυψη του φορτίου και στην διατήρηση της τάσης του DC διαύλου στην τάση αναφοράς, η μπαταρία κατά κύριο λόγο αποφορτίζεται συνεχώς. Την χρονική στιγμή $t = 235$ s η μείωση του φορτίου δίνει την δυνατότητα κάλυψης του απαιτούμενου φορτίου από την κυψέλη καυσίμου και την φόρτισης της μπαταρίας με την πλεονάζουσα ενέργεια. Τέλος από το γράφημα του σχήματος 3.17 στο οποίο παρουσιάζεται το ρεύμα και η τάση της μπαταρίας παρατηρούμε ότι τηρούνται οι τεχνικοί περιορισμοί της μπαταρίας που θέσαμε σχετικά με το ρεύμα φόρτισης (αρνητικό ρεύμα) και το ρεύμα εκφόρτισης (θετικό ρεύμα). Συγκεκριμένα όπως φαίνεται το ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας δεν ξεπερνάει τον τεχνικό περιορισμό που θέσαμε των 20 A, όμοια και το ρεύμα εκφόρτισης της μπαταρίας τον τεχνικό περιορισμό των 80 A. Το παραπάνω οφείλεται στον αποτελεσματικό σχεδιασμό, για την εξαγωγή των σημάτων αναφοράς ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης, του DC μετατροπέα υποβιβασμού (μετατροπέας φόρτισης) και του DC μετατροπέα ανύψωσης (μετατροπέας εκφόρτισης) αντίστοιχα μέσω των οποίων γίνεται η διαχείριση ενέργειας της μπαταρίας.

3.3 Rule-Based Fuzzy Logic Strategy

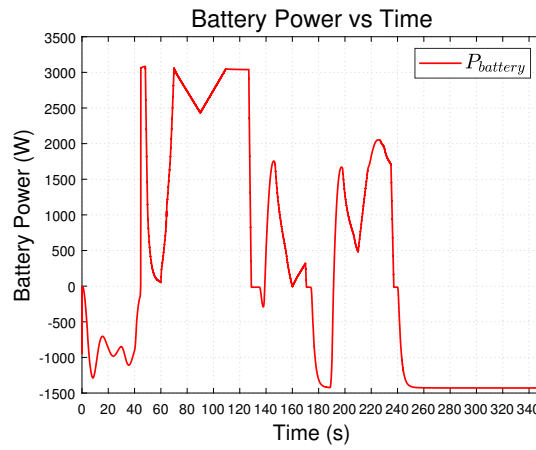
3.3.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Rule-Based Fuzzy Logic Strategy

Προσομοιώνοντας το υβριδικό σύστημα χρησιμοποιώντας την στρατηγική διαχείρισης ενέργειας Rule-Based Fuzzy Logic Strategy λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

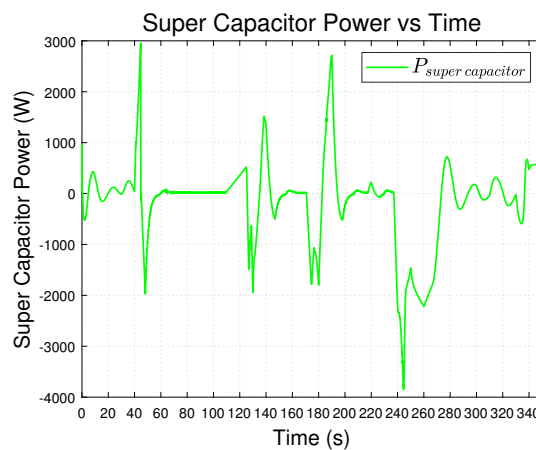
- **Ισχύς πηγών:** Η ισχύς της κυψέλης καυσίμου, της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή φαίνονται στα σχήματα 3.19, 3.20 και 3.21 αντίστοιχα για το προφίλ του φορτίου μας.



Σχήμα 3.19: Ισχύς κυψέλη καυσίμου κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.

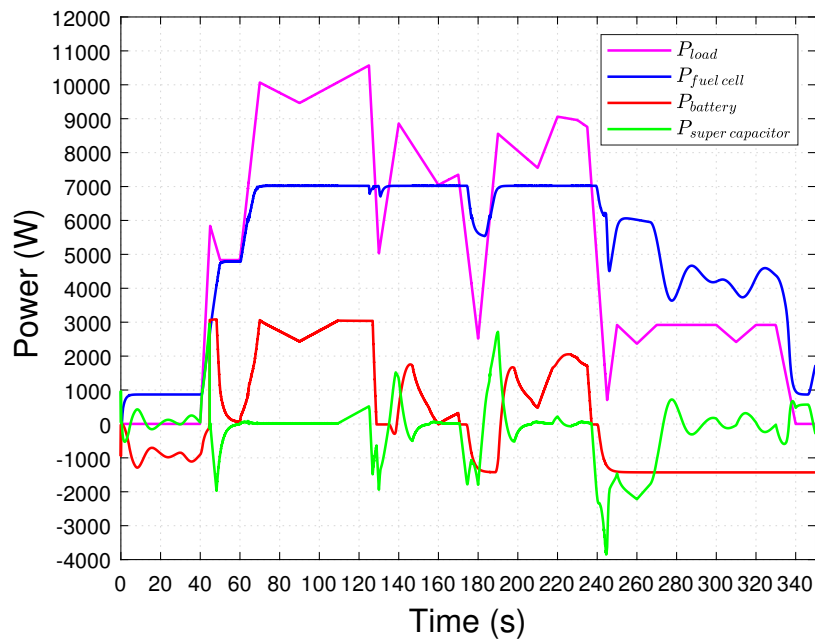


Σχήμα 3.20: Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.

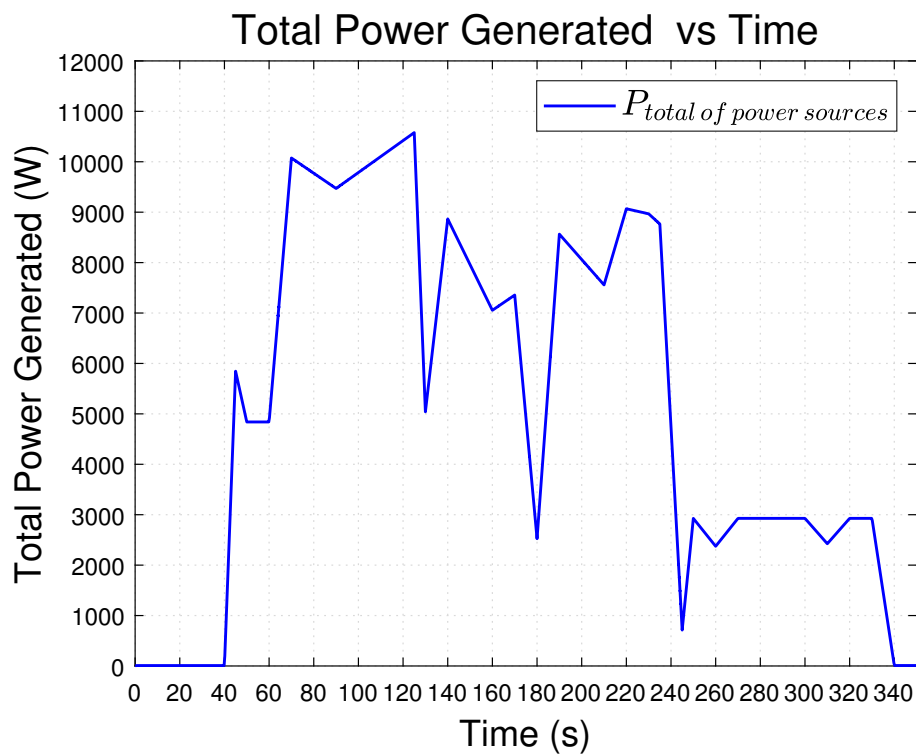


Σχήμα 3.21: Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.

- **Συνολική Παραγόμενη Ισχύς:** Στο σχήμα 3.22 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές ισχύος και για τις 3 πηγές, ενώ η συνολική παραγόμενη ισχύς τους δίνεται στο σχήμα 3.23

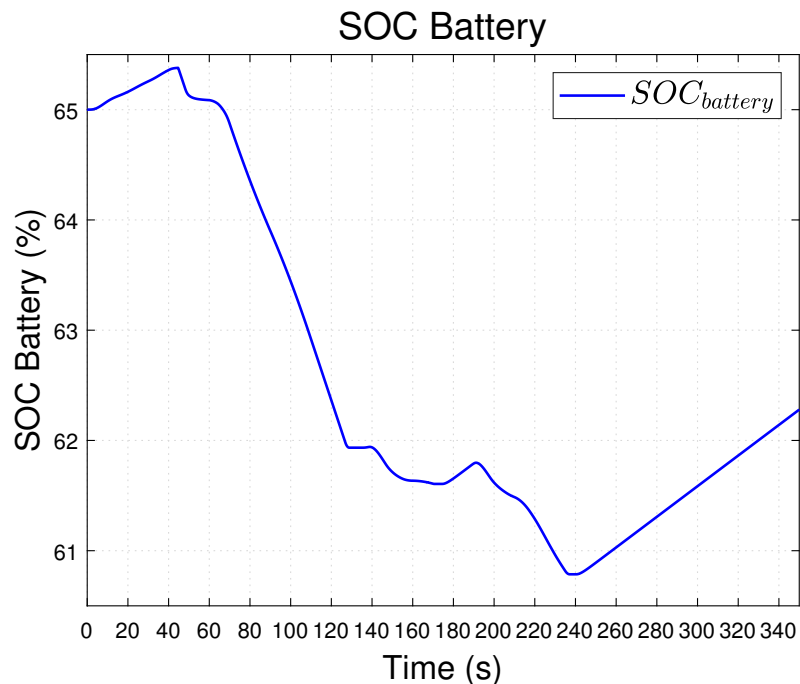


Σχήμα 3.22: Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.



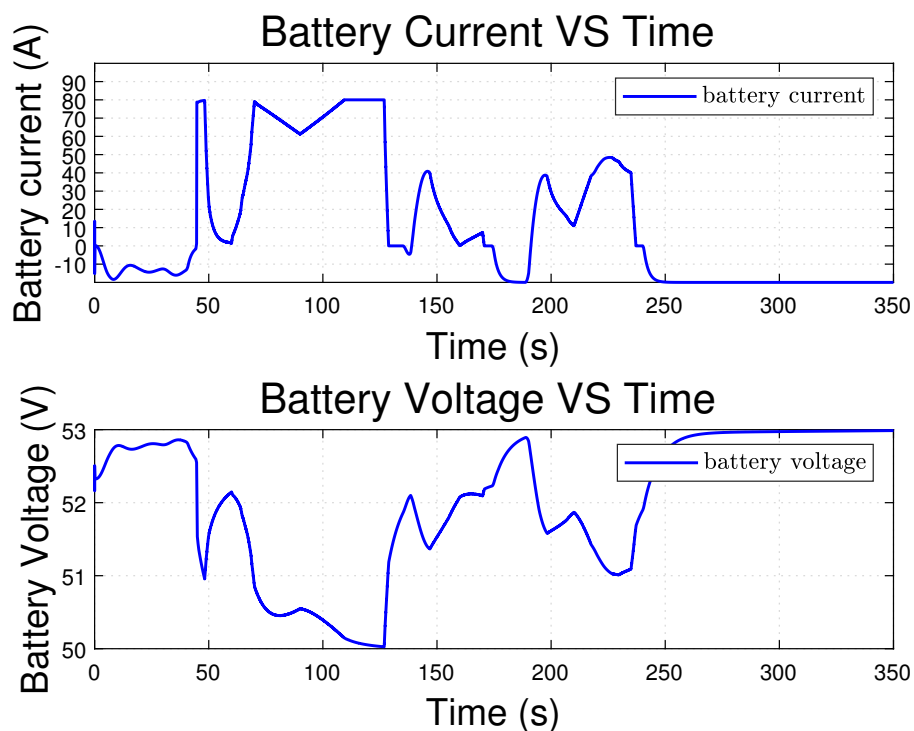
Σχήμα 3.23: Συνολική παραγόμενη ισχύς πηγών κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.

- Επίπεδο φόρτισης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας:



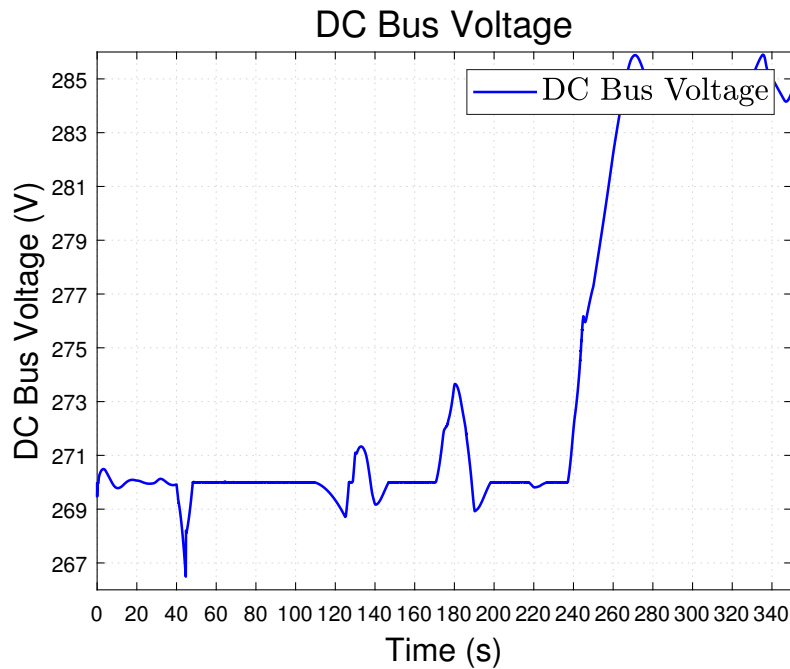
Σχήμα 3.24: Επίπεδο φόρτισης μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.

- Ρεύμα και τάση μπαταρίας:



Σχήμα 3.25: Τάση και ρεύμα μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.

- Τάση DC διαύλου:



Σχήμα 3.26: Τάση DC διαύλου κατά την εφαρμογή της Rule-Based Fuzzy Logic Strategy.

3.3.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Rule-Based Fuzzy Logic Strategy

Εστιάζοντας στο γράφημα του σχήματος 3.22 στο οποίο απεικονίζεται η ισχύς των πηγών του υβριδικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου, παρατηρούμε και σε αυτήν την περίπτωση όπως είναι λογικό ότι το απαιτούμενο φορτίο καλύπτεται από έναν συνδυασμό και των τριών πηγών με πρωτεύοντα ρόλο στην κάλυψη του φορτίου αυτόν της κυψέλης καυσίμου. Σε γενικές γραμμές ακολουθείται η ίδια ροή των γεγονότων και η ίδια απόκριση με αυτήν των προηγούμενων στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας. Γενικά αλλά και σε σύγκριση με τις προηγούμενες στρατηγικές, μπορούμε να διατυπώσουμε ορισμένες παρατηρήσεις που απορρέουν από τις αποκρίσεις ισχύος των πηγών και οφείλονται στην εφαρμοζόμενη στρατηγική διαχείρισης ενέργειας. Εξαιτίας των κανόνων της ασαφούς λογικής που θέσαμε και γενικότερα της φύσης της συγκεκριμένης λογικής, παρατηρείται ότι η καμπύλη ισχύος εξόδου της κυψέλης καυσίμου είναι πιο ομαλή (smooth) και δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις διακυμάνσεις του φορτίου ζήτησης συγκριτικά με τις προηγούμενες στρατηγικές. Πιο συγκεκριμένα τις χρονικές στιγμές $t = 125\text{ s}$, $t = 130\text{ s}$, $t = 170\text{ s}$, $t = 180\text{ s}$, $t = 250\text{ s}$ στις οποίες υπάρχουν σημαντικές μεταβολές στο φορτίο, συγκριτικά με τις προηγούμενες στρατηγικές παρατηρούμε ότι η απόκριση ισχύος της κυψέλης καυσίμου δεν είναι ανάλογη σε μεγάλο βαθμό με την μεταβολή του φορτίου ζήτησης.

Γενικά και σε αυτήν την περίπτωση η κυψέλη καυσίμου αναλαμβάνει την βασική κάλυψη της ζήτησης του φορτίου με την μπαταρία και τον υπερπυκνωτή να βοηθούν

στην κάλυψη του φορτίου όποτε αυτό απαιτείται. Ο υπερπυκνωτής και σε αυτήν την περίπτωση λόγω της γρήγορης δυναμικής του ανταποκρίνεται απευθείας όταν η κυψέλη καυσίμου εξαιτίας του αργού χρόνου ανταπόκρισης αδυνατεί να καλύψει πλήρως το φορτίο. Από την άλλη η μπαταρία όπως φαίνεται παρέχει την έξτρα ενέργεια στην περίπτωση όπου η μέγιστη ισχύς της κυψέλης καυσίμου δεν επαρκεί για την κάλυψη ζήτησης του φορτίου. Τέλος όταν η μπαταρία πλησιάζει την ελάχιστη κατάσταση φόρτισης, όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.24 η κυψέλη καυσίμου συμπεριφέρεται όπως και στις προηγούμενες στρατηγικές, ξεκινάει δηλαδή την φόρτιση της μπαταρίας.

3.3.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Rule-Based Fuzzy Logic Strategy

Από την παραπάνω ανάλυση επιβεβαιώνουμε την ορθότητα του σχεδιασμού του υβριδικού μας συστήματος. Συγκεκριμένα σχετικά με την χρήση της κυψέλης καυσίμου σκοπός αποτελούσε η κάλυψη των βασικών φορτίων ζήτησης δουλεύοντας εντός των ορίων λειτουργίας της. Επίσης η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται ενεργοποιημένη από την αρχή για την ετοιμότητα του υβριδικού μας συστήματος και την φόρτιση της μπαταρίας. Σχετικά με την μπαταρία η χρήση της στοχεύει στον έλεγχο της διατήρησης της τάσης του DC διαύλου στην τάση αναφοράς, ενώ παράλληλα να παρέχει ή να απορροφάει ενέργεια όταν υπάρχει αδυναμία κάλυψης του φορτίου από την κυψέλη είτε στην περίπτωση παραγωγή πλεονάζουσας ενέργειας αντίστοιχα. Τέλος επιβεβαιώνεται ο σκοπός χρησιμοποίησης του υπερπυκνωτή ο οποίος αφορούσε στο πλεονέκτημα της γρήγορης δυναμικής του, δηλαδή να παρέχει κατευθείαν την έξτρα ενέργεια που απαιτείτο όποτε η κυψέλη καυσίμου αργούσε να ανταποκριθεί εξαιτίας της χαμηλής δυναμικότητας της στις σχετικά απότομες μεταβολές του φορτίου ζήτησης.

Από την σύγκριση των γραφήματα των σχημάτων 3.22, 3.23 στα οποία απεικονίζονται η ισχύς της κάθε μια από τις τρεις πηγές συγκεντρωτικά και της αθροιστικής παραγωγής ισχύος των πηγών αντίστοιχα, συμπεραίνουμε ότι το φορτίο ζήτησης καλύπτεται συνεχώς από την αθροιστική ισχύ των τριών πηγών χωρίς να υπάρχουν ασυνέχειες είτε απώλειες, γεγονός που σηματοδοτεί ότι ο έλεγχος μας θεωρητικά είναι ορθός.

Σχετικά με την τάση του DC διαύλου σκοπός αποτελούσε η διατήρηση του στην τάση αναφοράς των 270 V μέσω της μπαταρίας η οποία αποτελούσε τον ρυθμιστή τάσης του DC διαύλου. Από την απεικονιζόμενη τάση του DC διαύλου του γραφήματος 3.26 παρατηρούμε ότι επιτυγχάνεται η διατήρησης της τάσης του DC διαύλου στην τάση των 270 V, με μια μικρή απόκλιση +5,5% έως -1%. Η αποκλίσεις από την τάση αναφοράς συμβαίνουν τις χρονικές στιγμές τις οποίες ο υπερπυκνωτής προσφέρει ή απορροφά ενέργεια από το σύστημα. Για παράδειγμα παρατηρώντας το σχήμα 3.22 λόγω ότι κατά τη χρονική περίοδο $t = 240 - 280 \text{ s}$ ο υπερπυκνωτής απορροφάει συνεχώς την περίσσεια ενέργεια από το σύστημα δηλαδή φορτίζεται, έχει σαν αποτέλεσμα η τιμή του DC διαύλου στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα να ανεβαίνει πάνω από την τιμή αναφοράς όπως μπορεί να φανεί και από το σχήμα 3.8. Από την $t = 280$ και έπειτα η τάση του DC διαύλου δεν επανέρχεται στην τάση αναφορά καθώς ο υπερπυκνωτής δεν εκλύει την απαραίτητη ποσότητα ενέργειας που θα χρειαζόταν ώστε η τιμή του να

μειωθεί στην τάση αναφοράς δεδομένου ότι η μπαταρία φορτίζεται ήδη με την ανώτερη επιτρεπτή ποσότητα ισχύος από την κυψέλη καυσίμου.

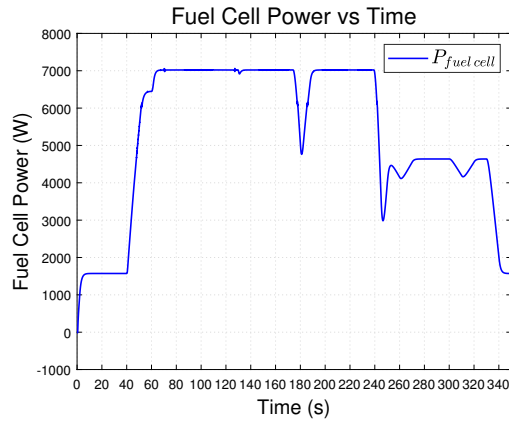
Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας όπως φαίνεται και από το αντίστοιχο γράφημα του σχήματος 3.24 παραμένει εντός των ορίων που θέσαμε, γεγονός που υποδεικνύει την σωστή ρύθμιση του Fuzzy Logicελεγκτή. Όπως παρατηρούμε η μπαταρία φορτίστηκε από την κυψέλη καυσίμου ως έναν βαθμό τα πρώτα 40 s. Από εκεί και έπειτα έως την χρονική στιγμή $t = 240$ s λόγω της προσφοράς της στην κάλυψη του φορτίου και στην διατήρηση της τάσης του DC διαύλου στην τάση αναφοράς, η μπαταρία κατά κύριο λόγο αποφορτίζεται συνεχώς. Την χρονική στιγμή $t = 235$ s η μείωση του φορτίου δίνει την δυνατότητα κάλυψης του απαιτούμενου φορτίου από την κυψέλη καυσίμου και την φόρτιση της μπαταρίας με την πλεονάζουσα ενέργεια. Τέλος από το γράφημα του σχήματος 3.25 στο οποίο παρουσιάζεται το ρεύμα και η τάση της μπαταρίας, παρατηρούμε ότι τηρούμε τους τεχνικούς περιορισμούς της μπαταρίας που θέσαμε σχετικά με το ρεύμα φόρτισης (αρνητικό ρεύμα) και το ρεύμα εκφόρτισης (θετικό ρεύμα) της μπαταρίας. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται, το ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας δεν ξεπερνάει τον τεχνικό περιορισμό που θέσαμε των 20 A, όμοια και το ρεύμα εκφόρτισης της μπαταρίας τον τεχνικό περιορισμό των 80 A. Το παραπάνω οφείλεται στον αποτελεσματικό σχεδιασμό για την εξαγωγή των σημάτων αναφοράς ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης του DC μετατροπέα υποβιβασμού (μετατροπέας φόρτισης) και του DC μετατροπέα ανύψωσης (μετατροπέας εκφόρτισης) αντίστοιχα, μέσω των οποίων γίνεται η διαχείριση της ενέργειας της μπαταρίας.

3.4 Equivalent Consumption Minimization Strategy

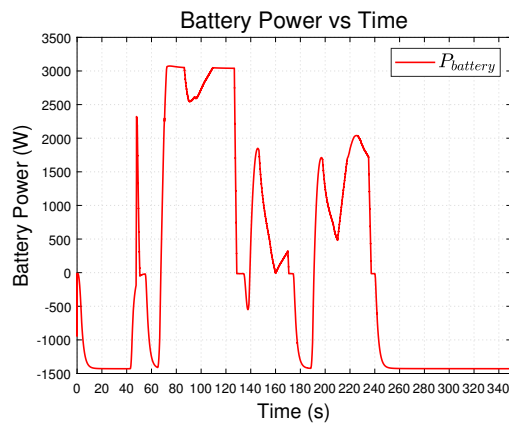
3.4.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Equivalent Consumption Minimization Strategy

Προσομοιώνοντας το υβριδικό μας σύστημα ισχύος έχτακτης ανάγκης χρησιμοποιώντας την στρατηγική διαχείρισης ενέργειας Equivalent Consumption Minimization Strategy λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

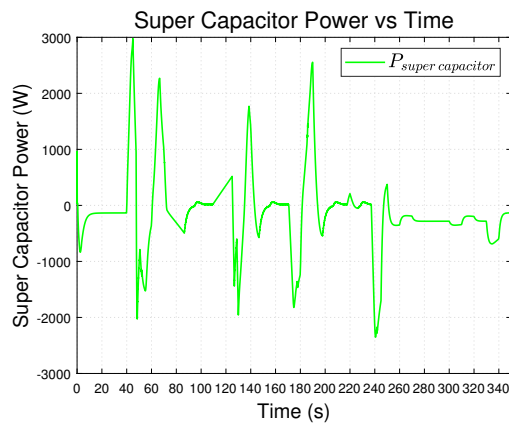
- **Ισχύς πηγών:** Η ισχύς της κυψέλης καυσίμου, της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή φαίνονται στα σχήματα 3.19, 3.20 και 3.21 αντίστοιχα για το προφίλ του φορτίου μας.



Σχήμα 3.27: Ισχύς κυψέλη καυσίμου κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.

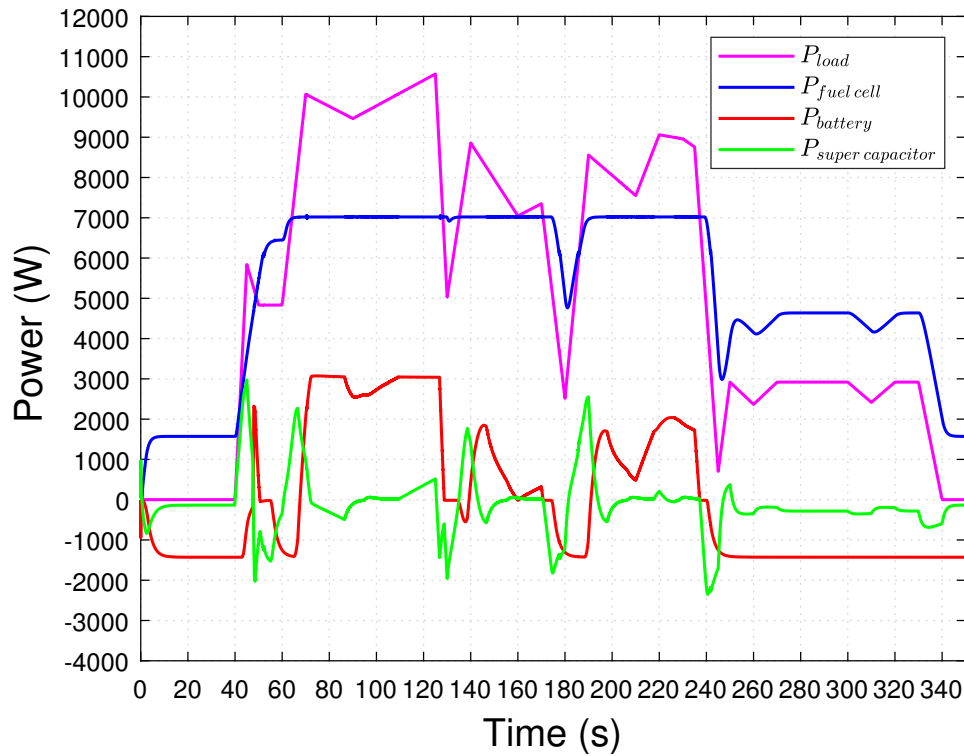


Σχήμα 3.28: Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.

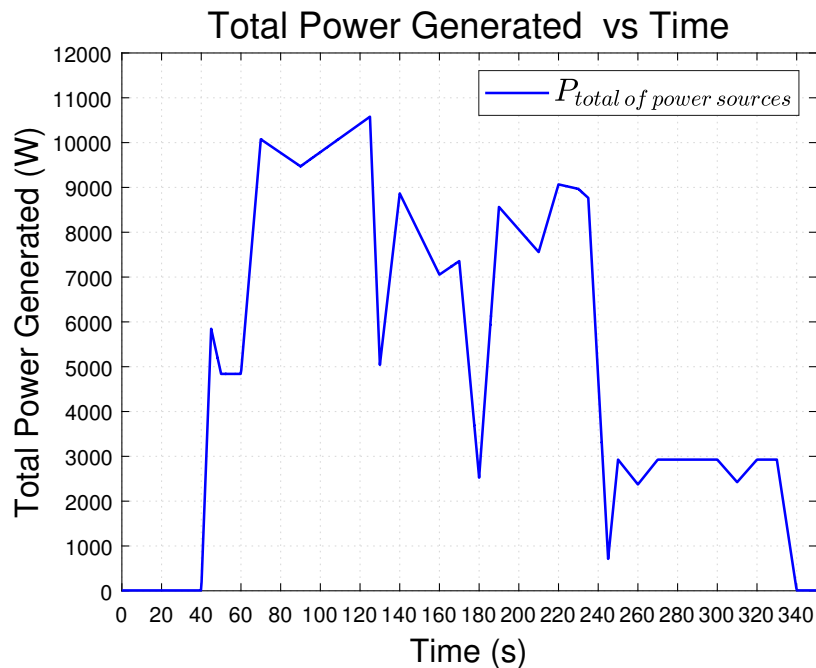


Σχήμα 3.29: Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.

- **Συνολική Παραγόμενη Ισχύς:** Στο σχήμα 3.22 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές ισχύος και για τις 3 πηγές, ενώ η συνολική παραγόμενη ισχύς τους δίνεται στο σχήμα 3.23

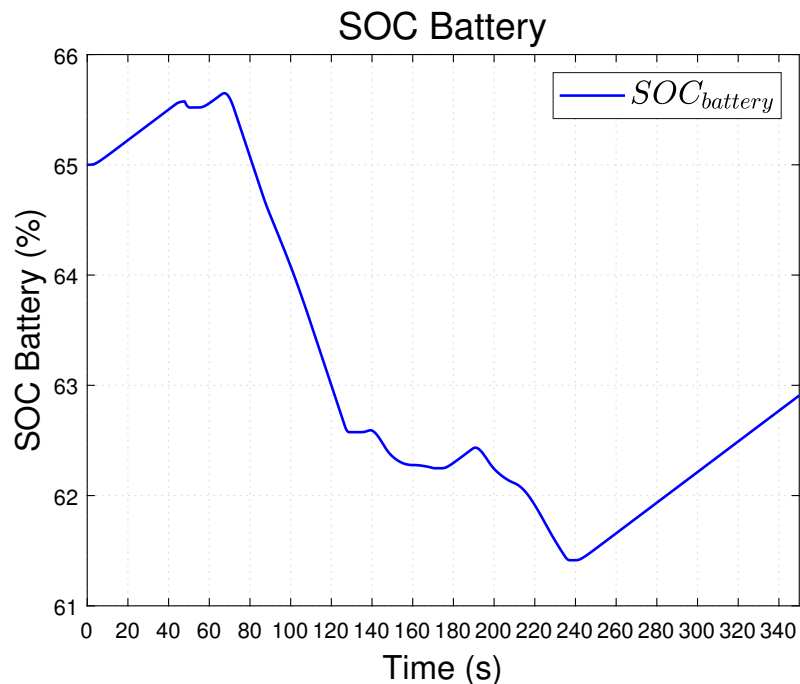


Σχήμα 3.30: Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.



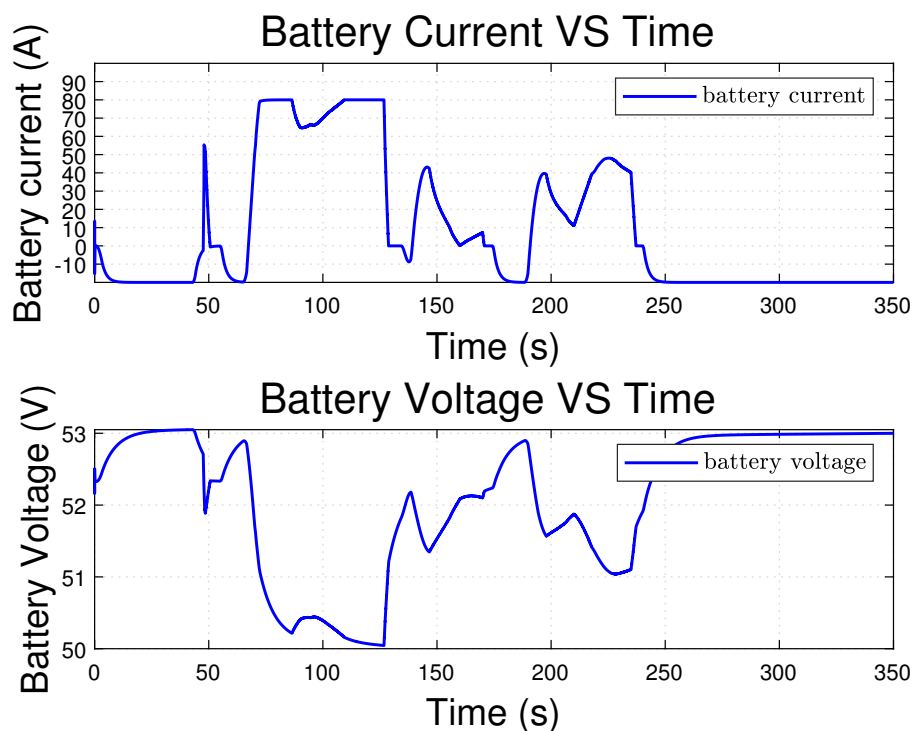
Σχήμα 3.31: Συνολική παραγόμενη ισχύς πηγών κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.

- Επίπεδο φόρτισης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας:



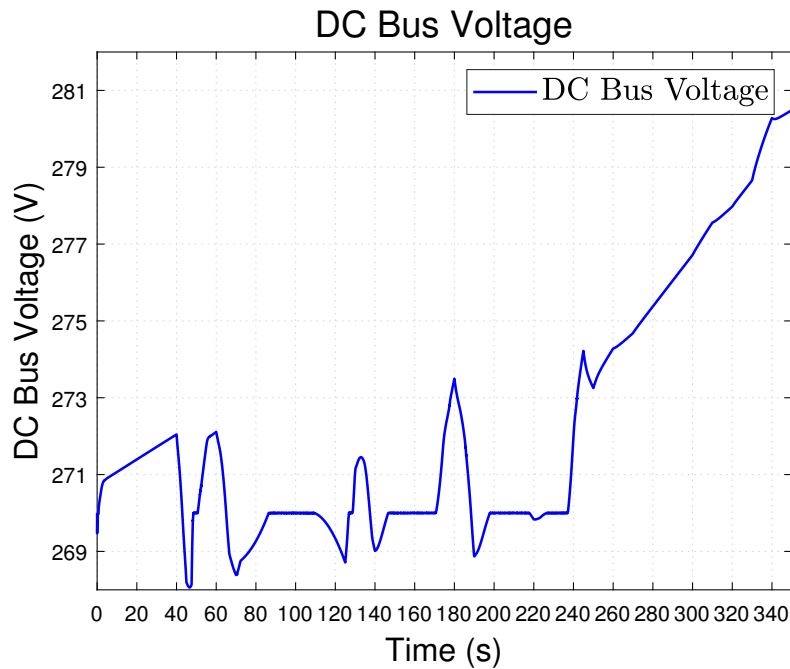
Σχήμα 3.32: Επίπεδο φόρτισης μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.

- Ρεύμα και τάση μπαταρίας:



Σχήμα 3.33: Τάση και ρεύμα μπαταρίας κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.

- Τάση DC διαύλου:



Σχήμα 3.34: Τάση DC διαύλου κατά την εφαρμογή της Equivalent Consumption Minimization Strategy.

3.4.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων Equivalent Consumption Minimization Strategy

Εστιάζοντας στο γράφημα του σχήματος 3.30 στο οποίο απεικονίζεται η ισχύς των πηγών του υβριδικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου, παρατηρούμε και σε αυτήν την περίπτωση όπως είναι λογικό, το απαιτούμενο φορτίο να καλύπτεται από έναν συνδυασμό και των τριών πηγών με πρωτεύοντα ρόλο στην κάλυψη του φορτίου αυτόν της κυψέλης καυσίμου. Σε γενικές γραμμές ακολουθείται η ίδια ροή των γεγονότων. Συγκριτικά με τις προηγούμενες στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας την χρονική στιγμή $t = 40\text{ s}$ κατά την οποία ξεκινάει το φορτίο ζήτησης, η κυψέλη καυσίμου φτάνει σύντομα στην μέγιστη ισχύ εξόδου της, πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει στις προηγούμενες περιπτώσεις.

Γενικά και σε αυτήν την περίπτωση η κυψέλη καυσίμου αναλαμβάνει την βασική κάλυψη της ζήτησης του φορτίου με την μπαταρία και τον υπερπυκνωτή να έχουν ρόλο επικουρικό στην κάλυψη του φορτίου. Ο υπερπυκνωτής και σε αυτήν την περίπτωση λόγω της γρήγορης δυναμικής του ανταποκρίνεται απευθείας όταν η κυψέλη καυσίμου εξαιτίας του αργού χρόνου ανταπόκρισης αδυνατεί να καλύψει πλήρως το φορτίο. Από την άλλη, η μπαταρία όπως φαίνεται παρέχει την έξτρα ενέργεια στην περίπτωση όπου η μέγιστη ισχύς της κυψέλης καυσίμου δεν επαρκεί για την κάλυψη ζήτησης του φορτίου. Τέλος όταν η μπαταρία πλησιάζει την ελάχιστη κατάσταση φόρτισης, όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.32 η κυψέλη καυσίμου συμπεριφέρεται όπως και στις προηγούμενες στρατηγικές, ξεκινάει δηλαδή την φόρτιση της μπαταρίας.

3.4.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Equivalent Consumption Minimization Strategy

Από την παραπάνω ανάλυση επιβεβαιώνουμε την ορθότητα του σχεδιασμού του υβριδικού μας συστήματος. Συγκεκριμένα σχετικά με την χρήση της κυψέλης καυσίμου σκοπός αποτελούσε η κάλυψη των βασικών φορτίων ζήτησης δουλεύοντας εντός των ορίων λειτουργίας της. Επίσης η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται ενεργοποιημένη από την αρχή για την ετοιμότητα του υβριδικού μας συστήματος και την φόρτιση της μπαταρίας. Σχετικά με την μπαταρία η χρήση της στοχεύει στον έλεγχο της διατήρησης της τάσης του DC διαύλου στην τάση αναφοράς, ενώ παράλληλα να παρέχει ή να απορροφάει ενέργεια όταν υπάρχει αδυναμία κάλυψης του φορτίου από την κυψέλη είτε στην περίπτωση παραγωγή πλεονάζουσας ενέργειας αντίστοιχα. Τέλος επιβεβαιώνεται ο σκοπός χρήσης του υπερπυκνωτή ο οποίος αφορούσε στο πλεονέκτημα της γρήγορης δυναμικής του, δηλαδή να παρέχει κατευθείαν την έξτρα ενέργεια που απαιτείτο όποτε η κυψέλη καυσίμου αργούσε να ανταποκριθεί εξαιτίας της χαμηλής δυναμικότητας της στις σχετικά απότομες μεταβολές του φορτίου ζήτησης.

Από την σύγκριση των γραφήματα των σχημάτων 3.30, 3.31 στα οποία απεικονίζεται η ισχύς για κάθε μια από τις τρεις πηγές συγκεντρωτικά και της αθροιστικής παραγωγής ισχύος των πηγών αντίστοιχα, συμπεραίνουμε ότι το φορτίο ζήτησης καλύπτεται συνεχώς από την αθροιστική ισχύ των τριών πηγών χωρίς να υπάρχουν ασυνέχειες είτε απώλειες, γεγονός που σηματοδοτεί ότι ο έλεγχος μας θεωρητικά είναι ορθός.

Σχετικά με την τάση του DC διαύλου σκοπός αποτελούσε η διατήρηση του στην τάση αναφοράς των 270 V μέσω της μπαταρίας η οποία αποτελούσε τον ρυθμιστή τάσης του DC διαύλου. Από την απεικονιζόμενη τάση του DC διαύλου του γραφήματος 3.34, παρατηρούμε ότι επιτυγχάνεται η διατήρηση της τάσης του στην τάση των 270 V με μια μικρή απόκλιση +4,5% έως -0.5%. Η αποκλίσεις από την τάση αναφοράς συμβαίνουν τις χρονικές στιγμές τις οποίες ο υπερπυκνωτής προσφέρει ή απορροφά ενέργεια από το σύστημα. Για παράδειγμα παρατηρώντας το σχήμα 3.30 κατά τη χρονική περίοδο $t = 240 - 350$ s, ο υπερπυκνωτής απορροφάει συνεχώς την περίσσεια ενέργεια από το σύστημα δηλαδή φορτίζεται με αποτέλεσμα η τιμή του DC διαύλου στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα να υπερβαίνει την τιμή αναφοράς, όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.34.

Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας όπως φαίνεται και από το αντίστοιχο γράφημα του σχήματος 3.32 παραμένει εντός των ορίων που θέσαμε. Όπως παρατηρούμε η μπαταρία φορτίστηκε από την κυψέλη καυσίμου ως έναν βαθμό τα πρώτα 40 s. Από εκεί και έπειτα έως την χρονική στιγμή $t = 240$ s λόγω της προσφοράς της στην κάλυψη του φορτίου και στην διατήρηση της τάσης του DC διαύλου στην τάση αναφοράς, η μπαταρία κατά κύριο λόγο αποφορτίζεται συνεχώς. Την χρονική στιγμή $t = 235$ s η μείωση του φορτίου δίνει την δυνατότητα κάλυψης του απαιτούμενου φορτίου από την κυψέλη καυσίμου και την φόρτιση της μπαταρίας με την πλεονάζουσα ενέργεια. Τέλος από το γράφημα του σχήματος 3.33 στο οποίο παρουσιάζεται το ρεύμα και η τάση της μπαταρίας, παρατηρούμε ότι τηρούμε τους τεχνικούς περιορισμούς της μπαταρίας που θέσαμε σχετικά με το ρεύμα φόρτισης (αρνητικό ρεύμα) και το ρεύμα εκφόρτισης (θετικό ρεύμα) της. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται το ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας δεν

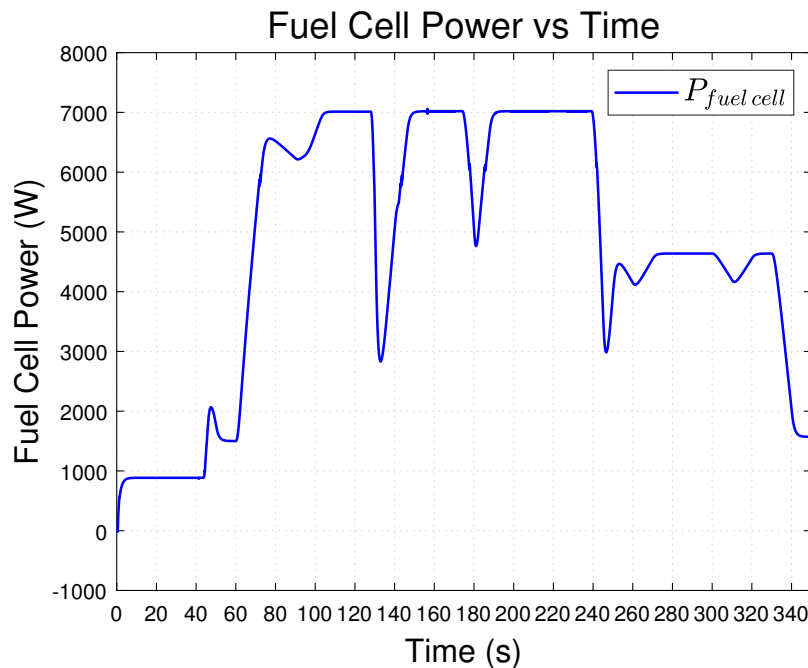
ξεπερνάει τον τεχνικό περιορισμό που θέσαμε των 20 A , όμοια και το ρεύμα εκφόρτισης της μπαταρίας τον τεχνικό περιορισμό των 80 A . Το παραπάνω οφείλεται στον αποτελεσματικό σχεδιασμό για την εξαγωγή των σημάτων αναφοράς ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης του DC μετατροπέα υποβιβασμού (μετατροπέας φόρτισης) και του DC μετατροπέα ανύψωσης (μετατροπέας εκφόρτισης) αντίστοιχα, μέσω των οποίων γίνεται η διαχείριση της ενέργειας της μπαταρίας.

3.5 External Energy Maximization Strategy

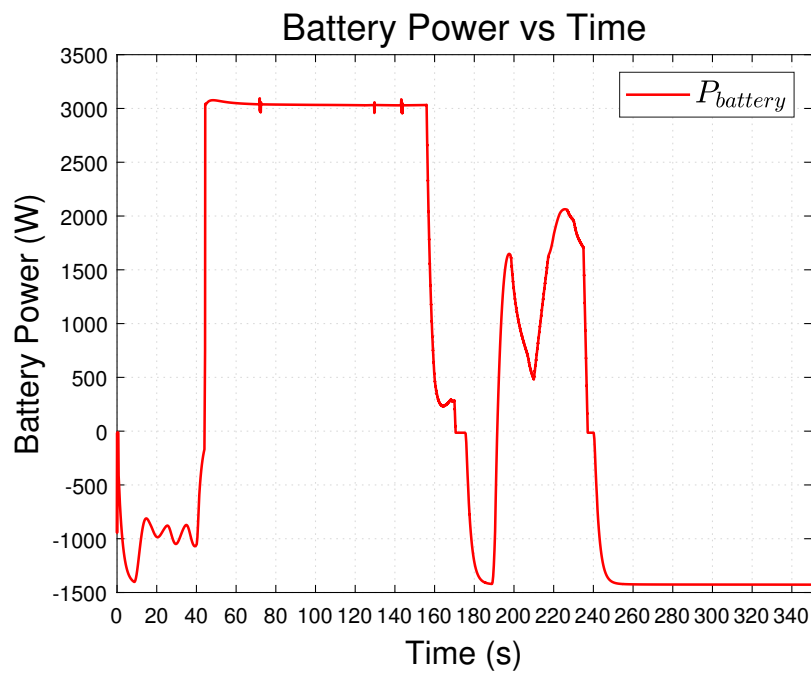
3.5.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων External Energy Maximization Strategy

Προσομοιώνοντας το υβριδικό μας σύστημα ισχύος έκτακτης ανάγκης χρησιμοποιώντας την στρατηγική διαχείρισης ενέργειας External Energy Maximization Strategy, λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

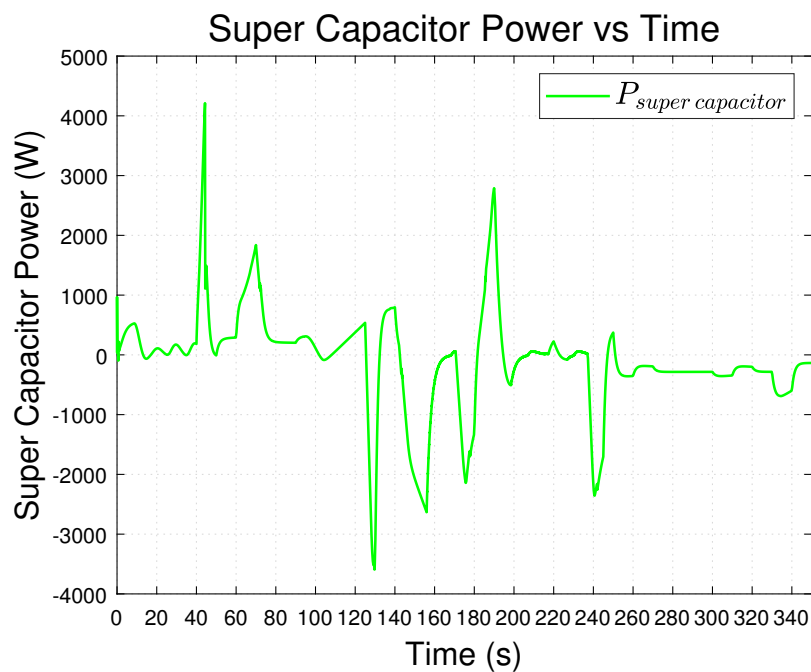
- **Ισχύς πηγών:** Η ισχύς της κυψέλης καυσίμου, της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή φαίνονται στα σχήματα 3.19, 3.20 και 3.21 αντίστοιχα, για το προφίλ του φορτίου μας.



Σχήμα 3.35: Ισχύς κυψέλης καυσίμου κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.

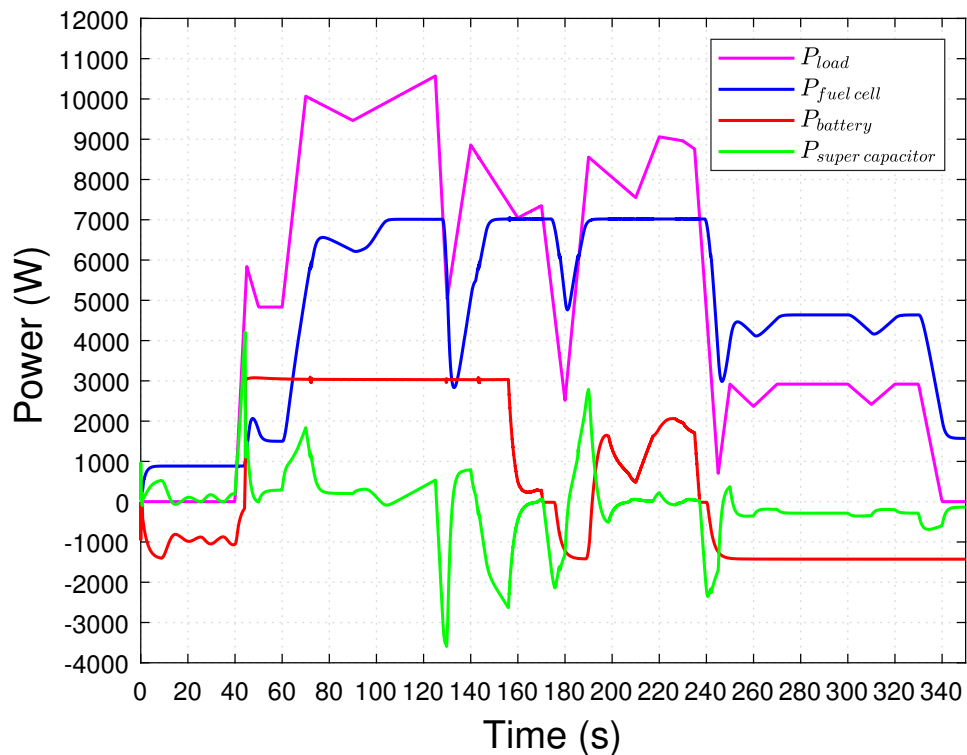


Σχήμα 3.36: Ισχύς μπαταρίας κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.

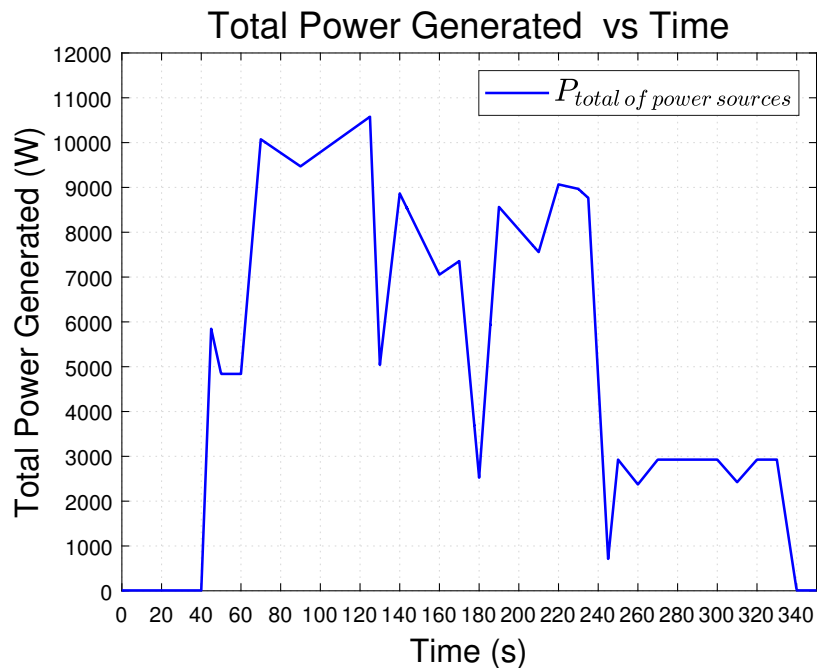


Σχήμα 3.37: Ισχύς υπερπυκνωτή κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.

- **Συνολική Παραγόμενη Ισχύς:** Στο σχήμα 3.22 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές ισχύος και για τις 3 πηγές, ενώ η συνολική παραγόμενη ισχύς τους δίνεται στο σχήμα 3.23

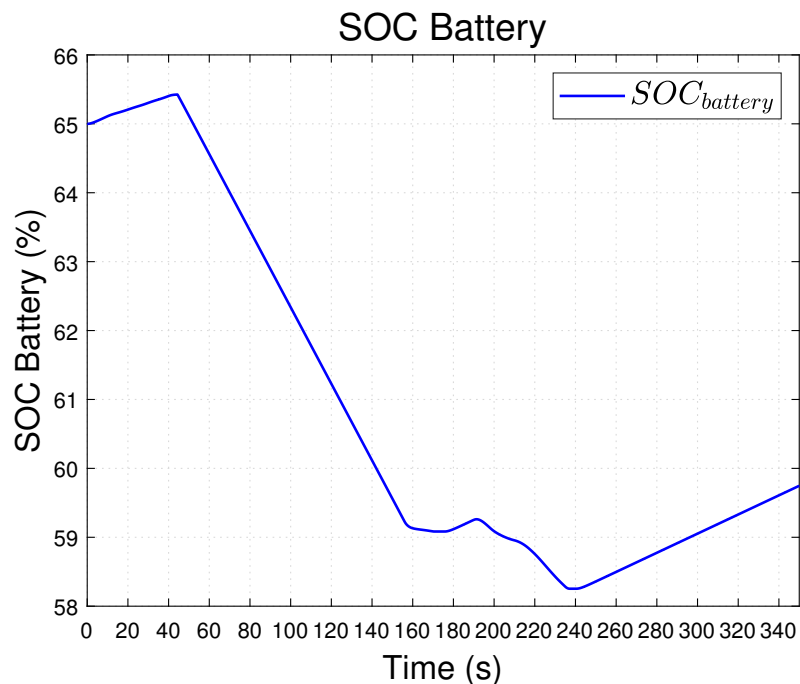


Σχήμα 3.38: Ισχύς πηγών συγκεντρωτικά κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.



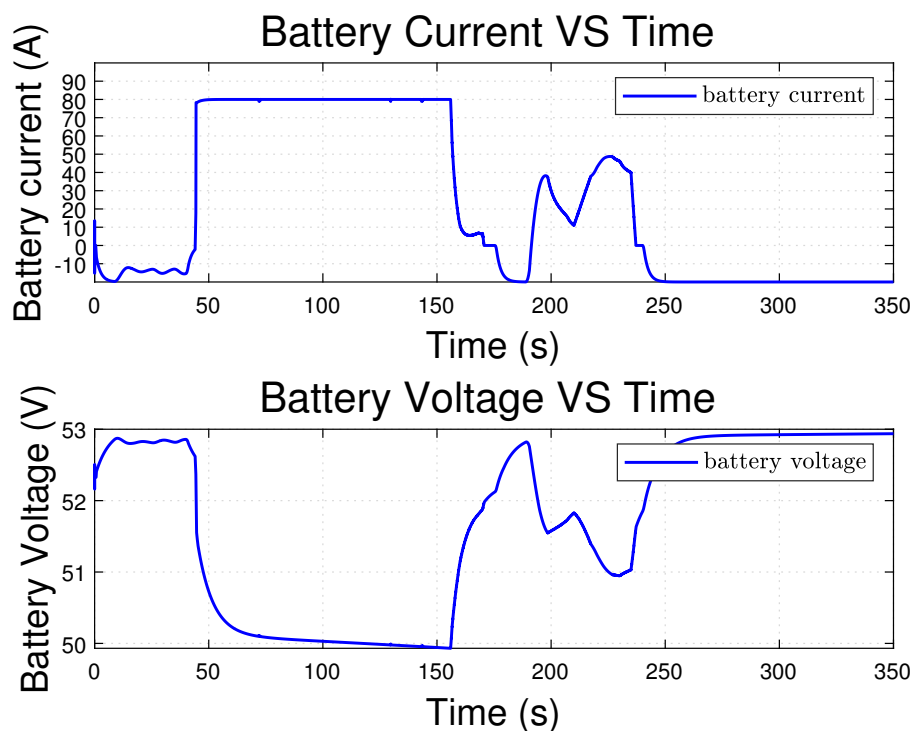
Σχήμα 3.39: Συνολική παραγόμενη ισχύς πηγών κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.

- Επίπεδο φόρτισης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας:



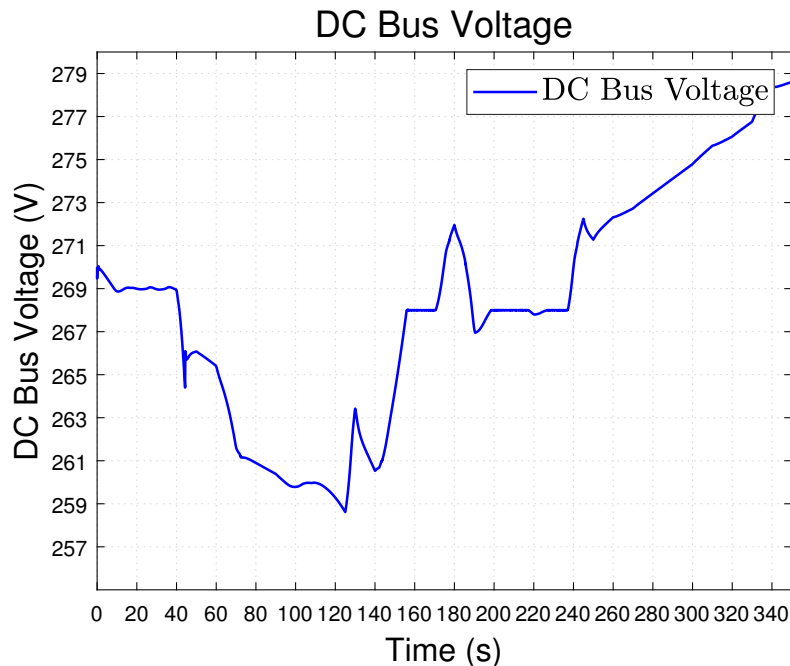
Σχήμα 3.40: Επίπεδο φόρτισης μπαταρίας κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.

- Ρεύμα και τάση της μπαταρίας:



Σχήμα 3.41: Τάση και ρεύμα μπαταρίας κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.

- Τάση DC διαύλου:



Σχήμα 3.42: Τάση DC διαύλου κατά την εφαρμογή της External Energy Maximization Strategy.

3.5.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων External Energy Maximization Strategy

Εστιάζοντας στο γράφημα του σχήματος 3.38 στο οποίο απεικονίζεται η ισχύς των πηγών του υβριδικού συστήματος συναρτήσει του χρόνου, παρατηρούμε και σε αυτήν την περίπτωση όπως είναι λογικό ότι το απαιτούμενο φορτίο καλύπτεται από έναν συνδυασμό και των τριών πηγών με πρωτεύοντα ρόλο στην κάλυψη του φορτίου αυτόν της κυψέλης καυσίμου. Σε γενικές γραμμές ακολουθείται η ίδια ροή των γεγονότων. Συγκριτικά με τις προηγούμενες στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας γίνονται αισθητές κάποιες διαφορές στην καμπύλη ισχύος εξόδου της κυψέλης καυσίμου εξαιτίας της εφαρμογής της συγκεκριμένης στρατηγικής. Συγκεκριμένα η ισχύς της κυψέλης καυσίμου καθυστερεί να ανεβάσει την ισχύ της στην μέγιστη δυνατή, όπως φαίνεται την χρονική στιγμή $t = 40\text{ s}$ κατά την οποία η ζήτηση του φορτίου αρχίζει να αυξάνεται. Όσον αφορά την χρήση τη μπαταρίας παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με αυτήν της Classical PI Control Strategy, δηλαδή η μπαταρία παρέχει βοηθητική ισχύ στο σύστημα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και σε μεγαλύτερη βαθμό συγκριτικά με τις προηγούμενες στρατηγικές. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται και από το σχήμα 3.40 όπου η τιμή SOC της μπαταρίας πέφτει στο χαμηλότερο επίπεδο (58.25 %) συγκριτικά με τις προηγούμενες στρατηγικές.

Γενικά και σε αυτήν την περίπτωση η κυψέλη καυσίμου αναλαμβάνει την βασική κάλυψη της ζήτησης του φορτίου με την μπαταρία και τον υπερπυκνωτή να έχουν ρόλο επικουρικό στην κάλυψη του φορτίου. Ο υπερπυκνωτής και σε αυτήν την περίπτωση

λόγω της γρήγορης δυναμικής του ανταποκρίνεται απευθείας όταν η κυψέλη καυσίμου εξαιτίας του αργού χρόνου ανταπόκρισης της αδυνατεί να καλύψει πλήρως το φορτίο. Από την άλλη η μπαταρία όπως φαίνεται, παρέχει την έξτρα ενέργεια στην περίπτωση όπου η μέγιστη ισχύς της κυψέλης καυσίμου δεν επαρκεί για την κάλυψη ζήτησης του φορτίου. Τέλος, όταν η μπαταρία πλησιάζει την ελάχιστη κατάσταση φόρτισης όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.40, η κυψέλη καυσίμου συμπεριφέρεται όπως και στις προηγούμενες στρατηγικές, ξεκινάει δηλαδή την φόρτιση της μπαταρίας.

3.5.3 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων External Energy Maximization Strategy

Από την παραπάνω ανάλυση επιβεβαιώνουμε την ορθότητα του σχεδιασμού του υβριδικού μας συστήματος. Συγκεκριμένα σχετικά με την χρήση της κυψέλης καυσίμου σκοπός αποτελούσε η κάλυψη των βασικών φορτίων ζήτησης δουλεύοντας εντός των ορίων λειτουργίας της. Επίσης η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται ενεργοποιημένη από την αρχή για την ετοιμότητα του υβριδικού μας συστήματος και την φόρτιση της μπαταρίας. Σχετικά με την μπαταρία η χρήση της στοχεύει στον έλεγχο της διατήρησης της τάσης του DC διαύλου στην τάση αναφοράς, ενώ παράλληλα να παρέχει ή να απορροφάει ενέργεια όταν υπάρχει αδυναμία κάλυψης του φορτίου από την κυψέλη είτε στην περίπτωση παραγωγή πλεονάζουσας ενέργειας αντίστοιχα. Τέλος επιβεβαιώνεται ο σκοπός χρησιμοποίησης του υπερπυκνωτή ο οποίος αφορούσε στο πλεονέκτημα της γρήγορης δυναμικής του, δηλαδή να παρέχει κατευθείαν την έξτρα ενέργεια που απαιτείτο όποτε η κυψέλη καυσίμου αργούσε να ανταποκριθεί εξαιτίας της χαμηλής δυναμικότητας της στις σχετικά απότομες μεταβολές του φορτίου ζήτησης ισχύος.

Από την σύγκριση των γραφήματα των σχημάτων 3.38, 3.39 στα οποία απεικονίζονται η ισχύς της κάθε μια από τις τρεις πηγές συγκεντρωτικά και της αθροιστικής παραγωγής ισχύος των πηγών αντίστοιχα, συμπεραίνουμε ότι το φορτίο ζήτησης καλύπτεται συνεχώς από την αθροιστική ισχύ των τριών πηγών χωρίς να υπάρχουν ασυνέχειες είτε απώλειες, γεγονός που σηματοδοτεί ότι ο έλεγχος μας θεωρητικά είναι ορθός.

Σχετικά με την τάση του DC διαύλου σκοπός αποτελούσε η διατήρηση του στην τάση αναφοράς των 270 V μέσω της μπαταρίας, η οποία αποτελούσε τον ρυθμιστή τάσης του DC διαύλου. Από την απεικονιζόμενη τάση του DC διαύλου του γραφήματος 3.42 παρατηρούμε ότι επιτυγχάνεται η διατήρησης της τάσης του στην τάση των 270 V με μια μικρή απόκλιση +3,18% έως -4.22%. Η αποκλίσεις από την τάση αναφοράς συμβαίνουν τις χρονικές στιγμές τις οποίες ο υπερπυκνωτής προσφέρει ή απορροφά ενέργεια από το σύστημα. Για παράδειγμα παρατηρώντας το σχήμα 3.42, κατά τη χρονική περίοδο $t = 240 - 350 \text{ s}$ ο υπερπυκνωτής απορροφάει συνεχώς την περίσσεια ενέργεια από το σύστημα, δηλαδή φορτίζεται με αποτέλεσμα η τιμή του DC διαύλου στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα να ανεβαίνει πάνω από την τιμή αναφοράς όπως φαίνεται από το σχήμα 3.42.

Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας όπως φαίνεται και από το αντίστοιχο γράφημα του σχήματος 3.40, παραμένει εντός των ορίων που θέσαμε. Όπως παρατηρούμε η μπα-

ταρία φορτίστηκε από την κυψέλη καυσίμου ως έναν βαθμό τα πρώτα 40 s. Από εκεί και έπειτα έως την χρονική στιγμή $t = 240$ s λόγω της προσφοράς της στην κάλυψη του φορτίου και στην διατήρηση της τάσης του DC διαύλου στην τάση αναφοράς, η μπαταρία κατά κύριο λόγο αποφορτίζεται συνεχώς. Την χρονική στιγμή $t = 235$ s η μείωση του φορτίου δίνει την δυνατότητα κάλυψης του απαιτούμενου φορτίου από την κυψέλη καυσίμου και την φόρτιση της μπαταρίας με την πλεονάζουσα ενέργεια. Τέλος από το γράφημα του σχήματος 3.33 στο οποίο παρουσιάζεται το ρεύμα και η τάση της μπαταρίας παρατηρούμε ότι τηρούμε τους τεχνικούς περιορισμούς της μπαταρίας που θέσαμε σχετικά με το ρεύμα φόρτισης (αρνητικό ρεύμα) και το ρεύμα εκφόρτισης (θετικό ρεύμα) της. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται το ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας δεν ξεπερνάει τον τεχνικό περιορισμό που θέσαμε των 20 A, όμοια και το ρεύμα εκφόρτισης της μπαταρίας τον τεχνικό περιορισμό των 80 A. Το παραπάνω οφείλεται στον αποτελεσματικό σχεδιασμό για την εξαγωγή των σημάτων αναφοράς ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης του DC μετατροπέα υποβιβασμού (μετατροπέας φόρτισης) και του DC μετατροπέα ανύψωσης (μετατροπέας εκφόρτισης) αντίστοιχα, μέσω των οποίων γίνεται η διαχείριση της ενέργειας της μπαταρίας.

3.6 Σύγκριση Στρατηγικών Διαχείρισης Ενέργειας Υβριδικού Συστήματος Τροφοδοσίας Συστήματος Ισχύος Αεροσκάφους

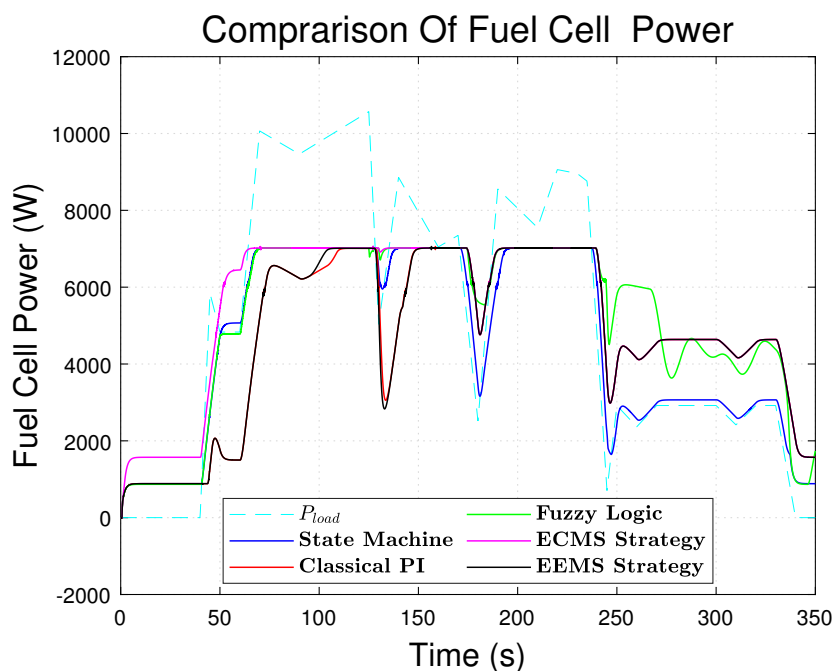
Στο παρόν εδάφιο θα συγκρίνουμε τις διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας που παρουσιάστηκαν προηγουμένως ως προς τα χαρακτηριστικά που αφορούν το ποσοστό συμμετοχής της κάθε πηγής στην κάλυψη του φορτίου, τον βαθμό εκφόρτισης της μπαταρίας, την απόκλιση της τάσης του DC διαύλου από την τάση αναφοράς των 270 V, την συνολική αποτελεσματικότητα και τέλος την οικονομία στην κατανάλωση του καυσίμου του συστήματος.

3.6.1 Σύγκριση στρατηγικών ως προς το ποσοστό συμμετοχής της κάθε πηγής στην κάλυψη του φορτίου ζήτησης

- **Ισχύς Κυψέλης Καυσίμου:**

Στο σχήμα 3.43, 3.44, 3.45 απεικονίζεται η ισχύς της κυψέλης καυσίμου, της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή συναρτήσει του χρόνου για τις διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας.

Από το παραπάνω γράφημα γίνεται εμφανές ότι η κυψέλη καυσίμου συμπεριφέρεται διαφορετικά σε κάθε περίπτωση. Παραμένει η βασική πηγή για την κάλυψη του φορτίου ζήτησης με διαφορές που εντοπίζονται κυρίως ως προς τον βαθμό που ακολουθεί η έξοδος ισχύος της κυψέλης την ισχύ ζήτησης του φορτίου. Επίσης σε κάθε περίπτωση αναλόγως την εφαρμοζόμενη στρατηγική παρατηρείται



Σχήμα 3.43: Σύγκριση ισχύος κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιώντας διαφορετικές στρατηγικές.

διαφορά ως προς την χρονική στιγμή την οποία η κυψέλη καυσίμου ανταποκρίνεται στην μεταβολή του φορτίου, κυρίως στην έναρξή της αύξησης του φορτίου ζήτησης. Τέλος παρατηρούμε ότι εμφανίζεται μεγάλη ομοιότητα ως προς τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται η κυψέλη καυσίμου στην Classical PI και EEMS στρατηγική.

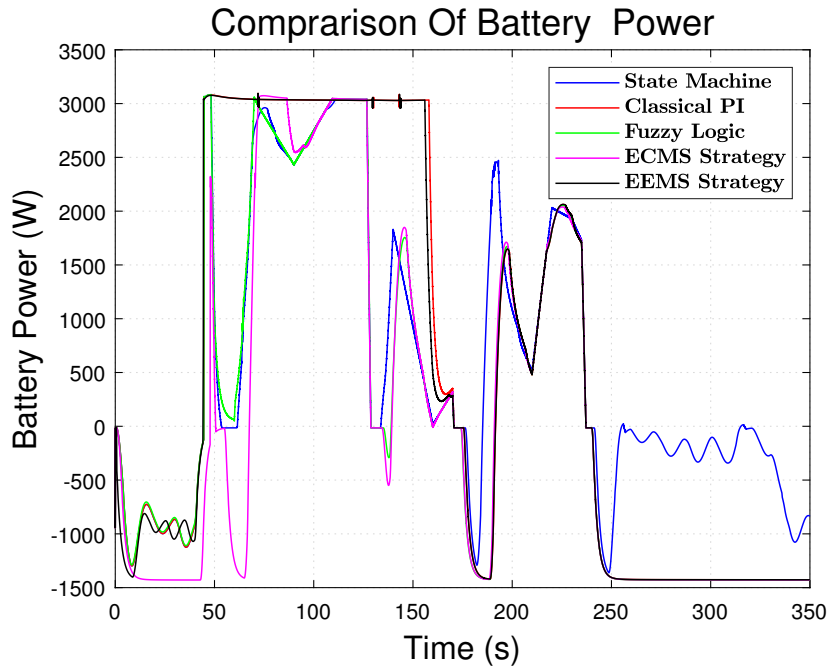
- **Ισχύς Μπαταρίας:**

Από το παραπάνω γράφημα διαπιστώνεται ότι και στις πέντε στρατηγικές ελέγχου επιλέγονται οι ίδιες χρονικές στιγμές και χρονικές διάρκειες σε γενικές γραμμές κατά τις οποίες η μπαταρία προσφέρει είτε απορροφάει ισχύ από το σύστημα. Η διαφορές αναλόγως την στρατηγική εντοπίζονται κυρίως στον βαθμό του επιπέδου ισχύος φόρτισης και εκφόρτισης. Και σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζεται μεγάλη ομοιότητα ως προς τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται η μπαταρία στην Classical PI και EEMS στρατηγική.

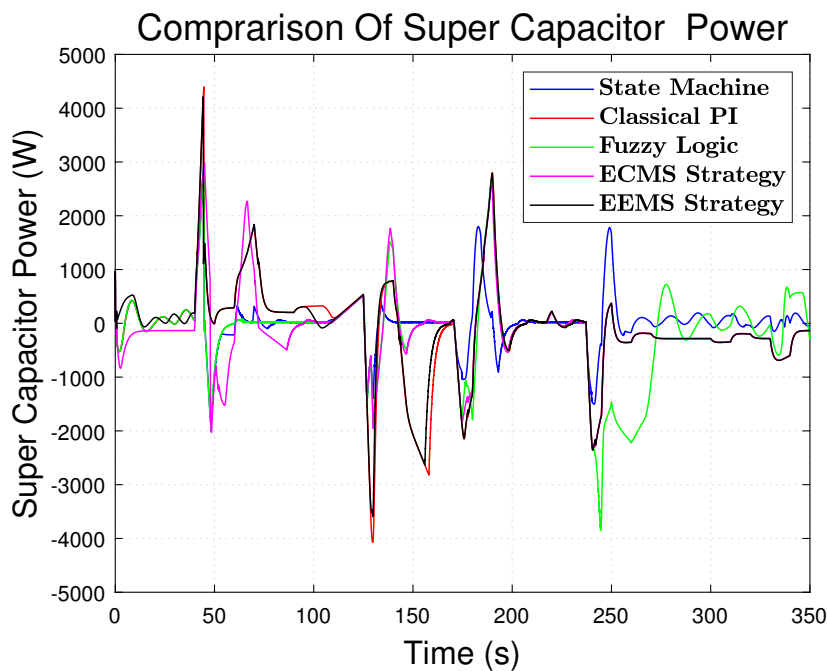
- **Ισχύς Υπερπυκνωτή:**

Από το γράφημα του σχήματος 3.45 όπως και στην περίπτωση της μπαταρία, παρατηρείται η επιλογή των ίδιων χρονικών στιγμών και χρονικής διάρκειας κατά τις οποίες ο υπερπυκνωτής προσφέρει ή απορροφάει ισχύ από το σύστημα. Η διαφορές αναλόγως την στρατηγική εντοπίζονται κυρίως στον βαθμό του επιπέδου ισχύος φόρτισης και εκφόρτισης του υπερπυκνωτή. Και σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζεται μεγάλη ομοιότητα ως προς τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται ο υπερπυκνωτής στην Classical PI και EEMS στρατηγική.

Υπολογίζοντας το ποσοστό της προσφοράς της κάθε πηγής ενέργειας στην συνολική κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου για κάθε μία από τις εξεταζόμενες στρατηγικές ενέργειας προκύπτει το παρακάτω γράφημα μπάρας του σχήματος



Σχήμα 3.44: Σύγκριση ισχύος μπαταρίας χρησιμοποιώντας διαφορετικές στρατηγικές.

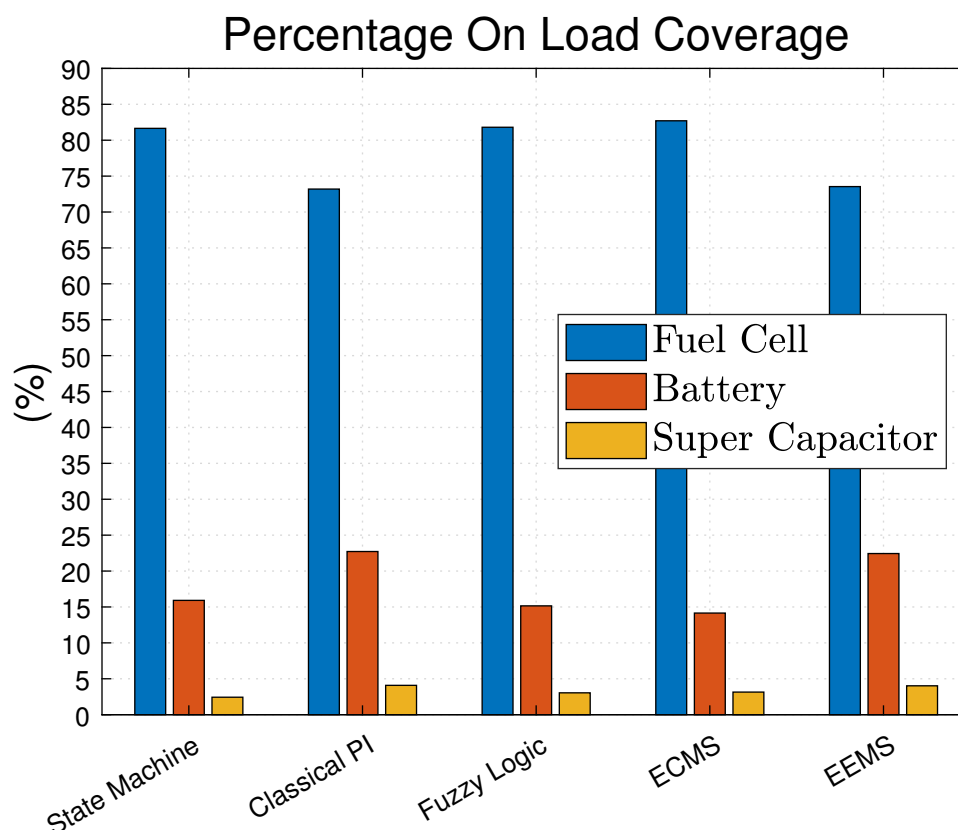


Σχήμα 3.45: Σύγκριση ισχύος υπερπυκνωτή χρησιμοποιώντας διαφορετικές στρατηγικές.

3.46 στο οποίο συνοψίζονται τα αντίστοιχα ποσοστά συμμετοχής σε κάθε περίπτωση.

Από το γράφημα του σχήματος 3.46 συμπεραίνουμε ότι η συμμετοχή της πηγής κυψέλης καυσίμου στην κάλυψη του φορτίου ζήτησης είναι η μεγαλύτερη σε όλες τις στρατηγικές και κυμαίνεται σε επίπεδα άνω του 80%, εκτός από την Classical PI και EEMS στρατηγική στις οποίες το ποσοστό συμμετοχής της κυψέλης

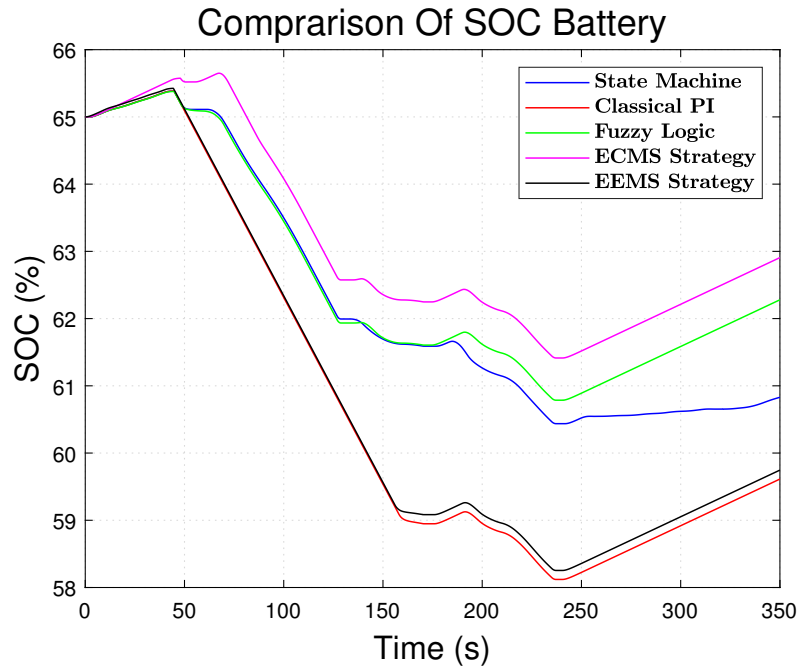
βρίσκεται κάτω του 75%. Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα όπως φαίνεται και από το σχήμα την προσφορά της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή στην κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου σε μεγαλύτερο ποσοστό συγκριτικά με τις υπόλοιπες στρατηγικές. Τέλος επιβεβαιώνεται από το γράφημα ο επικουρικός ρόλος των δευτερευόντων πηγών της μπαταρίας και ιδιαίτερα του υπερπυκνωτή στην κάλυψη του φορτίου.



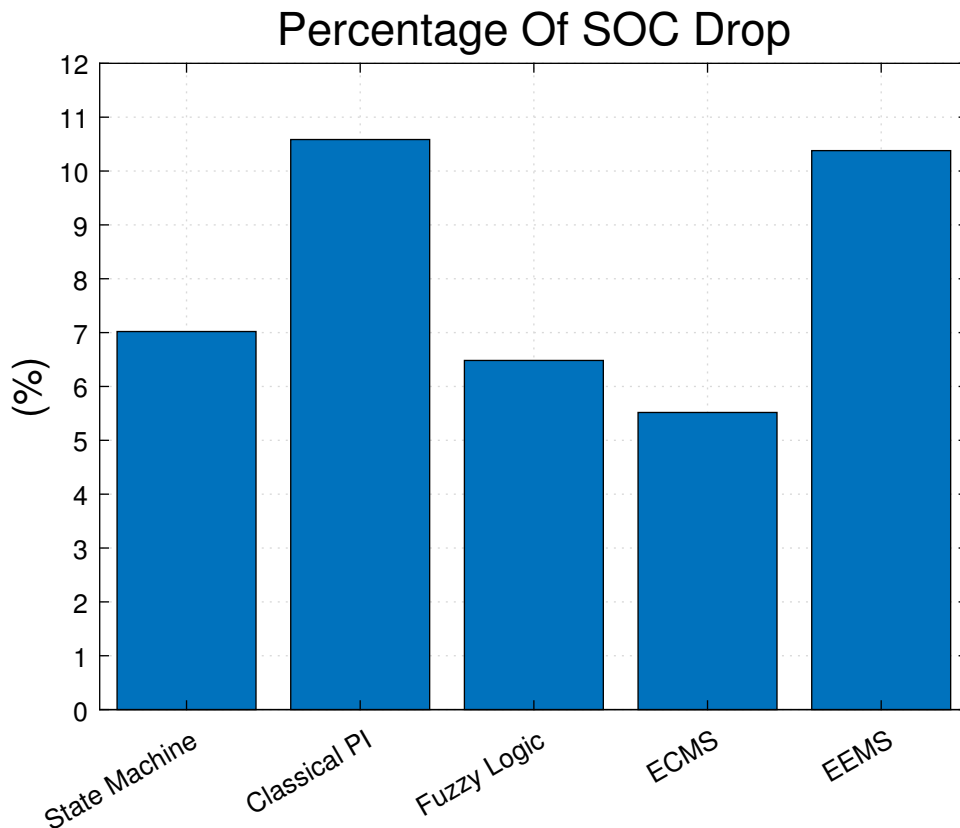
Σχήμα 3.46: Ποσοστά προσφοράς της κάθε πηγής ενέργειας στην συνολική κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου για κάθε στρατηγική.

3.6.2 Σύγκριση στρατηγικών ως προς τον βαθμό εκφόρτισης της μπαταρίας

- **Κατάσταση φόρτισης (SOC) μπαταρίας:** Στο σχήμα 3.47 απεικονίζεται η μεταβολή της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας συναρτήσει του χρόνου για κάθε μια από τις πέντε στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας.



Σχήμα 3.47: Σύγκριση SOC μπαταρίας χρησιμοποιώντας διαφορετικές στρατηγικές.



Σχήμα 3.48: Ποσοστά εκφόρτισης μπαταρίας για κάθε στρατηγική.

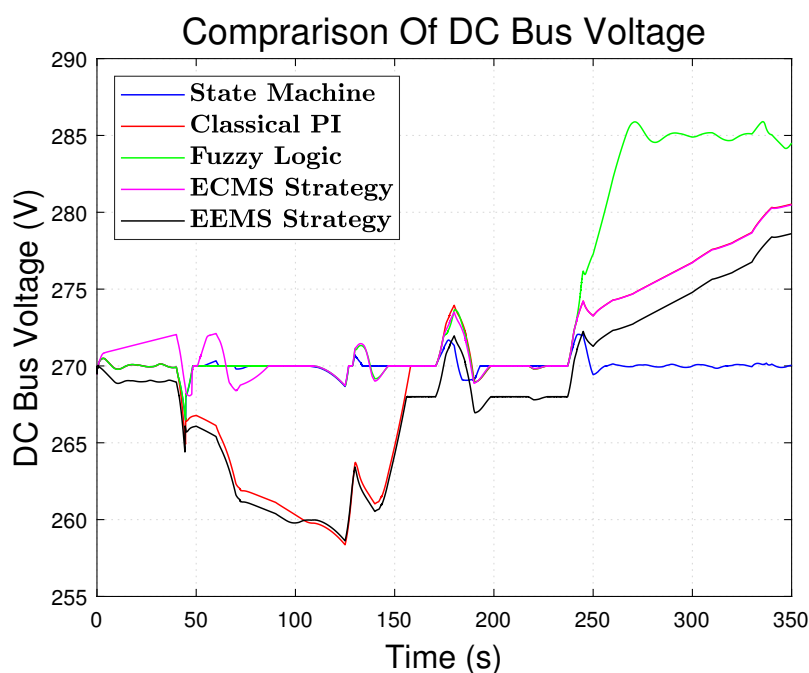
Υπολογίζοντας το ποσοστό εκφόρτισης της μπαταρίας από την αρχική της κατάσταση (65%) για κάθε μία από τις εξεταζόμενες στρατηγικές ελέγχου προκύπτει το παρακάτω γράφημα μπάρας του σχήματος 3.48 που φαίνονται τα α-

ντίστοιχα ποσοστά σε κάθε περίπτωση.

Από το γράφημα του σχήματος 3.48 γίνεται φανερό ότι στην περίπτωση της Classical PI στρατηγικής συναντάται το μεγαλύτερο ποσοστό εκφόρτισης της μπαταρίας, φαινόμενο λογικό καθώς στην συγκεκριμένη στρατηγική η μπαταρία προσπαθεί να φτάσει την τιμή του *SOC* αναφοράς (60%), ξεκινώντας από μια αρχική κατάσταση φόρτισης 65%. Ακολουθεί με σχεδόν όμοιο ποσοστό εκφόρτισης η EEMS στρατηγική, ενώ στις υπόλοιπες τρεις στρατηγικές τα ποσοστά εκφόρτισης μπαταρίας κυμαίνονται σε χαμηλότερες τιμές.

3.6.3 Σύγκριση στρατηγικών ως προς την διατήρηση της τάσης του DC δίαυλου

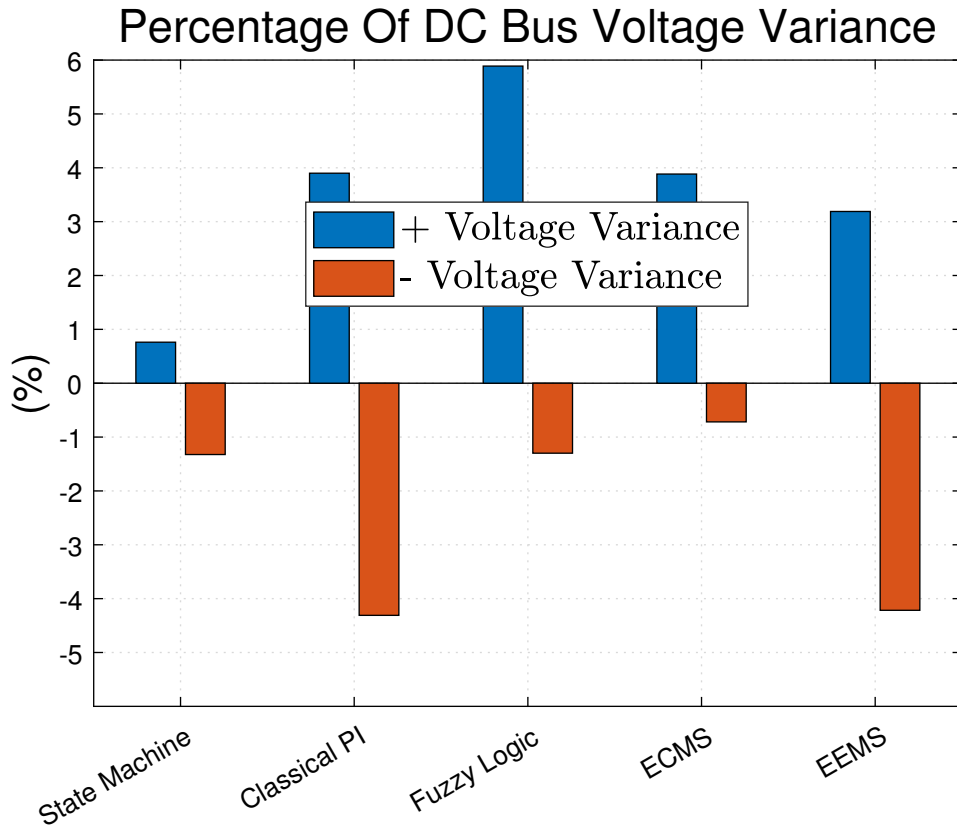
- **Τάση DC διαύλου:** Στο σχήμα 3.49 απεικονίζεται η μεταβολή της τάσης του DC διαύλου συναρτήσει του χρόνου για κάθε μια από τις πέντε στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας.



Σχήμα 3.49: Σύγκριση τάσης DC διαύλου χρησιμοποιώντας διαφορετικές στρατηγικές.

Υπολογίζοντας το ποσοστό μεταβολής της τάσης του DC διαύλου από την τάση αναφοράς (270 V) για κάθε μία από τις εξεταζόμενες στρατηγικές ελέγχου προκύπτει το παρακάτω γράφημα μπάρας του σχήματος 3.50 στο οποίο φαίνονται τα αντίστοιχα θετικά και αρνητικά ποσοστά μεταβολής σε κάθε περίπτωση.

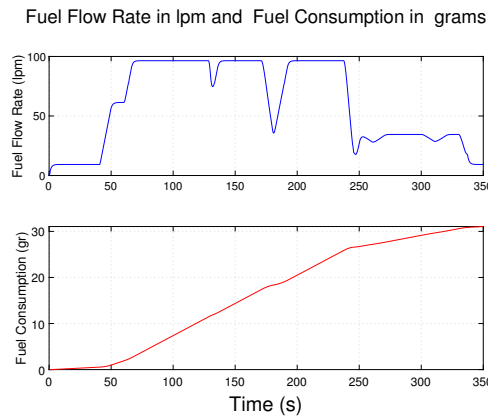
Από το γράφημα του σχήματος 3.50 συμπεραίνεται πως σε όλες τις στρατηγικές επιτυγχάνεται η διατήρηση της τάσης του DC διαύλου στην τάση αναφοράς των 270 V με μικρές θετικές και αρνητικές αποκλίσεις. Συγκεκριμένα οι μικρότερες αποκλίσεις παρατηρούνται στην περίπτωση της State Machine στρατηγικής.



Σχήμα 3.50: Ποσοστά μεταβολής τάσης του DC διαύλου για κάθε στρατηγική.

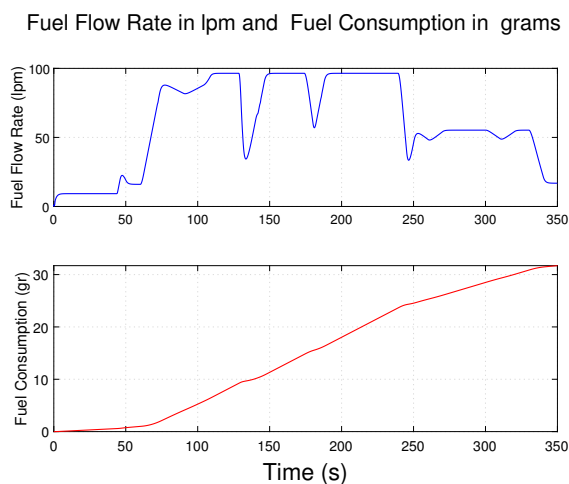
3.6.4 Σύγκριση στρατηγικών ως προς την οικονομία της κατανάλωσης καυσίμου.

Στην παρούσα υποενότητα υπολογίστηκε για κάθε στρατηγική ελέγχου η ροή του υδρογόνου σε λίτρα ανά λεπτό (*lpm*) κάνοντας χρήση της εξίσωσης (2.9) του κεφαλαίου 5, ενώ μέσω της συνολικής ροής υδρογόνου έγινε ο υπολογισμός της συνολικής κατανάλωσης του καυσίμου σε γραμμάρια (*g*). Στα σχήματα 3.51, 3.52, 3.53, 3.54, 3.55 παρουσιάζεται η ροή του υδρογόνου και η κατανάλωση καυσίμου για κάθε μια από τις στρατηγικές ελέγχου αντίστοιχα.

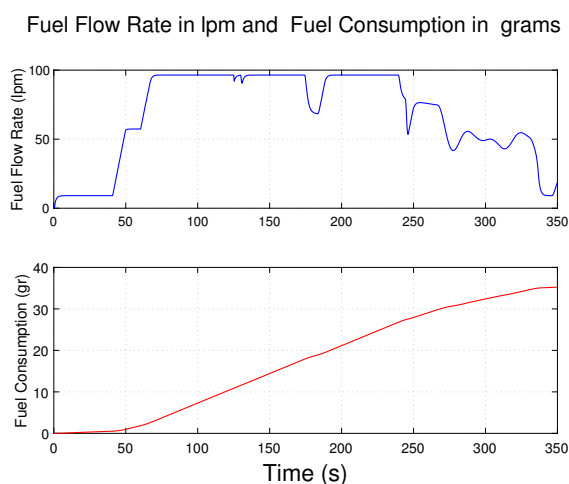


Σχήμα 3.51: Ροή υδρογόνου και κατανάλωση καυσίμου της State Machine στρατηγικής.

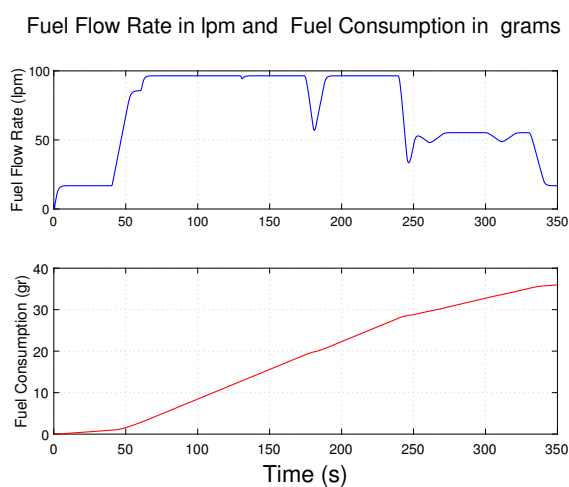
3.6. Σύγκριση Στρατηγικών Διαχείρισης Ενέργειας Υβριδικού Συστήματος Τροφοδοσίας Συστήματος Ισχύος Αεροσκάφους



Σχήμα 3.52: Ροή υδρογόνου και κατανάλωση καυσίμου της Classical PI στρατηγικής.

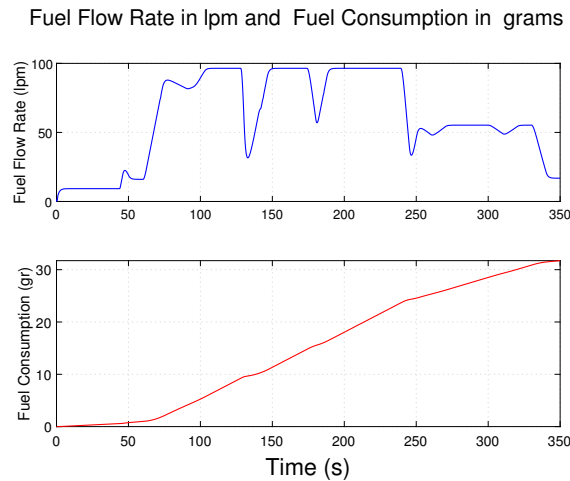


Σχήμα 3.53: Ροή υδρογόνου και κατανάλωση καυσίμου της Rule-Based Fuzzy Logic στρατηγικής.

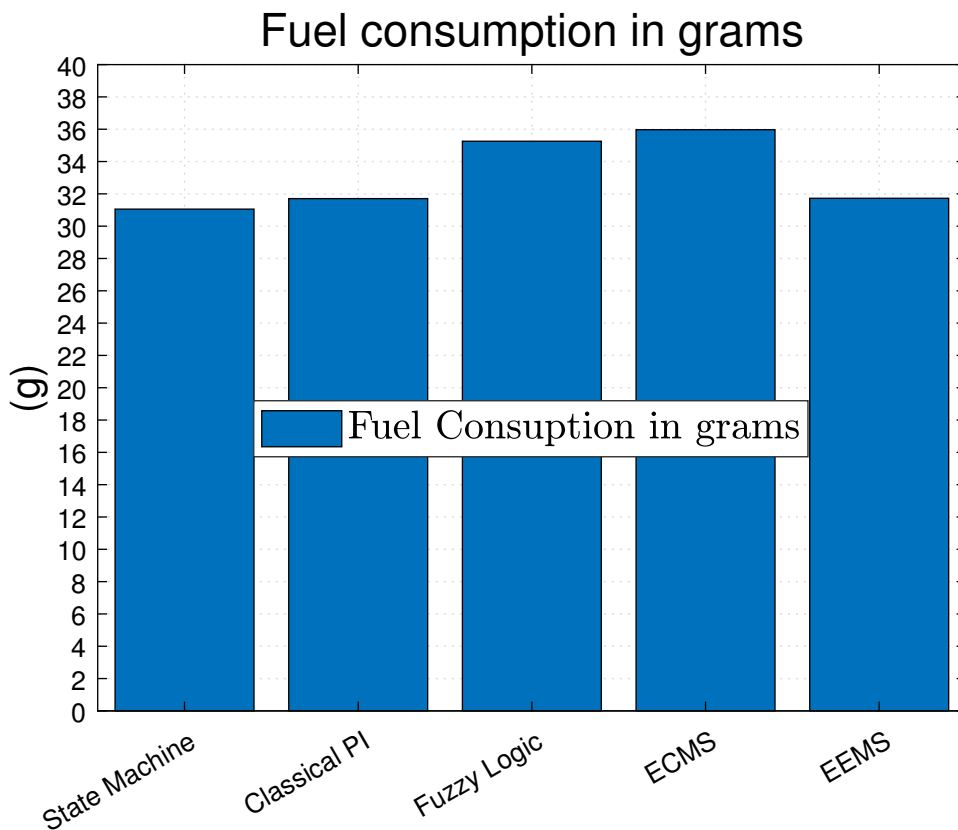


Σχήμα 3.54: Ροή υδρογόνου και κατανάλωση καυσίμου της ECMS στρατηγικής.

Στο γράφημα του σχήματος 3.56 παρουσιάζουμε για λόγους σύγκρισης την κατα-



Σχήμα 3.55: Ροή υδρογόνου και κατανάλωση καυσίμου της EEMS στρατηγικής.



Σχήμα 3.56: Κατανάλωση καυσίμου για κάθε στρατηγική ελέγχου.

νάλωση του καυσίμου σε γραμμάρια για κάθε στρατηγική ελέγχου.

Παρατηρώντας το γράφημα του σχήματος 3.56 γίνεται σαφές ότι την βέλτιστη κατανάλωση καυσίμου την πετυχαίνουμε μέσω της State Machine στρατηγικής με κατανάλωση στα 31.0544 g. Αμέσως μετά ακολουθούν η Classical PI και EEMS στρατηγική με ελαφρώς αυξημένη κατανάλωση κατά +2.0970 % και +2.1624 % αντίστοιχα σε σύγκριση με την προηγούμενη. Τέλος με σημαντική διαφορά ακολουθούν η Rule-Based Fuzzy Logic και η ECMS στρατηγική με μεγάλου βαθμού αυξημένη κατανάλωση κατά +13.5322 % και +15.8316 % αντίστοιχα συγκριτικά με την State Machine στρατηγική.

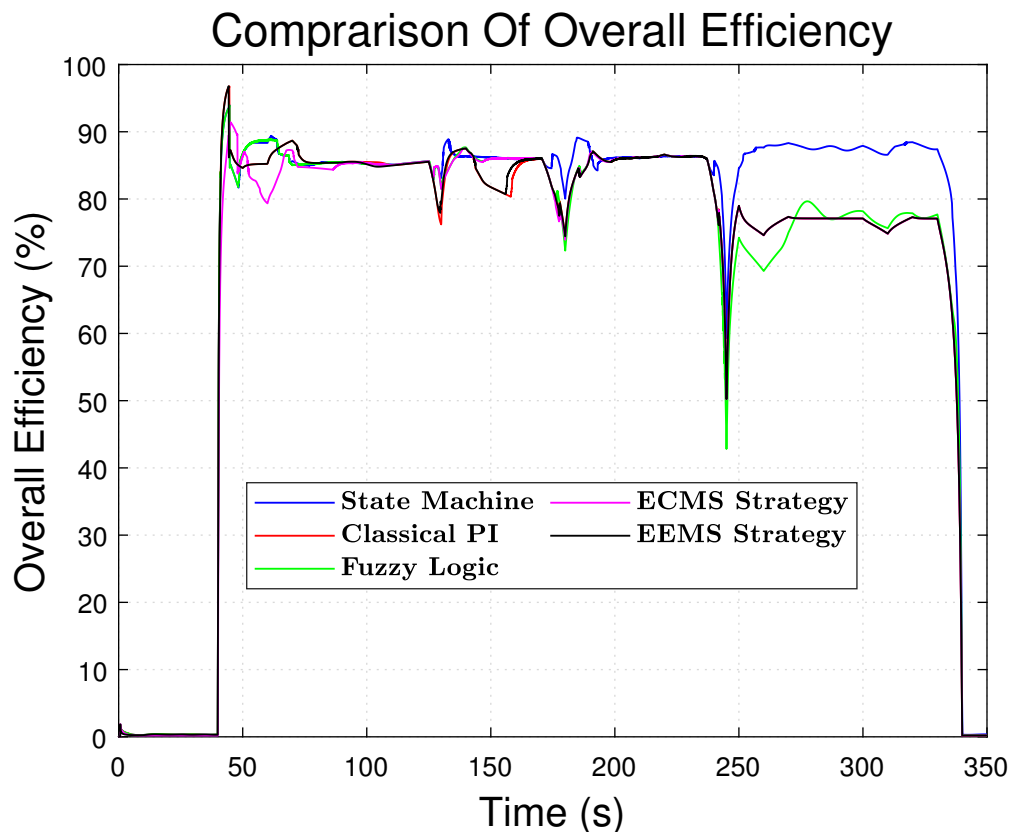
3.6.5 Σύγκριση ως προς την συνολική αποτελεσματικότητα (Overall Efficiency) στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας.

Στην παρούσα υποενότητα υπολογίζεται η συνολική αποτελεσματικότητα για κάθε στρατηγική ελέγχου διαχείρισης ενέργειας, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$efficiency = \frac{P_{load}}{P_{fc}^{in} + P_{batt}^{in} + P_{sc}} \quad (3.1)$$

όπου P_{fc}^{in} , P_{batt}^{in} η ισχύς εισόδου στους μετατροπείς της κυψέλης καυσίμου και τις μπαταρίας αντίστοιχα, P_{sc} η ισχύς του υπερπυκνωτή (δεν μεσολαβεί μετατροπέας τάσης) και P_{load} η ισχύς του φορτίου ζήτησης.

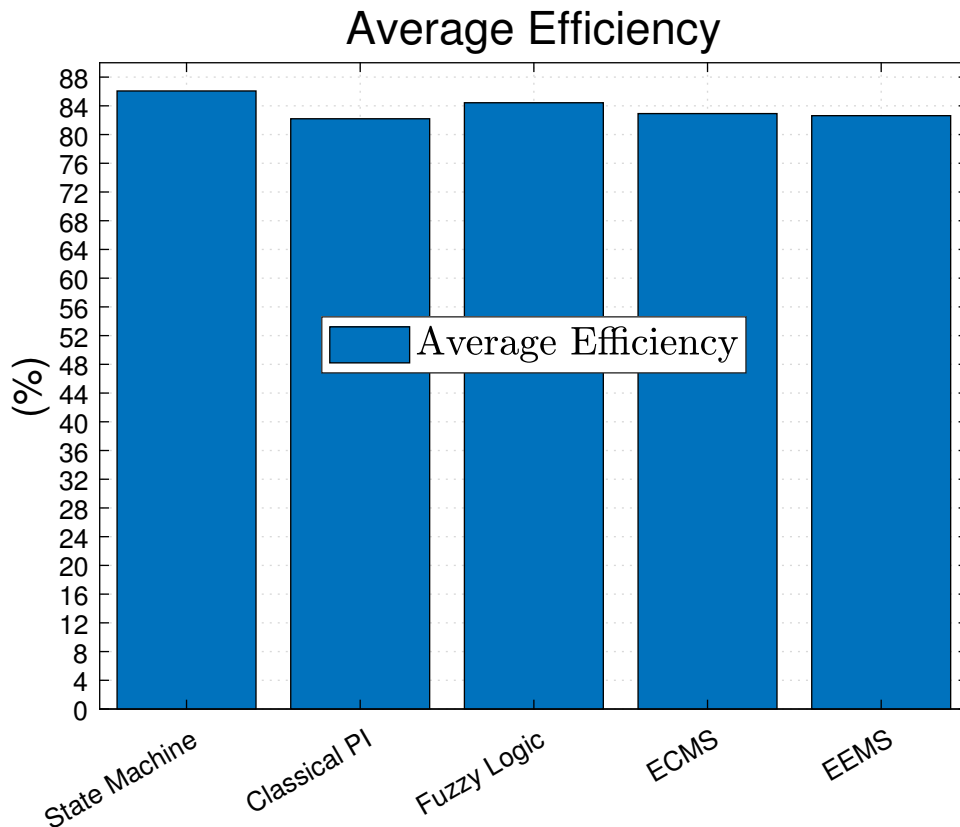
Στο σχήμα 3.57 παρουσιάζεται η συνολική αποτελεσματικότητα κάθε χρονική για κάθε στρατηγική διαχείρισης ενέργειας.



Σχήμα 3.57: Συνολική αποτελεσματικότητα για κάθε στρατηγική ελέγχου.

Στο γράφημα του σχήματος 3.58 παρουσιάζουμε για λόγους σύγκρισης την μέση τιμή της συνολικής αποτελεσματικότητας για κάθε στρατηγική ελέγχου.

Παρατηρώντας το γράφημα του σχήματος 3.58 γίνεται σαφές ότι την υψηλότερη συνολική αποτελεσματικότητα την πετυχαίνει η State Machine στρατηγική με 86.07 %.



Σχήμα 3.58: Συνολική αποτελεσματικότητα για κάθε στρατηγική ελέγχου.

Αμέσως μετά ακολουθεί η Rule-Based Fuzzy Logic και ECMS στρατηγική με μειωμένη αποτελεσματικότητα κατά -2.00% και -3.66% αντίστοιχα σε σύγκριση με την προηγούμενη. Τέλος ακολουθούν η EEMS και η Classical PI στρατηγική με μείωση της συνολικής αποτελεσματικότητας κατά -3.99% και -4.49% αντίστοιχα συγκριτικά με την State Machine στρατηγική.

Η συνολική απόδοση των εξεταζόμενων στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας με βάση τα κριτήρια σύγκρισης συνοψίζεται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Πίνακας σύνοψης κριτηρίων σύγκρισης στρατηγικών.

Κριτήρια	State Machine Control	Classical PI Control	Rule-Based Fuzzy Logic Control	ECMS	EEMS
Ποσοστό συμμετοχής κυψέλης καυσίμου (%)	81.6505	73.1954	81.8036	82.7043	73.5404
Ποσοστό συμμετοχής μπαταρίας (%)	15.9168	22.7213	15.1531	14.1507	22.4394
Ποσοστό συμμετοχής υπερπυκνωτή (%)	2.4317	4.0837	3.0422	3.1455	4.0203
Ποσοστό εκφόρτισης μπαταρίας (%)	7.0200	10.5849	6.4830	5.5171	10.3790
Ποσοστό διακύμανσης τάσης DC δίαυλου (%)	-1.3243 έως + 0.7616	-4.3104 έως + 3.8994	-1.2993 έως + 5.8885	-0.7182 έως + 3.8837	-4.2165 έως + 3.1889
Κατανάλωση καυσίμου (g)	31.0544	31.7056	35.2567	35.9708	31.7259
Συνολική αποτελεσματικότητα (%)	86.07	82.20	84.34	82.92	82.63

4 Συμπεράσματα-Μελλοντικές Προοπτικές

4.1 Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να σχεδιαστεί και να εξεταστεί η συμπεριφορά και η απόκριση ενός υβριδικού συστήματος ισχύος κυψελών καυσίμου με την προοπτική της αντικατάστασης της τροφοδοσίας του συστήματος ισχύος έκτακτης ανάγκης των αεροσκαφών, το οποίο μέχρι στιγμής τροφοδοτείται από τους κύριους κινητήρες. Παρουσιάστηκε ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκε καθένα από τα δομικά μέρη του συστήματος αλλά και το σύστημα μας συνολικά, τηρώντας παράλληλα τους τεχνικούς περιορισμούς που παρουσιάζει. Παρουσιάστηκε μια σύγκριση απόδοσης των πέντε διαφορετικών στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας που εφαρμόστηκαν για την βελτιστοποίηση της κατανομής ισχύος στις πηγές του συστήματος. Κριτήρια σύγκρισης αποτελούσαν το ποσοστό συμμετοχής κάθε μιας από τις τρεις πηγές στην κάλυψη του φορτίου, το ποσοστό εκφόρτισης της μπαταρίας, η απόκλιση της τάση από την τάση αναφοράς του DC διαύλου, η κατανάλωση καυσίμου καθώς και η συνολική αποτελεσματικότητα για κάθε μια από τις εφαρμοζόμενες στρατηγικές. Συγκριτικά με τις άλλες στρατηγικές η ECMS έκανε την λιγότερη χρήση μπαταρίας (5.5171 % ποσοστό εκφόρτισης) παρουσιάζοντας όμως ταυτόχρονα την μεγαλύτερη κατανάλωση υδρογόνου (35.9708 g). Η State Machine Control στρατηγική πέτυχε την λιγότερη κατανάλωση καυσίμου (31.0544 g) παράλληλα με την μεγαλύτερη συνολική απόδοση (86.07 %). Αντίθετα την λιγότερη συνολική απόδοση την πέτυχε η Classical PI στρατηγική (82.20 %) πετυχαίνοντας όμως την αμέσως μεγαλύτερη εξοικονόμηση καυσίμου (31.7056 g) μετά την State Machine Control στρατηγική. Ως προς το ποσοστό συμμετοχής στην κάλυψη του φορτίου η ECMS έκανε την μεγαλύτερη χρήση της κυψέλης καυσίμου (82.7043 %) και την λιγότερη χρήση της μπαταρίας (14.1507 %), σε αντίθεση με Classical PI στρατηγική στην οποία η κυψέλη καυσίμου συμμετείχε στον μικρότερο βαθμό (73.1954 %) και η μπαταρία στον μεγαλύτερο (22.7213 %). Ως προς τον τεχνικό περιορισμό της διατήρησης της τάσης του DC διαύλου στην τιμή αναφοράς, η μικρότερη διακύμανση της τάσης παρατηρείται στην State Machine Control στρατηγική ενώ η μεγαλύτερη διακύμανση στην Classical PI στρατηγική. Αρκετά παρόμοιες επιδόσεις σε όλες τις παραμέτρους σύγκρισης παρουσιάζουν η EEMS και η Classical PI στρατηγική.

Σχετικά με την επιλογή συγκεκριμένης στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας, έχει

να κάνει με τον εκάστοτε στόχο που θέλουμε να πετύχουμε. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας θα πρέπει να είναι ένα σύστημα πολλαπλών στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας ώστε να επιλέγεται η κατάλληλη στρατηγική με βάση το κριτήριο στο οποίο δίνεται προτεραιότητα κάθε φορά. Για παράδειγμα εάν ο στόχος είναι η μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου τότε θα πρέπει να επιλεγεί ως στρατηγική διαχείρισης ενέργειας η State Machine Control στρατηγική, ενώ εάν ως προτεραιότητα τεθεί η λιγότερη χρήση/εκφόρτιση της μπαταρίας τότε το σύστημα πολλαπλών στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας θα πρέπει να επιλέξει την εφαρμογή της ECMS στρατηγικής.

Καταλήγοντας θα ήθελα να αναφερθώ στις προοπτικές που παρουσιάζει το εξεταζόμενο υβριδικό σύστημα ως προς την χρήση του στον τομέα των αερομεταφορών. Συγκεκριμένα τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το εν λόγω υβριδικό σύστημα **πρώτον** ως προς τις μηδενικές εκπομπές ρύπων και επομένως του μηδενικού περιβαλλοντικού του αποτυπώματος, **δεύτερον** τα βελτιωμένα δυναμικά χαρακτηριστικά που εμφανίζει και οφείλονται στην χρήση των συστημάτων μπαταρίας και υπερπυκνωτή τα οποία με το να προσφέρουν είτε να απορροφούν την δυναμική ενέργεια του συστήματος που προκύπτει εξαιτίας της αργής ανταπόκρισης της κυψέλης καυσίμου στις διακυμάνσεις του φορτίου, αυξάνουν έτσι την δυναμική του συστήματος, **τρίτον** με την εισαγωγή στοιχείων μπαταρίας και υπερπυκνωτή θα καλύπτεται η απαιτούμενη συμπληρωματική ισχύς του φορτίου ζήτησης επιτρέποντας έτσι την χρήση κυψέλης καυσίμου μικρότερης ονομαστικής τιμής, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος του συστήματος καθώς η κυψέλη καυσίμου αποτελεί την πιο ακριβή τεχνολογία στο σύστημα, **τέταρτον** το γεγονός ότι το συγκεκριμένο υβριδικό σύστημα λειτουργεί με υψηλή απόδοση εξαιτίας των εφαρμοζόμενων στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας και σε συνδυασμό με όλα τα παραπάνω γινόμαστε αισιόδοξοι ως προς την προοπτική της εφαρμογής του εν λόγω υβριδικού συστήματος σε πραγματικά αεροσκάφη. Τέλος το γεγονός ότι η συμπεριφορά του υβριδικού μας συστήματος αξιολογήθηκε και ανταπεξήλθε στις απαιτήσεις του φορτίου ενός ρεαλιστικού σεναρίου προσγείωσης έκτακτης ανάγκης του αεροσκάφους, με την τήρηση ταυτόχρονα όλων των τεχνικών περιορισμών που τέθηκαν όπως εκείνου του ελέγχου της ενέργειας της κυψέλης καυσίμου, της τάσης του DC διαύλου, του ρεύματος και τάσης φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας κτλ., καθιστά το εν λόγω υβριδικό σύστημα ένα αξιόπιστο σύστημα ως προς το κριτήριο της ασφάλειας.

4.2 Μελλοντικές Προοπτικές

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου αναμφίβολα αποτελεί μία από τις υποψήφιες τεχνολογίες του μέλλοντος. Το μηδενικό περιβαλλοντολογικό αποτύπωμα του υδρογόνου σε συνδυασμό με το γεγονός ότι είναι το τρίτο στοιχείο στην Γη σε αφθονία και περιέχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους το καθιστούν το απόλυτο καύσιμο.

Ζητήματα όμως που σχετίζονται κυρίως με τον τομέα τεχνολογίας των υλικών παρουσιάζονται ως εμπόδια στην εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου. Συγκεκριμένα τα ακριβά υλικά (λευκόχρυσος, ασήμι κτλ) από τα οποία αποτελούνται ορισμένα από τα βασικά δομικά στοιχεία της κυψέλης όπως ο ηλεκτρολύτης, σε συνδυασμό με την ανάγκη αντικατάστασης τους ύστερα από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα καθιστούν

περιορισμένη την ευρεία χρήση τους. Η εξέλιξη του τομέα της τεχνολογίας υλικών ως προς την εύρεση υλικών με σχετικά μικρό κόστος, περισσότερη αντοχή στις καταπονήσεις και υλικών μεγαλύτερου βαθμού αγωγιμότητας για την διευκόλυνση κίνησης μεγαλύτερων ηλεκτρικών φορτίων, αποτελούν αναμφίβολα μεγάλη πρόκληση και στόχο που πρέπει να τεθεί άμεσα για την διεύρυνση της χρήσης των κυψελών καυσίμου.

Εκτός από τα παραπάνω, ζητήματα που αφορούν το ίδιο το υδρογόνο στέκονται εμπόδιο στην παραγωγή των συμβατικών καυσίμων. Η δυσκολία του υδρογόνου στην αποθήκευση δεδομένου ότι είναι πολύ ελαφρύ και η συμπίεση μεγάλης ποσότητας σε μικρού μεγέθους δεξαμενή είναι δύσκολη λόγω των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται για να επιτευχθεί η υγροποίηση, καθώς και η έλλειψη οργανωμένου δικτύου διανομής του είναι ορισμένα σημεία στα οποία το υδρογόνο μειονεκτεί έναντι των συμβατικών καυσίμων. Επίσης η σχετικά υψηλή τιμή σε σύγκριση με αυτή της βενζίνης ή του πετρελαίου αλλά και το γεγονός ότι κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες το υδρογόνο μπορεί να γίνει εξαιρετικά επικίνδυνο είναι από τα πρώτα ζητήματα που πρέπει να ξεπεραστούν για την επιτυχημένη εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου.

Πρόσφατες έρευνες χρησιμοποίησαν μια διαφορετική τεχνολογία η οποία στηρίζεται στην χρήση της αμμωνίας ως μέσο για την εξαγωγή υδρογόνου. Η συγκεκριμένη τεχνολογία τείνει να αποκτήσει τεράστιο δυναμικό στην αγορά καθώς έρχεται να δώσει λύση στο πρόβλημα της αποθήκευσης και της επικινδυνότητας του υδρογόνου καθώς η αμμωνία αποθηκεύει σχεδόν διπλάσια ενέργεια από το υγρό υδρογόνο ενώ είναι πολύ πιο βολική και ασφαλέστερη.

Τέλος όσον αφορά τις στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας συνεχώς γίνονται προσπάθειες που αποσκοπούν σε ακόμη μεγαλύτερη αξιοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας από το εκάστοτε σύστημα. Συγκεκριμένα προτεινόμενες καινοτόμες και περισσότερο περίπλοκες στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας οι οποίες στηρίζονται στην πρόβλεψη επόμενων καταστάσεων (Model Predictive Control) και σε τεχνικές χρήσης εκμάθησης τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Networks) οι οποίες έχουν ανοίξει τον δρόμο για ακόμη μεγαλύτερες βελτιστοποιήσεις, ή ο σχεδιασμός μιας στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας πολλαπλών στόχων για την βελτιστοποίηση όλων των κριτηρίων σύγκρισης θα μπορούσαν να είναι αντικείμενο μελέτης μιας επόμενης έρευνας.

Βιβλιογραφία

- [1] Ameen M Bassam et al. «An improved energy management strategy for a hybrid fuel cell/battery passenger vessel». In: *International journal of hydrogen energy* 41.47 (2016), pp. 22453–22464.
- [2] Pablo Garcia et al. «Energy management system of fuel-cell-battery hybrid tramway». In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57.12 (2009), pp. 4013–4023.
- [3] AA Abdelhafez and AJ Forsyth. «A review of more-electric aircraft». In: *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology*. Vol. 13. AEROSPACE SCIENCES & AVIATION TECHNOLOGY, ASAT-13, May 26–28, 2009. The Military Technical College. 2009, pp. 1–13.
- [4] Gwenaelle M Renouard-Vallet et al. «Fuel cells for aircraft applications». In: *ECS Transactions* 30.1 (2011), p. 271.
- [5] Frank de Bruijn. «The current status of fuel cell technology for mobile and stationary applications». In: *Green chemistry* 7.3 (2005), pp. 132–150.
- [6] Sheila Mae Constantino Ang. «Model-based design and operation of fuel cell systems». PhD thesis. UCL (University College London), 2012.
- [7] Maria Laura Sarmiento Carnevali. «Modeling and control of PEM fuel cells». In: (2017).
- [8] Tomas Tronstad et al. «Study on the use of fuel cells in shipping». In: *European Maritime Safety Agency* (2017).
- [9] <https://electricala2z.com/renewable-energy/fuel-cell-characteristics-curve-losses/>.
- [10] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/battery-characteristics/summary-and-comparison-of-battery-characteristics>.
- [11] http://www.twd.com.cn/EN/news_show.asp?id=37.
- [12] U Umar et al. «Application of Battery Energy Storage System to Optimize Renewable Energy Resources to the Grid». In: *International Journal of of Advancement in Engineering Technology, Management and Applied Science (IJAETMAS)* 3.10 (2016), pp. 52–67.
- [13] <https://www.powerstream.com/BatteryFAQ-nickel-metal-hydride.html>.
- [14] <https://www.science.org.au/curious/technology-future/lithium-ion-batteries>.

- [15] <https://www.tecategroup.com/products/ultracapacitors/ultracapacitor-FAQ.php>.
- [16] <https://studiousguy.com/working-principle-supercapacitor>.
- [17] <https://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity>.
- [18] <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>.
- [19] <https://studiousguy.com/pid-controller-working/>.
- [20] Jinghua Zhong. «PID controller tuning: A short tutorial». In: *Mechanical Engineering, Purdue University* (2006), pp. 1–10.
- [21] W Hart Danial. «Commonly used Power and Converter Equations». In: *Sl: sn* (2010).
- [22] Souleman Njoya Motapon, Louis-A Dessaint, and Kamal Al-Haddad. «A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft». In: *IEEE transactions on industrial electronics* 61.3 (2013), pp. 1320–1334.
- [23] Olivier Tremblay, Louis-A Dessaint, et al. «A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles». In: *2009 IEEE vehicle power and propulsion conference*. IEEE. 2009, pp. 1722–1729.
- [24] Olivier Tremblay, Louis-A Dessaint, and Abdel-illah Dekkiche. «A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles». In: *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Ieee. 2007, pp. 284–289.
- [25] Keith B Oldham. «A Gouy–Chapman–Stern model of the double layer at a (metal)/(ionic liquid) interface». In: *Journal of Electroanalytical Chemistry* 613.2 (2008), pp. 131–138.
- [26] Ameen M Bassam et al. «Development of a multi-scheme energy management strategy for a hybrid fuel cell driven passenger ship». In: *International Journal of Hydrogen Energy* 42.1 (2017), pp. 623–635.
- [27] Pablo Garcia et al. «Viability study of a FC-battery-SC tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy». In: *International journal of hydrogen energy* 37.11 (2012), pp. 9368–9382.
- [28] Stéphane Caux et al. «On-line fuzzy energy management for hybrid fuel cell systems». In: *International journal of hydrogen energy* 35.5 (2010), pp. 2134–2143.
- [29] Mehdi Dhifli et al. «An efficient external energy maximization-based energy management strategy for a battery/supercapacitor of a micro grid system». In: *International Journal of Computer Science and Network Security* 20.1 (2020), pp. 196–203.