



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Μελέτη και προσομοίωση υβριδικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για
χρήση στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα**



**Φοιτητής: Ζαχαριάς Κωνσταντίνος
ΑΜ:44474**

Επιβλέπων Καθηγητής

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

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Οκτώβρης 2024



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

Diploma Thesis

Design and simulation of a hybrid energy storage system for electric vehicles



Student: Zacharias Konstantinos
Registration Number: 44474

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:

Σταύρος Καμινάρης Καθηγητής	Γεώργιος Βόκας Καθηγητής	Γεώργιος Ιωαννίδης Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Ζαχαριάς Κωνσταντίνος,
Οκτώβρης, 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 ...Ζαχαριάς Κωνσταντίνος..... του...Όθωνος., με αριθμό μητρώου ...44474... φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

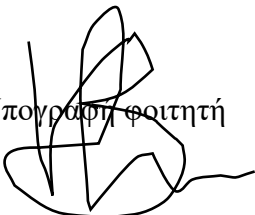
δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«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.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος/ουσας καθηγητή/ήτριας.»

Ο Δηλών
Ζαχαρίας Κωνσταντίνος

Υπογραφή φοιτητή


Περίληψη

Η χρήση μπαταριών λιθίου στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα παρουσιάζει αρκετούς περιορισμούς όπως μειωμένη πυκνότητα ισχύος, διάρκεια ζωής και αυξημένη φθορά σε συνθήκες ταχυφόρτισης. Η συνεργασία της μπαταρίας με υπερπυκνωτές ως ένα υβριδικό σύστημα, μπορεί να υπερνικήσει τις αδυναμίες αυτές και να οδηγήσει σε μια συμπαγής και οικονομική κατασκευή. Ο σκοπός της εργασίας είναι η προσομοίωση ενός τέτοιου υβριδικού συστήματος και η κατάλληλη μελέτη των παραμέτρων με στόχο την ελαχιστοποίηση του βάρους και του κόστους με παράλληλη μεγιστοποίηση της απόδοσης.

Λέξεις – κλειδιά

Υβριδικό σύστημα, ηλεκτρικό αυτοκίνητο, ηλεκτρικό όχημα, μπαταρία, πυκνωτές, υπερπυκνωτές

Abstract

The use of lithium batteries in electric cars presents several limitations such as reduced power density, lifetime, and increased wear in fast charging conditions. The cooperation of the battery with supercapacitors as a hybrid system can overcome these weaknesses and lead to compact and economical construction. The purpose of the work is the simulation of such a hybrid system and the appropriate study of the parameters to minimize weight and cost while maximizing performance.

Keywords

Hybrid system, electric car, electric vehicle, battery, capacitors, supercapacitors

Περιεχόμενα

Κατάλογος Εικόνων	7
Κατάλογος Πινάκων.....	8
Αλφαβητικό Ευρετήριο.....	9
Σκοπός και στόχοι	11
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : (Εισαγωγή).....	13
1.1 Υπόβαθρο (background)	13
1.2 Έρευνα Προβλήματος και Κίνητρο	13
1.3 Στόχοι και Πεδίο	13
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : (Βιβλιογραφική Ανασκόπηση)	15
2.1 Επισκόπηση των Ηλεκτρικών Οχημάτων και Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας.....	15
2.1.1. Εισαγωγή στα Ηλεκτρικά Οχήματα.....	15
2.1.2. Τα Εξαρτήματα που Απαρτίζουν τα Ηλεκτρικά Οχήματα	18
2.1.3 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας για Ηλεκτρικά Οχήματα.....	19
2.2 Τρέχουσες Τάσεις στις Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας	21
2.2.1. Προηγμένες Εξελίξεις στη Τεχνολογία των Μπαταριών Ιόντων Λιθίου	22
2.2.2. Αναδυόμενες Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας.....	22
2.2.3. Αρχιτεκτονική Δομή Ηλεκτρικού Οχήματος.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : (Υβριδικά συστήματα)	29
3.1 Τύποι αρχιτεκτονικών υβριδικών συστημάτων.....	29
3.1.1 Σειριακή Υβριδική Αρχιτεκτονική (Series Hybrid).....	29
3.1.2 Παράλληλη Υβριδική Αρχιτεκτονική (Parallel Hybrid)	30
3.1.3 Μικτή ή Συνδυασμένη Υβριδική Αρχιτεκτονική (Series-Parallel Hybrid)	32
3.1.4. Υβριδικά με Επέκταση Εμβέλειας (Range-Extended Hybrids).....	33
3.2 Πηγές Ενέργειας στα Ηλεκτρικά και Υβριδικά Συστήματα	35
3.2.1 Μπαταρίες	35
3.2.2 Υπερπυκνωτές (Supercapacitors)	36
3.2.3 Κυψέλες Καυσίμου Υδρογόνου (Hydrogen Fuel Cells)	37
3.3 Χαρακτηριστικά και Τοπολογίες Ηλεκτρικών και Υβριδικών Οχημάτων	38
3.3.1 Battery Electric Vehicle (BEV).....	39
3.3.2 Υβριδικό Ηλεκτρικό Όχημα (HEV).....	40
3.3.3 Plug-in Υβριδικό Ηλεκτρικό Όχημα (PHEV).....	40
3.3.4 Ηλεκτρικό Όχημα με Κυψέλες Καυσίμου (FCEV)	40
3.4 Πρότυπα και Προδιαγραφές Ηλεκτρικών Οχημάτων	41
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο : (πείραμα)	42
4.1 Σχεδιασμός hardware	43
4.2 Calibration και επεξεργασία δεδομένων	48
4.3 Ανάλυση και Αποτελέσματα	53
4.4 Συμπεράσματα	56
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : simulation(προσομοίωση)	57
5.1 Μοντέλο κυκλώματος υπερπυκνωτή.....	57
5.2 Μοντέλο κυκλώματος μπαταρίας	61
5.3 Μοντέλο κυκλώματος Hybrid ESS.....	65
5.4 Διαδικασία προσομοίωσης	66
5.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	67
5.6 Αποτελέσματα.....	72
5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο : Συμπεράσματα	72
Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές	73

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Ο Τόμας Εντισον και το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο[18].....	15
Εικόνα 2: Μία σύντομη ιστορία των ηλεκτρικών οχημάτων [17]	18
Εικόνα 3 Ποιοτική σύγκριση μεταξύ των τεχνολογιών μπαταρίας και υπερπυκνωτών [14].....	24
Εικόνα 4: Σύγκριση μπαταρίας λιθίου και υπερπυκνωτών σε μεταβλητές ποιότητας όπως η πυκνότητα ισχύος [16]	26
Εικόνα 5 Αρχιτεκτονική δομή ηλεκτρικού οχήματος[19].....	27
Εικόνα 6 Ένα BMW i3 που φορτίζει σε κλασική πρίζα των 230V.....	27
Εικόνα 7 Διασύνδεση συστημάτων σε ένα ηλεκτρικό όχημα [20]	28
Εικόνα 8 Δομή υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος σειράς [21]	30
Εικόνα 9 Toyota prius 2024.....	31
Εικόνα 10: Δομή παράλληλου υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος[21]	32
Εικόνα 11 Βασικές αρχές ενός τυπικού υπερπυκνωτή[13]	36
Εικόνα 12 Ισοδύναμο κύκλωμα υπερπυκνωτή[23]	37
Εικόνα 13 Μπλοκ διάγραμμα του μοντέλου του υπερπυκνωτή[23]	37
Εικόνα 14 Βασική δομή ενός τυπικού συστήματος σφονδύλου[24].....	38
Εικόνα 15: Βασική δομή των διαφορετικών τύπων ηλεκτρικών οχημάτων (EVs)	39
Εικόνα 16 Ο υπερπυκνωτής και η μπαταρία NiMH που χρησιμοποιούνται στο πείραμα [30]	42
Εικόνα 17 Πειραματική διάταξη	44
Εικόνα 18 Σύστημα ελέγχου της διάταξης.....	45
Εικόνα 19 Κόμβοι μέτρησης ADC (Αναλογικός-Ψηφιακός Μετατροπέας).....	46
Εικόνα 20 Κυκλώματα κλιμάκωσης με τελεστικούς ενισχυτές και οι σταθερές κλιμάκωσής τους.	46
Εικόνα 21 Τάση και θερμοκρασία μπαταρίας κατά τη διάρκεια μιας φόρτισης με σταθερό ρεύμα.....	47
Εικόνα 22 Η διάταξη PCB της διάταξης δοκιμής.	48
Εικόνα 23: Παράδειγμα βαθμονόμησης για σενάρια υψηλού και χαμηλού παλμού με 8 A και κύκλο λειτουργίας 25%.....	50
Εικόνα 24 Αλληλουχία επεξεργασίας δεδομένων	51
Εικόνα 25 Διάγραμμα των χρόνων δειγματοληψίας, επικάλυψης πάνω σε έναν παλμό ρεύματος.	52

Εικόνα 26 Μοντέλο Υπερπυκνωτή	58
Εικόνα 27 Σύγκριση του αρχικού μοντέλου υπερπυκνωτών με το πείραμα κατά τη διάρκεια μιας μακροχρόνιας δοκιμής φόρτισης	59
Εικόνα 28 Συγκρίνοντας το αρχικό μοντέλο υπερπυκνωτών με υπολογισμένες τιμές στους πειραματικούς παλμούς εκφόρτισης	59
Εικόνα 29 Σύγκριση του μοντέλου υπερπυκνωτών τεσσάρων διακλαδώσεων προσομοίωση σε πειραματικά δεδομένα σε παλμική εκκένωση 10A δοκιμή	60
Εικόνα 30 Μοντέλο μπαταρίας δοκιμής.....	61
Εικόνα 31 Υπολογισμός μπαταρίας ESR. $R_{ESR}=\Delta V/\Delta I$	62
Εικόνα 32 Ρύθμιση τάσης μπαταρίας για εύρεση του μεταβατικού κλάδου αντιστάσεις.....	62
Εικόνα 33 Σύγκριση του μοντέλου μπαταρίας δύο κλάδων με πειραματικά δεδομένα.....	63
Εικόνα 34 Τελικό μοντέλο διάταξης.....	64
Εικόνα 35 Σύγκριση του μοντέλου μπαταρίας τριών κλάδων με πειραματικά δεδομένα	65
Εικόνα 36 Hybrid ESS model με μια μπαταρία σε παράλληλη διάταξη και με 3 υπερπυκνωτές σε σειρά.....	65
Εικόνα 37 Η σύγκριση του υβριδικού μοντέλου ESS με πειραματικά δεδομένα.....	66
Εικόνα 38 Διάγραμμα ροής αριθμητικής προσομοίωσης για δεδομένο χρόνο, t_n	67
Εικόνα 39 Σάρωση των μεταβλητών παλμού για αύξηση της απόδοσης.	71
Εικόνα 40 Κέρδη απόδοσης για περιόδους χαμηλών και υψηλών παλμών.	71

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Προδιαγραφές Μπαταρίας έναντι Υπερπυκνωτή [15]	25
Πίνακας 2 :Ονομαστικά μεγέθη μπαταριών ιόντων λιθίου[21].....	35
Πίνακας 3: Σύγκριση απλού πυκνωτή και υπερπυκνωτή [23].....	36
Πίνακας 4: Προδιαγραφές εξαρτημάτων υπερπυκνωτών και μπαταρίας [30-31].....	43
Πίνακας 5 Παράδειγμα αναγνώσεων χωρίς αλλοιώσεις από έναν παλμό ρεύματος 16 A με Κ.Α: 25%,	51
Πίνακας 6 Πολλαπλασιαστές μεταβλητών για παλμό 16 A με κύκλο λειτουργίας 25%.	52
Πίνακας 7 Τα δεδομένα από τον Πίνακα 4, μετά τη μετατροπή σε τάση.....	53
Πίνακας 8. Πειραματικά Αποτελέσματα για τις Βραχυχρόνιες Δοκιμές.....	54
Πίνακας 9 Δοκιμές 16 A, 10% κύκλου εργασίας.	55

Πίνακας 10 Στοιχεία Υπερπυκνωτή.....	59
Πίνακας 11 Οι τελικές τιμές συστατικών που χρησιμοποιούνται για τον μοντέλο υπερπυκνωτών.....	60
Πίνακας 12 Τιμές εξαρτημάτων για το μοντέλο μπαταρίας δύο διακλαδώσεων.	63
Πίνακας 13 Τιμές του μοντέλου της μπαταρίας	64
Πίνακας 14 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τις ίδιες περιπτώσεις δοκιμών που εκτελέστηκαν	68
Πίνακας 15 Σύγκριση προσομοιωμένων με πειραματικών αποτελεσμάτων	69

Αλφαβητικό Ευρετήριο

- (HO) ηλεκτρικά οχήματα
- (AC) εναλλασσόμενο ρεύμα
- (BEV) Battery Electric Vehicle
- (BSS) Batt
- (BMS) Battery Management System
- (BOL) Beginning-of-Life
- (CFRPs) Composite Fiber Reinforced Panels
- (CIGS) Cu(In,Ga)Se₂
- (COTS) Commercial-off-the-Shelf
- (EOL) End-of-Life
- (EPS) Electrical Power System
- (ESA) European Space Agency
- (ESS) Energy system storage
- (EV) ηλεκτρικά οχήματα
- (FCEV) Ηλεκτρικό Όχημα με Κυψέλες Καυσίμου
- (GaN) Gallium Nitride
- (GRC) NASA Glenn Research Center\
- (HEV) Υβριδικό Ηλεκτρικό Όχημα
- (IEEE) The Institute for Electrical and Electronics Engineers
- (KSC) Kennedy Space Center
- (Li-ion) Lithium-ion
- (LiCFx) Lithium carbon monofluoride
- (LiPo) Lithium polymer

- (LiSO₂) Lithium sulfur dioxide
- (LiSOCl₂) Lithium thionyl chloride
- (MIL) Military
- (QML) Qualified Manufacturers List
- (NiCd) Nickel-cadmium
- (NiH₂) Nickel-hydrogen
- (OPV) Organic Photovoltaic
- (OSCAR) Optical Sensors based on carbon materials
- (PCB) Printed Circuit Board
- (PEASSS) Piezoelectric Assisted Smart Satellite Structure
- (PET) polyethylene terephthalate
- (PCM) Powertrain Control Module
- (PHEV) Plug-in Υβριδικό Ηλεκτρικό Όχημα
- (PMAD) Power management and distribution
- (RHUs) Radioisotopic Heater Units
- (RTGs) Radioisotope Thermoelectric Generators
- (SABER) Solid-state Architecture Batteries for Enhanced Rechargeability and Safety
- (SP) Specific Power
- (SWaP) Size, Weight, and Power
- (TPV) Thermophotovoltaic
- (TR) Thermoradiative
- (TRL) Technology Readiness Level
- (VCU) Vehicle Control Unit

Σκοπός και στόχοι

Σκοπός

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να μελετήσει και να προσομοιώσει ένα υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που συνδυάζει διαφορετικές τεχνολογίες (π.χ. μπαταρίες, υπερπυκνωτές) για την αύξηση της αποδοτικότητας και της απόδοσης ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Μέσω της ανάλυσης και της προσομοίωσης, η εργασία στοχεύει να προσδιορίσει τις βέλτιστες ρυθμίσεις και στρατηγικές για την εφαρμογή αυτών των συστημάτων, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη βιώσιμων και αποδοτικών λύσεων για την ηλεκτροκίνηση.

Στόχοι

1. **Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας:** Να διερευνηθούν οι τρέχουσες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και να αξιολογηθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.
2. **Σχεδίαση υβριδικού συστήματος:** Να σχεδιαστεί ένα υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που συνδυάζει μπαταρίες και υπερπυκνωτές, εστιάζοντας στην αποτελεσματικότητα της αποθήκευσης και της απόδοσης.
3. **Προσομοίωση:** Να υλοποιηθεί προσομοίωση του προτεινόμενου συστήματος χρησιμοποιώντας κατάλληλα λογισμικά και εργαλεία προσομοίωσης (π.χ. MATLAB/Simulink, PLECS) για να εκτιμηθούν οι επιδόσεις υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας.
4. **Αξιολόγηση επιδόσεων:** Να αναλυθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, συγκρίνοντας την αποδοτικότητα του υβριδικού συστήματος με παραδοσιακά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Δομή

Η συγκεκριμένη εργασία αναπτύσσεται σε έξι κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται ο λόγος εκπόνησης της διπλωματικής οι προβληματισμοί και ο στόχος

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τρέχουσες τεχνολογίες καθώς και μια μικρή ιστορική αναδρομή. Επίσης αναλύονται οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας και τέλος η δομή ενός ηλεκτρικού αυτοκινητού.

Στο τρίτο κεφάλαιο εμβαθύνω στα υβριδικά συστήματα, αναφέρω πηγές ενέργειας και τα συγκρίνω με τον υπερπυκνωτή.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η δομή και η μεθοδολογία ελέγχου του υπό μελέτη υβριδικού συστήματος. Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τις λεπτομέρειες του πειράματος αυτής της έρευνας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος, με τη χρήση του λογισμικού SIMULINK/MATLAB, και της μελέτης.

Στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας και επισημαίνονται τα στοιχεία καινοτομίας της.

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : (Εισαγωγή)

1.1 Υπόβαθρο (background)

Η αυξανόμενη παγκόσμια ανησυχία για την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και η ανάγκη για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου οδήγησαν σε μια σημαντική αύξηση της δημοτικότητας των ηλεκτρικών οχημάτων ως εναλλακτική λύση σε παραδοσιακά οχήματα που κινούνται με ορυκτά καύσιμα. Τα ηλεκτρικά οχήματα προσφέρουν πολλαπλά οφέλη, όπως μηδενικές εκπομπές καυσαερίων, μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Ωστόσο, ένα από τα βασικά εμπόδια που εμποδίζουν την ευρεία αποδοχή των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η περιορισμένη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας των τρεχουσών τεχνολογιών μπαταριών.

1.2 Έρευνα Προβλήματος και Κίνητρο

Η απόδοση και η χρηστικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αποτελεσματικότητα και τη χωρητικότητα των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας τους. Οι υπάρχουσες τεχνολογίες μπαταριών που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα αντιμετωπίζουν αρκετούς περιορισμούς, συμπεριλαμβανομένης της περιορισμένης αυτονομίας, των μακρών χρόνων φόρτισης και του υψηλού κόστους. Αυτά τα περιοριστικά στοιχεία αποτελούν εμπόδια για την ευρύτερη αποδοχή και υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά. Συνεπώς, υπάρχει μια κρίσιμη ανάγκη για την ανάπτυξη καινοτόμων και προηγμένων λύσεων αποθήκευσης ενέργειας που μπορούν να αντιμετωπίσουν αυτές τις προκλήσεις και να προωθήσουν την ανάπτυξη της βιομηχανίας ηλεκτρικών οχημάτων.

Σε αυτό το πλαίσιο, το πρόβλημα έρευνας αυτού του προπτυχιακού έργου είναι η σχεδίαση και η προσομοίωση ενός υβριδικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για ηλεκτρικά οχήματα που θα ξεπερνά τους περιορισμούς των συμβατικών συστημάτων μπαταριών. Το προτεινόμενο υβριδικό σύστημα στοχεύει στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης, της αυτονομίας και της αποδοτικότητας φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως το κόστος, το βάρος και την ασφάλεια.

Το κίνητρο πίσω από αυτήν την έρευνα είναι να συμβάλει στην πρόοδο της τεχνολογίας των ηλεκτρικών οχημάτων αναπτύσσοντας ένα υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Μέσω της ένταξης της αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες με άλλα στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι υπερπυκνωτές, το υβριδικό σύστημα μπορεί δυνητικά να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς των μεμονωμένων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας και να παρέχει μια πιο αξιόπιστη και αποδοτική λύση για τα ηλεκτρικά οχήματα.

1.3 Στόχοι και Πεδίο

Ο κύριος στόχος αυτού του προπτυχιακού έργου είναι η σχεδίαση και η προσομοίωση ενός υβριδικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας που θα βελτιστοποιεί την απόδοση των ηλεκτρικών οχημάτων. Οι συγκεκριμένοι στόχοι περιλαμβάνουν:

- Διεξαγωγή μιας σφαιρικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης για την ανάλυση της παρούσας κατάστασης στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας για ηλεκτρικά οχήματα, συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών μπαταριών και των υβριδικών διαμορφώσεων.

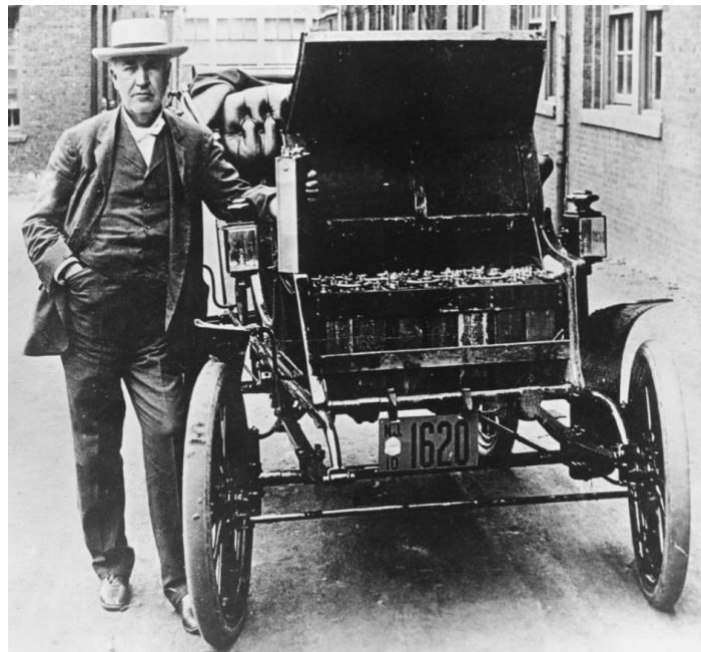
- Ανάπτυξη μιας συστηματικής μεθοδολογίας για τη σχεδίαση και την προσομοίωση του υβριδικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες, όπως η πυκνότητα ενέργειας, η πυκνότητα ισχύος, το κόστος, το βάρος και η ασφάλεια.
- Αξιολόγηση της απόδοσης του υβριδικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μέσω προσομοιώσεων και αναλύσεων, που περιλαμβάνουν διάφορες παραμέτρους, όπως η αυτονομία, η αποδοτικότητα, ο χρόνος φόρτισης και η αντοχή.

Με την ολοκλήρωση αυτού του έργου, αναμένεται να προκύψουν σημαντικά ευρήματα και συμπεράσματα που θα συνεισφέρουν στη βελτίωση της απόδοσης και της αποδοτικότητας των ηλεκτρικών οχημάτων μέσω της χρήσης υβριδικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : (Βιβλιογραφική Ανασκόπηση)

2.1 Επισκόπηση των Ηλεκτρικών Οχημάτων και Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας

Μία επισκόπηση των ηλεκτρικών οχημάτων και των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας αποκαλύπτει τη σημασία τους ως τεχνολογίας μετασχηματισμού στον τομέα των μεταφορών. Τα ηλεκτρικά οχήματα (EV) έχουν αναδειχθεί ως βιώσιμη και βιώσιμη εναλλακτική λύση στα συμβατικά οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, αντιμετωπίζοντας ανησυχίες που σχετίζονται με την περιβαλλοντική ρύπανση και την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα. Τα EV τροφοδοτούνται από συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που αποθηκεύουν και παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια για την κίνηση του οχήματος. Αυτά τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, που βασίζονται συνήθως σε προηγμένες τεχνολογίες μπαταριών, όπως οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της απόδοσης, της αυτονομίας και της συνολικής απόδοσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτή η παράγραφος παρέχει μια υψηλού επιπέδου εισαγωγή στο θέμα, τονίζοντας τη σημασία των ηλεκτρικών οχημάτων και των συσχετιζόμενων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στη μετάβαση προς ένα πιο πράσινο και πιο βιώσιμο μέλλον των μεταφορών.



Εικόνα 1 Ο Τόμας Εντισον και το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο[18]

2.1.1. Εισαγωγή στα Ηλεκτρικά Οχήματα

Τα EV, ή ηλεκτρικά οχήματα, είναι αυτοκίνητα που κινούνται από έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες αντί για κινητήρες εσωτερικής καύσης (ICE) που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα. Χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ή άλλες συσκευές αποθήκευσης ενέργειας για να προωθήσουν το όχημα. Τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν κερδίσει σημαντική προσοχή και δημοτικότητα τα τελευταία χρόνια λόγω των δυνατοτήτων τους να μειώνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την εξάρτησή τους από ορυκτά καύσιμα.

Η ιδέα των ηλεκτρικών οχημάτων χρονολογείται από τις αρχές του 19ου αιώνα. Το πρώτο πρακτικό ηλεκτρικό όχημα εφευρέθηκε από τον Thomas Davenport, έναν Αμερικανό σιδηρουργό,

το 1835. Ωστόσο, η σύγχρονη ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων ξεκίνησε στα τέλη του 20ου αιώνα με τις εξελίξεις στην τεχνολογία των μπαταριών και τις ανησυχίες για την ατμοσφαιρική ρύπανση και την κλιματική αλλαγή.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 και στις αρχές της δεκαετίας του 2000, τα ηλεκτρικά οχήματα γνώρισαν μια αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για αυτά, με την εισαγωγή του General Motors EV1 και του Toyota RAV4 EV. Αυτά τα οχήματα τροφοδοτούνταν από μπαταρίες μολύβδου-οξέος και μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου (NiMH), αντίστοιχα. Ωστόσο, η περιορισμένη αυτονομία και η έλλειψη υποδομής φόρτισης εμπόδισαν την ευρεία υιοθέτησή τους.

Η εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων επιταχύνθηκε τη δεκαετία του 2010, κυρίως λόγω της προόδου στην τεχνολογία μπαταριών ιόντων λιθίου και της κυβερνητικής υποστήριξης για καθαρές μεταφορές. Η εισαγωγή του Tesla Roadster το 2008 σηματοδότησε ένα σημείο καμπής για τα ηλεκτρικά οχήματα, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες για ηλεκτρικά αυτοκίνητα υψηλών επιδόσεων. Η Tesla, που ιδρύθηκε από τον Έλον Μασκ, έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην αύξηση της δημοτικότητας και της εξέλιξης των ηλεκτρικών οχημάτων.

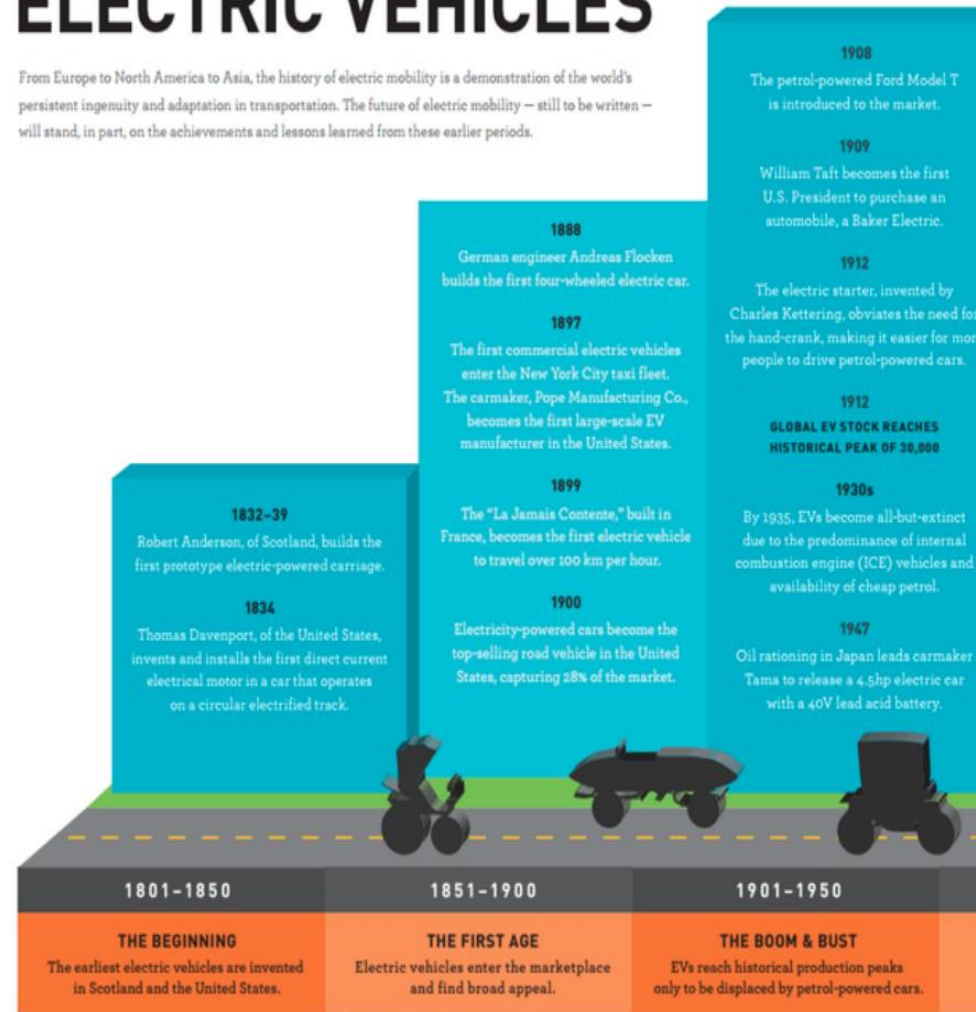
Τα επόμενα χρόνια, μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες άρχισαν να εισάγουν ηλεκτρικά οχήματα στη σειρά τους. Η Nissan κυκλοφόρησε το Nissan Leaf το 2010, το οποίο έγινε το ηλεκτρικό αυτοκίνητο με τις περισσότερες πωλήσεις παγκοσμίως εκείνη την εποχή. Άλλες αυτοκινητοβιομηχανίες όπως η Chevrolet, η BMW και η Audi ακολούθησαν το παράδειγμά τους με τα δικά τους ηλεκτρικά μοντέλα. Η αυτονομία οδήγησης των ηλεκτρικών οχημάτων έχει βελτιωθεί με την πάροδο του χρόνου. Τα πρώτα μοντέλα είχαν αυτονομία περίπου 100 μιλίων (160 χιλιομέτρων), ενώ τα σύγχρονα EV μπορούν να ξεπεράσουν τα 300 μίλια (480 χιλιόμετρα) με μία μόνο φόρτιση. Αυτή η αυξημένη αυτονομία, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη υποδομή φόρτισης, έχει μετριάσει το «άγχος αυτονομίας» και έχει κάνει τα ηλεκτρικά οχήματα πιο πρακτικά για καθημερινή χρήση.

Επιπλέον, η ποικιλία των τύπων ηλεκτρικών οχημάτων έχει διευρυνθεί. Εκτός από σεντάν όπως το Tesla Model S και το Chevrolet Bolt, υπάρχουν πλέον ηλεκτρικά SUV (π.χ. Tesla Model X, Audi e-tron), ηλεκτρικά crossover (π.χ. Hyundai Kona Electric) και ηλεκτρικά φορτηγά (π.χ. Tesla Cybertruck, Ford F-150 Lightning). Αυτή η διαφοροποίηση των τύπων οχημάτων έχει κάνει τα ηλεκτρικά οχήματα ελκυστικά σε ένα ευρύτερο φάσμα καταναλωτών. Οι κυβερνήσεις και οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής σε όλο τον κόσμο έχουν εφαρμόσει κίνητρα και κανονισμούς για την προώθηση της υιοθέτησης ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτές περιλαμβάνουν εκπτώσεις φόρου, επιδοτήσεις και αυστηρότερα πρότυπα εκπομπών. Ως αποτέλεσμα, το μερίδιο αγοράς των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται σταθερά και πολλές χώρες έχουν θέσει φιλόδοξους στόχους να καταργήσουν σταδιακά τα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης εντελώς τις επόμενες δεκαετίες.

Έτσι, τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν προχωρήσει πολύ από την αρχή της δημιουργίας τους τον 19ο αιώνα. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των μπαταριών, η αυξημένη εμβέλεια οδήγησης, η επέκταση της υποδομής φόρτισης και η κρατική υποστήριξη έχουν τροφοδοτήσει την εξέλιξη των EV, καθιστώντας τα μια πολλά υποσχόμενη λύση για ένα πιο βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον μέλλον μεταφοράς. Σε αυτή την ενότητα παρέχεται μια λεπτομερής εισαγωγή στα ηλεκτρικά οχήματα (HO). Εξετάζεται η ιστορία και η ανάπτυξη των HO, τονίζοντας τη σημασία τους ως βιώσιμη και περιβαλλοντικά φιλική λύση μεταφοράς. Η συζήτηση περιλαμβάνει μια επισκόπηση των κύριων συστατικών των HO, όπως ο ηλεκτροκινητήρας, η ηλεκτρονική ισχύος και η υποδομή φόρτισης. Επιπλέον, αναφέρονται οι περιβαλλοντικά οφέλη και οι προκλήσεις που συνδέονται με την υιοθέτηση HO όπως φαίνεται στην Εικόνα 2 παρακάτω [17].

A BRIEF HISTORY OF ELECTRIC VEHICLES

From Europe to North America to Asia, the history of electric mobility is a demonstration of the world's persistent ingenuity and adaptation in transportation. The future of electric mobility – still to be written – will stand, in part, on the achievements and lessons learned from these earlier periods.





Εικόνα 2: Μία σύντομη ιστορία των ηλεκτρικών οχημάτων [17]

2.1.2. Τα Εξαρτήματα που Απαρτίζουν τα Ηλεκτρικά Οχήματα

Εκτός από τον ηλεκτροκινητήρα και την μπαταρία, ένα ηλεκτρικό όχημα (EV) αποτελείται από πολλά βασικά εξαρτήματα που συνεργάζονται για να επιτρέπουν τη λειτουργία του. Εδώ είναι μερικά βασικά μέρη που βρίσκονται σε ένα EV:

1. Ηλεκτρικός κινητήρας: Ο ηλεκτροκινητήρας είναι η κύρια πηγή πρόωσης σε ένα EV. Μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια από την μπαταρία σε μηχανική ενέργεια για την κίνηση των τροχών.
2. Μπαταρία: Η μπαταρία αποθηκεύει την ηλεκτρική ενέργεια που τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα. Συνήθως αποτελείται από πολλές μεμονωμένες μπαταρίες συνδεδεμένες μεταξύ τους για να παρέχουν την απαραίτητη τάση και χωρητικότητα. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος στα σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα λόγω της υψηλής ενεργειακής τους πυκνότητας.
3. Ενσωματωμένος φορτιστής: Ο ενσωματωμένος φορτιστής μετατρέπει το AC (εναλλασσόμενο ρεύμα) από σταθμό φόρτισης ή πρίζα τοίχου σε συνεχές ρεύμα (συνεχές ρεύμα) για να επαναφορτίσει τη μπαταρία. Διαχειρίζεται τη διαδικασία φόρτισης και διασφαλίζει ότι η μπαταρία λαμβάνει τη σωστή τάση και ρεύμα.

4. Power Electronics: Το σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος ελέγχει τη ροή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ της μπαταρίας, του κινητήρα και άλλων εξαρτημάτων του οχήματος. Περιλαμβάνει εξαρτήματα όπως μετατροπείς, μετατροπείς και ελεγκτές κινητήρα που ρυθμίζουν την παροχή ισχύος και διευκολύνουν την αποτελεσματική λειτουργία.
5. Σύστημα πέδησης με ανάκτηση: Τα EV συχνά ενσωματώνουν αναγεννητική πέδηση, η οποία συλλαμβάνει την κινητική ενέργεια που παράγεται κατά το φρενάρισμα ή την επιβράδυνση. Αυτή η ενέργεια μετατρέπεται ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια και τροφοδοτείται πίσω στην μπαταρία, συμβάλλοντας στην επέκταση της αυτονομίας του οχήματος.
6. Σύστημα διαχείρισης θερμότητας: Τα ηλεκτρικά οχήματα απαιτούν σύστημα θερμικής διαχείρισης για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας της μπαταρίας και άλλων εξαρτημάτων. Εξασφαλίζει βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, βελτιώνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και διατηρεί την απόδοση σε ακραίες θερμοκρασίες.
7. Vehicle Control Unit (VCU): Το VCU χρησιμεύει ως ο εγκέφαλος του ηλεκτρικού οχήματος, διαχειρίζεται διάφορα συστήματα και συντονίζει τη λειτουργία τους. Ελέγχει τον κινητήρα, την μπαταρία, τα ηλεκτρονικά ισχύος, την αναγεννητική πέδηση και άλλα υποσυστήματα για να εξασφαλίσει ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία.
8. Θύρα φόρτισης: Η θύρα φόρτισης είναι όπου το EV συνδέεται σε μια εξωτερική πηγή ρεύματος για επαναφόρτιση. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι υποδοχών φόρτισης και πρότυπα ανάλογα με την περιοχή και την υποδομή φόρτισης.
9. Συστήματα Infotainment και Control: Τα ηλεκτρικά οχήματα διαθέτουν συχνά προηγμένα συστήματα ψυχαγωγίας και ψηφιακές διεπαφές για την άνεση του οδηγού και των επιβατών. Αυτά τα συστήματα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της μπαταρίας, την αυτονομία οδήγησης, την κατανάλωση ενέργειας και προσφέρουν λειτουργίες όπως πλοήγηση, έλεγχος κλίματος και επιλογές συνδεσιμότητας.
10. Αμάξωμα και πλαίσιο: Το αμάξωμα και το πλαίσιο ενός EV είναι παρόμοια με αυτά των συμβατικών οχημάτων. Παρέχουν δομική ακεραιότητα, υποστηρίζουν διάφορα εξαρτήματα του οχήματος και στεγάζουν την καμπίνα επιβατών. Ωστόσο, τα EV μπορεί να έχουν αεροδυναμικές βελτιώσεις και ελαφριά υλικά για τη βελτίωση της απόδοσης και τη μεγιστοποίηση της εμβέλειας.

Αυτά είναι μερικά από τα κύρια συστατικά που βρίσκονται στα ηλεκτρικά οχήματα. Καθώς η τεχνολογία προχωρά, νέες καινοτομίες και βελτιώσεις συνεχίζουν να βελτιώνουν την απόδοση, την εμβέλεια και τις συνολικές δυνατότητες των EV.

2.1.3 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας για Ηλεκτρικά Οχήματα

1. : Μπαταρίες ιόντων λιθίου

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος στα ηλεκτρικά οχήματα (EV) λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητάς τους, του σχετικά χαμηλού βάρους και της ώριμης τεχνολογίας τους. Αποτελούνται από κύτταρα ιόντων λιθίου που αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια χημικά. Ακολουθούν τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των μπαταριών ιόντων λιθίου στα EV:

Πλεονεκτήματα:

- Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα επιτρέπει μεγαλύτερες αποστάσεις οδήγησης.
- Ελαφρύ και συμπαγές, επιτρέποντας πιο αποτελεσματική χρήση του χώρου στο όχημα.

- Δυνατότητες γρήγορης φόρτισης, μείωση του χρόνου φόρτισης.
- Καθιερωμένη τεχνολογία με ισχυρή υποδομή παραγωγής.
- Ευρέως διαθέσιμο και σχετικά χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες.

Περιορισμοί:

- Περιορισμένη διάρκεια ζωής, που συνήθως διαρκεί μερικά χρόνια πριν μειωθεί η χωρητικότητά τους.
- Ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες, που μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση και τη μακροζωία τους.
- Οι διαδικασίες παραγωγής και διάθεσης μπορεί να έχουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- Εξάρτηση από σπάνιους πόρους όπως το λίθιο και το κοβάλτιο.

Εφαρμογές σε EV:

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους τύπους ηλεκτρικών οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων σεντάν, SUV, crossover και υβριδικών. Προσφέρουν μια καλή ισορροπία μεταξύ της ενεργειακής πυκνότητας, του κόστους και της πρακτικότητας, καθιστώντας τα κατάλληλα για μια σειρά εφαρμογών EV.

2. Μπαταρίες στερεάς κατάστασης:

Οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που στοχεύει να ξεπεράσει ορισμένους από τους περιορισμούς των μπαταριών ιόντων λιθίου. Χρησιμοποιούν στερεούς ηλεκτρολύτες αντί για τους υγρούς ή ηλεκτρολύτες γέλης που βρίσκονται στις παραδοσιακές μπαταρίες ιόντων λιθίου. Αν και βρίσκονται ακόμη στο στάδιο έρευνας και ανάπτυξης, οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης παρουσιάζουν πολλά υποσχόμενα χαρακτηριστικά για τα EV:

Πλεονεκτήματα:

- ⇒ Υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου, επιτρέποντας αυξημένη εμβέλεια οδήγησης
- ⇒ Βελτιωμένη ασφάλεια λόγω της απουσίας εύφλεκτων υγρών ηλεκτρολυτών.
- ⇒ Γρηγορότεροι χρόνοι φόρτισης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
- ⇒ Δυνατότητα για χαμηλότερο κόστος και μειωμένη εξάρτηση από σπάνιους πόρους.

Περιορισμοί:

- ◇ Επί του παρόντος, οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης βρίσκονται ακόμη σε φάση ανάπτυξης και δεν διατίθενται στο εμπόριο σε κλίμακα.
- ◇ Πρέπει να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις παραγωγής, όπως η κλιμάκωση των διαδικασιών παραγωγής.
- ◇ Η βελτιστοποίηση κόστους και απόδοσης αποτελούν συνεχείς ερευνητικούς στόχους.

Εφαρμογές σε EV:

Οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης έχουν τη δυνατότητα να φέρουν επανάσταση στη βιομηχανία των EV, προσφέροντας ακόμη υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, αυξημένη ασφάλεια

και ταχύτερους χρόνους φόρτισης. Μόλις η τεχνολογία ωριμάσει και γίνει εμπορικά βιώσιμη, θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε μια ευρεία γκάμα ηλεκτρικών οχημάτων.

3. Κυψέλες καυσίμου υδρογόνου:

Αν και δεν είναι αυστηρά τεχνολογία μπαταρίας, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου είναι μια εναλλακτική πηγή ενέργειας για ηλεκτρικά οχήματα. Αντί να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια σε μια μπαταρία, οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας χημικής αντίδρασης μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου. Ακολουθούν τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των κυψελών καυσίμου υδρογόνου:

Πλεονεκτήματα:

- Μεγαλύτερες αποστάσεις οδήγησης σε σύγκριση με τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία, καθώς το υδρογόνο μπορεί να ανεφοδιαστεί γρήγορα.
- Γρήγοροι χρόνοι ανεφοδιασμού, παρόμοιοι με τα συμβατικά βενζινοκίνητα οχήματα.
- Μηδενικές εκπομπές καυσαερίων, καθώς το μόνο υποπροϊόν είναι οι υδρατμοί.
- Κατάλληλο για εφαρμογές βαρέως τύπου, όπως λεωφορεία και φορτηγά.

Περιορισμοί:

- i. Περιορισμένη υποδομή ανεφοδιασμού με υδρογόνο σε σύγκριση με την υποδομή φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία.
- ii. Μεγαλύτερο κόστος και πολυπλοκότητα σε σύγκριση με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου.
- iii. Απώλειες απόδοσης στη διαδικασία παραγωγής υδρογόνου.
- iv. Προκλήσεις που σχετίζονται με την αποθήκευση και τη μεταφορά υδρογόνου.

Εφαρμογές σε EV:

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου χρησιμοποιούνται κυρίως σε οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου (FCV), τα οποία είναι ηλεκτρικά οχήματα που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επί του σκάφους. Τα FCV είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για μεταφορά μεγάλων αποστάσεων και εφαρμογές όπου ο γρήγορος ανεφοδιασμός είναι ζωτικής σημασίας. Ωστόσο, η περιορισμένη υποδομή υδρογόνου και το υψηλό κόστος συνιστούν προκλήσεις για ευρεία υιοθέτηση.

2.2 Τρέχουσες Τάσεις στις Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου παραμένουν η πιο διαδεδομένη τεχνολογία στα ηλεκτρικά οχήματα λόγω της υψηλής ενεργειακής τους πυκνότητας, των δυνατοτήτων γρήγορης φόρτισης και της καθιερωμένης υποδομής κατασκευής. Οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης υπόσχονται μελλοντικές εφαρμογές EV, προσφέροντας υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και βελτιωμένη ασφάλεια. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, ενώ αντιμετωπίζουν προκλήσεις υποδομής, παρέχουν μια εναλλακτική πηγή ενέργειας για συγκεκριμένες εφαρμογές, δίνοντας έμφαση σε μεγάλες αποστάσεις οδήγησης και γρήγορους χρόνους ανεφοδιασμού. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη σε αυτές τις τεχνολογίες μπαταριών θα συμβάλει στην πρόοδο των ηλεκτρικών οχημάτων και στη μετάβαση σε βιώσιμες μεταφορές.

2.2.1. Προηγμένες Εξελίξεις στη Τεχνολογία των Μπαταριών Ιόντων Λιθίου

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν υποστεί σημαντικές προόδους όλα αυτά τα χρόνια, με γνώμονα τις συνεχείς προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης. Οι καινοτομίες σε στερεούς ηλεκτρολύτες, ανόργανες ανόδους και προηγμένες εναποθέσεις υλικών έχουν παίξει καθοριστικό ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης, της ασφάλειας και της μακροζωίας των μπαταριών ιόντων λιθίου. Οι στερεοί ηλεκτρολύτες έχουν αναδειχθεί ως ένας πολλά υποσχόμενος τομέας έρευνας για την ανάπτυξη μπαταριών ιόντων λιθίου. Παραδοσιακά, σε αυτές τις μπαταρίες έχουν χρησιμοποιηθεί υγροί ή ηλεκτρολύτες γέλης, αλλά συνοδεύονται από ορισμένους περιορισμούς, όπως η ευφλεκτότητα και η ευαισθησία σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι στερεοί ηλεκτρολύτες, από την άλλη πλευρά, προσφέρουν αυξημένη ασφάλεια και σταθερότητα. Είναι μη εύφλεκτα και λιγότερο επιρρεπή σε διαρροές, μειώνοντας τον κίνδυνο θερμικής διαρροής και βελτιώνοντας τη συνολική ασφάλεια των μπαταριών ιόντων λιθίου.

Η ανάπτυξη στερεών ηλεκτρολυτών έχει ανοίξει δυνατότητες για υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και δυνατότητες ταχύτερης φόρτισης μαζί με αυξημένη χωρητικότητα, βελτιωμένη απόδοση ποδηλασίας και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Οι ερευνητές διερευνούν ενεργά διάφορα στερεά υλικά ηλεκτρολυτών, όπως κεραμικά, σουλφίδια και συνθέσεις με βάση πολυμερή, για να βελτιστοποιήσουν την αγωγιμότητα και τη σταθερότητά τους.

Ένας άλλος τομέας προόδου στις μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι η εξερεύνηση ανόργανων μετάλλων. Συμβατικά, ο γραφίτης ήταν η προτιμώμενη επιλογή για το υλικό ανόδου λόγω της ικανότητάς του να παρεμβάλλει ιόντα λιθίου. Ωστόσο, οι ερευνητές εστιάζουν τώρα σε εναλλακτικά υλικά όπως το πυρίτιο, ο κασσίτερος και τα οξειδία μετάλλων, τα οποία έχουν υψηλότερες δυνατότητες αποθήκευσης λιθίου. Αυτά τα ανόργανα υλικά ανόδου επιτρέπουν υψηλότερες ενεργειακές πυκνότητες, επιτρέποντας αυξημένη αποθήκευση ενέργειας στον ίδιο όγκο μπαταρίας.

Ενώ η χρήση ανόργανων ανοδίων φέρνει πλεονεκτήματα όσον αφορά τη χωρητικότητα, θέτουν επίσης προκλήσεις που σχετίζονται με την επέκταση του όγκου και τη σταθερότητα κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης. Οι ερευνητές εργάζονται ενεργά για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων μέσω διαφόρων προσεγγίσεων, όπως τεχνικές νανοδομής, επίστρωσης και κράματος, για τη βελτίωση της απόδοσης και της σταθερότητας του κύκλου των υλικών ανόδου.

Οι προηγμένες εναποθέσεις υλικών έχουν επίσης διαδραματίσει ζωτικό ρόλο στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης των μπαταριών ιόντων λιθίου. Οι τεχνικές εναπόθεσης λεπτής μεμβράνης, όπως η εναπόθεση ατομικού στρώματος (ALD) και η φυσική εναπόθεση ατμού (PVD), επιτρέπουν τον ακριβή έλεγχο και την ομοιόμορφη επίστρωση των υλικών των ηλεκτροδίων. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν την ανάπτυξη ηλεκτροδίων μπαταρίας με βελτιστοποιημένες ιδιότητες επιφάνειας, βελτιωμένη πρόσφυση και βελτιωμένες διεπαφές ηλεκτροδίου-ηλεκτρολύτη. Με τη βελτίωση των διαδικασιών εναπόθεσης και την εξερεύνηση νέων υλικών, οι ερευνητές στοχεύουν να βελτιώσουν την απόδοση, τη διάρκεια ζωής και τη συνολική απόδοση των μπαταριών ιόντων λιθίου.

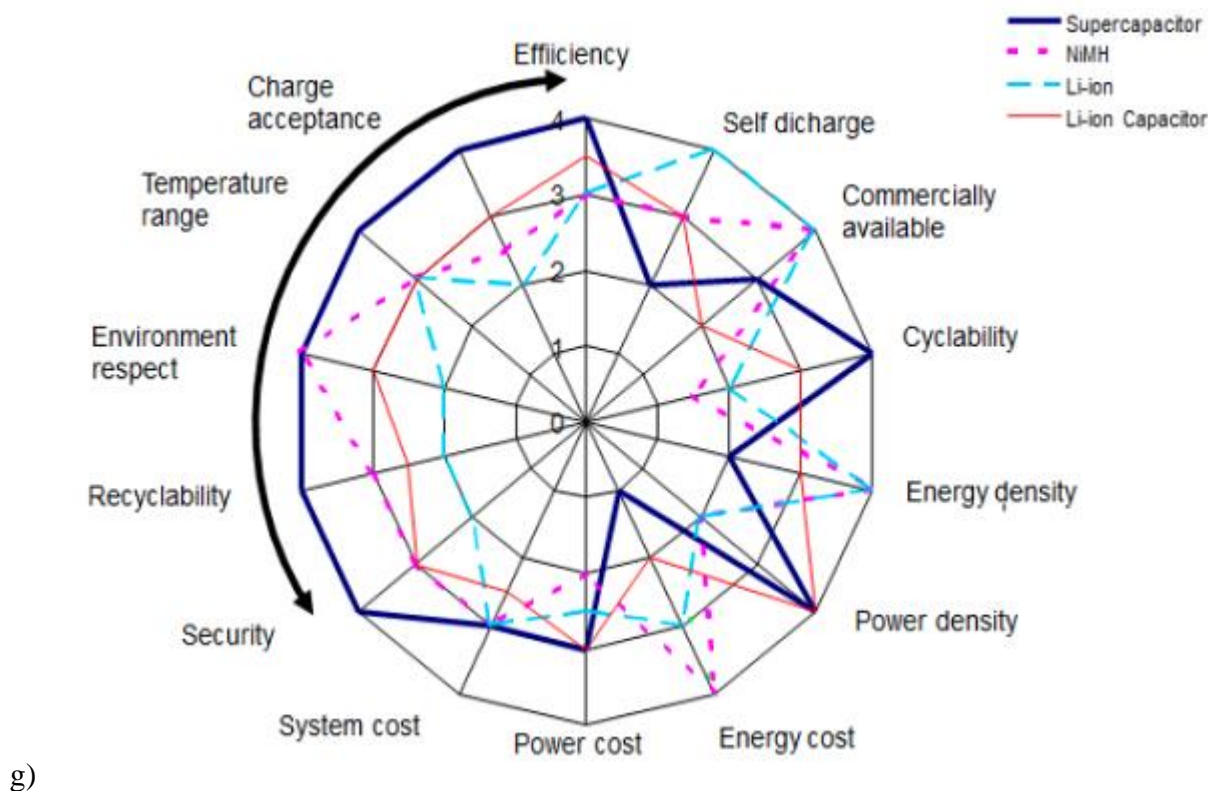
Η εξέλιξη των μπαταριών ιόντων λιθίου μέσω στερεών ηλεκτρολυτών, ανόργανων ανοδίων και προηγμένων εναποθέσεων υλικών έχει οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στην ενεργειακή πυκνότητα, την ασφάλεια και τη διάρκεια ζωής τους. Αυτές οι εξελίξεις ανοίγουν το δρόμο για την ανάπτυξη ηλεκτρικών οχημάτων με μεγαλύτερες αποστάσεις οδήγησης, ταχύτερους χρόνους φόρτισης και αυξημένη συνολική αξιοπιστία. Οι συνεχείς προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης θα προωθήσουν περαιτέρω την εξέλιξη των μπαταριών ιόντων λιθίου, καθιστώντας τις ακόμη πιο αποτελεσματικές, βιώσιμες και κατάλληλες για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

2.2.2. Αναδυόμενες Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας

Ενώ οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι σήμερα η κυρίαρχη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας στα ηλεκτρικά οχήματα (ηλεκτρικά οχήματα), οι συνεχιζόμενες προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης διερευνούν. Αυτές οι αυξανόμενες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας στοχεύουν να ξεπεράσουν τους περιορισμούς των μπαταριών ιόντων λιθίου, προσφέροντας βελτιωμένη απόδοση, υψηλότερες πυκνότητες ενέργειας, ταχύτερους χρόνους φόρτισης και βελτιωμένη ασφάλεια. Εδώ είναι μερικές από τις αξιοσημείωτες τεχνολογίες που διερευνώνται:

- a) Μπαταρίες στερεάς κατάστασης: οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης χρησιμοποιούν στερεούς ηλεκτρολύτες αντί υγρών ή ηλεκτρολυτών γέλης που βρίσκονται στις παραδοσιακές μπαταρίες ιόντων λιθίου. Με την εξάλειψη εύφλεκτων εξαρτημάτων, οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης προσφέρουν βελτιωμένη ασφάλεια. Έχουν επίσης τη δυνατότητα για τις υψηλότερες ενεργειακές πυκνότητες, τη μακρύτερη ζωή κύκλων, και τα γρηγορότερα ποσοστά χρέωσης. Οι ερευνητές εργάζονται για τη βελτιστοποίηση των στερεών ηλεκτρολυτικών υλικών, την ενίσχυση της αγωγιμότητας και την αντιμετώπιση προκλήσεων όπως η επεκτασιμότητα της κατασκευής για να φέρουν τις μπαταρίες στερεάς κατάστασης πιο κοντά στην εμπορική βιωσιμότητα.
- b) Μπαταρίες λιθίου-θείου (Li-S): οι μπαταρίες Li-S είναι μια εναλλακτική λύση στις μπαταρίες ιόντων λιθίου που χρησιμοποιούν θείο ως υλικό καθόδου. Προσφέρουν σημαντικά υψηλότερες ενεργειακές πυκνότητες σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μπαταρίες ιόντων λιθίου, επιτρέποντας ενδεχομένως μεγαλύτερες αποστάσεις οδήγησης για ηλεκτρικά οχήματα. Επιπλέον, το θείο είναι άφθονο και με σχετικά χαμηλό κόστος, μειώνοντας την εξάρτηση από τους σπάνιους πόρους. Προκλήσεις όπως η διάλυση των πολυσουλφιδίων και η επέκταση/συστολή του θείου κατά τη διάρκεια του κύκλου αντιμετωπίζονται για τη βελτίωση της διάρκειας ζωής του κύκλου και της σταθερότητας των μπαταριών Li-S.
- c) Μπαταρίες λιθίου-αέρα (Li-Air): οι μπαταρίες λιθίου-αέρα έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν εξαιρετικά υψηλές πυκνότητες ενέργειας, ξεπερνώντας ακόμη και αυτές των μπαταριών Li-S. Χρησιμοποιούν αέρα περιβάλλοντος ως υλικό καθόδου, μειώνοντας σημαντικά το βάρος της μπαταρίας. Ωστόσο, οι μπαταρίες Li-Air βρίσκονται ακόμη στα αρχικά στάδια ανάπτυξης, αντιμετωπίζοντας προκλήσεις που σχετίζονται με τη σταθερότητα των ηλεκτρολυτών, την αποδοτικότητα και τη διάρκεια ζωής του κύκλου. Οι ερευνητές διερευνούν ενεργά νέα υλικά και σχέδια για να ξεπεράσουν αυτά τα εμπόδια.
- d) Μπαταρίες ιόντων νατρίου (Na-Ion): οι μπαταρίες ιόντων νατρίου στοχεύουν στην αντικατάσταση του λιθίου με νάτριο ως φορέα φόρτισης. Το νάτριο είναι πιο άφθονο και οικονομικά αποδοτικό από το λίθιο, μειώνοντας ενδεχομένως το συνολικό κόστος της μπαταρίας. Οι μπαταρίες ιόντων Na διερευνώνται για την καταλληλότητά τους σε εφαρμογές στατικής αποθήκευσης ενέργειας και η συνεχιζόμενη έρευνα επιδιώκει να βελτιώσει την ενεργειακή πυκνότητα και τη διάρκεια ζωής τους για εφαρμογές EV.
- e) Μπαταρίες ροής: οι μπαταρίες ροής προσφέρουν το πλεονέκτημα της αποσύνδεσης της χωρητικότητας αποθήκευσης ενέργειας από την ικανότητα ισχύος. Αποθηκεύουν ενέργεια σε εξωτερικές δεξαμενές που περιέχουν υγρούς ηλεκτρολύτες, επιτρέποντας εύκολη επεκτασιμότητα αυξάνοντας το μέγεθος των δεξαμενών. Οι μπαταρίες ροής έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν μεγαλύτερες σειρές οδήγησης και ταχύτερους χρόνους φόρτισης. Ωστόσο, προκλήσεις όπως το κόστος, το μέγεθος και η ενεργειακή απόδοση πρέπει να αντιμετωπιστούν για την εφαρμογή τους στα ηλεκτρικά οχήματα.

- f) Υπερπυκνωτές: οι Υπερπυκνωτές, αποθηκεύουν ενέργεια ηλεκτροστατικά και όχι χημικά. Προσφέρουν υψηλή πυκνότητα ισχύος και δυνατότητες γρήγορης φόρτισης, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορες εκρήξεις ισχύος. Αν και οι υπερπυκνωτές έχουν χαμηλότερες Ενεργειακές πυκνότητες σε σύγκριση με τις μπαταρίες, η συνεχιζόμενη έρευνα στοχεύει στη βελτίωση της χωρητικότητας αποθήκευσης ενέργειας τους για να καταστούν βιώσιμες για τα ηλεκτρικά οχήματα. Παρόλο που η ενεργειακή πυκνότητα των υπερπυκνωτών, που ονομάζονται επίσης υπερπυκνωτές (ultracapacitors), είναι χαμηλή (έως 7 Wh kg^{-1}), προσφέρουν πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος (έως 100 kW kg^{-1}), κάτι που θα μπορούσε να είναι χρήσιμο για διαστημικές εφαρμογές που απαιτούν ενεργειακές μεταπτώσεις. Ο γρήγορος χρόνος φόρτισης και εκφόρτισης, η ικανότητά τους να αντέχουν εκατομμύρια κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης, καθώς και το ευρύ φάσμα θερμοκρασιών λειτουργίας (-40°C έως $+70^\circ\text{C}$), τους καθιστούν ιδανική επιλογή για διάφορες διαστημικές εφαρμογές (εκτοξευτές και δορυφόρους). Παρόλο που δεν είναι πιθανό να αντικαταστήσουν πλήρως τις μπαταρίες λιθίου-ιόντων, οι υπερπυκνωτές θα μπορούσαν να μειώσουν δραστικά την ανάγκη για μπαταρία και να βοηθήσουν στη μείωση του βάρους, βελτιώνοντας ταυτόχρονα την απόδοση σε ορισμένες εφαρμογές. Στην Εικόνα 3 φαίνεται ένα διάγραμμα σύγκρισης [14], ενώ στον πίνακα 1 παρατίθενται οι διαφορές μεταξύ των μπαταριών λιθίου-ιόντων και των υπερπυκνωτών[15].



Εικόνα 3 Ποιοτική σύγκριση μεταξύ των τεχνολογιών μπαταρίας και υπερπυκνωτών [14]

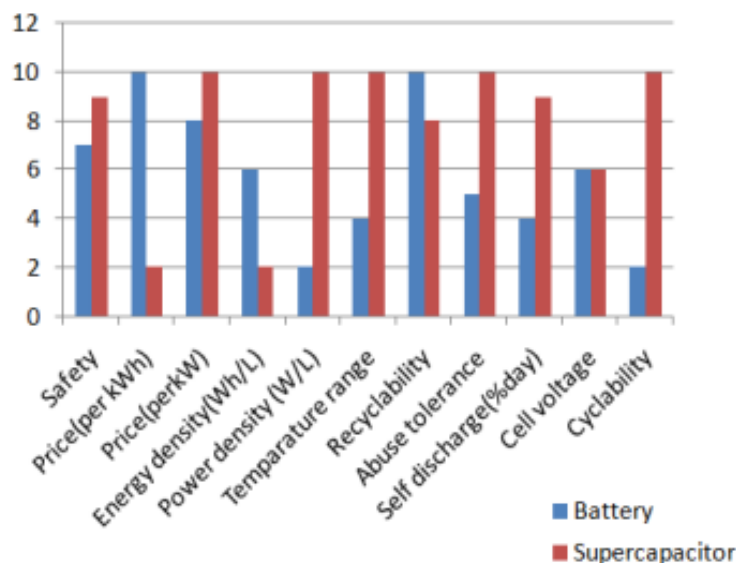
Feature	Li-Ion Battery	Supercapacitor
Gravimetric energy (Wh kg ⁻¹)	100–265	4–10
Volumetric energy (Wh L ⁻¹)	220–400	4–14
Power density (W kg ⁻¹)	1,500	3,000–40,000
Voltage of a cell (V)	3.6	2.7–3
ESR (mΩ)	500	40–300
Efficiency (%)	75–90	98
Cyclability (nb charges)	500–1,000	500,000–20, 000,000
Life (years)	5–10	10–15
Self-discharge (% per month)	2	40–50 (descending)
Charge temperature	0 to 45°C	-40 to 65°C
Discharge temperature	-20C~60°C	-40 to 65°C
Deep discharge pb	yes	no
Overload pb	yes	no
Risk of explosion	yes	no
Charging 1 cell	complex	easy
Charging cells in series	complex	complex
Voltage on discharge	stable	decreasing
cost (\$) per kW h	235–1,179	11,792

Πίνακας 1 Προδιαγραφές Μπαταρίας έναντι Υπερπυκνωτή [15]

Εδώ είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι πηγές αυτές εξακολουθούν να βρίσκονται σε εξέλιξη και αντιμετωπίζουν προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν πριν από την εμπορευματοποίηση και την ευρεία υιοθέτηση στα ηλεκτρικά οχήματα. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, με την αποδεδειγμένη αξιοπιστία τους και την καθιερωμένη υποδομή τους, θα συνεχίσουν να κυριαρχούν στην αγορά ηλεκτρικών οχημάτων βραχυπρόθεσμα. Ωστόσο, οι συνεχιζόμενες προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση αυτών των αναδυόμενων τεχνολογιών και την απελευθέρωση των δυνατοτήτων τους να φέρουν επανάσταση στο τοπίο αποθήκευσης ενέργειας για τα ηλεκτρικά οχήματα στο μέλλον.

Το υβριδικό σύστημα χρησιμοποιείται πλέον πρακτικά σε αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα (EV). Τα ειδικά χαρακτηριστικά ενός υπερπυκνωτή (SC) μπορούν να βοηθήσουν τη συστοιχία μπαταριών Στο ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Ζαχαριάς Κωνσταντίνος

Εικόνα 4 απεικονίζονται οι διαφορές μεταξύ μπαταριών μολύβδου-οξέος και SC, όπου μπορούν να αξιοποιηθούν συμπληρωματικά χαρακτηριστικά [16].



Εικόνα 4: Σύγκριση μπαταρίας λιθίου και υπερπυκνωτών σε μεταβλητές ποιότητας όπως η πυκνότητα ισχύος [16]

2.2.3. Αρχιτεκτονική Δομή Ηλεκτρικού Οχήματος

Η αρχιτεκτονική δομή ενός ηλεκτρικού οχήματος (EV) έχει εξελιχθεί σημαντικά από τις πρώτες απόπειρες μετατροπής συμβατικών οχημάτων σε ηλεκτρικά. Αρχικά, η μετατροπή αυτή γινόταν αντικαθιστώντας τον κινητήρα εσωτερικής καύσης με έναν ηλεκτροκινητήρα και τη δεξαμενή καυσίμου με συσσωρευτή (μπαταρία). Ωστόσο, αυτή η λύση παρουσίαζε προβλήματα όπως αυξημένο βάρος, χαμηλή ευελιξία και χαμηλή απόδοση. Έτσι, εγκαταλείφθηκε υπέρ πιο σύγχρονων και ειδικά σχεδιασμένων ηλεκτρικών οχημάτων.

Στα σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα, ο σχεδιασμός [19] λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες της ηλεκτροκίνησης και διαμορφώνει τη δομή με βάση νέες και έξυπνες λύσεις. Η βασική δομή περιλαμβάνει τα εξής κύρια εξαρτήματα:

1. Συσσωρευτής (Battery): Η πηγή ενέργειας του οχήματος, η οποία αποθηκεύει την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία του.

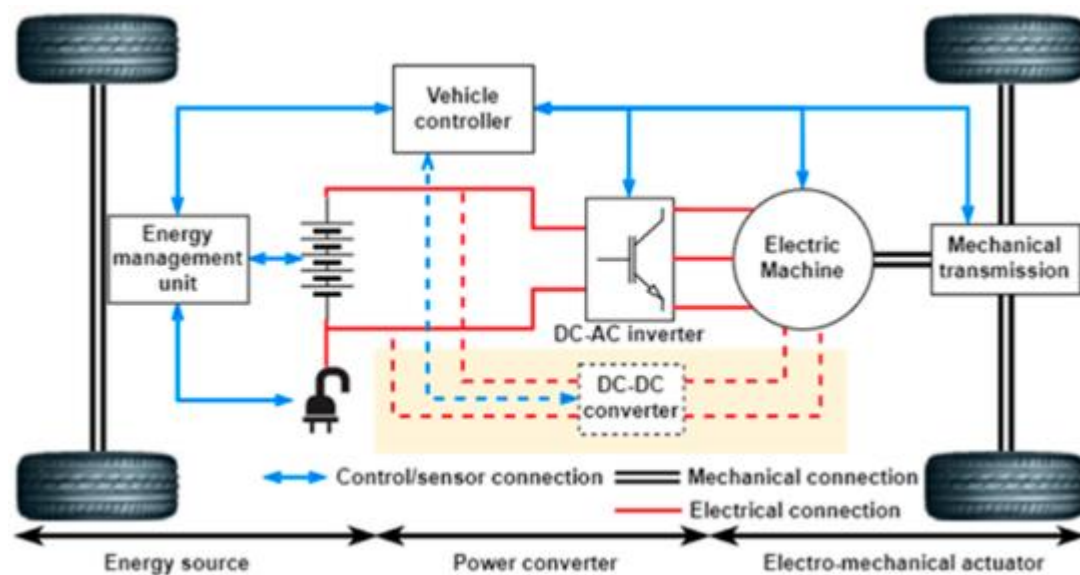
2. Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος (Power Electronic Converter): Αυτό το εξάρτημα μετατρέπει και ελέγχει την ενέργεια που παρέχεται στον κινητήρα, επιτρέποντας την ομαλή λειτουργία και τη ρύθμιση της απόδοσης του συστήματος.

3. Ηλεκτροκινητήρας (Motor, M): Ο βασικός μηχανισμός που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική για την κίνηση του οχήματος.

4. Αισθητήρες ροπής και ταχύτητας (Torque and Speed Sensors): Αυτοί οι αισθητήρες παρακολουθούν και ρυθμίζουν την απόδοση του κινητήρα, εξασφαλίζοντας ότι το όχημα λειτουργεί με τη μέγιστη απόδοση.

5. Ηλεκτρονικός ελεγκτής (Controller): Ο εγκέφαλος του συστήματος που συντονίζει τη λειτουργία όλων των εξαρτημάτων, διασφαλίζοντας τη σωστή κατανομή της ενέργειας και την απόδοση του οχήματος.

Χάρη σε αυτούς τους ηλεκτροκινητήρες, τα EV θεωρούνται οχήματα μηδενικών εκπομπών (ZEV - Zero Emissions Vehicle), καθώς δεν εκπέμπουν ρύπους κατά τη λειτουργία τους. Η σύγχρονη αρχιτεκτονική των ηλεκτρικών οχημάτων είναι σχεδιασμένη με τρόπο που να εξασφαλίζει υψηλή απόδοση, ευελιξία και ασφάλεια.



Εικόνα 5 Αρχιτεκτονική δομή ηλεκτρικού οχήματος[19]

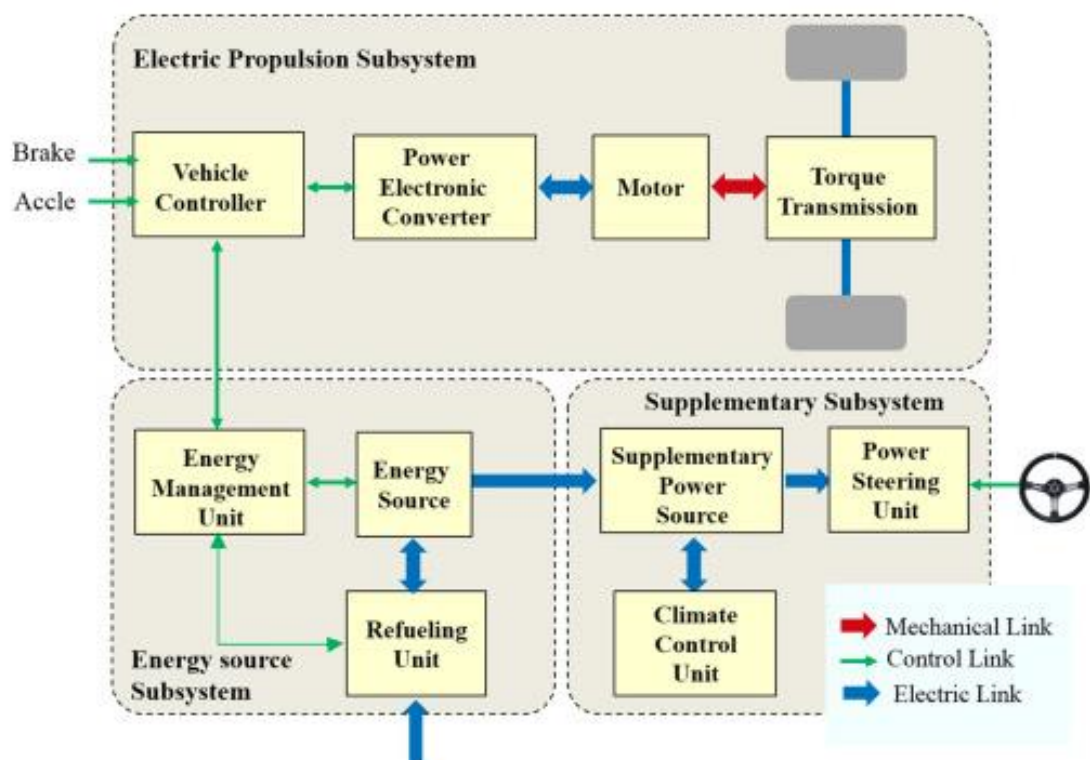
Η μονάδα ισχύος (drive train) του οχήματος αποτελείται από τρία μεγάλα υποσυστήματα: i) την ηλεκτρική προώθηση (Electric Propulsion), ii) την πηγή ενέργειας (Energy Source) και iii) τα βοηθητικά συστήματα (Auxiliary). Το σύστημα ηλεκτρικής προώθησης αποτελείται από έναν ελεγκτή του οχήματος (Vehicle Controller), έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος (Electronic Power Converter), τον ηλεκτροκινητήρα (Electric Motor), το σύστημα μηχανικής μετάδοσης (Mechanical Transmission) και τους τροχούς (Wheel). Το υποσύστημα πηγής ενέργειας περιλαμβάνει την πηγή ενέργειας (Energy Source), τη μονάδα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management Unit) και τη μονάδα επαναφόρτισης ενέργειας (Energy Refueling Unit) που φαίνεται στην Εικόνα 6. Τέλος, το βοηθητικό υποσύστημα αποτελείται από τη μονάδα οδήγησης ισχύος (Power Steering Unit), τη μονάδα κλιματικού ελέγχου (Temperature Control Unit) και τη μονάδα βοηθητικής υποστήριξης (Auxiliary Power Supply).



Εικόνα 6 Ένα BMW i3 που φορτίζει σε κλασική πρίζα των 230V

Με βάση τις εισόδους που δέχεται από τα πεντάλ επιτάχυνσης και πέδησης, ο ελεγκτής του οχήματος παρέχει κατάλληλα σήματα ελέγχου στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος ο οποίος ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Ζαχαριάς Κωνσταντίνος

λειτουργεί για να ελέγχει τη ροή ισχύος ανάμεσα στον ηλεκτροκινητήρα και την πηγή ενέργειας. Η αντίστροφη ροή ισχύος οφείλεται στην εφαρμογή της αναγεννητικής πέδησης (regenerative braking) και αυτή η επαναπαραγόμενη ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στην πηγή ενέργειας, με την προϋπόθεση ότι η τελευταία είναι σε θέση να την αποθηκεύσει. Οι περισσότεροι συσσωρευτές EV όπως και οι υπερπυκνωτές έχουν την ικανότητα να δέχονται εύκολα την ενέργεια αυτή. Η μονάδα διαχείρισης ενέργειας συνεργάζεται με τον ελεγκτή του οχήματος για να ελέγξει τη διαδικασία της αναγεννητικής πέδησης και την ανάκτηση ενέργειας. Επίσης, συνεργάζεται με τη μονάδα επαναφόρτισης ενέργειας για να ελέγξει τη μονάδα επαναφόρτισης καθώς και τη δυνατότητα χρήσης της πηγής ενέργειας. Η μονάδα βοηθητικής υποστήριξης παρέχει την απαιτούμενη ισχύ στα απαιτούμενα επίπεδα τάσης για όλες τις βοηθητικές διατάξεις του οχήματος. Η διασύνδεση αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 7 παρακάτω.



Εικόνα 7 Διασύνδεση συστημάτων σε ένα ηλεκτρικό όχημα [20]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : (Υβριδικά συστήματα)

Οι αρχιτεκτονικές ηλεκτρικών υβριδικών συστημάτων μετάδοσης (Hybrid Electric Transmission Systems) αναφέρονται στους διάφορους τρόπους με τους οποίους μπορούν να συνδυαστούν ηλεκτρικά και μηχανικά μέρη για την παροχή κίνησης σε ένα όχημα. Τα υβριδικά οχήματα συνδυάζουν έναν παραδοσιακό κινητήρα εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engine - ICE) με έναν ή περισσότερους ηλεκτροκινητήρες για να βελτιώσουν την απόδοση καυσίμου, να μειώσουν τις εκπομπές ρύπων και να προσφέρουν καλύτερη απόδοση.

3.1 Τύποι αρχιτεκτονικών υβριδικών συστημάτων

3.1.1 Σειριακή Υβριδική Αρχιτεκτονική (Series Hybrid)

Η σειριακή υβριδική αρχιτεκτονική (Series Hybrid) είναι μια από τις κύριες μορφές υβριδικών συστημάτων μετάδοσης κίνησης που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά υβριδικά οχήματα. Σε αυτή την αρχιτεκτονική, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engine - ICE) δεν συνδέεται απευθείας με τους τροχούς. Αντίθετα, ο ρόλος του κινητήρα καύσης είναι να παράγει ηλεκτρική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την κίνηση του οχήματος μέσω ηλεκτροκινητήρων.

Κύρια στοιχεία της σειριακής υβριδικής αρχιτεκτονικής

1. Κινητήρας Εσωτερικής Καύσης (ICE)

- Λειτουργεί ως γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Συνήθως λειτουργεί σε ένα σταθερό εύρος στροφών, όπου η αποδοτικότητά του είναι η υψηλότερη.

2. Γεννήτρια

- ⇒ Συνδέεται με τον κινητήρα καύσης και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια.
- ⇒ Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είτε αποθηκεύεται στην μπαταρία είτε τροφοδοτεί άμεσα τους ηλεκτροκινητήρες.

3. Ηλεκτροκινητήρες

- Παρέχουν την κύρια κίνηση στους τροχούς του οχήματος.
- Μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα από τον κινητήρα καύσης, χρησιμοποιώντας την ενέργεια που αποθηκεύεται στην μπαταρία.

4. Μπαταρία Υψηλής Τάσης

- Αποθηκεύει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τον κινητήρα καύσης μέσω της γεννήτριας και την ενέργεια που ανακτάται κατά την επιβράδυνση (regenerative braking).

5. Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management System)

- Ελέγχει τη ροή ενέργειας από τον κινητήρα καύσης, τη γεννήτρια, την μπαταρία και τους ηλεκτροκινητήρες, βελτιστοποιώντας την απόδοση και τη χρήση καυσίμου.

Πλεονεκτήματα της Σειριακής Υβριδικής Αρχιτεκτονικής

- Απλή Μηχανική Κατασκευή: Λιγότερες μηχανικές συνδέσεις και εξαρτήματα σε σύγκριση με άλλες υβριδικές αρχιτεκτονικές.

- Σταθερή Λειτουργία του ICE: Ο κινητήρας καύσης μπορεί να λειτουργεί στο βέλτιστο σημείο απόδοσης του, βελτιώνοντας την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων.

- Αποδοτική Χρήση Ενέργειας: Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να διανέμεται αποτελεσματικά ανάλογα με τις ανάγκες του οχήματος.

Μειονεκτήματα της Σειριακής Υβριδικής Αρχιτεκτονικής

- Απώλειες Ενέργειας: Οι πολλαπλές μετατροπές ενέργειας (από μηχανική σε ηλεκτρική και αντίστροφα) μπορεί να προκαλέσουν απώλειες αποδοτικότητας.
- Βάρος και Κόστος: Η ανάγκη για μεγάλη μπαταρία και ισχυρούς ηλεκτροκινητήρες αυξάνει το βάρος και το κόστος του οχήματος.

Παραδείγματα Σειριακών Υβριδικών Οχημάτων

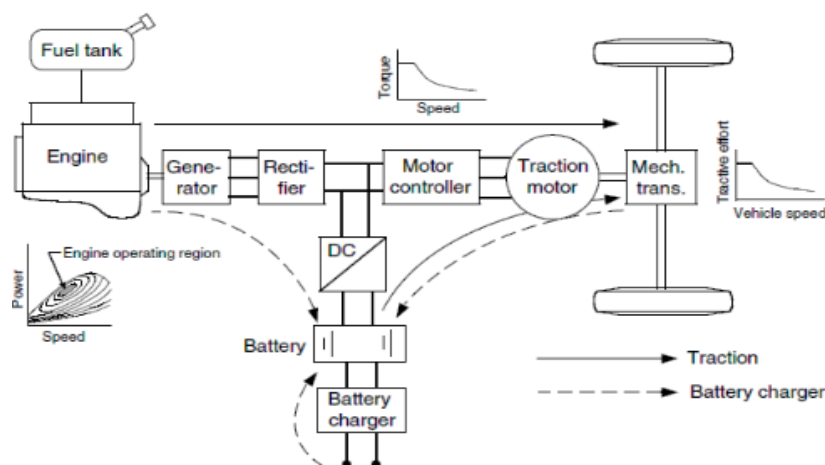
1. BMW i3 (Range Extender)

- Ένα ηλεκτρικό όχημα με έναν μικρό κινητήρα βενζίνης που λειτουργεί ως γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, επεκτείνοντας την εμβέλεια του οχήματος.

2. Chevrolet Volt

- Χρησιμοποιεί έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν η μπαταρία έχει εξαντληθεί, διατηρώντας την κίνηση του οχήματος μέσω ηλεκτροκινητήρων.

Η σειριακή υβριδική αρχιτεκτονική προσφέρει μια αποδοτική λύση για την ενσωμάτωση των πλεονεκτημάτων των ηλεκτρικών οχημάτων με τη δυνατότητα επέκτασης της εμβέλειας μέσω του κινητήρα καύσης, καθιστώντας την κατάλληλη για διάφορες χρήσεις, από αστική οδήγηση μέχρι μεγάλα ταξίδια.



Εικόνα 8 Δομή υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος σειράς [21]

3.1.2 Παράλληλη Υβριδική Αρχιτεκτονική (Parallel Hybrid)

Ένα παράλληλο υβριδικό ηλεκτρικό όχημα (Parallel Hybrid Electric Vehicle - PHEV) συνδυάζει έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engine - ICE) και έναν ή περισσότερους ηλεκτροκινητήρες που μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα ή ταυτόχρονα για την κίνηση του οχήματος. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει την ευελιξία στη χρήση ενέργειας, βελτιστοποιώντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων.

Κύρια στοιχεία της παράλληλης υβριδικής αρχιτεκτονικής

1. Κινητήρας Εσωτερικής Καύσης (ICE)

- Παρέχει κίνηση απευθείας στους τροχούς είτε μόνος του είτε σε συνδυασμό με τον ηλεκτροκινητήρα.
- Συνήθως μικρότερης ισχύος από τα συμβατικά οχήματα, λόγω της υποστήριξης από τον ηλεκτροκινητήρα.

2. Ηλεκτροκινητήρας

- ⇒ Παρέχει κίνηση απευθείας στους τροχούς και μπορεί να υποβοηθά τον κινητήρα καύσης κατά την επιτάχυνση ή σε άλλες απαιτητικές συνθήκες.
- ⇒ Μπορεί επίσης να λειτουργεί ως γεννήτρια για την ανάκτηση ενέργειας κατά την επιβράδυνση (regenerative braking).

3. Μπαταρία Υψηλής Τάσης

- ο Αποθηκεύει την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται από τον ηλεκτροκινητήρα.
- ο Φορτίζεται μέσω της ανάκτησης ενέργειας και από τον κινητήρα καύσης μέσω της γεννήτριας.

4. Μετάδοση (Transmission)

- ο Συνήθως ένας συμβατικός μηχανικός μεταδότης που συνδέει τόσο τον κινητήρα καύσης όσο και τον ηλεκτροκινητήρα με τους τροχούς.

5. Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management System)

- Ελέγχει την κατανομή της ισχύος μεταξύ του κινητήρα καύσης και του ηλεκτροκινητήρα, βελτιστοποιώντας την αποδοτικότητα και τις εκπομπές.

Πλεονεκτήματα της Παράλληλης Υβριδικής Αρχιτεκτονικής

- Βελτιωμένη Αποδοτικότητα Καυσίμου: Η χρήση του ηλεκτροκινητήρα μειώνει την κατανάλωση καυσίμου, ιδίως κατά την αστική οδήγηση και τις χαμηλές ταχύτητες.
- Μειωμένες Εκπομπές Ρύπων: Η συνδυασμένη χρήση του ηλεκτροκινητήρα και του κινητήρα καύσης μειώνει τις εκπομπές ρύπων σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα.
- Καλύτερη Απόδοση: Ο ηλεκτροκινητήρας μπορεί να προσφέρει πρόσθετη ισχύ κατά την επιτάχυνση, βελτιώνοντας την απόδοση του οχήματος.
- Ανάκτηση Ενέργειας: Η ανάκτηση ενέργειας κατά την επιβράδυνση ή το φρενάρισμα βελτιώνει την αποδοτικότητα του συστήματος.

Παραδείγματα Παράλληλων Υβριδικών Οχημάτων

1. Toyota Prius

- Ένα από τα πιο γνωστά υβριδικά οχήματα, χρησιμοποιεί ένα σύστημα που συνδυάζει τον κινητήρα καύσης με τον ηλεκτροκινητήρα για βελτιωμένη αποδοτικότητα και μειωμένες εκπομπές.



Εικόνα 9 Toyota prius 2024

2. Honda Insight

5. Μετάδοση (Transmission)

- Συνδυάζει τη δυνατότητα μηχανικής σύνδεσης του κινητήρα καύσης και των ηλεκτροκινητήρων με τους τροχούς.

6. Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management System)

- Ελέγχει και συντονίζει τη λειτουργία του κινητήρα καύσης, της γεννήτριας, της μπαταρίας και των ηλεκτροκινητήρων, βελτιστοποιώντας την απόδοση και τη χρήση καυσίμου.

Πλεονεκτήματα της μικτής υβριδικής αρχιτεκτονικής

- Βελτιστοποίηση Απόδοσης: Μπορεί να λειτουργεί είτε ως σειριακό είτε ως παράλληλο υβριδικό, ανάλογα με τις συνθήκες οδήγησης, βελτιστοποιώντας την αποδοτικότητα.

- Ευελιξία στη Χρήση Ενέργειας: Μπορεί να επιλέξει την πιο αποδοτική πηγή ενέργειας (ηλεκτρική ή καύσιμη) ανάλογα με τις ανάγκες.

- Καλύτερη Κατανάλωση Καυσίμου: Συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των σειριακών και παράλληλων συστημάτων για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.

- Μειωμένες Εκπομπές Ρύπων: Η δυνατότητα λειτουργίας με ηλεκτρική ενέργεια μειώνει τις εκπομπές ρύπων σε αστικές συνθήκες οδήγησης.

Μειονεκτήματα της μικτής υβριδικής αρχιτεκτονικής

- Πολυπλοκότητα Συστήματος: Η συνδυασμένη λειτουργία και των δύο αρχιτεκτονικών απαιτεί περίπλοκα συστήματα ελέγχου και διαχείρισης ενέργειας.

- Υψηλότερο Κόστος: Το σύνθετο σύστημα μετάδοσης και η ανάγκη για περισσότερα εξαρτήματα αυξάνουν το κόστος κατασκευής και συντήρησης.

Παραδείγματα μικτών υβριδικών οχημάτων

1. Toyota Prius

- Ένα από τα πιο γνωστά παραδείγματα, το Toyota Prius χρησιμοποιεί μια μικτή υβριδική αρχιτεκτονική που του επιτρέπει να λειτουργεί τόσο ως σειριακό όσο και ως παράλληλο υβριδικό όχημα.

2. Ford Fusion Hybrid

- Συνδυάζει έναν κινητήρα βενζίνης με έναν ηλεκτροκινητήρα για να προσφέρει βελτιωμένη αποδοτικότητα καυσίμου και μειωμένες εκπομπές ρύπων.

3. Hyundai Ioniq Hybrid

- Ένα άλλο παράδειγμα μικτής υβριδικής αρχιτεκτονικής, το οποίο προσφέρει υψηλή αποδοτικότητα καυσίμου και ευελιξία στη χρήση ενέργειας. Η μικτή ή συνδυασμένη υβριδική αρχιτεκτονική αποτελεί μια προηγμένη λύση για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης και αποδοτικότητας στα υβριδικά οχήματα, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των σειριακών και παράλληλων υβριδικών συστημάτων.

3.1.4. Υβριδικά με Επέκταση Εμβέλειας (Range-Extended Hybrids)

Τα υβριδικά με επέκταση εμβέλειας (Range-Extended Hybrids) είναι μια κατηγορία υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων που βασίζονται κυρίως στην ηλεκτρική κίνηση, αλλά διαθέτουν επίσης έναν μικρό κινητήρα εσωτερικής καύσης για να επεκτείνουν την εμβέλεια του οχήματος όταν η μπαταρία εξαντληθεί. Σε αυτή την αρχιτεκτονική, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης δεν παρέχει άμεσα κίνηση στους τροχούς, αλλά λειτουργεί ως γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Κύρια στοιχεία της αρχιτεκτονικής υβριδικών με επέκταση εμβέλειας

1. Ηλεκτροκινητήρας

- Παρέχει την κύρια κίνηση στους τροχούς του οχήματος.
- Χρησιμοποιεί την ενέργεια που αποθηκεύεται στην μπαταρία για να κινήσει το όχημα.

2. Μπαταρία Υψηλής Τάσης

- Αποθηκεύει την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται από τον ηλεκτροκινητήρα.
- Φορτίζεται μέσω εξωτερικής πηγής (πρίζα, σταθμός φόρτισης) και μέσω της ανάκτησης ενέργειας κατά την επιβράδυνση.

3. Κινητήρας Εσωτερικής Καύσης (ICE)

- Συνήθως μικρού μεγέθους και λειτουργεί ως γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όταν η μπαταρία εξαντληθεί.
- Δεν συνδέεται απευθείας με τους τροχούς.

4. Γεννήτρια

- Συνδέεται με τον κινητήρα καύσης και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είτε τροφοδοτεί άμεσα τον ηλεκτροκινητήρα είτε φορτίζει την μπαταρία.

5. Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management System)

- Ελέγχει και συντονίζει τη λειτουργία της μπαταρίας, του ηλεκτροκινητήρα και του κινητήρα καύσης, βελτιστοποιώντας την απόδοση και τη χρήση ενέργειας.

Πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής υβριδικών με επέκταση εμβέλειας

- Μεγάλη Εμβέλεια: Η χρήση του κινητήρα καύσης ως γεννήτριας επιτρέπει την επέκταση της εμβέλειας του οχήματος πέρα από τη χωρητικότητα της μπαταρίας.
- Αποδοτικότητα Καυσίμου: Ο κινητήρας καύσης μπορεί να λειτουργεί στο βέλτιστο σημείο απόδοσής του, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων.
- Χαμηλότερες Εκπομπές Ρύπων: Η κύρια κίνηση γίνεται μέσω του ηλεκτροκινητήρα, μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων σε αστικές περιοχές.
- Ευελιξία στη Χρήση Ενέργειας: Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί το όχημα ως πλήρως ηλεκτρικό για μικρές διαδρομές και να βασίζεται στον κινητήρα καύσης για μεγαλύτερες αποστάσεις.

Μειονεκτήματα της αρχιτεκτονικής υβριδικών με επέκταση εμβέλειας

- Πολυπλοκότητα Συστήματος: Η προσθήκη του κινητήρα καύσης και της γεννήτριας αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος.

- Υψηλότερο Κόστος: Το κόστος κατασκευής και συντήρησης μπορεί να είναι υψηλότερο σε σύγκριση με τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα.

- Βάρος: Το πρόσθετο βάρος του κινητήρα καύσης και της γεννήτριας μπορεί να επηρεάσει την αποδοτικότητα και την απόδοση του οχήματος.

3.2 Πηγές Ενέργειας στα Ηλεκτρικά και Υβριδικά Συστήματα

Οι πηγές ενέργειας στα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα περιλαμβάνουν διάφορες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση και την παροχή ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, οι υπερπυκνωτές και οι κυψέλες καυσίμου. Κάθε μία από αυτές τις πηγές έχει μοναδικά χαρακτηριστικά και εφαρμογές.

Πηγές ενέργειας στα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα

3.2.1 Μπαταρίες

Οι μπαταρίες είναι η κύρια πηγή ενέργειας για τα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. Οι πιο κοινές τεχνολογίες μπαταριών περιλαμβάνουν:

- Μπαταρίες Λιθίου-Ιόντων (**Lithium-Ion Batteries**)

Specific Energy	90 Wh/kg
Energy density	153 Wh/L
Specific Power	300 W/kg
Nominal cell voltage	3.5 V
Amphour efficiency	Very good
Internal resistance	Very low
Commercially available	Only in very small cells not suitable for electric vehicles
Operating temperature	Ambient
Self-discharge	Very low, ~ 10% per month
Number of life cycles	>1000
Recharge time	2-3 h

Πίνακας 2 :Ονομαστικά μεγέθη μπαταριών ιόντων λιθίου[21]

A. Χαρακτηριστικά: Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, μακρά διάρκεια ζωής, καλή απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης.

B. Χρήση: Ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. Παράδειγμα: Tesla Model S, Nissan Leaf.

Μπαταρίες Νικελίου-Μεταλλικού Υδριδίου (**Nickel-Metal Hydride Batteries**)

a. Χαρακτηριστικά: Ανθεκτικές, ασφαλείς, χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τις μπαταρίες λιθίου-ιόντων.

b. Χρήση: Υβριδικά οχήματα. Παράδειγμα: Παλαιότερα μοντέλα Toyota Prius.

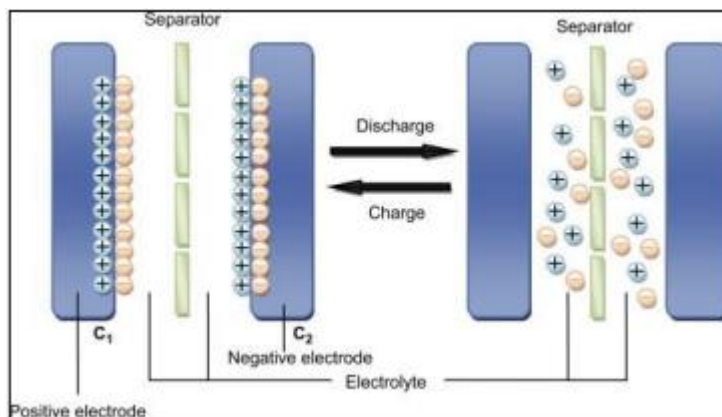
Μπαταρίες Στερεάς Κατάστασης (**Solid-State Batteries**)

i. Χαρακτηριστικά: Υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, βελτιωμένη ασφάλεια, ταχύτερη φόρτιση.

ii. Χρήση: Πειραματικά και μελλοντικά ηλεκτρικά οχήματα.

3.2.2 Υπερπυκνωτές (Supercapacitors)

Οι υπερπυκνωτές είναι μια τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιείται σε ορισμένες εφαρμογές ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων. Η Εικόνα 11 δείχνει τις βασικές αρχές ενός τυπικού υπερπυκνωτή SC. Ο SC αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη, έναν διαχωριστή και θετικά και αρνητικά ηλεκτρόδια (συλλέκτες ρεύματος). Ο SC κατασκευάζεται με τον ίδιο τρόπο όπως οι ηλεκτροχημικές μπαταρίες, με τα δύο ηλεκτρόδια βυθισμένα στο διάλυμα του ηλεκτρολύτη και διαχωρισμένα από ένα στρώμα που ονομάζεται διαχωριστής. Τα ηλεκτρόδια προστατεύονται από μία μεμβράνη στον διαχωριστή, η οποία επιτρέπει μόνο την κινητικότητα των ιόντων και όχι την ηλεκτρική τους σύνδεση[13].



Εικόνα 11 Βασικές αρχές ενός τυπικού υπερπυκνωτή[13]

Χαρακτηριστικά:

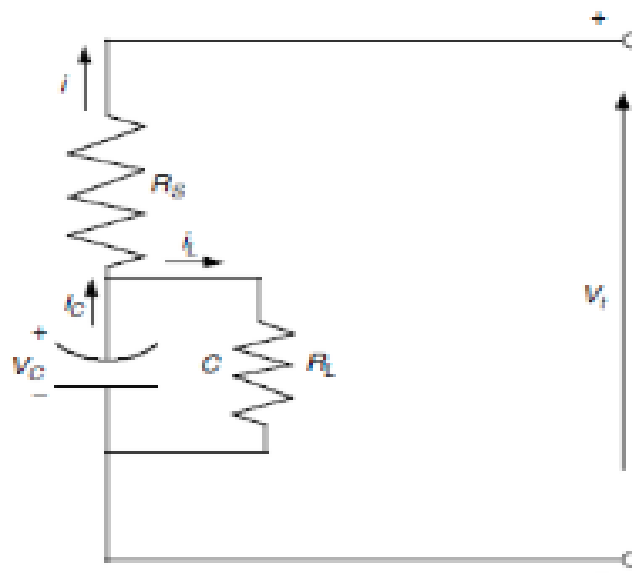
- ⇒ Υψηλή Ισχύς: Μπορούν να παρέχουν και να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας πολύ γρήγορα.
- ⇒ Μεγάλη Αντοχή: Έχουν πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης σε σύγκριση με τις μπαταρίες.
- ⇒ Χαμηλή Ενεργειακή Πυκνότητα: Αποθηκεύουν λιγότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου/βάρους σε σύγκριση με τις μπαταρίες.
- ⇒ Χρήση: Συμπληρωματική χρήση σε συνδυασμό με μπαταρίες για την παροχή άμεσης ισχύος και την απορρόφηση ενέργειας κατά την ανάκτηση ενέργειας από το φρενάρισμα.
- ⇒ Παράδειγμα Χρήσης: Ορισμένα υβριδικά λεωφορεία και οχήματα πόλης που απαιτούν γρήγορη εκφόρτιση και φόρτιση.

Comparisons of capacitors and Supercapacitors

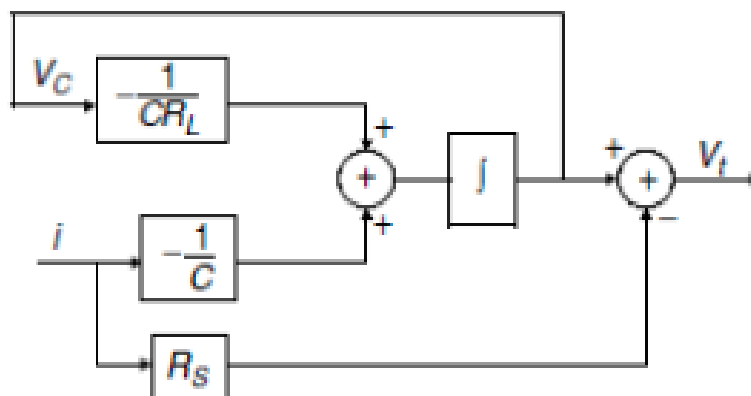
capacitor	supercapacitor
Low breakdown voltage rating	High breakdown voltage rating
Slow charging and discharging	Fast charging and discharging
Low energy density	High energy density
Long life cycle	Longer life cycle
	Higher superior efficiency

Πίνακας 3: Σύγκριση απλού πυκνωτή και υπερπυκνωτή [23]

Τόσο στους supercapacitors όσο και στους ultracapacitors, τα δύο ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από έναν διαχωριστή ως εξής: Διαχωρίζονται με πορώδη, διηλεκτρικό, εξαιρετικά λεπτό διαχωριστή. Αυτό τα εμποδίζει να κινηθούν. Αυτός ο μικρός διαχωριστής και η μεγάλη επιφάνεια του ηλεκτρολύτη δίνουν στον υπερπυκνωτή την ικανότητα να επιτρέπει στον υπερπυκνωτή να έχει υψηλή χωρητικότητα. Ωστόσο, αυτός ο λεπτός μονωτής είναι ο λόγος για τον οποίο η τάση του υπερπυκνωτή του στοιχείου πρέπει να διατηρείται χαμηλή. Αυτό συμβαίνει επειδή οι υψηλές τάσεις οδηγούν σε ηλεκτρικά τόξα μεταξύ των πλακών.



Εικόνα 12 Ισοδύναμο κύκλωμα υπερπυκνωτή[23]



Εικόνα 13 Μπλοκ διάγραμμα του μοντέλου του υπερπυκνωτή[23]

3.2.3 Κυψέλες Καυσίμου Υδρογόνου (Hydrogen Fuel Cells)

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω χημικής αντίδρασης μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου. Χαρακτηριστικά:

- 1) Μηδενικές Εκπομπές: Η μόνη εκπομπή είναι το νερό
- 2) Γρήγορη Αναπλήρωση Καυσίμου: Γεμίζουν γρήγορα σε σύγκριση με τη φόρτιση μπαταριών.

- 3) Υψηλή Ενεργειακή Πυκνότητα: Μπορούν να παρέχουν μεγαλύτερη αυτονομία σε σχέση με τις μπαταρίες.
- 4) Χρήση: Ηλεκτρικά οχήματα που απαιτούν μεγάλη αυτονομία. Παράδειγμα: Toyota Mirai, Hyundai Nexa.

Συνδυασμοί Πηγών Ενέργειας στα Υβριδικά Οχήματα

Τα υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν συνδυασμούς πηγών ενέργειας για να μεγιστοποιήσουν την αποδοτικότητα και την αυτονομία τους. Οι πιο συνηθισμένοι συνδυασμοί περιλαμβάνουν:

- 1) Υβριδικά με Βενζινοκινητήρα και Μπαταρίες (Hybrid Electric Vehicles - HEVs):
- 2) Συνδυασμός: Βενζινοκινητήρας και μπαταρία (συνήθως λιθίου-ιόντων ή νικελίου-μεταλλικού υδριδίου).
- 3) Χρήση: Toyota Prius, Ford Fusion Hybrid.

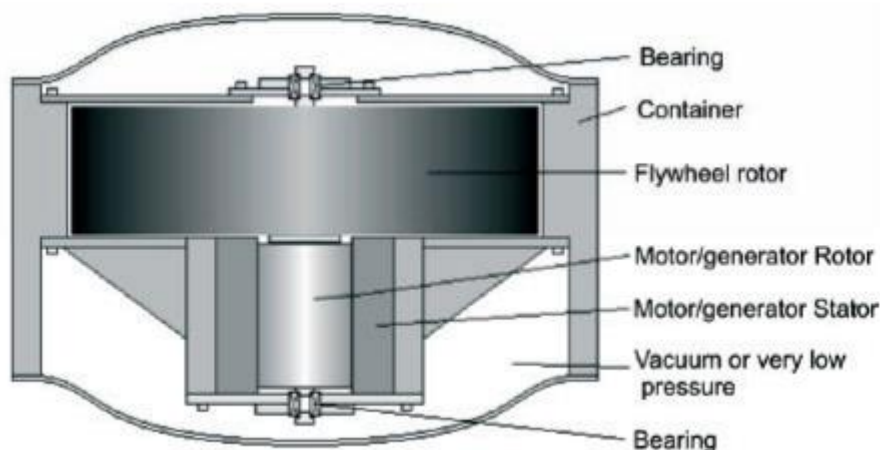
Φορτιζόμενα Υβριδικά (Plug-in Hybrid Electric Vehicles - PHEVs):

- Συνδυασμός: Βενζινοκινητήρας και μεγαλύτερη μπαταρία λιθίου-ιόντων που μπορεί να φορτιστεί εξωτερικά.
- Χρήση: Chevrolet Volt, Toyota Prius Plug-in.

Υβριδικά με Επέκταση Εμβέλειας (Range-Extended Electric Vehicles - REEVs):

Συνδυασμός: Ηλεκτροκινητήρας με μπαταρία και μικρός βενζινοκινητήρας που λειτουργεί ως γεννήτρια.

- Χρήση: BMW i3 (Range Extender), Chevrolet Volt.

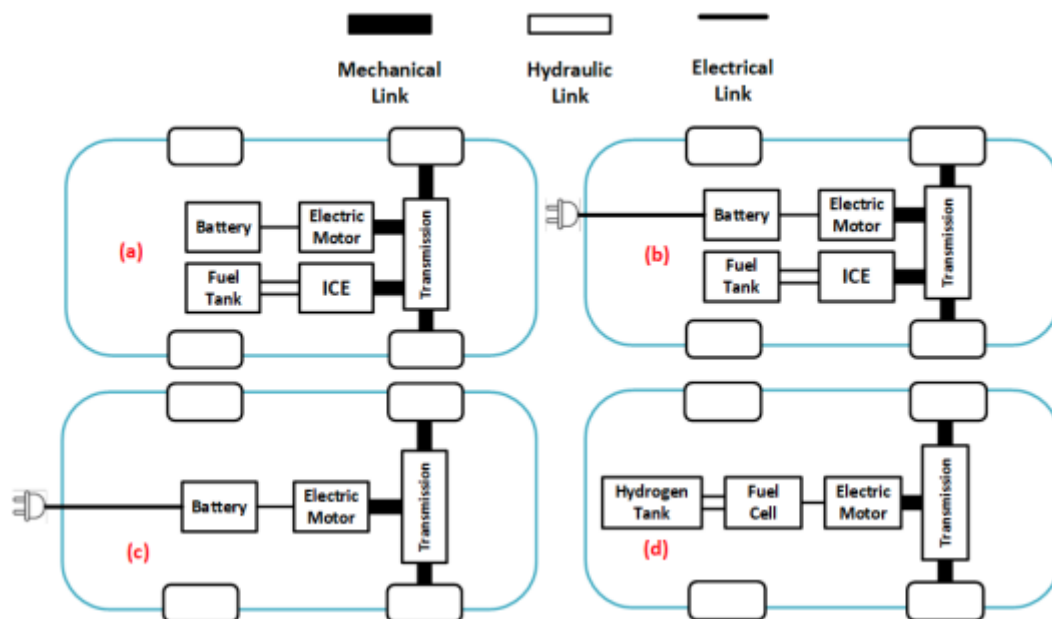


Εικόνα 14 Βασική δομή ενός τυπικού συστήματος σφονδύλου[24]

3.3 Χαρακτηριστικά και Τοπολογίες Ηλεκτρικών και Υβριδικών Οχημάτων

Υπάρχουν πολλοί τύποι ηλεκτρικών οχημάτων (EVs), οι οποίοι κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον μετατροπέα ενέργειας που χρησιμοποιείται για την προώθηση του οχήματος (δηλαδή, κινητήρας εσωτερικής καύσης - ICE ή ηλεκτροκινητήρας - EM), την πηγή ενέργειας (όπως μπαταρία, κυψέλη καυσίμου ή βενζίνη), και το αν φορτίζεται από εξωτερική πηγή (π.χ. σταθμός φόρτισης ή οικιακός

φορτιστής) [25]. Μια σύντομη εξήγηση αυτών των τύπων παρουσιάζεται στις παρακάτω υποενότητες. Η βασική δομή των διαφορετικών τύπων EVs εμφανίζεται στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15: Βασική δομή των διαφορετικών τύπων ηλεκτρικών οχημάτων (EVs)

Στην εικόνα παρουσιάζονται α) Υβριδικό Ηλεκτρικό Όχημα (HEV)· (b) Υβριδικό Ηλεκτρικό Όχημα με δυνατότητα φόρτισης (PHEV)· (c) Ηλεκτρικό Όχημα με Μπαταρία (BEV)· και (d) Ηλεκτρικό Όχημα με Κυψέλες Καυσίμου (FCEV).[26]

3.3.1 Battery Electric Vehicle (BEV)

Το BEV αναμένεται να κυριαρχήσει στην αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) με τις μελλοντικές προόδους στην τεχνολογία μπαταριών και τη μείωση του κόστους. Το BEV περιέχει μόνο έναν ηλεκτροκινητήρα (EM) που τροφοδοτείται από μπαταρία και δεν διαθέτει κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE). Η ηλεκτρική αυτονομία εξαρτάται από τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του τύπου είναι ότι δεν παράγει τοπικές εκπομπές ρύπων, κάτι που είναι εξαιρετικά σημαντικό στις μεγάλες πόλεις. Υπάρχουν πολλές διαμορφώσεις αυτού του τύπου[27] ανάλογα με τα σχέδια των διαφορετικών εταιρειών, αλλά η βασική διαμόρφωση και τα κύρια εξαρτήματα φαίνονται στην Εικόνα 16 c.

Η μπαταρία φορτίζεται από το δίκτυο διανομής μέσω διαφορετικών τύπων φορτιστών EV. Επιπλέον, κατά την επιβράδυνση και το φρενάρισμα του EV, ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια και παράγει ηλεκτρική ενέργεια που φορτίζει την μπαταρία. Αυτό ονομάζεται αναγεννητική πέδηση, η οποία χρησιμοποιείται επίσης σε άλλα δημόσια ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς, όπως τα μετρό και τα τραμ. Για να επιτραπεί η αναγεννητική πέδηση, χρησιμοποιείται ένας αμφίδρομος μετατροπέας DC/AC. Αυτός επιτρέπει τη ροή της ηλεκτρικής ενέργειας από την μπαταρία στον AC κινητήρα κατά την οδήγηση και από τον AC κινητήρα στην μπαταρία κατά το φρενάρισμα [28,27]. Η κύρια πρόκληση για το BEV είναι ο μεγάλος χρόνος φόρτισης και ο περιορισμός της δημόσιας υποδομής φόρτισης. Αυτό το ζήτημα θα αντιμετωπιστεί στο εγγύς μέλλον με την πρόοδο της τεχνολογίας μπαταριών, η οποία θα επεκτείνει την ηλεκτρική αυτονομία του οχήματος πριν χρειαστεί

επαναφόρτιση. Επιπλέον, η ευρεία ανάπτυξη δημόσιων σταθμών ταχείας φόρτισης θα μειώσει το άγχος των ιδιοκτητών EV σχετικά με την αυτονομία τους. Επιπρόσθετα, στο μέλλον οι κατασκευαστές BEV μπορεί να επιτρέψουν την αντικατάσταση μπαταρίας. Αυτό σημαίνει την αντικατάσταση της άδειας μπαταρίας με μία πλήρως φορτισμένη σε σταθμό αντικατάστασης μπαταριών, κάτι που απαιτεί πολύ λίγο χρόνο. Αυτός ο τύπος EV έχει τη μεγαλύτερη χωρητικότητα μπαταρίας και η φόρτισή του μπορεί να έχει σημαντική αρνητική επίδραση στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, αν δεν διαχειριστεί σωστά. Επιπλέον, η ικανότητά του να παρέχει ηλεκτρικές υπηρεσίες είναι υψηλότερη από άλλους τύπους EV.

3.3.2 Υβριδικό Ηλεκτρικό Όχημα (HEV)

Το HEV είναι παρόμοιο με το όχημα με κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICEV), αλλά διαθέτει μεγαλύτερο ηλεκτροκινητήρα (EM) και μπαταρία. Η μπαταρία μπορεί να φορτιστεί μέσω αναγεννητικής πέδησης και από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE) σε χαμηλά φορτία. Συνήθως, η μπαταρία και ο ηλεκτροκινητήρας κινούν το όχημα σε χαμηλές ταχύτητες, ενώ ο κινητήρας εσωτερικής καύσης το κινεί σε υψηλότερες ταχύτητες. Επιπλέον, ο ηλεκτροκινητήρας μπορεί να υποβοηθήσει τον κινητήρα εσωτερικής καύσης σε υψηλά φορτία, βελτιώνοντας την απόδοση και την αποδοτικότητα του οχήματος. Το HEV έχει χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHGs) και κατανάλωση καυσίμου σε σύγκριση με τα ICEV. Σε αυτόν τον τύπο δεν χρησιμοποιείται φόρτιση από το δίκτυο διανομής μέσω φορτιστή EV [27,28]. Συνεπώς, δεν προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας λόγω φόρτισης της μπαταρίας και δεν μπορεί να παρέχει καμία ηλεκτρική υπηρεσία. Υπάρχουν διάφορες δομές αυτού του τύπου [27]: σειριακές, παράλληλες, σειριακές/παράλληλες, ήπιες και σύνθετες HEV, καθώς και το σειριακό/παράλληλο plug-in υβριδικό ηλεκτρικό όχημα (PHEV), το οποίο εξηγείται στην επόμενη υποενότητα. Η βασική διαμόρφωση για το παράλληλο HEV φαίνεται στην Εικόνα 1α.

3.3.3 Plug-in Υβριδικό Ηλεκτρικό Όχημα (PHEV)

Αυτό είναι ένα HEV, αλλά η μπαταρία του μπορεί να φορτιστεί μέσω αναγεννητικής πέδησης, από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE) και από φορτιστή EV που τροφοδοτείται από το δίκτυο διανομής. Χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ισχύ του ηλεκτροκινητήρα (EM), μικρότερο κινητήρα εσωτερικής καύσης και μεγαλύτερη χωρητικότητα μπαταρίας σε σύγκριση με το HEV, προκειμένου να επεκτείνει την ηλεκτρική αυτονομία. Μπορεί να λειτουργεί σε πλήρως ηλεκτρική λειτουργία, χρησιμοποιώντας μόνο τον ηλεκτροκινητήρα, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHGs). Η χωρητικότητα της μπαταρίας καθορίζει την αυτονομία της ηλεκτρικής λειτουργίας [27,28]. Αυτός ο τύπος συνήθως έχει μικρή χωρητικότητα μπαταρίας. Επομένως, αναμένεται ότι θα έχει περιορισμένη αρνητική επίδραση στο ηλεκτρικό σύστημα ενέργειας. Επιπλέον, η ικανότητά του να παρέχει ηλεκτρικές υπηρεσίες είναι περιορισμένη. Το PHEV μπορεί να έχει οποιαδήποτε υβριδική διαμόρφωση. Η βασική διαμόρφωση για το παράλληλο PHEV φαίνεται στην Εικόνα 1β.

3.3.4 Ηλεκτρικό Όχημα με Κυψέλες Καυσίμου (FCEV)

Το FCEV τροφοδοτείται από ηλεκτροκινητήρα (EM) όπως το BEV, αλλά χρησιμοποιεί μια κυψέλη καυσίμου αντί για μπαταρία. Το όχημα ανεφοδιάζεται με υδρογόνο και η κυψέλη καυσίμου μετατρέπει την χημική ενέργεια του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια που τροφοδοτεί τον κινητήρα του EV. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από ορυκτά καύσιμα όπως το φυσικό αέριο ή μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού. Το FCEV έχει σύντομο χρόνο ανεφοδιασμού όπως τα ICEVs [27,28]. Η βασική διαμόρφωση του FCEV φαίνεται στο Σχήμα 1δ. Μπορεί επίσης να λειτουργεί με συνδυασμό

μπαταρίας και υπερπυκνωτών. Αν δεν χρησιμοποιηθεί μπαταρία, αυτός ο τύπος οχήματος δεν θα έχει καμία επίδραση στο ηλεκτρικό σύστημα, καθώς δεν χρειάζεται ηλεκτρική φόρτιση από το δίκτυο διανομής.

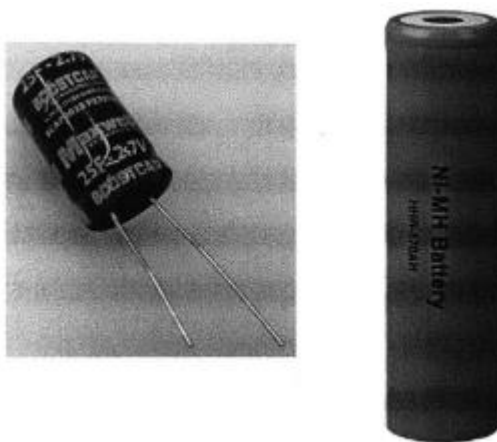
3.4 Πρότυπα και Προδιαγραφές Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) δημιούργησε νέες διαστάσεις στον τομέα των μεταφορών και στην βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας. Προκειμένου να λειτουργήσει ομαλά αυτή η νέα τεχνολογία σε όλο το κόσμο, είναι απαραίτητο να θεσπιστούν και να εγκαθιδριθούν πρότυπα από τους παγκόσμιους ρυθμιστικούς φορείς [29]. Αυτά τα πρότυπα θα αφορούν όλες τις πτυχές του ηλεκτρικού οχήματος καθώς και το σύστημα που το περιβάλλει. Μπορούμε λοιπόν να τα χωρίσουμε σε τρεις κατηγορίες: 1) Πρότυπα εξαρτημάτων, 2) Πρότυπα συστημάτων ηλεκτρικής οδικής ολοκλήρωσης (EVGI), 3) Πρότυπα ασφαλείας. Τα πρότυπα των συστημάτων ηλεκτρικής οδικής ολοκλήρωσης αφορούν την διαδικασία φόρτισης/εκφόρτισης με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [11-12]. Κατά την διάρκεια φόρτισης/εκφόρτισης από το δίκτυο το EV συμπεριφέρεται σαν ενεργειακός πόρος (DER). Έτσι το όχημα πρέπει να ακολουθεί και το πρότυπο (EVGI) καθώς και το (DER). Οι κύριοι οργανισμοί που παρέχουν αυτά τα πρότυπα διασύνδεσης είναι το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) καθώς και τα Εργαστήρια Ασφαλειών (UL). Σε αντίθεση τα πρότυπα ασφαλείας και ενσωμάτωσης του EV τα πρότυπα που αφορούν το δίκτυο ορίζονται από πληθώρα οργανισμών. Με τους πιο σημαντικούς να είναι η Εθνική Ένωση Πυροπροστασίας (NFPA) και ο Εθνικός Ηλεκτρικός Κώδικας (NEC), οι οποίοι επικεντρώνονται στα μέτρα ασφαλείας. Στις Ηνωμένες Πολιτείες γίνεται χρήση των πρότυπων SAE και IEEE σε αντίθεση με την Ευρώπη η οποία χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο το πρότυπο IEC. Η Ιαπωνία έχει θεσπίσει το δικό της ξεχωριστό πρότυπο που ονομάζεται CHAdeMO και η Κίνα το Guobiao .

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο : (πείραμα)

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει τις λεπτομέρειες του πειράματος αυτής της έρευνας. Τα πειράματα επικεντρώθηκαν στην εξέταση ενός υβριδικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (ESS) και ενός ESS μόνο με μπαταρία με παλμικά φορτία ρεύματος εκφόρτισης και μέτρησης της απόδοσης φόρτισης του κάθε συστήματος. Η απόδοση φόρτισης ορίζεται ως το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται στο φορτίο ανά μονάδα φόρτισης που αντλείται από την μπαταρία. Αυτές οι αποδόσεις μετρήθηκαν για διάφορα προφίλ παλμών προκειμένου να καθοριστεί ένα μοτίβο που θα μπορούσε να γενικευτεί για σχέδια βασισμένα σε υπερπυκνωτές. Μετά τις μετρήσεις, το κέρδος απόδοσης θα υπολογιστεί με τη σύγκριση του υβριδικού ESS και του ESS μόνο με μπαταρία και θα αποδειχθούν τα πλεονέκτημα των υπερπυκνωτών.

Όλα τα πειράματα χρησιμοποίησαν έναν τύπο μπαταρίας και υπερπυκνωτή. Ο υπερπυκνωτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο Maxwell BCAP0025 με χωρητικότητα 25F και ονομαστική τάση 2,5V. Οι συστοιχίες μπαταριών ήταν πέντε Panasonic Nickel-MetalHydrideHHR379AH ονομαστικής χωρητικότητας 3,5 Ah. Η μπαταρία η οποία ήταν η ίδια για το υβριδικό και μονο μπαταρία σύστημα ESS είχε ονομαστική τάση 6,0 V. Αυτό σήμαινε ότι οι τρεις πυκνωτές έπρεπε να τοποθετηθούν σε σειρά για να διατηρούν τις τάσεις τους εντός της ονομαστικής τιμής. Φωτογραφίες αυτών απεικονίζονται στην εικόνα 16[30] και οι διαστάσεις και οι ηλεκτρικές προδιαγραφές φαίνονται στον πίνακα 4[30-31].



Εικόνα 16 Ο υπερπυκνωτής και η μπαταρία NiMH που χρησιμοποιούνται στο πείραμα [30]

	Ultracapacitor	Battery
Length (mm)	26	67
Diameter (mm)	16	18.2
Nominal Voltage (V)	2.5	1.2
Capacitance (F)	25	-
Capacity (Ah)	-	3.5
Series Cells in ESS	3	5

Πίνακας 4: Προδιαγραφές εξαρτημάτων υπερπυκνωτών και μπαταρίας [30-31]

Ένα μεγάλο μέρος της πειραματικής εγκατάστασης ήταν ο σχεδιασμός και η κατασκευή του φορτίου και ο εξοπλισμός μετρήσεων. Η επιλογή να δημιουργήσουμε εξέδρα δοκιμών ήταν κοστοβορο και όχι τόσο δύσκολο στο να σχεδιαστεί. Υπάρχουν λύσεις μέσω χοριγών που θα επέτρεπαν σε άλλους να το κάνουν αυτό το πείραμα, αλλά όλα έχουν κάποιο κόστος.

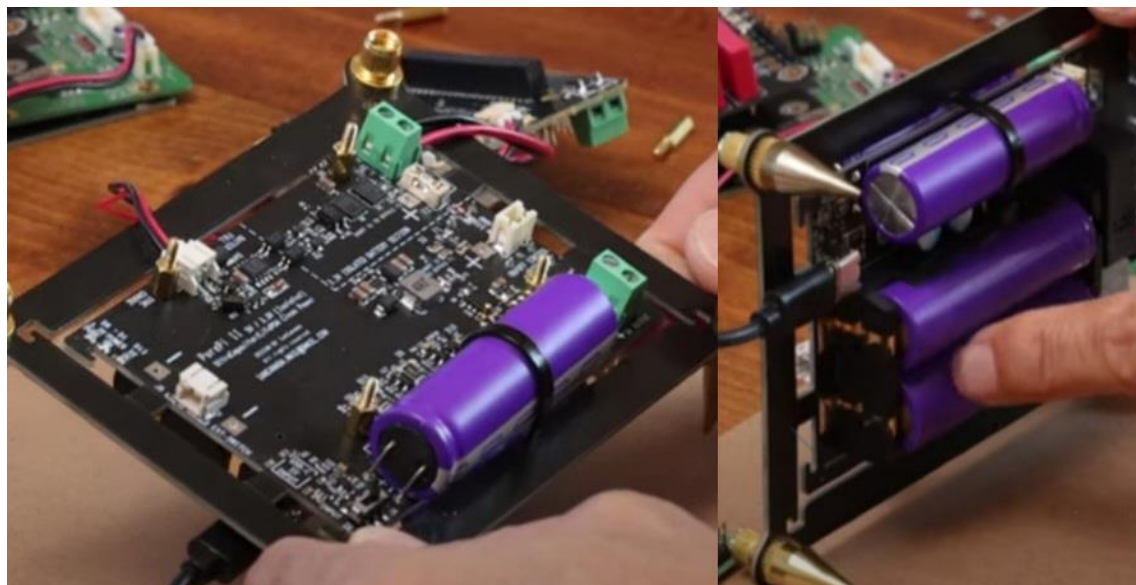
Ο εξοπλισμός σχεδιάστηκε βασισμένος στο Atmel ATmega168 microcontroller για χειρισμό και για μέτρηση. Ο μικροελεγκτής έφερε ένα εσωτερικό ρολόι 8 MHz, το οποίο ήταν σημαντικό, καθώς είχε το τσιπ να εκτελεί πολλές λειτουργίες σε σύντομο χρονικό διάστημα. Αυτές οι λειτουργίες περιλαμβάνονται ρύθμιση του ρεύματος φορτίου, λήψη μετρήσεων και των 8 καναλιών ADC, και κοινοποίηση των δεδομένων εξόδου στον υπολογιστή. Ο υπολογιστής υπήρχε μόνο για να λάβει τα δεδομένα και να τα αποθηκεύσει σε ένα αρχείο κειμένου για μεταγενέστερη επεξεργασία.

Ο ελεγκτής είχε τη δυνατότητα να ρυθμίζει το πλάτος των παλμών και κύκλους λειτουργίας για την εκτέλεση διαφόρων συνθηκών δοκιμής. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να διερευνήσει τα πλεονεκτήματα του υβριδικού υπερπυκνωτή-μπαταρίας στο πιο απλό επίπεδο. Οποιαδήποτε αποτελέσματα από αυτή την έρευνα προορίζονται να λειτουργήσουν ως οδηγός για μελλοντική έρευνα και παρέχει οδηγίες για το πότε και πώς να σχεδιάζεται υπερπυκνωτές σε συστήματα που λειτουργούν με μπαταρίες.

4.1 Σχεδιασμός hardware

Η πειραματική διάταξη έπρεπε να πληροί ορισμένες σημαντικές προδιαγραφές. Πρώτον, έπρεπε να μπορεί να διαχειριστεί τα υψηλά ρεύματα που αναμένονταν στο πείραμα, τα οποία θα μπορούσαν να φτάσουν πάνω από 16 A. Δεύτερον, το μοντέλο έπρεπε να είναι πλήρως ελεγχόμενο ή προγραμματιζόμενο μέσω λογισμικού, ώστε να μπορεί να εκτελεί οποιοδήποτε επιθυμητό σενάριο δοκιμής οποιαδήποτε στιγμή, με τη δυνατότητα προσθήκης νέων σεναρίων δοκιμών. Τρίτον, έπρεπε να είναι σε θέση να μετρά συνεχώς τις σημαντικές τάσεις και ρεύματα καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Τέλος, η διάταξη έπρεπε να μπορεί να μεταδίδει αυτά τα δεδομένα σε υπολογιστή για περαιτέρω ανάλυση. Αντί να αγοραστεί μια ενεργή πηγή ρεύματος και μια μονάδα συλλογής δεδομένων για ενσωμάτωση σε ένα σύστημα, αποφασίστηκε να σχεδιαστεί μια προσαρμοσμένη πλακέτα για να καλύψει όλες αυτές τις απαιτήσεις.

Ο μικροελεγκτής ήταν τοποθετημένος στο κέντρο του σχεδίου και έλεγχε όλα τα μέρη της πλακέτας. Ο μικροελεγκτής επικοινωνούσε με ένα ψηφιακό ποτενσιόμετρο (Maxim MAX5402) μέσω ενός ψηφιακού διαύλου ενιαίας περιφερειακής διεπαφής (SPI) για τον έλεγχο του ρεύματος που εισέρχεται ή εξέρχεται από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (ESS) και παρήχθησαν τα κατάλληλα αναλογικά σήματα. Αυτά τα αναλογικά σήματα επισημαίνονται ως Vcharge και Vdischarge. Τα τελικά αποτελέσματα επιδόσεων βασίζονται σε δεδομένα που συλλέχθηκαν με τη μέτρηση των τάσεων των κόμβων του κυκλώματος υψηλού ρεύματος. Ωστόσο, αυτές οι τάσεις δεν μπορούσαν να διαβαστούν απευθείας από τον ADC επειδή ήταν εκτός του εύρους μέτρησης 0-3 V. Ως εκ τούτου, το σήμα έπρεπε να κλιμακωθεί κατάλληλα μέσω ενός κυκλώματος ενίσχυσης με έναν επιχειρησιακό ενισχυτή πριν φτάσει στον ADC των 10 bit στην πλακέτα του μικροελεγκτή. Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στην εικόνα 17.



Εικόνα 17 Πειραματική διάταξη

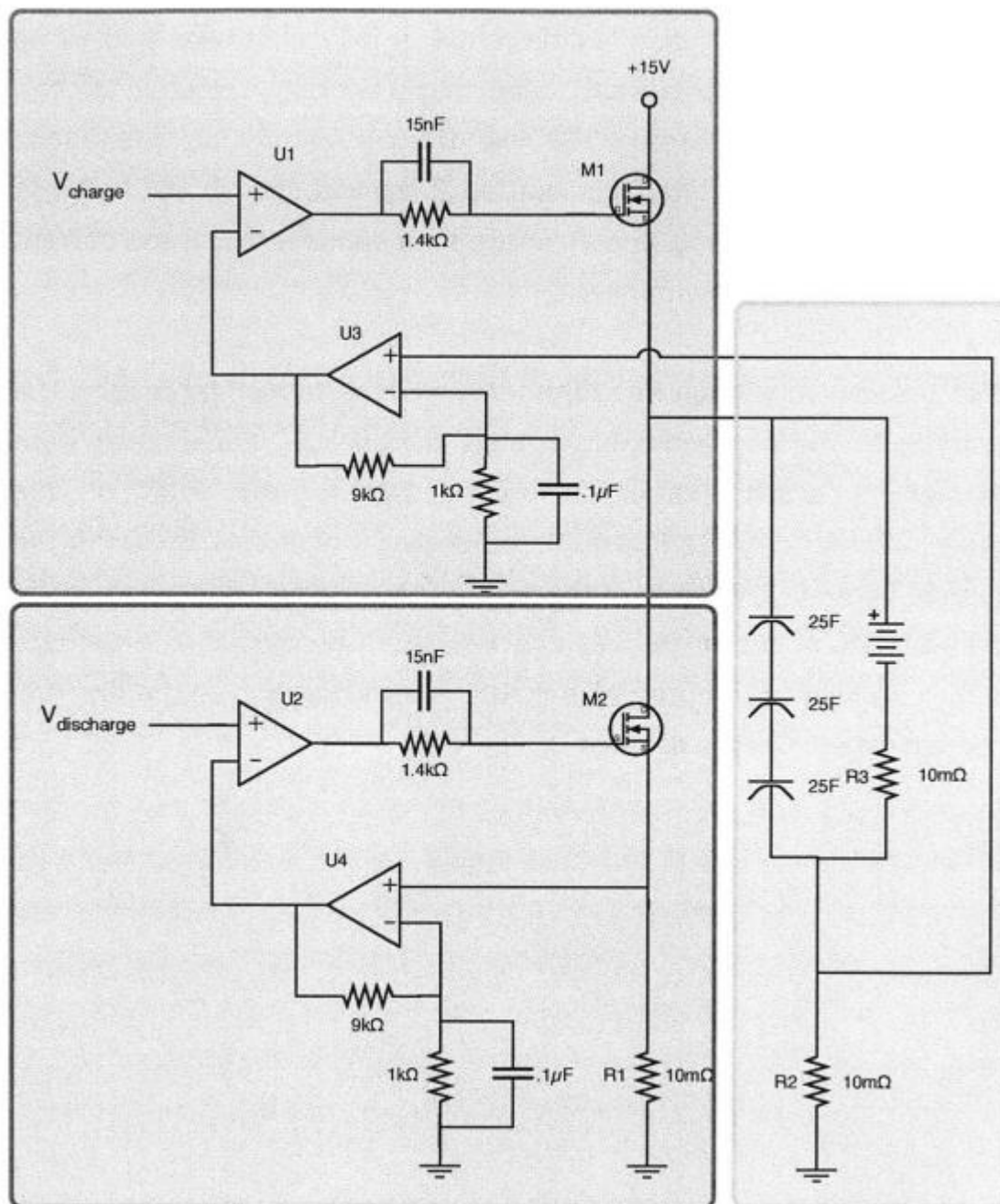
Το κύκλωμα έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ακριβή έλεγχο των ρευμάτων του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας στην εξέδρα δοκιμών. Η ανάλυση του κυκλώματος χωρίζεται σε τρία μέρη:

1. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (δεξιά, με πράσινη επισήμανση)
2. Το κύκλωμα εκφόρτισης (κάτω αριστερά, με μπλε επισήμανση)
3. Το κύκλωμα φόρτισης (πάνω αριστερά, με πορτοκαλί επισήμανση)

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να διαμορφωθεί ως σύστημα μόνο μπαταρίας ή ως υβριδικό σύστημα αποτελούμενο από μπαταρία και υπερπυκνωτή, ανάλογα με την προσθήκη ή την αφαίρεση ενός από τους υπερπυκνωτές. Το κύκλωμα εκφόρτισης αποτελούνταν από έναν βρόχο ανάδρασης που λειτουργούσε ως πηγή ρεύματος ελεγχόμενης απότηντάσης. Η είσοδος στο U_2 , $V_{discharge}$, ήταν μια τάση από 0 έως 2,5V. Το σήμα εξόδου ήταν η τάση πάνω στην $R1$. Το ρεύμα εκφόρτισης από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας δίνεται από την εξίσωση (8).

$$I_{out} = 10 * V_{discharge} \quad (8)$$

Η διαδρομή ανάδρασης περιλάμβανε έναν πολλαπλασιαστή 10x για να μειώσει το σφάλμα μετατόπισης στο U_4 , καθώς και για να μειώσει την επίδραση του σφάλματος μετατόπισης τάσης στη λειτουργία του κυκλώματος. Οι πυκνωτές και οι επιπλέον αντιστάσεις στον βρόχο ανάδρασης πρόσθεσαν μηδενικά σημεία για να αυξήσουν τη σταθερότητα του βρόχου και να αποτρέψουν τις ταλαντώσεις. Το κύκλωμα φόρτισης λειτουργούσε με τις ίδιες ακριβώς αρχές, με τη διαφορά ότι ο βρόχος ανάδρασης χρησιμοποιούσε την αντίσταση $R2$ αντί για την $R1$ και τροφοδοτούσε ρεύμα στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (ESS), αντί να απορροφά ρεύμα από αυτό. Η αντίσταση $R3$ προστέθηκε ως αντίσταση αίσθησης ρεύματος για να επιτρέπει στο σύστημα να μετρά το ρεύμα της μπαταρίας στο υβριδικό σενάριο.

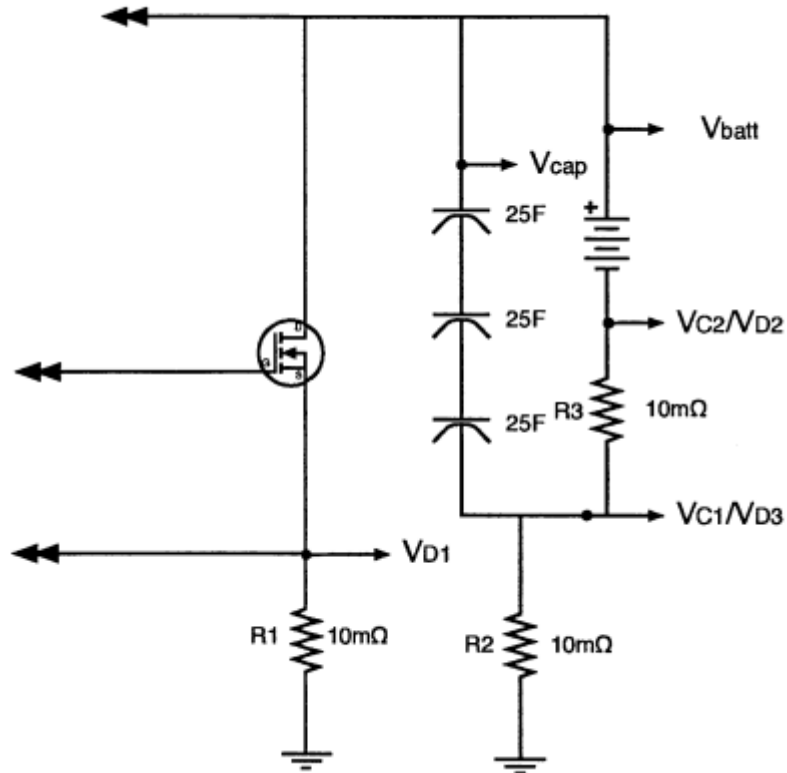


Εικόνα 18 Σύστημα ελέγχου της διάταξης

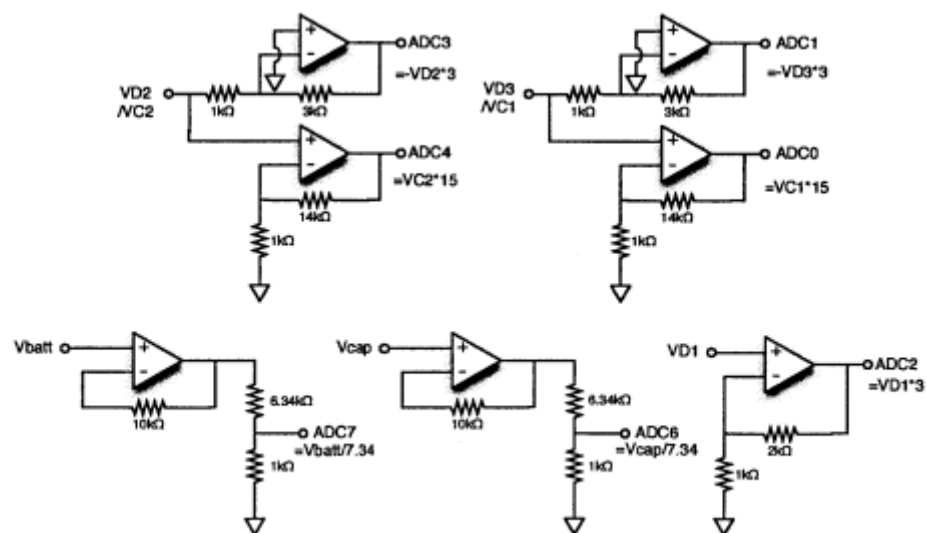
Με τον σχεδιασμό του κυκλώματος υψηλού ρεύματος ολοκληρωμένο, έπρεπε να επιλεγεί ένας μικροελεγκτής για τον έλεγχο του ρεύματος. Ο μικροελεγκτής που επιλέχθηκε για αυτήν την πλακέτα ήταν ο Atmel ATmega168, με βασικά χαρακτηριστικά έναν εσωτερικό χρονιστή 8MHz, διεπαφή SPI και έναν 8-κάναλο, 10-bit ADC. Αυτά ήταν σημαντικά για την ακριβή και έγκαιρη συλλογή όλων των δεδομένων και τον έλεγχο του ρεύματος.

Οι μετρήσεις ρεύματος και τάσης πραγματοποιούνταν διαβάζοντας τις τάσεις στους βασικούς κόμβους που επισημαίνονται στην Εικόνα 19. Κάθε σήμα περνούσε από ένα κύκλωμα κλιμάκωσης πριν φτάσει στον ADC του μικροελεγκτή. Σκοπός του κυκλώματος κλιμάκωσης ήταν να προσαρμόσει την τάση στο εύρος 0-3 V που απαιτεί ο ADC. Αρνητικές τάσεις, όπως αυτές των κόμβων VD2 και VD3 κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας, έπρεπε να αντιστραφούν ώστε να

αποφευχθεί ο κορεσμός του ADC στο κατώτερο όριο. Το κύκλωμα κλιμάκωσης παρουσιάζεται αναλυτικά στην Εικόνα 21.



Εικόνα 19 Κόμβοι μέτρησης ADC (Αναλογικός-Ψηφιακός Μετατροπέας).

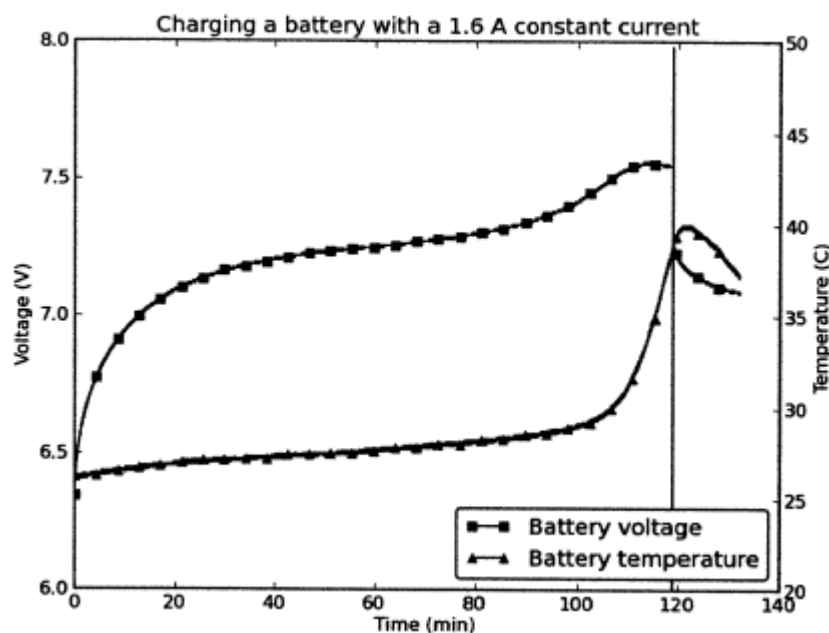


Εικόνα 20 Κυκλώματα κλιμάκωσης με τελεστικούς ενισχυτές και οι σταθερές κλιμάκωσής τους.

Ένας ακροδέκτης ADC (ADC5) ήταν αφιερωμένος σε έναν αισθητήρα θερμοκρασίας LM35, με σκοπό τη μέτρηση της θερμοκρασίας της μπαταρίας. Ο LM35 καλύφθηκε με θερμική πάστα και τοποθετήθηκε με ταινία μεταξύ δύο από τα πέντε κελιά της μπαταρίας, ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη θερμική επαφή. Η θερμοκρασία της μπαταρίας χρησιμοποιήθηκε για δύο σκοπούς: ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Ζαχαριάς Κωνσταντίνος

ασφάλεια και φόρτιση της μπαταρίας. Πρώτον, η θερμοκρασία της μπαταρίας παρακολουθούνταν συνεχώς, ανεξάρτητα από το τι έκανε ο ελεγκτής τη στιγμή εκείνη. Εάν η θερμοκρασία της μπαταρίας έφτανε ή ξεπερνούσε τους 50 °C, τότε το ρεύμα διακόπτονταν και όλα τα πειράματα τερματίζονταν. Οι δοκιμές που εκτελούνταν αυτόματα διαδοχικά θα περίμεναν επίσης μέχρι η θερμοκρασία της μπαταρίας να πέσει κάτω από τους 25 °C πριν ξεκινήσει μια νέα δοκιμή, έτσι ώστε οι μπαταρίες να ξεκινούν σχετικά κρύες και στην ίδια θερμική κατάσταση.

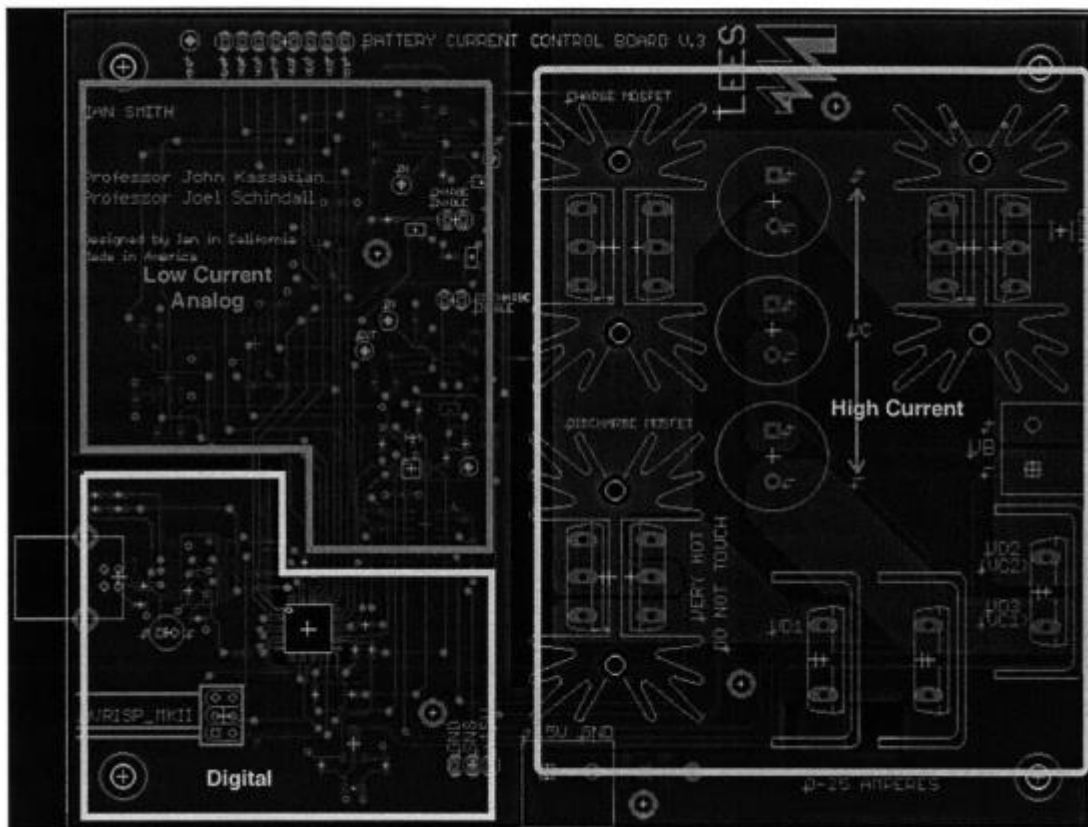
Σε αντίθεση με το πρωτόκολλο εκφόρτισης, το οποίο εκτελούνταν για καθορισμένο χρονικό διάστημα ή αριθμό παλμών, το πρωτόκολλο φόρτισης της μπαταρίας περιλάμβανε έναν βρόχο ανάδρασης firmware που βασιζόταν στη θερμοκρασία της μπαταρίας για να καθορίσει πότε η φόρτιση ήταν πλήρης. Ο βασικός δείκτης δεν ήταν η συγκεκριμένη θερμοκρασία - αν και ήταν προγραμματισμένο να διακόπτεται αν η θερμοκρασία της μπαταρίας ξεπερνούσε τους 50 °C - αλλά η παράγωγος της θερμοκρασίας φόρτισης. Το φύλλο δεδομένων της μπαταρίας ανέφερε ότι η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη όταν η θερμοκρασία της αυξάνεται με ρυθμό ίσο ή μεγαλύτερο από 1 °C/λεπτό. Έτσι, το πρωτόκολλο φόρτισης μέτρησε τη θερμοκρασία της μπαταρίας κάθε λεπτό και εάν είχε αυξηθεί τουλάχιστον κατά 1 °C από την προηγούμενη μέτρηση, τότε θα σταματούσε τη φόρτιση της μπαταρίας και θα την άφηνε να κρυώσει πίσω στους 25 °C. Ένα διάγραμμα της τάσης και της θερμοκρασίας της μπαταρίας κατά τη διάρκεια ενός κύκλου φόρτισης απεικονίζεται στην Εικόνα 21.



Εικόνα 21 Τάση και θερμοκρασία μπαταρίας κατά τη διάρκεια μιας φόρτισης με σταθερό ρεύμα.

Η διάταξη της πλακέτας (PCB) απεικονίζεται στην Εικόνα 22 παρακάτω. Είναι μια τετραπλή πλακέτα με σήματα στις εξωτερικές στρώσεις, γείωση στη δεύτερη στρώση και +15 V και ψηφιακό +5 V να χωρίζουν την τρίτη στρώση. Τα κυκλώματα κλιμάκωσης ADC και ελέγχου ρεύματος στην αναλογική ενότητα χαμηλού ρεύματος τοποθετήθηκαν κυρίως στην κάτω στρώση, χρησιμοποιώντας επιφανειακά εξαρτήματα ώστε να διατηρηθεί η περιοχή της πλακέτας εντός των ορίων του κατασκευαστή. Έπρεπε να δοθεί προσοχή για τη σωστή διάταξη της επιφάνειας γείωσης και την απομόνωση του κυκλώματος υψηλού ρεύματος από το αναλογικό κύκλωμα χαμηλού ρεύματος και το ψηφιακό κύκλωμα. Σημειώστε την κοπή στην επιφάνεια γείωσης κοντά στον συνδετήρα 15V στην κάτω πλευρά της πλακέτας - αυτή η κοπή διασφάλισε ότι το υψηλό ρεύμα δεν θα κυκλοφορούσε μέσα από την ευαίσθητη επιφάνεια αναλογικής ή ψηφιακής γείωσης στην αριστερή πλευρά της

πλακέτας. Οι επιφάνειες υψηλού ρεύματος διατηρήθηκαν όλες στην επάνω στρώση και σχεδιάστηκαν να είναι όσο το δυνατόν πιο φαρδιές για να κρατήσουν την αντίσταση γραμμής χαμηλή. Αυτές οι πτυχές ήταν κρίσιμες για το σχεδιασμό, καθώς η υψηλή αντίσταση γραμμής ή η μετατόπιση της επιφάνειας γείωσης θα επηρέαζαν άμεσα την τάση στα 10Ω αισθητήρια και τις μετρήσεις του ADC.



Εικόνα 22 Η διάταξη PCB της διάταξης δοκιμής.

Η ψηφιακή διάταξη περιλάμβανε υποστήριξη για τον μικροελεγκτή, καθώς και τα μέσα για τον προγραμματισμό της πλακέτας και την επικοινωνία με τον υπολογιστή. Ο βος ακροδέκτης επέτρεπε την επαναπρογραμματισμένη πλακέτα εντός του κυκλώματος, χρησιμοποιώντας τον προγραμματιστή Atmel AVRISP MkII. Η σειριακή επικοινωνία με τον υπολογιστή διευκολυνόταν από το τσιπ FTDI FT232R USB-to-UART. Η αρνητική πλευρά αυτού του σχεδιασμού ήταν η προσθήκη θορύβου γείωσης όταν το USB ήταν συνδεδεμένο με τον υπολογιστή. Αυτός ο θόρυβος αντισταθμίστηκε κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης, αλλά θα μπορούσε να είχε αποφευχθεί εντελώς. Αυτό θα συζητηθεί εκτενέστερα στο κεφάλαιο με τα συμπεράσματα, με προτάσεις για την εξάλειψη αυτού του προβλήματος.

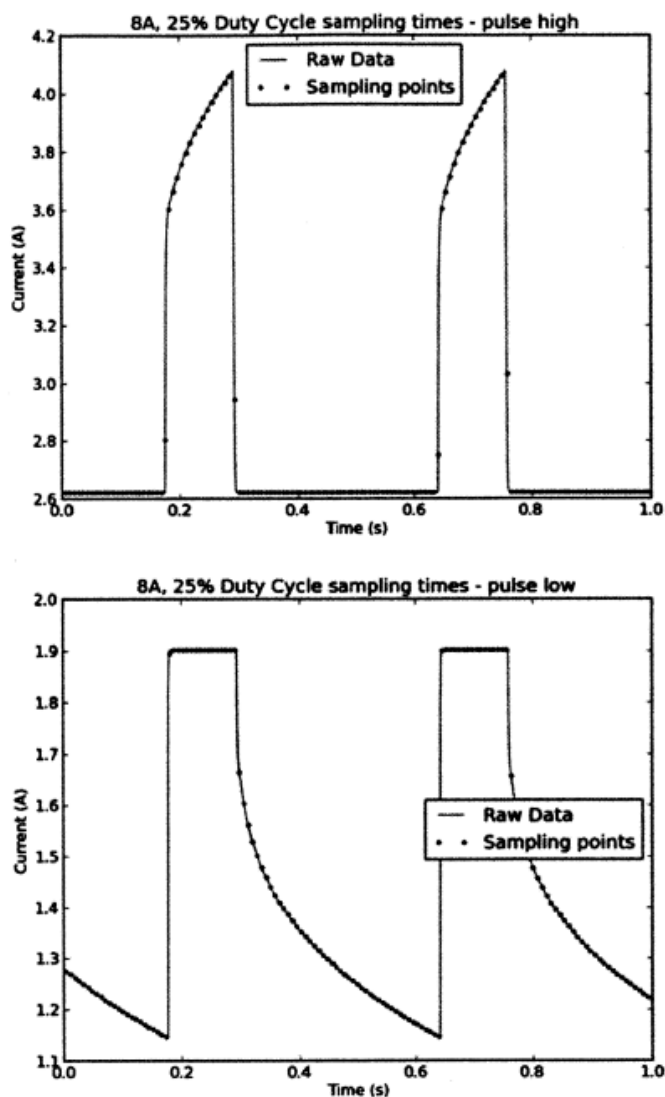
4.2 Calibration και επεξεργασία δεδομένων

Η διάταξη δοκιμής εξήγαγε τα ακατέργαστα δεδομένα ADC στον υπολογιστή, ο οποίος τα αποθήκευε σε αρχείο κειμένου για μεταγενέστερη επεξεργασία. Όπως κάθε άλλο όργανο μέτρησης, αυτά τα δεδομένα έπρεπε να βαθμονομηθούν συγκρίνοντάς τα με μια γνωστή αξιόπιστη πηγή των ίδιων μετρήσεων. Η βαθμονόμηση ήταν εξαιρετικά σημαντική πτυχή της μέτρησης, καθώς χωρίς αυτή δεν υπήρχε εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα που προέρχονταν από τα δεδομένα.

Η διαδικασία βαθμονόμησης περιλάμβανε τη ρύθμιση των διαθέσιμων μεταβλητών των αλγορίθμων επεξεργασίας δεδομένων ώστε να ταιριάζουν με μια γνωστή επιθυμητή έξοδο. Αυτές οι ρυθμίσεις υπολόγιζαν μικρές παραλλαγές μεταξύ των εξαρτημάτων, τις ανοχές των συσκευών και τη διάταξη της πλακέτας. Η διάταξη δοκιμής διαχειριζόταν 16 A ρεύματος στην πλακέτα· οποιαδήποτε επιπλέον αντίσταση που εισάγονταν από τις διαδρομές θα μπορούσε να προκαλέσει ελαφρές αποκλίσεις στις μετρήσεις του ADC. Αυτά τα σφάλματα μπορούσαν να αθροιστούν όταν η διάταξη δοκιμής έπαιρνε χιλιάδες μετρήσεις κατά τη διάρκεια ενός πειράματος. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε για κάθε ένταση ρεύματος - 8 A και 16 A - και για κάθε κύκλο λειτουργίας - 10% και 25%. Η βαθμονόμηση κατά επίπεδο ρεύματος ήταν απαραίτητη, καθώς τα σφάλματα αντίστασης θα επηρέαζαν τις μετρήσεις με μια απόκλιση ανάλογη του φορτίου. Η βαθμονόμηση κατά κύκλο λειτουργίας ήταν ένα επιπλέον μέτρο που ελήφθη για να διασφαλιστεί η ακρίβεια των δεδομένων. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας βαθμονόμησης ήταν μια σειρά πολλαπλασιαστών για κάθε μεταβλητή, που λογιζόταν τις ατέλειες του συστήματος.

Η γνωστή επιθυμητή έξοδος στην προκειμένη περίπτωση καταγράφηκε από έναν βαθμονομημένο παλμογράφο Tektronix DPO 3034. Μετρήσεις λήφθηκαν σε κάθε κόμβο μέτρησης της διάταξης δοκιμής, ενώ η διάταξη εξήγαγε τα δεδομένα της ταυτόχρονα. Έτσι, είχαμε δύο ερμηνείες των ίδιων σημάτων - μία από τον παλμογράφο και άλλη από τη διάταξη δοκιμής. Ένα σημαντικό στοιχείο είναι ότι ο παλμογράφος είχε μόνο τέσσερις κανάλια, αλλά υπήρχαν πέντε μεταβλητές που χρειαζόταν να βαθμονομηθούν: VD, VD2, VD3, Vbatt και Vcap. Έτσι, μια δεύτερη διαδικασία βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε αμέσως μετά την πρώτη για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με τις μεταβλητές που είχαν παραληφθεί. Υποτέθηκε ότι η χωρητικότητα της μπαταρίας ήταν αρκετά υψηλή και ότι η μπαταρία ήταν πάντα φορτισμένη πριν τη βαθμονόμηση, ώστε η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών δοκιμών να είναι αμελητέα.

Ένα ακόμη πρόβλημα που προέκυψε κατά τη διάρκεια των αρχικών δοκιμών βαθμονόμησης ήταν η μεγάλη κλίμακα των τιμών που μπορούσαν να παρατηρηθούν, λόγω της παλμικής φύσης των πειραμάτων. Η ανάλυση, ακόμη και σε λειτουργία 11-bit Hi-Res, για έναν παλμογράφο με 8-δαιρέσεις κάθετη κλίμακα δεν ήταν αρκετά υψηλή όταν έπρεπε να ληφθούν υπόψη όλα τα εύρη τάσης. Η μείωση της κάθετης κλίμακας θα αύξανε την ανάλυση μέτρησης, αλλά θα προκαλούσε κορεσμό του παλμογράφου και οι μετρήσεις θα ήταν άχρηστες. Η λύση ήταν να βαθμονομηθούν οι υψηλές και χαμηλές παλμικές καμπύλες ξεχωριστά. Ένα παράδειγμα αυτού απεικονίζεται στην Εικόνα 23. Τα μπλε σημεία υποδεικνύουν τους χρόνους δειγματοληψίας του προσαρμοσμένου ελεγκτή. Αυτά τα σημεία συγκρίθηκαν με τα ακατέργαστα δεδομένα του ελεγκτή για την βαθμονόμηση.



Εικόνα 23: Παράδειγμα βαθμονόμησης για σενάρια υψηλού και χαμηλού παλμού με 8 A και κύκλο λειτουργίας 25%.

Η δομή των δεδομένων εξόδου από τη διάταξη δοκιμής απεικονίζεται στην Εικόνα 24. Αποτελείται από 11 πεδία δεδομένων, καθένα σε δεκαδική μορφή. Οι πρώτοι 6 αριθμοί αντιπροσωπεύουν τον αριθμό αρχείου, ο οποίος ξεκινά από το 0 και αυξάνεται κατά 1 για κάθε γραμμή που αποστέλλεται στον υπολογιστή. Αυτός ο αριθμός χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση του χρόνου: η περίοδος δειγματοληψίας είναι ακριβώς 7.382 ms, έτσι ο χρόνος από την αρχή είναι ο αριθμός αρχείου πολλαπλασιασμένος με 0.007382.

Το επόμενο πεδίο αντιπροσωπεύει την κατάσταση της διάταξης δοκιμής. Οι καταστάσεις ορίζονται ως εξής:

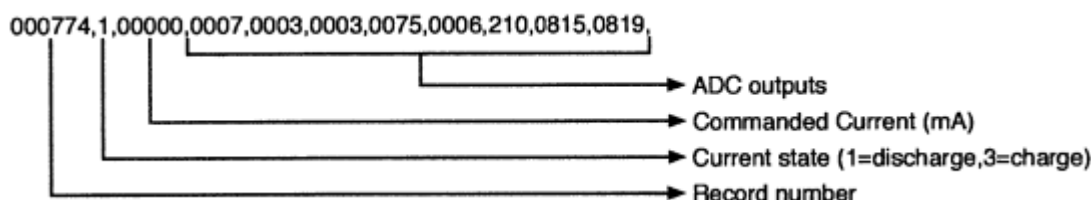
1. Ο ελεγκτής βρίσκεται μεταξύ των παλμών ρεύματος.
2. Ο ελεγκτής εκπέμπει ρεύμα.
3. Ο ελεγκτής φορτίζει τη μπαταρία.
4. Ο ελεγκτής περιμένει να κρυώσει η μπαταρία πριν αρχίσει να τη φορτίζει (περιμένει μέχρι η θερμοκρασία της μπαταρίας να είναι κάτω από 25 °C).
5. Ο ελεγκτής περιμένει να κρυώσει η μπαταρία πριν αρχίσει να την εκφορτίζει (περιμένει μέχρι η θερμοκρασία της μπαταρίας να είναι κάτω από 25 °C).

Το τρίτο πεδίο δεδομένων είναι το μέγεθος του εντοπισμένου ρεύματος από τον ελεγκτή σε εκείνη τη στιγμή. Αυτός ο αριθμός αναφέρεται σε μονάδες mA. Τα επόμενα 8 πεδία δεδομένων

είναι οι αναγνώσεις του 10-bit ADC από κάθε ένα από τα 8 κανάλια. Αντιπροσωπεύονται από αριστερά προς τα δεξιά στην αριθμητική σειρά των καναλιών ADC (ADCO αριστερά, ADC7 δεξιά). Η σειρά είναι ως εξής:

- ADC0 = Vc2
- ADC1 = VD3
- ADC2 = VD
- ADC3 = VD2
- ADC4 = Vc2
- ADC5 = temp
- ADC6 = Vcap
- ADC7 = Vbatt

Το ADC5, που αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία της μπαταρίας, ήταν διαφορετικό από τις άλλες μετρήσεις. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας LM35 που ήταν τοποθετημένος στη μπαταρία ανέφερε μια αναλογική τάση ίση με 10 mV για κάθε απόλυτο βαθμό Κελσίου. Καταγραφόταν μόνο με 3 ψηφία, καθώς οι περιβαλλοντικές συνθήκες ήταν γνωστό ότι δεν θα ξεπερνούσαν τους 99 °C ή θα έπεφταν κάτω από 0 °C, και ο μικροελεγκτής αυτόματα αφαιρούσε το ρεύμα φόρτισης/εκφόρτισης από τη μπαταρία εάν η θερμοκρασία της αυξανόταν στους 50 °C ή και πάνω.



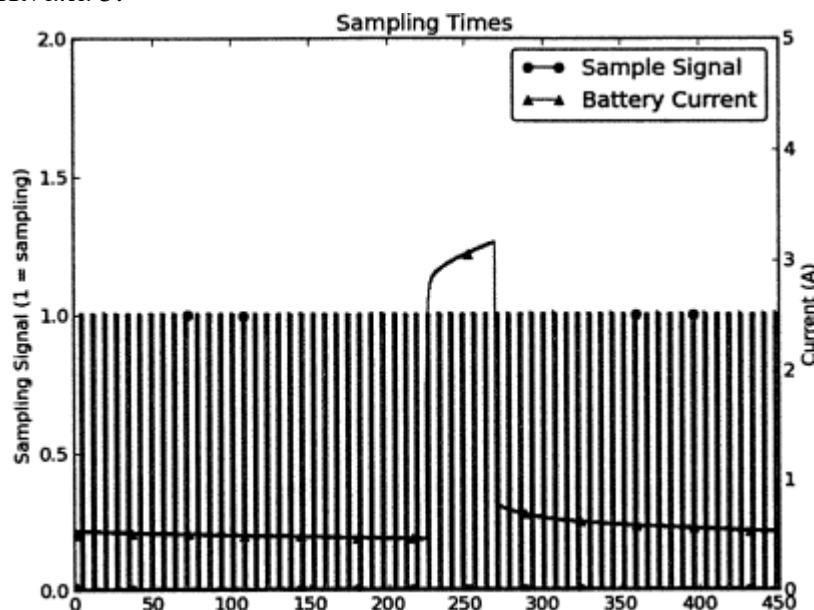
Εικόνα 24 Αλληλουχία επεξεργασίας δεδομένων

Ένα δείγμα ροής ακατέργαστων δεδομένων από τη διάταξη δοκιμής, που ελήφθη κατά τη διάρκεια ενός παλμού ρεύματος 16 A με κύκλο λειτουργίας 25%, απεικονίζεται στον Πίνακα 4. Οι μικρές ροές δεδομένων (κάτω από 10.000 γραμμές) μπορούσαν να αναλυθούν στο Microsoft Excel, αλλά οι μεγαλύτερες ροές (πάνω από 10.000 γραμμές) απαιτούσαν ένα σενάριο Python.

Record_num	State	Current	VC1	VD3	VD1	VD2	VC2	temp	VCAP	VBATT
6234	2	16000	5	483	481	720	6	226	700	705
6235	2	16000	5	483	480	725	6	226	696	701
6236	2	16000	5	482	480	727	6	226	694	698
6237	2	16000	5	483	480	731	6	226	691	696
6238	2	16000	5	481	480	732	5	226	689	694
6239	2	16000	5	482	480	735	6	226	687	692

Πίνακας 5 Παράδειγμα αναγνώσεων χωρίς αλλοιώσεις από έναν παλμό ρεύματος 16 A με Κ.Α: 25%,

Οι χρόνοι δειγματοληψίας ήταν καλά τεκμηριωμένοι και ελεγχόμενοι, με περίοδο δειγματοληψίας 7.382 ms. Το πρώτο δείγμα του παλμού σημειώθηκε 638 μs μετά την έναρξη του παλμού, εξασφαλίζοντας τη συνέχεια των σημείων δεδομένων. Ένα διάγραμμα των σημείων δειγματοληψίας σε σχέση με τους παλμούς ρεύματος απεικονίζεται στην Εικόνα 25. Αυτό μας επέτρεψε να συσχετίσουμε τις ακριβείς μετρήσεις του παλμογράφου με κάθε κομμάτι των δεδομένων που εξήγαγε η διάταξη δοκιμής. Το αποτέλεσμα ήταν ένας πίνακας πολλαπλασιαστών για κάθε μία από τις πέντε μεταβλητές σε κάθε μία από τις -60 δεδομένες σημεία που καταγράφηκαν από τη διάταξη δοκιμής. Ένα παράδειγμα του πίνακα πολλαπλασιαστών για 16 A με κύκλο λειτουργίας 25% εμφανίζεται στον Πίνακα 5.



Εικόνα 25 Διάγραμμα των χρόνων δειγματοληψίας, επικάλυψης πάνω σε έναν παλμό ρεύματος.

Sample #	VD1 mult	VD2 mult	VD3 mult	VCAP mult	VBATT mult
1	0.000345	-0.000354	-0.000371	0.007857	0.007811
2	0.000345	-0.000354	-0.000371	0.007857	0.007813
3	0.000345	-0.000354	-0.000371	0.007855	0.007807
4	0.000344	-0.000354	-0.000371	0.007859	0.007811
5	0.000345	-0.000353	-0.000372	0.007859	0.007814
6	0.000345	-0.000353	-0.000372	0.007857	0.007809

Πίνακας 6 Πολλαπλασιαστές μεταβλητών για παλμό 16 A με κύκλο λειτουργίας 25%.

Οι πολλαπλασιαστές είχαν διπλή λειτουργία. Η πρώτη, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αφορούσε τη διόρθωση σφαλμάτων και την αναγνώριση ενός αναπόφευκτα ατελούς συστήματος. Η δεύτερη ήταν η μετατροπή του αριθμού ADC από την τιμή ADC στην πραγματική τάση στο μετρούμενο κόμβο. Γι' αυτό οι αριθμοί είναι όλοι πολύ μικρότεροι από το 1. Τα δεδομένα από τον Πίνακα 4, μετά τη μετατροπή σε τάση χρησιμοποιώντας τους πολλαπλασιαστές του Πίνακα 5, απεικονίζονται στον Πίνακα 6.

Sample #	VD1	VD2	VD3	VCAP	VBATT
1	0.166	-0.255	-0.179	5.500	5.507
2	0.165	-0.257	-0.179	5.468	5.477
3	0.166	-0.257	-0.179	5.451	5.449
4	0.165	-0.259	-0.179	5.431	5.437
5	0.166	-0.259	-0.179	5.415	5.423
6	0.165	-0.260	-0.179	5.397	5.404

Πίνακας 7 Τα δεδομένα από τον Πίνακα 4, μετά τη μετατροπή σε τάση

Οι μεμονωμένες τάσεις κόμβων ήταν το μόνο που χρειαζόνταν για να υπολογιστούν τα πλήρη αποτελέσματα της δοκιμής. Οι μετατροπές από τις τάσεις των κόμβων σε ρεύμα και ενέργεια δίνονται από τις εξισώσεις (9) και (10).

$$I_B = \frac{(V_{D3} - V_{D2})}{R_3} \quad (9)$$

$$E_L = \int V_{CAP} \cdot \frac{V_{D1}}{R_1} + \frac{V_{D3}^2}{R_2} + I_B^2 \cdot R_3 + (V_{batt} - V_{cap}) \cdot I_B dt \quad (10)$$

Η ενέργεια που παραδόθηκε στο φορτίο, E_L , περιλάμβανε τους αισθητήρες αντίστασης και την αντίσταση των διαδρομών μαζί με το φορτίο. Ουσιαστικά, η ιδέα ήταν ότι οτιδήποτε δεν ήταν το υβριδικό ESS θεωρούνταν μέρος του φορτίου. Οι πρώτοι τρεις όροι στην εξίσωση (10) περιλάμβαναν την απώλεια ενέργειας στον MOSFET εκφόρτισης, R_1 , R_2 και R_3 . Ο τελευταίος όρος λογιστικοποίησε την αντίσταση μεταξύ των κόμβων V_{bat} και V_{cap} . Η διάταξη είχε τις υποδοχές για να δεχτεί έναν MOSFET για να ανοίξει τη σύνδεση μεταξύ της τράπεζας υπερπυκνωτων και της μπαταρίας, αλλά αυτές οι υποδοχές ήταν βραχυκυκλωμένες χρησιμοποιώντας έναν jumper και καλώδιο μεγάλης διατομής. Παρ' όλα αυτά, υπήρχε κάποια αντίσταση μεταξύ των δύο κόμβων και αυτή η ενέργεια έπρεπε να υπολογιστεί. Για αναφορά, αυτός ο jumper αντιπροσώπευε λιγότερο από το 0,1% της συνολικής ενέργειας που μετρήθηκε ως "παραδοθείσα στο φορτίο."

4.3 Ανάλυση και Αποτελέσματα

Όλα τα δεδομένα για κάθε περίπτωση δοκιμής κατέληξαν σε δύο βασικές μετρήσεις: την ποσότητα ενέργειας που παραδόθηκε στο φορτίο (E_L) και την ποσότητα φόρτισης που αφαιρέθηκε από την μπαταρία για να παραδοθεί αυτή η ενέργεια. Αυτές οι παράμετροι συνδυάστηκαν για να υπολογιστεί η απόδοση φόρτισης - δηλαδή, η ποσότητα ενέργειας που παραδόθηκε στο φορτίο ανά μονάδα φόρτισης που αφαιρέθηκε από την μπαταρία. Αυτή η απόδοση δίνεται από την εξίσωση (11).

$$\frac{E_L}{\int I_B dt} \quad (11)$$

Αυτή η μέτρηση επιλέχθηκε επειδή έχει σημαντικές επιπτώσεις στην χρησιμότητα του υβριδικού ESS. Εάν η απόδοση φόρτισης είναι υψηλότερη στο υβριδικό ESS από ό,τι στο μόνο μπαταρίας ESS, τότε η μπαταρία θα μπορούσε να παρέχει περισσότερη ενέργεια στο φορτίο με λιγότερη φόρτιση. Αυτό θα σήμαινε ότι ένα υβριδικό ESS θα μπορούσε να λειτουργεί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα με μία μόνο φόρτιση σε σύγκριση με το μόνο μπαταρίας αντίστοιχο του. Η λιγότερη σπατάλη ενέργειας θα σήμαινε επίσης ότι η μπαταρία θα παραμένει πιο δροσερή για

μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, κάτι που έχει άμεση σχέση με την αυξημένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Δύο τύποι δοκιμών πραγματοποιήθηκαν: οι "βραχυχρόνιες" δοκιμές και οι δοκιμές "εξαντλήσεως". Οι βραχυχρόνιες δοκιμές ονομάστηκαν έτσι επειδή τα δεδομένα προήλθαν από τη δειγματοληψία δέκα μόνο παλμών - τους τελευταίους δέκα παλμούς σε μια σειρά εκατό παλμών. Οι δοκιμές ρυθμίστηκαν με ένα buffer 90 παλμών, καθώς μπορεί να χρειαστεί λίγος χρόνος για να φτάσει το σύστημα σε περιοδική σταθερή κατάσταση, και ένας μικρός αριθμός παλμών δεν θα υπόκειται στη μείωση της τάσης της μπαταρίας καθώς μειώνεται η κατάσταση φόρτισης. Για παράδειγμα, δέκα παλμοί 16 A, 435 ms, με κύκλο λειτουργίας 25% θα προσέφεραν μόνο 0.0019 Ah, ή 0.055% της χωρητικότητας της μπαταρίας. Οι μπαταρίες φορτίστηκαν πλήρως πριν από την έναρξη αυτών των δοκιμών, ώστε τα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν πιο συνεπή μεταξύ τους.

Η τελική περίληψη των αποτελεσμάτων των πειραματικών βραχυχρόνιων δοκιμών απεικονίζεται στον Πίνακα 7. Είναι δομημένος ώστε να εμφανίζει μόνο τις τελικές, σημαντικές παραμέτρους: τόσο τα σενάρια του υβριδικού όσο και του μόνο μπαταρίας ESS, τις αντίστοιχες αποδόσεις φόρτισης και την κερδισμένη απόδοση. Η κερδισμένη απόδοση υπολογίστηκε ως η αύξηση της απόδοσης όταν μεταβαίνουμε από ένα μόνο μπαταρίας ESS (E_{L,B}) σε ένα υβριδικό ESS (E_{L,H}), όπως δίνεται στην εξίσωση (12).

$$Gain = \frac{E_{L,H} / \int I_{B,H}}{E_{L,B} / \int I_{B,B}} - 1 \quad (12)$$

System	E _{L,H} (Ws)	E _{L,B} (Ws)	∫I _{B,H} (As)	∫I _{B,B} (As)	E _L /I _{B, H} (W/A)	E _L /I _{B, B} (W/A)	Eff Gain (%)
8A, 10% Duty Cycle							
Experiment	22.11	19.32	3.44	3.40	6.43	5.68	13%
8A, 25% Duty Cycle							
Experiment	56.18	55.43	8.53	9.22	6.59	6.01	10%
16A, 10% Duty Cycle							
Experiment	38.19	28.86	6.85	7.05	5.57	4.09	36%
16A, 25% Duty Cycle							
Experiment	106.37	87.20	18.18	19.02	5.85	4.58	28%

Πίνακας 8. Πειραματικά Αποτελέσματα για τις Βραχυχρόνιες Δοκιμές

Τα δεδομένα έδειξαν ξεκάθαρα ότι τα υβριδικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας προσφέρουν σημαντικά οφέλη στην απόδοση σε σύγκριση με τα απλά συστήματα μπαταρίας. Η πιο ασθενής βελτίωση παρατηρήθηκε στην περίπτωση δοκιμής με 8 A και 25% κύκλο εργασίας, η οποία προσέφερε αύξηση 10% στην απόδοση. Η καλύτερη περίπτωση ήταν αυτή με 16 A και 10% κύκλο εργασίας, η οποία προσέφερε κέρδος 36%! Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι τρεις υπερπυκνωτές

που προστέθηκαν στη μπαταρία είχαν συνολικό όγκο λιγότερο από ένα κελί μπαταρίας, μόλις 90% ενός κελιού.

Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι αυτά τα σημαντικά οφέλη παρατηρήθηκαν μόνο στην περίπτωση 16 A και 10% κύκλο εργασίας. Η περίπτωση 16 A και 25% πρόσθεσε επίσης κάποια αύξηση στην αποδοτικότητα, αλλά σε μικρότερο βαθμό, ενώ οι περιπτώσεις 8 A δεν είχαν τόσο μεγάλα οφέλη. Αυτές οι τέσσερις δοκιμές δείχνουν δύο κύριες τάσεις για αποδοτική χρήση των υπερπυκνωτών:

- ◇ Οι υπερπυκνωτές προσέφεραν μεγαλύτερη αποδοτικότητα καθώς αυξανόταν το μέγιστο φορτίο.
- ◇ Οι υπερπυκνωτές πρόσφεραν μεγαλύτερη αποδοτικότητα καθώς μειωνόταν ο κύκλος εργασίας ή το μέσο φορτίο.

Οι δοκιμές αποφόρτισης πραγματοποιήθηκαν από τον πρώτο παλμό μέχρι τον τελευταίο, όπου η μπαταρία μπορούσε ακόμα να παρέχει το φορτίο. Η μπαταρία θεωρήθηκε «αποφορτισμένη» μόλις δεν μπορούσε να παρέχει το επιθυμητό φορτίο (8 A ή 16 A) για ολόκληρη την διάρκεια του παλμού. Αυτή η επιλογή σχεδιασμού επιλέχθηκε επειδή αντιπροσωπεύει μια πραγματική κατάσταση – οι περισσότεροι άνθρωποι θεωρούν ότι οι μπαταρίες τους είναι «νεκρές» όταν δεν μπορούν να εκτελέσουν τη δουλειά που χρειάζονται, όχι όταν φτάσουν σε μια συγκεκριμένη τάση. Αυτές οι δοκιμές συνήθως διαρκούν περίπου 18.000 παλμούς 16 A και 10% κύκλο εργασίας.

Η δοκιμή αποφόρτισης πραγματοποιήθηκε μόνο στην καλύτερη περίπτωση: 16 A και 10% κύκλο εργασίας, λόγω περιορισμών χρόνου, για να επικυρωθούν τα αποτελέσματα των σύντομων δοκιμών. Η λογική ήταν ότι αν η καλύτερη περίπτωση μπορούσε να διατηρήσει την υψηλή αποδοτικότητα σε ολόκληρο τον κύκλο αποφόρτισης της μπαταρίας, τότε και οι άλλες θα ακολουθούσαν. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι η δοκιμή αποφόρτισης ταίριαζε με τα αποτελέσματα των σύντομων δοκιμών, με συνολικό κέρδος περίπου 38%. Αυτό το νούμερο ήταν μόλις 5% χαμηλότερο από το αποτέλεσμα των σύντομων δοκιμών, επιβεβαιώνοντας και τα δύο αποτελέσματα.

System	$E_{L,H}$ (Ws)	$E_{L,B}$ (Ws)	$I_{L,H}$ (As)	$I_{L,B}$ (As)	$E_L/I_{L,H}$ (W/A)	$E_L/I_{L,B}$ (W/A)	Eff Gain (%)
16A, 10% Duty Cycle							
Experiment	38.19	28.86	6.85	7.05	5.57	4.09	36%

System	$E_{L,H}$ (Wh)	$E_{L,B}$ (Wh)	$I_{L,H}$ (Ah)	$I_{L,B}$ (Ah)	$E_L/I_{L,H}$ (W/A)	$E_L/I_{L,B}$ (W/A)	Eff Gain (%)
16A, 10% Duty Cycle, Depletion							
Experiment	20.12	15.22	3.41	3.55	5.90	4.28	38%

Πίνακας 9 Δοκιμές 16 A, 10% κύκλου εργασίας.

Τα παρατηρούμενα αποτελέσματα ήταν λογικά συνεπή. Δεδομένου ότι η απώλεια ισχύος ως θερμότητα είναι ανάλογη με το τετράγωνο του ρεύματος της μπαταρίας, θα περιμέναμε ότι η αύξηση της αποδοτικότητας στα 16 A θα ήταν περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερη από αυτή στα 8 A. Ωστόσο, τα πειράματα έδειξαν ότι η αύξηση της αποδοτικότητας για τις δοκιμές στα 16 A ήταν μόνο τρεις φορές καλύτερη από αυτή των δοκιμών στα 8 A. Αυτή η διαφορά μεταξύ των αναμενόμενων και των πραγματικών παραγόντων κέρδους μπορεί πιθανώς να αποδοθεί σε άλλα στοιχεία του συστήματος που επίσης παράγουν θερμότητα, καθιστώντας δύσκολη την αναπαράσταση όλων των απωλειών με έναν μόνο αντιστάτη σειράς. Πρόσθετη απόδειξη για τη μείωση των απωλειών θερμότητας βρέθηκε στις μετρήσεις θερμοκρασίας: στο τέλος των δοκιμών εξάντλησης, η

θερμοκρασία της μπαταρίας του ενεργειακού συστήματος μόνο με μπαταρία αυξήθηκε κατά 19,3 °C, ενώ η θερμοκρασία της μπαταρίας του υβριδικού ενεργειακού συστήματος αυξήθηκε μόνο κατά 7,7 °C

4.4 Συμπεράσματα

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει την εγκατάσταση και τα αποτελέσματα του πειραματικού μέρους αυτής της έρευνας. Αρχικά, συζητήθηκε λεπτομερώς ο σχεδιασμός του υλικού και η βαθμονόμηση για να εξηγηθεί πώς ελέγχονταν τα ρεύματα του ESS. Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο εξηγήθηκε πώς μετρήθηκαν, επικοινωνήθηκαν, αποθηκεύτηκαν, επεξεργάστηκαν και ερμηνεύτηκαν τα δεδομένα για ανάλυση. Τέλος, τα αποτελέσματα αναλύθηκαν και οι συμπερασμοί που αντλήθηκαν αφορούσαν τα οφέλη της αντικατάστασης ενός ESS με μόνο μπαταρία με ένα υβριδικό ESS μπαταρίας-υπερπυκνωτή.

Τα υβριδικά ESS μπαταρίας-υπερπυκνωτή έδειξαν προοπτικές για σημαντικά οφέλη σε εφαρμογές παλμικής εκφόρτισης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7. Τα οφέλη διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με το πλάτος του παλμού και τον κύκλο λειτουργίας, με αυτό με τους υψηλότερους παλμούς και τους χαμηλότερους κύκλους λειτουργίας να προσφέρουν μεγαλύτερες εξοικονομήσεις. Από τις τέσσερις περιπτώσεις δοκιμών, η περίπτωση 16 A, 10% κύκλου λειτουργίας ήταν η δοκιμή με το μεγαλύτερο πλάτος παλμών και τον χαμηλότερο κύκλο λειτουργίας. Παρείχε επίσης τις υψηλότερες αποδόσεις ενεργειακής αποδοτικότητας, με εξοικονομήσεις 36-38% σε σύγκριση με το ESS μόνο μπαταρίας. Η δοκιμή με το χαμηλότερο πλάτος παλμών και τον υψηλότερο κύκλο λειτουργίας - η περίπτωση δοκιμής 8 A, 25% κύκλου λειτουργίας - απέφερε τις χαμηλότερες αποδόσεις στο 10%.

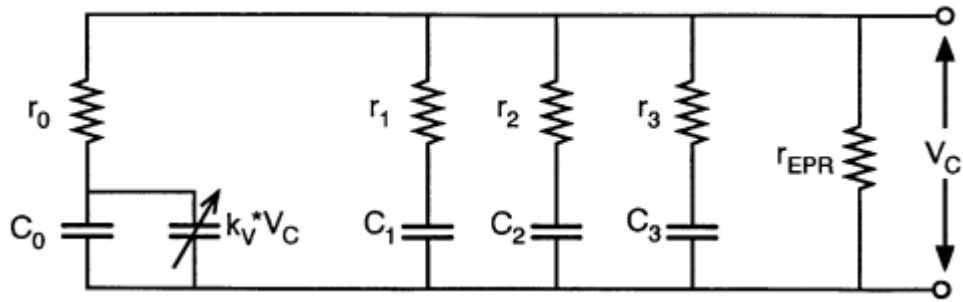
Οι τέσσερις περιπτώσεις δοκιμών ελέγχθηκαν όλες με σύντομες δοκιμές - δεδομένα που συλλέχθηκαν από μόνο 10 παλμούς. Η δοκιμή 16 A 10% κύκλου λειτουργίας επαναλήφθηκε, τρέχοντας μια μπαταρία από πλήρη μέχρι εντελώς εξαντλημένη, και οι εξοικονομήσεις αποδείχθηκαν παρόμοιες με την περίπτωση σύντομης δοκιμής. Έτσι, μπορεί λογικά να συμπεραστεί ότι τα αποτελέσματα στον Πίνακα 7 μπορούν να εξαγάγουν συμπεράσματα για τις αντίστοιχες περιπτώσεις δοκιμής εξάντλησης.

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : simulation(προσομοίωση)

Η έρευνα για τα μοντέλα κυκλωμάτων μπαταριών και υπερπυκνωτών έχει προχωρήσει πολύ. Δεν είναι λογικό να σχεδιάζεται ένα ολόκληρο σύστημα γύρω από αυτά τα εξαρτήματα χωρίς να γνωρίζουμε πώς θα συμπεριφερθούν στο κύκλωμα. Ωστόσο, η δοκιμή σχεδίων αποκλειστικά μέσω πειραμάτων δεν είναι πρακτική, καθώς η διαδικασία επαλήθευσης των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας απαιτεί υπερβολικό χρόνο. Η προσομοίωση προσφέρει έναν πιο γρήγορο τρόπο επιλογής εξαρτημάτων που πληρούν τις τεχνικές απαιτήσεις. Αυτό το κεφάλαιο αναλύει τη διαδικασία προσομοίωσης. Η επιλογή της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή είχε γίνει πριν την προσομοίωση, άρα αυτό το θέμα δεν θα εξεταστεί. Αντίθετα, τα πειράματα θα χρησιμοποιηθούν για την επιβεβαίωση των μοντέλων κυκλωμάτων των επιλεγμένων εξαρτημάτων, καθώς και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Το κεφάλαιο θα εστιάσει στο μοντέλο του υπερπυκνωτή και στο μοντέλο της μπαταρίας χωριστά. Και τα δύο μοντέλα βασίστηκαν σε προηγούμενη έρευνα, δίνοντας έμφαση σε πρακτικά μοντέλα που είναι σχετικά εύκολα στην ανάλυση και προσομοίωση, αλλά ταυτόχρονα αποδείχθηκαν ακριβή στις δοκιμές επικύρωσης με πραγματικά δεδομένα. Τα μοντέλα επικυρώθηκαν μέσω σύγκρισης με τα πειράματα που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4. Όταν οριστικοποιήθηκαν τα μοντέλα, αυτά συνδυάστηκαν για να δημιουργηθεί ένα υβριδικό μοντέλο συστήματος, το οποίο επίσης επαληθεύθηκε μέσω πειραματικών δεδομένων. Ο σκοπός του κεφαλαίου είναι να δημιουργήσει ένα απλό και ακριβές υβριδικό μοντέλο μπαταρίας-υπερπυκνωτή, που θα χρησιμοποιηθεί για τη δοκιμή μελλοντικών εκδοχών των σχεδιαστικών εννοιών της διατριβής και να εξετάσει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών των υβριδικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

5.1 Μοντέλο κυκλώματος υπερπυκνωτή

Το μοντέλο κυκλώματος ενός υπερπυκνωτή που χρησιμοποιήθηκε σε αυτές τις προσομοιώσεις και απεικονίζεται στην εικόνα 26 αποτελείται από τέσσερα παρακλάδια χωρητικότητας, τα οποία αναπαριστούν την αποθήκευση ενέργειας και τη συμπεριφορά του υπερπυκνωτή σε βραχυπρόθεσμο, μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο επίπεδο [34]. Η χωρητικότητα της συσκευής δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από την τάση στους ακροδέκτες του υπερπυκνωτή. Αυτή η εξάρτηση αναπαρίσταται με έναν μεταβλητό πυκνωτή που είναι συνδεδεμένος παράλληλα με τον C_0 , με τη χωρητικότητα αυτού του μεταβλητού πυκνωτή να είναι ανάλογη της τάσης στους ακροδέκτες, V_c , με σταθερά αναλογίας k_v . Ο C_0 αποθηκεύει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας και κυριαρχεί στα υπόλοιπα παρακλάδια ως προς τη χωρητικότητα, έχοντας χρόνο απόκρισης της τάξης των εκατοντάδων χιλιοστών του δευτερολέπτου. Το βραχυπρόθεσμο παρακλάδι (C_3 και r_3) έχει χρόνο απόκρισης τάξης δεκάδων χιλιοστών του δευτερολέπτου, το μεσοπρόθεσμο παρακλάδι (C_1 και r_1) έχει χρόνο απόκρισης εκατοντάδων δευτερολέπτων, και το μακροπρόθεσμο παρακλάδι (C_2 και r_2) έχει χρόνο απόκρισης χιλιάδων δευτερολέπτων. Οι μεσοπρόθεσμοι και μακροπρόθεσμοι χρόνοι απόκρισης επιτυγχάνονται προσαρμόζοντας την αντίσταση του κάθε παρακλαδιού, έτσι ώστε να μην αυξηθεί λανθασμένα η συνολική χωρητικότητα του μοντέλου κυκλώματος.



Εικόνα 26 Μοντέλο Υπερπυκνωτή

Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίστηκε στο τριπλό μοντέλο υπερπυκνωτή και στις μεθόδους για τον προσδιορισμό των τιμών των εξαρτημάτων. Το μοντέλο τους ήταν παρόμοιο με αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 27, αλλά δεν περιλάμβανε το βραχυπρόθεσμο παρακλάδι (C_3 και r_3). Η διαδικασία εύρεσης των παραμέτρων τους βασίστηκε στα χαρακτηριστικά φόρτισης του υπερπυκνωτή κατά τη διάρκεια φόρτισης με σταθερό ρεύμα. Αρχικά, θεωρήθηκε ότι τα τρία παρακλάδια είχαν τόσο διαφορετικούς χρόνους απόκρισης, ώστε να φορτίζονται ανεξάρτητα και διαδοχικά. Η τιμή του r_0 υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τον Νόμο του Ohm και τη στιγμιαία αύξηση τάσης όταν εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το ρεύμα φόρτισης. Η τιμή του C_0 υπολογίστηκε με τη μέτρηση του dV/dt κατά τη φόρτιση του υπερπυκνωτή με γνωστή ποσότητα σταθερού ρεύματος.

Η τιμή της μεταβλητής χωρητικότητας, k_V , καθορίστηκε αθροίζοντας το συνολικό φορτίο που διοχετεύθηκε στον υπερπυκνωτή, μετρώντας την τάση όταν ολοκληρώθηκε η φόρτιση και εφαρμόζοντας την εξίσωση (13). Η εξίσωση (13) εξισώνει το συνολικό φορτίο που εισήχθη στον πυκνωτή με την ενέργεια που αποθηκεύεται στο μηδενικό παρακλάδι του [34] για να εκφράσει την ποσότητα του φορτίου που αποθηκεύεται στον μεταβλητό πυκνωτή και τον C_0 .

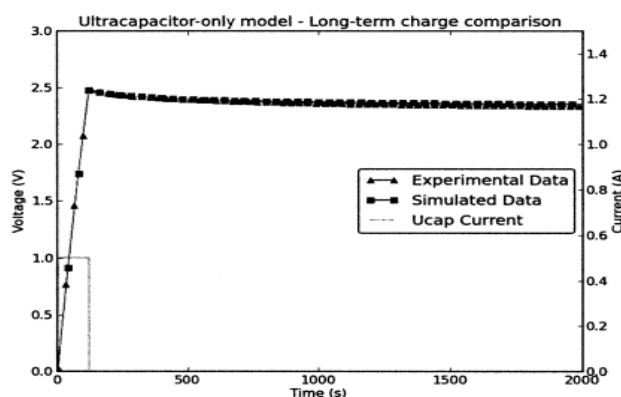
$$Q_{TOT} = \left(C_0 + \frac{k_V \cdot V_{MAX}}{2} \right) \cdot V_{MAX} \quad (13)$$

Οι τιμές των εξαρτημάτων στο 1ο και 2ο παρακλάδι υπολογίστηκαν παρατηρώντας τη συμπεριφορά του υπερπυκνωτή μετά τη φόρτιση, όταν η τάση άρχισε να μειώνεται αργά. Όπως και πριν, έγινε η υπόθεση ότι τα δύο παρακλάδια λειτουργούν διαδοχικά, με τον χρόνο απόκρισης του 1ου παρακλαδιού να είναι πολύ μικρότερος από εκείνον του 2ου. Τέλος, η εκτιμώμενη παράλληλη αντίσταση (r_{EPR}) [31] ορίστηκε βάσει των δεδομένων του κατασκευαστή. Οι τιμές των εξαρτημάτων του τριπλού μοντέλου, όπως υπολογίστηκαν με την παραπάνω μέθοδο, παρατίθενται στον Πίνακα 9.

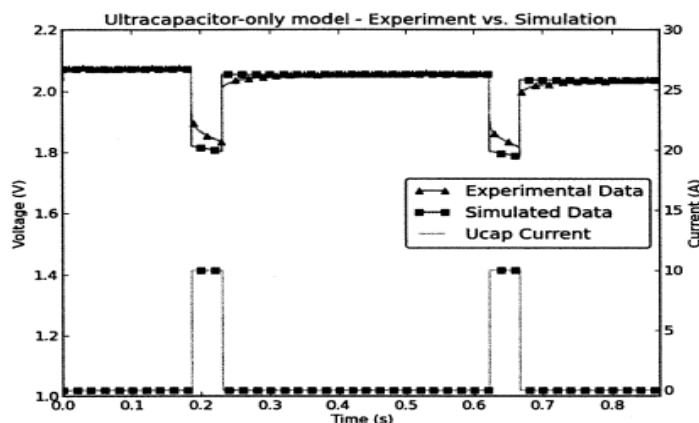
C_0	19.28 F
r_0	25.1 mΩ
C_1	1.05 F
r_1	186.4 Ω
C_2	1.06 F
r_2	2.12 kΩ
k_V	3.51 F/V
r_{EPR}	60 kΩ

Πίνακας 10 Στοιχεία Υπερπυκνωτή

Οι τιμές αυτές και το τριπλό μοντέλο δεν ταίριαζαν ακριβώς με τα πραγματικά δεδομένα στην περίπτωση του παλμικού πειράματος. Το μοντέλο είχε σχεδιαστεί για να αναπαριστά τους μεγάλους χρόνους απόκρισης κατά τη βραδεία φόρτιση και εκφόρτιση. Ένα παράδειγμα αυτού του τεστ φόρτισης φαίνεται στην Εικόνα 27, όπου τα προσομοιωμένα και τα πειραματικά δεδομένα διέφεραν κατά περίπου 1%. Το μοντέλο επικυρώθηκε στη συνέχεια με βάση τα πειραματικά δεδομένα από παρόμοια τεστ παλμικής εκφόρτισης που πραγματοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Τα πειραματικά δεδομένα καταγράφηκαν με ένα παλμογράφο Tektronix DPO 3034, για μέγιστη ακρίβεια και ανάλυση. Οι παλμοί ήταν 10 A με κύκλο λειτουργίας 10% και περίοδο παλμών 436 ms. Στην Εικόνα 29 απεικονίζεται η προσομοίωση σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα. Είναι εμφανές ότι το προτεινόμενο μοντέλο, χωρίς τροποποιήσεις, δεν λειτουργεί σωστά για τον υπερπυκνωτή με αυτό το φορτίο εκφόρτισης.



Εικόνα 27 Σύγκριση του αρχικού μοντέλου υπερπυκνωτών με το πείραμα κατά τη διάρκεια μιας μακροχρόνιας δοκιμής φόρτισης



Εικόνα 28 Συγκρίνοντας το αρχικό μοντέλο υπερπυκνωτών με υπολογισμένες τιμές στους πειραματικούς παλμούς εκφόρτισης

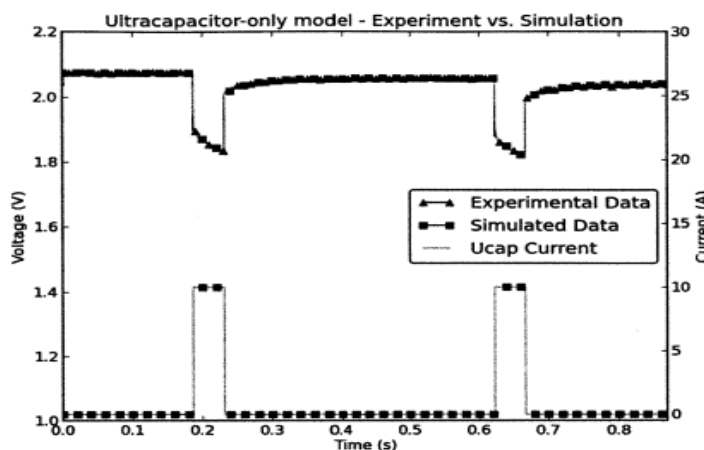
Το μοντέλο απέτυχε να αποδώσει σωστά γιατί οι χρόνοι απόκρισης θεωρήθηκαν υπερβολικά μεγάλοι κατά τον υπολογισμό των τιμών των εξαρτημάτων. Οι χρόνοι αυτοί ήταν σχετικοί με τη συγκεκριμένη εφαρμογή ηλεκτρονικών ισχύος [34]. Το μοντέλο αυτό είχε απλοποιηθεί από ένα μεγαλύτερο μοντέλο, το οποίο περιείχε η παρακλάδια για να αναπαριστά όλες τις διαφορετικές μεταβατικές συμπεριφορές [35]. Η μείωση των παρακλαδιών σε τρία επιτάχυνε και απλοποίησε την

ανάλυση του κυκλώματος, αλλά με κόστος την ακρίβεια σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Το βραχυπρόθεσμο παρακλάδι (C3 και r3) προστέθηκε για να αναπαραστήσει με ακρίβεια την απόκριση του υπερπυκνωτή στους παλμούς σε αυτή την έρευνα. Οι τιμές των εξαρτημάτων αρχικά υπολογίστηκαν προσεγγίζοντας την ESR ώστε να ταιριάζει με την στιγμιαία πτώση τάσης στην αρχή του παλμού και τον χρόνο απόκρισης της τάσης κατά τη διάρκεια του παλμού. Οι αρχικές εκτιμήσεις ήταν 100 mΩ και 500 mF, δίνοντας χρόνο απόκρισης 20 ms. Αυτές οι τιμές χρειάστηκε να προσαρμοστούν σε 60 mΩ και 417 mF, δίνοντας χρόνο απόκρισης 28 ms, που ταιρίαζε καλύτερα με τα πειραματικά δεδομένα. Οι τελικές τιμές των εξαρτημάτων για το μοντέλο με τα τέσσερα παρακλάδια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 28, παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

C_0	19.28 F
r_0	25.1 mΩ
C_1	1.05 F
r_1	186.4 Ω
C_2	1.06 F
r_2	2.12 kΩ
C_3	417 mF
r_3	60 mΩ
k_V	3.51 F/V
Γ_{EPR}	60 kΩ

Πίνακας 11 Οι τελικές τιμές συστατικών που χρησιμοποιούνται για τον μοντέλο υπερπυκνωτών

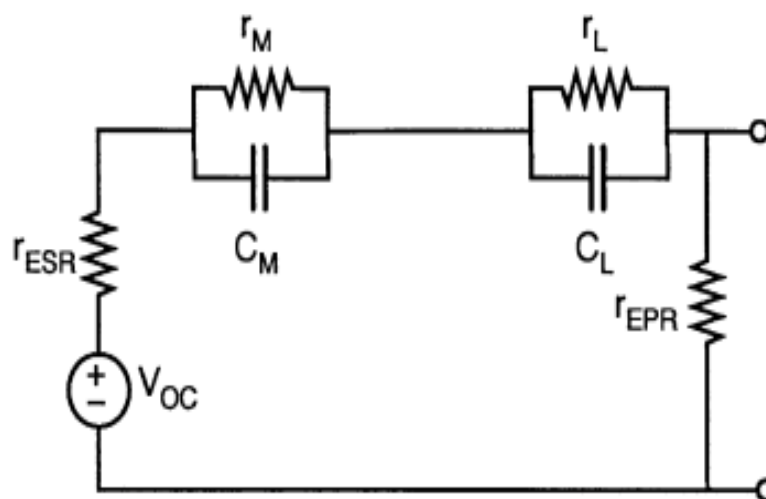
Το τροποποιημένο μοντέλο επικυρώθηκε με το ίδιο τεστ παλμικής εκφόρτισης που περιγράφηκε παραπάνω. Στην Εικόνα 29 απεικονίζεται το γράφημα τόσο των νέων δεδομένων όσο και της πειραματικής απόκρισης, τα οποία τοποθετήθηκαν το ένα πάνω στο άλλο. Παρόλο που τα πειράματα του Κεφαλαίου 4 χρησιμοποίησαν τρεις υπερπυκνωτές σε σειρά, το μοντέλο του μεμονωμένου υπερπυκνωτή επικυρώθηκε με έναν μόνο υπερπυκνωτή. Αυτή η δοκιμή έδειξε ότι η τοπολογία που απεικονίζεται στην Εικόνα 27 αναπαρήγαγε σχεδόν τέλεια τη βραχυπρόθεσμη συμπεριφορά και τη συγκεκριμένη χωρητικότητα των υπερπυκνωτών. Το μέσο σφάλμα μεταξύ των δύο αποκρίσεων ήταν μικρότερο από 1%.



Εικόνα 29 Σύγκριση του μοντέλου υπερπυκνωτών τεσσάρων διακλαδώσεων προσομοίωση σε πειραματικά δεδομένα σε παλμική εκκένωση 10A δοκιμή

5.2 Μοντέλο κυκλώματος μπαταρίας

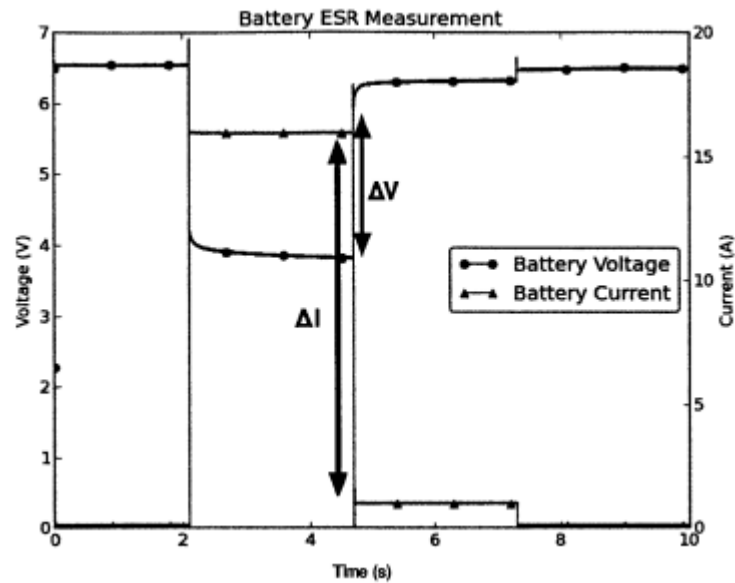
Το αρχικό μοντέλο κυκλώματος μπαταρίας απεικονίζεται στην Εικόνα 30. Όπως και το μοντέλο του υπερπυκνωτή, περιέχει πολλαπλά κυκλώματα RC για να αναπαραστήσει τη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη μεταβατική συμπεριφορά. Ωστόσο, σε αντίθεση με το μοντέλο της Εικόνας 27, αυτά τα κυκλώματα RC είναι σε σειρά με την πηγή τάσης ανοιχτού κυκλώματος. [36] Ένα καθόλου οχι και τόσο υπερβολικά περίπλοκο μοντέλο, αλλά ταυτόχρονα προσεγγίζει στενά τη βραχυπρόθεσμη συμπεριφορά της μπαταρίας. Δεν αναπαριστά με ακρίβεια τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας κατά τον υπολογισμό της τάσης ανοιχτού κυκλώματος.



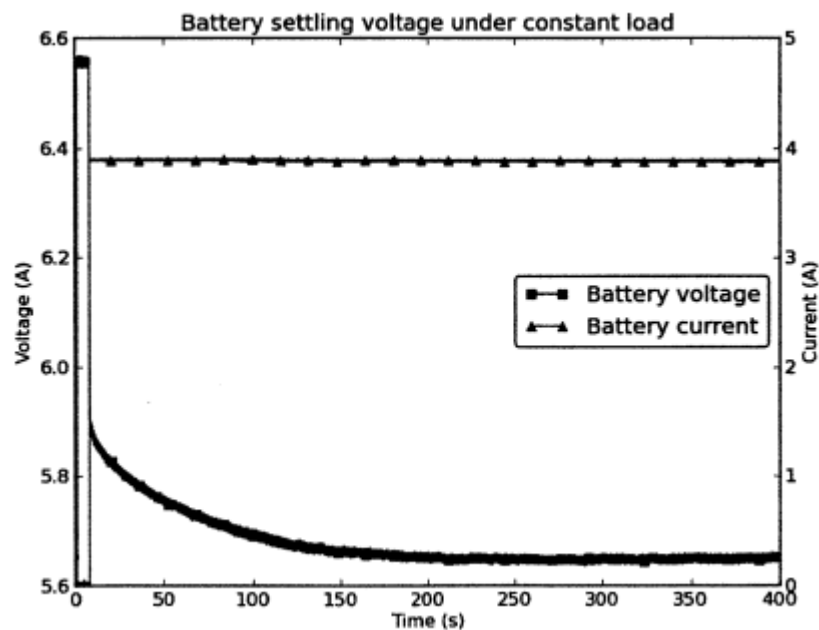
Εικόνα 30 Μοντέλο μπαταρίας δοκιμής

Όπως και με το μοντέλο του υπερπυκνωτή, η αρχική προσπάθεια για αυτήν την εργασία έγινε χρησιμοποιώντας το απλό μοντέλο στην Εικόνα 31, αλλά τελικά απαιτήθηκε η προσθήκη ενός ακόμη παρακλαδιού για να αναπαρασταθεί με ακρίβεια η βραχυπρόθεσμη μεταβατική απόκριση στα παλμικά φορτία. Η διαδικασία εύρεσης παραμέτρων για το μοντέλο με δύο παρακλάδια περιγράφεται εδώ, και το βραχυπρόθεσμο παρακλάδι προστίθεται αργότερα. Οι παράμετροι του μοντέλου μπαταρίας αποκτήθηκαν μέσω σύγκρισης με πειραματικά δεδομένα. Η σειριακή αντίσταση, r_{ESR} , υπολογίστηκε παρατηρώντας τη στιγμιαία πτώση τάσης $I \cdot R$ όταν εφαρμόστηκε ένα φορτίο στη μπαταρία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 32. Οι μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες αντιστάσεις (r_M και r_L) υπολογίστηκαν παρακολουθώντας την τελική σταθερή τιμή της τάσης της μπαταρίας υπό σταθερό φορτίο. Σε αυτή την περίπτωση, το φορτίο ήταν 4 A και η μέτρηση της τάσης έγινε μετά από 400 δευτερόλεπτα. Αυτή η γραφική παράσταση φαίνεται στην Εικόνα 33. Η τελική σταθερή τάση δίνεται από την εξίσωση (14).

$$V_{final} = I_{LOAD} \cdot (r_{ESR} + r_M + r_L) \quad (14)$$



Εικόνα 31 Υπολογισμός μπαταρίας ESR. $R_{ESR} = \Delta V / \Delta I$



Εικόνα 32 Ρύθμιση τάσης μπαταρίας για εύρεση του μεταβατικού κλάδου αντιστάσεις

Αφού ορίστηκαν οι μεταβατικές αντιστάσεις, οι χρόνοι απόκρισης ανατέθηκαν σε κάθε από τα κυκλώματα RC, ώστε να ταιριάζουν καλύτερα με τη συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια της δοκιμής ESR στην Εικόνα 32 και της δοκιμής σταθεροποίησης τάσης στην Εικόνα 33. Ο μεσοπρόθεσμος χρόνος απόκρισης ορίστηκε στα 200 ms, ενώ ο μακροπρόθεσμος χρόνος απόκρισης ορίστηκε στα 48 s. Οι τιμές χωρητικότητας δόθηκαν από την εξίσωση (15).

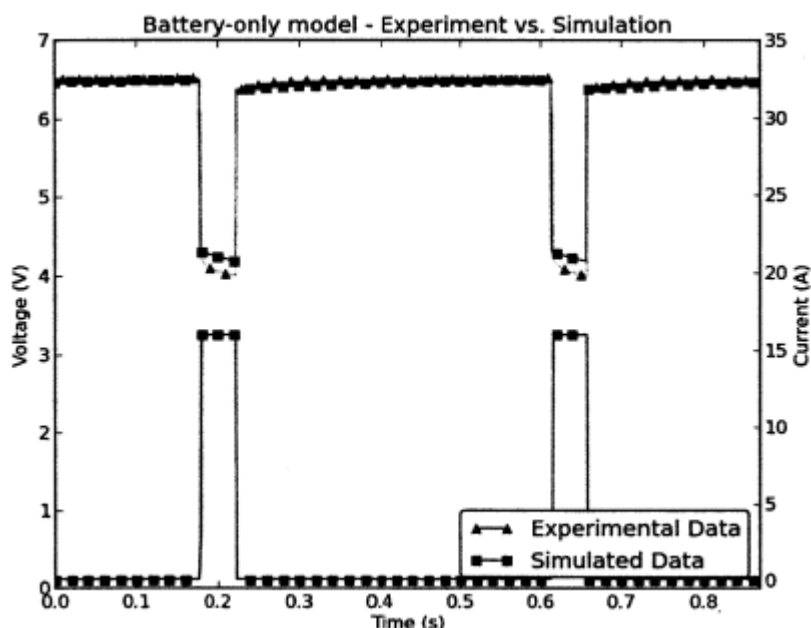
$$C = \frac{\tau}{r} \quad (15)$$

Σημειώνεται ότι η αντίσταση διαρροής, r_{EPR} , αποκλείστηκε από την ανάλυση. Αυτό έγινε σκόπιμα, καθώς το ρεύμα διαρροής της μπαταρίας δεν ήταν αρκετά υψηλό ώστε να επηρεάσει τα πειράματα. Το ρεύμα διαρροής επηρεάζει κυρίως τη μακροχρόνια διάρκεια ζωής της μπαταρίας, σε χρονικές κλίμακες πολύ μεγαλύτερες από αυτές που πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές. Συνήθως αγνοείται σε δοκιμές εκφόρτισης αυτού του τύπου, προκειμένου να απλοποιηθεί το μοντέλο. Φυσικά, αυτή η παράμετρος είναι εξαιρετικά σημαντική όταν σχεδιάζεται ένα σύστημα με μακροχρόνια διάρκεια ζωής, όπως ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο ή ένα εργαλείο ισχύος. Μπαταρίες με άλλες εξαιρετικές χαρακτηριστικές φόρτισης/εκφόρτισης μπορεί να είναι ακατάλληλες για προϊόντα με μακροχρόνια διάρκεια ζωής αν η r_{EPR} είναι πολύ χαμηλή.

Οι τιμές των εξαρτημάτων του μοντέλου με τα δύο παρακλάδια παρατίθενται στον Πίνακα 11. Η επικύρωση αυτού του μοντέλου έγινε με την ίδια διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για την επικύρωση του μοντέλου κυκλώματος του υπερπυκνωτή στην Ενότητα 5.1. Ωστόσο, το μοντέλο με τα δύο παρακλάδια δεν απεικόνιζε με ακρίβεια τη βραχυπρόθεσμη συμπεριφορά της απόκρισης στους παλμούς. Η σύγκριση μεταξύ προσομοίωσης και πειραματικών δεδομένων απεικονίζεται στην Εικόνα 33.

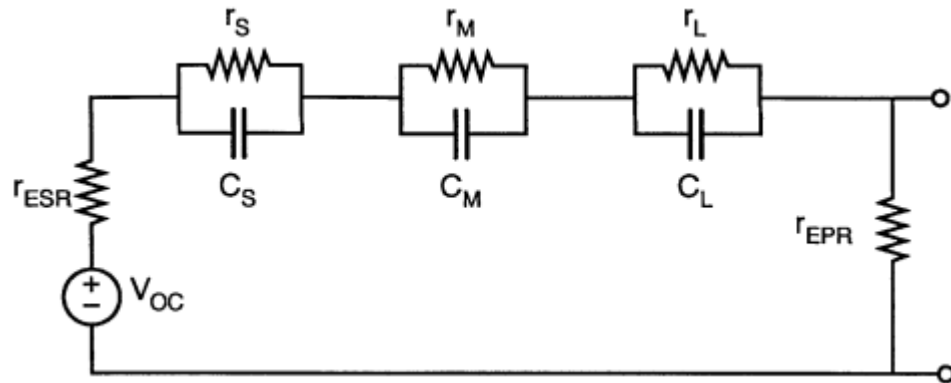
C_M	8 F
r_M	25 mΩ
C_L	1165 F
r_L	42.1 mΩ
r_{ESR}	127 mΩ
r_{EPR}	∞

Πίνακας 12 Τιμές εξαρτημάτων για το μοντέλο μπαταρίας δύο διακλαδώσεων.



Εικόνα 33 Σύγκριση του μοντέλου μπαταρίας δύο κλάδων με πειραματικά δεδομένα

Προστέθηκε ένα τρίτο RC παρακλάδι (r_s και C_s) για να αναπαραστήσει τη βραχυπρόθεσμη απόκριση στο παλμικό φορτίο. Αυτό το τελικό μοντέλο απεικονίζεται στην Εικόνα 34.



Εικόνα 34 Τελικό μοντέλο διάταξης

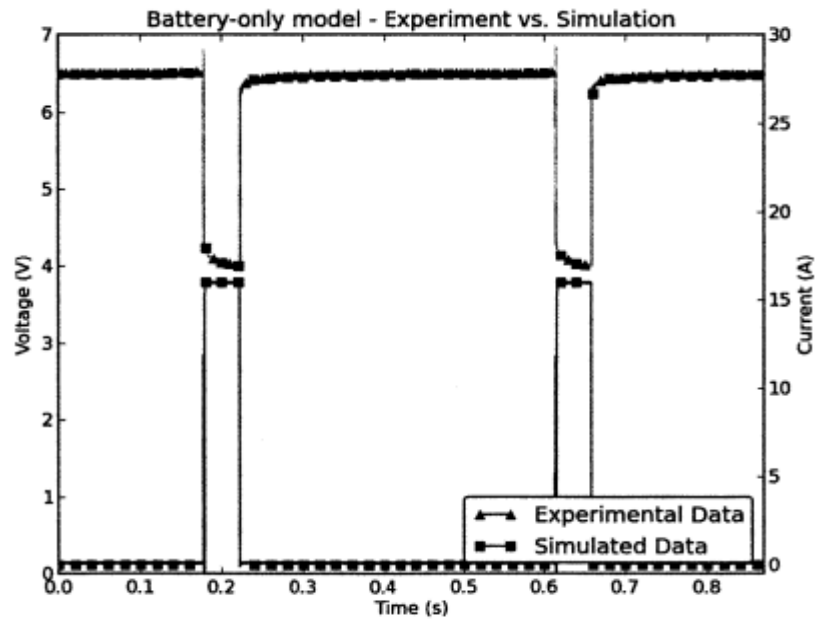
Ο χρόνος απόκρισης του νέου παρακλαδιού ορίστηκε στα 5 ms και η αντίσταση ρυθμίστηκε ώστε να ταιριάζει με τα πειραματικά δεδομένα. Η σχέση μεταξύ των αντιστάσεων που προσδιορίστηκαν από τη δοκιμή σταθεροποίησης τάσης στην Εικόνα 32 έπρεπε να τροποποιηθεί για να συμπεριλάβει τη νέα αντίσταση χωρίς να αλλοιώσει την τελική σταθερή τάση. Αυτή η νέα σχέση δίνεται από την εξίσωση (16). Η χωρητικότητα του νέου παρακλαδιού προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση (15).

$$V_{final} = I_{LOAD} \cdot (r_{ESR} + r_s + r_M + r_L) \quad (16)$$

Οι τελικές τιμές των εξαρτημάτων για το μοντέλο μπαταρίας με τρία παρακλάδια παρουσιάζονται στον Πίνακα 12. Η διαδικασία εύρεσης παραμέτρων πραγματοποιήθηκε με το πειραματικό σύστημα που περιλάμβανε τον αντιστάτη R3 των 10 mΩ, ο οποίος εισήχθη στο Κεφάλαιο 4, σε σειρά με τη μπαταρία. Αυτή η επιπλέον αντίσταση λήφθηκε υπόψη κατά τον υπολογισμό της r_{ESR} που εμφανίζεται στον Πίνακα 12. Το διάγραμμα στην Εικόνα συγκρίνει τα προσομοιωμένα δεδομένα με τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία περιλάμβαναν τον R3 στο κύκλωμα. Το μέσο σφάλμα μεταξύ των δύο συνόλων δεδομένων ήταν μικρότερο από 1%.

C_s	333 mF
r_s	15 mΩ
C_M	8 F
r_M	25 mΩ
C_L	1165 F
r_L	42.1 mΩ
r_{ESR}	127 mΩ
r_{EPR}	∞

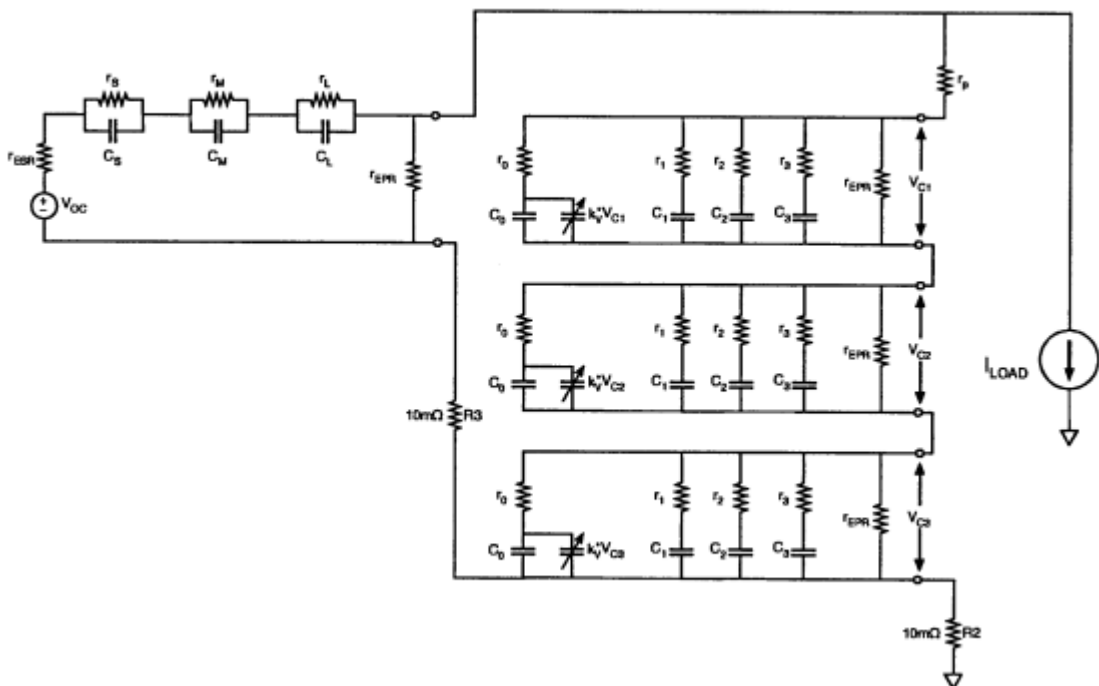
Πίνακας 13 Τιμές του μοντέλου της μπαταρίας



Εικόνα 35 Σύγκριση του μοντέλου μπαταρίας τριών κλάδων με πειραματικά δεδομένα

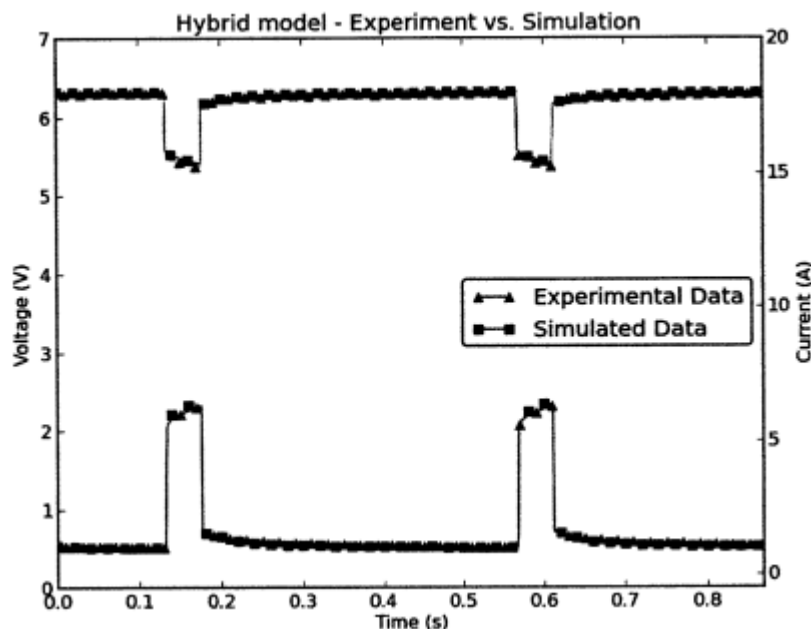
5.3 Μοντέλο κυκλώματος Hybrid ESS

Το τελικό μοντέλο για το υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (ESS) μπαταρίας-υπερπυκνωτών απεικονίζεται στην Εικόνα 36. Το μοντέλο της μπαταρίας αναπαριστά 5 κυψέλες NiMH, ενώ απαιτούνται 3 μοντέλα υπερπυκνωτών — ένα για κάθε υπερπυκνωτή στο σύστημα. Η αντίσταση r_p προστέθηκε για να συμπεριληφθεί η ρεαλιστική αντίσταση των διαδρομών και των πατημάτων της πλακέτας όταν χρησιμοποιούνται και οι 3 υπερπυκνωτές στο κύκλωμα. Αυτή η αντίσταση δεν είχε ληφθεί υπόψη στο μοντέλο του υπερπυκνωτή στην Ενότητα 5.1.



Εικόνα 36 Hybrid ESS model με μια μπαταρία σε παράλληλη διάταξη και με 3 υπερπυκνωτές σε σειρά.

Αυτό είναι το μοντέλο των αποτελεσμάτων που δοκιμάστηκαν σε σχέση με τα πειράματα που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4. Το μοντέλο επικυρώθηκε με τον ίδιο τρόπο που επικυρώθηκε το μοντέλο της μπαταρίας — δοκιμάζοντάς το με δεδομένα πραγματικού κόσμου. Το μέσο σφάλμα μεταξύ των δύο γραφημάτων στην Εικόνα 37 ήταν μικρότερο από 1%.



Εικόνα 37 Η σύγκριση του υβριδικού μοντέλου ESS με πειραματικά δεδομένα

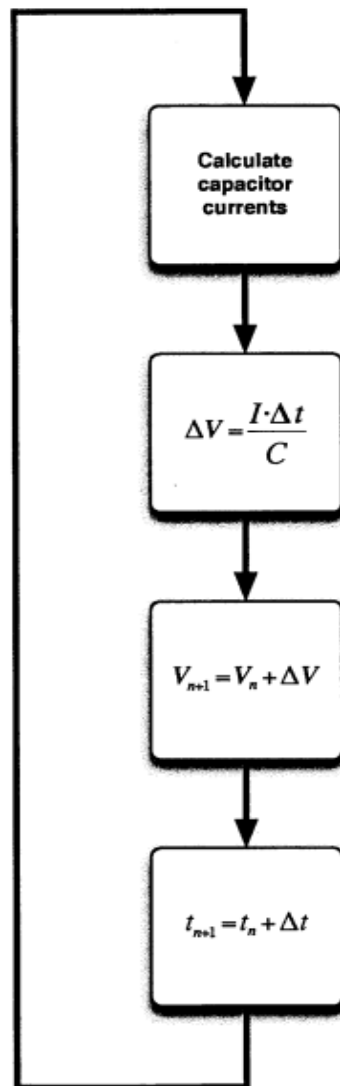
5.4 Διαδικασία προσομοίωσης

Scripts σε Python, χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες PyLab και matplotlib, αποτέλεσαν την κύρια μέθοδο προσομοίωσης του κυκλώματος. Αυτό απαιτούσε χειροκίνητη ανάλυση των κυκλωματικών μοντέλων, μια διαδικασία χρονοβόρα. Ωστόσο, το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου ήταν ότι, αφού ολοκληρώθηκε η αρχική εργασία, η προσομοίωση μπορούσε να εκτελείται πολύ γρήγορα και τα αποτελέσματα να αναλύονται ταυτόχρονα. Φυσικά, αυτό ήταν εφικτό μόνο επειδή τα μοντέλα επιλέχθηκαν να είναι σχετικά απλά. Πιο σύνθετα μοντέλα θα απαιτούσαν είτε πολύ περισσότερη προετοιμασία είτε την πραγματική χρήση λογισμικού SPICE.

Η προσομοίωση υπολογίζει τα διακριτά αλλαγές τάσης σε κάθε συσκευή αποθήκευσης ενέργειας στο μοντέλο — τους πυκνωτές — σε διακριτά χρονικά βήματα. Αυτή η μέθοδος αριθμητικής προσομοίωσης και ολοκλήρωσης απλοποίησε σημαντικά τα μαθηματικά που απαιτούνταν για την περιγραφή του κυκλωματικού μοντέλου. Οι πυκνωτές σε κάθε διακριτό χρονικό βήμα μπορούσαν να θεωρούνται ως πηγές τάσης, μειώνοντας το μοντέλο σε ένα μεγάλο δίκτυο αντιστάσεων με πηγές τάσης.

Τα διακριτά ρεύματα σε κάθε πυκνωτή υπολογίστηκαν αρχικά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της υπέρθεσης. Στη συνέχεια, η χωρητικότητα και το ρεύμα κάθε πυκνωτή χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστεί η μεταβολή τάσης (ΔV) αυτού του πυκνωτή σε συγκεκριμένο χρόνο t_n . Αυτό ήταν απλό για όλα τα παρακλάδια εκτός από το 0^ο παρακλάδι, όπου η χωρητικότητα περιλαμβάνει το C_0 και τον μεταβλητό πυκνωτή. Αυτή η μεταβλητή χωρητικότητα λήφθηκε υπόψη σε αυτό το στάδιο, ορίζοντας C για το 0^ο παρακλάδι ως το άθροισμα των χωρητικοτήτων των C_0 και $k_v \cdot V_c$ σε εκείνη τη χρονική στιγμή. Το τελικό βήμα ήταν να προσαρμοστούν οι τάσεις των πυκνωτών αναλόγως στο

επόμενο χρονικό βήμα. Αυτό απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής στην Εικόνα 38. Τα scripts που εκτελούν αυτές τις εργασίες περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Α.



Εικόνα 38 Διάγραμμα ροής αριθμητικής προσομοίωσης για δεδομένο χρόνο, t_n

5.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Το τελικό αποτέλεσμα αυτών των ερευνών ήταν αριθμοί που περιγράφουν την αύξηση της απόδοσης όταν αντικαθίσταται ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (ESS) με μπαταρία μόνο από ένα υβριδικό ESS μπαταρίας-υπερπυκνωτών, σύμφωνα με το περιγραφόμενο προφίλ εκφόρτισης με παλμικό ρεύμα. Αυτή η μέτρηση απόδοσης ήταν η αποδοτικότητα φόρτισης — η ποσότητα ενέργειας που παραδίδεται στο φορτίο ανά μονάδα φορτίου που παρέχεται από τη μπαταρία κατά τη διάρκεια ολόκληρης της δοκιμής. Αυτός ο αριθμός δίνεται από την εξίσωση (16).

$$\frac{E_L}{\int I_B dt} \quad (16)$$

Όπου E_L ήταν η συνολική ενέργεια που παραδόθηκε στο φορτίο και I_B ήταν το ρεύμα που παρέχεται από τη μπαταρία. Το "φορτίο" ορίστηκε ως η πηγή ρεύματος, R2, R3 και r_p .

Αυτή η μέτρηση επιλέχθηκε λόγω των σημαντικών συνεπειών της για την χρησιμότητα του υβριδικού ESS. Εάν η αποδοτικότητα φόρτισης είναι υψηλότερη στο υβριδικό ESS σε σύγκριση με το ESS με μπαταρία μόνο, τότε η μπαταρία θα μπορούσε να παρέχει περισσότερη ενέργεια στο φορτίο με λιγότερο φορτίο. Αυτό θα σήμαινε ότι ένα υβριδικό ESS θα μπορούσε να λειτουργήσει περισσότερο με μία μόνο φόρτιση σε σύγκριση με το αντίστοιχο με μπαταρία μόνο. Δεδομένου ότι η απώλεια ενέργειας στη μπαταρία μετατρέπεται σε θερμότητα, λιγότερη σπατάλη ενέργειας σημαίνει επίσης ότι η μπαταρία θα παραμένει πιο δροσερή, γεγονός που έχει συνδεθεί άμεσα με την αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε τέσσερις δοκιμαστικές περιπτώσεις που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατίθενται παρακάτω, στον Πίνακα 13. Οι στήλες αντιπροσωπεύουν την ενέργεια που παραδόθηκε στο φορτίο (E_L), το ολοκλήρωμα του ρεύματος της μπαταρίας (I_B) και την αποδοτικότητα φόρτισης (E_L / I_B). Η σημαίνει "Υβριδικό-Hybrid" και B σημαίνει "Battery-only," οπότε το $E_{L,B}$ θα σήμαινε την ενέργεια που παραδόθηκε στο φορτίο από ένα ESS με battery-only. Αυτοί οι αριθμοί βασίστηκαν στους τελευταίους 10 παλμούς μιας σειράς 100 παλμών. Οι 90 παλμοί "σπαταλήθηκαν" για να επιτραπεί στο σύστημα να φτάσει σε περιοδική σταθερή κατάσταση πριν από τη μέτρηση. Γενικά, η ποσότητα των παλμών για να φτάσει το σύστημα σε περιοδική σταθερή κατάσταση ήταν κοντά στους 10 ή 20.

System	$E_{L,H}$ (Ws)	$E_{L,B}$ (Ws)	$I_{B,H}$ (As)	$I_{B,B}$ (As)	$E_L / I_B, H$ (W/A)	$E_L / I_B, B$ (W/A)	Eff Gain (%)
8A, 10% Duty Cycle							
Simulation	22.51	19.76	3.56	3.54	6.32	5.58	13%
8A, 25% Duty Cycle							
Simulation	57.38	52.41	9.41	9.53	6.09	5.50	11%
16A, 10% Duty Cycle							
Simulation	39.26	28.81	7.13	7.07	5.50	4.07	35%
16A, 25% Duty Cycle							
Simulation	103.12	80.68	19.00	18.88	5.43	4.27	27%

Πίνακας 14 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τις ίδιες περιπτώσεις δοκιμών που εκτελέστηκαν

Τα δεδομένα που προήλθαν ήταν πολύ θετικά για την υβριδική περίπτωση. Το υβριδικό ESS υπερέβαινε συνεχώς την περίπτωση με μόνο μπαταρία, όπως αναμενόταν. Η ESR του υπερπυκνωτή ήταν περίπου το μισό της ESR της μπαταρίας. Έτσι, η συνδυασμένη χρήση τους σε παράλληλη διάταξη μείωσε τη συνολική σειριακή αντίσταση με το φορτίο και μείωσε τις απώλειες. Αυτή η δοκιμή ποσοτικοποίησε επίσης την εξοικονόμηση στην τελευταία στήλη ("Eff Gain (%)"). Αυτή η στήλη αντιπροσώπευε την ποσοστιαία αύξηση της αποδοτικότητας φόρτισης συγκρίνοντας το υβριδικό ESS με το ESS μόνο μπαταρίας. Αυτή η αύξηση δόθηκε από την εξίσωση (17).

$$Gain = \frac{E_{L,H} / \int I_{B,H}}{E_{L,B} / \int I_{B,B}} - 1 \quad (17)$$

Οι προσομοιωμένες κερδισμένες αποδόσεις στον Πίνακα 13 συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τις πειραματικές δοκιμές στο Κεφάλαιο 4. Αυτή η σύγκριση εμφανίζεται στον Πίνακα 14. Παρά το ότι τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια, η σύγκριση δεν ήταν απόλυτα ακριβής. Η πραγματική μπαταρία στις πειραματικές δοκιμές δεν είχε σταθερή τάση· αυτή μειωνόταν καθώς έπεφτε το επίπεδο φόρτισης. Το μοντέλο δεν λάμβανε υπόψη την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, αν και έγινε προσπάθεια ώστε όλες οι πειραματικές δοκιμές να ξεκινούν με παρόμοια τάση μπαταρίας (κοντά στη μέγιστη φόρτιση). Παρ' όλα αυτά, δεν μπορούσε να διασφαλιστεί ότι οι υβριδικές και οι δοκιμές του battery-only είχαν ακριβώς τις ίδιες συνθήκες εκκίνησης της μπαταρίας. Οποιαδήποτε διαφορά στην τάση της μπαταρίας, στην κατάσταση φόρτισης, στον χρόνο ή στη θερμοκρασία θα μπορούσε να επηρεάσει ελαφρώς τα αποτελέσματα.

Αντίθετα, τα προσομοιωμένα δεδομένα διατηρούσαν πλήρη κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας για κάθε δοκιμαστική περίπτωση. Όλες οι δοκιμές ξεκινούσαν με μια μπαταρία 6,70 V, αν και οι κύκλοι εργασίας και οι περίοδοι άλλαξαν για να ταιριάζουν με τις πραγματικές παραμέτρους των δοκιμών που προσομοίωναν. Αυτές οι αλλαγές παραμέτρων ήταν απαραίτητες λόγω των ατελειών στο σχεδιασμό του ελεγκτή. Η προστιθέμενη αντίσταση του r_p ήταν επίσης εκεί για να προσομοιώσει ατέλειες στο σχεδιασμό της πλακέτας κυκλωμάτων. Αυτό θα αναλυθεί περισσότερο στο Κεφάλαιο 6. Παρά αυτές τις ατέλειες, τα προσομοιωμένα και πειραματικά δεδομένα ταίριαζαν πολύ κοντά, με τις τελικές κερδισμένες αποδόσεις της προσομοίωσης και του πειραματισμού να αντιστοιχούν με ακρίβεια μέσα σε 10%.

System	$E_{L,H}$ (Ws)	$E_{L,B}$ (Ws)	$I_{B,H}$ (A)	$I_{B,B}$ (A)	$E_L/I_{B,H}$ (J/A)	$E_L/I_{B,B}$ (J/A)	Eff Gain (%)
8A, 10% Duty Cycle							
Simulation	22.51	19.76	3.56	3.54	6.32	5.58	13%
Experiment	22.11	19.32	3.44	3.40	6.43	5.68	13%
8A, 25% Duty Cycle							
Simulation	57.38	52.41	9.41	9.53	6.09	5.50	11%
Experiment	56.18	55.43	8.53	9.22	6.59	6.01	10%
16A, 10% Duty Cycle							
Simulation	39.26	28.81	7.13	7.07	5.50	4.07	35%
Experiment	38.19	28.86	6.85	7.05	5.57	4.09	36%
16A, 25% Duty Cycle							
Simulation	103.12	80.68	19.00	18.88	5.43	4.27	27%
Experiment	106.37	87.20	18.18	19.02	5.85	4.58	28%

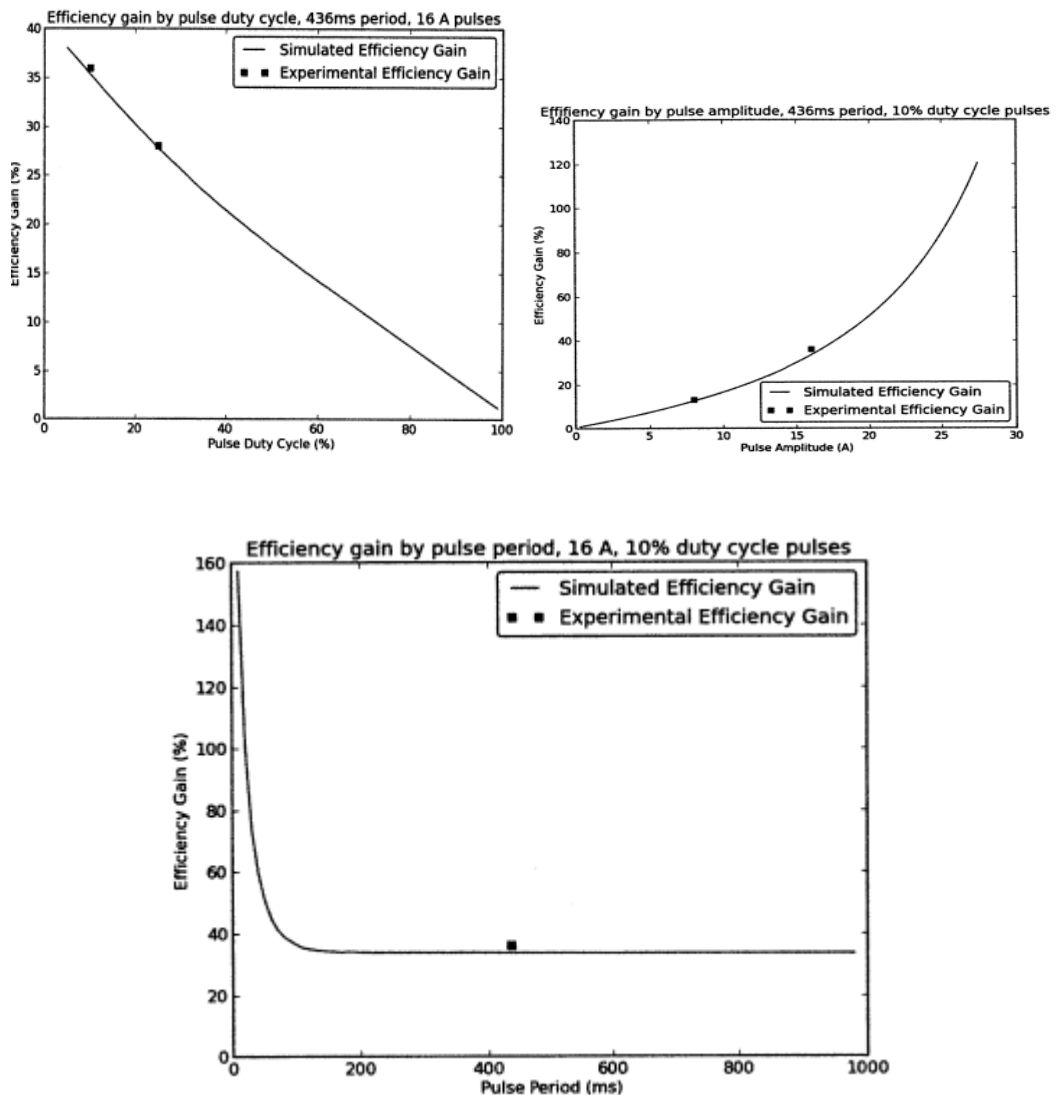
Πίνακας 15 Σύγκριση προσομοιωμένων με πειραματικών αποτελεσμάτων

Οι φυσικές πειραματικές δοκιμές περιορίστηκαν σε συγκεκριμένες παραμέτρους λόγω των επιλογών των εξαρτημάτων. Αντίθετα, η προσομοίωση δεν είχε αυτούς τους περιορισμούς, επιτρέποντας την αλλαγή των παραμέτρων για να εντοπιστούν τάσεις σε κάθε κύκλο εργασίας, πλάτος παλμού και συχνότητα παλμού. Οι γραφικές παραστάσεις στην Εικόνα 39 παρουσιάζεται ο άξονας "Κέρδος Αποδοτικότητα (%)", όπως περιγράφεται από την εξίσωση (17).

Υπήρχαν κάποιες προφανείς τάσεις που μπορούσαν να διακριθούν. Για παράδειγμα, η μεγαλύτερη ένταση παλμού είχε ως αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερα κέρδη. Αυτό είναι διαισθητικά λογικό — οι απώλειες αυξάνονται με το τετράγωνο της έντασης του ρεύματος. Αυτή η σχέση δίνεται από την εξίσωση (18), όπου k είναι η σταθερά αναλογίας.

$$P_L = k \cdot I_{RMS}^2 \quad (18)$$

Έτσι, ενώ οι συνολικές απώλειες αυξάνονται με την ένταση, το συνολικό ποσοστό κερδών αυξάνεται επίσης. Επίσης, οι χαμηλότεροι κύκλοι εργασίας προσέφεραν υψηλότερα κέρδη. Αυτό έχει νόημα, καθώς η αναλογία RMS προς τον μέσο ρεύμα αυξάνεται όταν ο κύκλος εργασίας μειώνεται. Η απώλεια ανά μονάδα παραδιδόμενης ενέργειας αυξάνεται με αυτήν την αναλογία, επομένως υπάρχει ένα αυξανόμενο όφελος από τη μείωση αυτής της αναλογίας στην μπαταρία.



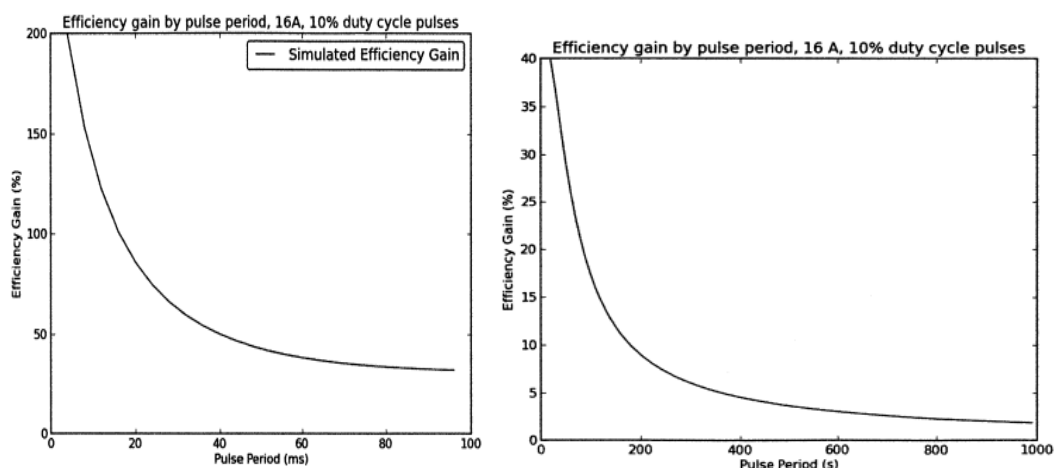
Εικόνα 39 Σάρωση των μεταβλητών παλμού για αύξηση της απόδοσης.

Η σχέση μεταξύ κέρδους αποδοτικότητας και κύκλου εργασίας φαίνεται να είναι γραμμική, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 40α. Αυτό οφείλεται στη τετραγωνική σχέση μεταξύ του RMS ρεύματος και του κέρδους αποδοτικότητας. Το RMS ρεύμα των παλμών δίνεται από την εξίσωση (19), όπου A είναι η ένταση παλμού και D ο κύκλος εργασίας. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (18) και (19) προκύπτει το αποτέλεσμα που απεικονίζεται από την εξίσωση (20): Οι απώλειες του συστήματος είναι άμεσα αναλογικές με τον κύκλο εργασίας.

$$I_{RMS} = A \cdot \sqrt{D} \quad (19)$$

$$P_L = k \cdot A^2 \cdot D \quad (20)$$

Η σχέση μεταξύ κέρδους αποδοτικότητας και περιόδου παλμού απεικονίζεται στην Εικόνα 40γ. Πρόκειται για μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση, όπου το κέρδος αποδοτικότητας μειώνεται καθώς η περίοδος του παλμού αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στην περιορισμένη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει ο υπεραγωγός. Καθώς η περίοδος του παλμού αυξάνεται με σταθερό λόγο κύκλου εργασίας, ο υπεραγωγός προμηθεύει περισσότερη ενέργεια στο φορτίο, αποφορτίζοντάς τον περαιτέρω. Όταν η περίοδος του παλμού πλησιάζει στο άπειρο, ο υπεραγωγός είναι ουσιαστικά αποφορτισμένος και δεν βοηθά καθόλου τη μπαταρία, με αποτέλεσμα το κέρδος αποδοτικότητας να είναι 0. Η Εικόνα 40 δείχνει μια σάρωση συχνότητας των κερδών αποδοτικότητας σε χαμηλές περιόδους παλμού — μεταξύ 1 και 100 ms — και σε υψηλές περιόδους παλμού — μεταξύ 10 και 1000 s. Και οι δύο περίοδοι ακολουθούν την αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ κέρδους αποδοτικότητας και περιόδου παλμού, με τις υψηλότερες περιόδους να πλησιάζουν το 0 κέρδος αποδοτικότητας.



Εικόνα 40 Κέρδη απόδοσης για περιόδους χαμηλών και υψηλών παλμών.

Από τα γραφήματα στην Εικόνα 41, ήταν σαφές ότι η ένταση παλμού και η περίοδος παλμού ήταν οι πιο σημαντικοί παράγοντες που συνέβαλαν στα κέρδη αποδοτικότητας. Ενώ η σχέση μεταξύ κέρδους αποδοτικότητας και κύκλου εργασίας ήταν γραμμική, η σχέση με την ένταση παλμού ήταν τετραγωνική, και η σχέση με την περίοδο παλμού σε σταθερό κύκλο εργασίας ήταν αντιστρόφως ανάλογη.

5.6 Αποτελέσματα

Αυτό το κεφάλαιο περιέγραψε τη μοντελοποίηση της μπαταρίας, του υπεραγωγού και της ρύθμισης του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 4. Αρχικά προτάθηκαν τα μοντέλα για τα μεμονωμένα στοιχεία, βασιζόμενα σε προηγούμενες έρευνες [8], [9] και [10]. Στη συνέχεια, επικυρώθηκαν με δεδομένα από το πειραματικό setup και ένα παλμογράφο, και επιβεβαιώθηκε ότι παρήγαγαν κυματομορφές με λιγότερο από 1% σφάλμα.

Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν με τα επικυρωμένα μοντέλα, χρησιμοποιώντας τις ίδιες τέσσερις περιπτώσεις δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν στο κεφάλαιο πειραμάτων. Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων βρίσκονται στον Πίνακα 13, ενώ στον Πίνακα 14 συγκρίνονται με τα πραγματικά δεδομένα από τα πειράματα του Κεφαλαίου 4. Εκτός από αυτές τις δοκιμές για σύγκριση, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον προσομοιώσεις για να εξεταστούν οι τρεις βασικές μεταβλητές της έρευνας: η ένταση του παλμού, ο κύκλος εργασίας του παλμού και η περίοδος του παλμού. Τα αποτελέσματα στην Εικόνα 40 έδειξαν τις εξής τάσεις: τα κέρδη αποδοτικότητας αυξάνονταν με χαμηλότερο κύκλο εργασίας, χαμηλότερη περίοδο παλμού και υψηλότερη ένταση παλμού. Οι μεταβλητές που προσέφεραν την υψηλότερη απόδοση σε κέρδη αποδοτικότητας ήταν η αύξηση της έντασης του παλμού και η μείωση της περιόδου του παλμού, οι οποίες είχαν αντίστοιχα τετραγωνική και αντιστρόφως ανάλογη σχέση με τα κέρδη αποδοτικότητας.

Εκτός από την επικύρωση των κυκλωματικών μοντέλων της μπαταρίας και του υπεραγωγού, αυτές οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι τα υβριδικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας-υπερπυκνωτή έχουν εκπληκτική δυναμική για να κάνουν ορισμένα επιλεγμένα συστήματα μπαταρίας πιο αποδοτικά. Τα συστήματα που επωφελούνται περισσότερο είναι αυτά με υψηλή αιχμή κατανάλωσης ισχύος και χαμηλή μέση κατανάλωση, ακόμη και σε μέτριες έως χαμηλές συχνότητες.

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο : Συμπεράσματα

Η παρούσα διατριβή εξερεύνησε τα οφέλη των υβριδικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες και υπερπυκνωτές σε σύγκριση με τα συστήματα που χρησιμοποιούν μόνο μπαταρίες. Τα δύο είδη συστημάτων αποθηκεύτηκαν σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις δοκιμών για να αξιολογηθούν οι αποδοτικές τους δυνατότητες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το υβριδικό σύστημα μπορεί να προσφέρει σημαντικές βελτιώσεις στην αποδοτικότητα, ανάλογα με το προφίλ εκφόρτισης του φορτίου. Αυτά τα πειραματικά δεδομένα βοήθησαν επίσης στην επικύρωση ενός κυκλώματος μοντέλου για το υβριδικό σύστημα, διευκολύνοντας μελλοντικές δοκιμές και σχεδιασμούς.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός και η διάταξη των πειραμάτων, η οποία περιλάμβανε μια προσαρμοσμένη πλακέτα κυκλώματος (PCB) ικανή να διαχειρίζεται το φορτίο και να ελέγχει τις ροές ενέργειας του συστήματος. Αυτή η διάταξη χρησιμοποιήθηκε για όλες τις δοκιμές και τις μετρήσεις που απαιτούνταν για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας κάθε συστήματος. Τα δεδομένα μεταφέρθηκαν μέσω USB σε υπολογιστή για αποθήκευση και επεξεργασία. Χρησιμοποιώντας σενάρια Python και Microsoft Excel, τα ψηφιακά δεδομένα μετατράπηκαν σε συνεχείς τάσεις και ρεύματα για τον υπολογισμό της αποδοτικότητας.

Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάστηκαν κυκλωματικά μοντέλα για τη μπαταρία και τον υπερπυκνωτή, τα οποία αναπτύχθηκαν και επικυρώθηκαν ανεξάρτητα με δεδομένα από οσκοπίο.

Αυτά τα μοντέλα συνδυάστηκαν για να δημιουργήσουν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο υβριδικού συστήματος, το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε προσομοιώσεις που αντιστοιχούσαν στις φυσικές δοκιμές του Κεφαλαίου 4. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επαληθεύτηκαν ότι ευθυγραμμίζονται με τα φυσικά δεδομένα, επιβεβαιώνοντας την ακρίβεια των μοντέλων για μελλοντική χρήση. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές που περιλάμβαναν την παρακολούθηση παραμέτρων όπως η πλάτος, η περίοδος και ο κύκλος λειτουργίας, προκειμένου να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες.

Τα οφέλη του υβριδικού συστήματος ήταν πιο εμφανή σε προφίλ εκφόρτισης με παλμούς υψηλής πλάτους, χαμηλού κύκλου λειτουργίας και μικρής περιόδου. Τα κέρδη αποδοτικότητας αυξάνονταν εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας των παλμών και τετραγωνικά με το πλάτος των παλμών, καθιστώντας αυτές τις παραμέτρους κρίσιμες για την ενσωμάτωσή τους στο σύστημα. Η αποδοτικότητα αυξανόταν γραμμικά με τον κύκλο λειτουργίας, αν και αυτό είχε μικρότερη επίδραση σε σχέση με τους άλλους δύο παράγοντες. Επιπλέον, καθώς η αποδοτικότητα αυξανόταν, η θερμοκρασία της μπαταρίας παρέμενε χαμηλότερη· για παράδειγμα, σε μια δοκιμή 16 A με 10% κύκλο λειτουργίας, η θερμοκρασία αυξήθηκε κατά 19.3 °C στο σύστημα μόνο με μπαταρία, σε σύγκριση με 7.7 °C στο υβριδικό σύστημα. Αυτά τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι τα υβριδικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να είναι μικρότερα, ελαφρύτερα, πιο αποδοτικά και να απαιτούν λιγότερη ενεργή ψύξη από τα συστήματα που βασίζονται μόνο σε μπαταρίες, προσφέροντας την ίδια ενέργεια για συγκεκριμένα φορτία εκφόρτισης.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] A novel design of hybrid energy storage system for electric vehicles. (2018). In Chinese Journal of Electrical Engineering (Vol. 4, Issue 1, pp. 45–51). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- [2] Hans, M. R., Renapurkar, A. B., & Ghuge, K. K. (2020). Implementation of Fuzzy Logic for Modern E-Vehicles using Super Capacitors and Li-ion Battery. In 2020 International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC). 2020 International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC). IEEE.
- [3] Reddy, R. M., Das, M., & Chauhan, N. (2023). Novel Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Wide Ambient Temperature Electric Vehicles Operation. In IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs (Vol. 70, Issue 7, pp. 2580–2584). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- [4] Charith Tammineedi, “Modeling battery-ultracapacitor hybrid systems for solar and wind applications”, M.Sc. Thesis, The Pennsylvania State University, May 2011.

- [5] Mohd Azri Abd Aziz, Mohd Saifizi Saidon, Muhammad Izuan Fahmi Romli, Siti Marhainis Othman, Wan Azani Mustafa, Mohd Rizal Manan, & Muhammad Zaid Aihsan. (2023). A Review on BLDC Motor Application in Electric Vehicle (EV) using Battery, Supercapacitor and Hybrid Energy Storage System: Efficiency and Future Prospects. In *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology* (Vol. 30, Issue 2, pp. 41–59). Akademia Baru Publishing.
- [6] Apribowo, Chico Hermanu Brillianto, and Hari Maghfiroh. "Fuzzy Logic Controller and Its Application in Brushless DC Motor (BLDC) in Electric Vehicle-A Review." *Journal of Electrical, Electronic, Information, and Communication Technology* 3, no. 1 (2021): 35-43.
<https://doi.org/10.20961/jeeict.3.1.50651>
- [7] Horn, Michael, Jennifer MacLeod, Meinan Liu, Jeremy Webb, and Nunzio Motta. "Supercapacitors: A new source of power for electric cars?." *Economic Analysis and Policy* 61 (2019): 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2018.08.003>
- [8] M. Chen, S. Member, and G.A. Rinc, "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 21, 2006, pp. 504 - 511.
- [9] R. Faranda, M. Gallina, D.T. Son, D. Elettrotecnica, and P. Milano, "A new simplified model of Double-Layer Capacitors," *Clean Electrical Power, 2007. ICCEP '07. International Conference on*, 2007, pp. 706- 710
- [10] L. Zubieta and R. Bonert, "Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 36, 2000, pp. 199-205.
- [11] Anon, (n.d.). *3.0 Power - NASA*. [online] Available at: <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/power-subsystems/>.
- [12] Μηχανικών, Τ. (n.d.). *ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ*. [online] Available at: <https://apothesis.lib.hmu.gr/bitstream/handle/20.500.12688/10593/LeventakisIoannis2019.pdf?sequence=1> [Accessed 7 Oct. 2024].
- [13] Zhang, Deyi, Binbin Yang, Wenna She, Shiyao Gao, Jingruo Wang, Yi Wang, Kunjie Wang, Hongxia Li, and Lele Han. "Simultaneously achieving high energy and power density for ultrafast-charging supercapacitor built by a semigraphitic hierarchical porous carbon nanosheet and a high-voltage alkaline aqueous electrolyte." *Journal of Power Sources* 506 (2021): 230103.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230103>
- [14] SupercapTech (2016). *Battery VS Supercapacitor - SupercapTech.com*. [online] Supercaptech.com. Available at: <https://www.supercaptech.com/battery-vs-supercapacitor>.
- [15] Powerbox. (2019). *PRBX_WP_017_EN_Rev_B*. [online] Available at: https://www.prbx.com/?attachment_id=3285 [Accessed 7 Oct. 2024].

[16] Hamid, J., Sheeba, R. and Sofiya, S. (2019). Energy Harvesting through Regenerative Braking using Hybrid Storage System in Electric Vehicles. *2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*, 3, pp.1–6. doi:<https://doi.org/10.1109/incos45849.2019.8951323>.

[17] chadmin (2017). *Rise of the machines: will electric vehicles dominate the future?* | *Energy Networks Australia*. [online] Energy Networks Australia. Available at: <https://www.energynetworks.com.au/news/energy-insider/rise-of-the-machines-will-electric-vehicles-dominate-the-future/> [Accessed 7 Oct. 2024].

[18] Peek, J. (2021). *Thomas Edison, a man ahead of his time, built his own electric car in 1912*. [online] Hagerty Media. Available at: <https://www.hagerty.com/media/automotive-history/thomas-edison-a-man-ahead-of-his-time-built-his-own-electric-car-in-1912/>.

[19] Wu, C., Sehab, R., Akrad, A. and Morel, C. (2022). Fault Diagnosis Methods and Fault Tolerant Control Strategies for the Electric Vehicle Powertrains. *Energies*, 15(13), p.4840. doi:<https://doi.org/10.3390/en15134840>.

[20] Sanjeevikumar Padmanaban, Khan, B., Om Prakash Mahela, Hassan Haes Alhelou and Rajkumar, S. (2022). *Active Electrical Distribution Network*. Academic Press.

[21] Πρόγραμμα, Δ., Σπουδών, Μ., Ζώτου, Ε., Χος, Δ., Μηχανικός, Η. and Υπολογιστών, Μ. (n.d.). *ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ*. [online] Available at: https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/43746/EV-Final_%20.pdf [Accessed 7 Oct. 2024].

[22] Hybrid Electric Vehicles. (2017). [online] Hoboken: John Wiley And Sons Ltd. Available at: <http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-111897056X,subjectCd-EEI0.html>.

[23] SlideShare. (2017). *SUPER CAPACITOR*. [online] Available at: <https://www.slideshare.net/slideshow/super-capacitor/73274597> [Accessed 7 Oct. 2024].

[24] ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Τσιώλης Παναγιώτης ΑΕΜ: 4681 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΦΟΝΔΥΛΟ (Flywheel Energy System Storage). (n.d.). Available at: https://ikee.lib.auth.gr/record/291047/files/%CE%9C%CE%9F%CE%9D%CE%A4%CE%95%CE%9B%CE%9F%CE%A0%CE%9F%CE%99%CE%97%CE%A3%CE%97_FESS.pdf [Accessed 7 Oct. 2024].

[25] Shaukat, N., Khan, B., Ali, S.M., Mehmood, C.A., Khan, J., Farid, U., Majid, M., Anwar, S.M., Jawad, M. and Ullah, Z. (2018). A survey on electric vehicle transportation within smart grid system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [online] 81, pp.1329–1349. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.092>.

- [26] Nour, M., Chaves-Ávila, J.P., Magdy, G. and Sánchez-Miralles, Á. (2020). Review of Positive and Negative Impacts of Electric Vehicles Charging on Electric Power Systems. *Energies*, [online] 13(18), p.4675. doi:<https://doi.org/10.3390/en13184675>.
- [27] Tie, S.F.; Tan, C.W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 20, 82–102, doi:10.1016/j.rser.2012.11.077.
- [28] Un-Noor, F.; Padmanaban, S.; Mihet-Popa, L.; Mollah, M.N.; Hossain, E. A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development. *Energies* 2017, 10, 1217, doi:10.3390/en10081217.
- [29] International Energy Agency (2023). *Global EV Outlook 2023 – Analysis*. [online] IEA. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>.
- [30] Product Datasheet - HHR370AH," January 2004. [pdf]. Available: http://industrial.panasonic.com/wwdata/pdf2/ACG4000/ACG4000CE2_16.pdf
- [31] "Product Datasheet - HC Power Series," August 2009. [pdf]. Available: http://www.maxwell.com/ultracapacitors/datasheets/DATASHEET_HC_series__1013793.pdf
- [32] R. Mino and S. Hara, "A Pulsed Discharge Control of Battery," TENCON 2006. 2006 IEEE Region 10 Conference, 2006, pp. 1-4.
- [33] S.M, I.C. (2024). Benefits of battery-ultracapacitor hybrid energy storage systems. *Mit.edu*. [online] doi:<http://hdl.handle.net/1721.1/75685>.
- [34] L. Zubieta and R. Bonert, "Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 36, 2000, pp. 199-205
- [35] L. Shi and M.L. Crow, "Comparison of Ultracapacitor Electric Circuit Models," *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008 IEEE, 2008, pp. 1-6.
- [36] D. Meekhun, V. Boitier, J. Dilhac, and C. Roche, "Study of the ambient temperature effect on the characteristics and the lifetime of Nickel-Metal Hydride secondary battery," *Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*, 2009 IEEE, 2009, pp. 1-4
- [37] R. Faranda, M. Gallina, D.T. Son, D. Eletrotecnica, and P. Milano, "A new simplified model of Double-Layer Capacitors," *Clean Electrical Power, 2007. ICCEP '07. International Conference on*, 2007, pp. 706- 710.
- [38] "XMEGA AU MANUAL," [pdf]. Atmel Corporation. Available: <http://www.atmel.com/Images/doc8331.pdf>

- [39] M. Chen, S. Member, and G.A. Rinc, "Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 21, 2006, pp. 504 - 511.
- [40] S.G. T, T.M. Undeland, I. Fellow, A~. Ulleberg, and P.J. Vie, "Optimal Load Sharing Strategy in a Hybrid Power System based on PV / Fuel Cell / Battery / Supercapacitor," *International Conference on Clean Electrical Power*, Kjeller, Norway: Inst. for Energy Technol., 2009, pp. 141-146.
- [41] J. Schindall, "The Charge of Ultracapacitors," *IEEE Spectrum*, November 2007 vol. 44, no. 11 (NA), pp. 42-46.
- [42] M. Conte, "Supercapacitors Technical Requirements for New Applications," *Fuel Cells*, vol. 10, 2010, pp. 806-818.
- [43] H.L. Lee, "OPERATING PRINCIPLES OF THE ULTRACAPACITOR," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25, 1989, pp. 102-106.
- [44] R.A. Dougal, S. Liu, and R.E. White, "Power and life extension of battery-ultracacipacitor hybrids," *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions. Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 25, 2002, pp. 120-131.
- [45] B.R. Signorelli, D.C. Ku, J.G. Kassakian, and J.E. Schindall, "Electrochemical Double-Layer Capacitors Using Carbon Nanotube Electrode Structures," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, 2009, pp. 1837-1847.
- [46] "Letter of Certification: RoHS Compliance," [pdf]. Available: http://www.maxwell.com/pdf/rohs/20090414_MaxwellTechnologies_RoHS.pdf
- [47] "Lead-free (RoHS Compliance) Electronic Components," [pdf]. Available: <http://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/pa003.pdf>

Παράρτημα Α

Τα παρακάτω σενάρια Python χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογίσουν τα δεδομένα προσομοίωσης στο Κεφάλαιο 5. Ακολουθεί μια λίστα με τα σενάρια και μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας τους:

****hybrid.py**** - Δημιουργεί γραφήματα της προσομοιωμένης εξόδου ενός υβριδικού μοντέλου επικαλυμμένης με δεδομένα πραγματικού κόσμου που έχουν καταγραφεί με ένα οσκιλλόσκοπο. Χρησιμοποιείται για την επικύρωση του μοντέλου στο Κεφάλαιο 4.

****results.py**** - Προσομοιώνει τις σύντομες δοκιμές με ένα μοντέλο που λειτουργεί μόνο με μπαταρία, και πάλι με ένα υβριδικό μοντέλο, και εξάγει τα αποτελέσματα κερδών απόδοσης που εμφανίζονται στον Πίνακα 13.

****sweep.py**** - Εκτελεί τον αλγόριθμο results.py σε ένα ευρύ φάσμα είτε πλάτους παλμού, είτε κύκλων καθήλωσης, είτε περιόδων. Δημιούργησε τα γραφήματα που εμφανίζονται στην Εικόνα 44 και στην Εικόνα 45

****depreresults.py**** - Προσομοιώνει τη δοκιμή αποφόρτισης 16 A με 10% κύκλο καθήλωσης που εκτελέστηκε στο Κεφάλαιο 4.

hybrid.py

```
#!/usr/bin/env python

# This script will plot a simulated hybrid circuit model on top of
# data captured by an oscilloscope. Used for model validation.

import math
import tek
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
from pylab import *

import re, os
import string

from datetime import datetime

plotfile = 0
output_text = 0
BATTERY = 1
sweep = 0
m = 3

dt = .00001

WAH = []
WAB = []
Effgain = []

R1 = 10.33e-3
R2 = 11.82e-3
R3 = 10.23e-3

Drange = [x/100.0 for x in range(2,100)]
Irange = [x*28.0/100.0 for x in range(1,100)]
Trange = [x/100.0 for x in range(1,100)]

for T in [.436]:
    #Dideal = .1
    #Dideal = .25
    Dideal = .10
    D = Dideal
    Load_Amplitude = 16
    #T = .436
    #T = .02
    T = .002

    if sweep:
```

```
#print '%2.1fA (%2.1f%%%)'
%(Load_Amplitude,Load_Amplitude/max(Irange)*100)
#print '%2.1f%% (%2.1f%%%)' %(D*100.0,D/max(Drange)*100)
print '%4.0fms (%2.1f%%%)' %(T*1000.0,T*1.0/max(Trange)*100)

for UCAP in [1]:#,0]:

    t = []
    Vcap = []
    Icap = []

    Vb = []
    Vs = []
    Vm = []
    VI = []
    V0 = []
    V1 = []
    V2 = []
    V3 = []
    Vc = []
    I0 = []
    I1 = []
    I2 = []
    I3 = []
    Ip = []
    Ib = []
    Is = []
    Im = []
    Il = []
    Ic = []
    Ileak = []
    time2 = []
    file1 = []

    if plotfile:
        decimation_ratio = 2

        figure()
        file = "./Winter 2011/Depletion/ESR April 11/Hybrid 16A10
pulses IBAT.isf"
        #Hybrid 16A10 pulses IBAT.isf"
        #Battery 16A pulses IBAT.isf"
        #UCAP good 500mA 2000s charge ICAP.isf"

        #For the V file:
        with open(file, "rb") as fptr:
            Y_t, samples_info = tek.read_isf_file( fptr,
decimation_ratio )

        # Printing the samples info to the console
        print('filename: %s' % f )
        for k,v in samples_info.iteritems():
```

```
print('\tKey: %s Value: %s' % (k, v) )

#examples on how to get the sample info
y_zero = float(samples_info['YZERO'])
y_mult = float(samples_info['YMULT'])
y_off = float(samples_info['YOFF'])
v_scale = float(samples_info['VSCALE'])
v_pos = float(samples_info['VPOS'])

h_delay = float(samples_info['HDELAY'])
h_scale = float(samples_info['HSCALE'])
x_incr = float(samples_info['XINCR'])

number_of_samples = int(samples_info['NR_PT'])

# rescale and apply offsets
filedata = y_zero + y_mult * (Y_t - y_off)# + v_pos

# plot
filet = linspace(0, number_of_samples*x_incr,
num=number_of_samples/decimation_ratio )
filet = [x-filet[0] for x in filet]
filedt = filet[1] - filet[0]
print max(filet)
filet = filet[0:-1:int(round(dt/filedt))]
filedata = filedata[0:-1:int(round(dt/filedt))]

Vfile = "./Winter 2011/Depletion/ESR April 11/Hybrid 16A10
pulses VBAT.isf"
#Hybrid 16A10 pulses VBAT.isf"
#UCAP good 500mA 2000s charge VCAP.isf"
#UCAP good 10A pulses.isf"
#Battery 16A pulses VBAT.isf"
#VCAP ESR 10A 5s.isf"

#Battery 16A pulses VBAT.isf"
#For the V file:
with open(Vfile, "rb") as fptr:
    Y_t, samples_info = tek.read_isf_file( fptr,
decimation_ratio )

# Printing the samples info to the console
print('filename: %s' % f )
for k,v in samples_info.iteritems():
    print('\tKey: %s Value: %s' % (k, v) )

#examples on how to get the sample info
y_zero = float(samples_info['YZERO'])
y_mult = float(samples_info['YMULT'])
y_off = float(samples_info['YOFF'])
v_scale = float(samples_info['VSCALE'])
```



```
v_pos = float(samples_info['VPOS'])

h_delay = float(samples_info['HDELAY'])
h_scale = float(samples_info['HSCALE'])
x_incr = float(samples_info['XINCR'])

number_of_samples = int(samples_info['NR_PT'])

# rescale and apply offsets
if len(filet) <= 0:
    filet = linspace(0, number_of_samples*x_incr,
num=number_of_samples/decimation_ratio )

    filet = [x-filet[0] for x in filet]
    filedt = filet[1] - filet[0]
    filet = filet[0:-1:int(round(dt/filedt))]

Vdata = y_zero + y_mult * (Y_t - y_off)# + v_pos

Vdata = Vdata[0:-1:int(round(dt/filedt))]

Vbatt = 6.55

if BATTERY and not UCAP:
    Vbatt = 6.59

Vbatt = 6.7

#Define the starting battery voltges for each test case
if BATTERY and UCAP and Load_Amplitude == 8 and Dideal == .10
and not sweep:
    Vbatt = 6.73
    D = .1018
    T = .435947
elif BATTERY and not UCAP and Load_Amplitude == 8 and Dideal ==
.10 and not sweep:
    Vbatt = 6.93
    D = .1018
    T = .435313
elif BATTERY and UCAP and Load_Amplitude == 8 and Dideal == .25
and not sweep:
    Vbatt = 6.73
    D = .2527
    T = .46412
elif BATTERY and not UCAP and Load_Amplitude == 8 and Dideal ==
.25 and not sweep:
    Vbatt = 6.83
    D = .2544
    T = .46839
elif BATTERY and UCAP and Load_Amplitude == 16 and Dideal == .10
and not sweep:
    Vbatt = 6.38
```

```

        D = .1014
        T = .435116
    elif BATTERY and not UCAP and Load_Amplitude == 16 and Dideal ==
.10 and not sweep:
        Vbatt = 6.33
        Vbatt = 6.38
        D = .1019
        T = .43548
    elif BATTERY and UCAP and Load_Amplitude == 16 and Dideal == .25
and not sweep:
        Vbatt = 6.48
        D = .2534
        T = .464147
    elif BATTERY and not UCAP and Load_Amplitude == 16 and Dideal ==
.25 and not sweep:
        Vbatt = 6.73
        #Vbatt = 6.90
        D = .2533
        T = .465315

Vbatt = 6.53

if BATTERY:
    Vi = Vbatt/m
else:
    Vi = 1.480
    Vi = 2.17
    Vi = 2.14
V0.append(Vi)
V1.append(Vi)
V2.append(Vi)
V3.append(Vi)
Vs.append(0)
Vm.append(0)
Vl.append(0)
Vb.append(Vbatt)

#Ultracapacitor Model
rleak = 60e3

c0 = 19.28
c1 = 1.05
c2 = 1.06
kv = 3.51
r0 = 25.1e-3
r1 = 186.4
r2 = 2.121e3
r3 = .188
c3 = .229
tau3 = .025
r3 = .188
r3 = .060
```

```
c3 = tau3/r3

#Battery Model
re = .150# + .01 #10mOhms for the current sense resistor R2
#re = .130
#re = .175
taus = .06
taus = .2
taus = .01
taul = 48.0
rs = .04
rs = .005
rl = .0812-rs
cs = taus/rs
cl = taul/rl

#In experiment, re seems to be 137mOhms...
re = .137

rj = 0
if BATTERY and UCAP:
    #account for the pad resistnace of the 3 ultracaps
    rj = .015
#The pad impedance of the UCAP
rp = .01
rp = 0

taus = .005
rs = .015
cs = taus/rs

taum = .20
rm = .04-rs
cm = taum/rm

taul = 48.0
rl = .0812-rs-rm
cl = taul/rl

#re = re + .01

print 'taus',rs*cs
print 'taum',rm*cm
print 'taul',rl*cl

if not UCAP:
    #rs = .00001
    #rl = .00001
    r0 = 10e12
    r1 = 10e12
    r2 = 10e12
    r3 = 10e12
```

```

2.3: if time2[-1] - floor(time2[-1]/T)*T <= D*T:# and time2[-1] <
      #if time2[-1] >= 2.1 and time2[-1] <= 120.3:
          Ip.append(Load_Amplitude)
          #Ip.append(-.5)
          if pulse_flag:
              pulse_count = pulse_count + 1
              pulse_flag = 0
              if pulse_count >= 90 and pulse_count <= 100
and start_load != 0:
                    #print 'Pulse %3.0d Energy: %3.3f'
                    %(pulse_count-1,sum(Eload[start_load:-1]))
                    start_load = time
                    elif pulse_count >= 90:
                        start_load = time
            else:
                Ip.append(0)
                pulse_flag = 1

      #V0 currents:
      I001 = V0[-1] / (r0 + 1.0/(1.0/r123l+1.0/((m-
1)*r0123l+re+rj)) )
      I0series = I001 * r123l/(r123l + (m-1)*r0123l+re+rj)
      I002 = I0series * r123l/(r0+r123l)
      I011 = -(I001-I0series) * r23l/(r1+r23l)
      I012 = I0series * r023l/(r1+r023l)
      I021 = -(I001-I0series) * r13l/(r2+r13l)
      I022 = I0series * r013l/(r2+r013l)
      I031 = -(I001-I0series) * r12l/(r3+r12l)
      I032 = I0series * r012l/(r3+r012l)
      I00 = I001 + (m-1)*I002
      I01 = I011 + (m-1)*I012
      I02 = I021 + (m-1)*I022
      I03 = I031 + (m-1)*I032
      I0B = -m*I0series
      I0S = I0B
      I0M = I0B
      I0L = I0B

      #V1 currents:
      I111 = V1[-1] / (r1 + 1.0/(1.0/r023l+1.0/((m-
1)*r0123l+re+rj)) )
      I1series = I111 * r023l/(r023l + (m-1)*r0123l+re+rj)
      I112 = I1series * r023l/(r1+r023l)
      I101 = -(I111-I1series) * r23l/(r0+r23l)
      I102 = I1series * r123l/(r0+r123l)
      I121 = -(I111-I1series) * r03l/(r2+r03l)
      I122 = I1series * r013l/(r2+r013l)
      I131 = -(I111-I1series) * r02l/(r3+r02l)
      I132 = I1series * r012l/(r3+r012l)
      I10 = I101 + (m-1)*I102
      I11 = I111 + (m-1)*I112
      I12 = I121 + (m-1)*I122

```

```

I13 = I131 + (m-1)*I132
I1B = -m*I1series
I1S = I1B
I1M = I1B
I1L = I1B

#V2 currents:
I221 = V2[-1] / (r2 + 1.0/(1.0/r013l+1.0/((m-
1)*r0123l+re+rj)) )
I2series = I221 * r013l/(r013l + (m-1)*r0123l+re+rj)
I222 = I2series * r013l/(r2+r013l)
I201 = -(I221-I2series) * r13l/(r0+r13l)
I202 = I2series * r123l/(r0+r123l)
I211 = -(I221-I2series) * r03l/(r1+r03l)
I212 = I2series * r023l/(r1+r023l)
I231 = -(I221-I2series) * r01l/(r3+r01l)
I232 = I2series * r012l/(r3+r012l)
I20 = I201 + (m-1)*I202
I21 = I211 + (m-1)*I212
I22 = I221 + (m-1)*I222
I23 = I231 + (m-1)*I232
I2B = -m*I2series
I2S = I2B
I2M = I2B
I2L = I2B

#V3 currents:
I331 = V3[-1] / (r3 + 1.0/(1.0/r012l+1.0/((m-
1)*r0123l+re+rj)) )
I3series = I331 * r012l/(r012l + (m-1)*r0123l+re+rj)
I332 = I3series * r012l/(r3+r012l)
I311 = -(I331-I3series) * r02l/(r1+r02l)
I312 = I3series * r023l/(r1+r023l)
I321 = -(I331-I3series) * r01l/(r2+r01l)
I322 = I3series * r013l/(r2+r013l)
I301 = -(I331-I3series) * r12l/(r0+r12l)
I302 = I3series * r123l/(r0+r123l)
I30 = I301 + (m-1)*I302
I31 = I311 + (m-1)*I312
I32 = I321 + (m-1)*I322
I33 = I331 + (m-1)*I332
I3B = -m*I3series
I3S = I3B
I3M = I3B
I3L = I3B

#Vb, VI, Vm, VS currents:
IBB = (Vb[-1]+VI[-1]+Vm[-1]+Vs[-1])/(re + m*r0123l + rj)
IBS = IBB + Vs[-1]/rs
IBM = IBB + Vm[-1]/rm
IBL = IBB + VI[-1]/rl
IB0 = -IBB * r123l/(r0+r123l)
IB1 = -IBB * r023l/(r1+r023l)

```

```

IB2 = -IBB * r013/(r2+r013)
IB3 = -IBB * r012/(r3+r012)

#Ip currents:
IPB = Ip[-1] * (m*r0123l+rj)/(m*r0123l+re+rj)
IPS = IPB
IPM = IPB
IPL = IPB
IP0 = Ip[-1] * re/(m*r0123l+re+rj) * r123l/(r0+r123l)
IP1 = Ip[-1] * re/(m*r0123l+re+rj) * r023l/(r1+r023l)
IP2 = Ip[-1] * re/(m*r0123l+re+rj) * r013l/(r2+r013l)
IP3 = Ip[-1] * re/(m*r0123l+re+rj) * r012l/(r3+r012l)

#Add them all up!
I0.append(I00 + I10 + I20 + I30 + IB0 + IP0)
I1.append(I01 + I11 + I21 + I31 + IB1 + IP1)
I2.append(I02 + I12 + I22 + I32 + IB2 + IP2)
I3.append(I03 + I13 + I23 + I33 + IB3 + IP3)
Ib.append(I0B + I1B + I2B + I3B + IBB + IPB)
Is.append(I0S + I1S + I2S + I3S + IBS + IPS)
Im.append(I0M + I1M + I2M + I3M + IBM + IPM)
Il.append(I0L + I1L + I2L + I3L + IBL + IPL)
Ic.append(Ip[-1]-Ib[-1])

Vb.append(Vbatt)
Vc.append(Vb[-1] + Vs[-1] + Vm[-1] + Vl[-1] - Ib[-1]*re)
#Vc.append(Vb[-1]+Vl[-1]-Ib[-1]*re - (Vs[-1]-Is[-1]*rs) +
3.0*(V0[-1] - I0[-1]*r0) - 3.0*(V1[-1] - I1[-1]*r1))
#V0.append(V0[-1] - I0[-1]/(c0+kv*(V1[-1]-I1[-1]*r1))*dt)
V0.append(V0[-1] - I0[-1]/( c0+kv*(V1[-1]-I1[-1]*r1)*((V1[-1]-I1[-1]*r1)>0) ) *dt )
V1.append(V1[-1] - I1[-1]/c1*dt)
V2.append(V2[-1] - I2[-1]/c2*dt)
V3.append(V3[-1] - I3[-1]/c3*dt)
Vs.append(Vs[-1] - Is[-1]/cs*dt)
Vm.append(Vm[-1] - Im[-1]/cm*dt)
Vl.append(Vl[-1] - Il[-1]/cl*dt)

Ileak.append((V0[-1]-I0[-1]*r1)/rleak)

if pulse_count >= 90 and pulse_count < 100:
    if pulse_index_start == 0:
        pulse_index_start = time

        pulse_index_end = time

        Ewaste.append( (pow(I0[-1],2)*r0+pow(I1[-1],2)*r1+pow(Ileak[-1],2)*rleak + pow(Ib[-1],2)*re + pow(Vs[-1],2)/rs + pow(Vl[-1],2)/rl + pow(Ip[-1],2)*.01)*dt )
        current.append(Ib[-1]*dt)

```



```

        #print 'Energy per unit charge: %3.2f J/A' %(WAH[-1])
        if output_text:
            print 'Efficiency Gain: %3.3f%%' %(Effgain[-1]*100.0)
    else:
        WAH.append(sum(Eload)/sum(current))
        #print 'Energy per unit charge: %3.2f J/A' %(WAB[-1])

#         if Load_Amplitude == 16 and plotfile:
#             figure()
#
#             plot(time2[pulse_index_start:pulse_index_end],Vc[pulse_index_start:pulse_index_end])
#             axis([time2[pulse_index_start],time2[pulse_index_end],0,7])
#             title('%3.0fA Amplitude, %2.0f%% Duty Cycle Load, UCAP = %1.0f' %(Load_Amplitude,D*100.0,UCAP))
#             show()
#             if len(WAH) >= 1 and not UCAP:
#                 print Effgain[-1]

ax1 = subplot(111)
ax2 = twinx()

start_plot_time = 0
if BATTERY and not UCAP:
    start_plot_time = 90.961035 - .016279 #Battery
    start_plot_time = 10-.1513153+.000821
elif BATTERY and UCAP:
    start_plot_time = 91.004 - .013001 #Hybrid
    start_plot_time = 10-.1513153+.000821+.0453-.018812
elif not BATTERY and UCAP:
    start_plot_time = 1.932593 + .009882 #1 Ucap
    start_plot_time = 1.932593 + .0600271 + .000498 #1 Good Ucap
#start_plot_time = 0
plot_delta = 0.868

start_plot_time = 50.0*T

end_plot_time = start_plot_time+plot_delta

#     ax2.plot(time2,Ib)
#     ax1.plot(time2,Vc)
#
#     show()
#     sys.exit()

plot_t = [x-time2[int(start_plot_time/dt)] for x in
time2[int(start_plot_time/dt):int(end_plot_time/dt)]]
plot1_y = Ib[int(start_plot_time/dt):int(end_plot_time/dt)]
plot2_y = Vc[int(start_plot_time/dt):int(end_plot_time/dt)]

ax2.plot(plot_t,plot1_y,'c-')
ax1.plot(plot_t,plot2_y,'r-')

```



```

if plotfile:
    ax2.plot(filet,filedata,'b-')
    ax1.plot(filet,Vdata,'y-')

ax2.plot(-1,0,'b^-',label = 'Experimental Data')
ax2.plot(-1,0,'rs-',label = 'Simulated Data')
#ax2.plot(-1,0,'c-',label = 'Battery Current')

spacing = 40

m1_t = plot_t[0:-1:int(spacing*.0005/dt)]
m1_y = plot1_y[0:-1:int(spacing*.0005/dt)]
m2_t = plot_t[0:-1:int(spacing*.0005/dt)]
m2_y = plot2_y[0:-1:int(spacing*.0005/dt)]
if plotfile:
    m3_t = filet[int(20*.0005/dt):-1:int(spacing*.0005/dt)]
    m3_y = filedata[int(20*.0005/dt):-1:int(spacing*.0005/dt)]
    m4_t = filet[int(20*.0005/dt):-1:int(spacing*.0005/dt)]
    m4_y = Vdata[int(20*.0005/dt):-1:int(spacing*.0005/dt)]

err_sum = []
# for i in range(0,len(plot_t)):
#     #err_sum.append( (plot1_y[i]-filedata[i])/filedata[i] )
#     #if Vdata[i] < 6.0:
#         err_sum.append( (plot2_y[i]-Vdata[i])/Vdata[i] )
#
# print 'Average error between Simluated and Experimental values: %2.1f%%'
# %(100.0*median(err_sum))
# print 'Min: %2.1f%%' %(100.0*min(err_sum))
# print 'Max: %2.1f%%' %(100.0*max(err_sum))
# print 'Mean: %2.1f%%' %(100.0*mean(err_sum))
# print 'Stdev: %2.1f%%' %(100.0*std(err_sum))

ax2.plot(m1_t,m1_y,'rs')
ax1.plot(m2_t,m2_y,'rs')
if plotfile:
    ax2.plot(m3_t,m3_y,'b^-')
    ax1.plot(m4_t,m4_y,'b^-')
xlabel('Time (ms)')

ax1.set_ylabel('Voltage (V)')
ax2.set_ylabel('Current (A)')

title('Hybrid model - Experiment vs. Simulation')
ax1.set_xlabel('Time (s)')

ax1.set_ylim(ymin=0,ymax=7.0)
ax1.set_xlim(xmin=0,xmax=plot_delta)
###ax2.set_xlim(xmin=0,xmax=plot_delta)
ax2.set_ylim(ymin=-.5,ymax=20)

legend(loc=7,fancybox=True)

# #axis([0,600,0,3])
show()

#plot(plot_t,[x*100.0 for x in err_sum])
#plot(filet,plot1_y)
#plot(filet,filedata)
#plot(plot_t,[plot1_y[i]-filedata[i] for i in range(0,len(plot_t))],'g')
#show()

```

results.py

```
#!/usr/bin/env python

# This script will plot the calibration numbers from the scope.

import math
import tek
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
from pylab import *

import re, os
import string

from datetime import datetime

plotfile = 0
output_text = 1
BATTERY = 1
m = 3

dt = .001

WAH = []
WAB = []
Effgain = []

R1 = 10.33e-3
R2 = 11.82e-3
R3 = 10.23e-3

for Dideal in [0.1,0.25]:
    #Dideal = .1
    #Dideal = .25
    #Dideal = .1
    D = Dideal
    Load_Amplitude = 16
    T = .436
    #T = .02

    for UCAP in [1,0]:

        t = []
        Vcap = []
        Icap = []

        Vb = []
        Vs = []
        Vm = []
        VI = []
```

```
V0 = []
V1 = []
V2 = []
V3 = []
Vc = []
I0 = []
I1 = []
I2 = []
I3 = []
Ip = []
Ib = []
Is = []
Im = []
Ii = []
Ic = []
Ileak = []
time2 = []
filet = []

#         if plotfile:
#         figure()
#         file = "./Winter 2011/Depletion/ESR April 11/UCAP good 500mA
2000s charge ICAP.isf"
#         #Hybrid 16A10 pulses IBAT.isf"
#         #Battery 16A pulses IBAT.isf"
#         #UCAP good 500mA 2000s charge ICAP.isf"
#
#         decimation_ratio = 10
#         #For the V file:
#         with open(file, "rb") as fptr:
#             Y_t, samples_info = tek.read_isf_file( fptr,
decimation_ratio )
#
#         # Printing the samples info to the console
#         print('filename: %s' % f )
#         for k,v in samples_info.iteritems():
#             print('\tKey: %s Value: %s' % (k, v) )
#
#         #examples on how to get the sample info
#         y_zero = float(samples_info['YZERO'])
#         y_mult = float(samples_info['YMULT'])
#         y_off = float(samples_info['YOFF'])
#         v_scale = float(samples_info['VSCALE'])
#         v_pos = float(samples_info['VPOS'])
#
#         h_delay = float(samples_info['HDELAY'])
#         h_scale = float(samples_info['HSCALE'])
#         x_incr = float(samples_info['XINCR'])
#
#         number_of_samples = int(samples_info['NR_PT'])
#
#         # rescale and apply offsets
```

```
#          filedata = y_zero + y_mult * (Y_t - y_off)# + v_pos
#
#          # plot
#          filet = linspace(0, number_of_samples*x_incr,
num=number_of_samples/decimation_ratio )
#          filet = [x-filet[0] for x in filet]
#          filedt = filet[1] - filet[0]
#          filet = filet[0:-1:int(round(dt/filedt))]
#          filedata = filedata[0:-1:int(round(dt/filedt))]

#          Vfile = "./Winter 2011/Depletion/ESR April 11/UCAP good 10A
pulses.isf"
#          #Hybrid 16A10 pulses VBAT.isf"
#          #UCAP good 500mA 2000s charge VCAP.isf"
#          #UCAP good 10A pulses.isf"
#          #Battery 16A pulses VBAT.isf"
#          #VCAP ESR 10A 5s.isf"
#
#          #Battery 16A pulses VBAT.isf"
#          decimation_ratio = 10
#          #For the V file:
#          with open(Vfile, "rb") as fptr:
#          Y_t, samples_info = tek.read_isf_file( fptr,
decimation_ratio )
#
#          # Printing the samples info to the console
#          print('filename: %s' % f )
#          for k,v in samples_info.iteritems():
#          print('\tKey: %s Value: %s' % (k, v) )
#
#          #examples on how to get the sample info
#          y_zero = float(samples_info['YZERO'])
#          y_mult = float(samples_info['YMULT'])
#          y_off = float(samples_info['YOFF'])
#          v_scale = float(samples_info['VSCALE'])
#          v_pos = float(samples_info['VPOS'])
#
#          h_delay = float(samples_info['HDELAY'])
#          h_scale = float(samples_info['HSCALE'])
#          x_incr = float(samples_info['XINCR'])
#
#          number_of_samples = int(samples_info['NR_PT'])
#
#          # rescale and apply offsets
#          if len(filet) <= 0:
#          filet = linspace(0, number_of_samples*x_incr,
num=number_of_samples/decimation_ratio )
#
#          filet = [x-filet[0] for x in filet]
#          filedt = filet[1] - filet[0]
#          filet = filet[0:-1:int(round(dt/filedt))]
```

```
#
#          Vdata = y_zero + y_mult * (Y_t - y_off)# + v_pos
#
#          Vdata = Vdata[0:-1:int(round(dt/filedt))]

Vbatt = 6.55

if BATTERY and not UCAP:
    Vbatt = 6.59

Vbatt = 6.7

#Define the starting battery voltges for each test case
if BATTERY and UCAP and Load_Amplitude == 8 and Dideal == .10:
    Vbatt = 6.73
    D = .1018
    T = .435947
elif BATTERY and not UCAP and Load_Amplitude == 8 and Dideal ==
.10:
    Vbatt = 6.93
    Vbatt = 6.73
    D = .1018
    T = .435313
elif BATTERY and UCAP and Load_Amplitude == 8 and Dideal == .25:
    Vbatt = 6.73
    D = .2527
    T = .46412
elif BATTERY and not UCAP and Load_Amplitude == 8 and Dideal ==
.25:
    Vbatt = 6.83
    Vbatt = 6.73
    D = .2544
    T = .46839
elif BATTERY and UCAP and Load_Amplitude == 16 and Dideal ==
.10:
    Vbatt = 6.38
    #Vbatt = 6.33
    D = .1014
    T = .435116
elif BATTERY and not UCAP and Load_Amplitude == 16 and Dideal ==
.10:
    Vbatt = 6.33
    Vbatt = 6.38
    D = .1019
    T = .43548
elif BATTERY and UCAP and Load_Amplitude == 16 and Dideal ==
.25:
    Vbatt = 6.73
    D = .2534
    T = .464147
elif BATTERY and not UCAP and Load_Amplitude == 16 and Dideal ==
.25:
```

```
Vbatt = 6.73
#Vbatt = 6.90
D = .2533
T = .465315

#Vbatt = 6.70

if BATTERY:
    Vi = Vbatt/m
else:
    Vi = 1.480
    Vi = 2.17
V0.append(Vi)
V1.append(Vi)
V2.append(Vi)
V3.append(Vi)
Vs.append(0)
Vm.append(0)
Vl.append(0)
Vb.append(Vbatt)

# r0 = .0100478
# c0 = 89.03
# kv = 29.1062
# r1 = 17.4976
# c2 = 13.7162

#Ultracapacitor Model
rleak = 60e3

c0 = 19.28
c1 = 1.05
c2 = 1.06
kv = 3.51
r0 = 25.1e-3
r1 = 186.4
r2 = 2.121e3
r3 = .188
c3 = .229
tau3 = .025
#tau3 = .001
r3 = .188
r3 = .060
c3 = tau3/r3

#Battery Model
taus = .06
taus = .2
taus = .01
taul = 48.0
rs = .04
```

```
rs = .005
rl = .0812-rs
cs = taus/rs
cl = taul/rl

re = .127

rj = 0
if BATTERY and UCAP:
    #account for the pad resistnace of the 3 ultracaps
    rj = .015
#The pad impedance of the UCAP
rp = .01
rp = 0

rs = .005
cs = 2.0

rl = .0762
cl = 630.0
cl = 10.0

rs = .015
cs = 0.33333

rm = .025
cm = 8

rl = .0412
cl = 1165

if not UCAP:
    #rs = .00001
    #rl = .00001
    r0 = 10e12
    r1 = 10e12
    r2 = 10e12
    r3 = 10e12
    rleak = 10e12
if not BATTERY:
    re = 10e12

re0 = 1.0/(1.0/re+1.0/r0)
re1 = 1.0/(1.0/re+1.0/r1)
rel = 1.0/(1.0/re+1.0/rleak)
r0l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1)
r0l = 1.0/(1.0/r0+1.0/rleak)
r1l = 1.0/(1.0/r1+1.0/rleak)
res = 1.0/(1.0/re+1.0/rs)
r2l = 1.0/(1.0/r2+1.0/rleak)
r03l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r3+1.0/rleak)
r13l = 1.0/(1.0/r1+1.0/r3+1.0/rleak)
```

```

r23l = 1.0/(1.0/r2+1.0/r3+1.0/rleak)

re0l = 1.0/(1.0/re+1.0/r0+1.0/rleak)
re1l = 1.0/(1.0/re+1.0/r1+1.0/rleak)
r01l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1+1.0/rleak)
r02l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r2+1.0/rleak)
r12l = 1.0/(1.0/r1+1.0/r2+1.0/rleak)

r012l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1+1.0/r2+1.0/rleak)
r013l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1+1.0/r3+1.0/rleak)
r023l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r2+1.0/r3+1.0/rleak)
r123l = 1.0/(1.0/r1+1.0/r2+1.0/r3+1.0/rleak)

r0123l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1+1.0/r2+1.0/r3+1.0/rleak)

Ewaste = []
Eload = []
current = []
SOC = []

EFET = []
ER2 = []
ER3 = []
ERP = []
EBATT = []

current_integral = 0
pulse_count = 0
pulse_flag = 0
start_load = 0
pulse_index_start = 0
pulse_index_end = 0
#print 'Max Time', 101.0*T/dt#max(range(0,int(101*T/dt)))
for time in range(0,int(105*T/dt)):
    time2.append(time*dt)

    #if time2[-1] >= 2.9 and time2[-1] <= 5.5: #
    if time2[-1] - floor(time2[-1]/T)*T <= D*T:# and time2[-1] <
2.3:
        #if time2[-1] >= 2.1 and time2[-1] <= 120.3:
            Ip.append(Load_Amplitude)
            #Ip.append(-.5)
            if pulse_flag:
                pulse_count = pulse_count + 1
                pulse_flag = 0
                if pulse_count >= 90 and pulse_count <= 100
and start_load != 0:
                    #print 'Pulse %3.0d Energy: %3.3f'
                    %(pulse_count-1,sum(Eload[start_load:-1]))
                    start_load = time
                elif pulse_count >= 90:
                    start_load = time
            else:

```



```

Ip.append(0)
pulse_flag = 1

#V0 currents:
I001 = V0[-1] / (r0 + 1.0/(1.0/r123l+1.0/((m-
1)*r0123l+re+rj)) )
I0series = I001 * r123l/(r123l + (m-1)*r0123l+re+rj)
I002 = I0series * r123l/(r0+r123l)
I011 = -(I001-I0series) * r23l/(r1+r23l)
I012 = I0series * r023l/(r1+r023l)
I021 = -(I001-I0series) * r13l/(r2+r13l)
I022 = I0series * r013l/(r2+r013l)
I031 = -(I001-I0series) * r12l/(r3+r12l)
I032 = I0series * r012l/(r3+r012l)
I00 = I001 + (m-1)*I002
I01 = I011 + (m-1)*I012
I02 = I021 + (m-1)*I022
I03 = I031 + (m-1)*I032
I0B = -m*I0series
I0S = I0B
I0M = I0B
I0L = I0B

#V1 currents:
I111 = V1[-1] / (r1 + 1.0/(1.0/r023l+1.0/((m-
1)*r0123l+re+rj)) )
I1series = I111 * r023l/(r023l + (m-1)*r0123l+re+rj)
I112 = I1series * r023l/(r1+r023l)
I101 = -(I111-I1series) * r23l/(r0+r23l)
I102 = I1series * r123l/(r0+r123l)
I121 = -(I111-I1series) * r03l/(r2+r03l)
I122 = I1series * r013l/(r2+r013l)
I131 = -(I111-I1series) * r02l/(r3+r02l)
I132 = I1series * r012l/(r3+r012l)
I10 = I101 + (m-1)*I102
I11 = I111 + (m-1)*I112
I12 = I121 + (m-1)*I122
I13 = I131 + (m-1)*I132
I1B = -m*I1series
I1S = I1B
I1M = I1B
I1L = I1B

#V2 currents:
I221 = V2[-1] / (r2 + 1.0/(1.0/r013l+1.0/((m-
1)*r0123l+re+rj)) )
I2series = I221 * r013l/(r013l + (m-1)*r0123l+re+rj)
I222 = I2series * r013l/(r2+r013l)
I201 = -(I221-I2series) * r13l/(r0+r13l)
I202 = I2series * r123l/(r0+r123l)
I211 = -(I221-I2series) * r03l/(r1+r03l)
I212 = I2series * r023l/(r1+r023l)
I231 = -(I221-I2series) * r01l/(r3+r01l)

```

```

I232 = I2series * r012/(r3+r012l)
I20 = I201 + (m-1)*I202
I21 = I211 + (m-1)*I212
I22 = I221 + (m-1)*I222
I23 = I231 + (m-1)*I232
I2B = -m*I2series
I2S = I2B
I2M = I2B
I2L = I2B

#V3 currents:
I331 = V3[-1] / (r3 + 1.0/(1.0/r012l+1.0/((m-
1)*r0123l+re+rj)) )
I3series = I331 * r012/(r012l + (m-1)*r0123l+re+rj)
I332 = I3series * r012/(r3+r012l)
I311 = -(I331-I3series) * r02l/(r1+r02l)
I312 = I3series * r023/(r1+r023l)
I321 = -(I331-I3series) * r01l/(r2+r01l)
I322 = I3series * r013/(r2+r013l)
I301 = -(I331-I3series) * r12l/(r0+r12l)
I302 = I3series * r123/(r0+r123l)
I30 = I301 + (m-1)*I302
I31 = I311 + (m-1)*I312
I32 = I321 + (m-1)*I322
I33 = I331 + (m-1)*I332
I3B = -m*I3series
I3S = I3B
I3M = I3B
I3L = I3B

#Vb, VI, Vm, VS currents:
IBB = (Vb[-1]+Vl[-1]+Vm[-1]+Vs[-1])/(re + m*r0123l + rj)
IBS = IBB + Vs[-1]/rs
IBM = IBB + Vm[-1]/rm
IBL = IBB + Vl[-1]/rl
IB0 = -IBB * r123l/(r0+r123l)
IB1 = -IBB * r023l/(r1+r023l)
IB2 = -IBB * r013l/(r2+r013l)
IB3 = -IBB * r012l/(r3+r012l)

#Ip currents:
IPB = Ip[-1] * (m*r0123l+rj)/(m*r0123l+re+rj)
IPS = IPB
IPM = IPB
IPL = IPB
IP0 = Ip[-1] * re/(m*r0123l+re+rj) * r123l/(r0+r123l)
IP1 = Ip[-1] * re/(m*r0123l+re+rj) * r023l/(r1+r023l)
IP2 = Ip[-1] * re/(m*r0123l+re+rj) * r013l/(r2+r013l)
IP3 = Ip[-1] * re/(m*r0123l+re+rj) * r012l/(r3+r012l)

#Add them all up!
I0.append(I00 + I10 + I20 + I30 + IB0 + IP0)
I1.append(I01 + I11 + I21 + I31 + IB1 + IP1)

```

```

I2.append(I02 + I12 + I22 + I32 + IB2 + IP2)
I3.append(I03 + I13 + I23 + I33 + IB3 + IP3)
Ib.append(I0B + I1B + I2B + I3B + IBB + IPB)
Is.append(I0S + I1S + I2S + I3S + IBS + IPS)
Im.append(I0M + I1M + I2M + I3M + IBM + IPM)
Il.append(I0L + I1L + I2L + I3L + IBL + IPL)
Ic.append(Ip[-1]-Ib[-1])

Vb.append(Vbatt)
Vc.append(Vb[-1] + Vs[-1] + Vm[-1] + Vl[-1] - Ib[-1]*re)
#Vc.append(Vb[-1]+Vl[-1]-Ib[-1]*re - (Vs[-1]-Is[-1]*rs) +
3.0*(V0[-1] - I0[-1]*r0) - 3.0*(V1[-1] - I1[-1]*r1))
#V0.append(V0[-1] - I0[-1]/(c0+kv*(V1[-1]-I1[-1]*r1))*dt)
V0.append(V0[-1] - I0[-1]/( c0+kv*(V1[-1]-I1[-1]*r1))*((V1[-1]-I1[-1]*r1)>0) )*dt )
V1.append(V1[-1] - I1[-1]/c1*dt)
V2.append(V2[-1] - I2[-1]/c2*dt)
V3.append(V3[-1] - I3[-1]/c3*dt)
Vs.append(Vs[-1] - Is[-1]/cs*dt)
Vm.append(Vm[-1] - Im[-1]/cm*dt)
Vl.append(Vl[-1] - Il[-1]/cl*dt)

Ileak.append((V0[-1]-I0[-1]*r1)/rleak)

if pulse_count >= 90 and pulse_count < 100:
    if pulse_index_start == 0:
        pulse_index_start = time

        pulse_index_end = time

        Ewaste.append( ( pow(I0[-1],2)*r0+pow(I1[-1],2)*r1+pow(Ileak[-1],2)*rleak + pow(Ib[-1],2)*re + pow(Vs[-1],2)/rs + pow(Vl[-1],2)/rl + pow(Ip[-1],2)*.01)*dt )
        current.append(Ib[-1]*dt)

#FET and R1 waste
EFET.append( (Vc[-1]-Ib[-1]*R3)*Ip[-1]*dt )
#The resistor connected to Ground and Vcap-
ER2.append( pow(Ip[-1],2)*R2*dt )
#The resistor in series with the battery
#But it's only considered 'Load' when pulsing
if Ip[-1] != 0:
    ER3.append( pow(Ib[-1],2)*R3*dt )
    #The pad resistance at the Ucap
    #ERP.append( pow(Ic[-1],2)*rp*dt )
    ERP.append( pow(Ic[-1],2)*rj*dt )
else:
    ER3.append(0)
    ERP.append(0)

```

```
        #Eload.append( ( Vc[-1]*Ip[-1] + pow(Ip[-1],2)*.01 +
pow(Ib[-1],2)*.01 + pow(Ic[-1],2)*rj ) *dt)
        Eload.append(EFET[-1]+ER2[-1]+ER3[-1]+ERP[-1])
        #Eload.append(EFET[-1]+ER2[-1]+ERP[-1])
        EBATT.append( (Vc[-1]+Ib[-1]*R3)*Ib[-1]*dt )
        #Eload.append( ( Vc[-1]*Ip[-1]) *dt)
    else:
        Eload.append(0)
        current_integral = current_integral + Ib[-1]*dt

    if output_text:
        if UCAP:
            print '\nHybrid ESS, %2.1fA %2.1f%% Duty Cycle,
%4.2fms period' %(Load_Amplitude,D*100.0,T*1000.0)
        else:
            print '\nBattery-only ESS, %2.1fA %2.1f%% Duty
Cycle, %4.2fms period' %(Load_Amplitude,D*100.0,T*1000.0)
            #print 'Energy waste: %3.3f J' %(sum(Ewaste))
            print 'Energy delivered to load: %3.3f J' %(sum(Eload))
            print 'Energy delivered by battery: %3.3f J' %(sum(EBATT))
            print '\nEFET: %3.6f J' %(sum(EFET))
            print 'ER2: %3.6f J' %(sum(ER2))
            print 'ER3: %3.6f J' %(sum(ER3))
            print 'ERP: %3.6f J\n' %(sum(ERP))

            print 'Ibattery: %3.3f A-s' %(sum(current))
    if not UCAP:
        WAB.append(sum(Eload)/sum(current))
        if len(WAH) > 0:
            Effgain.append((WAH[-1]-WAB[-1])/WAB[-1])
            #print 'Energy per unit charge: %3.2f J/A' %(WAH[-1])
            if output_text:
                print 'Efficiency Gain: %3.3f%%' %(Effgain[-1]*100.0)
    else:
        WAH.append(sum(Eload)/sum(current))
        #print 'Energy per unit charge: %3.2f J/A' %(WAB[-1])
```

sweep.py

```
#!/usr/bin/env python

# This script will plot the sweeps of amplitude, duty cycle, or period.
# Use the sweep_<parameter> flags to choose which one you want to sweep.
# Only sweep 1 parameter at a time!

import math
import tek
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
from pylab import *

import re, os
import string

#output_text = 0
BATTERY = 1
m = 3

dt = .00001

sweep_current = 0
sweep_duty = 0
sweep_period = 1

WAH = []
WAB = []
Effgain = []

R1 = 10.33e-3
R2 = 11.82e-3
R3 = 10.23e-3

Drange = [x/100.0 for x in range(5,100)]
Irange = [x*28.0/100.0 for x in range(1,100)]
Trange = [x/100.0 for x in range(1,100)]

if sweep_current:
    loop_range = Irange
elif sweep_duty:
    loop_range = Drange
elif sweep_period:
    loop_range = Trange

for loop_variable in loop_range:
    #Dideal = .1
    #Dideal = .25

    Load_Amplitude = 16
```

```
Dideal = .1
T = .436

if sweep_current:
    Load_Amplitude = loop_variable
elif sweep_duty:
    Dideal = loop_variable
elif sweep_period:
    T = loop_variable

D = Dideal

if sweep_current:
    print '%2.1fA (%2.1f%%)'
%(Load_Amplitude,Load_Amplitude/max(Irange)*100)
elif sweep_duty:
    print '%2.1f%% (%2.1f%%)' %(D*100.0,D/max(Drange)*100)
elif sweep_period:
    #print '%4.0fus (%2.1f%%)'
%(T*1000000.0,T*1.0/max(Trange)*100)
    print '%4.0fms (%2.1f%%)' %(T*1000.0,T*1.0/max(Trange)*100)
    #print '%4.0fs (%2.1f%%)' %(T*1.0,T*1.0/max(Trange)*100)

for UCAP in [1,0]:

    t = []
    Vcap = []
    Icap = []

    Vb = []
    Vs = []
    Vm = []
    Vl = []
    V0 = []
    V1 = []
    V2 = []
    V3 = []
    Vc = []
    I0 = []
    I1 = []
    I2 = []
    I3 = []
    Ip = []
    Ib = []
    Is = []
    Im = []
    Il = []
    Ic = []
    Ileak = []
    time2 = []
    file1 = []

    Vbatt = 6.55
```

```
if BATTERY and not UCAP:
    Vbatt = 6.59

Vbatt = 6.7

if BATTERY:
    Vi = Vbatt/m
else:
    Vi = 1.480
    Vi = 2.17

V0 = Vi
V1 = Vi
V2 = Vi
V3 = Vi
Vs = 0
Vm = 0
VI = 0
Vb = Vbatt

#Ultracapacitor Model
rleak = 60e3

c0 = 19.28
c1 = 1.05
c2 = 1.06
kv = 3.51
r0 = 25.1e-3
r1 = 186.4
r2 = 2.121e3
r3 = .188
c3 = .229
tau3 = .025
r3 = .188
r3 = .060
c3 = tau3/r3

#Battery Model
taus = .06
taus = .2
taus = .01
taul = 48.0
#(re + rs + rl) * 10 is about 2.0
#So rs + rl is about .2-re
#Let's say they are equal...
rs = .04
rs = .005
rl = .0812-rs
cs = taus/rs
cl = taul/rl
```

```
re = .150
re = .148
re = .147

#In experiment, re seems to be 137mOhms...
re = .137

rj = 0
if BATTERY and UCAP:
    #account for the pad resistnace of the 3 ultracaps
    rj = .015
rp = .01
rp = 0

rs = .005
cs = 2.0

rl = .0762
cl = 630.0
cl = 10.0

rs = .015
cs = 0.33333

rm = .025
cm = 8

rl = .0412
cl = 1165

if not UCAP:
    #rs = .00001
    #rl = .00001
    r0 = 10e12
    r1 = 10e12
    r2 = 10e12
    r3 = 10e12
    rleak = 10e12
if not BATTERY:
    re = 10e12

re0 = 1.0/(1.0/re+1.0/r0)
re1 = 1.0/(1.0/re+1.0/r1)
rel = 1.0/(1.0/re+1.0/rleak)
r0l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1)
r0l = 1.0/(1.0/r0+1.0/rleak)
r1l = 1.0/(1.0/r1+1.0/rleak)
res = 1.0/(1.0/re+1.0/rs)
r2l = 1.0/(1.0/r2+1.0/rleak)
r03l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r3+1.0/rleak)
r13l = 1.0/(1.0/r1+1.0/r3+1.0/rleak)
r23l = 1.0/(1.0/r2+1.0/r3+1.0/rleak)
```



```
re0l = 1.0/(1.0/re+1.0/r0+1.0/rleak)
re1l = 1.0/(1.0/re+1.0/r1+1.0/rleak)
r01l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1+1.0/rleak)
r02l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r2+1.0/rleak)
r12l = 1.0/(1.0/r1+1.0/r2+1.0/rleak)

r012l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1+1.0/r2+1.0/rleak)
r013l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1+1.0/r3+1.0/rleak)
r023l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r2+1.0/r3+1.0/rleak)
r123l = 1.0/(1.0/r1+1.0/r2+1.0/r3+1.0/rleak)

r0123l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1+1.0/r2+1.0/r3+1.0/rleak)

Ewaste = []
Eload = []
current = []
SOC = []

EFET = []
ER2 = []
ER3 = []
ERP = []
EBATT = []

Ewaste = 0
Eload = 0
EBATT = 0
EFET = 0
ER2 = 0
ER3 = 0
ERP = 0

current = 0

current_integral = 0
pulse_count = 0
pulse_flag = 0
start_load = 0
pulse_index_start = 0
pulse_index_end = 0
#print 'Max Time', 101.0*T/dt#max(range(0,int(101*T/dt)))

time2 = 0-dt
while time2 <= 105*T:
    time2 = time2 + dt
    #print time2
#for time in range(0,int(105*T/dt)):
    #time2 = (time*dt)

    #if time2[-1] >= 2.9 and time2[-1] <= 5.5: #
    #print time2 - floor(time2/T)*T
```

```

if time2 - floor(time2/T)*T <= D*T:# and time2[-1] < 2.3:
#if time2[-1] >= 2.1 and time2[-1] <= 120.3:
    Ip = (Load_Amplitude)
    #Ip.append(-.5)
    if pulse_flag:
        pulse_count = pulse_count + 1
        pulse_flag = 0
        if pulse_count >= 90 and pulse_count <= 100
and start_load != 0:
        #print 'Pulse %3.0d Energy: %3.3f'
        %(pulse_count-1,sum(Eload[start_load:-1]))
        start_load = time2/dt
    elif pulse_count >= 90:
        start_load = time2/dt
else:
    Ip = (0)
    pulse_flag = 1

#V0 currents:
I001 = V0 / (r0 + 1.0/(1.0/r123l+1.0/((m-1)*r0123l+re+rj)) )
I0series = I001 * r123l/(r123l + (m-1)*r0123l+re+rj)
I002 = I0series * r123l/(r0+r123l)
I011 = -(I001-I0series) * r23l/(r1+r23l)
I012 = I0series * r023l/(r1+r023l)
I021 = -(I001-I0series) * r13l/(r2+r13l)
I022 = I0series * r013l/(r2+r013l)
I031 = -(I001-I0series) * r12l/(r3+r12l)
I032 = I0series * r012l/(r3+r012l)
I00 = I001 + (m-1)*I002
I01 = I011 + (m-1)*I012
I02 = I021 + (m-1)*I022
I03 = I031 + (m-1)*I032
I0B = -m*I0series
I0S = I0B
I0M = I0B
I0L = I0B

#V1 currents:
I111 = V1 / (r1 + 1.0/(1.0/r023l+1.0/((m-1)*r0123l+re+rj)) )
I1series = I111 * r023l/(r023l + (m-1)*r0123l+re+rj)
I112 = I1series * r023l/(r1+r023l)
I101 = -(I111-I1series) * r23l/(r0+r23l)
I102 = I1series * r123l/(r0+r123l)
I121 = -(I111-I1series) * r03l/(r2+r03l)
I122 = I1series * r013l/(r2+r013l)
I131 = -(I111-I1series) * r02l/(r3+r02l)
I132 = I1series * r012l/(r3+r012l)
I10 = I101 + (m-1)*I102
I11 = I111 + (m-1)*I112
I12 = I121 + (m-1)*I122
I13 = I131 + (m-1)*I132
I1B = -m*I1series
I1S = I1B

```

```

I1M = I1B
I1L = I1B

#V2 currents:
I221 = V2 / (r2 + 1.0/(1.0/r013l+1.0/((m-1)*r0123l+re+rj)) )
I2series = I221 * r013l/(r013l + (m-1)*r0123l+re+rj)
I222 = I2series * r013l/(r2+r013l)
I201 = -(I221-I2series) * r13l/(r0+r13l)
I202 = I2series * r123l/(r0+r123l)
I211 = -(I221-I2series) * r03l/(r1+r03l)
I212 = I2series * r023l/(r1+r023l)
I231 = -(I221-I2series) * r01l/(r3+r01l)
I232 = I2series * r012l/(r3+r012l)
I20 = I201 + (m-1)*I202
I21 = I211 + (m-1)*I212
I22 = I221 + (m-1)*I222
I23 = I231 + (m-1)*I232
I2B = -m*I2series
I2S = I2B
I2M = I2B
I2L = I2B

#V3 currents:
I331 = V3 / (r3 + 1.0/(1.0/r012l+1.0/((m-1)*r0123l+re+rj)) )
I3series = I331 * r012l/(r012l + (m-1)*r0123l+re+rj)
I332 = I3series * r012l/(r3+r012l)
I311 = -(I331-I3series) * r02l/(r1+r02l)
I312 = I3series * r023l/(r1+r023l)
I321 = -(I331-I3series) * r01l/(r2+r01l)
I322 = I3series * r013l/(r2+r013l)
I301 = -(I331-I3series) * r12l/(r0+r12l)
I302 = I3series * r123l/(r0+r123l)
I30 = I301 + (m-1)*I302
I31 = I311 + (m-1)*I312
I32 = I321 + (m-1)*I322
I33 = I331 + (m-1)*I332
I3B = -m*I3series
I3S = I3B
I3M = I3B
I3L = I3B

#Vb, VI, VS currents:
IBB = (Vb+VI+Vs+Vm)/(re + m*r0123l + rj)
IBS = IBB + Vs/rs
IBM = IBB + Vm/rm
IBL = IBB + VI/rl
IB0 = -IBB * r123l/(r0+r123l)
IB1 = -IBB * r023l/(r1+r023l)
IB2 = -IBB * r013l/(r2+r013l)
IB3 = -IBB * r012l/(r3+r012l)

#Ip currents:
IPB = Ip * (m*r0123l+rj)/(m*r0123l+re+rj)

```

```

IPS = IPB
IPM = IPB
IPL = IPB
IP0 = Ip * re/(m*r0123l+re+rj) * r123l/(r0+r123l)
IP1 = Ip * re/(m*r0123l+re+rj) * r023l/(r1+r023l)
IP2 = Ip * re/(m*r0123l+re+rj) * r013l/(r2+r013l)
IP3 = Ip * re/(m*r0123l+re+rj) * r012l/(r3+r012l)

I0 = (I00 + I10 + I20 + I30 + IB0 + IP0)
I1 = (I01 + I11 + I21 + I31 + IB1 + IP1)
I2 = (I02 + I12 + I22 + I32 + IB2 + IP2)
I3 = (I03 + I13 + I23 + I33 + IB3 + IP3)
Ib = (I0B + I1B + I2B + I3B + IBB + IPB)
Is = (I0S + I1S + I2S + I3S + IBS + IPS)
Im = (I0M + I1M + I2M + I3M + IBM + IPM)
Il = (I0L + I1L + I2L + I3L + IBL + IPL)
Ic = (Ip-Ib)

Vb = (Vbatt)
Vc = (Vb + Vs + Vm + Vl - Ib*re)
#Vc = (Vb[-1]+Vl[-1]-Ib[-1]*re - (Vs[-1]-Is[-1]*rs) +
3.0*(V0[-1] - I0[-1]*r0) - 3.0*(V1[-1] - I1[-1]*r1))
#V0 = (V0[-1] - I0[-1]/(c0+kv*(V1[-1]-I1[-1]*r1))*dt)
V0 = (V0 - I0/( c0+kv*(V1-I1*r1)*((V1-I1*r1)>0) ))*dt )
V1 = (V1 - I1/c1*dt)
V2 = (V2 - I2/c2*dt)
V3 = (V3 - I3/c3*dt)
Vs = (Vs - Is/cs*dt)
Vm = (Vm - Im/cm*dt)
Vl = (Vl - Il/cl*dt)

Ileak = ((V0-I0*r1)/rleak)

if pulse_count >= 90 and pulse_count < 100:
    if pulse_index_start == 0:
        pulse_index_start = time2/dt

        pulse_index_end = time2/dt

        Ewaste = Ewaste + (
(pow(I0,2)*r0+pow(I1,2)*r1+pow(Ileak,2)*rleak + pow(Ib,2)*re + pow(Vs,2)/rs +
pow(Vl,2)/rl + pow(Ip,2)*.01)*dt )
        current = current + (Ib*dt)

        #FET and R1 waste
        EFET = EFET + ( (Vc-Ib*R3)*Ip*dt )
        #The resistor connected to Ground and Vcap-
        ER2 = ER2 + ( pow(Ip,2)*R2*dt )
        #The resistor in series with the battery
        #But it's only considered 'Load' when pulsing
        if Ip != 0:

```

```

        ER3 = ER3 + ( pow(Ib,2)*R3*dt )
        #The pad resistance at the Ucap
        ERP = ERP + ( pow(Ic,2)*rp*dt )
    else:
        ER3 = ER3
        ERP = ERP

        #Eload.append( ( Vc[-1]*Ip[-1] + pow(Ip[-1],2)*.01 +
pow(Ib[-1],2)*.01 + pow(Ic[-1],2)*rj ) *dt)
        Eload = Eload + (EFET+ER2+ER3+ERP)
        EBATT = EBATT + ( (Vc+Ib*R3)*Ib*dt )
        #Eload.append( ( Vc[-1]*Ip[-1]) *dt)

        current_integral = current_integral + Ib*dt

    if not UCAP:
        WAB.append(Eload/current)
        if len(WAH) > 0:
            Effgain.append((WAH[-1]-WAB[-1])/WAB[-1])
            #print 'Energy per unit charge: %3.2f J/A' %(WAH[-1])
    else:
        WAH.append(Eload/current)
        #print 'Energy per unit charge: %3.2f J/A' %(WAB[-1])

    if len(WAH) >= 1 and not UCAP:
        print Effgain[-1]

#Clear all of the massive arrays so the computer doesn't slow to a crawl when
plotting
I0 = []
I1 = []
I2 = []
Ib = []
Is = []
Il = []
Ic = []
Ileak = []
V0 = []
V1 = []
V2 = []
Vb = []
Vs = []
Vm = []
VI = []
Vc = []
time2 = []
EFET = []
ER2 = []
ER3 = []
ERP = []
EBATT = []
Eload = []
SOC = []

```

```

fig = figure()
ax1 = subplot(111)

if sweep_current:
    ax1.plot([x for x in Irange],[x*100.0 for x in Effgain],label='Simulated
Efficiency Gain')
elif sweep_duty:
    ax1.plot([x*100.0 for x in Drange],[x*100.0 for x in Effgain],label='Simulated
Efficiency Gain')
elif sweep_period:
    #ax1.plot([x*1000000.0 for x in Trange],[x*100.0 for x in
Effgain],label='Simulated Efficiency Gain')
    ax1.plot([x*1000.0 for x in Trange],[x*100.0 for x in
Effgain],label='Simulated Efficiency Gain')
    #ax1.plot([x for x in Trange],[x*100.0 for x in Effgain],label='Simulated
Efficiency Gain')

#Plot the experimental results, as well
if sweep_current:
    E8A10x = 8 #Pulse Amplitude
    E8A25x = 8 #Pulse Amplitude
    E16A10x = 16 #Pulse Amplitude
    E16A25x = 16 #Pulse Amplitude
elif sweep_duty:
    E8A10x = 10 #Pulse Duty Cycle
    E8A25x = 25 #Pulse Duty Cycle
    E16A10x = 10 #Pulse Duty Cycle
    E16A25x = 25 #Pulse Duty Cycle
elif sweep_period:
    E8A10x = 436 #Pulse Period
    E8A25x = 465 #Pulse Period
    E16A10x = 436 #Pulse Period
    E16A25x = 465 #Pulse Period

E8A10y = 9
E8A25y = 8
E16A10y = 36
E16A25y = 28
#ax1.plot(E8A10x,E8A10y,'gs',label='Experimental Efficiency Gain')
#ax1.plot(E8A25x,E8A25y,'gs')
#ax1.plot(E16A10x,E16A10y,'gs')
#ax1.plot(E16A25x,E16A25y,'gs')

if sweep_current:
    title('Efficiency gain by pulse amplitude, %3.0fms period, %2.0f%% duty
cycle pulses' %(T*1000.0,D*100.0))
    xlabel('Pulse Amplitude (A)')
    legend(loc=4,fancybox=True)
elif sweep_duty:
    title('Efficiency gain by duty cycle, %3.0fms period, %2.0fA pulses'
%(T*1000.0,Load_Amplitude))
    xlabel('Duty Cycle (%)')

```

```
        legend(loc=1,fancybox=True)
elif sweep_period:
    title('Efficiency gain by pulse period, %2.0fA, %2.0f%% duty cycle pulses'
          '%(Load_Amplitude,D*100.0)')
    #xlabel('Pulse Period (us)')
    xlabel('Pulse Period (ms)')
    #xlabel('Pulse Period (s)')
    legend(loc=1,fancybox=True)

ylabel('Efficiency Gain (%)')
ax1.set_ylim(ymin=0)
ax1.set_xlim(xmin=0)
#legend(loc=4,fancybox=True)
#legend(loc=1,fancybox=True)
#legend(loc=1,fancybox=True)
fig.savefig('Results.png',transparent=True)
show()
```

depreresults.py

```
#!/usr/bin/env python

# This script will simulate the depletion test.

import math
import tek
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
from pylab import *

import re, os
import string

plotfile = 0
output_text = 1
BATTERY = 1
m = 3

dt = .001

WAH = []
WAB = []
Effgain = []

R1 = 10.33e-3
R2 = 11.82e-3
R3 = 10.23e-3

PULSEMAX = 19000

for Dideal in [0.1]:
    D = Dideal
    Load_Amplitude = 16
    T = .436
    #T = .02

    for UCAP in [1,0]:

        t = []
        Vcap = []
        Icap = []

        Vb = []
        Vs = []
        Vm = []
        VI = []
        V0 = []
        V1 = []
        V2 = []
```



```
V3 = []
Vc = []
I0 = []
I1 = []
I2 = []
I3 = []
Ip = []
Ib = []
Is = []
Im = []
Il = []
Ic = []
Ileak = []
time2 = []
filet = []

#         if plotfile:
#             figure()
#             file = "./Winter 2011/Depletion/ESR April 11/UCAP good 500mA
2000s charge ICAP.isf"
#             #Hybrid 16A10 pulses IBAT.isf"
#             #Battery 16A pulses IBAT.isf"
#             #UCAP good 500mA 2000s charge ICAP.isf"
#
#             decimation_ratio = 10
#             #For the V file:
#             with open(file, "rb") as fptr:
#                 Y_t, samples_info = tek.read_isf_file( fptr,
decimation_ratio )
#
#             # Printing the samples info to the console
#             print('filename: %s' % f )
#             for k,v in samples_info.iteritems():
#                 print("\tKey: %s Value: %s' % (k, v) )
#
#             #examples on how to get the sample info
#             y_zero = float(samples_info['YZERO'])
#             y_mult = float(samples_info['YMULT'])
#             y_off = float(samples_info['YOFF'])
#             v_scale = float(samples_info['VSCALE'])
#             v_pos = float(samples_info['VPOS'])
#
#             h_delay = float(samples_info['HDELAY'])
#             h_scale = float(samples_info['HSCALE'])
#             x_incr = float(samples_info['XINCR'])
#
#             number_of_samples = int(samples_info['NR_PT'])
#
#             # rescale and apply offsets
#             filedata = y_zero + y_mult * (Y_t - y_off)# + v_pos
#
#             # plot
```

```

#           filet = linspace(0, number_of_samples*x_incr,
num=number_of_samples/decimation_ratio )
#           filet = [x-filet[0] for x in filet]
#           filedt = filet[1] - filet[0]
#           filet = filet[0:-1:int(round(dt/filedt))]
#           filedata = filedata[0:-1:int(round(dt/filedt))]

#           Vfile = "./Winter 2011/Depletion/ESR April 11/UCAP good 10A
pulses.isf"
#           #Hybrid 16A10 pulses VBAT.isf"
#           #UCAP good 500mA 2000s charge VCAP.isf"
#           #UCAP good 10A pulses.isf"
#           #Battery 16A pulses VBAT.isf"
#           #VCAP ESR 10A 5s.isf"
#
#           #Battery 16A pulses VBAT.isf"
#           decimation_ratio = 10
#           #For the V file:
#           with open(Vfile, "rb") as fptr:
#               Y_t, samples_info = tek.read_isf_file( fptr,
decimation_ratio )
#
#           # Printing the samples info to the console
#           print('filename: %s' % f )
#           for k,v in samples_info.iteritems():
#               print('\tKey: %s Value: %s' % (k, v) )
#
#           #examples on how to get the sample info
#           y_zero = float(samples_info['YZERO'])
#           y_mult = float(samples_info['YMULT'])
#           y_off = float(samples_info['YOFF'])
#           v_scale = float(samples_info['VSCALE'])
#           v_pos = float(samples_info['VPOS'])
#
#           h_delay = float(samples_info['HDELAY'])
#           h_scale = float(samples_info['HSCALE'])
#           x_incr = float(samples_info['XINCR'])
#
#           number_of_samples = int(samples_info['NR_PT'])
#
#           # rescale and apply offsets
#           if len(filet) <= 0:
#               filet = linspace(0, number_of_samples*x_incr,
num=number_of_samples/decimation_ratio )
#
#               filet = [x-filet[0] for x in filet]
#               filedt = filet[1] - filet[0]
#               filet = filet[0:-1:int(round(dt/filedt))]
#
#           Vdata = y_zero + y_mult * (Y_t - y_off)# + v_pos
#
#

```

```

#           Vdata = Vdata[0:-1:int(round(dt/filedt))]

Vbatt = 6.55

if BATTERY and not UCAP:
    Vbatt = 6.59

Vbatt = 6.7

#Define the starting battery voltges for each test case
if BATTERY and UCAP and Load_Amplitude == 8 and Dideal == .10:
    Vbatt = 6.73
    D = .1018
    T = .435947
elif BATTERY and not UCAP and Load_Amplitude == 8 and Dideal ==
.10:
    Vbatt = 6.93
    Vbatt = 6.73
    D = .1018
    T = .435313
elif BATTERY and UCAP and Load_Amplitude == 8 and Dideal == .25:
    Vbatt = 6.73
    D = .2527
    T = .46412
elif BATTERY and not UCAP and Load_Amplitude == 8 and Dideal ==
.25:
    Vbatt = 6.83
    Vbatt = 6.73
    D = .2544
    T = .46839
elif BATTERY and UCAP and Load_Amplitude == 16 and Dideal ==
.10:
    Vbatt = 6.38
    #Vbatt = 6.33
    D = .1014
    T = .435116
elif BATTERY and not UCAP and Load_Amplitude == 16 and Dideal ==
.10:
    Vbatt = 6.33
    Vbatt = 6.38
    D = .1019
    T = .43548
elif BATTERY and UCAP and Load_Amplitude == 16 and Dideal ==
.25:
    Vbatt = 6.73
    D = .2534
    T = .464147
elif BATTERY and not UCAP and Load_Amplitude == 16 and Dideal ==
.25:
    Vbatt = 6.73
    #Vbatt = 6.90
    D = .2533

```

```
T = .465315

#Vbatt = 6.70

if BATTERY:
    Vi = Vbatt/m
else:
    Vi = 1.480
    Vi = 2.17
V0.append(Vi)
V1.append(Vi)
V2.append(Vi)
V3.append(Vi)
Vs.append(0)
Vm.append(0)
Vl.append(0)
Vb.append(Vbatt)

#Ultracapacitor Model
rleak = 60e3

c0 = 19.28
c1 = 1.05
c2 = 1.06
kv = 3.51
r0 = 25.1e-3
r1 = 186.4
r2 = 2.121e3
r3 = .188
c3 = .229
tau3 = .025
#tau3 = .001
r3 = .188
r3 = .060
c3 = tau3/r3

#Battery Model
taus = .06
taus = .2
taus = .01
taul = 48.0
#(re + rs + rl) * 10 is about 2.0
#So rs + rl is about .2-re
#Let's say they are equal...
rs = .04
rs = .005
rl = .0812-rs
cs = taus/rs
cl = taul/rl

re = .150
re = .148
```

```
re = .147

#In experiment, re seems to be 137mOhms...
re = .137

rj = 0
if BATTERY and UCAP:
    #account for the pad resistnace of the 3 ultracaps
    rj = .015
rp = .01
rp = 0

rs = .005
cs = 2.0

rl = .0762
cl = 630.0
cl = 10.0

rs = .015
cs = 0.33333

rm = .025
cm = 8

rl = .0412
cl = 1165

if not UCAP:
    #rs = .00001
    #rl = .00001
    r0 = 10e12
    r1 = 10e12
    r2 = 10e12
    r3 = 10e12
    rleak = 10e12
if not BATTERY:
    re = 10e12

re0 = 1.0/(1.0/re+1.0/r0)
re1 = 1.0/(1.0/re+1.0/r1)
rel = 1.0/(1.0/re+1.0/rleak)
r0l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1)
r0l = 1.0/(1.0/r0+1.0/rleak)
r1l = 1.0/(1.0/r1+1.0/rleak)
res = 1.0/(1.0/re+1.0/rs)
r2l = 1.0/(1.0/r2+1.0/rleak)
r03l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r3+1.0/rleak)
r13l = 1.0/(1.0/r1+1.0/r3+1.0/rleak)
r23l = 1.0/(1.0/r2+1.0/r3+1.0/rleak)
```

```
re0l = 1.0/(1.0/re+1.0/r0+1.0/rleak)
re1l = 1.0/(1.0/re+1.0/r1+1.0/rleak)
r01l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1+1.0/rleak)
r02l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r2+1.0/rleak)
r12l = 1.0/(1.0/r1+1.0/r2+1.0/rleak)

r012l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1+1.0/r2+1.0/rleak)
r013l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1+1.0/r3+1.0/rleak)
r023l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r2+1.0/r3+1.0/rleak)
r123l = 1.0/(1.0/r1+1.0/r2+1.0/r3+1.0/rleak)

r0123l = 1.0/(1.0/r0+1.0/r1+1.0/r2+1.0/r3+1.0/rleak)

Ewaste = []
Eload = []
current = []
SOC = []

EFET = []
ER2 = []
ER3 = []
ERP = []
EBATT = []

current_integral = 0
pulse_count = 0
pulse_flag = 0
start_load = 0
pulse_index_start = 0
pulse_index_end = 0

V0 = V0[-1]
V1 = V1[-1]
V2 = V2[-1]
V3 = V3[-1]
Vs = Vs[-1]
Vm = Vm[-1]
VI = VI[-1]
Vb = Vb[-1]

Ewaste = 0
Eload = 0
current = 0
SOC = 0
EFET = 0
ER2 = 0
ER3 = 0
ERP = 0
EBATT = 0

#print 'Max Time', 101.0*T/dt#max(range(0,int(101*T/dt)))
```

```

time = 0 - dt
while time <= (PULSEMAX+2)*T:
#for time in range(0,int((PULSEMAX+2)*T/dt)):
    time = time + dt
    time2 = time

    #if time2[-1] >= 2.9 and time2[-1] <= 5.5: #
if time2 - floor(time2/T)*T <= D*T:# and time2[-1] < 2.3:
#if time2[-1] >= 2.1 and time2[-1] <= 120.3:
    #Ip.append(Load_Amplitude)
    Ip = Load_Amplitude
    if pulse_flag:
        pulse_count = pulse_count + 1
        pulse_flag = 0
    else:
        #Ip.append(0)
        Ip = 0
        pulse_flag = 1

#V0 currents:
#I001 = V0[-1] / (r0 + 1.0/(1.0/r123l+1.0/((m-
1)*r0123l+re+rj)) )
I001 = V0 / (r0 + 1.0/(1.0/r123l+1.0/((m-1)*r0123l+re+rj)) )
I0series = I001 * r123l/(r123l + (m-1)*r0123l+re+rj)
I002 = I0series * r123l/(r0+r123l)
I011 = -(I001-I0series) * r23l/(r1+r23l)
I012 = I0series * r023l/(r1+r023l)
I021 = -(I001-I0series) * r13l/(r2+r13l)
I022 = I0series * r013l/(r2+r013l)
I031 = -(I001-I0series) * r12l/(r3+r12l)
I032 = I0series * r012l/(r3+r012l)
I00 = I001 + (m-1)*I002
I01 = I011 + (m-1)*I012
I02 = I021 + (m-1)*I022
I03 = I031 + (m-1)*I032
I0B = -m*I0series
I0S = I0B
I0M = I0B
I0L = I0B

#V1 currents:
#I111 = V1[-1] / (r1 + 1.0/(1.0/r023l+1.0/((m-
1)*r0123l+re+rj)) )
I111 = V1 / (r1 + 1.0/(1.0/r023l+1.0/((m-1)*r0123l+re+rj)) )
I1series = I111 * r023l/(r023l + (m-1)*r0123l+re+rj)
I112 = I1series * r023l/(r1+r023l)
I101 = -(I111-I1series) * r23l/(r0+r23l)
I102 = I1series * r123l/(r0+r123l)
I121 = -(I111-I1series) * r03l/(r2+r03l)
I122 = I1series * r013l/(r2+r013l)
I131 = -(I111-I1series) * r02l/(r3+r02l)
I132 = I1series * r012l/(r3+r012l)
I10 = I101 + (m-1)*I102

```

```

I11 = I111 + (m-1)*I112
I12 = I121 + (m-1)*I122
I13 = I131 + (m-1)*I132
I1B = -m*I1series
I1S = I1B
I1M = I1B
I1L = I1B

#V2 currents:
#I221 = V2[-1] / (r2 + 1.0/(1.0/r013l+1.0/((m-
1)*r0123l+re+rj)) )
I221 = V2 / (r2 + 1.0/(1.0/r013l+1.0/((m-1)*r0123l+re+rj)) )
I2series = I221 * r013l/(r013l + (m-1)*r0123l+re+rj)
I222 = I2series * r013l/(r2+r013l)
I201 = -(I221-I2series) * r13l/(r0+r13l)
I202 = I2series * r123l/(r0+r123l)
I211 = -(I221-I2series) * r03l/(r1+r03l)
I212 = I2series * r023l/(r1+r023l)
I231 = -(I221-I2series) * r01l/(r3+r01l)
I232 = I2series * r012l/(r3+r012l)
I20 = I201 + (m-1)*I202
I21 = I211 + (m-1)*I212
I22 = I221 + (m-1)*I222
I23 = I231 + (m-1)*I232
I2B = -m*I2series
I2S = I2B
I2M = I2B
I2L = I2B

#V3 currents:
#I331 = V3[-1] / (r3 + 1.0/(1.0/r012l+1.0/((m-
1)*r0123l+re+rj)) )
I331 = V3 / (r3 + 1.0/(1.0/r012l+1.0/((m-1)*r0123l+re+rj)) )
I3series = I331 * r012l/(r012l + (m-1)*r0123l+re+rj)
I332 = I3series * r012l/(r3+r012l)
I311 = -(I331-I3series) * r02l/(r1+r02l)
I312 = I3series * r023l/(r1+r023l)
I321 = -(I331-I3series) * r01l/(r2+r01l)
I322 = I3series * r013l/(r2+r013l)
I301 = -(I331-I3series) * r12l/(r0+r12l)
I302 = I3series * r123l/(r0+r123l)
I30 = I301 + (m-1)*I302
I31 = I311 + (m-1)*I312
I32 = I321 + (m-1)*I322
I33 = I331 + (m-1)*I332
I3B = -m*I3series
I3S = I3B
I3M = I3B
I3L = I3B

#Vb, Vl, Vm, VS currents:
#IBB = (Vb[-1]+Vl[-1]+Vm[-1]+Vs[-1])/(re + m*r0123l + rj)
IBB = (Vb+Vl+Vm+Vs)/(re + m*r0123l + rj)

```



```

IBS = IBB + Vs/rs
IBM = IBB + Vm/rm
IBL = IBB + Vl/rl
IB0 = -IBB * r123l/(r0+r123l)
IB1 = -IBB * r023l/(r1+r023l)
IB2 = -IBB * r013l/(r2+r013l)
IB3 = -IBB * r012l/(r3+r012l)

#Ip currents:
IPB = Ip * (m*r0123l+rj)/(m*r0123l+re+rj)
IPS = IPB
IPM = IPB
IPL = IPB
IP0 = Ip * re/(m*r0123l+re+rj) * r123l/(r0+r123l)
IP1 = Ip * re/(m*r0123l+re+rj) * r023l/(r1+r023l)
IP2 = Ip * re/(m*r0123l+re+rj) * r013l/(r2+r013l)
IP3 = Ip * re/(m*r0123l+re+rj) * r012l/(r3+r012l)

#Add them all up!
IO = (IO0 + IO1 + IO2 + IO3 + IB0 + IP0)
I1 = (IO1 + I11 + I21 + I31 + IB1 + IP1)
I2 = (IO2 + I12 + I22 + I32 + IB2 + IP2)
I3 = (IO3 + I13 + I23 + I33 + IB3 + IP3)
Ib = (IOB + I1B + I2B + I3B + IBB + IPB)
Is = (IOS + I1S + I2S + I3S + IBS + IPS)
Im = (IOM + I1M + I2M + I3M + IBM + IPM)
Il = (IOL + I1L + I2L + I3L + IBL + IPL)
Ic = (Ip-Ib)

Vb = (Vbatt)
Vc = (Vb + Vs + Vm + Vl - Ib*re)
#Vc = (Vb+Vl-Ib*re - (Vs-Is*rs) + 3.0*(V0 - IO*r0) - 3.0*(V1
- I1*r1))

#V0 = (V0 - IO/(c0+kv*(V1-I1*r1))*dt)
V0 = (V0 - IO/( c0+kv*(V1-I1*r1)*((V1-I1*r1)>0) ))*dt )
V1 = (V1 - I1/c1*dt)
V2 = (V2 - I2/c2*dt)
V3 = (V3 - I3/c3*dt)
Vs = (Vs - Is/cs*dt)
Vm = (Vm - Im/cm*dt)
Vl = (Vl - Il/cl*dt)
Ileak = ((V0-I0*r1)/rleak)

if pulse_count >= 90 and pulse_count < PULSEMAX:
    if pulse_index_start == 0:
        pulse_index_start = time

    pulse_index_end = time

    #Ewaste.append( (pow(IO[-1],2)*r0+pow(I1[-
1],2)*r1+pow(Ileak[-1],2)*rleak + pow(Ib[-1],2)*re + pow(Vs[-1],2)/rs + pow(Vl[-
1],2)/rl + pow(Ip[-1],2)*.01)*dt )
    #current.append(Ib[-1]*dt)

```

```

current = current + Ib*dt

#FET and R1 waste
#
EFET.append( (Vc[-1]-Ib[-1]*R3)*Ip[-1]*dt )
EFET = EFET + ( (Vc-Ib*R3)*Ip*dt )
#The resistor connected to Ground and Vcap-
#
ER2.append( pow(Ip[-1],2)*R2*dt )
ER2 = ER2 + ( pow(Ip,2)*R2*dt )
#The resistor in series with the battery
#But it's only considered 'Load' when pulsing
if Ip != 0:
#
ER3.append( pow(Ib[-1],2)*R3*dt )
#The pad resistance at the Ucap
#ERP.append( pow(Ic[-1],2)*rp*dt )
#
ERP.append( pow(Ic[-1],2)*rj*dt )

ER3 = ER3 + ( pow(Ib,2)*R3*dt )
#The pad resistance at the Ucap
#ERP.append( pow(Ic[-1],2)*rp*dt )
ERP = ERP + ( pow(Ic,2)*rj*dt )
else:
#
ER3.append(0)
#
ERP.append(0)

ER3 = ER3 + (0)
ERP = ERP + (0)

#
Eload.append(EFET[-1]+ER2[-1]+ER3[-1]+ERP[-1])
#
EBATT.append( (Vc[-1]+Ib[-1]*R3)*Ib[-1]*dt )

Eload = (EFET+ER2+ER3+ERP)
EBATT = EBATT + ( (Vc+Ib*R3)*Ib*dt )
else:
#
Eload.append(0)
Eload = Eload + (0)
#
current_integral = current_integral + Ib[-1]*dt
current_integral = current_integral + Ib*dt

if output_text:
if UCAP:
print '\nHybrid ESS, %2.1fA %2.1f%% Duty Cycle,
%4.2fms period' %(Load_Amplitude,D*100.0,T*1000.0)
else:
print '\nBattery-only ESS, %2.1fA %2.1f%% Duty
Cycle, %4.2fms period' %(Load_Amplitude,D*100.0,T*1000.0)
#print 'Energy waste: %3.3f J' %(sum(Ewaste))
print 'Energy delivered to load: %3.3f Wh'
%(sum(Eload)/3600)
print 'Energy delivered by battery: %3.3f Wh'
%(sum(EBATT)/3600)
print '\nEFET: %3.6f Wh' %(sum(EFET)/3600)
print 'ER2: %3.6f Wh' %(sum(ER2)/3600)
print 'ER3: %3.6f Wh' %(sum(ER3)/3600)

print 'ERP: %3.6f Wh\n' %(sum(ERP)/3600)

print 'Ibattery: %3.3f Ah' %(sum(current)/3600)
if not UCAP:
WAB.append(sum(Eload)/sum(current))
if len(WAH) > 0:
Effgain.append((WAH[-1]-WAB[-1])/WAB[-1])
#print 'Energy per unit charge: %3.2f J/A' %(WAH[-1])
if output_text:
print 'Efficiency Gain: %3.3f%%' %(Effgain[-1]*100.0)
else:
WAH.append(sum(Eload)/sum(current))
#print 'Energy per unit charge: %3.2f J/A' %(WAB[-1])

```