

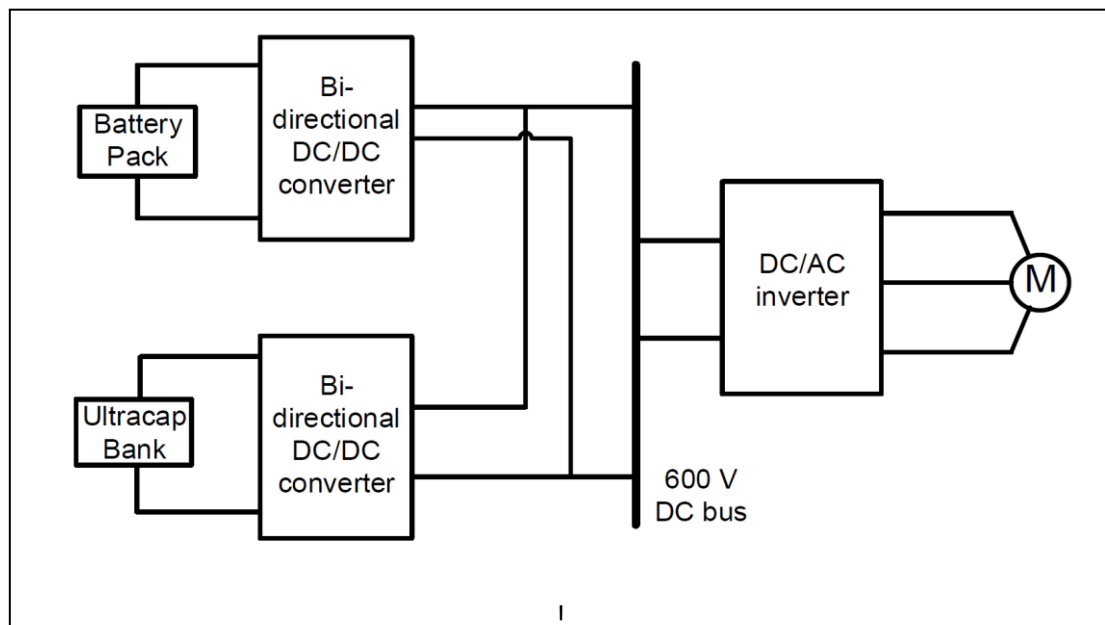


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ



Φοιτητής: Ροσσολάτος Ιωσήφ-Μάξιμος
ΑΜ: 48345480

Επιβλέπων Καθηγητής

Καμινάρης Σταύρος
Καθηγητής του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της
Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

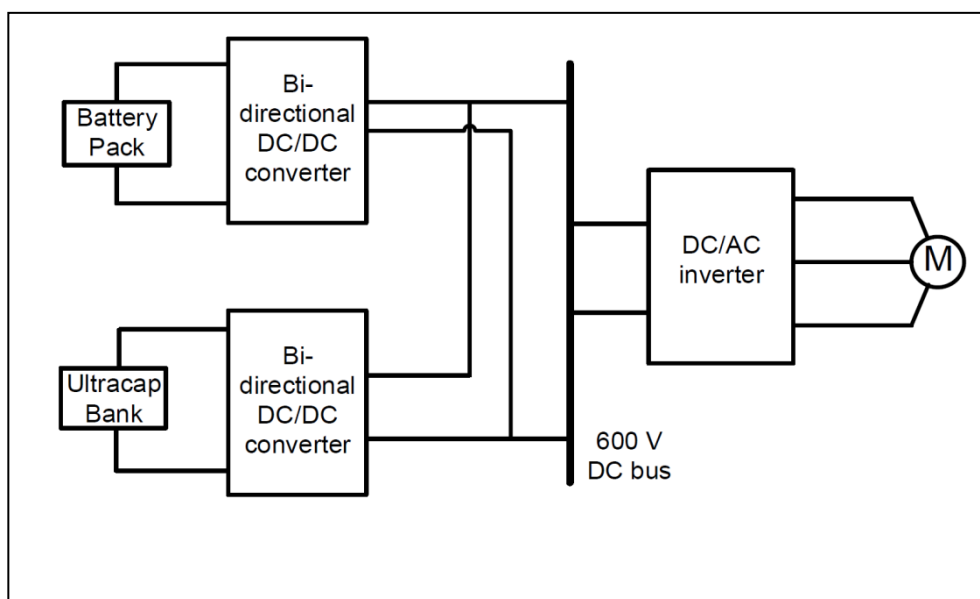
ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Σεπτέμβρης 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Development of an energy management model based on fuzzy logic



Student: Rossolatos Iosif-Maximos
Registration Number: 48345480

Supervisor

Kaminaris Stavros
Professor at Department of Electrical and Electronics Engineering UniWA
Faculty of Engineering

ATHENS-EGALEO, September 2024

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

(Όνοματεπώνυμο), (βαθμίδα)	(Όνοματεπώνυμο), (βαθμίδα)	(Όνοματεπώνυμο), (βαθμίδα)
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Ιωσήφ-Μάξιμος Ροσσολάτος, Ιούνιος, 2024

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ιωσήφ – Μάξιμος Ροσσολάτος του Ισιδώρου, με αριθμό μητρώου 48345480 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Ο Δηλών
Ιωσήφ-Μάξιμος Ροσσολάτος

Υπογραφή φοιτητή



Αφιέρωση

*Αφιερώνω την παρούσα διπλωματική εργασία,
στους γονείς μου, Ισίδωρο και Εύα
στον εκλιπόντα αδερφό μου, Βλάση
στη γυναίκα μου και το γιό μου, Αγνή και Ισίδωρο
για την υποστήριξη και τη δύναμη που μου
προσέφεραν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.*

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Καμινάρη Σταύρο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και μου ανέθεσε ένα τόσο ιδιαίτερο θέμα προς έρευνα και ανάπτυξη, δίνοντάς μου την δυνατότητα να ασχοληθώ με μια τόσο ανερχόμενη και επίκαιρη τεχνολογία.

Επίσης ιδιαίτερες ευχαριστίες εκ βαθέων οφείλω στον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Ρίμπα Δημήτριο για τις ανεκτίμητες γνώσεις του και την μοναδική καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε μέχρι την ολοκλήρωσή της.

Περίληψη

Η αγορά ηλεκτρικών οχημάτων αναπτύσσεται ραγδαία την τελευταία δεκαετία, ακολουθώντας το παγκόσμιο σχέδιο για μηδενικές εκπομπές έως το 2035. Ειδικά στην Ευρώπη, το μερίδιο των πωλήσεων των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων αυξήθηκε κατά 63%, φτάνοντας το 9% της συνολικής αγοράς, ενώ τα Plug-in Hybrid ηλεκτρικά οχήματα, που συνδυάζουν ηλεκτρικό κινητήρα με μηχανή εσωτερικής καύσης, αυξήθηκαν κατά 71% το 2021.

Η βιομηχανία πίσω από τα ηλεκτρικά οχήματα παράγει πάνω από 390 δισεκατομμύρια ευρώ σε έσοδα, μόνο για την Ευρώπη, επομένως μπορεί εύκολα να οριστεί ως σημαντικός οικονομικός και τεχνολογικός τομέας. Επιπλέον, τα ηλεκτρικά οχήματα προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα όπως μέγιστη ροπή ακόμη και σε μηδενική ταχύτητα, εύκολη και ομαλή οδήγηση, καθώς και πολύ χαμηλή κατανάλωση. Συγκριτικά με ένα συμβατικό όχημα, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί έως και 82% σύμφωνα με αναλύσεις.

Λόγω της πολυπλοκότητας του πακέτου μπαταριών, απαιτείται ένα εξαιρετικά προσαρμοστικό και έξυπνο σύστημα διαχείρισης για την παρακολούθηση παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η τάση των κυψελών και το ρεύμα, καθώς και για την προστασία από υπερφόρτιση ή τη διάγνωση σφαλμάτων. Η θερμοκρασία της μπαταρίας, ιδιαίτερα, είναι κρίσιμος παράγοντας για τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και επηρεάζεται κυρίως από το στυλ οδήγησης, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ή την ταχύτητα φόρτισης. Ακόμη και αν η χωρητικότητα της μπαταρίας μειωθεί αρκετά (30-40%) μετά από 8-10 χρόνια, μπορεί ακόμη να είναι βιώσιμη και χρήσιμη σε στατικές εφαρμογές όπως τα συστήματα αποθήκευσης ανανεώσιμης ενέργειας.

Αν και η μπαταρία λιθίου φαίνεται να είναι η πιο οικονομικά αποδοτική πηγή ενέργειας, είναι δύσκολο να επιτευχθεί υψηλή απόδοση και αυτονομία. Τα υψηλά ρεύματα αιχμής κατά την εκκίνηση σε κρύες συνθήκες ή τα ρεύματα υψηλής συχνότητας λόγω της αναγέννησης από έντονη πέδηση μπορούν να υπερθερμάνουν τις κυψέλες, προκαλώντας έντονο άγχος στον μετατροπέα. Επομένως, απαιτείται μια εξαιρετικά προσαρμοστική και ενεργειακά πυκνή πηγή για να διαχειριστεί αυτές τις απαιτήσεις. Οι υπερπυκνωτές (UC) διαθέτουν τεράστια χωρητικότητα (έως και 1500F) σε σύγκριση με τους κανονικούς πυκνωτές και ενώ δεν μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, μπορούν να παρέχουν τεράστια ισχύ για να καλύψουν διαφορετικά φορτία. Λόγω αυτής της χαμηλής ενεργειακής τους πυκνότητας, η έρευνα επικεντρώθηκε στην ενσωμάτωση αυτής της πηγής σε υπάρχοντα πακέτα μπαταριών για τη δημιουργία μιας υβριδικής πηγής ενέργειας, είτε σε ενεργή είτε σε παράλληλη διαμόρφωση. Η παθητική διάταξη εκμεταλλεύεται τη σύνδεση και των δύο πηγών με έναν συνδετικό κρίκο DC, ενώ η ενεργή απαιτεί διαφορετικό μετατροπέα DC-DC για κάθε συσσωρευτή. Οι ημιανεργές τοπολογίες με χρήση ελέγχου διόδου και αμφίδρομου μετατροπέα είναι επίσης διαθέσιμες, εξασφαλίζοντας υψηλή απόδοση και μέτριο κόστος.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που εκμεταλλεύεται η υβριδοποίηση είναι η συμπαγής διαμόρφωση με λιγότερες απαιτούμενες μπαταρίες, μειώνοντας έτσι το κόστος και εξασφαλίζοντας σωστή προσαρμογή. Το κόστος λειτουργίας μπορεί να μειωθεί έως και 20%, ενώ το βάρος της διάταξης μειώνεται τουλάχιστον κατά 15%. Η συνολική ενεργειακή πυκνότητα μειώνεται καθώς χρειάζονται λιγότερες κυψέλες μπαταρίας, αλλά καθώς το σύστημα διαρκεί περισσότερο και μπορεί να αποθηκεύσει επιπλέον ενέργεια μέσω της αναγεννητικής πέδησης, οι δυνατότητες είναι απεριόριστες. Μπορεί ακόμη να συνδυαστεί με μια συνεχή μεταβαλλόμενη μετάδοση (CVT), επιτρέποντας περαιτέρω μείωση κατά 15% στη γήρανση της μπαταρίας. Αν και οι υπερπυκνωτές είναι αρχικά

ακριβοί, αυτό το κόστος είναι αμελητέο (3% των συνολικών εξόδων). Ωστόσο, η συνολική τιμή του συστήματος θα είναι πάνω από 25% χαμηλότερη λόγω των εξόδων ηλεκτρικής ενέργειας και αντικατάστασης μπαταριών. Επιπλέον, μπορούν να διατηρήσουν το 80% της χωρητικότητάς τους μετά από 250.000 κύκλους, επιτρέποντας συνεχή λειτουργία για πάνω από 30-35 χρόνια.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα μοντέλο διαχείρισης ενέργειας ηλεκτρικού αυτοκινήτου με χρήση ασαφούς λογικής. Το μοντέλο αυτό αναπτύσσεται με στόχο τη βελτίωση των παραμέτρων και κατά συνέπεια της απόδοσης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

Λέξεις – κλειδιά

Αυτοκίνητο, μπαταρία, υπερπυκνωτές, έλεγχος, υβριδοποίηση, EV, θερμοκρασία, ενέργεια.

Abstract

The electric vehicle market has been rapidly expanding over the past decade, following the global plan for zero emissions by 2035. In Europe, the market share for purely electric vehicles increased by 63%, reaching 9% of the total market, while Plug-in Hybrid electric vehicles, which combine an electric motor with an internal combustion engine, saw a 71% increase in 2021.

The electric vehicle industry generates over 390 billion euros in tax revenue in Europe alone, highlighting its significance as a major economic and technological sector. Additionally, electric vehicles offer several advantages, such as maximum torque even at zero speed, easy and smooth driving, and very low energy consumption. Compared to conventional vehicles, energy consumption can be reduced by up to 82%, according to tank-to-wheel (TTW) analyses.

Due to the complexity of the battery pack, a highly adaptive and smart management system is required to monitor parameters like temperature, cell voltage, and current, as well as to protect against overcharging or diagnose errors. Battery temperature, in particular, is a critical factor for battery life and is mainly affected by driving style, ambient temperature, and charging speed. Even if battery capacity degrades significantly (30-40%) after 8-10 years, it can still be viable and useful in stationary applications, such as renewable energy storage systems.

Although lithium batteries appear to be the most cost-efficient energy source, achieving high mileage and performance is challenging. Peak power demands during cold starts or high-frequency currents due to intense braking regeneration can overheat the cells, causing significant stress on the converter. Therefore, a highly adaptive and power-dense source is needed to handle these demands. Ultracapacitors (UC) provide superior capacitance (up to 1500F) compared to regular capacitors, and while they cannot store large amounts of energy, they can deliver immense power to meet various loads. Due to their low energy density, research has focused on integrating this source into existing battery packs to form a hybrid energy source, either in active or passive configuration. Passive layouts exploit the connection of both sources with a DC link, while active setups require a different DC-DC converter for each accumulator. Semi-active topologies, using a control diode and a bidirectional converter, are also available, ensuring high efficiency and moderate cost.

Another important advantage of hybridization is the compact sizing with fewer required batteries, thereby reducing cost and ensuring proper fitting. Operating costs can be decreased by up to 20%, and the weight of the setup is reduced by at least 15%. Although total energy density is lowered because fewer battery cells are needed, the system lasts longer and can store additional energy through regenerative braking, providing endless possibilities. It can even be combined with a continuously variable transmission (CVT), allowing for a further 15% reduction in battery aging. While ultracapacitors are initially expensive, this cost is negligible (3% of the overall costs). However, the total system price will be over 25% lower due to electricity costs and battery replacement costs. Additionally, ultracapacitors can maintain 80% of their capacity after 250,000 cycles, allowing for over 30-35 years of continuous operation. This paper develops an energy management model for electric vehicles using fuzzy logic, aiming to improve the parameters and consequently the performance of an electric vehicle.

Keywords

Car, battery, supercapacitors, control, hybridization, EV, temperature, energy.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Εικόνων.....	11
Κατάλογος Πινάκων	12
Σκοπός και στόχοι.....	14
Δομή	14
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Εισαγωγή στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο.....	15
1.1 Τα πρώτα ηλεκτρικά αυτοκίνητα	15
1.2 Η σκοτεινή εποχή	16
1.3 Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο αναγεννιέται.....	17
1.4 Το μέλλον των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.....	20
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Συστήματα Ενέργειας.....	23
2.1 Μπαταρίες	23
2.2 Πυκνωτές – Υπέρ-πυκνωτές	33
2.2.1 Η εφεύρεση του πυκνωτή.....	33
2.2.2 Ο Υπέρ-Πυκνωτής	36
2.3 Το υβριδικό σύστημα αποθήκευσης	40
2.4 Τοπολογίες ενός υβριδικού συστήματος αποθήκευσης	43
2.5 Ο μετατροπέας DC/DC.....	45
2.5.1 Αρχές λειτουργίας του μετατροπέα DC/DC.....	45
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Στρατηγικές Διαχείρισης Ενέργειας	47
3.1 Η φιλοσοφία των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας	47
3.2 Εισαγωγή στην ασαφή λογική	52
3.2.1 Ασαφής Έλεγχος.....	54
3.2.2 Προτερήματα της ασαφούς λογικής.....	55
4 Ανάπτυξη μοντέλου διαχείρισης ενέργειας για ένα υβριδικό σύστημα ηλεκτρικού αυτοκινήτου βασισμένο στην ασαφή λογική με τη χρήση MatLaB.....	57
4.1 MatLab και Simulink.....	57
4.2 Περιγραφή μεθοδολογίας	58
4.2.1 Υβριδικό σύστημα αποθήκευσης	58
4.3 Μοντέλα πηγών ενέργειας	60
4.4 Κύκλος λειτουργίας	62
4.5 Λειτουργίες ισχύος	63
4.6 Το ασαφές μοντέλο	64
5 Αποτελέσματα	70
5.1 Διακυμάνσεις ισχύος HESS υπό διαφορετικούς κύκλους λειτουργίας	70
5.2 Κατανομή ισχύος HESS ανάλογα με τη συνολική ζήτηση	70
5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	79
Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές.....	80

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Όχημα του Thomas Parker	15
Εικόνα 1.2 Το Πρώτο Ηλεκτρικό Όχημα	16
Εικόνα 1.3 Enfield 8000 Σύρος	18
Εικόνα 1.4 Citicar της εταιρείας Vanguard-Sebring	18
Εικόνα 1.5 Toyota Prius 1997	19
Εικόνα 1.6 Tesla roadster 2008	20
Εικόνα 2.1. Οι πρώτες μπαταρίες από τον Alesandro Volta	23
Εικόνα 2.2 Πρώτη μπαταρία παραγωγής του Cruickshank.....	24
Εικόνα 2.3 Μπαταρία του John Daniell.....	25
Εικόνα 2.4 Βελτιωμένη έκδοση μπαταρίας μόλυβδου-οξέως.....	26
Εικόνα 2.5 Κυψέλη βαρύτητας.....	27
Εικόνα 2.6 Μπαταρία Σχεδιασμού Georges Leclanche.....	28
Εικόνα 2.7 Ξηρός συσσωρευτής του Gassner	29
Εικόνα 2.8 Πατέντα του Akira Yoshino.....	31
Εικόνα 2.9 Μπαταρία 1500κιλών 246kWh από ένα Hummer EV του 2023	32
Εικόνα 2.10 Σχηματικό Πυκνωτή	33
Εικόνα 2.11. Πυκνωτές Mica	34
Εικόνα 2.12 Πυκνωτής χαρτιού	34
Εικόνα 2.13 Πυκνωτές Ηλεκτρολυτικοί.....	35
Εικόνα 2.14 Πυκνωτές Ταντάλιου	35
Εικόνα 2.15 Η εξέλιξη των υπερπυκνωτών	37
Εικόνα 2.16 Κατασκευή υπερπυκνωτή	38
Εικόνα 2.17 (α) Δομή ηλεκτροστατικού πυκνωτή, (β) δομή του SC, (γ) μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος του SC	39
Εικόνα 2.18 Σύγκριση της πυκνότητας ενέργειας και ισχύος των συσκευών αποθήκευσης	40
Εικόνα 2.19 Πολιτικές και ενέργειες που απαιτούνται.....	41
Εικόνα 2.20 Παρακολούθηση μεταβλητών συστήματος.....	42

Εικόνα 2.21 Σχέδιο υβριδικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας	43
Εικόνα 3.1 Επίπεδα ενεργειακής διαχείρισης.....	49
Εικόνα 3.2 Στρατηγικές EMS.....	50
Εικόνα 3.3 Διάγραμμα Ασαφούς λογικής	53
Εικόνα 3.4 Διάγραμμα Ασαφή Ελέγχου	54
Εικόνα 4.1 Matlab.....	57
Εικόνα 4.2 Προβλεπόμενη τοπολογία: Πειραματική διάταξη με δύο μετατροπείς buck-boost συνδεδεμένους απευθείας στο DC BUS με έξοδο ισχύος απευθείας συνδεδεμένη με τη λειτουργία τροφοδοσίας και τον κύκλο λειτουργίας.....	59
Εικόνα 4.3 Μπαταρία Λιθίου, μοντέλο Thevenin	60
Εικόνα 4.4 Υπερ-πυκνωτής, μοντέλο RC	61
Εικόνα 4.5 Διάγραμμα ροής.....	66
Εικόνα 4.6 Διακεκριμένες πηγές ενέργειας SoC για την κάλυψη της ζήτησης ισχύος	67
Εικόνα 4.7 Λειτουργία ισχύος κινητήρα.....	67
Εικόνα 4.8 Φόρτιση εκφόρτιση και κάλυψη ζήτησης.....	68
Εικόνα 4.9 Προσομοίωση ελεγκτή ασαφούς λογικής με χρήση MATLAB/Simulink	69
Εικόνα 5.1. Παραλλαγές ισχύος εξόδου του HESS με βάση τη ζήτηση του συστήματος μετάδοσης κίνησης και τον κύκλο λειτουργίας.....	70
Εικόνα 5.2 Κατανομή ισχύος του υβριδικού συστήματος αποθήκευσης υπό διαφορετικά φορτία	71
Εικόνα 5.3 Διακυμάνσεις SOC των δύο πηγών χωριστά ανάλογα με την έξοδο του συστήματος μετάδοσης κίνησης	73
Εικόνα 5.4 Χρόνος λειτουργίας και τάση υπερπυκνωτών σε πέντε διακριτούς ρυθμούς	75
Εικόνα 5.5 Η τάση της μπαταρίας και ο χρόνος λειτουργίας μειώνονται σε χαμηλούς - υψηλούς ρυθμούς φόρτισης και θερμοκρασίες.....	76
Εικόνα 5.6 Το διάγραμμα απόδοσης της πειραματικής διάταξης.....	77

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Σύγκριση τοπολογιών	43
Πίνακας 2. Σύγκριση αποδόσεων των διαφόρων υβριδικών συστημάτων	51

Πίνακας 3. Κανόνες για τον προτεινόμενο ελεγκτή ασαφούς λογικής	65
Πίνακας 4. Τιμές διαγράμματος κατανομής ισχύος του υβριδικού συστήματος αποθήκευσης υπό διαφορετικά φορτία	72
Πίνακας 5. Ακολουθία δεδομένων	74
Πίνακας 6. Τιμές διαγράμματος απόδοσης της πειραματικής διάταξης.....	77
Πίνακας 7. Καταγραφή αποτελεσμάτων βιβλιογραφίας	78

Σκοπός και στόχοι

Στην παρούσα διπλωματική εργασία σκοπός είναι να αναπτύξουμε ένα μοντέλο διαχείρισης ενέργειας για ένα ηλεκτρικών όχημα το οποίο αποθηκεύει ενέργεια σε υπερ-πυκνωτές και μπαταρίες. Στόχος μας είναι να κρατήσουμε την μπαταρία εντός ασφαλών ορίων, διατηρώντας τη χωρητικότητα της στο μέγιστο βαθμό, εκμεταλλευόμενοι τις δυνατότητες των υπερ-πυκνωτών. Απώτερος στόχος είναι η βελτίωση της κατανάλωσης ενέργειας, η καλύτερες επιδόσεις και η αναβάθμιση του όγκου της κατασκευής.

Μια από τις καινοτομίες της εργασίας έγκειται στην εισαγωγή και κατηγοριοποίηση των μεθόδων διαχείρισης ισχύος, επιτρέποντας βελτιωμένες δυνατότητες κατανομής ισχύος, καθώς οι λειτουργικοί κύκλοι μπορούν να προσαρμόζονται συνεχώς, οδηγώντας σε πιο βελτιωμένο και ακριβή έλεγχο σε πραγματικό χρόνο.

Δομή

- Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ιστορία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Αναφέρονται όλα τα σημαντικά ιστορικά γεγονότα τα οποία συντέλεσαν ώστε να φτάσουμε τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα στην μορφή που είναι σήμερα.
- Στο 2^ο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα συστήματα ενέργειας ενός ηλεκτρικού οχήματος. Αναλύονται οι μπαταρίες, οι πυκνωτές και οι υπερπυκνωτές και το πως αυτά τα στοιχεία βοηθούν στην λειτουργία του οχήματος.
- Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας που χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα με ηλεκτρικό κινητήρα. Αναγράφεται η φιλοσοφία των συστημάτων αλλά και της ασαφής λογικής που θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα διπλωματική.
- Στο 4^ο κεφάλαιο αναπτύσσουμε το μοντέλο το οποίο θα εξετάσουμε δηλαδή ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας για ένα υβριδικό σύστημα ηλεκτρικού αυτοκινήτου βασισμένο στην ασαφή λογική με τη μεθοδολογία και το πειραματικό μέρος με χρήση του λογισμικού Matlab.
- Τέλος στο κεφάλαιο 5 αναγράφονται και αναλυτικά τα συμπεράσματα του μοντέλου.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Εισαγωγή στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο

Ηλεκτρικό αυτοκίνητο ονομάζουμε το όχημα το οποίο φέρει μέσο αποθήκευσης ενέργειας και συστήματα διαχείρισης αυτής, η οποία ωθεί το όχημα μέσω ηλεκτρικού κινητήρα. Η ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου αποθηκεύεται στο μέσο αποθήκευσης, στις περισσότερες περιπτώσεις σε μια μπαταρία, έπειτα χρησιμοποιείται για όλες τις λειτουργίες του οχήματος όπως η ώθηση αυτού. Είναι δύσκολο να εντοπίσει κανείς την εφεύρεση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου σε μια χώρα ή έναν εφευρέτη. Όλα ήταν μια σειρά από ανακαλύψεις οι οποίες ξεκίνησαν περίπου στη δεκαετία του 1830 και κατά την οποία κατασκευάστηκε το πρώτο ηλεκτρικό όχημα.

Το 1828 ένας Ούγγρος ιερέας και φυσικός ονόματι Anyos Jedlik εφηύρε ένα αρχικό τύπο ηλεκτρικού κινητήρα και δημιούργησε ένα μικρό μοντέλο ηλεκτρικού αυτοκινήτου [1]. Επίσης ένα πρώτο πρώιμο ηλεκτρικό όχημα ανέπτυξε και ο Robert Anderson γύρω στο 1832, όμως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα έγιναν πρακτικά μετά τη δεκαετία του 1870. Στη εικόνα 1.1 απεικονίζεται ένα ηλεκτρικό όχημα που κατασκευάστηκε λίγα χρόνια αργότερα από έναν Άγγλο εφευρέτη τον Thomas Parker.



Εικόνα 1.1 Όχημα του Thomas Parker

1.1 Τα πρώτα ηλεκτρικά αυτοκίνητα

Μόλις το 1859 είχαν κάνει την εμφάνισή τους, έπειτα από εφεύρεση του Γάλλου φυσικού Gaston Plante, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος ως ένα βιώσιμο μέσο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα όχημα [2]. Ένας άλλος Γάλλος επιστήμονας, ο Camille Alphonse Faure, αναβάθμισε το σχεδιασμό της μπαταρίας το 1881, με αποτέλεσμα να αυξηθεί κατά πολύ η χωρητικότητά της, κάτι το οποίο την οδήγησε άμεσα στην κατασκευή της σε βιομηχανική κλίμακα. Λίγους μήνες πριν στη Γαλλία ο εφευρέτης Gustave Troune βελτίωσε την απόδοση ενός ηλεκτρικού κινητήρα, που είχε αναπτυχθεί από τη Siemens, η οποία αγόρασε τα σχέδια από τον Johann Kravogl. Έπειτα ο ίδιος ο Troune τοποθέτησε τον ανεπτυγμένο κινητήρα και την προσφάτως αναβαθμισμένη μπαταρία σε ένα αγγλικό τρίκυκλο James Starley, έτσι δημιούργησε το πρώτο ηλεκτρικό όχημα στον κόσμο. (εικόνα 1.2)



Εικόνα 1.2 Το Πρώτο Ηλεκτρικό Όχημα

Στις Ηνωμένες Πολιτείες ένα άλλο ηλεκτρικό αυτοκίνητο κατασκευάστηκε από τον William Morrison από την Αϊόβα το 1890-91 [3]. Το όχημα ήταν ένα βαγόνι έξι επιβατών ικανό να φτάσει τη ταχύτητα των 23km/h. Ο κόσμος των ΗΠΑ άρχισε να στρέφει την προσοχή του στα ηλεκτρικά οχήματα μετά το 1895 όταν η A.L. Ryker παρουσίασε τα πρώτα ηλεκτρικά τρίκυκλα στις ΗΠΑ. Τη χρυσή τους εποχή γνώρισαν τα ηλεκτρικά οχήματα τις δεκαετίες του 1890 και στις αρχές του 1900 καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα σε σύγκριση με τα οχήματα που κινούνταν με άλλα καύσιμα, βενζίνη ή ατμό, είχαν πολλά πλεονεκτήματα. Ήταν αθόρυβα, ευκολοδήγητα χωρίς καθόλου ρύπους. Έτσι έγιναν γρήγορα δημοφιλή στους κατοίκους των πόλεων και περισσότερο στις γυναίκες. Η αύξηση της δημοτικότητας σε όλα τα κοινωνικά στρώματα έγινε εφόσον περισσότεροι άνθρωποι απέκτησαν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια οπότε και έγινε ευκολότερη η φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων.

Αρκετοί επαγγελματίες του κατασκευαστικού κλάδου εκείνης της εποχής παρατήρησαν την υψηλή ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων με αποτέλεσμα να αναζητήσουν τρόπους βελτίωσης της τεχνολογίας. Παραδείγματος χάρη, ο Ferdinand Porsche, ο ιδρυτής της εταιρείας των σπορ αυτοκινήτων Porsche, ανέπτυξε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο το 1898 με την ονομασία P1. Με λίγους μήνες διαφορά εφηύρε το πρώτο υβριδικό αυτοκίνητο στον κόσμο, ένα όχημα που κινείται με ηλεκτρισμό και κινητήρα αερίου. Ένας από τους μεγαλύτερους εφευρέτες παγκοσμίως, ο Thomas Edison, πίστευε πως τα ηλεκτρικά οχήματα ήταν η καλύτερη τεχνολογία γι' αυτό δημιούργησε μια μπαταρία αναβαθμισμένων αποδόσεων.

1.2 Η σκοτεινή εποχή

Ένα μοντέλο μαζικής παραγωγής του Henry Ford, που το ονόμασε T, έδωσε το πρώτο πλήγμα στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Παρουσιάστηκε το 1908, το model T έκανε τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα ευρέως διαθέσιμα [4]. Από το 1912 η τιμή ενός βενζινοκίνητου οχήματος ήταν μόνο στα 650 δολάρια σε αντίθεση με ένα ηλεκτρικό roadster του οποίου η τιμή ήταν στα 1750 δολάρια. Λίγες εβδομάδες

αργότερα ο Charles Kettering εφοδίασε τα βενζινοκίνητα οχήματα με ηλεκτρική μίζα, κάτι το οποίο εξάλειψε την ανάγκη για χειροκίνητο στρόφαλο και αύξησε τις πωλήσεις.

Μέχρι τη δεκαετία του 1920 οι ΗΠΑ βελτίωσαν το οδικό τους δίκτυο, ένα δίκτυο το οποίο ένωνε τις πόλεις, κάτι το οποίο έκανε τους Αμερικάνους να θέλουν να εξερευνήσουν. Σημαντικό γεγονός ήταν η ανακάλυψη του αργού πετρελαίου αφού η βενζίνη έγινε φθηνή και άμεσα διαθέσιμη για τους κατοίκους της υπαίθρου της Αμερικής με αποτέλεσμα τα πρατήρια βενζίνης να εμφανίζονται σε όλη τη χώρα σε σύγκριση με το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο ελάχιστη είχαν εκτός πόλεων. Κάπως έτσι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα εξαφανίστηκαν μέχρι το 1935. Για δεκαετίες η φθηνή και άφθονη βενζίνη μετά από την ανακάλυψη αποθεμάτων πετρελαίου αλλά και η συνεχής βελτίωση του κινητήρα εσωτερικής καύσης στάθηκαν εμπόδιο στην ανάπτυξη των οχημάτων με εναλλακτικά καύσιμα όπως τα ηλεκτρικά οχήματα. Ήταν μια "μαύρη" εποχή για τον κλάδο των ηλεκτρικών οχημάτων.

1.3 Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο αναγεννιέται

Προς τα τέλη της δεκαετίας του 1960 οι τιμές των υγρών καυσίμων ήταν συνεχώς αυξανόμενες – με κορύφωση το 1973 λόγω του αραβικού εμπάργκο – κάτι το οποίο προκάλεσε το ενδιαφέρον για την μείωση της εξάρτησης των ΗΠΑ από το ξένο πετρέλαιο και αναζήτηση εγχώριων πηγών καυσίμου [4]. Με σκοπό την απεξάρτηση η κυβέρνηση πλαισίωσε νόμους έρευνας και ανάπτυξης εξουσιοδοτώντας το τμήμα ενέργειας να ερευνήσει και να αναπτύξει ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. Πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες διαφόρων μεγεθών ξεκίνησαν την έρευνα με στόχο την ανάπτυξη οχημάτων τα οποία θα κινούνταν με εναλλακτικά καύσιμα, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Η General Motors κατασκεύασε ένα πρωτότυπο για ένα αστικό ηλεκτρικό όχημα το οποίο παρουσίασε το 1973.

Στη Βρετανία εκείνη την περίοδο το Συμβούλιο Ηλεκτρισμού ανακοίνωσε ένα διαγωνισμό για τη προμήθεια σε ηλεκτρικά οχήματα πόλης. Έτσι δόθηκε η ευκαιρία στον Γιάννη Γουλανδρή και στο τότε νέο του απόκτημα, την εταιρεία Enfield, να δηλώσουν συμμετοχή μαζί με δυο κολοσσούς της παγκόσμιας αυτοκινητοβιομηχανίας, την Ford και την Leyland, με σκοπό τη νίκη. Η Enfield κέρδισε τον διαγωνισμό με την δημιουργία του ηλεκτρικού οχήματος Enfield 8000 (εικόνα 1.3) και μαζί τον θαυμασμό σημαντικών συμμάχων [5]. Λόγο των εμποδίων στη Βρετανία, εκτεταμένες απεργίες, ο πανίσχυρος Γουλανδρής αποφάσισε να μεταφέρει την παραγωγή του ηλεκτρικού οχήματος στη νησιωτική Ελλάδα, στην πρωτεύουσα των Κυκλάδων τη Σύρο. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάστηκε το πρώτο ηλεκτρικό όχημα στην Ελλάδα. Κατάφεραν να ολοκληρωθούν μόλις 123 οχήματα λόγω των τεράστιων δυσκολιών στη γραφειοκρατία και στην φορολογία που επικρατούσε και επικρατεί στην Ελλάδα, με το εργοστάσιο να κλείνει με συνοπτικές διαδικασίες.



Εικόνα 1.3 Enfield 8000 Σύρος

Ένα χρόνο μετά κάνει το ντεμπούτο του στο Electric Vehicle Symposium στη Ουάσιγκτον το CitiCar της εταιρείας Vanguard-Sebring [6]. Το όχημα μπορούσε να αναπτύξει έως 30 mph και είχε αυτονομία 40 μιλίων (εικόνα 1.4).. Η εταιρεία ήταν η έκτη αυτοκινητοβιομηχανία στις ΗΠΑ μέχρι το 1975 αλλά διαλύθηκε λίγα χρόνια αργότερα λόγω του τέλους της πετρελαϊκής κρίσης του '70.



Εικόνα 1.4 CitiCar της εταιρείας Vanguard-Sebring

Στα μέσα τις ίδιας δεκαετίας και της επόμενης, αρκετοί κατασκευαστές αυτοκινήτων προσπάθησαν να μετατρέψουν τα μοντέλα τους σε ηλεκτρικά. Όμως η αγορά δεν ήταν έτοιμη για τόσο ακριβά και δύσκολα σε φόρτιση οχήματα. Τα περισσότερα οχήματα είχαν πωληθεί σε εταιρείες ηλεκτρικών υπηρεσιών κοινής ωφέλειας αλλά και σε κυβερνητικές υπηρεσίες. Έχοντας κατά νου τη μελλοντική ανάγκη για καθαρά αυτοκίνητα τα οποία δεν θα χρησιμοποιούσαν ορυκτά καύσιμα η ιαπωνική κυβέρνηση άρχισε να υποστηρίζει έντονα την έρευνα στον τομέα των ηλεκτρικών οχημάτων. Λίγα χρόνια αργότερα γύρω στο 1990 ψηφίζεται η τροποποίηση του νόμου για καθαρό αέρα και το 1992 ο νόμος για την ενεργειακή πολιτική συν τους νέους κανονισμούς για τις εκπομπές ρύπων τα οποία προκαλούν ανανεωμένο ενδιαφέρον για ηλεκτρικά οχήματα. Παρόλες τις δυσκολίες και με την βοήθεια των τροποποιήσεων για μια καθαρή ατμόσφαιρα οι επιστήμονες και οι μηχανικοί συνέχισαν να προσπαθούν, ελπίζοντας πως θα μπορούσαν να βελτιώσουν τις μπαταρίες, την αυτονομία και την ταχύτητα πλησιάζοντας αυτά των βενζινοκίνητων.

Ένα από τα σημαντικότερα γεγονότα στον τομέα των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν η εισαγωγή του μοντέλου Prius (εικόνα 1.5) της Toyota [7]. Κυκλοφόρησε στην Ιαπωνία το 1997 και έγινε το πρώτο υβριδικό ηλεκτρικό όχημα μαζικής παραγωγής στον κόσμο. Έγινε άμεση επιτυχία με σχεδόν 18,000 πωλήσεις. Έκτοτε οι αυξανόμενες τιμές της βενζίνης και η αυξανόμενη ανησυχία για τη ρύπανση από άνθρακα βοήθησαν το υβριδικό – ηλεκτρικό όχημα με τις μεγαλύτερες πωλήσεις παγκοσμίως.



Εικόνα 1.5 Toyota Prius 1997

Λίγους μήνες αργότερα, το 1999, η Honda παρουσιάζει στην Ιαπωνία το Insight το πρώτο της υβριδικό όχημα. Ήταν το πρώτο όχημα που διέθετε ολοκληρωμένο σύστημα υποβοήθησης. Ένα μήνα αργότερα εισάγει το όχημα στις Η.Π.Α καθιστώντας το ως το πρώτο υβριδικό όχημα διαθέσιμο στην χώρα. Επτά μήνες αργότερα φτάνει και το Toyota Prius στην Αμερική. Μέχρι το 2000 το Prius είχε γίνει διαθέσιμο σε όλο τον κόσμο, αφού η άμεση επιτυχία και η διασημότητες βοήθησαν στο να ανέβει

το προφίλ του αυτοκινήτου. Η Toyota χρησιμοποίησε μια υβριδική μπαταρία νικελίου-υβριδίου μετάλλου, μια τεχνολογία που υποστηρίχθηκε από το τμήμα έρευνας του Υπουργείου Ενέργειας, ώστε να κάνει το Prius πραγματικότητα.

1.4 Το μέλλον των ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Το πραγματικό σημείο καμπής των ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρία έρχεται το 2003, όταν δυο επιχειρηματίες με ονόματα Martin Eberhard και Marc Tarpenning είδαν μια ευκαιρία. Οι δυο επιχειρηματίες ιδρύουν την εταιρεία Tesla Motors. Τρία χρόνια αργότερα η εταιρεία παρουσιάζει στην Διεθνή έκθεση αυτοκινήτου το πρώτο της μοντέλο, το Tesla Roadster [8], (εικόνα 1.6). Η πρώτη πώληση του συγκεκριμένου μοντέλου έγινε το 2008 με αρχική τιμή 98.950,00 \$. Δημοφιλέστερα στοιχεία του αυτοκινήτου ήταν η επιτάχυνσή του από 0 σε 97 km/h σε 3,9 δευτερόλεπτα, η αποθήκευση ενέργειας στις μπαταρίες ιόντων λιθίου οι οποίες ήταν περίπου 6380 κελιά τοποθετημένα στο πίσω μέρος του οχήματος και η μεγάλη εμβέλεια που είχε ανά φόρτιση, η οποία έφτανε στα 393 km κάτι το οποίο ήταν πρωτότυπο για την εποχή του. Επίσης είναι το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο παραγωγής το οποίο μεταφέρθηκε στο βαθύ διάστημα με έναν πύραυλο Falcon της εταιρείας SpaceX.



Εικόνα 1.6 Tesla roadster 2008

Δυο χρόνια μετά η Nissan λανσάρει το Leaf το οποίο γίνεται το πρώτο ηλεκτρικό όχημα της εταιρείας, ενώ κυκλοφόρησε πρώτα στην Ιαπωνία και την Ευρώπη και ένα χρόνο αργότερα ξεκίνησε τις πωλήσεις στην Αμερική [3]. Η πρώτη έκδοση του Leaf είχε αυτονομία περίπου 170 km με μπαταρία η οποία φόρτιζε στο 80% σε χρονικό διάστημα 30 λεπτών. Είναι ένα αυτοκίνητο πόλης σχεδιασμένο για καθημερινή οδήγηση. Η αρχική του τιμή ήταν στα 32.780,00 \$. Το Leaf ξεπέρασε τις 300.000

πωλήσεις το 2018 και κέρδισε το στέμμα ως το ηλεκτρικό αυτοκίνητο με τις περισσότερες πωλήσεις στην ιστορία, όμως λίγους μήνες αργότερα νικήθηκε από τις πωλήσεις του Tesla Model 3.

Η μετέπειτα επιτυχία της Tesla ώθησε πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες να επιταχύνουν τις εργασίες για το λανσάρισμα δικών τους ηλεκτρικών μοντέλων, όπως έγινε με τη Nissan. Τα επόμενα χρόνια όπως ήταν αναμενόμενο άρχισαν να κυκλοφορούν διάφορα ηλεκτρικά οχήματα στις ΗΠΑ αλλά και σε όλο τον κόσμο. Ωστόσο, οι καταναλωτές άρχισαν να αντιμετωπίζουν τα πρώτα προβλήματα της φόρτισης των οχημάτων εν κινήσει. Μέσω νόμου για την ανάκαμψη, το τμήμα Ενέργειας επένδυσε περισσότερα από 110 εκατομμύρια δολάρια για την ανάπτυξη εθνικής υποδομής φόρτισης εγκαθιστώντας πάνω από 15.000 σταθμούς φόρτισης στην επικράτεια των Η.Π.Α. Το ίδιο παράδειγμα ακολούθησαν και σε άλλες χώρες του κόσμου με σκοπό την ανάπτυξη και προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Για την επίτευξη των στόχων για τη μείωση των ρύπων, αρκετές χώρες πήραν πρωτοβουλίες ώστε να κάνουν τα ηλεκτρικά οχήματα πιο προσιτά ως προς το κόστος αλλά και πιο ελκυστικά ως προς τα χαρακτηριστικά σε σύγκριση με τα βενζινοκίνητα οχήματα [9]. Η Αμερική για να μπορέσει να ωθήσει ακόμα περισσότερο τις εταιρείες χορηγεί δάνεια ύψους \$5,9 δισεκατομμυρίων στην Ford, \$1,6 δισεκατομμυρίων στην Nissan και \$465 εκατομμύρια στην Tesla. Η Ford τα αξιοποίησε για να μπορέσει να αναπτύξει ηλεκτρικά οχήματα. Η Nissan τα χρησιμοποίησε ώστε να επεκτείνει ένα από τα εργοστάσιά της για να μπορέσει να κατασκευάζει μπαταρίες ιόντων λιθίου. Η Tesla επένδυσε σε ένα νέο εργοστάσιο στη Νότια Καλιφόρνια ώστε να μπορέσει να φτιάξει το νέο της σεντάν Model S και τα υπόλοιπα για ένα ακόμη εργοστάσιο στη Βόρεια Καλιφόρνια για την κατασκευή μπαταριών και ηλεκτρικών συστημάτων μετάδοσης κίνησης.

Σε όλο τον κόσμο υπάρχει συνεχής αύξηση των πωλήσεων σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα ενώ η μεγαλύτερη επιτάχυνση στις πωλήσεις λαμβάνει χώρα στην Ευρώπη. Την πρωτιά σε αυτή τη λίστα διακατέχει η Νορβηγία, η οποία έχει ήδη καταργήσει σχεδόν εξ ολοκλήρου τις πωλήσεις οχημάτων εσωτερικής καύσης. Στη Νορβηγία σχεδόν το 80 τοις εκατό των νέων αυτοκινήτων που πωλούνται στη χώρα είναι πλήρως ηλεκτρικά, με στόχο να φτάσει στο 100% έως το 2025 – η πρώτη χώρα στον κόσμο που υλοποιεί κάτι τέτοιο. Μέχρι το 2035 αναμένεται ότι όλες οι μεγάλες αγορές αυτοκινήτων θα γίνουν ηλεκτρικές. Η ταχεία ανάπτυξη της ηλεκτρικής κινητικότητας δείχνει πως έχουμε φτάσει στο οριακό σημείο. Η ανάπτυξη δεν φαίνεται να επιβραδύνεται σύντομα καθώς οι κυβερνήσεις, οι εταιρείες και τα άτομα προσβλέπουν σε ένα βιώσιμο μέλλον. Πολλοί στρέφονται στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ως κύριο βήμα για την απαλλαγή από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου όπως διοξείδιό του άνθρακα

Επιπλέον από χρόνο σε χρόνο, αρκετές κυβερνήσεις και εταιρείες επιδιώκουν να ενισχύουν τις δεσμεύσεις τους για βιώσιμες μεταφορές [8]. Η Ευρωπαϊκή ένωση ανακοίνωσε ότι μέχρι το 2035 όλα τα νέα αυτοκίνητα που πωλούνται θα πρέπει να έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων. Ο πρόεδρος της Αμερικής είπε ότι το θέλει να δει τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα να καλύπτουν το 50% των νέων οχημάτων έως το 2030. Αρκετές είναι οι χώρες οι οποίες οδεύουν στο ίδιο μονοπάτι με σκοπό να περιορίσουν ή να απαγορεύσουν εντελώς τις πωλήσεις βενζινοκίνητων οχημάτων, συμπεριλαμβανομένου του Καναδά, του Ηνωμένου Βασιλείου, της Ιαπωνίας, πολλών πολιτειών στις ΗΠΑ αλλά και κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Σύμφωνα με αυτό πολλοί κατασκευαστές οχημάτων έχουν δηλώσει τις προθέσεις τους για διακοπή πωλήσεων οχημάτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης και να γίνουν ηλεκτροκίνητοι, σε ορισμένες τοποθεσίες. Για παράδειγμα, η GM σκοπεύει να σταματήσει να κατασκευάζει

βενζινοκίνητα οχήματα έως το 2035. Παρόμοιες δεσμεύσεις ανέλαβαν εταιρείες όπως Η Cadillac, η Honda, η Volvo, η Volkswagen, η Mercedes και η Jaguar. Οι εταιρείες για να μπορέσουν να πετύχουν τους στόχους τους στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα επενδύουν μεγάλα κεφάλαια στην ανάπτυξη και βελτίωση των μπαταριών, στην έρευνα για εύρεση νέων τύπων αποθήκευσης ενέργειας, στην ανάπτυξη εφαρμογών διαχείρισης ενέργειας, στη δημιουργία ειδικών αλγορίθμων και στρατηγικών αλλά και στη βελτίωση των χαρακτηριστικών του κάθε ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

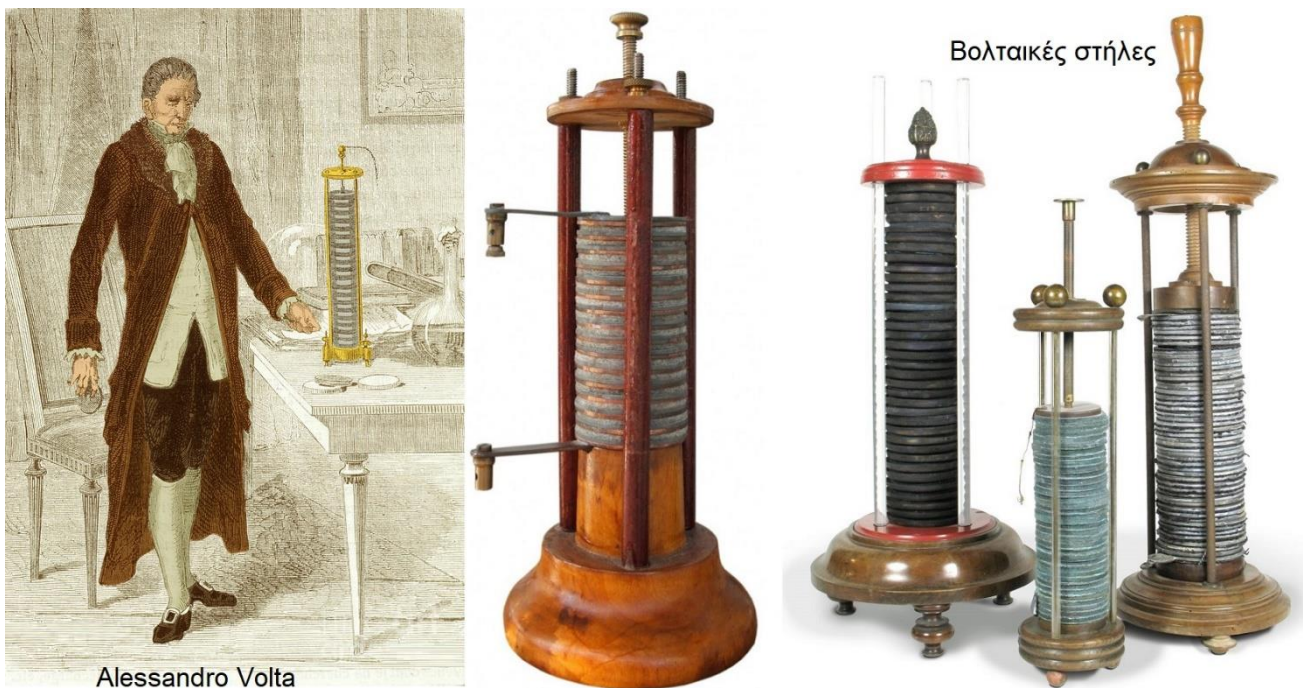
Το μέλλον δεν γνωρίζουμε τι μας επιφυλάσσει όμως οι τάσεις σε συνδυασμό με τις συνεχώς αυξανόμενες υποδομές φόρτισης, τις συνεχόμενες βελτιώσεις- αναβαθμίσεις των αυτοκινήτων αλλά και την έντονη ζήτηση για ηλεκτρικά οχήματα, δείχνουν ένα λαμπρό μέλλον για την ηλεκτροκίνηση.

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Συστήματα Ενέργειας

Ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο φέρει ποικίλους συνδυασμούς μέσω αποθήκευσης και συστημάτων διαχείρισης ενέργειας. Υπάρχουν μέσα αποθήκευσης τα οποία έχουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα άλλα έχουν μεγάλη πυκνότητα ισχύος ή ενεργειακή απόδοση και για κάθε εφαρμογή απαιτείται η σωστή ισορροπία για βέλτιστο αποτέλεσμα στον τροχό. Στην εφαρμογή την οποία μελετάμε θα αναλύσουμε συστήματα μπαταριών, υπέρ-πυκνωτών και των συνδυασμό αυτών.

2.1 Μπαταρίες

Η μπαταρία είναι η διάταξη η οποία συσσωρεύει χημική ενέργεια και την απελευθερώνει σε μορφή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μετατροπή γίνεται μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξείδωσης-αναγωγής κατά την οποία γίνεται η μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος [10]. Οι πρώτοι επιστήμονες που ασχολήθηκαν με την μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική ήταν ο Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta και ο Luigi Galvani. Έπειτα από μια μεγάλη σειρά πειραμάτων ο Βόλτα κατασκεύασε την πρώτη μπαταρία η οποία αποτελούταν από πλάκες ψευδαργύρου και χαλκού εναλλάξ που ανάμεσά τους είχαν ύφασμα εμβαπτισμένο σε αλατόνερο. Το 1798 ολοκλήρωσε κατασκευαστικά την πρώτη του «βολταϊκή στήλη» όπως φαίνεται και στη επόμενη εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1. Οι πρώτες μπαταρίες από τον Alesandro Volta

Λίγους μήνες αργότερα το 1801 ο Gautherot ,ο οποίος ήταν Γάλλος επιστήμονας, μετά από πειράματα είδε πως τα πλατινένια και ασημένια σύρματα που είχαν χρησιμοποιηθεί για πειράματα ηλεκτρολύσεως, ανέπτυσαν τα ίδια μικρή ποσότητα δευτερεύοντος ρεύματος κατόπιν της αποσύνδεσής τους από την κύρια μπαταρία [11]. Την ίδια ανακάλυψη έκανε και ο Ritter στο εργαστήριό του. Τοποθετώντας μια σειρά από κομμάτια χρυσού χωρισμένα από δίσκους υφάσματος, εμποτισμένα σε αλατούχο διάλυμα, δημιούργησε την πρώτη επαναφορτιζόμενη μπαταρία.

Εφαρμόζοντας ηλεκτρικό ρεύμα από μια βολταϊκή μπαταρία με περισσότερα στοιχεία σε αυτή την ανενεργή από μόνη της μπαταρία παρατηρήθηκε πως απέδιδε ρεύμα προς την αντίθετη κατεύθυνση από εκείνη της βολταϊκής μπαταρίας. Το ρεύμα αυτό ονομάστηκε δευτερογενές όπως δευτερογενές ονομάστηκαν και οι μπαταρίες οι οποίες μπορούσαν να φορτιστούν ξανά. Επίσης διαπιστώθηκε πως η επαναφόρτιση των μπαταριών μπορούσε να γίνει πολλές φορές και ότι με τη βοήθεια αντίστροφου εφαρμοζόμενου ρεύματος η αρχική σύνθεση των ηλεκτροδίων μπορούσε να αποκατασταθεί όπως δείχνει η Εικόνα 2.2.



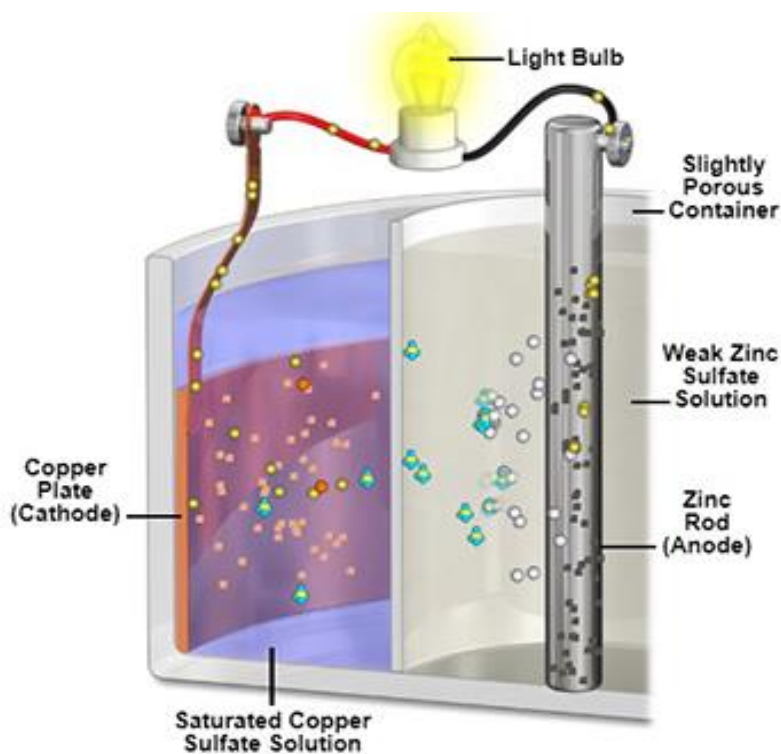
Εικόνα 2.2 Πρώτη μπαταρία παραγωγής του Cruickshank

Το 1802, ο William Cruickshank κατασκεύασε την πρώτη μπαταρία μαζικής παραγωγής. Μέσα σε ένα μακρύ ορθογώνιο ξύλινο κουτί τοποθέτησε τετράγωνα φύλλα χαλκού, τα οποία τα συγκόλλησε στα άκρα μεταξύ τους με φύλλα ψευδαργύρου ίσου μεγέθους και όλα αυτά ήταν σφραγισμένα με τσιμέντο [12]. Τις πλάκες κρατούσαν στη θέσης τους οι ειδικές εσοχές μέσα στο ξύλινο κουτί και στη συνέχεια γέμιζε με ηλεκτρολύτη άλμης ή με αραιωμένο οξύ το κουτί. Ένα πρόβλημα της βολταϊκής στήλης λυνόταν με αυτόν τον τρόπο, στο οποίο λόγω βάρους των πλακών παρατηρείτο διαρροή ηλεκτρολύτη. Κίνδυνος διαρροής δεν υπήρχε εφόσον το ξύλινο κουτί παρέμενε ανέπαφο. Η μπαταρία αυτή, του William Cruickshank, παρήγαγε περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια συγκριτικά με του Volta.

Ο Johann Wilhelm Ritter, ένας φυσικός με καταγωγή από τη Γερμανία, ήταν ο πρώτος που παρουσίασε τα στοιχεία από τα οποία αποτελούνταν μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία. Επίσης ήταν από τους πρώτους που αναγνώρισε την πόλωση των μπαταριών (+ και -). Εκείνη την εποχή δεν είχε εφευρεθεί ο φορτιστής και δυστυχώς δεν υπήρχε κάποιος πρακτικός τρόπος να επαναφορτιστεί η μπαταρία, κάτι το οποίο συνέβη αρκετά χρόνια αργότερα. Ο Ritter χρησιμοποιούσε στα πειράματά του δευτερεύουσες μπαταρίες, οι οποίες σχηματίστηκαν από δίσκους χαλκού χωρισμένους με κυκλικά κομμάτια υφάσματος εμποτισμένα σε άλατα αμμωνίας ή αλατούχο νερό. Φορτίζοντας μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία αποτελούμενη από μια στήλη 50 χάλκινων δίσκων, με τη βοήθεια μια μπαταρίας ψευδαργύρου και χαλκού εκατό ζευγών, διαπίστωσε αποσύνθεση νερού, χημικές ή

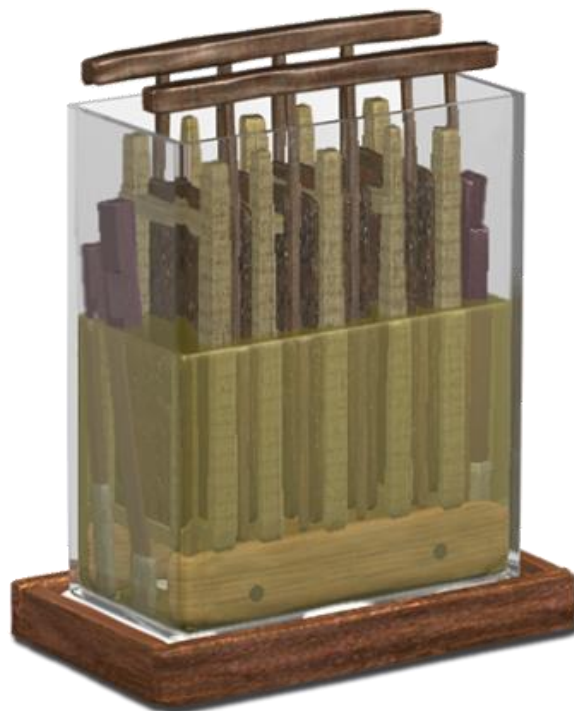
φυσιολογικές δράσεις και επιδράσεις οι οποίες γινόντουσαν στις συνηθισμένες για την εποχή μπαταρίες. Παρ' όλες της προσπάθειες του Ritter οι μπαταρίες του δεν κατάφεραν να χρησιμοποιηθούν ούτε στο εμπόριο ούτε και στην επιστημονική έρευνα, λόγω της διάταξης αυτών, της μικρής χωρητικότητας και απόδοσης αλλά και της ανάγκης χρήσης μια μπαταρίας μεγαλύτερου αριθμού στοιχείων για τη φόρτισή της.

Λίγα χρόνια αργότερα, το 1836, ένας Άγγλος χημικός, ο John F. Daniell αύξησε την απόδοση του σχεδιασμό του Volta βρίσκοντας τρόπο ώστε να αποφευχθούν τα προβλήματα διάβρωσης των μπαταριών. Ο Daniell ανέπτυξε ένα συσσωρευτή που ήταν αδύνατο να επαναφορτιστεί μετά την πρώτη αποφόρτισή του. Στο στοιχείο που ήταν γνωστό ως στοιχείο Daniell, το αρνητικό ηλεκτρόδιο ήταν μια ράβδος από καθαρό ψευδάργυρο τοποθετημένη μέσα σε έναν ηλεκτρολύτη (θειικό οξύ), όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.3. Ο ψευδάργυρος, για την προστασία του από το οξύ, καλυπτόταν με στρώμα υδραργύρου. Το θετικό ηλεκτρόδιο ήταν ένα χάλκινο δοχείο που περιείχε θειικό οξύ κορεσμένο με θειούχο χαλκό. Το στοιχείο αυτό ανέπτυξε πιο σταθερό ρεύμα από τις προηγούμενες μπαταρίες που είχαν κατασκευαστεί μέχρι τότε και ήταν ο προπομπός της αλκαλικής μπαταρίας



Εικόνα 2.3 Μπαταρία του John Daniell

Το 1854 ο Wilhelm Josef Sinstedden εφήυρε και κατασκεύασε την μπαταρία μόλυβδου – οξέος που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.4 [13]. Δημοσίευσε τα εργαστηριακά του αποτελέσματα σχετικά με τη χρήση πλακών μόλυβδου σαν ηλεκτρόδια και αραιωμένου θειικού οξέος ως ηλεκτρολύτη. Κατά την περίοδο των δοκιμών ο Sinstedden παρατήρησε πως αυξανόταν η χωρητικότητα αποθήκευσης του κυττάρου μόλυβδου – οξέος μετά από μια σειρά κύκλων φόρτισης – αποφόρτισης. Ακόμα ανακάλυψε ότι ο κύκλος φόρτισης δημιουργούσε στη μια πλάκα διοξείδιο του μόλυβδου και στη άλλη πλάκα καθαρό μόλυβδο, αποτέλεσμα αυτού ήταν η αύξηση του ρεύματος εξόδου.



Εικόνα 2.4 Βελτιωμένη έκδοση μπαταρίας μολυβδου-οξέως

Λίγου μήνες αργότερα, ο Gaston Plante βελτιώνει την έκδοση της μπαταρίας μολυβδου – οξέος του Wilhelm Josef Sinstedden, στο εργαστήριό του στο Παρίσι της Γαλλίας [12-13]. Η μπαταρία αποτελούνταν από μια σειρά γυάλινων δοχείων τα οποία περιείχαν θειικό οξύ και πλάκες μολυβδου, ζύγιζε περίπου 35 κιλά, ο όγκος της ήταν μερικά κυβικά μέτρα και η τάση στα άκρα της ήταν 4,5 volt. Αναζητώντας λύση ώστε να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας, έπειτα από πειράματα, διαπίστωσε πως έπρεπε να αυξήσει την επιφάνεια των πλακών όσο περισσότερο μπορούσε. Έτσι, οδηγήθηκε στην κατασκευή ενός δευτερεύοντος στοιχείου μεγάλης ποσότητας ή δύναμης. Χρησιμοποίησε διάταξη η οποία περιείχε πλάκες διαχωρισμένες η μια από την άλλη από ένα παχύ ύφασμα, συνδεδεμένες παράλληλα και βυθίζοντας τη συστοιχία σε ένα γυάλινο βάζο γεμάτο με νερό όξινο με δέκατο μέρος θειικού οξέος. Η βελτίωση αυτή του Plante κατέστησε εμπορικά βιώσιμη την πατέντα του Sinstedden. Ίσως το πιο γνωστό παράγωγο της μπαταρίας μολυβδου-οξέος Plante σήμερα είναι η μπαταρία αυτοκινήτου στα 12V.

Το 1860 ο Callaud, με γαλλική καταγωγή, παρουσίασε μια παραλλαγή του στοιχείου Daniell, το στοιχείο βαρύτητας [14]. Η έκδοση αυτή απαλλάσσεται από το πορώδες διαχωριστικό για την απομόνωση των ηλεκτροδίων. Αποτελείται από ένα γυάλινο βάζο στο οποίο η χάλκινη κάθοδος τοποθετείται στον πυθμένα του και η άνοδος, η οποία είναι από ψευδάργυρο, αναρτάται κάτω από το χείλος του δοχείου, όπως παρατηρείται στην εικόνα 2.5. Κρύσταλλοι θειικού χαλκού διασκορπίζονται γύρω από την κάθοδο και έπειτα το βάζο γεμίζεται με απεσταγμένο νερό. Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, σχηματίζεται στην κορυφή και γύρω από την άνοδο, ένα στρώμα διαλύματος θειικού ψευδαργύρου. Η ανώτερη στιβάδα διαχωρίζεται από την κάτω στιβάδα θειικού χαλκού λόγω της χαμηλότερης πυκνότητάς της και της πολικότητας του στοιχείου. Η στιβάδα θειικού χαλκού είχε βαθύ μπλε χρώμα ενώ η στιβάδα θειικού ψευδαργύρου ήταν διάφανη, αποτέλεσμα αυτού ήταν η ευκολία της μέτρησης ζωής της μπαταρίας από έναν τεχνικό με μια ματιά. Ένα βασικό μειονέκτημα της μπαταρίας αυτή είναι πως πάντα έπρεπε να διατηρείται σε σταθερή θέση αλλιώς τα χημικά στοιχεία θα μπορούσαν να αναμειχθούν ή να χυθούν. Επιπλέον μειονέκτημα του στοιχείου βαρύτητας

ήταν ότι έπρεπε να εκφορτίζεται συνεχώς με ένα μικρό ρεύμα κατανάλωσης ώστε να μην αναμειγνύονται τα δυο διαλύματα με διάχυση, άρα το στοιχείο κρίνεται ακατάλληλο για διακοπτόμενη χρήση.

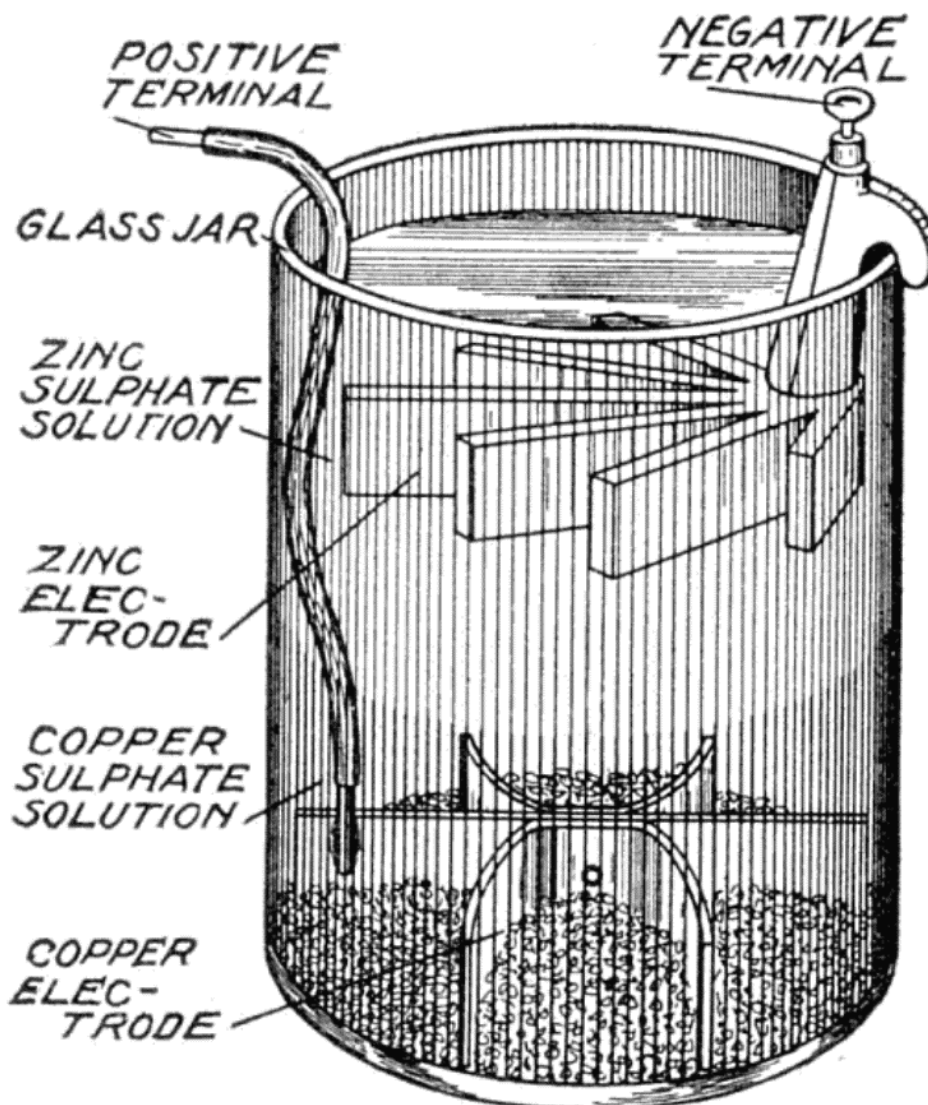
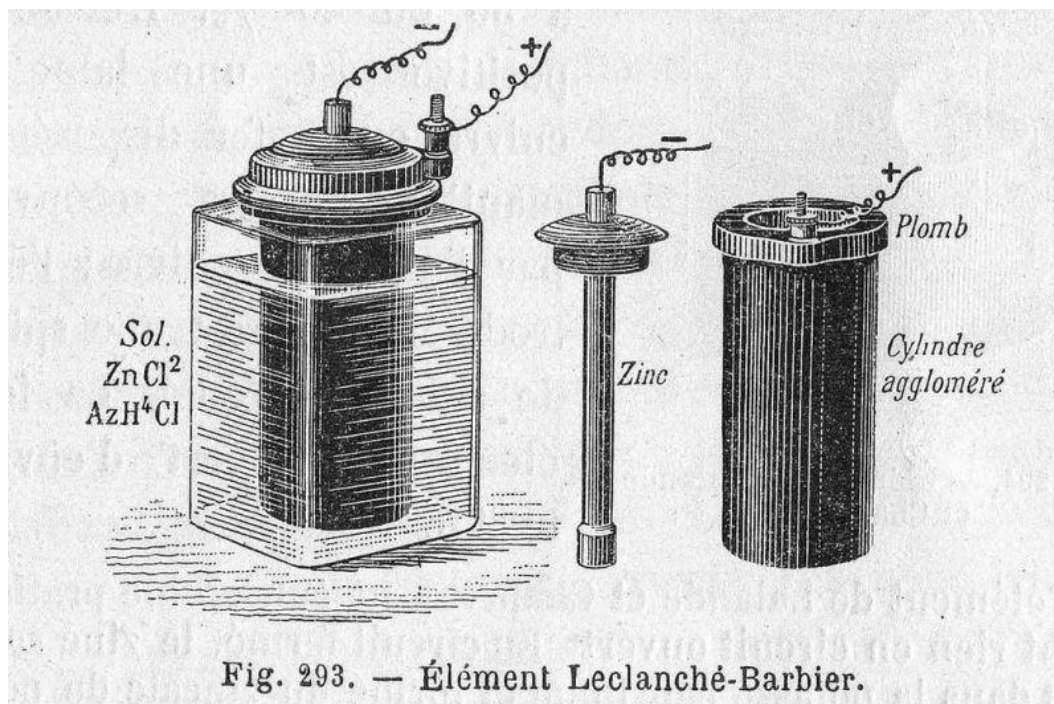


Fig. 64. Gravity Cell

Εικόνα 2.5 Κυψέλη βαρύτητας

Ένας ακόμα Γάλλος χημικός, ο Georges Leclanche γεννημένος στην Parmain της Γαλλίας σχεδίασε ένα "υγρό" στοιχείο το 1866 [15]. Η μπαταρία ψευδαργύρου- άνθρακα, η οποία ονομάζεται και μπαταρία του Leclanche, περιέχει ένα άλλο είδος κυψελών από τις προηγούμενες εκδόσεις μπαταριών. Για τα ηλεκτρόδια χρησιμοποίησε ψευδάργυρο και μίγμα διοξειδίου του άνθρακα-μαγγανίου. Ο σχεδιασμός της κυψέλης του Leclanche, η οποία ονομάζεται υγρή κυψέλη, πλήρωσε την κάθοδο μέσα σε ένα πορώδες δοχείο, το οποίο στη συνέχεια βυθίστηκε, μαζί με την άνοδο, σε διάλυμα χλωριούχου αμμωνίου (εικόνα 2.6). Ο ηλεκτρολύτης μπορούσε εύκολα να διαρρεύσει μέσα από το δοχείο και να συνδέσει την άνοδο με την κάθοδο ηλεκτρικά. Δεν ήταν επαναφορτιζόμενη και

δεν ήταν σε θέση να παράγει σταθερή ηλεκτρική ενέργεια όμως με τάση 1.5 V φαινόταν ιδανική για εφαρμογές που χρειαζόταν σύντομες εκρήξεις ρεύματος ή απαιτούν λίγη συντήρηση [16].



Εικόνα 2.6 Μπαταρία Σχεδιασμού Georges Leclanche

Παραμένοντας στη Γαλλία, το 1880, ένας χημικός με γαλλική καταγωγή, ο Camille Alphonse Faure αναβάθμισε σημαντικά τη σχεδίαση της μπαταρίας μόλυβδου-οξέος του Plante [17]. Κατοχύρωσε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια μέθοδο επικάλυψης πλακών μόλυβδου με μια πάστα από νερό, θεικό οξύ και μόλυβδο, στην οποία έπειτα με ελαφρά θέρμανση σε υγρή ατμόσφαιρα γινόταν η σκλήρυνση. Αποτέλεσμα της διαδικασίας σκλήρυνση ήταν η αλλαγή της πάστας σε ένα μείγμα θεικών μόλυβδου που προσκολλήθηκε στην πλάκα μόλυβδου. Κατά την φόρτιση η ωριμασμένη πάστα μετατράπηκε σε ηλεκτροχημικά ενεργό υλικό και έδωσε σημαντική αύξηση χωρητικότητας συγκρίνοντάς την με την μπαταρία του Plante. Μπαταρίες με ίδια μέθοδο κατασκευής χρησιμοποιούμε έως και σήμερα στα αυτοκίνητα, με βελτιώσεις όσον αφορά τη σύνθεση οξειδίου και της κατασκευαστικής δομής των πλακών. Το 1886 η μπαταρία του Faure χρησιμοποιήθηκε για να τροφοδοτήσει το πρώτο ηλεκτροκίνητο υποβρύχιο. Επιπλέον η ίδια μπαταρία είναι ο βασικός λόγος που το Παρίσι ονομάζεται πόλη των φωτών, διότι ο συγκεκριμένος τύπος συσσωρευτή χρησιμοποιήθηκε για να φωτίσει με ηλεκτρικούς λαμπτήρες έναν δρόμο του Παρισιού, κάτι που δεν είχε συμβεί ξανά μέχρι τότε στην ανθρώπινη ιστορία.

Την ίδια χρονιά, το 1886, ο Carl Gassner, ένας Γερμανός επιστήμονας, εφηύρε τον πρώτο ξηρό συσσωρευτή [18]. Ο Gassner χρησιμοποίησε ψευδάργυρο σαν δοχείο για να στεγάσει τα άλλα συστατικά του στοιχείου. Χρησιμοποίησε ως άνοδο το σφραγισμένο δοχείο ψευδαργύρου. Στο κέντρο υπήρχε μια ράβδος άνθρακα βυθισμένη σε διοξείδιο του μαγγανίου ως κάθοδο (εικόνα 2.7). Ταυτόχρονα το χλωριούχο αμμώνιο αναμίχθηκε με γύψο δημιουργώντας μια μάζα στην οποία προσθέτοντας μια ποσότητα χλωριούχου ψευδαργύρου ολοκληρώνοντας τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος μείωσε σημαντικά τη διάβρωση του ψευδαργύρου όταν το στοιχείο ήταν σε αδράνεια και αύξησε σημαντικά τη διάρκεια ζωής του. Αντίθετα με τις προηγούμενες εκδόσεις που ήταν από υγρά στοιχεία,

δεν μπορούσε να χυθεί και ήταν εφικτό να αξιοποιηθεί με οποιονδήποτε προσανατολισμό τοποθετημένη. Το δυναμικό της μπαταρίας ήταν 1,5V.



Εικόνα 2.7 Ξηρός συσσωρευτής του Gassner

Κατά τη διάρκεια των επόμενων χρόνων αρκετές είναι οι εταιρείες οι οποίες θα ιδρυθούν ώστε να κατασκευάζουν μπαταρία ευρείας παραγωγής. Αρκετοί ήταν οι επιστήμονες οι οποίοι ίδρυσαν τα δικά τους εργοστάσια με σκοπό την μεγιστοποίηση της παραγωγής με βασικό συστατικό την εφεύρεσή τους. Οι μπαταρίες θα αξιοποιούνταν σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα, ηλεκτρικό φωτισμό, φακούς, βιομηχανία, ραδιόφωνα και για άλλες φορητές συσκευές. Μερικές από τις εταιρείες που ιδρύθηκαν από το 1886 έως το 1900 είναι οι Accumulatore Fabrik (AFA μετέπειτα VARTA), Electric storage Battery πρόγονος της Exide, The Chloride Electrical Syndicate Limited (Chloride Group), Philco (άνηκε στη Philips) και η National Carbon Battery η οποία στη συνέχεια έγινε Eveready Battery Company και σήμερα γνωστή ως Energizer.

Το 1899, ο Ernst Waldemar Jungner, με καταγωγή από τη Σουηδία, επινόησε την επαναφορτιζόμενη μπαταρία νικελίου καδμίου (NiCd). Η μπαταρία περιλάμβανε ως ηλεκτρόδια, νικέλιο για την άνοδο και κάδμιο για τη κάθοδο, σε διάλυμα υδροξειδίου του καλίου. Ήταν η πρώτη μπαταρία με αλκαλικό ηλεκτρολύτη [19]. Τα αρχικά μοντέλα του συσσωρευτή νικελίου-καδμίου ήταν καλύτερα κατασκευαστικά και είχαν αρκετά μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από τις προηγούμενες μπαταρίες. Ένα μειονέκτημά τους ήταν το υψηλό κόστος των υλικών σε σύγκριση με το ξηρό στοιχείο και την μπαταρία μόλυβδου-οξέος κάτι το οποίο περιόριζε τη χρήση τους.

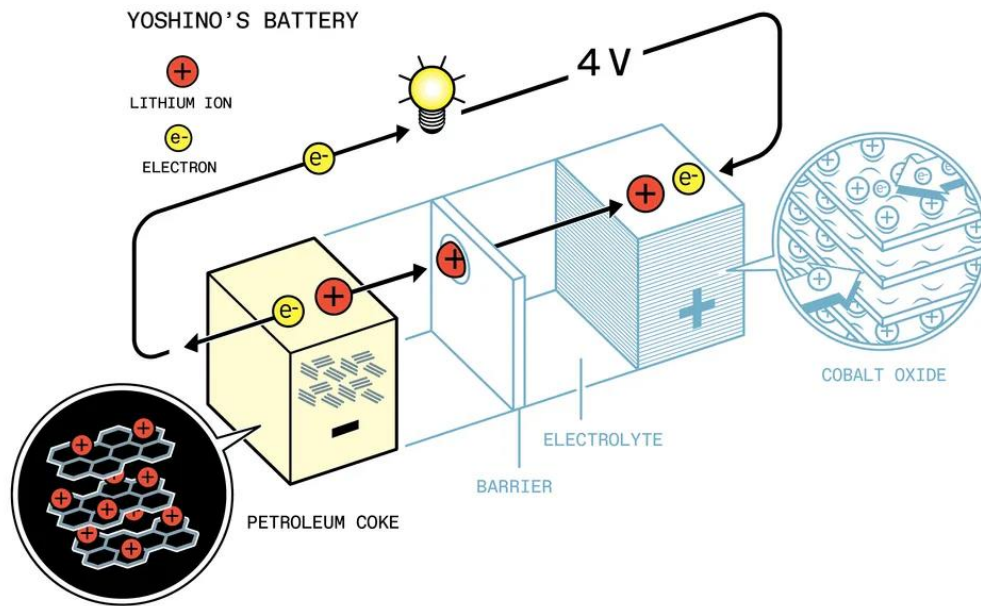
Από το 1902 έως το 1932 δεν παρουσιάστηκαν σημαντικές βελτιώσεις στις μπαταρίες. Τότε ο Ackermann και ο Shlecht κατάφεραν την αύξηση του ρεύματος φορτίου και της διάρκειας ζωής των

μπαταριών νικελίου-καδμίου. Η βελτίωση που τους έδωσε αυτά τα αποτελέσματα ήταν με χρήση πορώδους πλάκας στους πόλους της μπαταρίας.

Την επινόηση της πρώτης μπαταρίας τύπου gel έκανε ο Fabrik Sonneber το 1934. Η συγκεκριμένη μπαταρία έχει την ίδια αρχή με τη μπαταρία μόλυβδου-οξέος με τη διαφορά ότι ο ηλεκτρολύτης είναι σταθερός. Ο ηλεκτρολύτης έχει τη μορφή πάστας σαν gel που δημιουργείται με την προσθήκη πυριτίου και άλλων παραγόντων πηκτώματος στον ηλεκτρολύτη. Οι μπαταρίες gel μειώνουν την εξάτμιση του ηλεκτρολύτη, τη διαρροή που υπάρχει στην μπαταρία υγρού στοιχείου και διαθέτουν καλύτερη αντοχή σε κραδασμούς. Χημικά είναι παρόμοιες με τις υγρού στοιχείου με τη διαφορά πως το αντιμόνιο στις πλάκες μόλυβδου αντικαθίσταται από ασβέστιο.

Το 1950, ξεκινάει η βιομηχανοποιημένη παραγωγή μπαταριών βαθιάς εκφόρτισης για διάφορες εφαρμογές [20]. Εντός του ίδιου έτους κατασκευάζεται η πρώτη μπαταρία με τάση 12V για την ικανοποίηση των αυξημένων ενεργειακών αναγκών των οχημάτων. Οι πρώτες εταιρείες που τοποθέτησαν στα αυτοκίνητά τους μπαταρίες 12V ήταν η Cadillac, η Oldsmobile και η Buick. Τρεις δεκαετίες αργότερα, το 1985, με πρωτοπόρο τον Akira Yoshino μια ομάδα ερευνητών κατασκευάζει την πρώτη μπαταρία ιόντων λιθίου (Li-ion). Μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία η οποία ήταν μια πιο σταθερή εκδοχή της μπαταρίας λιθίου. Λίγους μήνες αργότερα, το 1986, ο Stanford Ovshinsky κατοχυρώνει με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας την μπαταρία NiMH νικελίου-υβριδίου μετάλλου. Με την αισθητή βελτίωση της τεχνολογίας τώρα, οι μπαταρίες NiMH έχουν αρχίσει και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αυτοκινήτων υψηλής τάσης όπως υβριδικά και ηλεκτρικά. Κάτι τέτοιο πέτυχε διότι η ενεργειακή πυκνότητα είναι υπερδιπλάσια σε σύγκριση με την μπαταρία μόλυβδου-οξέος και 40% μεγαλύτερη από αυτήν της μπαταρίας νικελίου-καδμίου. Επίσης έχουν καλύτερο αποτύπωμα στο περιβάλλον.

Πίσω στις αρχές τις δεκαετίας του 1970, ο νεαρός τότε Βρετανός χημικός Whittingham συμμετείχε στις έρευνες της EXXON για εναλλακτικές λύσεις πετρελαίου. Ανέπτυξε σε σύντομο χρονικό διάστημα από την έναρξη της έρευνας μια μπαταρία με μια κάθοδο τιτανίου – δισουλφιδίου και έναν ηλεκτρολύτη υγρό που χρησιμοποιούσε ιόντα λιθίου. Έδειχνε να ήταν η αρχή για κάτι μεγάλο όμως η εφεύρεσή του ήταν πολύ νωρίς και η αγορά μικρή. Στη συνέχεια ο Goodenough, εξοικειωμένος με το έργο του Whittingham, και ο ερευνητής Koichi Mizushima άρχισαν να ερευνούν τις μπαταρίες παρεμβολής λιθίου [21]. Έως το 1980 είχαν αναβαθμίσει τον σχεδιασμό του Whittingham, αλλάζοντας το δισουλφίδιο του τιτανίου με οξείδιο του κοβαλτίου, με αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης της μπαταρίας στα 4 βολτ. Το 1981 η πατέντα του Goodenough κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Έπειτα ο Akira Yoshino, ένας χημικός 34 χρονών τότε στην Asahi Chemical στην Ιαπωνία, μαζί με μια μικρή ομάδα συναδέλφων συνδύασε την κάθοδο από την κατοχυρωμένη πατέντα του Goodenough με την άνοδο αλουμινίου (εικόνα 2.8). Έκαναν δοκιμές προσπαθώντας να συνδυάσουν την κάθοδο με διάφορα άλλα υλικά ανόδου, κυρίως κατασκευασμένα από διαφορετικούς τύπους άνθρακα. Τελικά η ομάδα κατέληξε να εγκαταστήσει μια άνοδο με βάση τον γραφίτη [22]. Η εταιρεία Asahi Chemical λόγω του ότι ήταν εταιρεία χημικών, και όχι κατασκευαστής μπαταριών δεν είχε την τεχνογνωσία ώστε να μπορέσει να κατασκευάσει μπαταρίες παραγωγής σε εμπορική κλίμακα. Έτσι ο Yoshino και ο Isao Kuribayashi, ένα στέλεχος της εταιρείας και μέλος την ομάδας που δημιούργησε την μπαταρία, ξεκίνησαν την αναζήτηση συμβούλων και εταιρειών, οι οποίοι θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην κατασκευή της νέας αυτής για την εποχή μπαταρίας.



Εικόνα 2.8 Πατέντα του Akira Yoshino

Κατόπιν της πρώτης προσπάθειας, με την εταιρεία Battery Engineering και αφού η διοίκηση της Asahi Chemical φοβόταν να συνεργαστεί με αυτήν, ο Kuribayashi δεν τα παράτησε. Τον Ιανουάριο του 1987 ο Isao επισκέφτηκε το τμήμα βιντεοκαμερών της Sony ώστε να παρουσιάσει τη νέα εφεύρεση της εταιρείας του [23]. Η Sony όχι μόνο αναγνώρισε την αξία της νέας μπαταρίας αλλά προχώρησε και στην μετατροπή αυτού του ακατέργαστου πρωτότυπου σε προϊόν. Μετά από μια σειρά βελτιώσεων η Sony δημιούργησε ένα αληθινά εμπορικό προϊόν. Έτσι το 1991 η Sony παρουσιάζει την μπαταρία βαφτίζοντάς την, το γνωστό σε όλους πλέον, « ιόντων λιθίου ». Άμεσα ξεκίνησε να μπαίνει σε βιντεοκάμερες και έπειτα σε κινητά τηλέφωνα και ηλεκτρονικές συσκευές.

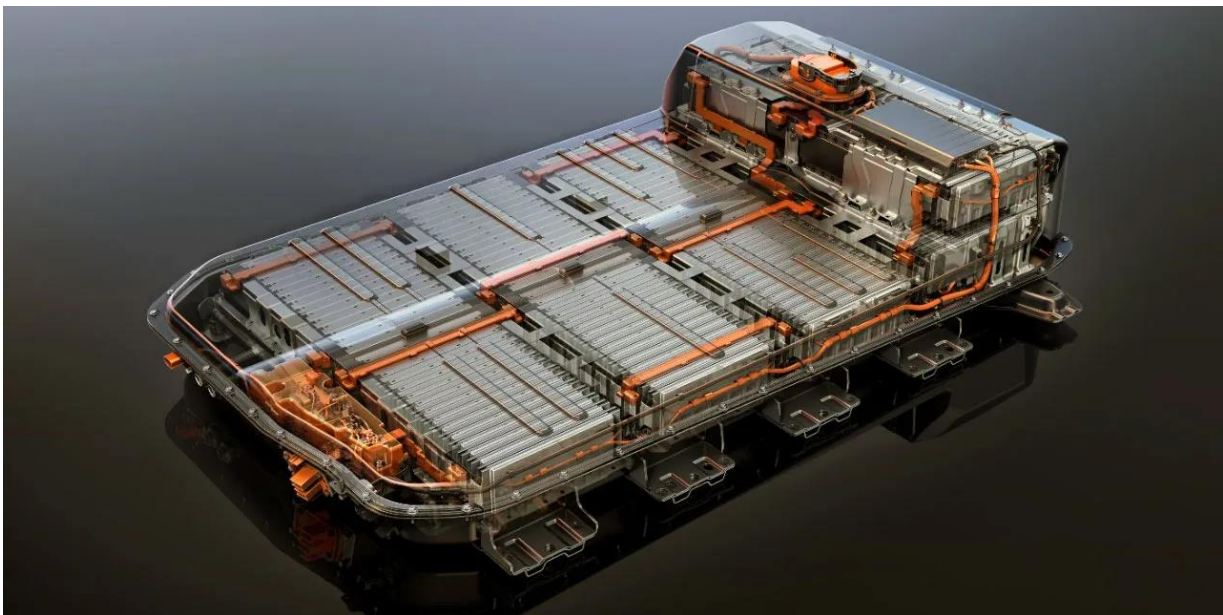
Στα τέλη της τελευταία δεκαετίας του 20^{ου} αιώνα, το πρώτο κύμα ηλεκτρικών οχημάτων – αναπτύχθηκαν μετά από οδηγίες από την κυβέρνηση της Καλιφόρνια για οχήματα εναλλακτικών καυσίμων - ήταν εξοπλισμένο με μπαταρίες τεχνολογίας NiMH με αρκετή επιτυχία για την εποχή [20-23]. Σύμφωνα με τον John M. German στην εγκυκλοπαίδεια της Ενέργειας οι μπαταρίες NiMH είναι δημοφιλείς επειδή « είναι εντελώς ασφαλείς και η ισχύς εξόδου τους δεν επηρεάζεται από την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας » κάτι το οποίο σημαίνει πως η τάση εξόδου παραμένει σταθερή ώσπου η μπαταρία να εξαντληθεί πλήρως. Αυτά τα χαρακτηριστικά δείχνουν ιδανικά για εφαρμογές σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα, γι' αυτό οι αυτοκινητοβιομηχανίες υιοθέτησαν μπαταρίες NiMH ύστερα από την εφεύρεση του Ovshinsky.

Ωστόσο δεν υπήρχε έντονο ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά οχήματα της δεκαετίας του 1990 διότι χρειαζόταν αρκετός χρόνος ώστε να αναπτύξουν ταχύτητα, περίπου 18 δευτερόλεπτα από 0 σε 60 mph, και η αυτονομία ήταν μόλις 100 μιλίων. Αναγκαία ήταν η εύρεση λύσης τόσο για περισσότερη αυτονομία όσο και για περισσότερη ισχύ [24]. Την λύση ήρθε να δώσει η πρόοδος των μπαταριών ιόντων λιθίου (Li-ion) που ήδη είχε χρησιμοποιηθεί σε προϊόντα τεχνολογίας. Μια μπαταρία η οποία διαθέτει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα με χαμηλό βάρος, καλή απόδοση σε υψηλή θερμοκρασία, χαμηλή συντήρηση, μεγάλη διάρκεια ζωής καθώς και μικρό ρυθμό αποφόρτισης σε αδράνεια σε σύγκριση με την μπαταρία NiMH νικελίου – υβριδίου μετάλλου. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν εξαιρετική ενεργειακή πυκνότητα η οποία αγγίζει της 270 Wh ανά κιλό, σχεδόν τετραπλάσια από μια

μέση μπαταρία NiMH. Εκδόσεις μπαταριών ιόντων λιθίου υπάρχουν αρκετές όμως όλες έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό, έχουν υγρό ηλεκτρολύτη άλατος λιθίου. Η πρώτη μπαταρία Li-ion σε ηλεκτρικό όχημα εγκαταστάθηκε στο Nissan Altra EV το 1998. Για να κατασκευαστούν απαιτούν μεγάλες ποσότητες επικίνδυνων υλικών κάνοντας δύσκολη την μαζική παραγωγή. Μια μπαταρία που είναι επιρρεπής σε εκρήξεις όταν δεν ελέγχεται και φροντίζεται σωστά. Παρόλα τα αρνητικά τους, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου υπερτερούν σε θετικά χαρακτηριστικά, ειδικά λόγω της υψηλής ενεργειακής τους πυκνότητας σε σύγκριση με το βάρος τους, κάτι το οποίο οδήγησε την Tesla όσο και τη Nissan να χρησιμοποιήσουν πακέτα συσσωρευτών ιόντων λιθίου για τα ηλεκτρικά οχήματα μαζικής παραγωγής.

Η Tesla, το 2008, λανσάρει για πρώτη φορά στην αγορά το αμιγώς ηλεκτρικό όχημα, Roadster, υψηλών επιδόσεων με μπαταρία στοιχείων ιόντων λιθίου το οποίο ξεπερνάει τα 390 χιλιόμετρα ανά φόρτιση [25]. Η Nissan με το πιο προσιτό Leaf έγινε ο πρώτος κατασκευαστής ο οποίος πούλησε πάνω από 290.000 ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρίες ιόντων λιθίου. Η μεγάλη αυτονομία της μπαταρίας έπεισε το κοινό να αγοράσει ηλεκτρικά οχήματα και παράλληλα τις αυτοκινητοβιομηχανίες να επενδύσουν στην ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων και των χαρακτηριστικών τους.

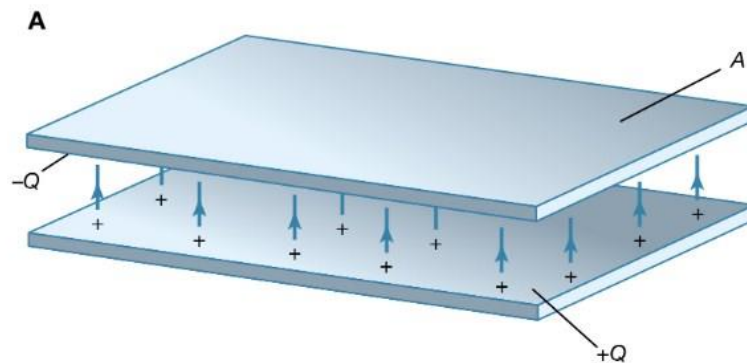
Το επόμενο βήμα δείχνει να είναι η μπαταρία λιθίου στερεάς κατάστασης. Η μπαταρία στερεάς κατάστασης αντικαθιστά τον υγρό ηλεκτρολύτη άλατος λιθίου, ο οποίος είναι υψηλά αντιδραστικός και εύφλεκτος, με έναν στερεό ηλεκτρολύτη, σε μορφή κάποιου είδους κεραμικό. Κάτι τέτοιο εξαλείφει τον κίνδυνο έκρηξης ή πυρκαγιάς των μπαταριών ιόντων λιθίου, ενώ ταυτόχρονα διπλασιάζει την ενεργειακή πυκνότητα και αυξάνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Ακόμα μια τέτοια τεχνολογία είναι σε αρκετά πρώιμο στάδιο μελέτης και έρευνας, ωστόσο η Toyota ισχυρίζεται πως η πρώτη μπαταρία λιθίου στερεάς κατάστασης, με αυτονομία άνω των 600 μιλίων, θα κυκλοφορήσει στην αγορά από το 2027 [26]. Έως τότε, υπάρχει η τεράστια δύναμη μια μπαταρίας στοιχείων ιόντων λιθίου, ενέργειας 246 KWh και βάρους περίπου 1500 κιλών, πάνω σε ένα Hummer EV έκδοσης 2023 (εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.9 Μπαταρία 1500κιλών 246kWh από ένα Hummer EV του 2023

2.2 Πυκνωτές – Υπέρ-πυκνωτές

Μια συσκευή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας η οποία αποτελείται από δυο αγωγούς σε κοντινή απόσταση και μονωμένους μεταξύ τους, ονομάζεται πυκνωτής (Εικόνα 2.10). Οι πυκνωτές έχουν πολλές και σημαντικές εφαρμογές στον κόσμο της τεχνολογίας. Για παράδειγμα, σε ψηφιακά κυκλώματα για τη στιγμιαία διακοπή ηλεκτρικής ενέργειας ή ως φίλτρα για την εκτροπή των ψευδών ηλεκτρικών σημάτων [27].



Εικόνα 2.10 Σχηματικό Πυκνωτή

2.2.1 Η εφεύρεση του πυκνωτή

Ο πρώτος καταγεγραμμένος πυκνωτής δημιουργήθηκε από τον Ewald Georg von Kleist (1700-1748) από την Πομερανία τον Οκτώβριο του 1745. Αυτή η πρωτοποριακή εφεύρεση αποτελείτο από ένα γυάλινο βάζο που περιείχε ένα αγωγίμο υγρό, όπως υδράργυρο, δεμένο στο σώμα, ενώ ένα σιδερένιο καρφί ή σύρμα ήταν βυθισμένο στο υγρό [28]. Ο Kleist ανακάλυψε ότι αυτή η συσκευή είχε την ικανότητα να διατηρεί ένα ηλεκτρικό φορτίο μόλις ηλεκτροδοτηθεί χρησιμοποιώντας τη μηχανή τριβής του.

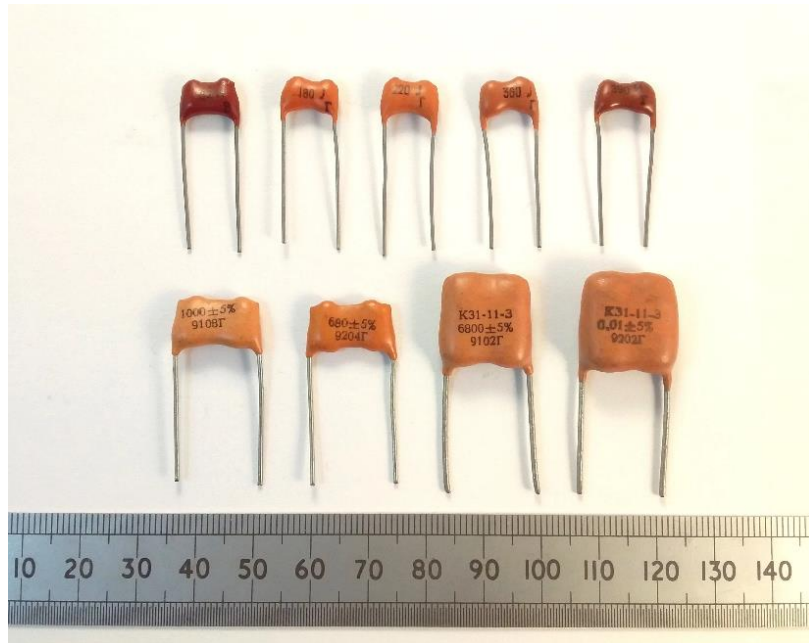
Πριν από την ευρεία αναγνώριση της ανακάλυψης του Kleist, ένας άλλος φυσικός με το όνομα Pieter van Musschenbroek (1700-1748) από την Ολλανδία ανέπτυξε ανεξάρτητα έναν πυκνωτή με εντυπωσιακές ομοιότητες. Η συγκεκριμένη συσκευή, γνωστή ως δοχείο (jar) Leyden, πήρε το όνομά της από το Πανεπιστήμιο του Leyden όπου ο van Musschenbroek διεξήγαγε την έρευνά του. Δεν πέρασε πολύς καιρός που ο Daniel Gralath ανέλαβε την πρωτοβουλία να συνδυάσει πολλά δοχεία (jars) παράλληλα, δημιουργώντας μια «μπαταρία» που αύξησε σημαντικά τη συνολική ικανότητα αποθήκευσης ηλεκτρικού φορτίου.

Τύποι πυκνωτών

Οι πιο γνωστοί τύποι πυκνωτών είναι [29]:

Μεταλλικής μεμβράνης: κατασκευάζονται από υψηλής ποιότητας πολυμερές φύλλο (συνήθως πολυκαρβονικό, πολυστυρένιο, πολυπροπυλένιο, πολυεστέρας (mylar) ή πολυσουλφόνη για πυκνωτές υψηλής ποιότητας), με ένα μεταλλικό στρώμα που εναποτίθεται στην επιφάνεια. Εξαιρετική ποιότητα και σταθερότητα, κατάλληλος για κυκλώματα χρονοδιακόπτη. Κατάλληλοι για υψηλές συχνότητες.

Mica: παρόμοιο με το μεταλλικό φιλμ. Συχνά υψηλής τάσης. Κατάλληλος για υψηλές συχνότητες αλλά ακριβός (εικόνα 2.11)



Εικόνα 2.11. Πυκνωτές Mica

Χαρτιού: για υψηλές τάσεις. (εικόνα 2.12)



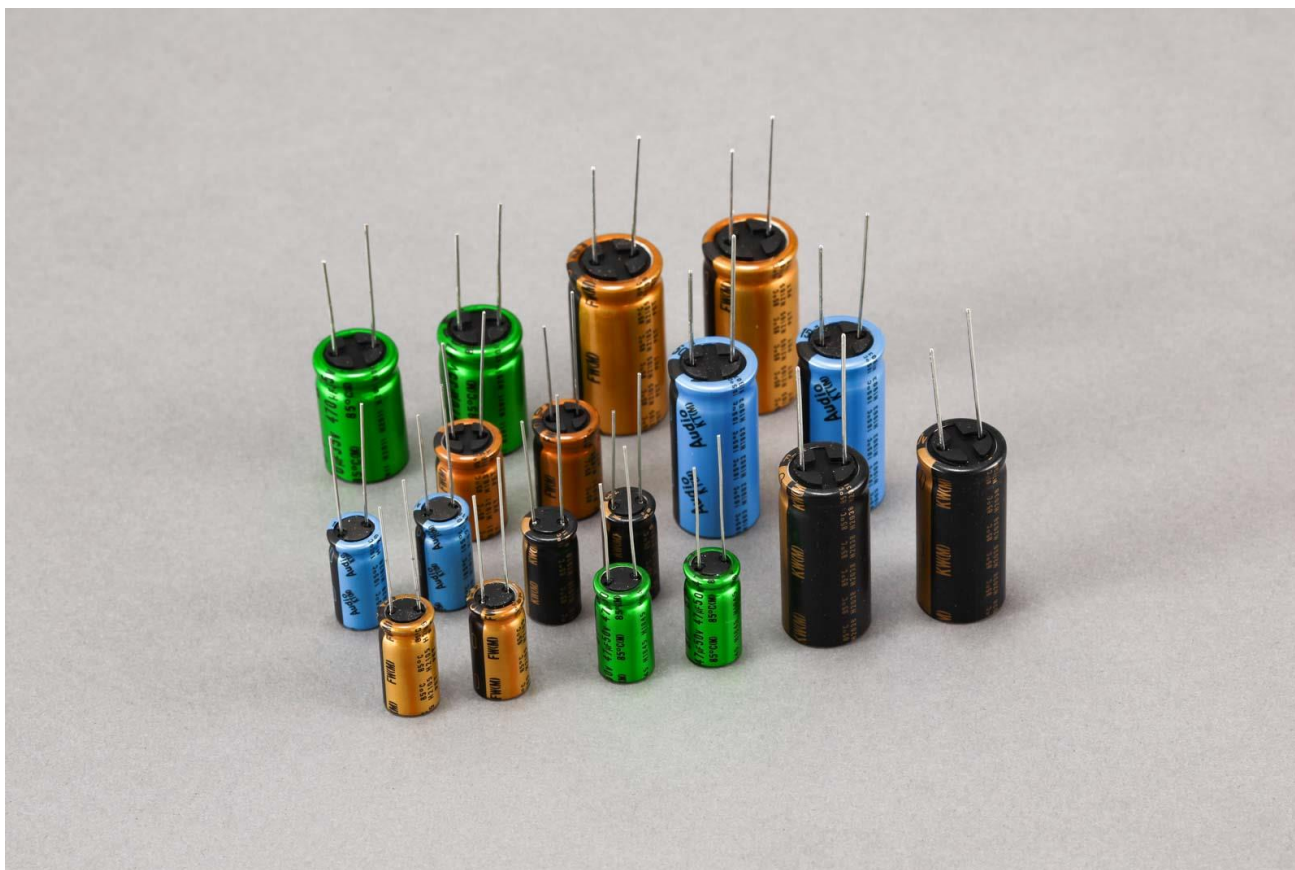
Εικόνα 2.12 Πυκνωτής χαρτιού

Γυαλί: για υψηλές τάσεις, ακριβός αλλά σταθερός θερμοκρασιακός συντελεστής σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.

Κεραμικός: τσιπ με ποικίλα στρώματα μετάλλου και κεραμικού. Ανάλογα με το διηλεκτρικό, είτε κατηγορίας 1 είτε κατηγορίας 2, η εξάρτηση θερμοκρασίας/χωρητικότητας διαφέρει. Αυτά τα τσιπ (ειδικά της κλάσης 2) έχουν υψηλή εφαπτομένη διηλεκτρικών απωλειών, χωρητικότητα που εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση και συχνά μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες σε γενικές εφαρμογές σύζευξης και φιλτραρίσματος χαμηλής ακρίβειας. Κατάλληλοι για υψηλές συχνότητες.

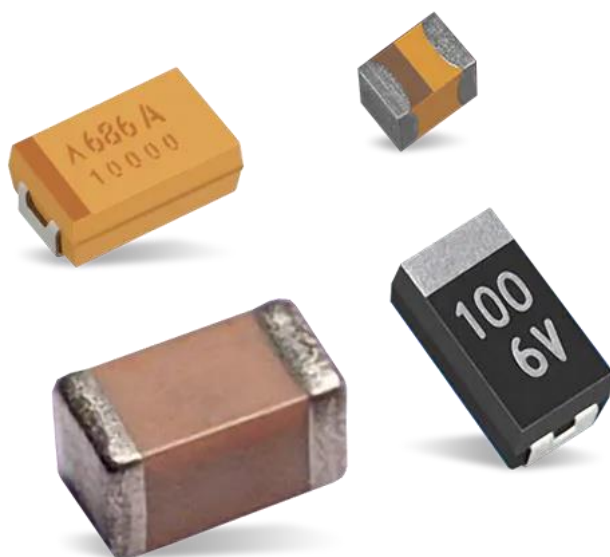
Ηλεκτρολυτικός: Πολωμένος και δομικά παρόμοιος με ένα μεταλλικό φιλμ, αλλά το ηλεκτρόδιο είναι χαραγμένο από αλουμίνιο για να αποκτήσει μεγαλύτερη επιφάνεια και το διηλεκτρικό είναι βυθισμένο σε υγρό ηλεκτρολύτη. Μεγάλες ανοχές, ασταθές, ιδίως όταν υπόκειται σε θερμότητα, με σταδιακά μειούμενη χωρητικότητα και υψηλή διαρροή. Διατίθενται ειδικοί τύποι με χαμηλή ισοδύναμη

αντίσταση σειράς. Η χωρητικότητα τείνει να μειώνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Μπορεί να επιτευχθεί υψηλή χωρητικότητα. (εικόνα 2.13)



Εικόνα 2.13 Πυκνωτές Ηλεκτρολυτικοί

Ταντάλιο: Παρόμοιος με τον ηλεκτρολυτικό, πολωμένος με καλύτερη απόδοση σε υψηλές συχνότητες. Υψηλή διηλεκτρική απορρόφηση. Υψηλός ρυθμός διαρροής και καλύτερη απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες. (εικόνα 2.14)



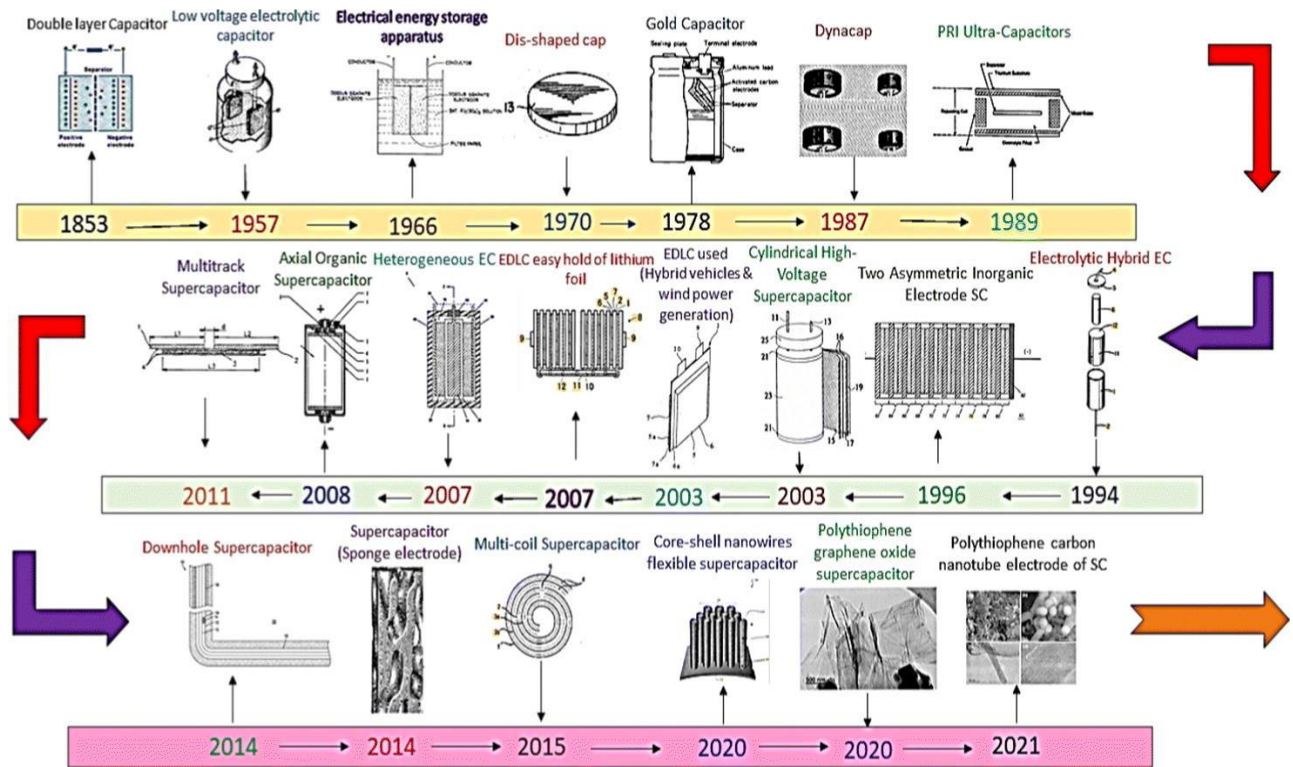
Εικόνα 2.14 Πυκνωτές Ταντάλιου

2.2.2 Ο Υπέρ-Πυκνωτής

Τα επαναλαμβανόμενα φυσικά φαινόμενα και τα ορυκτά καύσιμα είναι οι κύριες πηγές ενέργειας. Η αποθήκευση και η ρύθμιση της ενέργειας αποτελεί άμεσο ζήτημα για αυτές τις πηγές ενέργειας. Η ενέργεια πρέπει να παρέχεται αδιάλειπτα, διατηρώντας το τεράστιο δυναμικό της. Επιπλέον, οι εν λόγω πηγές ενέργειας μπορούν να αποθηκευτούν για διακοπτόμενα και χρονικά κενά μεταξύ της παραγωγής ενέργειας και της κατανάλωσης του τελικού χρήστη. Η αποθήκευση ενέργειας με νερό σε φράγματα, η αποθήκευση ενέργειας ως υδρογόνο και οι ηλεκτροχημικές συσκευές αποθήκευσης είναι τα κύρια συστήματα αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται σήμερα. Με τις συσκευές ηλεκτροχημικής αποθήκευσης, η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί απευθείας ως ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, αυτές οι συμβατικές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας έχουν ένα τεχνικό μειονέκτημα, η διάρκεια ζωής τους είναι μικρότερη από το μισό της διάρκειας ζωής των υπερπυκνωτών (SC) και οι περισσότερες από αυτές περιέχουν ρύπους που είναι επιβλαβείς για τη φύση. Οι μπαταρίες ροής με βάση τον σίδηρο έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και είναι φιλικές προς το περιβάλλον, αλλά έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα λόγω του υψηλού υδατικού διαλύματος. Για το λόγο αυτό, οι επιστήμονες μελετούν εδώ και πολλά χρόνια συσκευές αποθήκευσης ενέργειας με υψηλή χωρητικότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής.

Επιπλέον, οι SC χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως συσκευές προσωρινής αποθήκευσης ενέργειας για την αναγεννητική πέδηση σε ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα [30]. Οι SC έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή πυκνότητα ισχύος, γρήγορους χρόνους φόρτισης και εκφόρτισης, χαμηλή αντίσταση εισόδου, μεγάλη διάρκεια ζωής και φιλικότητα προς το περιβάλλον. Την τελευταία δεκαετία, έχουν προταθεί και υλοποιηθεί διάφορες τοπολογίες υβριδισμού για την αύξηση της πυκνότητας ισχύος και της διάρκειας ζωής των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Ως εκ τούτου, η ηλεκτροχημική δραστηριότητα ορισμένων υλικών και των σύνθετων υλικών τους έχει μελετηθεί για πιθανές μελλοντικές εφαρμογές των υλικών αυτών σε μπαταρίες ιόντων λιθίου. Οι υπερπυκνωτές μπορούν να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή συσκευών στερεάς κατάστασης που ξεπερνούν πολλά από τα μειονεκτήματα των μπαταριών.

Οι υπερπυκνωτές έχουν μια νέα ιστορία - εφευρέθηκαν στα μέσα του 19ου αιώνα. Οι μηχανικοί της General Electric (GE) ανέπτυξαν για πρώτη φορά πυκνωτές στις αρχές της δεκαετίας του 1950 και το 1957 [31]. Ο πρώτος SC σχεδιάστηκε από τον Becker χωρίς το περίφημο διπλό στρώμα, ενώ ο πρώτος στρατιωτικός SC, που αναπτύχθηκε από το Pinnacle Research Institute (PRI) το 1982, ονομάστηκε PRI Ultracapacitor. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980, τα ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης αυξήθηκαν ανάλογα με την αύξηση της χωρητικότητας και η ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR) μειώθηκε- το 1992, το Ινστιτούτο Maxwell υιοθέτησε αυτή την εξέλιξη και την ονόμασε "πυκνωτή ενίσχυσης" για να τονίσει τις ενεργειακές εφαρμογές του. Το 1994, ο Evans ανέπτυξε έναν ηλεκτρολυτικό πυκνωτή τανταλίου υψηλής τάσης που συνδύαζε τις ιδιότητες των ηλεκτρολυτικών και των ηλεκτροχημικών πυκνωτών, αλλά η χρήση του περιορίστηκε σε ορισμένες στρατιωτικές εφαρμογές. Πρόσφατα, ένας πυκνωτής ιόντων λιθίου που αναπτύχθηκε από την ομάδα FDK, ο οποίος ονομάζεται υβριδικός πυκνωτής, συνδυάζει ηλεκτροστατικά ηλεκτρόδια γραφίτη για να αυξήσει την ονομαστική τιμή χωρητικότητας σε Farad. Σήμερα, η έρευνα στον τομέα των SCs επικεντρώνεται στη βελτίωση των επιδόσεων των SCs, στην αύξηση της αποδοτικότητας και στη μείωση του κόστους παραγωγής. Παρουσιάζεται και συνοπτικά η εξέλιξή τους στην επόμενη εικόνα 2.15.



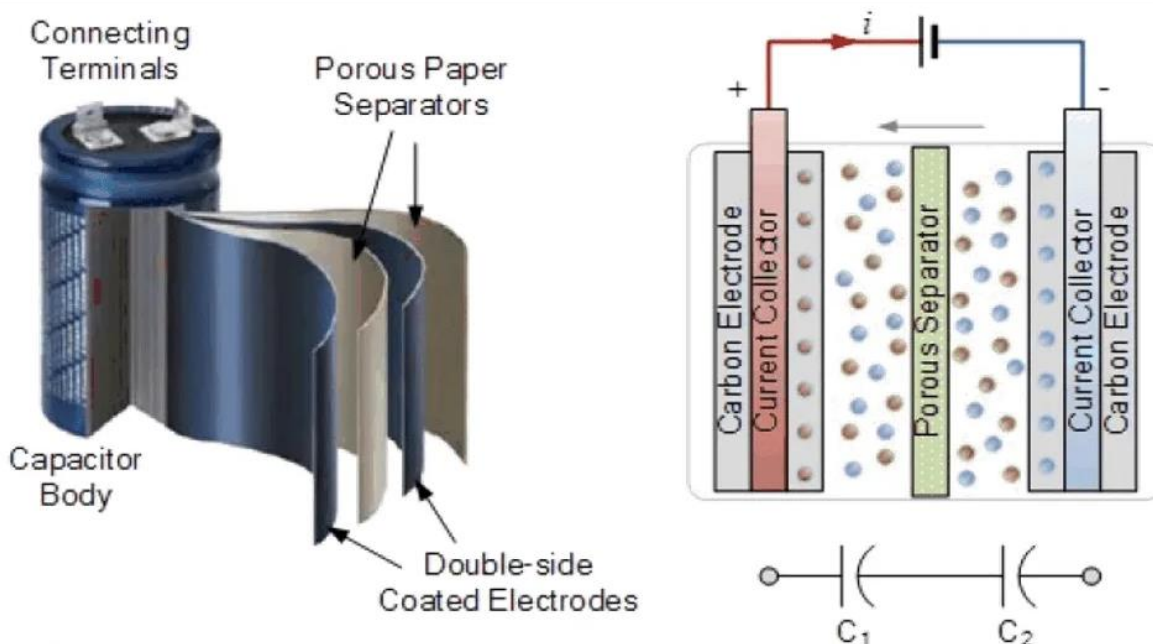
Εικόνα 2.15 Η εξέλιξη των υπερπυκνωτών

Η δομή των SC είναι διαφορετική από τους κεραμικούς και τους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές. Αποτελείται από δύο στερεά ηλεκτρόδια που πολώνονται από μια εφαρμοζόμενη τάση και χωρίζονται από έναν διαχωριστή μεμβράνης και έναν υγρό ηλεκτρολύτη [32]. Οι ηλεκτρικοί πυκνωτές διπλής στιβάδας (EDL), που ονομάζονται επίσης υπερπυκνωτές, σχηματίζονται λόγω των ιόντων στον ηλεκτρολύτη που σχηματίζουν μια EDL αντίθετης πολικότητας με τα ηλεκτρόδια. Η χωρητικότητα διπλού στρώματος είναι μία από τις δύο αρχές αποθήκευσης, όπου η ηλεκτροστατική αποθήκευση επιτυγχάνεται με το διαχωρισμό των φορτίων στο διπλό στρώμα Helmholtz και την αύξηση της χωρητικότητας της διάταξης. Η άλλη αρχή ηλεκτροχημικής αποθήκευσης είναι η ψευδοχωρητικότητα, η οποία επιτυγχάνεται με φαραδικές αντιδράσεις οξειδοαναγωγής. Αυτές οι δύο αρχές μπορούν να διαχωριστούν μόνο με ειδικές τεχνικές μέτρησης.

Τα υλικά ηλεκτροδίων για τους πυκνωτές EDL είναι συνήθως ενεργός άνθρακας με διάφορες εμφανίσεις άνθρακα, υφάσματα ινών άνθρακα, αεροζέλες, γραφίτης, γραφένιο και νανοσωλήνες άνθρακα. Τα υλικά ψευδοπυκνωτών χρησιμοποιούν αγώγιμα πολυμερή με χαμηλό ESR και υψηλή χωρητικότητα και βρόχο, δεδομένου ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα τα υλικά ως ηλεκτρόδια ψευδοπυκνωτών. Οι υβριδικοί SC συνδυάζουν δύο ηλεκτρόδια με υψηλή ψευδοχωρητικότητα και χωρητικότητα διπλού στρώματος από υλικά με βάση τον άνθρακα. Η ανάπτυξη υβριδικών ηλεκτροδίων υπερπυκνωτών είχε θετικό αντίκτυπο στα ηλεκτρόδια επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Οι ηλεκτρολύτες αποτελούνται από έναν διαλύτη και μια διαλυμένη χημική ουσία. Για καλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα απαιτούνται περισσότερα ιόντα στον ηλεκτρολύτη και χρησιμοποιούνται υδατικοί, οργανικοί και ιοντικοί ηλεκτρολύτες. Τα δύο ηλεκτρόδια διαχωρίζονται φυσικά με ένα διαχωριστικό για την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων και πρέπει να είναι στενά και πορώδη για την ελαχιστοποίηση της ισοδύναμης αντίστασης σειράς (ESR).

Για τον διαχωριστή χρησιμοποιούνται συνήθως φθηνά εξαρτήματα. Σε πιο σύνθετα σχέδια χρησιμοποιούνται μη υφασμένα πορώδη πολυμερή φιλμ, υφασμένες ίνες γυαλιού ή υφασμένες κεραμικές ίνες. Τέλος, στον συλλέκτη των ακροδεκτών του πυκνωτή συνδέονται ηλεκτρόδια για τη διάχυση υψηλών ρευμάτων αιχμής (Εικόνα 2.16).

Τα πλεονεκτήματα των υπερπυκνωτών (SC) ως συσκευών αποθήκευσης ενέργειας τους θέτουν σε μια ανώτερη θέση συγκριτικά με άλλες μορφές αποθήκευσης, παρά τα περιορισμένα τους μειονεκτήματα [33]. Ενώ η σύγκριση των οφελών και των περιορισμών φανερώνει ότι η συνδυαστική χρήση τους είναι λογική, η αξιολόγηση της μεθόδου κατασκευής συνδέεται με τις τιμές πυκνότητας ενέργειας και ισχύος, καθώς και με τον χρόνο φόρτισης. Η ανάλυση της απόδοσης των SC έχει συγκριθεί με άλλες μορφές αποθήκευσης σε πολλές μελέτες, αποδεικνύοντας ότι η συνδυαστική χρήση τους με άλλες συσκευές είναι λογική από πολλές απόψεις. Αυτή η υπεροχή έχει εξερευνηθεί σε υβριδικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι υβριδικές φωτοβολταϊκές (PV)-μπαταρίες SC. Επιπλέον, ορισμένες μελέτες έχουν προτείνει τη χρήση των SC σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκές μπαταρίες ή κυψέλες καυσίμου, συμπεριλαμβανομένων των υβριδικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (HESSs). Ορισμένες μελέτες έχουν επίσης προσομοιώσει και συγκρίνει τα HESSs ως προς τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και το ημερήσιο κόστος, με τις αναλύσεις απόδοσης και κόστους να δείχνουν βελτιωμένα αποτελέσματα για τις SC, συμπεριλαμβανομένων των HESSs.



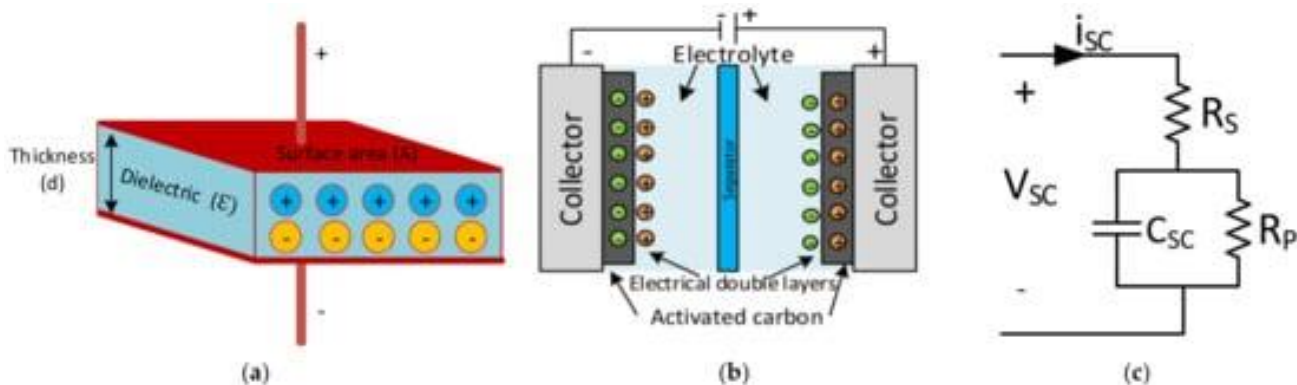
Source: ES Components

Εικόνα 2.16 Κατασκευή υπερπυκνωτή

Οι σύγχρονοι διπλοεπιπέδιοι πυκνωτές (EDLCs) χρησιμοποιούν οργανικά ηλεκτρολύτες που λειτουργούν στα 2,7 V και επιτυγχάνουν πυκνότητες ενέργειας περίπου 5-8 Wh/kg ή 7-10 Wh/L [34]. Επιπλέον, υπάρχει σήμερα εμπορικά διαθέσιμο ένας υπερπυκνωτής σε μοντέλο 48 V με διάρκεια ζωής 1.000.000 κύκλων λειτουργίας ή δέκα χρόνια συνεχούς χρήσης στα 48 V DC. Αυτά τα μοντέλα είναι σχεδιασμένα ειδικά για υβριδικά λεωφορεία και εξοπλισμό κατασκευής προσφέροντας οικονομικές λύσεις, ενώ χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως στην ηλεκτρονική, ιδίως για την ισορροπία κυψελών. Οι υπερπυκνωτές (SCs) προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή πυκνότητα ισχύος και πολλούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους τομείς, από την κατασκευή απλών ηλεκτρονικών ειδών, έως

την αποθήκευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την ανάκτηση ενέργειας. Ωστόσο, οι SCs κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται για εφαρμογές μικρής διάρκειας από χαμηλή έως υψηλή ισχύ και δεν είναι ιδανικοί για εναλλασσόμενα ρεύματα (AC). Η χρησιμότητά τους επεκτείνεται σε πολλούς τομείς, όπως: τροφοδοσία ισχύος, σταθεροποίηση τάσης, μικροπλέγματα, φωτοβολταϊκά, αποθήκευση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, ενέργεια απόκτησης, δημόσιος φωτισμός, ιατρικές εφαρμογές, στρατιωτικές και αυτοκινητοβιομηχανίες, και ανάκτηση ενέργειας.

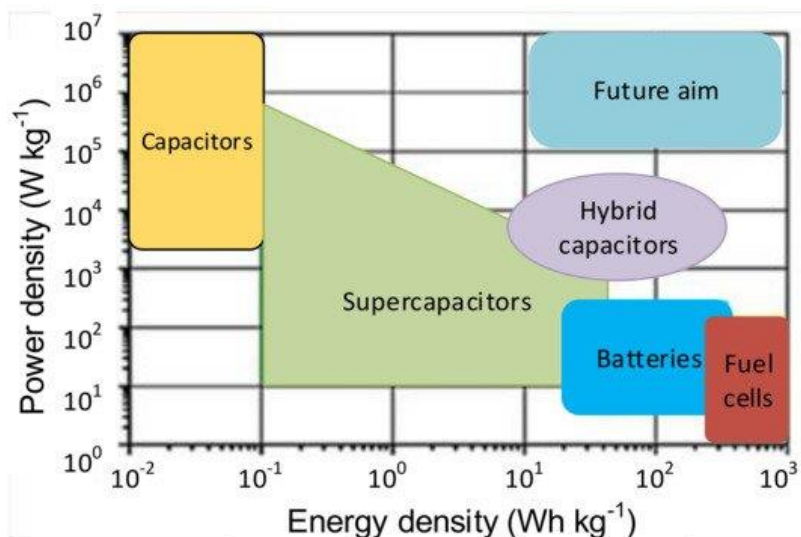
Η βασική δομή ενός SC (εικόνα 2.17) αποτελείται από συλλέκτες ρεύματος αλουμινίου στα ηλεκτρόδια αντί για διηλεκτρικά υλικά [34]. Η λειτουργία του SC βασίζεται στην αποθήκευση ενέργειας με την κατανομή των ιόντων κοντά στην επιφάνεια των δύο ηλεκτροδίων. Οι δύο πλάκες διεπαφής δημιουργούν μια ζώνη φόρτισης χώρου που ονομάζεται ηλεκτρική διπλή στρώση (EDL). Επομένως, ένα SC είναι ηλεκτροστατικό και δεν υπάρχει ηλεκτροχημική αντίδραση. Το μοντέλο ηλεκτρικού ισοδύναμου κυκλώματος ενός SC δίνεται στην Εικόνα 2.17 γ. Εδώ, η αντίσταση σειράς (R_s) στον πυκνωτή συμβολίζει την ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR). Αντίθετα, η παράλληλη αντίσταση (R_p) κατά μήκος του πυκνωτή αντιπροσωπεύει την αντίσταση που εκτιμάται σύμφωνα με τα ρεύματα διαρροής, ενώ η χωρητικότητα (CSC) αντιπροσωπεύει τη συνολική χωρητικότητα των SC.



Εικόνα 2.17 (α) Δομή ηλεκτροστατικού πυκνωτή, (β) δομή του SC, (γ) μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος του SC

Οι παράμετροι που αναφέρονται στα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του μέγιστου ρεύματος αιχμής σε μια δεύτερη και συγκεκριμένη τιμή μέγιστης ισχύος.

Οι κύριες ιδιότητες των SC είναι η χαμηλή ενέργεια και η υψηλή πυκνότητα ισχύος, η γρήγορη φόρτιση και εκφόρτιση, η διακοπή της ροής ενέργειας όταν είναι πλήρως φορτισμένα, η ελάχιστη εσωτερική αντίσταση (ESR), η μεγάλη διάρκεια ζωής σε αχρηστία και η εκτεταμένη διάρκεια ζωής [35]. Τα πλεονεκτήματα των SC κάνουν την ανταγωνιστική τους θέση ανώτερη σε πολλούς τρόπους από τις άλλες συμβατικές συσκευές αποθήκευσης. Συγκρίνοντας τις διακρίσεις και τα μειονεκτήματά τους, η χρήση των SC μαζί με άλλες συσκευές αποθήκευσης φαίνεται να είναι κατάλληλη. Τα SC είναι συστατικά χαμηλής τάσης και απαιτούν ασφαλή λειτουργία, όπου η τάση παραμένει εντός των καθορισμένων ορίων. Τα τυπικά SC με υδαρής ηλεκτρολύτες κατατάσσονται σε εύρος τάσης από 2,1 έως 2,3 V, ενώ τα SC με οργανικούς διαλύτες κατατάσσονται σε εύρος από 2,5 έως 2,7 V. Για υψηλότερες απαιτήσεις τάσης, οι κυψέλες SC συνδέονται σε σειρά. Η κατατιθέμενη τιμή χωρητικότητας κυμαίνεται μεταξύ 1 F έως 1000 F. Για υψηλότερες εφαρμογές, απαιτείται η σύνδεση των κυψελών SC παράλληλα. Η πυκνότητα ενέργειας των SC είναι μεγαλύτερη από αυτήν των συμβατικών πυκνωτών, ενώ η πυκνότητα ισχύος των πυκνωτών είναι μεγαλύτερη από αυτήν των SC όπως προκύπτει από το γράφημα της εικόνα 2.18.



Εικόνα 2.18 Σύγκριση της πυκνότητας ενέργειας και ισχύος των συσκευών αποθήκευσης

Οι υπέρ-πυκνωτές (SC) εφαρμόζονται σε πολλούς τομείς, όπως σε ανεμογεννήτριες, κινητούς σταθμούς βάσης, ηλεκτρονικές συσκευές και διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Τα τελευταία χρόνια, άρχισαν να ενσωματώνονται σε UPS, ηλεκτρικά οχήματα και άλλες εφαρμογές ισχύος, χάρη στα πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τις μπαταρίες μόλυβδου-οξέος. Επίσης, χρησιμοποιούνται ως συσκευή αποθήκευσης ενέργειας σε ανανεώσιμα και υβριδικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας για τη διατήρηση σταθερής τάσης στο δίκτυο. Επιπλέον, μπορούν να παρέχουν σταθερή παροχή ρεύματος σε εφαρμογές με μεταβαλλόμενα φορτία και να χρησιμοποιηθούν για τη φόρτιση γρήγορων συσκευών όπως φλας και φορητά ηχεία. Η ενσωμάτωσή τους σε διάφορες εφαρμογές, όπως εργαλεία, τροφοδοτικά, φώτα δρόμου, ιατρικές εφαρμογές, αλλά και σε στρατιωτικές και αυτοκινητοβιομηχανίες, αποτελεί προκλητική λύση για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών CO₂.

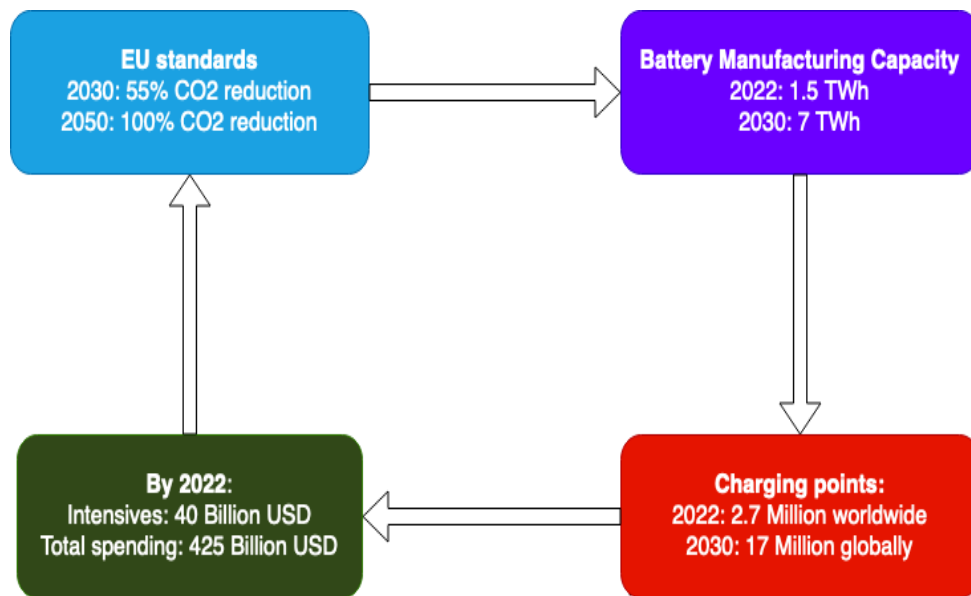
2.3 Το υβριδικό σύστημα αποθήκευσης

Τα τελευταία 20 χρόνια, η τάση των πράσινων μεταφορών και η βελτίωση της απόδοσης καυσίμου οδήγησε σε υβριδικά (HEV) και ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (BEV). Τα HEV χρησιμοποιούν έναν ηλεκτρικό κινητήρα για να βοηθήσουν το ICE ή ακόμα και να τροφοδοτήσουν πλήρως το αυτοκίνητο σε συνθήκες όπως η οδήγηση με χαμηλή ταχύτητα [35-37]. Ως εκ τούτου, η κατανάλωση καυσίμου μπορεί να περιοριστεί έως και 30% σε ορισμένες συνθήκες χωρίς σημαντικές αλλαγές στις συνήθειες οδήγησης. Λόγω της απλότητας κατασκευής τους, των χαμηλών εκπομπών ρύπων και της δημόσιας ζήτησης για βιώσιμη τιμή, το μερίδιο αγοράς 28% για τα ηλεκτρικά οχήματα επιτεύχθηκε το 2021. Ωστόσο, ο δρόμος προς τη μεταφορά χωρίς εκπομπές ρύπων μπορεί να επιτευχθεί πλήρως μόνο με την υιοθέτηση καθαρών ηλεκτρικών οχημάτων (EV). Ένας ηλεκτροκινητήρας είναι υπεύθυνος για την πρόωση του οχήματος που τροφοδοτείται από μπαταρίες λιθίου και ένα προηγμένο σύστημα διαχείρισης μπαταριών. Υπάρχουν σημαντικά οφέλη από τη χρήση των EV όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.19:

- Μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

- Αθόρυβη λειτουργία.
- Ανάκτηση ενέργειας μέσω αναγεννητικής πέδησης.
- Δυνατότητα φόρτισης στο σπίτι μέσω ανανεώσιμων πηγών.

Αυτές οι παράμετροι έπαιξαν σημαντικό ρόλο στις πρόσφατες πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων. Έως και 12% του μεριδίου αγοράς για το 2022 είναι αμιγώς ηλεκτρικά, με τεράστιες λίστες αναμονής λόγω των περιορισμένων πόρων που αντιμετωπίζουν οι κατασκευαστές, με τα πετρελαιοκίνητα αυτοκίνητα να μειώνονται. Αυτή η τάση συνεχίστηκε έντονα το 2023, με σχεδόν 2,5 εκατομμύρια EV που πωλήθηκαν το πρώτο τρίμηνο, να φτάσουν τα 15 εκατομμύρια μονάδες συνολικά, με αποτέλεσμα την κλιμάκωση του 35% από έτος σε έτος και το 18% του συνολικού μεριδίου αγοράς. Ακολουθώντας αυτή την κατεύθυνση, μέχρι το 2030 μπορούν να εξοικονομηθούν 5 εκατομμύρια βαρέλια αργού πετρελαίου την ημέρα, διασφαλίζοντας την αξιοποίηση πράσινων περιβαλλοντικών μέσων μεταφοράς. Πρόσθετες πολιτικές και ενέργειες που απαιτούνται φαίνονται στην εικόνα 2.19

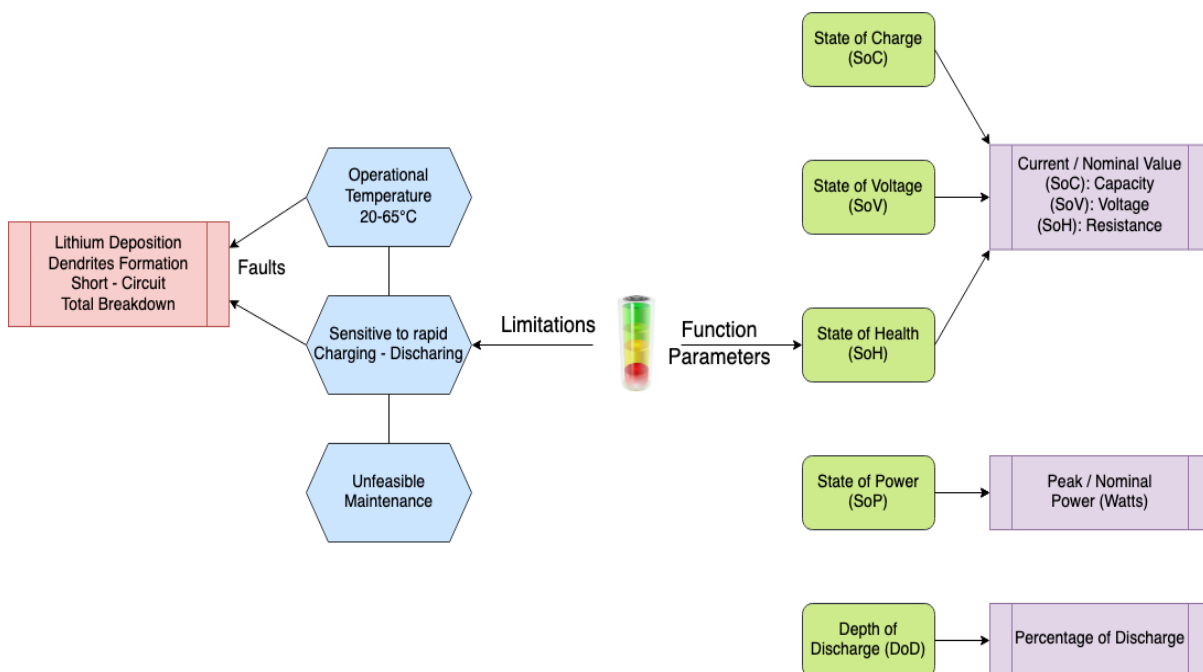


Εικόνα 2.19 Πολιτικές και ενέργειες που απαιτούνται

Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί σχετικά με τη λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων, όπως συνοψίστηκε σε προηγούμενη μελέτη [38]. Ο υψηλός χρόνος φόρτισης, η έλλειψη φορτιστών, η μειωμένη αυτονομία που προκαλεί άγχος στο χρήστη μαζί με το αυξημένο κόστος αγοράς, καθώς απαιτούνται σπάνια ορυκτά για την τρέχουσα κατασκευή μπαταριών και κινητήρα εξακολουθούν να θεωρούνται κύριοι και πρακτικοί περιορισμοί. Είναι προφανές ότι τα κύρια ζητήματα αναφέρονται στις περιορισμένες συνθήκες λειτουργίας της μπαταρίας και στην ευαισθησία σε ακραίες ρυθμίσεις. Το παράθυρο θερμοκρασίας μιας τυπικής μπαταρίας λιθίου είναι μεταξύ 20 και 40 βαθμών Κελσίου, ενώ η λειτουργία εκτός αυτού του εύρους μπορεί να προκαλέσει εναπόθεση λιθίου, δένδριτες ή ακόμα και ολική διάσπαση. Η σωστή ψύξη είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των κυψελών από υπερθέρμανση και ενώ είναι ενοποιημένη με το σύστημα ελέγχου κλιματισμού, μπορεί να μειώσει τη συνολική ενέργεια που καταναλώνεται ενώ προσφέρει μέγιστη θερμική άνεση. Επιπλέον, οι ακολουθίες φόρτισης και εκφόρτισης επιβλέπονται και ελέγχονται από πολύπλοκα ηλεκτρονικά ισχύος για να διασφαλίζεται η ασφάλεια και η προστασία, αποφεύγοντας τις συνθήκες αιχμής. Καθώς η μπαταρία αποτελεί μέρος του πλαισίου του οχήματος για καλύτερη

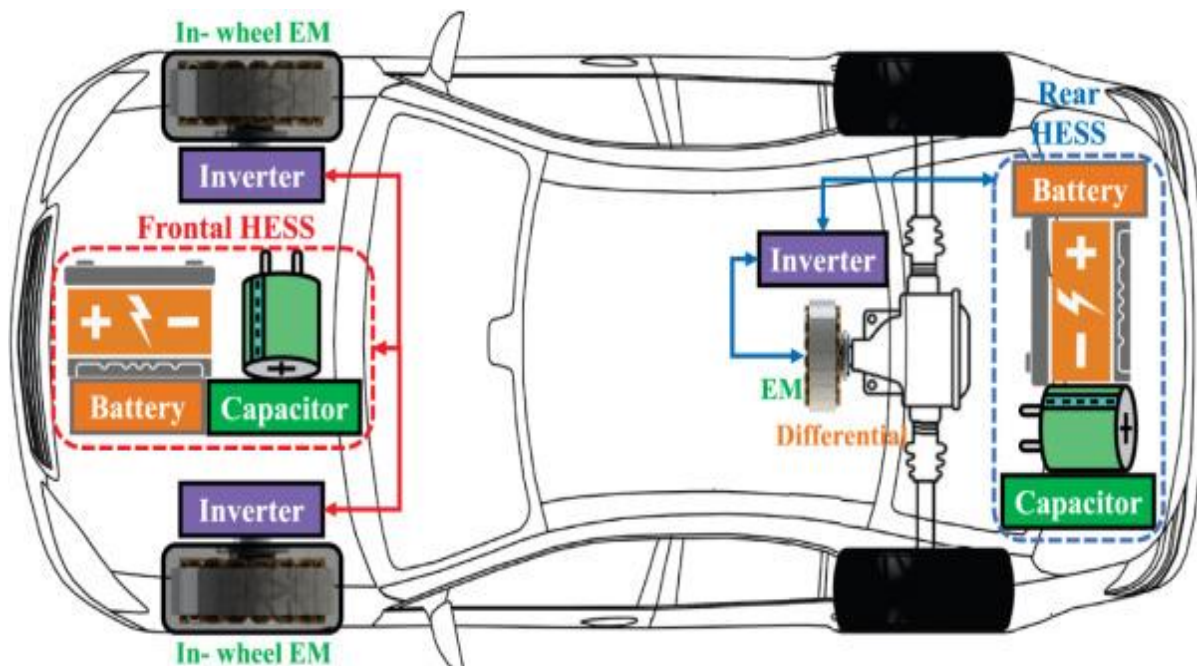
διαχείριση του βάρους, ακόμη και η συντήρηση είναι πρακτικά αδύνατη, επομένως η διάταξη πρέπει να είναι σχεδιασμένη και με ακρίβεια.

Υπάρχουν ορισμένες παράμετροι που επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Η κατάσταση φόρτισης (SoC) και η κατάσταση της υγείας (SoH), που αποκαλύπτουν την υποβάθμιση των κυττάρων, είναι ζωτικής σημασίας για τον υπολογισμό της γήρανσης της μπαταρίας και δεν μπορούν να μετρηθούν απευθείας στη συσκευασία. Το State of Power (SoP) παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις δυνατότητες του ρεύματος αιχμής της μπαταρίας, ενώ η κατάσταση τάσης αναφέρεται στην αναλογία ρεύματος-τάσης διαιρεμένη με την ονομαστική τιμή και μπορεί να συνδεθεί στο SoC. Τέλος, το Βάθος Εκφόρτισης (DoD) αντιπροσωπεύει το ποσοστό αποφόρτισης της μπαταρίας και αποδείχθηκε πολύτιμο καθώς η χαμηλή DoD επηρεάζει μαζικά την υποβάθμιση της μπαταρίας, περιορίζοντας την πίεση στα κύτταρα και αυξάνοντας τη βιωσιμότητά της [37]. Είναι απαραίτητο να παρακολουθούνται όλες οι τιμές για να διασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία της μπαταρίας και η ονομαστική απόδοση εντός του προβλεπόμενου χρόνου που εφαρμόζεται από τον κατασκευαστή, όπως απεικονίζεται στην επόμενη εικόνα 2.20.



Εικόνα 2.20 Παρακολούθηση μεταβλητών συστήματος

Για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών, χρησιμοποιείται ένα υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (HESS), που αποτελείται από μπαταρίες και υπερπυκνωτές [37-39]. Στην καθημερινή χρήση, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μειώνεται λόγω της σημαντικής παραγωγής θερμότητας που προκαλείται από την ανάγκη κάλυψης των υψηλών απαιτήσεων ισχύος των ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Οι υπερπυκνωτές (SC) ή (UC) λύνουν αυτό το πρόβλημα παρέχοντας φορτία μέσης και μέγιστης ισχύος, μειώνοντας το μέγιστο ρεύμα της μπαταρίας έως και 55% και εξασφαλίζοντας χαμηλότερες πτώσεις τάσης, επομένως λιγότερες διακυμάνσεις και κόστος χωρητικότητας. Ο υπερπυκνωτής συνοδεύεται επίσης από μια διάρκεια ζωής άνω των 1 εκατομμυρίου κύκλων λειτουργίας, καθιστώντας τον ως την τέλεια βοηθητική πηγή (Εικόνα 2.21). Ωστόσο, δεδομένου ότι η ενεργειακή πυκνότητα είναι χαμηλή, δεν μπορούν να λειτουργήσουν ως αυτόνομη πηγή για ένα EV.



Εικόνα 2.21 Σχέδιο υβριδικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

Ο συνδυασμός αυτών των διαφορετικών συστημάτων επιτρέπει στα ηλεκτρικά οχήματα να λειτουργούν σε μεγαλύτερη εμβέλεια χρησιμοποιώντας μπαταρίες υψηλής ενεργειακής πυκνότητας ενώ αυξάνει την απόδοση με υπερπυκνωτές που λειτουργούν ως μονάδες προσωρινής αποθήκευσης ισχύος. Επιπλέον, ο υπερπυκνωτής εκμεταλλεύεται την αναγεννητική συγκομιδή πέδησης, παρέχοντας καλύτερο έλεγχο και έως και 16,2% μεγαλύτερη εμβέλεια με λιγότερη φθορά [40]. Το σύστημα αποδίδει εξαιρετικά σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας όπου οι συμβατικές μπαταρίες βρίσκονται εκτός της ζώνης ασφαλείας τους. Ωστόσο, η σύνδεση των τρόπων ισχύος, καθώς και η ένδειξη του κύκλου λειτουργίας δεν έχουν μελετηθεί ευρέως στη βιβλιογραφία. Η ζήτηση ισχύος πρέπει να ταξινομηθεί σε διαφορετικές καταστάσεις για καλύτερη κατανόηση και ο κύκλος λειτουργίας, δηλαδή η ενέργεια που χρησιμοποιείται σε κάθε χρονικό διάστημα σε σύγκριση με το μέγιστο, π.χ. επιτάχυνση, είναι σημαντικές παράμετροι της σωστής κατανομής ισχύος.

2.4 Τοπολογίες ενός υβριδικού συστήματος αποθήκευσης

Η τοπολογία ενός υβριδικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (HESS) είναι υψηλής σημασίας για την απόδοση, το κόστος και την ευστροφία ενός συστήματος [41]. Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι τοπολογιών HESS: παθητική, ημι-ενεργή και ενεργή όπως δείχνει και ο Πίνακας 1 παρακάτω:

Πίνακας 1. Σύγκριση τοπολογιών

Παράμετροι	Τοπολογίες		
	Παθητική	Ημι-ενεργή	Ενεργή
Κόστος	Χαμηλό	Υψηλό	Πολύ Υψηλό
Αποδοτικότητα	Χαμηλή	Υψηλή	Χαμηλή-Υψηλή

Σχέδιο ελέγχου	Χαμηλό – αυστηρό	Σύνθετο	Σύνθετο
Καταπόνηση μπαταρίας	Χαμηλή – σοβαρή	Χαμηλή – σοβαρή	Χαμηλή
Ευστροφία	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή – Υψηλή
Μέγεθος μετατροπέα	Μικρό – Μεγάλο	Μεγάλο	Μικρό – Μεγάλο

Στην παθητική τοπολογία έχουμε την απλούστερη και πιο οικονομική επιλογή. Στην τοπολογία αυτή οι μπαταρίες και οι υπερπυκνωτές (SC) συνδέονται παράλληλα απευθείας με το DC bus. Η κύρια λειτουργία των SC είναι να λειτουργούν ως φίλτρο χαμηλής διέλευσης για την ισχύ της μπαταρίας. Αυτή η διαδικασία φιλτραρίσματος εξαρτάται από τις εσωτερικές αντιστάσεις της μπαταρίας και των SC, καθώς και από την χωρητικότητά τους. Παρ' όλα αυτά, η απόδοση της παθητικής τοπολογίας είναι περιορισμένη λόγω της ανάγκης για υψηλή αρχική επένδυση και την πολυπλοκότητα του συστήματος που απαιτείται για την αποτελεσματική χρήση των SC.

Την καλύτερη απόδοση πετυχαίνει η ενεργή τοπολογία του υβριδικού συστήματος διότι χρησιμοποιεί δυο μετατροπείς DC/DC και ένα επιπλέον κύκλωμα ελέγχου. Η τοπολογία αυτή επιτρέπει τον πλήρη έλεγχο της ροής ενέργειας μεταξύ της μπαταρίας και των υπερπυκνωτών, επιτυγχάνοντας τη βέλτιστη απόδοση. Όμως, αυτή η περίπτωση έχει σημαντικά μειονεκτήματα, το αυξημένο κόστος, τον μεγαλύτερο όγκο και την αυξημένη πολυπλοκότητα.

Η ημι-ενεργή τοπολογία υβριδικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της παθητικής και της ενεργής τοπολογίας, δημιουργώντας μια ισορροπία μεταξύ απόδοσης και κόστους. Στην τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται ένας μόνο μετατροπέας DC/DC επιτρέποντας την ρύθμιση της ροής ενέργειας μεταξύ των συσσωρευτών και των υπερπυκνωτών. Στην ημι-ενεργή τοπολογία μπορούν να υλοποιηθούν περισσότερες στρατηγικές ελέγχου, καθιστώντας την ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές όπου αποδοτικότητα και το κόστος είναι κρίσιμοι παράγοντες. Κάθε εφαρμογή έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις οι οποίες καθορίζουν την επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας.

2.5 Ο μετατροπέας DC/DC

Παράλληλα, στο Υβριδικό Σύστημα Ενέργειας (HES) ανακύπτει ένα νέο πρόβλημα. Αυτό της σωστής κατανομής ισχύος μεταξύ της πηγής υψηλής ισχύος (υπερπυκνωτής) και της πηγής υψηλής ενέργειας, δηλαδή του συσσωρευτή [38]. Η κατανομή της ισχύος πραγματοποιείται μέσω ενός κατάλληλα ελεγχόμενου μετατροπέα DC/DC. Για να προστατευθούν οι μπαταρίες από βαθιά εκφόρτιση, απαιτείται ένας αμφίδρομος μετατροπέας DC/DC για να αυξήσει την τάση εξόδου του υπερπυκνωτή σε ένα επίπεδο ασφαλές για τη μπαταρία.

Σε τυπικές εφαρμογές, η πηγή υψηλής ισχύος παρέχει άμεσα ισχύ στον δέκτη και η φόρτισή της αναπληρώνεται έπειτα από μακρύτερο χρονικό διάστημα από την πηγή υψηλής ενέργειας μέσω του μετατροπέα [41]. Με αυτόν τον τρόπο, η πηγή υψηλής ενέργειας επιβαρύνεται με χαμηλότερη τιμή ρεύματος, αλλά για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, κάτι που έχει πολύ θετική επίδραση στη διάρκεια ζωής της, ειδικά στην περίπτωση των μπαταριών λιθίου-ιόντων (Li-ion).

Έπειτα από έρευνες, σε ένα HESS, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η απόδοση όχι μόνο των πηγών υψηλής ενέργειας και υψηλής ισχύος, αλλά και του εξαρτήματος που συνδέει και τις δύο πηγές, δηλαδή του μετατροπέα DC/DC [42]. Σε πολλές εργασίες, αποδείχθηκε ότι ο μετατροπέας συνεχούς ρεύματος δεν πρέπει να είναι υπερβολικά μεγάλος και υπερδιαστασιοποιημένος, αλλά, ταυτόχρονα, η ισχύς του πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να μπορεί να ισορροπεί αποτελεσματικά και σχετικά γρήγορα το επίπεδο φόρτισης της πηγής υψηλής ισχύος. Η ανεπαρκής ισχύς του μετατροπέα DC/DC δεν επιτρέπει την αποτελεσματική επαναφόρτιση της πηγής υψηλής ισχύος εντός του καθορισμένου χρονικού ορίου. Από την άλλη πλευρά, ένας μετατροπέας με υπερβολική ισχύ είναι βαρύς, ακριβός και απαιτεί επιπλέον ψύξη, κάτι που επηρεάζει τη διάρκεια ζωής της πηγής υψηλής ενέργειας. Από αυτή την άποψη, η επιλογή ενός μετατροπέα DC/DC δεν είναι μια απλή εργασία και θα πρέπει να γίνεται βάσει εις βάθος αναλύσεων μιας συγκεκριμένης εφαρμογής.

2.5.1 Αρχές λειτουργίας του μετατροπέα DC/DC

Σύμφωνα με την παραπάνω εισαγωγή ένας ή και δυο μετατροπείς (inverter DC/DC) κρίνονται απαραίτητοι για τη διαχείριση της ενέργειας μεταξύ της μπαταρίας και των υπερπυκνωτών. Αυτές οι δύο πηγές ενέργειας έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά [43]. Οι μπαταρίες έχουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα, αλλά χαμηλή ισχύ απόκρισης, ενώ οι υπερπυκνωτές έχουν υψηλή ισχύ απόκρισης αλλά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα. Ο μετατροπέας συνδυάζει τα πλεονεκτήματα αυτών των δύο πηγών για να επιτύχει την καλύτερη απόδοση του συστήματος.

Ο μετατροπέας λειτουργεί μετατρέποντας την τάση από τη μία πηγή στην απαιτούμενη τάση για την άλλη. Συνήθως, ο μετατροπέας είναι υπεύθυνος για τη μετατροπή της τάσης της μπαταρίας (που είναι σχετικά σταθερή) σε μια τάση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους υπερπυκνωτές, ή το αντίστροφο. Ο μετατροπέας μπορεί επίσης να διαχειρίζεται την ενέργεια από την μπαταρία ή τους υπερπυκνωτές για να παρέχει την απαραίτητη ισχύ στους ηλεκτροκινητήρες του οχήματος. Η κύρια λειτουργία του περιλαμβάνει την εξισορρόπηση της ενέργειας μεταξύ των μπαταριών και των υπερπυκνωτών, εξασφαλίζοντας ότι η ενέργεια από τις υπερπυκνωτές χρησιμοποιείται για απότομες απαιτήσεις ισχύος (π.χ. επιτάχυνση), ενώ οι μπαταρίες παρέχουν τη βασική ενέργεια για τη λειτουργία του οχήματος σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Παράλληλα μπορεί να δημιουργήσει ένα DC link για το

πάντρεμα των 2 τάσεων , δηλαδή της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή για μια σταθερή και ενιαία τάση εξόδου.

Ένας μετατροπέας DC/DC λειτουργεί με τις παρακάτω αρχές λειτουργίας [44]:

- 1) Μετατροπή της τάσης: Ο μετατροπέας μετατρέπει την τάση από την μπαταρία ή τους υπερπυκνωτές σε διαφορετική τάση που απαιτείται για τη λειτουργία των μοτέρ ή άλλων εξαρτημάτων του οχήματος. Για παράδειγμα, η μπαταρία μπορεί να παρέχει μια σταθερή τάση (π.χ., 400V), ενώ το μοτέρ μπορεί να απαιτεί διαφορετική τάση για τη βέλτιστη λειτουργία του.
- 2) Διαχείριση Ροής Ενέργειας: Ο μετατροπέας διαχειρίζεται τη ροή της ενέργειας μεταξύ της μπαταρίας και των υπερπυκνωτών. Οι υπερπυκνωτές, με την ικανότητά τους να φορτίζονται και να εκφορτίζονται γρήγορα, χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας σε περιόδους υψηλής ζήτησης, όπως κατά την επιτάχυνση ή το φρενάρισμα
- 3) Αύξηση της απόδοσης: Ο μετατροπέας ρυθμίζει τη λειτουργία των μοτέρ ώστε να λειτουργούν στην πιο αποδοτική τους περιοχή. Αυτό περιλαμβάνει τη διαχείριση των τάσεων και των ρευμάτων για την αποφυγή απωλειών και την αύξηση της συνολικής απόδοσης.

Επίσης ένα μετατροπέας DC/DC σωστά διαστασιολογημένος είναι ικανός να βελτιώσει την απόδοση ενός υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος, μπαταριών και υπερπυκνωτών με τους εξής τρόπους [45]:

- I. Αύξηση αποδοτικότητας διαχείρισης ενέργειας: Οι υπερπυκνωτές μπορούν να αποθηκεύουν ενέργεια από το φρενάρισμα (ανάκτηση ενέργειας) και να την αποδίδουν γρήγορα κατά την επιτάχυνση, μειώνοντας την ανάγκη για άμεση παροχή ενέργειας από την μπαταρία. Αυτό μειώνει τις απώλειες ενέργειας και αυξάνει τη συνολική απόδοση του συστήματος.
- II. Μείωση φθορών της μπαταρίας: Οι μπαταρίες λιθίου έχουν περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης. Οι υπερπυκνωτές μπορούν να αναλάβουν τις αιφνίδιες αιχμές ενέργειας, μειώνοντας την καταπόνηση της μπαταρίας και αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής της.
- III. Βελτίωση της δυναμικής απόκρισης: Οι υπερπυκνωτές έχουν πολύ γρήγορη απόκριση σε αλλαγές στη ζήτηση ενέργειας, επιτρέποντας στο όχημα να ανταποκρίνεται πιο άμεσα σε επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις. Αυτό βελτιώνει την οδική συμπεριφορά και την ασφάλεια.
- IV. Εξοικονόμηση βάρους: Η βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας μπορεί να μειώσει την ανάγκη για μεγάλες και βαριές μπαταρίες όπως και για μεγάλα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα, μειώνοντας το συνολικό βάρος του οχήματος και βελτιώνοντας την απόδοσή του.
- V. Βελτίωση θερμικής διαχείρισης: Η μειωμένη καταπόνηση της μπαταρίας και η αποδοτικότερη διαχείριση της ενέργειας μειώνουν την παραγωγή θερμότητας. Αυτό συμβάλλει στην καλύτερη θερμική διαχείριση και στην αποφυγή υπερθέρμανσης των εξαρτημάτων.

Συνεπώς ο ρόλος του μετατροπέα είναι κρίσιμος όχι μόνο για την απόδοση του οχήματος αλλά για την βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας από τις μπαταρίες και τους υπερπυκνωτές. Οι σύγχρονες τεχνολογίες και οι προηγμένοι αλγόριθμοι μπορούν να ενισχύσουν την απόδοση και την αξιοπιστία των συστημάτων αυτών, καθιστώντας τα ηλεκτρικά οχήματα πιο αποδοτικά και βιώσιμα.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Στρατηγικές Διαχείρισης Ενέργειας

Λόγω της αυξανόμενης ανησυχίας για την υπερθέρμανση του πλανήτη και τις αλλαγές στο κλίμα, οι κανονισμοί εκπομπών από οχήματα γίνονται όλο και πιο αυστηροί. Αυτό έχει οδηγήσει σε σημαντική πρόοδο στην ηλεκτροκίνηση των οχημάτων και τον υβριδισμό προκειμένου να συμμορφωθούν με αυτούς τους κανονισμούς [46]. Μια από τις πιο αποτελεσματικές στρατηγικές για την εκπλήρωση των αυστηρών προτύπων εκπομπών είναι η αντικατάσταση των παραδοσιακών οχημάτων που κινούνται με κινητήρα εσωτερικής καύσης με υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEV) ή αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (BEV). Τα HEV συνδυάζουν έναν ηλεκτροκινητήρα που τροφοδοτείται από μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία με έναν παραδοσιακό εσωτερικής καύσης κινητήρα για να παρέχουν μια ισχυρή μέθοδο μεταφοράς κίνησης. Λόγω αυτού του υβριδισμού, τα HEV μπορούν να μετακινούνται ομαλά μεταξύ των δύο χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτροκινητήρα και έναν συμβατικό κινητήρα, αυξάνοντας την οικονομία καυσίμου και μειώνοντας τις εκπομπές. Τα HEV χαρακτηρίζονται από την ενσωμάτωση διαφορετικών πηγών ενέργειας και μετατροπείς ισχύος, κυρίως από τον συνδυασμό ενός εσωτερικού κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE) και ενός ηλεκτροκινητήρα. Τα HEV εξετάζονται επί του παρόντος από άποψη κόστους-αποδοτικότητας και μπορούν να αποτελέσουν μια πιθανή λύση για το μέλλον.

Ο κύριος στόχος στην ανάπτυξη των HEV είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών ενώ ταυτόχρονα αντιμετωπίζονται οι απαιτήσεις ισχύος των οδηγών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της έρευνας κατάλληλων στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας που μπορούν αποτελεσματικά να διανείμουν και να αξιοποιούν πηγές ενέργειας στα HEV. Οι στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας (EMS) είναι κρίσιμες για την επίτευξη βέλτιστης κατανομής ισχύος στα HEV ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιούν την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων σε διάφορες καταστάσεις οδήγησης. Η σημασία των EMS για τη βελτίωση της οικονομίας καυσίμου και τη μείωση των εκπομπών από τα HEV είναι ευρέως αναγνωρισμένη. Η πολύπλοκη φύση των τεχνολογιών υβριδικής ενέργειας, με πολλές πηγές ενέργειας και πολύπλοκες συμπεριφορές, παρουσιάζει προκλήσεις για την απόδοση των EMS. Ο κύριος στόχος των EMS, ανεξάρτητα από τη διάταξη του συστήματος μετάδοσης κίνησης, είναι ο αποτελεσματικός έλεγχος και η διαχείριση της ροής ηλεκτρικής ενέργειας από μετατροπείς ενέργειας για την επίτευξη της βέλτιστης ισχύος.

3.1 Η φιλοσοφία των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας

Ο όρος "στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας" (EMS – Energy Management System) περιγράφει μια συλλογή οργανωμένων σχεδίων, τύπων ή τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματική ρύθμιση και μεγιστοποίηση της χρήσης των ενεργειακών πόρων εντός ενός συγκεκριμένου συστήματος [47]. Τα EMS περιλαμβάνουν τη δυναμική κατανομή και διανομή ενέργειας από διάφορες πηγές, όπως οι εσωτερικές καύσεις και οι ηλεκτροκινητήρες, για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις πρόωσης ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιούν την ενεργειακή απόδοση, ειδικά στο πλαίσιο των υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων (HEV – Hybrid Electric Vehicle) ή των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων (BEV) και άλλων ενεργοβόρων εφαρμογών. Τα EMS για τα EV (ηλεκτρικά αυτοκίνητα - EV) μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες με βάση τις αρχές και τις στρατηγικές τους.

Τα EMS βασισμένα σε κανόνες βασίζονται σε ένα προκαθορισμένο σύνολο κανόνων και λογικής για να λαμβάνουν αποφάσεις διαχείρισης ενέργειας. Συνήθως βασίζονται σε ειδικές γνώσεις και ευρήματα, οι οποίες καθορίζουν τις ενέργειες που πρέπει να ληφθούν σε διάφορες συνθήκες. Το

σύστημα μπορεί να δίνει προτεραιότητα στον ηλεκτροκινητήρα κατά την οδήγηση σε αστικές περιοχές με ταχύτητα και να μεταβαίνει στην εσωτερική καύση κατά την οδήγηση σε υψηλότερες ταχύτητες.

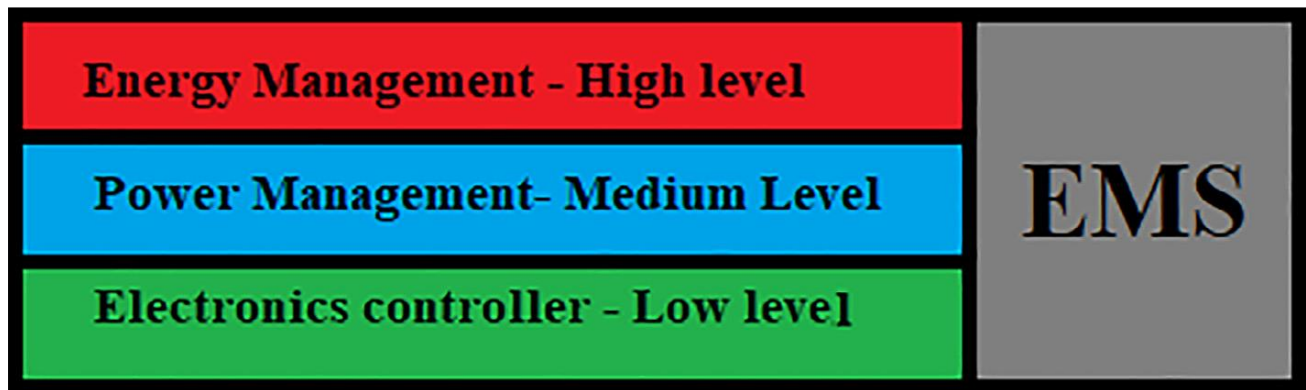
Τα EMS βασισμένα σε κανόνες προσφέρουν απλότητα και σαφήνεια, αλλά ενδέχεται να μην είναι επαρκώς ευέλικτα για να χειριστούν διαφορετικές οδηγικές καταστάσεις [48]. Οι κανόνες πρέπει να οριστούν και να τακτοποιηθούν σε ένα ενιαίο για να εκτελεστεί ένα EMS βασισμένο. Ανάλογα με τον σχεδιασμό του συστήματος, ο σύνολο κανόνων μπορεί να θεωρηθεί ως μια αλληλουχία που αξιολογούνται σειριακά ή ταυτόχρονα. Τα EMS βασισμένα σε κανόνες επιλέγουν τον/τους σωστό(ούς) κανόνα(ς) που ταιριάζει(ουν) καλύτερα στις παρούσες συνθήκες μετά τη συνεχή αξιολόγηση της κατάστασης του συστήματος. Οι μετρήσεις που πρέπει να γίνουν για τη μεγιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας καθορίζονται στη συνέχεια από τον επιλεγμένο κανόνα. Για τη λειτουργία των EMS βασισμένων σε κανόνες, πρέπει να δημιουργηθεί ένα σύνολο κανόνων που να κωδικοποιεί τη γνώση και την εμπειρία των μηχανικών ή των ειδικών του τομέα. Κάθε κανόνας περιγράφει μια συγκεκριμένη κατάσταση ή συνθήκη, και η αντίστοιχη ενέργεια καθορίζει την εντολή ελέγχου ή την τεχνική εφαρμογή. Οι λειτουργικές παράμετροι του οχήματος, όπως η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, η ταχύτητά του και η φόρτιση του κινητήρα, παρακολουθούνται συνεχώς από τα EMS βασισμένα σε κανόνες κατά τη λειτουργία τους. Οι προκαθορισμένοι κανόνες συγκρίνονται με την τρέχουσα κατάσταση, και η ενέργεια που σχετίζεται με τον πρώτο κανόνα που πληροί τις απαιτήσεις εκτελείται. Σε αυτήν την ιεραρχική ή βασιζόμενη σε προτεραιότητες διαδικασία, οι κανόνες με υψηλότερη προτεραιότητα έχουν τυπικά προτεραιότητα έναντι των κανόνων με χαμηλότερη προτεραιότητα.

Το πρόβλημα της διαχείρισης ενέργειας διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Οι καλύτερες ενεργειακές ενέργειες που μειώνουν την κατανάλωση καυσίμου ή αυξάνουν την απόδοση εντοπίζονται χρησιμοποιώντας μαθηματικές προσεγγίσεις βελτιστοποίησης όπως ο δυναμικός προγραμματισμός ή ο τετραγωνικός προγραμματισμός [49]. Τα EMS που βασίζονται στη βελτιστοποίηση μπορεί να χειριστούν πιο περίπλοκες οδηγικές καταστάσεις για την κάλυψη συγκεκριμένων στόχων. Ωστόσο, ενδέχεται να απαιτούν σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους και προγνωστική κατανόηση της δυναμικής του οχήματος. Η κύρια ιδέα πίσω από τα EMS που βασίζονται στη βελτιστοποίηση είναι η εντοπισμός της καλύτερης δράσης ελέγχου για τον έλεγχο του συστήματος με στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου, τη μείωση εκπομπών και την αύξηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος. Η διαδικασία βελτιστοποίησης περιλαμβάνει τη διατύπωση περιορισμών που λαμβάνουν υπόψη στοιχεία όπως η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, η ζήτηση ενέργειας, οι περιορισμοί στα συστατικά και η δυναμική του οχήματος, καθώς και τον καθορισμό μιας συνάρτησης στόχου που αποτυπώνει τον στόχο βελτιστοποίησης, όπως η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου ή η μέγιστη απόδοση. Αυτοί οι περιορισμοί εγγυώνται ότι η λύση είναι πρακτική και συμμορφώνεται με τους περιορισμούς λειτουργίας του συστήματος EV.

Διάφοροι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του διατυπωμένου προβλήματος. Αυτοί οι αλγόριθμοι προσαρμόζουν επανειλημμένα τις μεταβλητές ελέγχου, όπως τη ροπή του κινητήρα και την ενέργεια της μπαταρίας, για να αναζητήσουν τη βέλτιστη λύση που ικανοποιεί την συνάρτηση στόχου και τους περιορισμούς. Χρησιμοποιούν το δυναμικό προγραμματισμό, τον τετραγωνικό προγραμματισμό, τους εξελικτικούς αλγόριθμους και τον ελεγκτή προβλέψεων μοντέλου. Οι προσεγγίσεις βασισμένες στην εκμάθηση εκμεταλλεύονται αλγόριθμους μηχανικής μάθησης για να μάθουν και να προσαρμόζουν τη στρατηγική διαχείρισης ενέργειας με βάση ιστορικά δεδομένα και πραγματικά ανατροφοδοτούμενα. Με τη χρήση ενός συνόλου δεδομένων

οδηγημάτων και των συνοδευόμενων βέλτιστων ενεργειακών ενεργειών εκπαιδεύονται αλγόριθμοι εκπαίδευσης με επίβλεψη ή ενίσχυσης. Έπειτα μπορεί να προβλεφθεί το καλύτερο σχέδιο διαχείρισης ενέργειας για τα διάφορα οδηγικά σενάρια χρησιμοποιώντας το μοντέλο που έχει μάθει. Τα EMS που βασίζονται στη μάθηση έχουν το πλεονέκτημα της ευελιξίας, καθώς μπορούν να βελτιώνονται συνεχώς με την εμπειρία τους. Ωστόσο, για την εκπαίδευσή τους, ενδέχεται να απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων εκπαίδευσης και τεράστια ισχύ υπολογισμού.

Η βασική ιδέα πίσω από τα EMS που βασίζονται στη μάθηση είναι η χρήση ιστορικών δεδομένων οδήγησης και μετρήσεων απόδοσης για την εκπαίδευση ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης προκειμένου να καταγράψει τις πολύπλοκες συνδέσεις μεταξύ διαφόρων εισόδων (όπως η φόρτιση της μπαταρίας, η ταχύτητα του οχήματος και οι συνθήκες του δρόμου) και τις αντίστοιχες βέλτιστες ενεργειακές ενέργειες ελέγχου (π.χ. ροπή κινητήρα, ενέργεια μπαταρίας) [50]. Για την εκπαίδευση του μοντέλου, τα ζευγάρια εισόδου-εξόδου από ένα μεγάλο σύνολο δεδομένων τροφοδοτούνται σε αυτό, και το μοντέλο στη συνέχεια δοκιμάζεται για να ανακαλύψει τα υποκείμενα μοτίβα και συσχετίσεις. Το εκπαιδευμένο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου μετά τη φάση μάθησης για να προβλέψει τον ιδανικό διαμοιρασμό ισχύος - Power Distribution ratio και τις εντολές ελέγχου βάσει των τρεχουσών συνθηκών οδήγησης. Οι λειτουργικοί παράμετροι του οχήματος παρακολουθούνται συνεχώς από τα EMS που βασίζονται στη μάθηση, τα οποία επίσης συλλέγουν πραγματικά δεδομένα αισθητήρων και τα τροφοδοτούν στο εκπαιδευμένο μοντέλο για να παρέχουν τις πιο αποτελεσματικές εντολές ελέγχου κατά την Εικόνα 3.1. Αυτό δίνει στα EMS τη δυνατότητα να προσαρμόζονται σε διάφορες οδηγικές καταστάσεις, συνθήκες δρόμου και συμπεριφορά οδηγού, βελτιώνοντας την ενεργειακή οικονομία και την απόδοση [39].

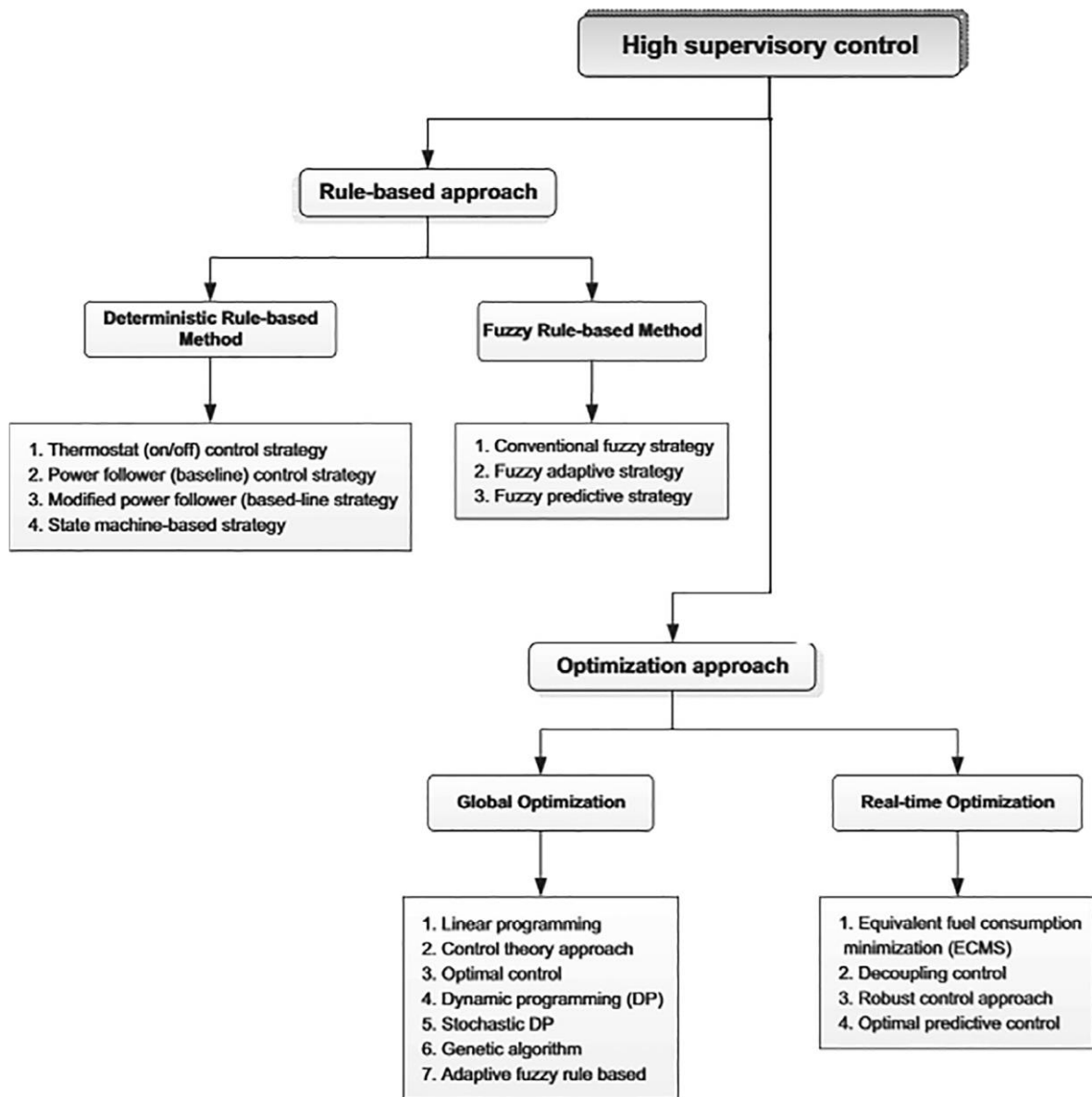


Εικόνα 3.1 Επίπεδα ενεργειακής διαχείρισης

Ακολουθήθηκαν διάφορες προσεγγίσεις σχετικά με το σχεδιασμό ενός έξυπνου EMS, με χρήση ενός πολύ σύνθετου αλγόριθμο ελέγχου που διαχειρίζεται τις συνθήκες εισόδου, όπως η μετατόπιση φορτίου διάρκειας ισχύος/πεντάλ και το HESS SoC, για να τροποποιήσει την ισχύ εξόδου παρατείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας [52]. Οι ερευνητές εφάρμοσαν την αρχή EMR (Energetic Macroscopic Representation) για το υβριδικό σύστημα για να εξομαλύνει το ρεύμα της μπαταρίας κατά 30%. Οι βασικές τεχνολογίες που επιδεικνύονται από τους Liu et al, αποδεικνύουν ότι ο έλεγχος και η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο ολόκληρου του ηλεκτρικού συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της μοντελοποίησης ηλεκτρικών μπαταριών, μπορεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση διασφαλίζοντας ομαλότερες συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, η αναλογία υπερπυκνωτών υποδεικνύει μια αξιοπρεπή αύξηση εύρους, έως και 25%, βελτιώνοντας τον έλεγχο

φόρτισης/εκφόρτισης SC, την ικανότητα πέδησης ανάκτησης με μειωμένη απώλεια ενέργειας/διακυμάνσεις ισχύος που προάγουν την εφαρμογή HESS. Η πολιτική ρύθμισης ισχύος συχνότητας μέσω υψηλοπερατών φίλτρων έχει συζητηθεί από τους Sandoval και Grijalva για τη βαθμολόγηση των τροχιών ισχύος και την ελαχιστοποίηση της πίεσης που εφαρμόζεται στην αποθήκευση ενέργειας. Όλα αυτά τα εργαλεία είναι πρακτικά, στοχεύοντας σε κάθε αδυναμία και κάθε πτυχή του HESS. Η διαίρεση του EMS σε υποσυστήματα υψηλού, μεσαίου και χαμηλού επιπέδου, μπορεί να μειώσει την πολυπλοκότητα και να καταστήσει την ικανότητα προσθήκης περαιτέρω πληροφοριών όπως γεωμετρία δρόμου, ζώνες ορίου ταχύτητας και κυκλοφορία εύκολα προσαρμόσιμη.

Η κατηγοριοποίηση των στρατηγικών απεικονίζεται στην εικόνα 3.2 παρακάτω:



Εικόνα 3.2 Στρατηγικές EMS

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί αρκετές στρατηγικές για τον προσδιορισμό της πιο κατάλληλης προσέγγισης EMS όσον αφορά το κόστος, την ευρωστία, την αξιοπιστία, τη

βελτιστοποίηση και την ευκολία εφαρμογής [53]. Η εικόνα 3.2 παρέχει μια επισκόπηση αυτών των στρατηγικών EMS όπως ταξινομούνται στη βιβλιογραφία, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως σε τρεις κύριες προσεγγίσεις:

- Στρατηγικές βασισμένες σε κανόνες (Rule-based strategies - SR)
- Στρατηγικές βασισμένες σε βελτιστοποίηση (Optimization-based strategies - SO)
- Στρατηγικές βασισμένες σε μάθηση ή μηχανική μάθηση (Strategies based on learning or machine learning - SL).

Οι στρατηγικές που βασίζονται σε κανόνες (SR) χρησιμοποιούν την τεχνογνωσία των μηχανικών, μετατρέποντάς την σε εκτελέσιμους κανόνες που διέπουν τα σήματα ελέγχου του συστήματος μετάδοσης κίνησης [54]. Αυτές οι στρατηγικές έχουν σχεδιαστεί για να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια απόδοσης και να λαμβάνουν υπόψη τους λειτουργικούς περιορισμούς των εξαρτημάτων του οχήματος, συμπεριλαμβανομένης της κατάστασης φόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (ESS). Τα SR είναι γνωστά για την απλότητα και την αποτελεσματικότητά τους στον εποπτικό έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, αλλά ενδέχεται να μην έχουν προσαρμοστικότητα υπό διαφορετικές συνθήκες φορτίου. Αυτό απαιτεί λεπτομερή ρύθμιση των παραμέτρων του οχήματος για ευθυγράμμιση με συγκεκριμένους στόχους απόδοσης.

Οι προσδιοριστικές μέθοδοι εντός των βασισμένων σε κανόνες, όπως η στρατηγική με το θερμοστάτη, διαχειρίζονται την κατάσταση φόρτισης μέσω μιας διαδικασίας υστέρησης, εναλλάσσοντας μεταξύ φάσεων φόρτισης και εκφόρτισης [55]. Παρόλο που είναι αξιόπιστες, ενδέχεται να μην λαμβάνουν υπόψη τους τη κατηγοριοποίηση των σεναρίων οδήγησης. Αντίθετα, οι μη προσδιοριστικές ή ασαφείς λογικές προσεγγίσεις εντός των SR προσφέρουν έναν πιο δυναμικό μηχανισμό ελέγχου, ικανό να αντιμετωπίζει τις μη γραμμικότητες και τις αβεβαιότητες στο σύστημα του οχήματος. Η ανάπτυξη αυτών των ασαφών συστημάτων απαιτεί σημαντική εμπειρία στον τομέα του σχηματισμού κανόνων και του κλιμακωτού συστήματος.

Οι ψευδοφασματικές μέθοδοι που βασίζονται σε κανόνες στα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιήθηκαν από τους Li et al. σε μια εφαρμογή HESS όπου η θερμοκρασία και οι τάσεις των εξαρτημάτων αξιολογήθηκαν για τη ρύθμιση της ισχύος εξόδου [56]. Παράλληλα με τη στρατηγική βελτιστοποίησης k-control για να καταστεί δυνατή η επιλογή μιας κατάλληλης τοπολογίας ελεγκτή EMS, χρησιμοποιήθηκαν στρατηγικές βασισμένες σε κανόνες και φιλτράρισμα των συνθηκών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η βασισμένη σε κανόνες στρατηγική λειτούργησε καλύτερα στο sizing του συστήματος και σε όλους σχεδόν τους κύκλους λειτουργίας. Δημιουργήθηκε ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης με κανόνες δυναμικού προγραμματισμού, όπου το HESS αυτοπροσαρμόζεται για να παρέχει την ονομαστική ισχύ χωρίς να φτάνει σε χαμηλότερο όριο, ανάλογα με την τρέχουσα ταχύτητα και την απαίτηση ισχύος. Όπως φαίνεται στον πίνακα 2, επιτεύχθηκε βελτίωση κατά 4% σε όλες τις καταστάσεις (SOH)- μια προσέγγιση προβλεπτικού ελέγχου με βάση το δυναμικό προγραμματισμό θα πρέπει να είναι σε θέση να προβλέπει τις οδικές συνθήκες για να παρέχει ένα κατάλληλο μοντέλο διαχωρισμού ισχύος με ελάχιστες απώλειες. Για την ελαχιστοποίηση του κόστους, των απωλειών μεταγωγής/αγωγιμότητας και των διακυμάνσεων του ρεύματος συν του μεγέθους, το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύτηκε και επιβλέφθηκε με στρατηγική δυναμικού προγραμματισμού.

Πίνακας 2. Σύγκριση αποδόσεων των διαφόρων υβριδικών συστημάτων

Strategy	Cycles	T. (°C)	Bat (kJ)	UC (kJ)	Total energy loss	Eff.
Original	100	10	4085	1765	14,692	82.4%
Optimized	100	10	2955	2016	10,409	86.9%
Boost	-	-	27.7%	-14.2%	29.1%	4.5%
Original	550	10	5563	1793	16,197	80.9%
Optimized	550	10	4028	2020	11,494	85.7%
Boost	-	-	27.6%	-12.7%	29%	4.8%
Original	650	10	8442	1791	19,104	78.3%
Optimized	650	10	6033	2024	13,526	83.6%
Boost	-	-	28.5%	-13%	29.2%	5.3%
Original	550	40	1933	1776	12,524	84.6%
Optimized	550	40	1423	2012	8857	88.6%
Boost	-	-	26.4%	-13.3%	29.3%	4%

Μια από τις δημοφιλέστερες μεθόδους για την εκτέλεση της στρατηγικής ελέγχου είναι η ασαφής λογική διότι δεν απαιτείται η εγκατάσταση ενός συγκεκριμένου μοντέλου για πολύπλοκα και μη γραμμικά συστήματα [57]. Ένα από τα κατάλληλα συστήματα για τη στρατηγική της ασαφούς λογικής είναι το σύστημα με μη σύνθετη γραμμικότητα, ενώ η συνολική απόδοση που επιτυγχάνεται σε πραγματικό χρόνο την καθιστά όλο και πιο ευρέως εφαρμόσιμη. Στη βιβλιογραφία, ο αλγόριθμος ασαφούς λογικής εφαρμόστηκε για τον έλεγχο ενός HESS με καθοδηγητική μεθοδολογία ταυτόχρονα. Επίσης, σε προηγούμενη αναφορά, ο αλγόριθμος ασαφούς λογικής ενσωματώθηκε στις στρατηγικές ελέγχου HESS που αποτελούνταν από κυψέλες καυσίμου, υπερπυκνωτές και μπαταρίες. Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, ο έλεγχος ασαφούς λογικής απέφυγε την προσομοίωση των πολύπλοκων συστημάτων αλλά τα σφάλματα ήταν πολύ λιγότερα. Σε μια άλλη αναφορά, ο αλγόριθμος ασαφούς λογικής χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο ενός HESS ενός εργοστασίου ενέργειας και ο αλγόριθμος ήταν απλούστερος από τους άλλους με το ίδιο αποτέλεσμα.

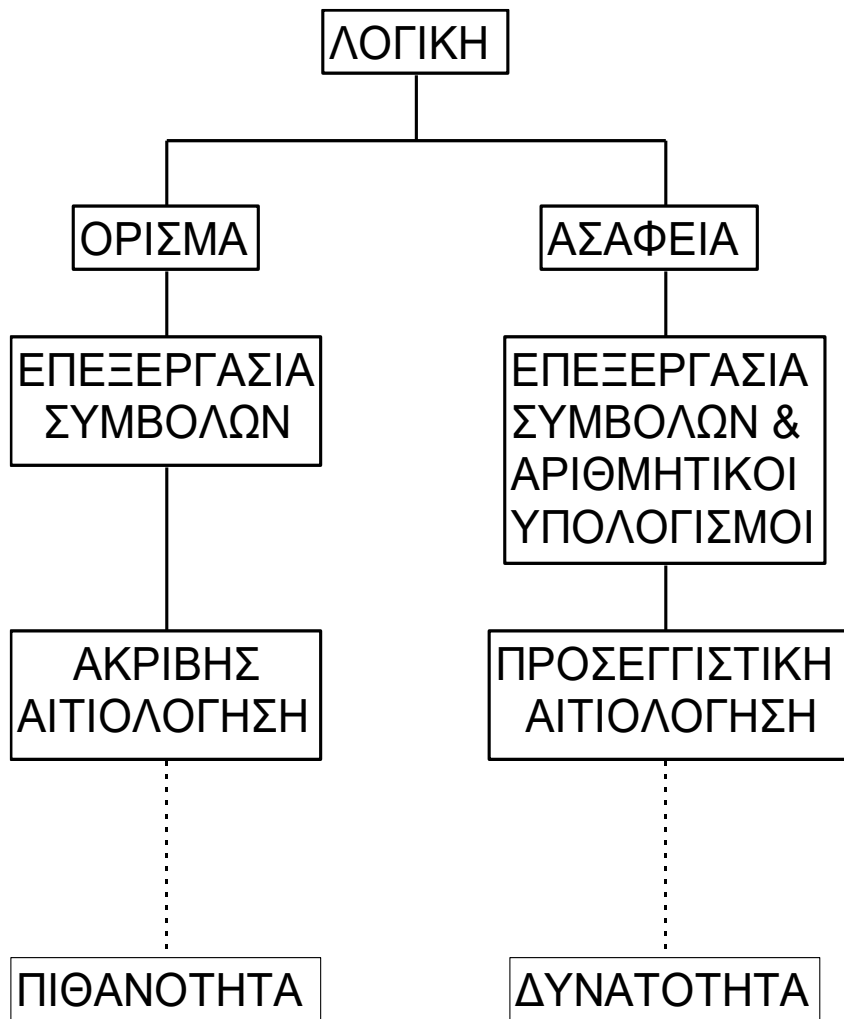
3.2 Εισαγωγή στην ασαφή λογική

Η ανάπτυξη της λογικής ως επιστήμη έγινε πριν από περισσότερο από δύο χιλιάδες χρόνια, όταν ο Αριστοτέλης διατύπωσε τις αρχές της Τυπικής Λογικής ή Λογικής Πρώτης Τάξης (Formal Logic, First Order Logic) [58]. Αυτή η λογική βασιζόταν στην έννοια ότι ένας συλλογισμός ήταν είτε αληθής είτε ψευδής, ένα στοιχείο ανήκε είτε δεν ανήκε σε ένα σύνολο, σύμφωνα με συγκεκριμένους κανόνες, όπως για παράδειγμα το σύνολο των ζυγών αριθμών. Η παρουσία ενός στοιχείου σε ένα σύνολο, συνεπώς, μπορούσε να αναπαρασταθεί με ένα δυαδικό ψηφίο: 1 για ένα στοιχείο του συνόλου και 0 για ένα στοιχείο που δεν ανήκει στο σύνολο.

Κατά τη δεκαετία του 1920, έγινε το επόμενο βήμα στην εξέλιξη της λογικής. Τα λογικά παράδοξα και η αρχή της απροσδιοριστίας συνέβαλαν στην ανάπτυξη της "διακριτής" λογικής από τον Lukasiewicz. Σε αυτήν την προσέγγιση, το "σωστό" και το "λάθος", η "αλήθεια" και το "ψεύδος" ενός συλλογισμού θεωρούνταν ως ακραίες τιμές ενός πεδίου τιμών. Μέσα σε αυτό το πεδίο, μπορούσε να οριστεί μια ή και περισσότερες ενδιάμεσες τιμές. Η εισαγωγή της ασαφούς λογικής από τον Lotfi A. Zadeh στη δεκαετία του 1960 ήταν μια σημαντική επανάσταση στον χώρο της μαθηματικής λογικής και της τεχνητής νοημοσύνης. Αντί να χρησιμοποιεί απόλυτες τιμές, όπως στην κλασική λογική, η ασαφής λογική επιτρέπει τη χρήση ασαφών έννοιών, όπως "μικρός", "μεγάλος", "κοντά", "μακριά", κλπ. Οι ασαφείς όροι και τα ασαφή σύνολα αντικατοπτρίζουν τη φυσική μας τάση να σκεφτόμαστε και να ερμηνεύουμε τον κόσμο γύρω μας με έννοιες που δεν είναι απόλυτα καθορισμένες. Αυτό το

μοντέλο επιτρέπει την αντιμετώπιση της ανακρίβειας και της ασάφειας που συναντώνται σε πολλά πρακτικά προβλήματα. Ένα παράδειγμα εφαρμογής της ασαφούς λογικής είναι στα συστήματα ελέγχου, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη αποφάσεων βάσει ασαφών κριτηρίων, όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα, η ασφάλεια κλπ.

Η θεωρία των ασαφών συνόλων έχει εφαρμογές σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων της ρομποτικής, των συστημάτων ελέγχου, της επεξεργασίας φωνής και εικόνας, και πολλών άλλων [59]. Η ευελιξία και η δυνατότητα να αντιμετωπίζει ανακρίβειες καθιστούν την ασαφή λογική ένα ισχυρό εργαλείο για τη μοντελοποίηση και τον έλεγχο πολύπλοκων συστημάτων σύμφωνα με την Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3 Διάγραμμα Ασαφούς λογικής

Η πρωταρχική ιδιότητα της ασαφούς λογικής, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι η δυνατότητα της ανοχής για την ανακρίβεια. Η ακρίβεια είναι συχνά δαπανηρή υπόθεση, έτσι αν ένα πρόβλημα δεν απαιτεί ακρίβεια δεν θα έπρεπε να πληρώσει γι' αυτό. Το ενδεικτικό παράδειγμα της στάθμευσης ενός αυτοκινήτου δίνει μια αξιοσημείωτη εικόνα. Αν ο οδηγός δεν χρειάζεται να παρκάρει το αυτοκίνητο σ' ένα καθορισμένο χώρο δεν χρειάζεται να ξοδέψει χρόνο στο παρκάρισμα με το νόμιμο τρόπο [60]. Η ασαφής λογική και η κλασσική λογική διαφέρουν στην έννοια ότι η πρώτη μπορεί να χειρισθεί και το συμβολικό και τον αριθμητικό τρόπο αναπαράστασης, ενώ η δεύτερη

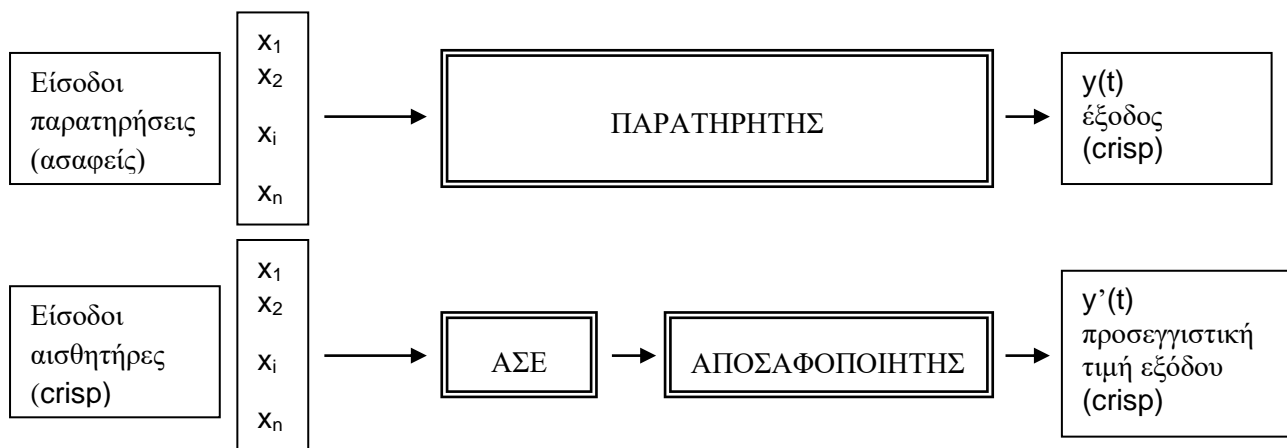
μπορεί να χειρισθεί μόνο το συμβολικό τρόπο. Στην ευρεία έννοια, η ασαφής λογική είναι μία ένωση της ασαφούς και της κλασσικής λογικής.

Ο Zadeh προκειμένου να τονίσει τον πρωταρχικό στόχο της ασαφούς λογικής παρήγαγε ένα σύστημα προσανατολισμένο στους υπολογιστές, εφοδιασμένο με αρχές και τεχνικές για τον χειρισμό μεθόδων αιτιολόγησης που είναι προσεγγιστικός και όχι ακριβείς. Έτσι η ασαφής λογική, ακριβής αιτιολόγηση, θεωρείται η οριακή περίπτωση της προσεγγιστικής λογικής. Στην ασαφή λογική τα πάντα είναι ζήτημα βαθμού.

Σε μια προσπάθεια να μεταφρασθεί η συγκεκριμένη (crisp) γνώση σε μια διαδικασία, τέτοια όπως η τάση, με μία λεκτική ή ασαφή γνώση, αυτό γίνεται μέσω της διαδικασίας της ασάφειας, πρέπει να μετατραπούν οι δυαδικές μεταβλητές εισόδου και εξόδου σε μέλη κάποιου ασαφούς συνόλου. Τα ασαφή σύνολα μπορούν να αναπαρασταθούν με μία μαθηματική τυποποίηση συχνά γνωστή σαν συνάρτηση συμμετοχής μέλους [61]. Η συνάρτηση αυτή δίνει ένα βαθμό ή τάξη συμμετοχής μέσα στο σύνολο. Η συνάρτηση συμμετοχής ενός ασαφούς συνόλου A , δηλώνεται με $\mu_A(x)$, απεικονίζει τα στοιχεία του όλου X μέσα σε μία αριθμητική τιμή μέσα στην περιοχή $[0,1]$. Σημειώνεται ότι μία συνάρτηση συμμετοχής είναι μία επονομαζόμενη συνάρτηση δυνατότητας και όχι μια συνάρτηση πιθανότητας. Σ' αυτά τα πλαίσια, μία μηδενική τιμή συμμετοχής αντιστοιχεί σε μία τιμή η οποία εξ ορισμού δεν είναι στοιχείο του ασαφούς συνόλου, ενώ μια τιμή του 1 αντιστοιχεί στη περίπτωση που το στοιχείο είναι εξ' ορισμού ένα μέλος του συνόλου. Στην ασαφή λογική, όπως στη δίτιμη λογική, ορίζονται πράξεις όπως η ένωση, η τομή, το συμπλήρωμα, OR, AND, κλπ.

3.2.1 Ασαφής Έλεγχος

Τα συστήματα ελέγχου που βασίζονται στην ασαφή λογική είναι συστήματα που χρησιμοποιούν κανόνες, όπου ένα σύνολο από ασαφείς κανόνες λογικής αποτελούν ένα μηχανισμό αποφάσεων για τον έλεγχο του συστήματος, προκειμένου να ρυθμίζουν τις λειτουργίες του [62]. Το σύστημα ασαφούς ελέγχου στοχεύει να αντικαταστήσει τον ανθρώπινο παρατηρητή με ένα σύστημα που βασίζεται σε κανόνες ασαφούς λογικής και παρουσιάζονται στην εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4 Διάγραμμα Ασαφή Ελέγχου

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα (εικόνα 3.4), ο άνθρωπος-παρατηρητής παρατηρεί ποσότητες διαβάζοντας ένα όργανο μέτρησης ή ένα διάγραμμα (ασαφή μεταβλητή) και εκτελεί μια συγκεκριμένη ενέργεια, όπως το πάτημα ενός κουμπιού ή τον περιστροφή ενός μοχλού (παρέχοντας μια σαφή ενέργεια). Με παρόμοιο τρόπο, ο ασαφής έλεγχος, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένες (crisp)

πληροφορίες από έναν αριθμό αισθητήρων, μέσω της διαδικασίας δημιουργίας ασάφειας μετατρέπει αυτές τις πληροφορίες σε λεκτικές πληροφορίες ή ασαφείς συναρτήσεις συμμετοχής. Στη συνέχεια, μέσω ενός συνόλου από ασαφείς κανόνες "IF-THEN", παρόμοιους με ένα έμπειρο σύστημα, επηρεάζουν κάποιες ασαφείς εξόδους. Οι ασαφείς εξόδοι μετατρέπονται στη συνέχεια σε συγκεκριμένες (crisp) τιμές μέσω μιας διαδικασίας αποσαφηνισμού, όπως η μέθοδος του κεντροειδούς (centroidal). Το αποτέλεσμα είναι μια τιμή εξόδου y . Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μια προσέγγιση της τιμής εξόδου y αντί για την πραγματική τιμή εξόδου y .

Ένας ασαφής έλεγχος λαμβάνει τη μορφή ενός συνόλου από κανόνες IF-THEN, όπου το μέρος της συνθήκης - υπόθεσης (IF) και το μέρος του συμπεράσματος - απόφασης (THEN) είναι συναρτήσεις μέλους [63]. Από αυτούς τους κανόνες, προκύπτει ένας μόνο αριθμός εξόδου, ο οποίος είναι δυαδικός. Οι ασαφείς κανόνες είναι ένας μηχανισμός με τον οποίο αναπαριστούμε τη γνώση, η οποία έχει προκύψει από την ανθρώπινη σκέψη μας. Σε ένα έξυπνο ασαφές σύστημα, οι κανόνες μπορεί να προκύψουν από τη γνώση ενός ανθρώπου, όπως ενός χειριστή.

Για παράδειγμα, αν η θερμοκρασία είναι υψηλή, τότε μείωσε το ρεύμα σε μεσαία επίπεδα. Σε αυτόν τον κανόνα, οι όροι "υψηλή" και "μεσαία" είναι ασαφείς μεταβλητές. Αυτοί οι κανόνες μεταφράζονται σε γλώσσα υπολογιστή ως:

IF (A είναι A1 και B είναι B1 και Γ είναι Γ1 και Δ είναι Δ1) THEN (E είναι E1 και F είναι F1).

Με τη χρήση ενός συνόλου τέτοιων κανόνων, προκύπτει ένας συγκεκριμένος αριθμός κανόνων που μπορεί να ερμηνευτεί ως φυσική γλώσσα, όπως αν ένας χειριστής παρουσιάζει το έργο του ελέγχου. Σε ένα πρακτικό σύστημα, όπως ένα σύστημα κλιματισμού, ο χειριστής συνήθως ρυθμίζει ή ομαλοποιεί τη λειτουργία μέσω κουμπιών, μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή ψύξη ή θέρμανση στον επιθυμητό χρόνο. Αυτή η γνώση ενός χειριστή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό ενός ασαφούς συστήματος ελέγχου για ένα σύστημα κλιματισμού. Ένα από τα πιο γνωστά εργαλεία στο σχεδιασμό ενός ασαφούς συστήματος ελέγχου είναι τα ασαφή συστήματα βασισμένα σε κανόνες.

3.2.2 Προτερήματα της ασαφούς λογικής

Παρακάτω παρατίθεται μια λίστα γενικών παρατηρήσεων σχετικά με την ασαφή λογική [64]:

- Η ασαφής λογική είναι εύκολη να κατανοηθεί συλλεκτικά.

Τα μαθηματικά συμπεράσματα που βρίσκονται πίσω από τον ασαφή συλλογισμό είναι πολύ απλά. Η ασαφής λογική αποτελεί μια πιο εντοπισμένη προσέγγιση χωρίς την εκτεταμένη πολυπλοκότητα.

- Η ασαφής λογική είναι ευέλικτη.

Με οποιοδήποτε δεδομένο σύστημα, είναι εύκολο η πρόσθεση λειτουργιών κατά την εκτέλεση και ανατροφοδότηση του έργου .

- Η ασαφής λογική είναι ανεκτική στα ανακριβή δεδομένα.

Όλα είναι ανακριβή αν το δούμε προσεκτικά, αλλά πέρα από αυτό, τα περισσότερα πράγματα είναι ανακριβή ακόμα και με προσεκτική επιθεώρηση. Η ασαφής σκέψη ενσωματώνει αυτή την κατανόηση στη διαδικασία αντί να την προσθέτει στο τέλος.

- Η ασαφής λογική μπορεί να μοντελοποιήσει μη γραμμικές συναρτήσεις αυθαίρετης πολυπλοκότητας.

Μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα ασαφές σύστημα για να ταιριάζει με οποιοδήποτε σύνολο εισόδου-εξόδου δεδομένων. Αυτή η διαδικασία γίνεται ιδιαίτερα εύκολη με τεχνικές προσαρμοστικής όπως τα Προσαρμοστικά Νευρο-Ασαφή Συστήματα Ενδοσκόπησης (ANFIS), τα οποία είναι διαθέσιμα στο λογισμικό Fuzzy Logic Toolbox.

- Η ασαφής λογική μπορεί να βασιστεί στην εμπειρία των ειδικών.

Αντίθετα από τα νευρωνικά δίκτυα, τα οποία παίρνουν δεδομένα εκπαίδευσης και δημιουργούν αδιαφανείς, αδιαπέραστα μοντέλα, η ασαφής λογική σας επιτρέπει να βασίζεστε στην εμπειρία ανθρώπων που ήδη κατανοούν το σύστημά σας.

- Η ασαφής λογική μπορεί να αναμειχθεί με συμβατικές τεχνικές ελέγχου.

Τα ασαφή συστήματα δεν αντικαθιστούν απαραίτητα τις συμβατικές μεθόδους ελέγχου. Σε πολλές περιπτώσεις τα ασαφή συστήματα τις ενισχύουν και απλοποιούν την υλοποίησή τους.

- Η ασαφής λογική βασίζεται στη φυσική γλώσσα.

Η βάση της ασαφούς λογικής είναι η βάση της ανθρώπινης επικοινωνίας. Αυτή η παρατήρηση υποστηρίζει πολλές από τις άλλες δηλώσεις σχετικά με την ασαφή λογική. Επειδή η ασαφής λογική βασίζεται στις δομές της ποιοτικής περιγραφής που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή γλώσσα, η ασαφής λογική είναι εύκολη στη χρήση.

4 Ανάπτυξη μοντέλου διαχείρισης ενέργειας για ένα υβριδικό σύστημα ηλεκτρικού αυτοκινήτου βασισμένο στην ασαφή λογική με τη χρήση MatLaB

4.1 MatLab και Simulink

MATLAB

Το λογισμικό Matlab είναι ένα τεράστιο περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών με εντυπωσιακά χαρακτηριστικά. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται από εκατομμύρια μηχανικούς και επιστήμονες παγκοσμίως. Το λογισμικό βασίζεται σε πίνακες, τον πιο φυσικό τρόπο αναπαράστασης των υπολογιστικών μαθηματικών. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι τα ευέλικτα γραφικά του, τα οποία καθιστούν εύκολη την οπτικοποίηση και την εξαγωγή πληροφοριών από τα δεδομένα: παρέχονται δυνατότητες γραφικών παραστάσεων δύο και τριών διαστάσεων, καθώς και μέθοδοι έμμεσης γραφικής παράστασης τεσσάρων διαστάσεων. Επιπλέον, υπάρχουν εργαλεία για αντικειμενοστραφή προγραμματισμό, αλγόριθμους και στοιχεία βάσεων δεδομένων. Εν ολίγοις, εννοείται ότι το περιβάλλον του Matlab είναι για πειραματισμό, εξερεύνηση και ανακάλυψη.



Εικόνα 4.1 Matlab

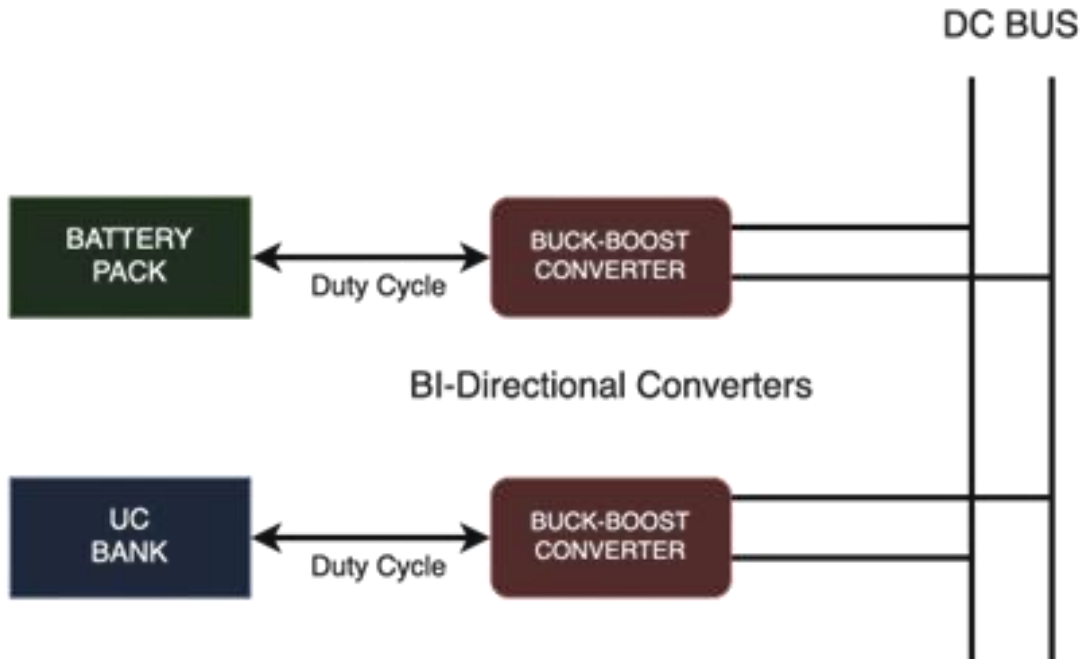
SIMULINK

Το Simulink είναι ένα περιβάλλον μπλοκ διαγραμμάτων που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση και τον σχεδιασμό βάσει μοντέλου σε διάφορους τομείς. Το πρόγραμμα υποστηρίζει τη δημιουργία συστημάτων σε επίπεδο συστήματος, προσομοιώσεις, αυτόματη δημιουργία κώδικα και συνεχή δοκιμή και επαλήθευση των ενσωματωμένων συστημάτων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση και τη δυναμική ανάλυση κινητήρων ΣΡ ξένης διέγερσης, καθώς και για την ανάλυση διαφόρων λειτουργικών σεναρίων. Επιπλέον, παρέχει ένα γραφικό πρόγραμμα επεξεργασίας, προσαρμόσιμες βιβλιοθήκες μπλοκ για τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση δυναμικών συστημάτων, και είναι ενσωματωμένο με το MATLAB για εύκολη επεξεργασία δεδομένων και ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

4.2 Περιγραφή μεθοδολογίας

4.2.1 Υβριδικό σύστημα αποθήκευσης

Η τοπολογία του εφαρμοζόμενου υβριδικού συστήματος είναι ένας παράμετρος κλειδί στην κατανομή ισχύος και τη δυναμική απόδοση ολόκληρης της εγκατάστασης. Όπως αναλύσαμε και παραπάνω υπάρχουν 3 διαφορετικές τοπολογίες: Παθητική, ημι-ενεργή και ενεργή. Στην παθητική διάταξη, οι δύο πηγές απλά συνδέονται παράλληλα, μειώνοντας επαρκώς τις αιχμηρές ρευματικές τιμές, αλλά η τάση του υπερ-πυκνωτή περιορίζεται από την μπαταρία [65]. Στην ημι-ενεργή διάταξη, απαιτείται ένας μετατροπέας dc-προς-dc που συνδέεται στη μπαταρία ή στον υπερ-πυκνωτή, ενώ ο άλλος συνδέεται παράλληλα με τον μετατροπέα, προσφέροντας καλύτερη προστασία των κυψελών και μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με το κόστος, αλλά η διάταξη περιορίζεται από το χαμηλότερο αναλογία απόδοσης προς κόστος και την αυξημένη διάσταση του μετατροπέα. Τέλος, η ενεργή τοπολογία υποδηλώνει δύο διπλής κατεύθυνσης μετατροπείς που συνδέονται άμεσα με τις δύο πηγές ενέργειας (μπαταρία και υπερ-πυκνωτή) και στη συνέχεια προς το DC Bus που τροφοδοτεί τον κινητήρα και άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Και οι δύο πηγές μπορούν να συζευχθούν ή να αποσυζευχθούν από το φορτίο ταυτόχρονα. Αυτή η διάταξη επιλέγεται για το έργο αυτό, καθώς η απόδοση, ο έλεγχος, η αποδοτικότητα και η ρύθμιση της τάσης είναι οι κύριες προτεραιότητες, παρά το γεγονός ότι είναι η πιο περίπλοκη ρύθμιση. Η κατανομή ενέργειας είναι εξαιρετικά προσαρμόσιμη, προσφέροντας τη δυνατότητα δοκιμής διαφορετικών στρατηγικών διαχείρισης ενέργειας. Η προβλεπόμενη τοπολογία απεικονίζεται στην εικόνα 4.2 παρακάτω.



Εικόνα 4.2 Προβλεπόμενη τοπολογία: Πειραματική διάταξη με δύο μετατροπείς buck-boost συνδεδεμένους απευθείας στο DC BUS με έξοδο ισχύος απευθείας συνδεδεμένη με τη λειτουργία τροφοδοσίας και τον κύκλο λειτουργίας

Για τους υπολογισμούς, λαμβάνεται υπόψη το μοντέλο απώλειας ισχύος. Καθώς οι εσωτερικοί παράμετροι και των δύο μετατροπέων δεν μπορούν να αγνοηθούν, όπως η αντίσταση του πηνίου, η πτώση τάσης και η αντίσταση ενεργοποίησης των διακοπών, θα χρησιμοποιηθεί η υπόθεση ότι τα μοντέλα και των δύο είναι ταυτόσημα. Η απώλεια ισχύος των στοιχείων DC/DC σχετίζεται με τον όρο που ονομάζεται κύκλος εργασίας. Αυτός περιγράφει το ποσοστό με το οποίο κάθε πηγή λειτουργεί μέχρι να φορτιστεί ξανά, για παράδειγμα, ένας κύκλος εργασίας 80% με 30% SOC και ανενεργός για να φορτιστεί, αντιστοιχεί σε 50% κύκλο εργασίας. Όπως προτείνεται, ο κύκλος εργασίας εκφράζεται ως η ενέργεια που παρέχεται από κάθε πηγή για να καλύψει την προβλεπόμενη ζήτηση ισχύος εντός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Επίσης, αναφέρεται ότι μια πτώση κατά 30% στο SOC του υπερ-πυκνωτή που απαιτείται για να καλυφθεί η επιτάχυνση του οχήματος από στάση θεωρείται επίσης ως 30% κύκλο εργασίας. Είναι γνωστό ότι μικροί κύκλοι εργασίας και χαμηλοί χρόνοι ή ρυθμοί φόρτισης (συνολική ενέργεια που αντλείται), είναι ουσιώδεις για την επέκταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας ή για την πρόληψη οποιασδήποτε δυνατής βλάβης καθώς και για την αύξηση της ικανότητας φόρτισης. Για τον υπολογισμό της απώλειας ισχύος απαιτούνται οι παρακάτω εξισώσεις.

$$\text{Boost mode: } \begin{cases} P_{VEHICLE} - V_H \times I_{UC} = V_L \times I_B - P_{CON,LOSS} \\ \frac{P_{VEHICLE}}{V_H} = I_{UC} + I_B \times (1 - D_{BOOST}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{Buck mode: } \begin{cases} P_{VEHICLE} - V_H \times I_{UC} = V_L \times I_B + P_{CON,LOSS} \\ \frac{P_{VEHICLE}}{V_H} = I_{UC} + I_B \times D_{BUCK} \end{cases} \quad (2)$$

Όπου PD είναι η ζήτηση ισχύος του οχήματος, $P_{CON,LOSS}$ αναφέρεται στην απώλεια ισχύος του μετατροπέα, V_H αντιστοιχεί στην τάση της χαμηλής πλευράς, ενώ το V_L είναι η τιμή της υψηλής

τάσης. Το I_B είναι ο ισχύς του πηνίου DC/DC, που επηρεάζει κυρίως τη μπαταρία, ενώ το I_{UC} υποδηλώνει το ρεύμα του υπερ-πυκνωτή. Τέλος, τα D_{BOOST} και D_{BUCK} αντιπροσωπεύουν τους κύκλους λειτουργίας στις λειτουργίες ενίσχυσης και προσθαλάσσωσης αντίστοιχα [66].

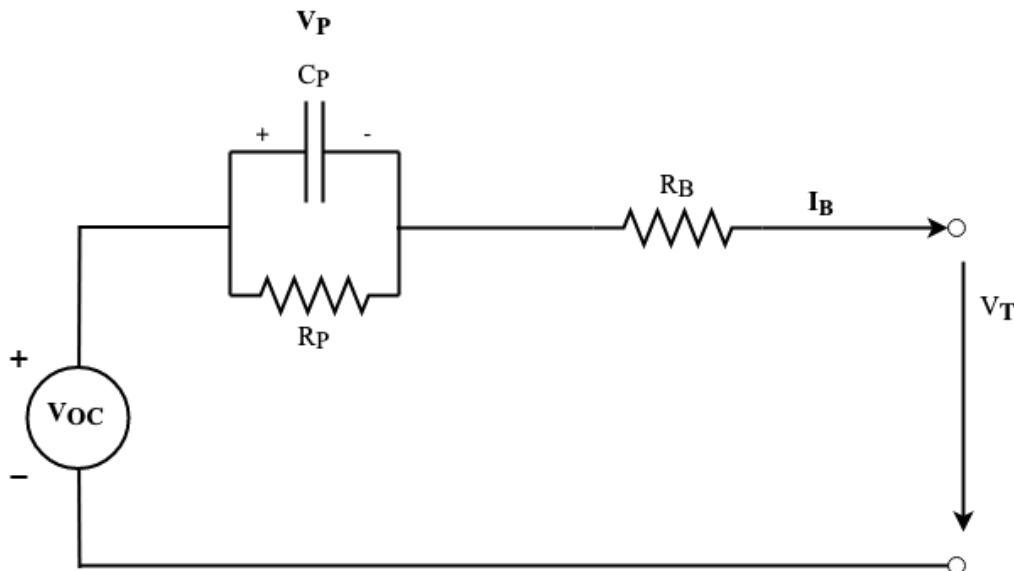
Συνεπώς, η περαιτέρω επεξεργασία με τη μετατροπή της ισχύος και τον τρέχοντα νόμο του Kirchhoff δείχνει ότι η απώλεια ισχύος του συνολικού συστήματος είναι ίση με το τετράγωνο του ρεύματος του επαγωγέα πολλαπλασιαζόμενο με τις εσωτερικές αντιστάσεις, τους κύκλους λειτουργίας σε κάθε κατάσταση και τις τάσεις των διακοπών του οι μετατροπείς που δεν μπορούν να αγνοηθούν

$$P_{CON,LOSS} = \begin{cases} I_B \times [(V_S + V_D) \times D_{BOOST}] + \times I_B^2 \times [R_L + (R_S + R_D) \times D_{BOOST}] \\ I_B \times [(V_S + V_D) \times D_{BUCK}] + \times I_B^2 \times [R_L + (R_S + R_D) \times D_{BUCK}] \end{cases} \quad (3)$$

Όπου V_D και R_D είναι η πτώση τάσης και η αντίσταση της διόδου, τα V_S και R_S υποδηλώνουν την πτώση τάσης και την αντίσταση του διακόπτη και το R_L αναφέρονται στην αντίσταση του επαγωγέα.

4.3 Μοντέλα πηγών ενέργειας

Όπως κάθε εξάρτημα και πηγή ενέργειας, έτσι η μπαταρία και ο υπερπυκνωτής μπορούν να απλοποιηθούν ακολουθώντας τη μοντελοποίηση Thevenin για καλύτερη εξήγηση, αγνοώντας τις απώλειες που είναι απειροελάχιστες. Έτσι, το μοντέλο της μπαταρίας αποτελείται από την εσωτερική αντίσταση R_B , την τάση πόλωσης V_P , την χωρητικότητα πόλωσης C_P , την αντίσταση πόλωσης R_P και το V_T ως τάση τερματικού. Τα V_{OC} υπολογίζονται ως η τάση ανοιχτού κυκλώματος, επομένως η μέγιστη τάση που μπορεί να παρέχει η μπαταρία χωρίς φορτίο. Έτσι, το τελικό μοντέλο παρουσιάζεται στην εικόνα 4.3 παρακάτω



Εικόνα 4.3 Μπαταρία Λιθίου, μοντέλο Thevenin

Ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης και τη θερμοκρασία σε κάθε συγκεκριμένη χρονική στιγμή k , οι τιμές πόλωσης είναι διαφορετικές και η τάση τερματικού πρέπει να υπολογιστεί από τις εξισώσεις. Είναι προφανές ότι αυτές οι παράμετροι βρίσκονται πάντα σε δυναμική κατάσταση και

πρέπει να εποπτεύονται από το σύστημα διαχείρισης ενέργειας για περαιτέρω προσαρμογές, βελτίωση της απόδοσης και του ελέγχου.

$$V_{T(k)} = V_{OC} \times SOC_{(k)} - I_{B(k)} \times R_B \times SOC_{(k)} - V_{P(k)} \quad (4)$$

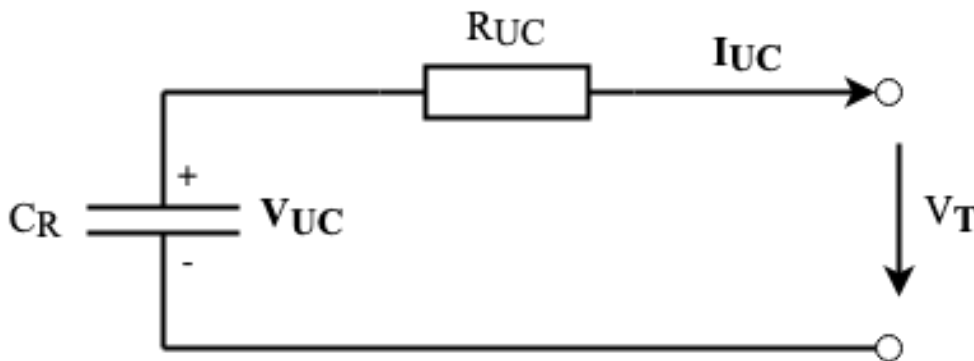
Όπου η εξίσωση αυτή περιγράφει τη κατάσταση φορτίου, τη στιγμή που το k εκφράζεται στην επόμενη εξίσωση.

$$SOC_{(k)} = \left(\frac{V_{P(k)} + V_{T(k)}}{V_{OC}} \right) \quad (5)$$

Τέλος, οι απώλειες της μπαταρίας λιθίου $P_{B,LOSS}$ μπορούν να υπολογιστούν σε οποιαδήποτε συγκεκριμένη χρονική στιγμή k συμπεριλαμβανομένων όλων των απωλειών που προκαλούνται από την πόλωση και την εσωτερική αντίσταση.

$$P_{B,LOSS} = I_B^2 \times R_B \times SOC + \frac{V_P}{R_P \times SOC} \quad (6)$$

Ο υπερπυκνωτής μπορεί να απλοποιηθεί ως μοντέλο RC ή ηλεκτρικό μοντέλο που περιέχει την ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR) ή τις απώλειες θερμότητας, την ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση (EPR), που αντιπροσωπεύει ρεύμα διαρροής και χωρητικότητα [67]. Ωστόσο, αυτό το μοντέλο προσθέτει πολυπλοκότητα στην προσομοίωση, επομένως προτιμάται το μοντέλο RC. Για απλότητα, τόσο η ονομαστική χωρητικότητα (C_R) όσο και η εσωτερική αντίσταση (R_{UC}) θα θεωρούνται συνεπείς, παρόλο που διαφέρουν κατά τη φόρτιση-εκφόρτιση λόγω των επιδράσεων του ESR και του EPR. Το V_{UC} και το I_{UC} αντιπροσωπεύουν την τάση και το ρεύμα του υπερπυκνωτή με V_T ως ακροδέκτη τάσης, παρόμοια με τη διάταξη της μπαταρίας. Το σχήμα στην εικόνα 4.4 απεικονίζει το τελικό μοντέλο του υπερπυκνωτή.



Εικόνα 4.4 Υπερ-πυκνωτής, μοντέλο RC

Εφόσον το μοντέλο είναι απλοποιημένο, είναι πλέον δυνατό να υπολογιστούν όλες οι τιμές μαζί με τις απώλειες ισχύος, χρησιμοποιώντας τους νόμους του Kirchhoff [68]. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος του υπερπυκνωτή σε ορισμένο n χρόνο:

$$V_{UC(n)} = V_{UC(n-1)} - \frac{I_{UC(n)}}{C_R} \quad (7)$$

Ακολουθεί η εξίσωση για την τάση ακροδεκτών του SC τη στιγμή n :

$$V_{T(n)} = V_{T(n-1)} - I_{UC(n)} \times R_{UC} \quad (8)$$

Η συνολική ισχύς που παρέχεται από τον υπερπυκνωτή εκφράζεται ως:

$$P_{UC(n)} = V_{T(n)} \times I_{UC(n)} \quad (9)$$

Το ρεύμα που ρέει μέσα και έξω από τον πυκνωτή υπολογίζεται με την εξίσωση 10. Η ίδια εξίσωση ισχύει για τη φόρτιση ή την εκφόρτιση με ένα μείον όταν ο πυκνωτής φορτίζεται:

$$I_{UC} = \frac{V_{UC} - \sqrt{V_{UC}^2 - 4 \times R_{UC} \times P_{UC}}}{2 \times R_{UC}} \quad (10)$$

Η εξίσωση 11 δείχνει τις απώλειες ισχύος λόγω εσωτερικής αντίστασης και ρεύματος διαρροής:

$$P_{UC,LOSS} = R_{UC} \times I_{UC}^2 \quad (11)$$

Η κατάσταση της τάσης, παρόμοια με το SOC για τους υπερπυκνωτές ισούται με την τάση ακροδεκτών διαιρούμενη με τη μέγιστη ονομαστική τάση από τον κατασκευαστή, όπως παρουσιάζεται στην Εξίσωση 12.

$$SOV = \frac{V_T}{V_{RATED}} \quad (12)$$

Η εξίσωση 13 εφαρμόζεται για τον υπολογισμό της παραμέτρου κατάστασης υγείας που αποκαλύπτει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας όπου το φορτίο εκφράζεται ως χωρητικότητα, μετρούμενη σε αμπέρ-ώρες.

$$SOH = \frac{Q_{max}}{Q_{rated}} \quad (13)$$

Τέλος, οι συνολικές απώλειες ισχύος του HESS συν τον μετατροπέα υπολογίζονται με την εξίσωση 14 παρακάτω:

$$P_{LOSS,TOTAL} = P_{CON,LOSS} + P_{B,LOSS} + P_{UC,LOSS} \quad (14)$$

4.4 Κύκλος λειτουργίας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο κύκλος λειτουργίας είναι ένας ουσιαστικός όρος για τη σωστή διαχείριση ενέργειας και διανομή ενέργειας. Οι παράμετροι SOC, SOV και άλλες παράμετροι θα πρέπει να διατηρούνται σε υψηλά επίπεδα για να καλύπτουν την απαραίτητη ισχύ για τον ηλεκτροκινητήρα [37]. Σε κλασματικά επίπεδα, η υπερφόρτιση ή η αποφόρτιση της μπαταρίας θα οδηγήσει σε λήξη της διάρκειας ζωής ή ακόμα και σε αστοχία. Είναι σημαντικό να διατηρείται η συχνότητα σταθερή, χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις, διατηρώντας παράλληλα την κατάσταση φόρτισης

και των δύο πηγών πάνω από το 25% ως χαμηλότερο όριο προστασίας και απόδοσης. Η επιλεγμένη τοπολογία προσφέρει εξαιρετικό έλεγχο μέσω της λειτουργίας buck-boost από τους μετατροπείς, μαζί με γρήγορη εναλλαγή ισχύος για προσαρμογές σε διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας ισχύος, ελαχιστοποιώντας το κυματισμό τάσης και τις απώλειες. Δεδομένου ότι η απόδοση του DC/DC μπορεί να φτάσει πάνω από 94% στις μέσες εξόδους ισχύος/ρεύματος, ο κύκλος λειτουργίας θα πρέπει να είναι χαμηλός και να επικεντρώνεται στη διατήρηση της φόρτισης SC σε υψηλά επίπεδα, διατηρώντας έτσι τον μετατροπέα στην περιοχή ονομαστικής ισχύος του.

Το υβριδικό ενεργειακό σύστημα απαιτείται για την κάλυψη της ζήτησης κινητήριας ισχύος P_{VEHICLE} του οχήματος που περιγράφεται στην Εξίσωση 15 παρακάτω:

$$P_{\text{VEHICLE}} = \frac{V_A}{3600 \cdot \eta} \times (M \times g \times f \times \cos(\beta) + M \times g \times \sin(\beta) + \frac{C_{\text{ARC}} \times A}{21.15} * V_A^2 + \frac{\delta \times M}{3.6} \times \frac{dV_A}{dt}) \quad (15)$$

όπου V_A είναι η ταχύτητα του αυτοκινήτου, η υποδηλώνει την απόδοση του συστήματος μετάδοσης κίνησης, M είναι η συνολική μάζα, g είναι η βαρυτική επιτάχυνση, f και C_{ARC} αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές υποβοήθησης κύλισης και αντίστασης αέρα, β δείχνει την κλίση του δρόμου, A είναι η εκτεθειμένη στον άνεμο περιοχή και το δ δηλώνει τον συντελεστή διόρθωσης του συντελεστή μάζας περιστροφής.

Με βάση την εξίσωση 14, το μέγεθος του HESS που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι ικανό να καλύψει και να ξεπεράσει τη ζήτηση ισχύος του οχήματος. Για λόγους ασφαλείας, η ισχύς της μπαταρίας από μόνη της θα πρέπει επίσης να μπορεί να καλύψει αυτήν την απαίτηση, επομένως ο συνολικός αριθμός κυψελών, η απαιτούμενη χωρητικότητα και η τάση εκφράζονται στην Εξίσωση 16

$$U_R \times C_R \times n_P \times n_S \geq P_{\text{VEHICLE}} \quad (16)$$

όπου το U_R είναι η ονομαστική τάση, το C_R υποδηλώνει την ονομαστική χωρητικότητα κάθε κυψέλης, το n_P δείχνει τα στοιχεία της μπαταρίας που απαιτούνται παράλληλα και το n_S αντιπροσωπεύει τα κελιά σε σειρά

4.5 Λειτουργίες ισχύος

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι λειτουργίας για ένα EV με βάση τον κινητήρα και τις καταστάσεις HESS. Αρχικοποίηση: Όταν το όχημα ξεκινά, το HESS πρέπει να παρέχει γρήγορα υψηλή ροπή. Αυτή τη στιγμή, η ισχύς παρέχεται μόνο από το SC, εκμεταλλευόμενη την υψηλή πυκνότητα ισχύος του. Κατά την επιτάχυνση, απαιτείται υψηλό ρεύμα, επομένως η μπαταρία θα πρέπει να βοηθά το SC στην κάλυψη της ζήτησης ισχύος του κινητήρα. Η τάση της μπαταρίας ενισχύεται από έναν μετατροπέα DC-DC για να ληφθεί υψηλή τάση διαύλου DC, επομένως το HESS παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια. Ο λόγος ισχύος εξόδου αυτών των πηγών θα πρέπει να κατανέμεται εύλογα με τον

υπερπυκνωτή να παρέχει το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες. Ωστόσο, καθώς η τάση του SC μειώνεται, ο κύκλος λειτουργίας μειώνεται, επομένως οι απώλειες ισχύος μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με την ταυτόχρονη εκφόρτιση της μπαταρίας ιόντων λιθίου και του υπερπυκνωτή. Ως αποτέλεσμα, το HESS μπορεί να προσαρμοστεί τέλεια στη μελλοντική στιγμιαία ζήτηση ισχύος.

Η επόμενη λειτουργία είναι η αναγεννητική πέδηση. Εάν το όχημα επιβραδύνει ή κινείται με υψηλές ταχύτητες, ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια και λειτουργεί σε κατάσταση παραγωγής ενέργειας. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αποστέλλεται πίσω στο HESS, σχεδόν εξ ολοκλήρου στο SC για να αποφευχθεί το ρεύμα υψηλής συχνότητας στην μπαταρία. Στη συνέχεια, ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης κάθε πηγής, η ενέργεια κατανέμεται στρατηγικά. Κατά τη φάση πέδησης, η τάση του ζυγού DC είναι χαμηλή και ο κύκλος λειτουργίας DC/DC είναι μικρός. Όταν η τάση του υπερπυκνωτή είναι υψηλότερη, ο κύκλος λειτουργίας DC/DC είναι μικρότερος, επομένως οι απώλειες είναι ελάχιστες.

Τέλος, στη λειτουργία ταξιδιού ή πορείας, ο κινητήρας λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα λόγω χαμηλού φορτίου ή κλίσης του δρόμου, επομένως μπορεί να απαιτείται μόνο ένα μικρό ρεύμα. Ως εκ τούτου, το SC χρησιμοποιείται για την παροχή όλων των ρευμάτων φορτίου καθώς είναι επαρκής. Ο μετατροπέας DC-DC μπαταρίας είναι προσωρινά απενεργοποιημένος για μείωση των απωλειών κυκλώματος. Ωστόσο, εάν η τάση SC πέσει κάτω από την τάση της μπαταρίας, η μπαταρία μπορεί να παρέχει ενέργεια στον κινητήρα και να φορτίζει το SC.

4.6 Το ασαφές μοντέλο

Για αυτό το έργο, επιλέγεται η ανάπτυξη ενός μοντέλου ασαφούς λογικής μέσω MATLAB / Simulink. Η ασαφής λογική είναι ένα μαθηματικό μοντέλο που οδηγεί σε μια μη δυαδική κατάσταση του νου και σε ένα εξελιγμένο σύστημα ελέγχου [61]. Τα συστήματα ασαφούς ελέγχου αποτελούνται από τέσσερα κύρια μέρη: ασάφεια, βασισμένη σε κανόνες, ασαφής συλλογιστική και απο-ασαφοποίηση. Η απαίτηση ισχύος είναι πολύτιμη παράμετρος λειτουργίας και βασικός παράγοντας του έργου. Παρόλο που απαιτείται αυξημένη επεξεργαστική ισχύς για την εκτέλεση των μοντέλων, υπάρχουν πολλαπλά οφέλη όσον αφορά τη χρήση της στρατηγικής και των ελεγκτών ασαφούς λογικής:

- i. Ρύθμιση τάσης του διαύλου συνεχούς ρεύματος κατά τις μεταβολές του φορτίου.
- ii. Περιορισμένες διακυμάνσεις ρεύματος και συχνότητας μπαταρίας, επομένως χαμηλότερες θερμοκρασίες.
- iii. Υψηλή απόδοση, απλότητα, αξιοπιστία και βελτιωμένη διάρκεια ζωής.

Το μοτίβο γραμμικότητας της απόκτησης δεδομένων είναι μια κρίσιμη παράμετρος για ένα ασαφές μοντέλο. Ένας ελεγκτής σταθμισμένης μνήμης Η χρησιμοποιείται για αυξημένη ακρίβεια στη μη γραμμική παρακολούθηση και αναγνώριση της κατάστασης μνήμης με βάση τα ασαφή συστήματα Takagi-Sugeno. Η μέθοδος αποσύνθεσης πακέτων κυματιδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της χρονικής αλληλουχίας για συνεπή ανάκτηση δεδομένων και αναγνώριση των καταστάσεων φόρτισης ή εκφόρτισης και ακόμη και για ταξινόμηση τρόπου λειτουργίας ισχύος. Επιπλέον, η μοντελοποίηση ασαφούς λογικής μπορεί να εφαρμοστεί όχι μόνο σε ηλεκτρικά οχήματα αλλά και σε μικρότερες εφαρμογές όπως ηλεκτρικά σκούτερ ή τρίτροχα, περιορίζοντας τις διακυμάνσεις και ενισχύοντας την εμβέλεια.

Ο ανεπτυγμένος ελεγκτής με βάση το ασαφές σύνολο έχει πέντε εισόδους: Απαίτηση ισχύος, Τάσεις UC και μπαταρίας και SoC. Ο ελεγκτής χρησιμοποιεί μια λίστα ασαφών κανόνων, για να χειριστεί τη συσχέτιση μεταξύ εισόδων και εξόδων. Σύμφωνα με τις αρχές, πρέπει να παρέχεται αποτελεσματική διαχείριση ενέργειας, σε σχέση με τις συνθήκες λειτουργίας της κάθε πηγής ξεχωριστά. Η παροχή βασίζεται στο SoC κάθε πηγής και οι τρόποι λειτουργίας που περιγράφηκαν προηγουμένως μπορεί επίσης να υποδεικνύουν τον τρόπο οδήγησης. Η βασική σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου που ορίζεται από τους ασαφείς κανόνες, είναι ότι η μπαταρία λειτουργεί ως η κύρια πηγή ενέργειας για το όχημα εφόσον το SOC είναι πάνω από 25% και η τάση του υπερπυκνωτή κάτω από 50%.

Σε σταθερές ταχύτητες με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, η ενέργεια παρέχεται από την μπαταρία λιθίου, ενώ το SC θα πρέπει να εξοικονομείται για φορτία αιχμής όπως μεγάλες κλίσεις και γρήγορες επιταχύνσεις. Επιπλέον, οι υπερπυκνωτές είναι αποτελεσματικοί στην εκμετάλλευση πέδησης με ανατροφοδότηση, καθώς η υψηλή πυκνότητα ισχύος τους επιτρέπει γρήγορη φόρτιση, ακόμη και με ρεύματα υψηλής συχνότητας. Στη συνέχεια, το SC μπορεί να φορτίσει την μπαταρία ή να χρησιμοποιήσει ένα χαμηλοπερατό φίλτρο για αυτήν την περίπτωση για να αποφύγει τις υψηλές συχνότητες. Ο ασαφής έλεγχος στοχεύει στη δημιουργία εντολών για φόρτιση και εκφόρτιση των δύο πηγών ενέργειας, ως συνάρτηση του ελεγκτή ασαφούς λογικής, που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Κανόνες για τον προτεινόμενο ελεγκτή ασαφούς λογικής

Κατάσταση ισχύος	Έξοδος ισχύος	
	SC	Μπαταρία
Αναγεννητική πέδηση	Φόρτιση*	Φόρτιση*
Coasting	Φόρτιση	Φόρτιση
Εκκίνηση	Μέγιστη	Χαμηλή
Αργή επιτάχυνση	Μεσαία	Μεσαία
Γρήγορη επιτάχυνση	Υψηλή	Μεσαία

* Ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης και τον κύκλο λειτουργίας

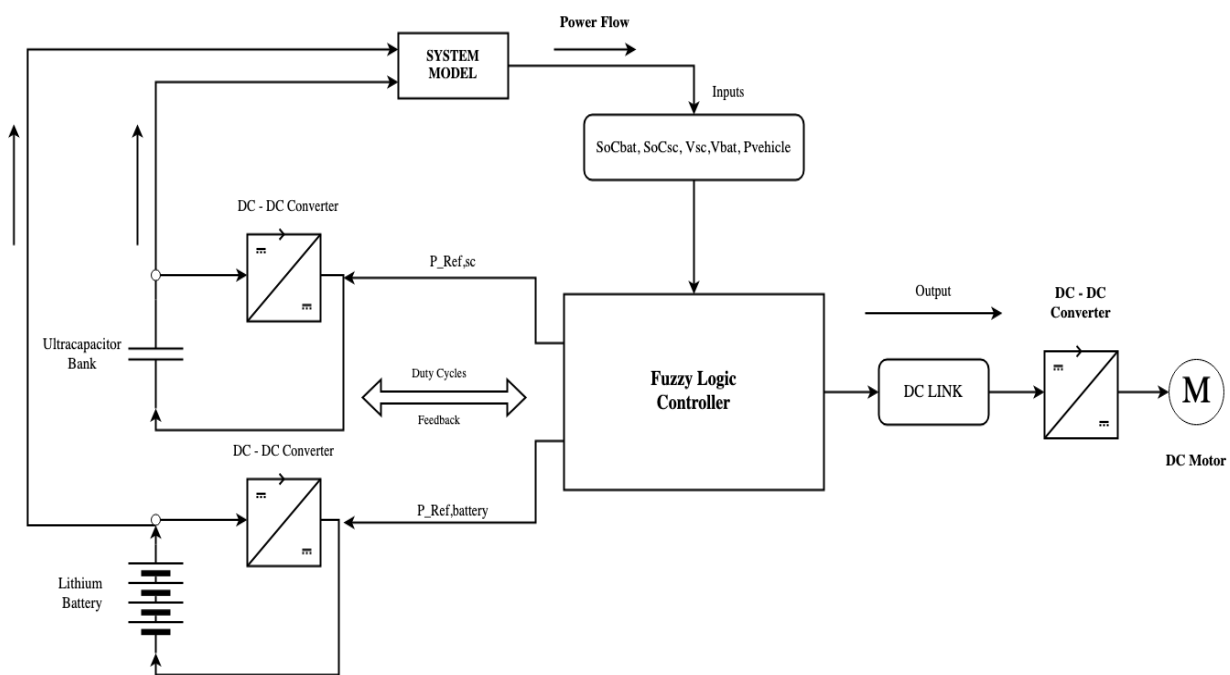
Οι κανόνες που περιλαμβάνουν το ασαφές μοντέλο είναι οι ακόλουθοι:

- I. Η ζήτηση ισχύος και το SOC_{SC} είναι M έως H: το SC θα παρέχει εξ ολοκλήρου τη ζήτηση.
- II. Η ζήτηση ισχύος είναι H και το SOC_{SC} είναι ML: Το SC θα παρέχει τη διαθέσιμη ισχύ του
- III. Η ζήτηση ισχύος είναι από M έως H και το SOC_{SC} είναι L: Η έξοδος και των δύο πηγών θα είναι ισορροπημένη
- IV. Η ζήτηση ισχύος είναι L σε ML και SOC_{SC} είναι L: Και πάλι, οι πηγές είναι ισορροπημένες
- V. Η ζήτηση ενέργειας είναι ML και το SOC_{SC} είναι L: Η μπαταρία θα καλύψει την ισχύ σχεδόν πλήρως
- VI. Η ζήτηση ισχύος είναι L έως ML και το SOC_{SC} είναι από M έως H: Το SC θα παρέχει το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος

Όπου το L είναι χαμηλό, το ML σημαίνει Μεσαίο Χαμηλό (Medium Low), το M για το μεσαίο και το H για το Υψηλό (High). Η κλίμακα αντιπροσωπεύεται ως ποσοστό ως εξής:

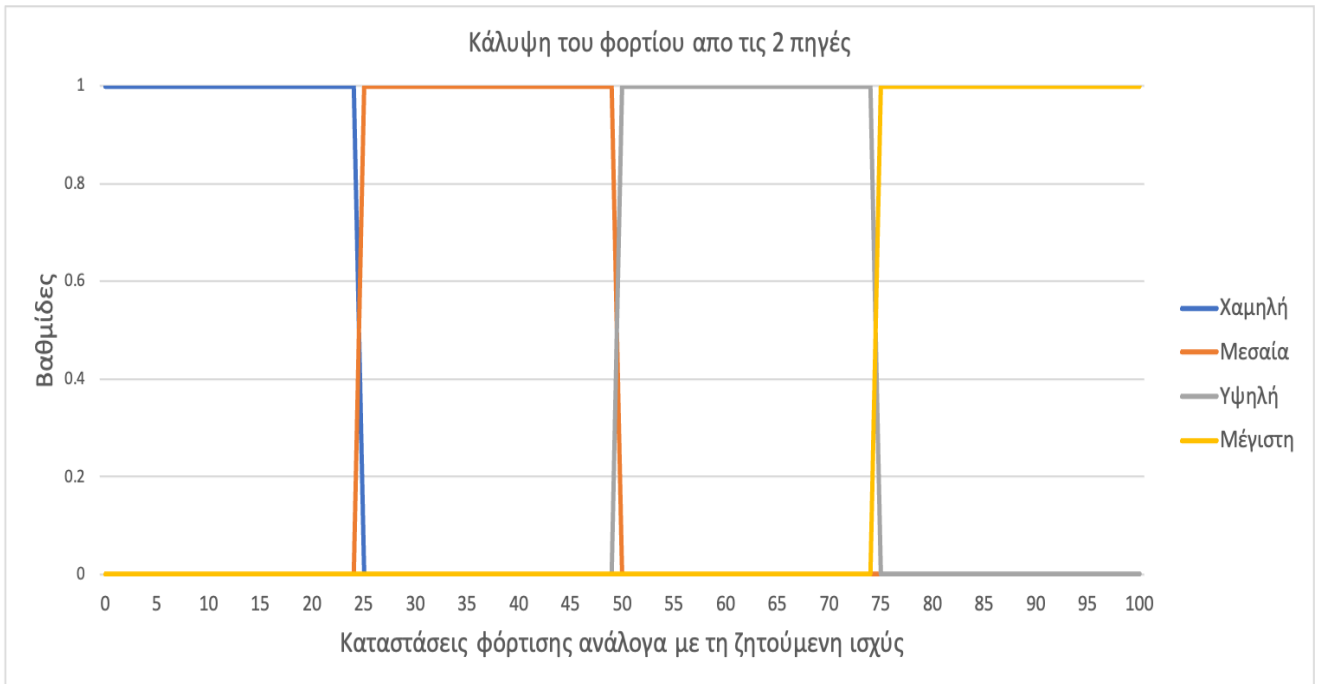
- Χαμηλό: 0 έως 25%
- Μεσαία Χαμηλή: 25 έως 50%
- Μεσαία: 50 έως 75%
- Υψηλό: > 75%

Το σχήμα που επιλέχθηκε για το EV παρουσιάζεται στην εικόνα 4.5 παρακάτω

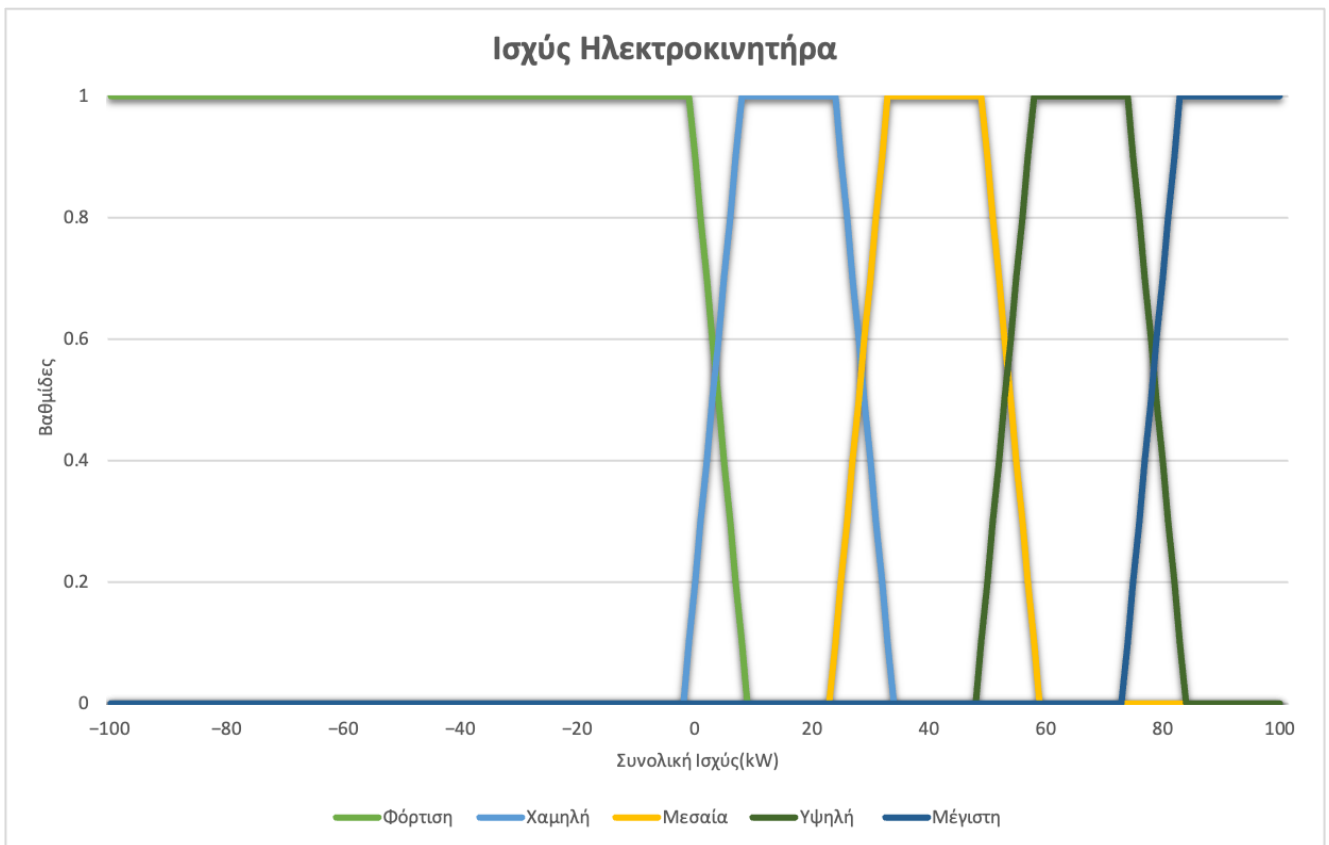


Εικόνα 4.5 Διάγραμμα ροής

Στη συνέχεια, το διάγραμμα ροής διαχείρισης ενέργειας δείχνει τη στρατηγική που ακολουθεί ο ελεγκτής ασαφούς λογικής για την κάλυψη της ζήτησης ισχύος και τη διαχείριση της εξόδου και των δύο πηγών. Οι συναρτήσεις μελών που εμφανίζονται σε προηγούμενες εργασίες, βασίζονται στο μοντέλο Mamdani, και προβάλλονται σε αυτή την μελέτη όπως φαίνεται στις εικόνες 4.6 και 4.7. Το ασαφές μοντέλο ενσωματώνει μια μικρή διαφορά στον ορισμό κανόνων (χαμηλό σε υψηλό) για να καθορίσει την τιμή του θερμοκρασίας και κύκλου λειτουργίας στα σεναρία κατανομής ισχύος που εφαρμόζονται.



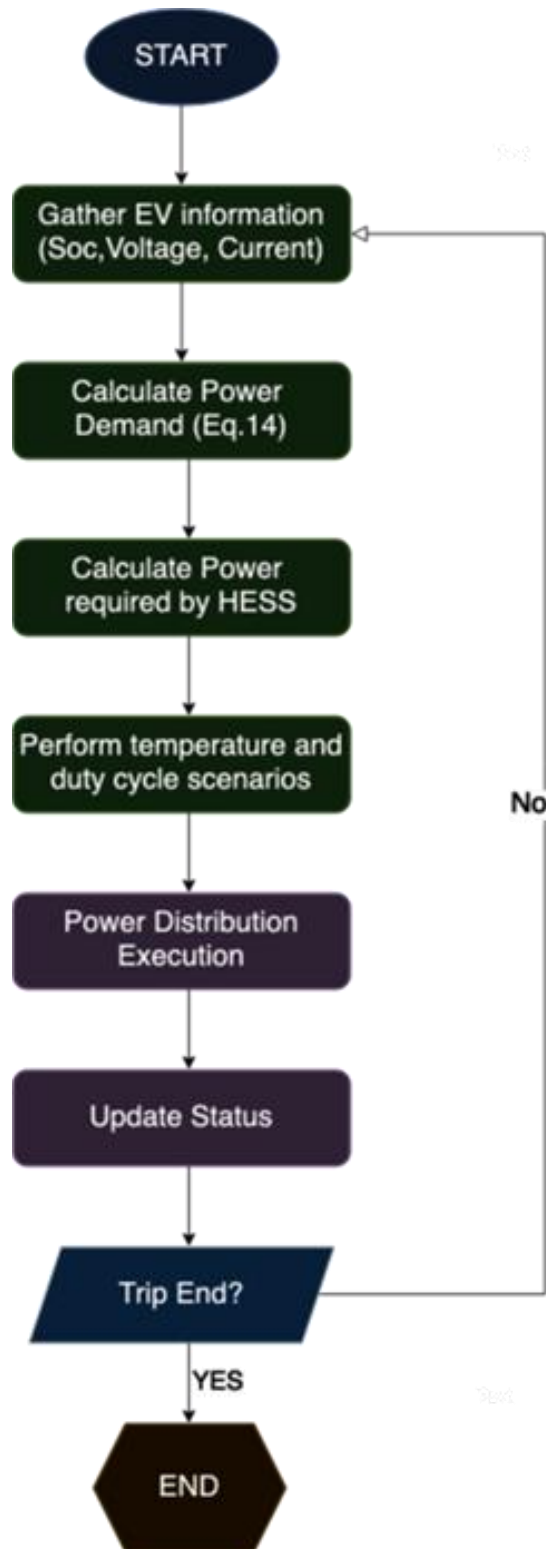
Εικόνα 4.6 Διακεκριμένες πηγές ενέργειας SoC για την κάλυψη της ζήτησης ισχύος



Εικόνα 4.7 Λειτουργία ισχύος κινητήρα

Εδώ παρουσιάζονται όλες οι συναρτήσεις μέλους που χρησιμοποιούνται για αυτό το ασαφές μοντέλο (α) Διακεκριμένες πηγές ενέργειας SoC για την κάλυψη της ζήτησης ισχύος. (β) Λειτουργία ισχύος κινητήρα (παράμετρος PVEHICLE) ανάλογα με την κατάσταση ισχύος

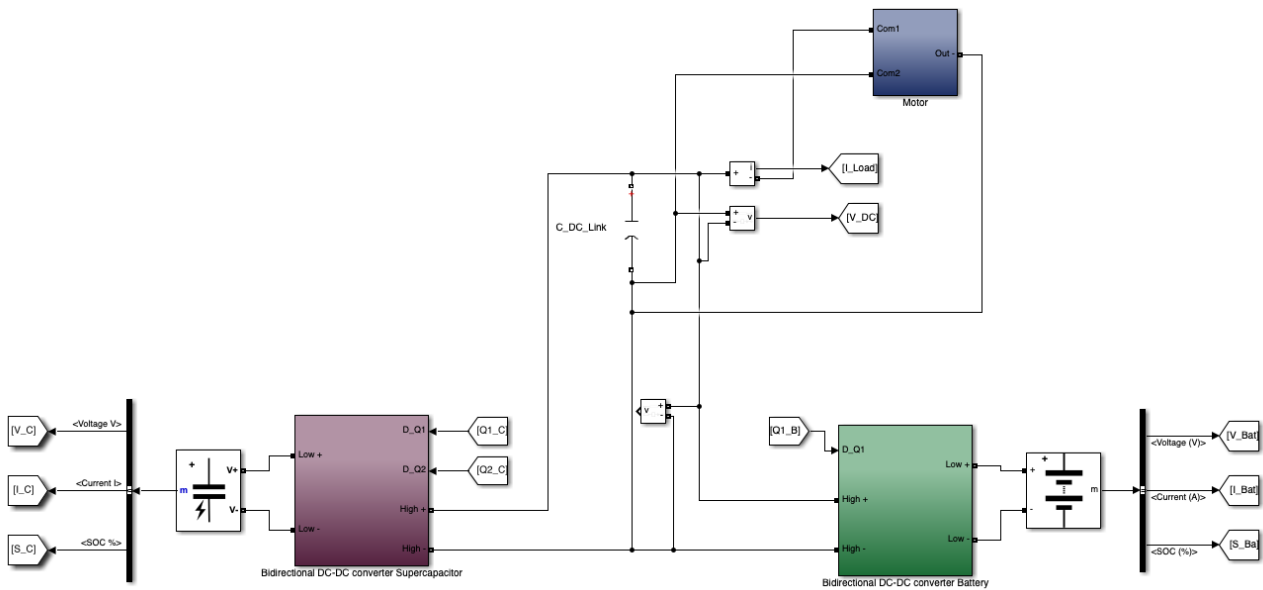
Η ρύθμιση της φόρτισης και εκφόρτισης καθώς και η κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης αποτελούν προτεραιότητες που φαίνονται στην εικόνα 4.8 παρακάτω:



Εικόνα 4.8 Φόρτιση εκφόρτιση και κάλυψη ζήτησης

Οι αναλογίες διανομής ισχύος θα ποικίλλουν ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης κάθε πηγής, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Σε προηγούμενες δοκιμές, ελέγχτηκε μια συγκεκριμένη αναλογία

μπαταρίας 70% και υπερπυκνωτών 30% για να προσφέρει καλύτερο μέγεθος, κόστος και βάρος, αλλά με μέτρια χαμηλότερη εμβέλεια. Πάνω από 100.000 τιμές επικύρωσαν το αποτέλεσμα, ενώ η διαχείριση θερμοκρασίας και η αποτροπή ρευμάτων υψηλής συχνότητας παρείχαν αυξημένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Αυτό το σύνολο δεδομένων θα χρησιμοποιηθεί σε αυτή τη μελέτη, καθώς και ένα πιο προηγμένο και ακριβές πρότυπο ελέγχου. Ωστόσο, ο έλεγχος και η φόρτιση πραγματοποιήθηκαν χειροκίνητα, επομένως οι περιορισμοί κλιμακώθηκαν. Η μοντελοποίηση του ελεγκτή ασαφούς λογικής υλοποιείται μέσω του MATLAB/ Simulink μέσω των έτοιμων προς χρήση βιβλιοθηκών. Επομένως, το διάγραμμα αυτού του μοντέλου στο περιβάλλον εφαρμογής προβάλλεται στην εικόνα 4.9.

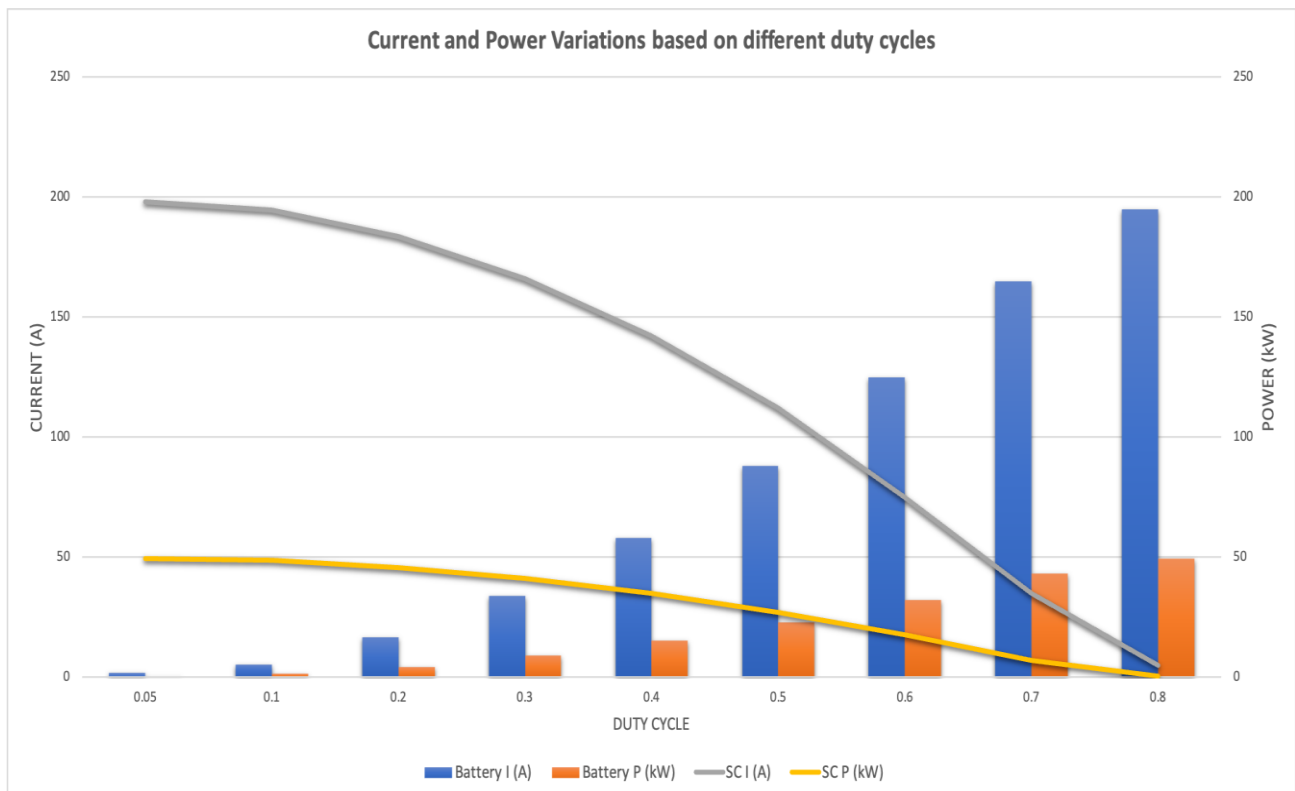


Εικόνα 4.9 Προσομοίωση ελεγκτή ασαφούς λογικής με χρήση MATLAB/Simulink

5 Αποτελέσματα

5.1 Διακυμάνσεις ισχύος HESS υπό διαφορετικούς κύκλους λειτουργίας

Οι κύκλοι λειτουργίας παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανομή ισχύος του HESS. Σε χαμηλές τιμές, κάτω από 40%, το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος καλύπτεται από τους υπερπυκνωτές λόγω της υψηλής πυκνότητας ισχύος τους, έτσι ώστε η μπαταρία να προστατεύεται. Καθώς οι κύκλοι λειτουργίας αυξάνονται, οι μπαταρίες αναλαμβάνουν όλο και περισσότερο τη ζήτηση ισχύος, ενώ η ισχύς του υπερπυκνωτή γίνεται ελάχιστη, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.1. Επομένως, είναι σημαντικό να διατηρείται ο λόγος κύκλου λειτουργίας όσο το δυνατόν χαμηλότερος, ιδανικά στο 0,50 ανάλογα με την ισχύ κατάσταση.

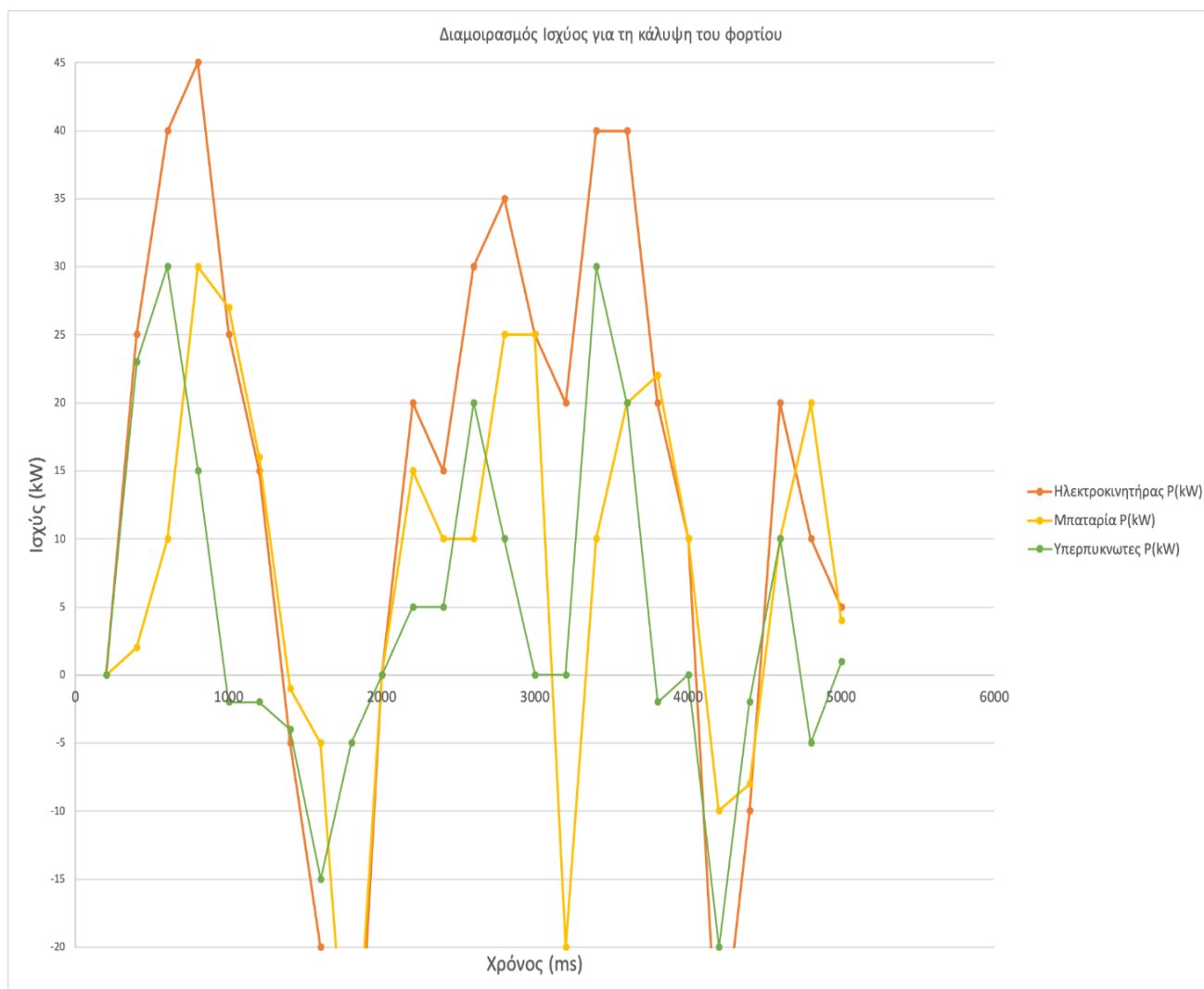


Εικόνα 5.1. Παραλλαγές ισχύος εξόδου του HESS με βάση τη ζήτηση του συστήματος μετάδοσης κίνησης και τον κύκλο λειτουργίας

5.2 Κατανομή ισχύος HESS ανάλογα με τη συνολική ζήτηση

Η ισχύς που απαιτείται από το σύστημα κίνησης ποικίλλει, καθώς το όχημα ξεπερνά διαφορετικές καταστάσεις ισχύος, επομένως ο ελεγκτής ασαφούς λογικής προτρέπει το HESS να καταναίμει σωστά την ισχύ, με τον κανόνα του $SoC_{min} \geq 25\%$ χωρίς να εξαντλείται καμία πηγή. Στην αρχή της προσομοίωσης, μετά την απο-ασαφοποίηση, η κατάσταση ισχύος του κινητήρα είναι υψηλή, έτσι ο υπερπυκνωτής καλύπτει αυτή τη ζήτηση ενώ η παροχή της μπαταρίας αυξάνεται σταδιακά για να εξισορροπηθεί η κατανομή ισχύος, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 5.2. Στη συνέχεια, μετά από 500 ms, ο κινητήρας εισέρχεται σε αναγεννητική κατάσταση πέδησης, ώστε και οι δύο πηγές να

επαναφορτίζονται γρήγορα. Στη συνέχεια, στο $T=1000ms$, ενεργοποιείται η κατάσταση επιτάχυνσης, αλλά επειδή η ζήτηση ισχύος δεν είναι γρήγορη, η μπαταρία μπορεί να χειριστεί επαρκώς την ενέργεια που απαιτείται χωρίς υπερθέρμανση και ο υπερπυκνωτής παραμένει με υψηλό SoC για λειτουργία υψηλής πυκνότητας που συμβαίνει σε $T=1250ms$. Ομοίως, η μπαταρία θα παρέχει ισχύ σε σταθερή λειτουργία, οδηγώντας σε $T=2000ms$, όπου ο υπερπυκνωτής φτάνει στο χαμηλότερο όριο με βάση τους κανόνες που εφαρμόζονται, επομένως η μπαταρία πρέπει να καλύψει το φορτίο και να φορτίσει επίσης τον υπερπυκνωτή, καθώς η ζήτηση είναι Μεσαίο. Τέλος, το UC είναι πλέον επαναφορτισμένο και διαθέσιμο για κάλυψη φορτίων αιχμής.

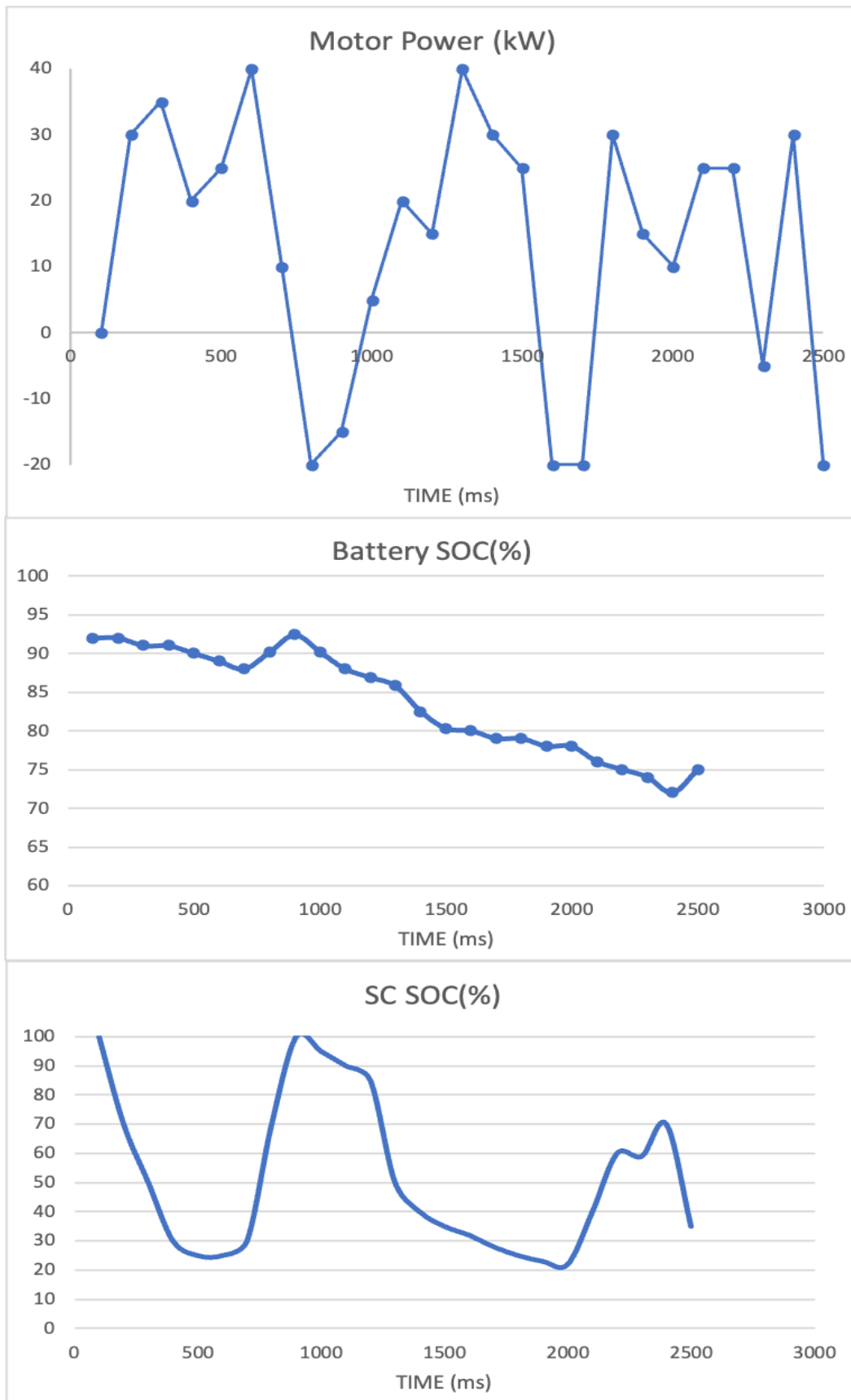


Εικόνα 5.2 Κατανομή ισχύος του υβριδικού συστήματος αποθήκευσης υπό διαφορετικά φορτία

Ο πίνακα 5 παρουσιάζει τις διακυμάνσεις φορτίου και κατανομής ισχύος που φαίνονται προηγουμένως και οι τιμές των οποίων φαίνονται στον πίνακα της εικόνας 5.3. Οι ελεγκτές ασαφούς λογικής βασισμένοι σε χρησιμοποιούμενους κανόνες, διατηρούν την κατάσταση φόρτισης σε ασφαλή επίπεδα, χωρίς να αφήνουν εξαντλημένη καμία πηγή, μια κατάσταση που μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη βλάβη ή ζημιά στα ηλεκτρικά συστήματα EV.

Πίνακας 4. Τιμές διαγράμματος κατανομής ισχύος του υβριδικού συστήματος αποθήκευσης υπό διαφορετικά φορτία

Χρόνος ms	Ηλεκτροκινητήρας P(kW)	Μπαταρία P(kW)	Υπερπυκνωτές P(kW)
200	0	0	0
400	25	2	23
600	40	10	30
800	45	30	15
1000	25	27	-2
1200	15	16	-2
1400	-5	-1	-4
1600	-20	-5	-15
1800	-40	-35	-5
2000	0	0	0
2200	20	15	5
2400	15	10	5
2600	30	10	20
2800	35	25	10
3000	25	25	0
3200	20	-20	0
3400	40	10	30
3600	40	20	20
3800	20	22	-2
4000	10	10	0
4200	-30	-10	-20
4400	-10	-8	-2
4600	20	10	10
4800	10	20	-5
5000	5	4	1



Εικόνα 5.3 Διακυμάνσεις SOC των δύο πηγών χωριστά ανάλογα με την έξοδο του συστήματος μετάδοσης κίνησης

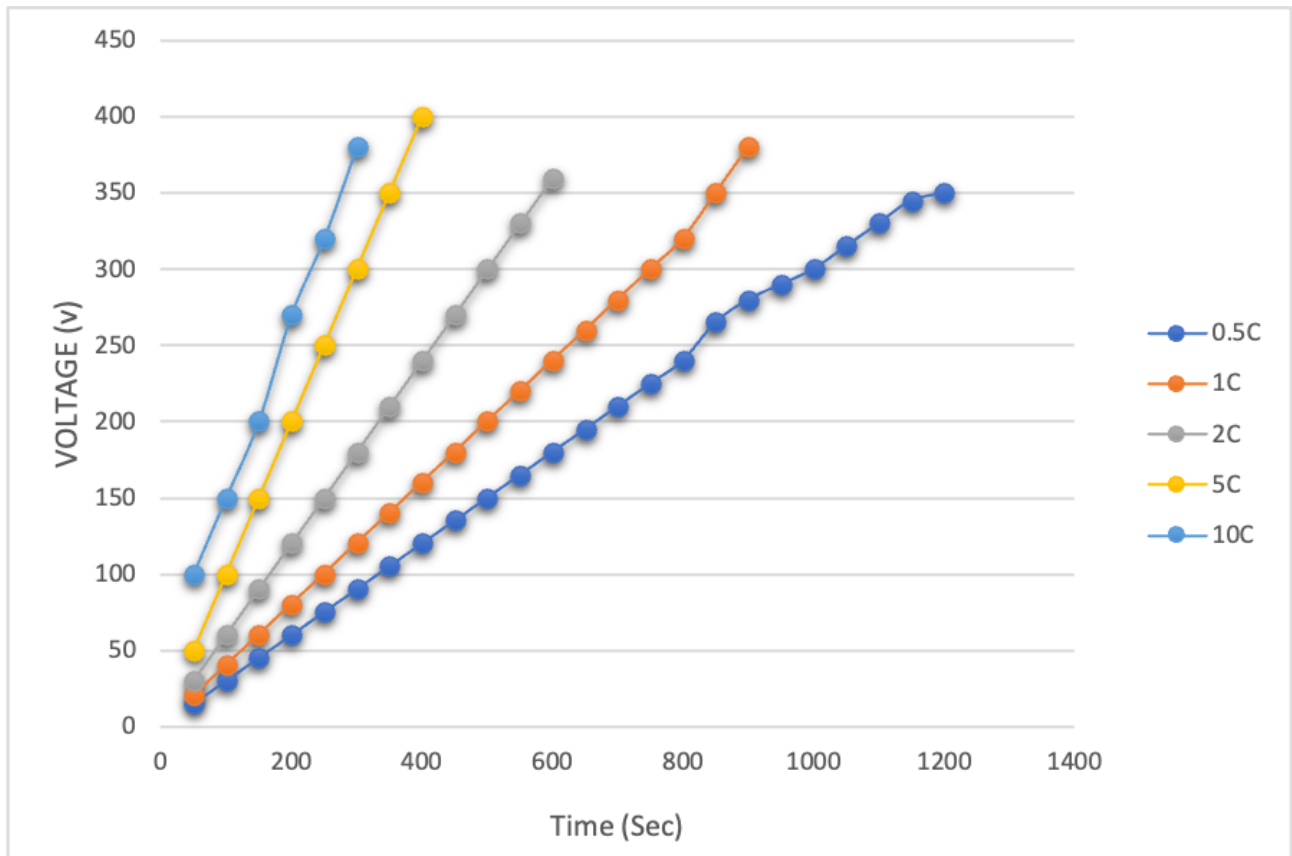
Το εύρος λειτουργίας της θερμοκρασίας της μπαταρίας διατηρείται μεταξύ 20-40° Κελσίου, η ονομαστική ισχύς του κινητήρα είναι 50 kW, η ενεργειακή χωρητικότητα της μπαταρίας είναι 40 kWh που λειτουργεί στα 360 V και η συστοιχία υπερπυκνωτών έχει συνολική χωρητικότητα 6.000 F στα 320 V. Το εύρος SoC όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, θα πρέπει να διατηρείται στο 20-80% αποτελεσματικό εύρος και για τις δύο πηγές, αλλά λόγω των περιορισμών του μετατροπέα DC/DC για την τάση διακοπής σε πραγματικές εφαρμογές, η δοκιμή αναφέρεται κυρίως στο 30% και περισσότερο διαθέσιμο SoV για το ολόκληρο το HESS. Το σύνολο δεδομένων που χρησιμοποιείται κυρίως, είναι διαθέσιμο σε προηγούμενες εργασίες [39]. Ωστόσο, για το προηγούμενο σχήμα η ακολουθία δεδομένων συνοψίζεται στον Πίνακα 5 παρακάτω.

Πίνακας 5. Ακολουθία δεδομένων

Time (ms)	P _{VEHICLE} (kW)	SoC _{BAT} (%)	SoC _{UC} (%)
100	0	92	100
200	30	92	70
300	35	91	50
400	20	91	30
500	25	90	25
600	40	89	25
700	10	88	30
800	-20	90.2	70
900	-15	92.4	100
1000	5	90.2	95
1100	20	88	90
1200	15	86.9	85
1300	40	85.8	50
1400	30	82.5	40
1500	25	80.3	35
1600	-20	80	32
1700	-20	79	28
1800	30	79	25
1900	15	78	23
2000	10	78	22
2100	25	76	40
2200	25	75	60
2300	-5	74	59
2400	-30	72	70
2500	-20	75	35

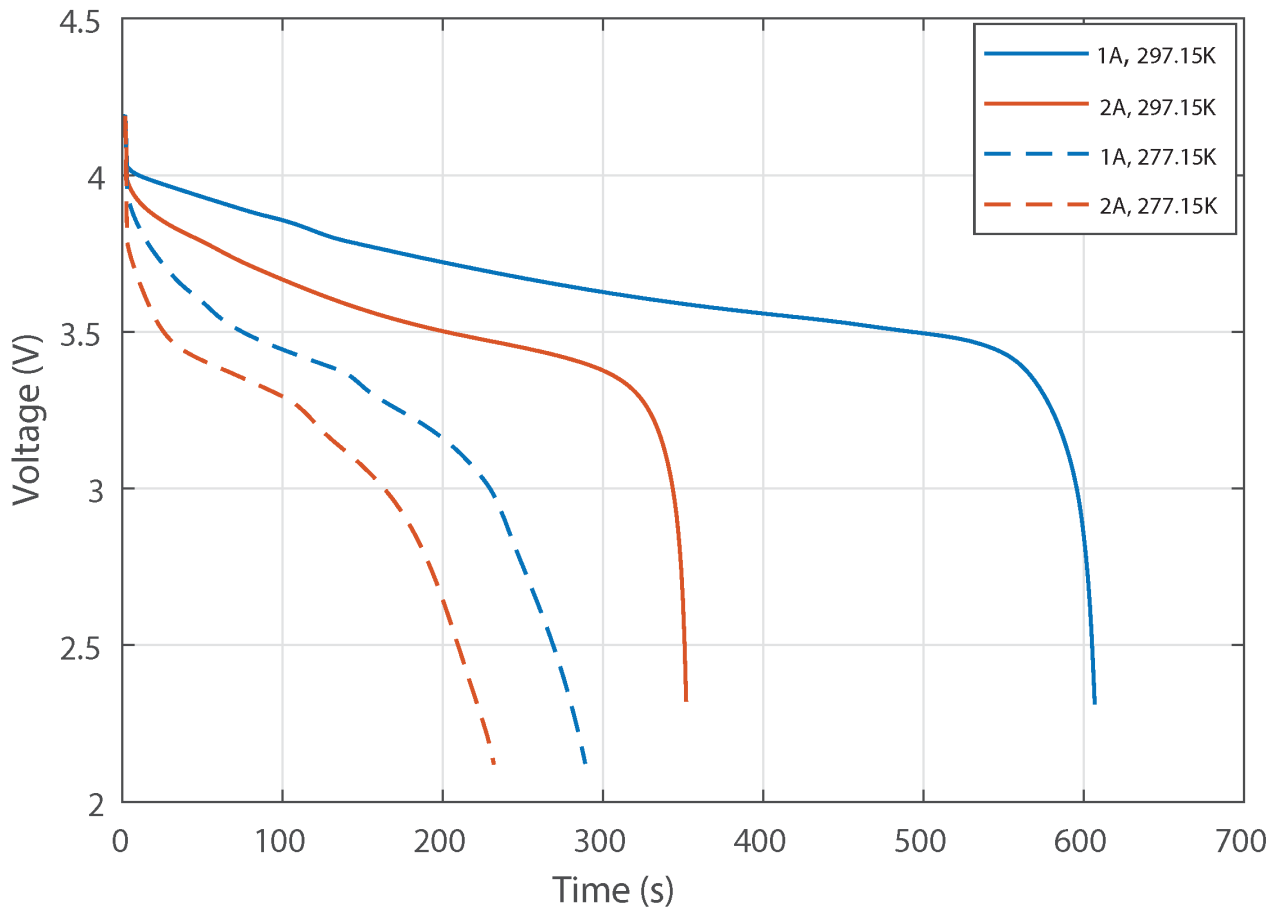
Σε σύγκριση με ένα τυπικό HESS με ασαφείς κανόνες ή άλλο σύστημα διαχείρισης, αυτή η εργασία δείχνει ασφαλή και υψηλό χρόνο λειτουργίας, παρατείνοντας επαρκώς τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Με την εισαγωγή κύκλων λειτουργίας και υπολογισμού σταθερών παραμέτρων, κάθε πηγή ενέργειας είναι υποχρεωμένη να λειτουργεί μέσα σε ένα καθορισμένο εύρος ισχύος, θερμοκρασίας και τάσης για να καλύψει τη ζήτηση του κινητήρα ή ακόμα και των βοηθητικών φορτίων, όπως ο έλεγχος κλιματισμού. Με βάση την προσομοίωση, η απόδοση αυξάνεται κατά 6%, καθώς η χρήση αναγεννητικής πέδησης είναι εξαιρετικά εφικτή μέσω της συστοιχίας UC, η εμβέλεια ενισχύεται κατά 2,5%, καθώς το HESS μπορεί να καλύψει τη ζήτηση για περισσότερο χρόνο, επομένως η απόσταση

που διανύθηκε αυξάνεται. Το μέγεθος βελτιώνεται κατά 22% καθώς απαιτούνται λιγότερες μπαταρίες εάν η απόσταση προγραμματιστεί ως συνεπής και η ελαχιστοποίηση του βάρους είναι απαραίτητη, ενώ η διάρκεια ζωής των πηγών ενέργειας ενισχύεται κατά 20% καθώς η μπαταρία διαρκεί περισσότερο, καθώς ασκείται λιγότερη πίεση λόγω UC. Αυτό το κέρδος εξηγείται περαιτέρω στην Εικόνα 5.4 παρακάτω.



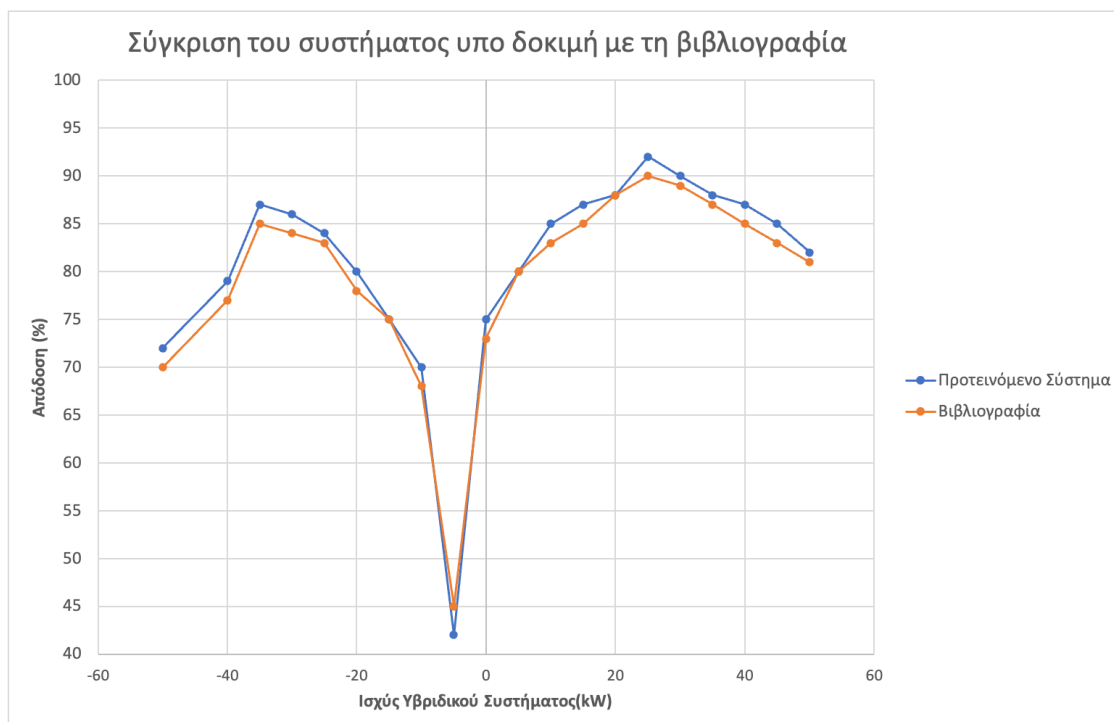
Εικόνα 5.4 Χρόνος λειτουργίας και τάση υπερπυκνωτών σε πέντε διακριτούς ρυθμούς

Καθώς ο ρυθμός φόρτισης αυξάνεται, μια πηγή ενέργειας δεν μπορεί να λειτουργήσει για αρκετό χρόνο. Το μέγεθος πρέπει να είναι επαρκές, αλλά οι διαστάσεις είναι ένας βασικός παράγοντας που σχετίζεται με τον κύκλο λειτουργίας και το ωφέλιμο εύρος. Οι υπερπυκνωτές έχουν αυξημένη ικανότητα χειρισμού υψηλών ρυθμών φόρτισης όπως εξηγείται στο αριστερό διάγραμμα, σε σύγκριση με την καμπύλη εκφόρτισης λιθίου [40] όπου τα στοιχεία της μπαταρίας δείχνουν χαμηλή ανοχή σε υψηλά ρεύματα και ρυθμούς φόρτισης που προκαλούν τεράστιες θερμοκρασίες όπως δείχνει η εικόνα 5.5.



Εικόνα 5.5 Η τάση της μπαταρίας και ο χρόνος λειτουργίας μειώνονται σε χαμηλούς - υψηλούς ρυθμούς φόρτισης και θερμοκρασίες

Στις εικόνες προηγουμένως εμφανίζεται η διαφορά της συμπεριφοράς των δύο πηγών ενέργειας και της τάσης εξόδου σε διάφορους ρυθμούς φόρτισης (α) Χρόνος λειτουργίας και τάση υπερπυκνωτών σε πέντε διακριτούς ρυθμούς. (β) Η τάση της μπαταρίας και ο χρόνος λειτουργίας μειώνονται σε χαμηλούς - υψηλούς ρυθμούς φόρτισης και θερμοκρασίες. Επιπλέον, το διάγραμμα απόδοσης της προτεινόμενης μεθόδου σε σύγκριση με το σχήμα αναφοράς που δοκιμάστηκε στο [39] παρουσιάζεται στην εικόνα 5.6. Μια μέση βελτίωση απόδοσης 3% είναι διαθέσιμη σε ολόκληρο το εύρος ισχύος λόγω βελτιωμένης κατανομής ισχύος και χρήσης αναγεννητικής πέδησης, εκτός από ελάχιστα φορτία όπου το HESS εξακολουθεί να είναι αργό στην παροχή τροφοδοσίας λόγω καθυστέρησης μεταγωγής DC/DC. Η απόδοση κορυφώνεται σε μεσαία ζήτηση ισχύος, 20-30 kW, φθάνοντας στην απόδοση 90%, συμπεριλαμβανομένων όλων των απωλειών. Οι απώλειες κινητήρα δεν ενσωματώνονται καθώς το HESS και ο μετατροπέας είναι τα κύρια εξαρτήματα που μελετήθηκαν σε αυτό το έργο. Όλες οι μετρήσεις συνοψίζονται στο Πίνακα 6.



Εικόνα 5.6 Το διάγραμμα απόδοσης της πειραματικής διάταξης

Πίνακας 6. Τιμές διαγράμματος απόδοσης της πειραματικής διάταξης

Ισχύς P(KW)	Προτεινόμενο Σύστημα	Βιβλιογραφία
-50	72	70
-40	79	77
-35	87	85
-30	86	84
-25	84	83
-20	80	78
-15	75	75
-10	70	68
-5	42	45
0	75	73
5	80	80
10	85	83
15	87	85
20	88	88
25	92	90
30	90	89
35	88	87
40	87	85
45	85	83
50	82	81

Σε σύγκριση με την προηγούμενη βιβλιογραφία, αυτή η καινοτομία εργασίας είναι η εισαγωγή της ένδειξης ζώνης λειτουργίας ασφαλούς μπαταρίας, δηλαδή 20 έως 80% Κατάσταση φόρτισης, μαζί με τη σύνδεση των κριτηρίων λειτουργίας ισχύος με τους κύκλους λειτουργίας. Ανάλογα με την κατάσταση ισχύος του κινητήρα, κάθε πηγή πρέπει να λειτουργεί σε έναν καθορισμένο κύκλο

λειτουργίας, έτσι ώστε να αποτρέπεται η εξάντληση, ενώ καλύπτεται πλήρως η ζήτηση ισχύος χωρίς καθυστέρηση ή μη ασφαλής λειτουργία. Αυτή η αξιολόγηση συνοψίζεται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7. Καταγραφή αποτελεσμάτων βιβλιογραφίας

A/A	Έγγραφο	Τύπος	Αποτέλεσμα
1	[69]	Βιώσιμο Ασαφή Μοντέλο	Κατανομή ισχύος μέσω κύκλων λειτουργίας, χρήση για χαμηλότερη καταπόνηση της μπαταρίας
2	[70]	Ασαφής PID Ελεγκτής	Μικρότερη γήρανση μπαταρίας
3	[71]	Μοντέλο με πρόβλεψη ελέγχου	Μικρότερες διακυμάνσεις ρεύματος μπαταρίας, ένδειξη SOV, λειτουργία μονής τροφοδοσίας
4	[72]	Μοντελοποίηση κλασματικής σειράς	Βελτιστοποιημένος υπολογισμός χρόνου εκφόρτισης SoC και HESS
5	[73]	Ημι-ενεργή τοπολογία	Ομαλή κατανομή για ρυθμούς λειτουργίας 2,5 C
6	[74]	Έλεγχος βελτιστοποίησης για τραμ	Η διαφοροποίηση του τρόπου λειτουργίας ισχύος χρησιμοποιεί καλύτερη απόδοση και ασφαλή λειτουργία
7	[75]	Ακριβής προσαρμογή αντίστασης και μεθόδου κύκλου λειτουργίας	Ασφαλής λειτουργία HESS, παρατείνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας αλλά έχει μεγαλύτερο χρόνο φόρτισης
8	[76]	Στρατηγική βασισμένη σε κανόνες με πρωτόκολλο CanBUS	Η προσέγγιση των τρόπων τροφοδοσίας ελαχιστοποιεί το ρεύμα της μπαταρίας και την υψηλή κατανάλωση υπερπυκνωτών
9	Εργασία	Στρατηγική βασισμένη σε κανόνες ασαφούς λογικής	Σύνδεση κύκλου λειτουργίας και τρόπων ισχύος για βελτιστοποιημένη κατανομή ισχύος σε ασφαλές περιβάλλον Λειτουργικό εύρος πηγών

5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αυτό το έγγραφο περιγράφει μια στρατηγική διαχείρισης ενέργειας σε ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιώντας έναν ελεγκτή ασαφούς λογικής για ένα υβριδικό σύστημα αποθήκευσης. Οι διαφορετικοί τρόποι ισχύος του συστήματος πρόωσης δηλώνονται με την εισαγωγή της σημασίας του κύκλου λειτουργίας για την κατανομή ισχύος. Η μπαταρία πρέπει να διατηρείται εντός ασφαλών ορίων SoC (20-80%), ενώ η συστοιχία υπερπυκνωτών παρέχει τη ζήτηση ισχύος ως βοηθητική πηγή και εκμεταλλεύεται περαιτέρω την αναγεννητική πέδηση. Η καινοτομία αυτής της μελέτης είναι η εισαγωγή και ταξινόμηση των τρόπων διαχείρισης ισχύος, παρέχοντας καλύτερες δυνατότητες διανομής ισχύος καθώς οι κύκλοι λειτουργίας μπορούν να τροποποιούνται συνεχώς, οδηγώντας σε καλύτερο και πιο ακριβή έλεγχο σε πραγματικό χρόνο. Οι λειτουργίες ισχύος υποδεικνύουν επίσης το στυλ οδήγησης του χρήστη και μπορούν εύκολα να παρακολουθούνται με ορισμένους αισθητήρες όπως η έξοδος ποτενσιόμετρου γκαζιού. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το FLC είναι σε θέση να ρυθμίσει την τροφοδοσία μεταξύ της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή αλλάζοντας την τιμή του κύκλου λειτουργίας του μετατροπέα buck-boost. Το προτεινόμενο σύστημα μπορεί στη συνέχεια να προσαρμόσει την κατανομή ισχύος σύμφωνα με την τρέχουσα κατάσταση ισχύος. Όταν το όχημα βρίσκεται σε κατάσταση επιτάχυνσης, ο υπερπυκνωτής παρέχει περισσότερη ή όλη την ισχύ στο σύστημα μετάδοσης κίνησης, ενώ η απόδοση της μπαταρίας αυξάνεται σταδιακά. Όταν το όχημα λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες, η μπαταρία λειτουργεί ως η κύρια πηγή ενέργειας και ο υπερπυκνωτής χρησιμοποιείται υποστηρικτικά ή φορτίζεται εάν το SoC είναι χαμηλό. Κατά τη διακοπή της αναγέννησης και οι δύο πηγές φορτίζονται ανάλογα με την τάση του μετατροπέα. Έχει επικυρωθεί ότι οι κύκλοι λειτουργίας από 0,40 έως 0,50 είναι οι ιδανικές αναλογίες για τις περισσότερες καταστάσεις χωρίς να καταπονείται η μπαταρία ή να εξαντλείται οποιαδήποτε πηγή. Αυτό το σχέδιο επιτυγχάνει 6% καλύτερη απόδοση και 2,5% εύρος με 22% βελτιωμένο μέγεθος συν 20% μεγαλύτερη παράταση μπαταρίας. Οι μελλοντικές εργασίες συνεπάγονται δοκιμές με μεγαλύτερες πηγές ενέργειας και εφαρμογή αυτής της στρατηγικής διαχείρισης σε πραγματική εφαρμογή.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1]. Emadi, A. (2005). *Handbook of automotive power electronics and motor drives*. Boca Raton: Taylor & Francis.
- [2]. Hosseinpour, S., Hongyi Chen and Hua Tang (2015). *Barriers to the wide adoption of electric vehicles: A literature review based discussion*. [online] IEEE Xplore. doi:<https://doi.org/10.1109/PICMET.2015.7273259>.
- [3]. Matulka, R. (2014). *The History of the Electric Car*. [online] Energy.gov. Available at: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>.
- [4]. Sanguesa, J.A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F.J. and Marquez-Barja, J.M. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*, [online] 4(1), pp.372–404. doi:<https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>.
- [5]. Karlis, A., Falekas, G. and Brusso, B.C. (2022). Made in Greece: The World’s First Production Electric Mini Comes From Syros [History]. *IEEE Industry Applications Magazine*, 28(5), pp.9–15. doi:<https://doi.org/10.1109/mias.2022.3182584>.
- [6]. Mayyas, A., Omar, M., Hayajneh, M. and Mayyas, A.R. (2017). Vehicle’s lightweight design vs. electrification from life cycle assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*, 167, pp.687–701. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.145>.
- [7]. Kebriaei, M., Niasar, A.H. and Asaei, B. (2015). Hybrid electric vehicles: An overview. *2015 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*. [online] doi:<https://doi.org/10.1109/iccve.2015.84>.
- [8]. Vynakov, O.F., Savolova, E.V. and Skrynnyk, A.I. (2019). MODERN ELECTRIC CARS OF TESLA MOTORS COMPANY. *Automation of technological and business processes*, [online] 8(2). doi:<https://doi.org/10.15673/atbp.v8i2.162>.
- [9]. Perkins, G. and Murmann, J.P. (2018). What Does the Success of Tesla Mean for the Future Dynamics in the Global Automobile Sector? *Management and Organization Review*, [online] 14(3), pp.471–480. Available at: <https://www.cambridge.org/core/journals/management-and-organization-review/article/what-does-the-success-of-tesla-mean-for-the-future-dynamics-in-the-global-automobile-sector/B023204421876CFB08B4DEA7FEA2C3D6>.
- [10]. Whittingham, M.S. (2012). History, Evolution, and Future Status of Energy Storage. *Proceedings of the IEEE*, 100(Special Centennial Issue), pp.1518–1534. doi:<https://doi.org/10.1109/jproc.2012.2190170>.
- [11]. Brenni, P., Galdi, R., Pietra, F. and Savini, A. (2012). From Volta onwards: A variety of electrical batteries in the Pavia Museum of Electrical Technology. *2012 Third IEEE HISTory of ELection-technology CONference (HISTELCON)*. doi:<https://doi.org/10.1109/histelcon.2012.6487561>.

- Amperorio (2017). *Ιστορία της Μπαταρίας - Amperorio*. [online] www.amperorio.gr. Available at: <https://www.amperorio.gr/index.php/el/istoria-tis-mpatarias.html>.
- [12]. Alarco, J. and Talbot, P. (2015). *The history and development of batteries*. [online] Phys.org. Available at: <https://phys.org/news/2015-04-history-batteries.html>.
- [13]. Goodyear, C. (2020). *Of greatest benefit to humankind*. [online] CAM Digital | University of Cambridge. Available at: <https://magazine.alumni.cam.ac.uk/of-greatest-benefit-to-humankind/> [Accessed 8 Jul. 2024].
- [14]. Saft | Batteries to energize the world. (2018). *The Leclanché battery, part of Saft's history*. [online] Available at: <https://www.saft.com/media-resources/our-stories/leclanch%C3%A9-battery-part-safts-history> [Accessed 8 Jul. 2024].
- [15]. Laboratory, N.H.M.F. (n.d.). *Leclanché Cell – 1866 - Magnet Academy*. [online] nationalmaglab.org. Available at: <https://nationalmaglab.org/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/museum/leclanche-cell-1866/>.
- [16]. Pavlov, D. (2017). Invention and Development of the Lead–Acid Battery. *Lead-Acid Batteries: Science and Technology*, pp.3–32. doi:<https://doi.org/10.1016/b978-0-444-59552-2.00001-8>.
- [17]. Gassner, A. (2010). Sizing storage and wind generation capacities in remote power systems. *dspace.library.uvic.ca*. [online] Available at: <https://dspace.library.uvic.ca/items/a1b2de7b-c770-453f-bbf1-ef67536ded65> [Accessed 8 Jul. 2024].
- [18]. Κεραμήτσος, Ν. (2022). Σχεδίαση και σύστημα διάγνωσης μπαταρίας. *polynoe.lib.uniwa.gr*. [online] doi:<https://doi.org/10.26265/polynoe-2831>.
- [19]. Μιχαλολιάκου, Σ. (2021). *Περιβαλλοντική αξιολόγηση μπαταρίας ιόντων-λιθίου με χρήση του Ecodesign Pilot*. [online] dione.lib.unipi.gr. Available at: <https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/13611> [Accessed 8 Jul. 2024].
- [20]. Beatrice, C., Capasso, C., Doulgeris, S., Samaras, Z. and Veneri, O. (2024). Hybrid storage system management for hybrid electric vehicles under real operating conditions. *Applied Energy*, [online] 354, p.122170. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122170>.
- [21]. Yoshino, A. (2012). The Birth of the Lithium-Ion Battery. *Angewandte Chemie International Edition*, 51(24), pp.5798–5800. doi:<https://doi.org/10.1002/anie.201105006>.
- [22]. Blomgren, G.E. (2016). The Development and Future of Lithium Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, [online] 164(1), pp.A5019–A5025. doi:<https://doi.org/10.1149/2.0251701jes>.
- [23]. Zeng, X., Li, M., Abd El-Hady, D., Alshitari, W., Al-Bogami, A.S., Lu, J. and Amine, K. (2019). Commercialization of Lithium Battery Technologies for Electric Vehicles. *Advanced Energy Materials*, 9(27), p.1900161. doi:<https://doi.org/10.1002/aenm.201900161>.

- [24]. Britannica (2024). *Tesla Motors* [online] Available at: <https://www.britannica.com/money/Tesla-Motors>
- [25]. Bell, L. (2023). *GMC's Hummer EV Has a Very Complicated Battery Pack* [online] Available at: <https://www.roadandtrack.com/news/a44475384/gmcs-hummer-ev-has-a-very-complicated-battery-pack/>
- [26]. Britannica (2023). *Capacitor | Definition, Function, & Facts*. [online] Encyclopedia Britannica. Available at: <https://www.britannica.com/technology/capacitor>.
- [27]. Both, J. (2015). Electrolytic capacitors, 1890 to 1925: early history and basic principle. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, [online] 31(1), pp.22–29. doi:<https://doi.org/10.1109/MEI.2015.6996675>.
- [28]. Burke, A. F., & Zhao, J. (2021). Past, present and future of electrochemical capacitors: Technologies, performance and applications. *Journal of Energy Storage*, 35, 102310. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102310>
- [29]. Khorate, A. and Kadam, A.V. (2022). An overview of patents and recent development in flexible supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 52, p.104887. doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104887>.
- [30]. Liu, Y., Shearing, P.R., He, G. and Dan (2021). Supercapacitors: History, Theory, Emerging Technologies, and Applications. *Springer eBooks*, pp.417–449. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-74406-9_15.
- [31]. Dutta, A., Mitra, S., Basak, M. and Banerjee, T. (2022). A comprehensive review on batteries and supercapacitors: Development and challenges since their inception. *Energy Storage*. doi:<https://doi.org/10.1002/est2.339>.
- [32]. Sun, J., Luo, B. and Li, H. (2022). A Review on the Conventional Capacitors, Supercapacitors, and Emerging Hybrid Ion Capacitors: Past, Present, and Future. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 3(6), p.2100191. doi:<https://doi.org/10.1002/aesr.202100191>.
- [33]. Şahin, M., Blaabjerg, F. and Sangwongwanich, A. (2022). A Comprehensive Review on Supercapacitor Applications and Developments. *Energies*, 15(3), p.674. doi:<https://doi.org/10.3390/en15030674>.
- [34]. Rimpas, D., Kaminaris, S.D., Piromalis, D. and Vokas, G. (2022). A review on electric vehicle hybrid energy storage systems. *TECHNOLOGIES AND MATERIALS FOR RENEWABLE ENERGY, ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY: TMREES21Gr*. doi:<https://doi.org/10.1063/5.0092436>.
- [35]. Rimpas, D., Kaminaris, S.D., Piromalis, D.D., Vokas, G., Arvanitis, K.G. and Karavas, C.-S. (2023). Comparative Review of Motor Technologies for Electric Vehicles Powered by a Hybrid Energy Storage System Based on Multi-Criteria Analysis. *Energies*, 16(6), p.2555. doi:<https://doi.org/10.3390/en16062555>.

- [36]. Rimpas, D., Kaminaris, S.D., Piromalis, D.D., Vokas, G. (2023). Real-Time Management for an EV Hybrid Storage System Based on Fuzzy Control. *Mathematics*, 11(21), pp.4429–4429. doi:https://doi.org/10.3390/math11214429.
- [37]. Chen, W., Liang, J., Yang, Z. and Li, G. (2019). A Review of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicle Applications and Beyond. *Energy Procedia*, 158, pp.4363–4368. doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.783.
- [38]. Rimpas, D., Kaminaris, S.D., Aldarraji, I., Piromalis, D., Vokas, G., Papageorgas, P.G. and Tsaramirsis, G. (2021). Energy management and storage systems on electric vehicles: A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.352.
- [39]. Rimpas, D., Kaminaris, S.D., Piromalis, D., Vokas, G. and Papageorgas, P. (2023). Design and implementation of a small-scaled hybrid storage system for optimal sizing in electric vehicles. *TECHNOLOGIES AND MATERIALS FOR RENEWABLE ENERGY, ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY: TMREES22Fr*. doi:https://doi.org/10.1063/5.0129856.
- [40]. Da Silva, S.F., Eckert, J.J., Corrêa, F.C., Silva, F.L., Silva, L.C.A. and Dedini, F.G. (2022). Dual HESS electric vehicle powertrain design and fuzzy control based on multi-objective optimization to increase driving range and battery life cycle. *Applied Energy*, 324, p.119723. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119723.
- [41]. Song, Z., Hofmann, H., Li, J., Han, X., Zhang, X. and Ouyang, M. (2015). A comparison study of different semi-active hybrid energy storage system topologies for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 274, pp.400–411. doi:https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.10.061.
- [42]. Hossain, M.Z., Rahim, N.A. and Selvaraj, J. a/l (2018). Recent progress and development on power DC-DC converter topology, control, design and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online] 81, pp.205–230. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.017.
- [43]. Sivakumar, S., Sathik, M.J., Manoj, P.S. and Sundararajan, G. (2016). An assessment on performance of DC-DC converters for renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, pp.1475–1485. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.057.
- [44]. Górecki, P. and Górecki, K. (2021). Methods of Fast Analysis of DC-DC Converters—A Review. *Electronics*, 10(23), p.2920. doi:https://doi.org/10.3390/electronics10232920.
- [45]. M. Sabri, M.F., Danapalasingam, K.A. and Rahmat, M.F. (2016). A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, pp.1433–1442. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.036.

- [46]. Zhang, F., Wang, L., Coskun, S., Pang, H., Cui, Y. and Xi, J. (2020). Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles: Review, Classification, Comparison, and Outlook. *Energies*, [online] 13(13), p.3352. doi:<https://doi.org/10.3390/en13133352>.
- [47]. Martinez, C.M., Hu, X., Cao, D., Velenis, E., Gao, B. and Wellers, M. (2017). Energy Management in Plug-in Hybrid Electric Vehicles: Recent Progress and a Connected Vehicles Perspective. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, [online] 66(6), pp.4534–4549. doi:<https://doi.org/10.1109/tvt.2016.2582721>.
- [48]. Zhang, R., Cheng, X. and Yang, L. (2019). Flexible Energy Management Protocol for Cooperative EV-to-EV Charging. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, [online] 20(1), pp.172–184. doi:<https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2807184>.
- [49]. Engelhardt, J., Zepter, J.M., Gabderakhmanova, T. and Marinelli, M. (2022). Energy management of a multi-battery system for renewable-based high power EV charging. *eTransportation*, 14, p.100198. doi:<https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100198>.
- [50]. H annan, M.A., Hoque, Md.M., Hussain, A., Yusof, Y. and Ker, P.J. (2018). State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations. *IEEE Access*, [online] 6, pp.19362–19378. doi:<https://doi.org/10.1109/access.2018.2817655>.
- [51]. Hasan, M.K., Mahmud, M., Ahasan Habib, A.K.M., Motakabber, S.M.A. and Islam, S. (2021). Review of electric vehicle energy storage and management system: Standards, issues, and challenges. *Journal of Energy Storage*, 41, p.102940. doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102940>.
- [52]. Engel, J., Schmitt, T., Rodemann, T. and Adamy, J. (2022). Hierarchical Economic Model Predictive Control Approach for a Building Energy Management System With Scenario-Driven EV Charging. *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp.1–1. doi:<https://doi.org/10.1109/tsg.2022.3160390>.
- [53]. Rafique, M., Khan, S.A., Zaman, M.H., Khawaja Khalid Mehmood, Zunaib Maqsood Haider, Abdollahi, M. and Kim, C.-H. (2019). An Intelligent Hybrid Energy Management System for a Smart House Considering Bidirectional Power Flow and Various EV Charging Techniques. *Applied sciences*, 9(8), pp.1658–1658. doi:<https://doi.org/10.3390/app9081658>.
- [54]. Wu, D., Zeng, H., Lu, C. and Boulet, B. (2017). Two-Stage Energy Management for Office Buildings With Workplace EV Charging and Renewable Energy. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 3(1), pp.225–237. doi:<https://doi.org/10.1109/tte.2017.2659626>.
- [55]. Tran, V.T., Islam, Md.R., Muttaqi, K.M. and Sutanto, D. (2019). An Efficient Energy Management Approach for a Solar-Powered EV Battery Charging Facility to Support Distribution Grids. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), pp.6517–6526. doi:<https://doi.org/10.1109/tia.2019.2940923>.

- [56]. Wu, Y., Ravey, A., Chrenko, D. and Abdellatif Miraoui (2018). A Real Time Energy Management for EV Charging Station Integrated with Local Generations and Energy Storage System. *HAL (Le Centre pour la Communication Scientifique Directe)*. doi:<https://doi.org/10.1109/itec.2018.8450235>.
- [57]. Çeven, S., Albayrak, A. and Bayır, R. (2020). Real-time range estimation in electric vehicles using fuzzy logic classifier. *Computers & Electrical Engineering*, 83, p.106577. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106577>.
- [58]. Pérez-Pimentel, Y., Osuna-Galán, I., Avilés-Cruz, C. and Villegas-Cortez, J. (2018). Power Supply Management for an Electric Vehicle Using Fuzzy Logic. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, [online] 2018, p.e2846748. doi:<https://doi.org/10.1155/2018/2846748>.
- [59]. Shen, Y., Li, Y., Tang, Y., Sun, J., Zhao, J. and Yang, X. (2021). An Energy Management Strategy Based on Fuzzy Logic for Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 17(1), pp.53–60. doi:<https://doi.org/10.1002/tee.23487>.
- [60]. Nag, S. and Lee, Kwang.Y. (2019). Optimized Fuzzy Logic Controller for Responsive Charging of Electric Vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 52(4), pp.147–152. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.170>.
- [61]. Ma, Y., Duan, P., Sun, Y. and Chen, H. (2018). Equalization of Lithium-Ion Battery Pack Based on Fuzzy Logic Control in Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(8), pp.6762–6771. doi:<https://doi.org/10.1109/tie.2018.2795578>.
- [62]. Mohd, T. A. T., Hassan, M. K., Aris, I., Azura, C. S., & Ibrahim, B. S. K. K. (2017). Application of fuzzy logic in multi-mode driving for a battery electric vehicle energy management. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 7(1), 284-290. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.7.1.1960>
- [63]. Lazaroïu, G.C. and Roscia, M. (2022). Fuzzy Logic Strategy for Priority Control of Electric Vehicle Charging. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp.1–10. doi:<https://doi.org/10.1109/tits.2022.3161398>.
- [64]. Martinez, D., Poveda, J. and Montenegro, D. (2017). Li-Ion battery management system based in fuzzy logic for improving electric vehicle autonomy. doi:<https://doi.org/10.1109/pepqa.2017.7981677>.
- [65]. Garcia-Trivino, P., Torreglosa, J.P., Fernandez-Ramirez, L.M. and Jurado, F. (2018). Decentralized Fuzzy Logic Control of Microgrid for Electric Vehicle Charging Station. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(2), pp.726–737. doi:<https://doi.org/10.1109/jestpe.2018.2796029>.
- [66]. Faddel, S., Mohamed, A.A.S. and Mohammed, O.A. (2017). Fuzzy logic-based autonomous controller for electric vehicles charging under different conditions in residential

- distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 148, pp.48–58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.03.009>.
- [67]. P. Justin Raj, V. Vasan Prabhu, Krishnakumar, V. and Joe, C. (2023). Solar Powered Charging of Fuzzy Logic Controller (FLC) Strategy with Battery Management System (BMS) Method Used for Electric Vehicle (EV). *International journal of fuzzy systems*, 25(7), pp.2876–2888. doi:<https://doi.org/10.1007/s40815-023-01537-7>.
- [68]. Mohamed Amine Hartani, Hamouda, M., Othmane Abdelkhalek and Saad Mekhilef (2022). Sustainable energy assessment of multi-type energy storage system in direct-current-microgrids adopting Mamdani with Sugeno fuzzy logic-based energy management strategy. *Journal of Energy Storage*, 56, pp.106037–106037. doi:<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106037>.
- [69]. Zhao, Y., Dan, D., Zheng, S., Wei, M. and Xie, Y. (2023). A two-stage eco-cooling control strategy for electric vehicle thermal management system considering multi-source information fusion. *Energy*, 267, pp.126606–126606. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126606>.
- [70]. Chen, H. Xiong, R. Lin, C. Shen, W. (2020) Model Predictive Control Based Real-Time Energy Management for a Hybrid Energy Storage System. *CSEE J. Power Energy Syst.* **2020**, 7, 862–874. doi:<https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.02180>
- [71]. Wang, Y., Gao, G., Li, X. and Chen, Z. (2020). A fractional-order model-based state estimation approach for lithium-ion battery and ultra-capacitor hybrid power source system considering load trajectory. *Journal of Power Sources*, 449, p.227543. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227543>.
- [72]. Chmielewski, A., Piórkowski, P., Bogdziński, K. and Możaryn, J. (2023). Application of a Bidirectional DC/DC Converter to Control the Power Distribution in the Battery–Ultracapacitor System. *Energies*, [online] 16(9), p.3687. doi:<https://doi.org/10.3390/en16093687>.
- [73]. Dong, A., Ma, R. and Deng, Y. (2023). Optimization on charging of the direct hybrid lithium-ion battery and supercapacitor for high power application through resistance balancing. *Energy*, 273, pp.127233–127233. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127233>.
- [74]. Xiong, R., Duan, Y., Cao, J. and Yu, Q. (2018). Battery and ultracapacitor in-the-loop approach to validate a real-time power management method for an all-climate electric vehicle. *Applied Energy*, 217, pp.153–165. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.128>.
- [75]. Xu, W., Liu, M., Xu, L. and Zhang, S. (2022). Energy Management Strategy of Hydrogen Fuel Cell/Battery/Ultracapacitor Hybrid Tractor Based on Efficiency Optimization. *Applied sciences*, 13(1), pp.151. doi:<https://doi.org/10.3390/app13010151>.
- [76]. Pai, F.S. (2023) Design and Control Method of a Battery/Ultra-Capacitor Energy Storage System for EVs. *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.* **12**, 203–208. doi:<https://doi.org/10.18178.ijeetc.12.3.203-208>