ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ ΓΙΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κοντογώγος Γεώργιος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ ΓΙΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΠΩΣΗΣ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κοντογώγος Γεώργιος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25η Σεπτεμβρίου 2024.

.....	.....	.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου	Ιωάννης Γκόνος	Χρήστος Χριστοδούλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024

……

Γεώργιος Κοντογώγος

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

Copyright © Γεώργιος Κοντογώγος, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights served.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πηγή ενέργειας είναι ένα από τα σημαντικότερα δομικά στοιχεία των ηλεκτρικών οχημάτων. Στη πλειοψηφία των ηλεκτρικών οχημάτων η βασική πηγή ενέργειας είναι οι μπαταρίες. Εξαιτίας της περιορισμένης απόδοσης που μπορεί να προσφέρει μία μπαταρία, στη σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι όπου ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να έχει πολλαπλές πηγές ενέργειας. Η επικρατέστερη ιδέα είναι αυτή της χρήσης των υπερπυκνωτών ως μία δευτερεύουσα πηγή ενέργειας. Οι υπερπυκνωτές όπως και οι μπαταρίες μπορούν να αποθηκεύσουν ηλεκτρική ενέργεια και να την διοχετεύσουν σε ένα φορτίο. Οι ιδιότητες των υπερπυκνωτών σε συνδυασμό με τις ιδιότητες των μπαταριών μπορούν να δημιουργήσουν ένα πολύ ισχυρό σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας και για αυτό το λόγο συναντάται όλο και πιο συχνά πλέον στα σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα. Ένα τέτοιο σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας ονομάζεται υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας (HESS). Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τα ακόλουθα πειράματα αποδεικνύουν πόσο χρήσιμο είναι ένα υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας στα ηλεκτρικά οχήματα. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν πειράματα και προσομοιώσεις ξεχωριστά για κάθε πηγή (μπαταρίες και υπερπυκνωτές), αλλά και για το ολοκληρωμένο HESS με τη συνύπαρξη των δύο πηγών ενέργειας.

Λέξεις κλειδιά: Μπαταρίες, υπερπυκνωτές, υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας, ηλεκτρικά οχήματα, γήρανση μπαταρίας, ελεγκτής.

ABSTRACT

The energy source is one of the most important structural components of electric vehicles. In the majority of electric vehicles, the primary energy source is batteries. Due to the limited efficiency that a battery can offer, methods have been developed in the modern automotive industry where an electric vehicle can have multiple energy sources. The prevailing idea is the use of supercapacitors as a secondary energy source. Supercapacitors, like batteries, can store electrical energy and deliver it to a load. The properties of supercapacitors combined with the properties of batteries can create a very powerful energy supply system, which is why it is increasingly found in modern electric vehicles. Such an energy supply system is called a Hybrid Energy Storage System (HESS). The conclusions drawn from the following experiments demonstrate how beneficial a hybrid energy storage system is for electric vehicles. Specifically, experiments and simulations were conducted separately for each source (batteries and supercapacitors), as well as for the integrated HESS with the coexistence of both energy sources.

Keywords: Batteries, supercapacitors, hybrid energy storage system, electric vehicles, battery aging, controller.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα καθώς και για την καθοδήγηση και την άψογη συνεργασία του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Μιχάλη Κώτσια, για την καθοδήγηση και για την πολύτιμη βοήθεια του κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Τεχνολογία μπαταριών στην ηλεκτροκίνηση.....3

1.1 Κατάλληλος τύπος μπαταρίας στην ηλεκτροκίνηση.....3

1.2 Οργάνωση μπαταριών σε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο.....6

1.3 Γήρανση της μπαταρίας στα σύγχρονα ηλεκτρικά αυτοκίνητα.....7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Οι υπερπυκνωτές στην ηλεκτροκίνηση.....9

2.1 Λόγοι χρήσης υπερπυκνωτών στην ηλεκτροκίνηση 9

2.2 Είδη υπερπυκνωτών.....10

2.3 Σύγκριση μπαταρίας και υπερπυκνωτή.....13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας ηλεκτρικών αυτοκινήτων 16

3.1 Γενικά περί HESS.....16

3.2 Πλεονεκτήματα των HESS έναντι των ESS (energy storage system).....17

3.3 Η χρήση του DC μετατροπέα.....18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Πειραματική διαδικασία και προσομοιώσεις 19

4.1 Εισαγωγή στα εργαλεία προσομοίωσης.....19

4.2 Προσομοίωση στοιχείων υβριδικού συστήματος.....20

4.2.1 Μοντελοποίηση μπαταρίας.....20

4.2.2 Μοντελοποίηση υπερπυκνωτή.....27

4.3 Πειραματικές μετρήσεις μπαταριών.....32

4.4 Συσχέτιση τάσης-χωρητικότητας της μπαταρίας.....37

4.5 Συσχέτιση τάσης-SOC της μπαταρίας.....39

4.6 Πειραματικές μετρήσεις υπερπυκνωτών.....40

4.6.1 Φόρτιση υπερπυκνωτών.....40

4.6.2 Αποφόρτιση υπερπυκνωτών.....43

4.7 Βελτίωση στην απόδοση αυτονομίας των μπαταριών με τη χρήση HESS.....46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας μπαταρίας-υπερπυκνωτή.....51

5.1 Η ιδέα πίσω από τη μοντελοποίηση του υβριδικού συστήματος……..51

5.2 Η υλοποίηση του υβριδικού συστήματος τροφοδοσίας ενέργειας……52

5.2.1 Ο ηλεκτρικός κινητήρας DC……53

5.2.2 Το pack των μπαταριών……..55

5.2.3 Ο υπερπυκνωτής ως πηγή τροφοδοσίας……..58

5.2.4 Ο ελεγκτής του υβριδικού συστήματος τροφοδοσίας ……..60

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία……69

6.1 Συμπεράσματα……69

6.2 Μελλοντική εργασία……72

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ……73

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Η εξέλιξη πωλήσεων των ηλεκτρικών αυτοκινήτων από το 2015 μέχρι το 2023[1]…1

Σχήμα 2: Το Battery pack ενός Chevrolet Bolt [2]……6

Σχήμα 3: Οι 3 βασικές ομάδες υπερπυκνωτών βασιζόμενες στον μηχανισμό αποθήκευσης ενέργειας[4]……..10

Σχήμα 4: Τρόπος αποθήκευσης ενέργειας για κάθε ένα είδος υπερπυκνωτή. (a) EDLC, (b) Ψευδοπυκνωτές, (c) Υβριδικοί υπερπυκνωτές[4]……12

Σχήμα 5: Η ανάπτυξη των υπερπυκνωτών στην αγορά από το 2007 μέχρι το 2020[7]……..13

Σχήμα 6: Σχέση μεταξύ πυκνότητας ενέργειας και πυκνότητας ισχύος για μπαταρίες και υπερπυκνωτές[4]……..14

Σχήμα 7: Το HESS ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου και οι ροές ισχύος από και προς το σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας[5]……16

Σχήμα 8: Το μοντέλο της μπαταρίας Li-ion σε περιβάλλον lt-spice……..20

Σχήμα 9: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για DC φορτίο στα 0.2 A……21

Σχήμα 10: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης με τη χρήση των cursors σε περιβάλλον lt-spice……..21

Σχήμα 11: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για το SOC της μπαταρίας……22

Σχήμα 12: Το μοντέλο της μπαταρίας Li-ion σε περιβάλλον simulink……22

Σχήμα 13: Η συμπεριφορά της μπαταρίας για διάφορες τιμές ρεύματος φορτίου……23

Σχήμα 14: Η σχέση μεταξύ της τάσης και της χωρητικότητας της μπαταρίας για διάφορες τιμές του ρεύματος φορτίου……24

Σχήμα 15: Προσομοίωση για 36 κύκλους ζωής της μπαταρίας……24

Σχήμα 16: Προσομοίωση για 72 κύκλους ζωής της μπαταρίας……25

Σχήμα 17: Προσομοίωση για 144 κύκλους ζωής της μπαταρίας……..25

Σχήμα 18: Η χωρητικότητα της μπαταρίας σε Ah συναρτήσει των κύκλων ζωής……26

Σχήμα 19: Το μοντέλο του υπερπυκνωτή για την φόρτιση σε περιβάλλον lt-spice……27

Σχήμα 20: Το μοντέλο του υπερπυκνωτή για την αποφόρτιση σε περιβάλλον lt-spice……28

Σχήμα 21: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την φόρτιση του υπερπυκνωτή σε περιβάλλον lt-spice……29

Σχήμα 22: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης φόρτισης με τη χρήση των cursors σε περιβάλλον lt-spice……..29

Σχήμα 23: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την αποφόρτιση του υπερπυκνωτή σε περιβάλλον lt-spice……..29

Σχήμα 24: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης αποφόρτισης με τη χρήση των cursors σε περιβάλλον lt-spice……..30

Σχήμα 25: Καμπύλη για τον χρόνο αποφόρτισης του υπερπυκνωτή για τις διάφορες τιμές του ρεύματος φορτίου……..31

Σχήμα 26: Το datasheet του κινητήρα των 12 Volt και 1.2 A……32

Σχήμα 27: Ο μικροελεγκτής PWM……33

Σχήμα 28: Η διάταξη του πειράματος……34

Σχήμα 29: Τάση στα άκρα του πακέτου των τριών μπαταριών……35

Σχήμα 30: Το ρεύμα των μπαταριών προς τον κινητήρα……35

Σχήμα 31: Η τάση στα άκρα του πακέτου των τριών μπαταριών σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις……36

Σχήμα 32: Η τάση στα άκρα των μπαταριών σύμφωνα με την προσομοίωση σε περιβάλλον lt-spice……36

Σχήμα 33: Η τάση στα άκρα των μπαταριών σύμφωνα με την προσομοίωση σε περιβάλλον simulink……..37

Σχήμα 34: Η τάση στα άκρα της μπαταρίας για προσομοίωση με ρεύμα φορτίου 0.2 A και χωρητικότητα 4600 mAh σε περιβάλλον lt-spice……38

Σχήμα 35: Η τάση στα άκρα της μπαταρίας για προσομοίωση με ρεύμα φορτίου 0.2 A εώς 1.2 A και χωρητικότητα 4600 mAh σε περιβάλλον simulink……38

Σχήμα 36: Η χωρητικότητα των μπαταριών κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών μετρήσεων……39

Σχήμα 37: Το SOC των μπαταριών κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών μετρήσεων……40

Σχήμα 38: Η φόρτιση του υπερπυκνωτή μέσω της γεννήτριας GW INSTEK GPD-2303s…..41

Σχήμα 39: Η τάση φόρτισης του υπερπυκνωτή 1 των 100 Farad σε σχέση με το χρόνο…..41

Σχήμα 40: Η τάση φόρτισης του υπερπυκνωτή 2 των 100 Farad σε σχέση με το χρόνο…..42

Σχήμα 41: Το datasheet του κινητήρα που χρησιμοποιήθηκε για την αποφόρτιση των υπερπυκνωτών……..43

Σχήμα 42: Η τάση αποφόρτισης του υπερπυκνωτή 1 των 100 Farad σε σχέση με το χρόνο..44

Σχήμα 43: Το ρεύμα αποφόρτισης του υπερπυκνωτή 1 των 100 Farad σε σχέση με το χρόνο…….44

Σχήμα 44: Η τάση αποφόρτισης του υπερπυκνωτή 2 των 100 Farad σε σχέση με το χρόνο…….45

Σχήμα 45: Το ρεύμα αποφόρτισης του υπερπυκνωτή των 100 Farad σε σχέση με το χρόνο…….45

Σχήμα 45(α): Προσομοίωση για 36 κύκλους ζωής της μπαταρίας στο υβριδικό σύστημα…..46

Σχήμα 45(β): Προσομοίωση για 72 κύκλους ζωής της μπαταρίας στο υβριδικό σύστημα…..47

Σχήμα 45(γ): Προσομοίωση για 144 κύκλους ζωής της μπαταρίας στο υβριδικό σύστημα..47

Σχήμα 45(δ): Η χωρητικότητα της μπαταρίας σε Ah συναρτήσει των κύκλων ζωής στο υβριδικό σύστημα……..49

Σχήμα 45(ε): Η χωρητικότητα της μπαταρίας σε Ah συναρτήσει των κύκλων ζωής……..49

Σχήμα 45(στ): Αποφόρτιση της μπαταρίας που βρίσκεται στον 1ο κύκλο ζωής της……50

Σχήμα 45(ζ): Αποφόρτιση της μπαταρίας που βρίσκεται στον 100ο κύκλο ζωής της……..50

Σχήμα 46: Το ολοκληρωμένο υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας του DC κινητήρα (HESS)……..52

Σχήμα 47: Ο DC ηλεκτρικός κινητήρας σε περιβάλλον simulink…….53

Σχήμα 48: Η εσωτερική υλοποίηση του DC Motor1…….53

Σχήμα 49: Ρεύμα και στροφές της μηχανής αντίστοιχα για προσομοίωση χωρίς φορτίο στον δρομέα μέχρι τα 0.5 sec και μετέπειτα προσθήκη φορτίου……..54

Σχήμα 50: Η ανύψωση του ρεύματος του κινητήρα κατά την εκκίνηση……54

Σχήμα 51: Το pack(πακέτο) των μπαταριών σε περιβάλλον simulink…….55

Σχήμα 52: Το ρεύμα του pack των μπαταριών για κενό φορτίο στον άξονα της μηχανής…56

Σχήμα 53: Το SOC και η τάση στα άκρα του pack των μπαταριών για κενό φορτίο στον άξονα της μηχανής……56

Σχήμα 54: Το ρεύμα του pack των μπαταριών για κενό φορτίο στον άξονα και μετέπειτα προσθήκη φορτίου……..57

Σχήμα 55: Το SOC και η τάση στα άκρα του pack των μπαταριών για κενό φορτίο στον άξονα και μετέπειτα προσθήκη φορτίου……..57

Σχήμα 56: Το pack(πακέτο) των υπερπυκνωτών σε περιβάλλον simulink……58

Σχήμα 57: Το ρεύμα του υπερπυκνωτή για ελάχιστο φορτίο στο άξονα του δρομέα της μηχανής…….59

Σχήμα 58: Η τάση στην έξοδο του υπεπρπυκνωτή και το SOC του για ρεύμα φορτίου 0.33 A……..59

Σχήμα 59: Το ρεύμα του υπερπυκνωτή με μετέπειτα προσθήκη φορτίου στον άξονα της μηχανής……59

Σχήμα 60: Η τάση και το SOC του υπεπρυκνωτή για μετέπειτα προσθήκη φορτίου στον άξονα της μηχανής……60

Σχήμα 61: Το block του ελεγκτή στο simulink……62

Σχήμα 62: Το πρώτο μέρος του ελεγκτή……..63

Σχήμα 63: Το δεύτερο μέρος του ελεγκτή……63

Σχήμα 64: Το pack των μπαταριών με την συνθήκη ελέγχου στην είσοδο του…….64

Σχήμα 65: Το pack των υπερπυκνωτών με την συνθήκη ελέγχου στην είσοδο του……..65

Σχήμα 66: Αποτελέσματα 1ης προσομοίωσης: (α) Ρεύμα φορτίου, (β) Σήμα << sc >>, (γ) Σήμα << bat >>, (δ) Ρεύμα μπαταριών, (ε) Τάση στα άκρα των μπαταριών, (στ) SOC μπαταριών……66

Σχήμα 67: Αποτελέσματα 1ης προσομοίωσης: (α) Ρεύμα φορτίου, (β) Σήμα << sc >>, (γ) Σήμα << bat >>, (δ) Ρεύμα υπερπυκνωτών, (ε) Τάση στα άκρα των υπερπυκνωτών, (στ) SOC υπερπυκνωτών……66

Σχήμα 68: Αποτελέσματα 2ης προσομοίωσης: (α) Ρεύμα φορτίου, (β) Σήμα << sc >>, (γ) Σήμα << bat >>, (δ) Ρεύμα μπαταριών, (ε) Τάση στα άκρα των μπαταριών, (στ) SOC μπαταριών……67

Σχήμα 69: Αποτελέσματα 2ης προσομοίωσης: (α) Ρεύμα φορτίου, (β) Σήμα << sc >>, (γ) Σήμα << bat >>, (δ) Ρεύμα υπερπυκνωτών, (ε) Τάση στα άκρα των υπερπυκνωτών, (στ) SOC υπερπυκνωτών……67

Σχήμα 70: Αποτελέσματα 3ης προσομοίωσης: (α) Ρεύμα φορτίου, (β) Σήμα << sc >>, (γ) Σήμα << bat >>, (δ) Ρεύμα μπαταριών, (ε) Τάση στα άκρα των μπαταριών, (στ) SOC μπαταριών……68

Σχήμα 71: Αποτελέσματα 3ης προσομοίωσης: (α) Ρεύμα φορτίου, (β) Σήμα << sc >>, (γ) Σήμα << bat >>, (δ) Ρεύμα υπερπυκνωτών, (ε) Τάση στα άκρα των υπερπυκνωτών, (στ) SOC υπερπυκνωτών……..68

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών των μπαταριών Lead-Acid, Ni-MH, ZEBRA και Li-ion[2]……4

Πίνακας 2: Η ενεργειακή απόδοση των μπαταριών Lead-Acid, Ni-MH, ZEBRA και Li-ion σύμφωνα με την χωρητικότητα τους[2]……..4

Πίνακας 3: Οι τιμές των εσωτερικών αντιστάσεων των μπαταριών Lead-Acid, Ni-MH, ZEBRA και Li-ion [2]…….5

Πίνακας 4: Συγκεντρωτικά στοιχεία για πυκνωτές, υπερπυκνωτές και μπαταρίες όσον αφορά πυκνότητες ενέργειας, ισχύος και χρόνους φόρτισης και αποφόρτισης[7]……..15

Πίνακας 5: Η χωρητικότητα της μπαταρίας με το πέρας των κύκλων ζωής της……26

Πίνακας 6: Οι χρόνοι αποφόρτισης του υπερπυκνωτή για τις διάφορες τιμές του ρεύματος φορτίου……..30

Πίνακας 7: Η χωρητικότητα της μπαταρίας με το πέρας των κύκλων ζωής της στο υβριδικό σύστημα……48

Πίνακας 8:Το διάγραμμα των λειτουργικών καταστάσεων του ελεγκτή……62

Εισαγωγή

Τα ηλεκτρικά οχήματα κινούνται αποκλειστικά με τη βοήθεια ενός ηλεκτροκινητήρα ο οποίος λαμβάνει ενέργεια από μία πηγή ενέργειας που βρίσκεται στο όχημα. Τα ηλεκτρικά οχήματα δεν είναι κάτι καινούργιο καθώς το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο εφευρέθηκε το 1859. Παρόλα αυτά τα ηλεκτρικά οχήματα έχασαν το παιχνίδι στη βιομηχανία αυτοκινήτων από τα οχήματα που διέθεταν κινητήρα εσωτερικής καύσης. Σύμφωνα με στοιχεία πωλήσεων αυτοκινήτων το 1900 τα ποσοστά των ηλεκτρικών οχημάτων, των αυτοκινήτων με κινητήρες εσωτερικής καύσης και των ατμοκίνητων οχημάτων ήταν 38%, 22% και 40% αντίστοιχα. Όπως είναι εμφανές η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων εκείνη την εποχή είναι μικρή αλλά σε καμία περίπτωση αμελητέα. Για τα επόμενα χρόνια η ζήτηση για ηλεκτρικά οχήματα δεν αυξήθηκε ιδιαίτερα μέχρι τη δεκαετία του 1970 όπου ανακοινώθηκε η έλλειψη πετρελαίου. Αυτή η ανακοίνωση σε συνδυασμό και με την ευαισθητοποίηση του κόσμου για το περιβάλλον οδήγησαν στην αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος του κόσμου για τα ηλεκτρικά οχήματα. Από τότε μέχρι και σήμερα και ειδικά τα τελευταία χρόνια η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων έχει εκτοξευθεί και έχει αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τα αυτοκίνητα με κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1 από το 2020 και μετά η πώληση των ηλεκτρικών οχημάτων έχει σχεδόν τετραπλασιαστεί.[1]

Σχήμα 1: Η εξέλιξη πωλήσεων των ηλεκτρικών αυτοκινήτων από το 2015 μέχρι το 2023[1]

Ωστόσο σε αντίθεση με τα αυτοκίνητα κινητήρων εσωτερικής καύσης η κύρια πηγή ενέργειας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι η μπαταρία τους. Έτσι καταλαβαίνουμε πως η αποτελεσματικότητα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων εξαρτάται άμεσα από την απόδοση της μπαταρίας και την ισχύ που αυτή μπορεί να δώσει.

Σε αντίθεση με τα υγρά καύσιμα η αποτελεσματικότητα τους περιορίζεται από την χαμηλή πυκνότητα ισχύος που έχουν οι μπαταρίες συγκριτικά με τα καύσιμα, καθώς και από το φαινόμενο γήρανσης της μπαταρίας, δηλαδή την μείωση της απόδοσης της με το πέρας ορισμένων φορτίσεων και αποφορτίσεων της [10]. Αυτό είναι ένα μειονέκτημα στο ηλεκτρικά οχήματα το οποίο όμως μπορεί να αντιμετωπιστεί. Η αντιμετώπιση του μπορεί να έρθει τόσο από την ίδια την μπαταρία, δηλαδή με κατάλληλη επιλογή ως προς το είδος της μπαταρίας, όσο και από τον τρόπο τοποθέτησης της μέσα στο όχημα και από το σύστημα διαχείρισης της.

Κεφάλαιο 1: Τεχνολογία μπαταριών στην ηλεκτροκίνηση

1.1 Κατάλληλος τύπος μπαταρίας για την ηλεκτροκίνηση

Η κύρια μπαταρία ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι από τα πιο σημαντικά στοιχεία του οχήματος, καθώς είναι η κύρια πηγή ενέργειας του. Σε αντίθεση με τις βοηθητικές μπαταρίες οι οποίες μπαίνουν σε λειτουργία όταν πρέπει να εκτελεστεί μία ενέργεια στο σύστημα η κύρια μπαταρία του αυτοκινήτου είναι αυτή που παρέχει την ενέργεια στον κινητήρα του αυτοκινήτου τόσο σε μόνιμη βάση όσο και σε περιπτώσεις μεταβατικών φαινομένων του κινητήρα όπως και η εκκίνηση ή η επιτάχυνση. Με το πέρασμα των χρόνων και με την εξέλιξη της τεχνολογίας των μπαταριών χρησιμοποιήθηκαν πολλά είδη μπαταριών μέχρι το επικρατέστερο.[2]

Τα βασικότερα είδη μπαταριών που έχουν χρησιμοποιηθεί στην ηλεκτροκίνηση ως βασική τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα είναι:

- Μπαταρίες μολύβδου-οξέως
- Μπαταρίες Na-NiC12 (ZEBRA)
- Μπαταρίες υδριδίου μετάλλου νικελίου (NIMH)
- Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li –ion) [2]

Στα αρχικά στάδια της ηλεκτροκίνησης χρησιμοποιήθηκαν μπαταρίες μολύβδου-οξέως. Όμως οι μπαταρίες αυτές έχουν πολύ χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα κάτι που τις έκανε πολύ αδύναμες για εφαρμογή σε ηλεκτρικά οχήματα. Λόγω της χαμηλής τους ενεργειακής πυκνότητας απαιτούνταν μεγάλος αριθμός μπαταριών για να τροφοδοτήσουν ικανοποιητικά τον ηλεκτροκινητήρα με αποτέλεσμα να αυξανόταν πολύ το βάρος του οχήματος.

Έτσι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως απορρίφθηκαν γρήγορα από εφαρμογές στην ηλεκτροκίνηση. Για αυτό το λόγο άρχισαν να χρησιμοποιούνται μπαταρίες υδριδίου μετάλλου νικελίου. Αυτές οι μπαταρίες είχαν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως και η απαιτούμενη μάζα των μπαταριών μειώθηκε περίπου κατά 33% κάνοντας το σύστημα πιο αποδοτικό.

Παρόλα αυτά η χρήση αυτών των μπαταριών έφτασε σε συμφόρηση καθώς ούτε αυτές κάλυπταν τις ανάγκες για ενέργεια σε ένα ηλεκτρικό όχημα ικανοποιητικά και επίσης υπέφεραν έντονα από το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης. [2]

Στη συνέχεια εμφανίστηκαν οι μπαταρίες ιόντων λιθίου οι οποίες χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα στην ηλεκτροκίνηση. Οι μπαταρίες Li-ion παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των υπόλοιπων τύπων μπαταριών που αναφέρθηκαν.

Στον πίνακα 1 προσομοιώνεται μία σύγκριση των βασικότερων χαρακτηριστικών των προαναφερόμενων μπαταριών.

Τύπος Μπαταρίας	Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	Πυκνότητα Ενέργειας (Wh/L)	Ειδική Ισχύς (W/kg)	Μάζα μπαταρίας στα ηλεκτρικά οχήματα για 100km με 20kWh/100km	Μείωση μάζας σε σύγκριση με την προηγούμενη μπαταρία
Lead-Acid	35-40	80-90	285	500-600 kg	0 %
Ni-MH	50-70	100-140	200	300-400 kg	36.36 %
ZEBRA	100	160	170	200 kg	42.86 %
Li-ion	150-200	250-400	260	100-140 kg	40 %

Πίνακας 1: Σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών των μπαταριών Lead-Acid, Ni-MH, ZEBRA και Li-ion[2]

Από τον πίνακα 1 είναι εμφανές ο λόγος για τον οποίο η χρήση των μπαταριών Li-ion έχει επικρατήσει. Τόσο η ειδική ενέργεια των μπαταριών Li-ion όσο και η πυκνότητα ενέργειας τους είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτές των υπόλοιπων μπαταριών. Αυτό σημαίνει πως το ηλεκτρικό αυτοκίνητο χρησιμοποιώντας μπαταρίες Li-ion ως την βασική πηγή τροφοδοσίας ενέργειας του ηλεκτρικού κινητήρα θα έχει πολύ μεγαλύτερη αυτονομία. Ακόμη στον πίνακα 1 μπορεί να παρατηρήσει κανείς πως η ειδική ισχύς της μπαταρίας Li-ion είναι ελάχιστα μικρότερη από αυτή των μπαταριών μολύβδου-οξέως(260 W/kg στις μπαταρίες Li-ion και 285 W/kg στις μπαταρίες μολύβδου-οξέως).[2]

Πλέον η πλειοψηφία των σύγχρονων ηλεκτρικών αυτοκινήτων διαθέτει και υπερπυκνωτές για την ζήτηση υψηλής ισχύος από τον κινητήρα κάτι που θα αναλυθεί σε βάθος στη συνέχεια. [2]

Στον πίνακα 2 παρουσιάζεται η ενεργειακή απόδοση της κάθε μπαταρίας σύμφωνα με την χωρητικότητα τους.

Τύπος Μπαταρίας	Ενεργειακή Απόδοση (%)	Ονομαστική Τάση (V)	Ονομαστική Χωρητικότητα (Ah)	Ονομαστική Χωρητικότητα (kWh)	Απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει με μία μόνο φόρτιση
Lead-Acid	85	6	215	1.29	22 μίλια
Ni-MH	85	343	77	26.4	75-150 μίλια
ZEBRA	75	278.6	64	17.83	120 μίλια
Li-ion	90	350	158	55	250 μίλια

Πίνακας 2: Η ενεργειακή απόδοση των μπαταριών Lead-Acid, Ni-MH, ZEBRA και Li-ion σύμφωνα με την χωρητικότητα τους[2]

Η απόδοση μιας μπαταρίας είναι συνάρτηση της ποσότητας της ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει και να δώσει, δηλαδή είναι συνάρτηση της χωρητικότητας της. Μία αποδοτική μπαταρία μπορεί να φορτιστεί γρήγορα και να δώσει μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Στον πίνακα 2 φαίνεται πως την μεγαλύτερη χωρητικότητα την έχουν οι μπαταρίες Li-ion για αυτό το λόγο είναι και οι πιο αποδοτικές.

Ένας παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται άμεσα η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι η εσωτερική αντίσταση της. Η εσωτερική αντίσταση είναι υπεύθυνη για την ποσότητα της ενέργειας την οποία μπορεί να αποδώσει η μπαταρία και για αυτό το λόγο πρέπει να είναι μικρή ώστε να μην προκαλεί μεγάλη πτώση στη τιμή τάσης. Μία μεγάλη τιμή εσωτερικής αντίστασης θα είχε ως αποτέλεσμα την υπερθέρμανση της μπαταρίας κάτι που θα προκαλούσε μεγάλη πτώση τάσης υπό φορτίο και θα οδηγούσε σε φθορά της μπαταρίας. Αξίζει να σημειωθεί πως η εσωτερική αντίσταση ποικίλει για φόρτιση και αποφόρτιση της μπαταρίας ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης (state of charge-SOC). Δηλαδή όσο μειώνεται το SOC της μπαταρίας μειώνεται και η τάση στα άκρα της και έτσι η εσωτερική αντίσταση μειώνεται.[2]

Τύπος Μπαταρίας	**Εσωτερική Αντίσταση**	**Επιπτώσεις στη χωρητικότητα της μπαταρίας**
Lead-Acid	15-16 mΩ	Χαμηλή αντίσταση-Ομαλή ροή
Ni-MH	778 mΩ	Υψηλή αντίσταση-Περιορισμός της ροής
ZEBRA	180 mΩ	Σχετικά χαμηλή αντίσταση
Li-ion	320 mΩ	Μέτρια αντίσταση

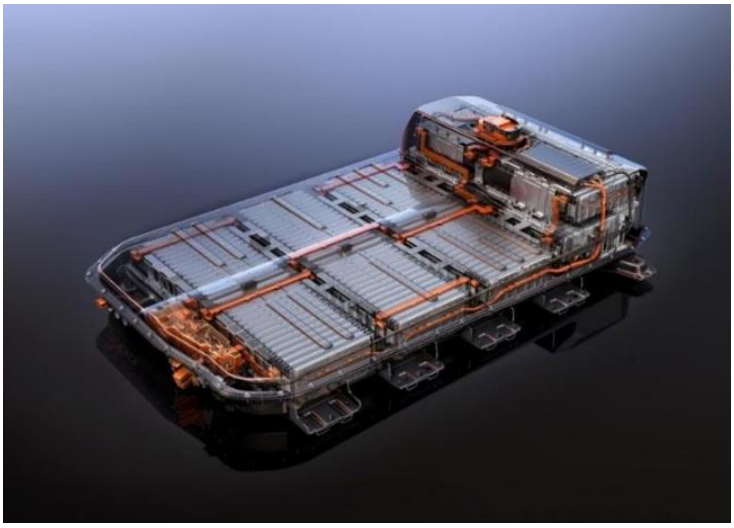
Πίνακας 3: Οι τιμές των εσωτερικών αντιστάσεων των μπαταριών Lead-Acid, Ni-MH, ZEBRA και Li-ion [2]

Συμπερασματικά στη βιομηχανία των ηλεκτρικών οχημάτων έχουν επικρατήσει οι μπαταρίες Li-ion λόγω των προαναφερόμενων πλεονεκτημάτων έναντι των άλλων τύπων μπαταριών. Δηλαδή η επικράτηση οφείλεται στον συνδυασμό της πολύ μεγάλης πυκνότητας ενέργειας και χωρητικότητας που σε συνδυασμό με την μέτρια εσωτερική αντίσταση καθιστά τις μπαταρίες Li-ion τις πιο αποδοτικές για εφαρμογές στην ηλεκτροκίνηση.

1.2 Οργάνωση των μπαταριών σε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο

Η οργάνωση των στοιχείων μπαταρίας στα σύγχρονα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι ένα κρίσιμο μέρος της σχεδίασης και της απόδοσης των οχημάτων αυτών. Τα στοιχεία της μπαταρίας οργανώνονται σε διάφορα επίπεδα για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση, ασφάλεια και διάρκεια ζωής τους. Αρχικά θα πρέπει να δημιουργηθούν μονάδες μπαταριών για να επιτευχθεί η ζητούμενη τάση και χωρητικότητα. Οι μονάδες αυτές αποτελούνται συνήθως από λίγες εώς αρκετές δεκάδες cells μπαταριών (μονάδες μπαταριών), τα οποία συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα. Οι μονάδες που δημιουργήθηκαν στη συνέχεια θα τοποθετηθούν στο Battery pack (πακέτο μπαταριών) του αυτοκινήτου, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει τις μονάδες μπαταριών, το σύστημα διαχείρισης των μπαταριών (Battery management system BMS) και το σύστημα διαχείρισης της θερμοκρασίας των μπαταριών (BTMS). Τόσο το BMS όσο και το BTMS συμβάλουν στην προστασία του συστήματος και στην αποδοτικότερη λειτουργία του. [2] [3]

Ενδεικτικά στο σχήμα 2 φαίνεται το Battery pack ενός οχήματος Chevrolet Bolt το οποίο ξεκίνησε την παραγωγή του το 2017.



Σχήμα 2: Το Battery pack ενός Chevrolet Bolt [2]

Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται για το Chevrolet Bolt είναι Li-ion και το Battery pack έχει την εξής οργάνωση. Το pack (πακέτο) αποτελείται από 10 modules (ενότητες) εκ των οποίων τα 8 modules έχουν 10 groups (ομάδες) μπαταριών και τα άλλα 2 έχουν 8 groups μπαταριών. Κάθε group αποτελείται από τρεις μπαταρίες συνδεδεμένες παράλληλα. Συνεπώς συνολικά υπάρχουν 96 groups μπαταριών και 288 μπαταρίες Li-ion. Η ενέργεια του Battery pack ανέρχεται στις 60 kWh και το σύστημα έχει αυτονομία 380 km με τη λειτουργία του κινητήρα στις ονομαστικές του συνθήκες.[2]

1.3 Γήρανση της μπαταρίας στα σύγχρονα ηλεκτρικά αυτοκίνητα

Όπως αναφέρθηκε ήδη ένα από τα σημαντικότερα συστήματα ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι το σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας της ηλεκτρικής μηχανής, και πιο συγκεκριμένα η μπαταρία αυτή καθεαυτή. Όντας τόσο σημαντική για την απόδοση του ηλεκτρικού οχήματος, είναι κρίσιμο να λειτουργεί όσο πιο αποδοτικά γίνεται.

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι μπαταρίες όσον αφορά την απόδοση τους, είναι η πτώση της με την πάροδο του χρόνου. Με λίγα λόγια η γήρανση της μπαταρίας είναι ένα θέμα το οποίο απασχολεί τις αυτοκινητοβιομηχανίες τα τελευταία χρόνια. Για την λύση αυτού του προβλήματος είναι απαραίτητη πρώτα η κατανόηση του και ο εντοπισμός της πηγής του.[10]

Τα κυριότερα αίτια της κόπωσης της μπαταρίας είναι:

- Κύκλοι ζωής της μπαταρίας:

  Κάθε φορά που η μπαταρία φορτίζεται και αποφορτίζεται, υφίσταται μια μικρή φθορά. Με την πάροδο του χρόνου, ο αριθμός των κύκλων αυτών μειώνει τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Ένας πλήρης κύκλος ζωής μιας μπαταρίας αποτελείται από πλήρη φόρτιση και πλήρη αποφόρτιση της.[10] [6]

- Θερμοκρασία:

Οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να προκαλέσουν αύξηση του ρυθμού της χημικής φθοράς, ενώ οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση και την ικανότητα φόρτισης. Η έκθεση της μπαταρίας σε ακραίες θερμοκρασίες για παρατεταμένες περιόδους είναι επιβλαβής. Γενικά, η θερμοκρασία είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας καταπόνησης, όπου οι αποκλίσεις από τους τυπικούς 25 °C μπορεί να οδηγήσουν σε επιταχυνόμενη αστοχία.[10]

- Το επίπεδο SOC της μπαταρίας:

Το επίπεδο SOC της μπαταρίας είναι και αυτό ένας από τους βασικότερους παράγοντες καθώς το ιδανικό θα ήταν να διατηρείται κοντά στο μέσο του και να μην είναι ούτε σε πολύ υψηλά επίπεδα ούτε σε πολύ χαμηλά. Από την μία το SOC δεν πρέπει να διατηρείται σε πολύ υψηλά επίπεδα γιατί επιταχύνεται η υποβάθμιση λόγω της σχέσης μεταξύ των δυναμικών ηλεκτροδίων και του ρυθμού των παρασιτικών πλευρικών αντιδράσεων και επίσης η διατήρηση της μπαταρίας σε πλήρη φόρτιση για παρατεταμένα διαστήματα μπορεί να προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας και να οδηγήσει σε χημική φθορά. Από την άλλη η συχνή πλήρης αποφόρτιση της μπαταρίας μπορεί να επιταχύνει την κόπωση της.

- Το είδος του φορτίου:

Το φορτίο, δηλαδή ο ηλεκτροκινητήρας παίζει και αυτό σημαντικό ρόλο. Κατά κύριο λόγο αυτό που μας ενδιαφέρει είναι το ρεύμα φορτίου το οποίο ανάλογα με την τιμή που παίρνει έχουμε και διαφορετική αποφόρτιση της μπαταρίας. Όσο μεγαλύτερη η ζήτηση του

ρεύματος από τον ηλεκτρικό κινητήρα τόσο πιο γρήγορη είναι η αποφόρτιση της μπαταρίας. Με την αυξημένη ζήτηση ρεύματος η οποία συμβαίνει κυρίως στην εκκίνηση του κινητήρα αλλά και στην επιτάχυνση του οχήματος αυξάνεται η πιθανότητα αστοχίας, λόγω μηχανικών καταπονήσεων που αναπτύσσονται στην μπαταρία κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της.[10]

- <u>Ρυθμός φόρτισης:</u>

Η χρήση ταχυφορτιστών μπορεί να προκαλέσει αυξημένη θερμική καταπόνηση και φθορά στις κυψέλες της μπαταρίας σε σύγκριση με την αργή φόρτιση. Αυτό οδηγεί στη μείωση της απόδοσης της μπαταρίας σε πολύ πιο σύντομο χρονικό διάστημα.

- <u>Συνθήκες χρήσης:</u>

Τέλος τον ρόλο τους παίζουν ο τρόπος οδήγησης και οι συνθήκες χρήσης του οχήματος, όπως η οδήγηση σε ανηφορικές περιοχές ή η συχνή χρήση υψηλών ταχυτήτων, μπορούν να αυξήσουν το φορτίο στη μπαταρία και να επιταχύνουν την γήρανση της.

Συμπερασματικά οι αιτίες γήρανσης της μπαταρίας ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι αρκετοί και παίζουν τον ρόλο τους είτε μικρότερο είτε μεγαλύτερο. Στη συνέχεια της εργασίας θα δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στους κύκλους ζωής της μπαταρίας, στο επίπεδο SOC της και στο προφίλ του φορτίου, δηλαδή στις διάφορες λειτουργίες του κινητήρα και τα διαφορετικά ρεύματα που μπορεί να ζητήσει.

Στη σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία προκειμένου να μειωθεί το πρόβλημα κόπωσης της μπαταρίας έχουν εφαρμοστεί πολύ μέθοδοι αντιμετώπισης. Ένας από τους επικρατέστερους τρόπους αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος είναι η προσθήκη και μιας δεύτερης πηγής τροφοδοσίας ενέργειας του ηλεκτροκινητήρα η οποία δεν αποτελείται από μπαταρίες αλλά από υπερπυκνωτές.

Κεφάλαιο 2: Οι υπερπυκνωτές στην ηλεκτροκίνηση

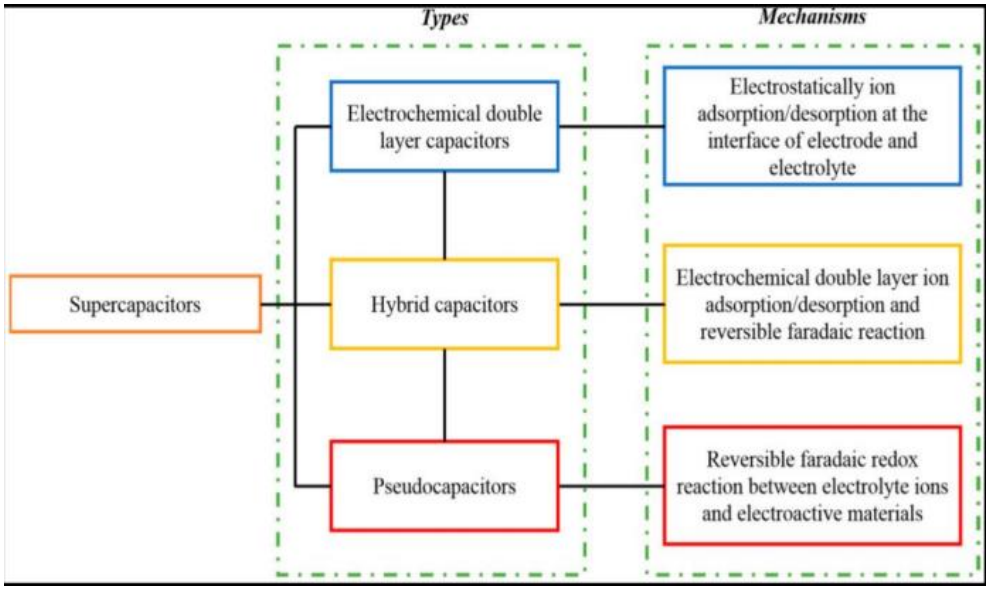
2.1 Λόγοι χρήσης υπερπυκνωτών στην ηλεκτροκίνηση

Προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος τροφοδοσίας ενέργειας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και να προστατευτεί η μπαταρία τους η χρήση υπερπυκνωτών είναι μία από τις πιο διαδεδομένες λύσεις. Οι λόγοι που οι υπερπυκνωτές έχουν <<εισβάλει>> στην βιομηχανία των ηλεκτρικών οχημάτων αφορούν κυρίως τις ιδιότητες τους ως προς την φόρτιση και την αποφόρτιση τους.

Πιο συγκεκριμένα οι υπερπυκνωτές έχουν πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος και έτσι μπορούν να τροφοδοτούν τον κινητήρα με ευκολία σε περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης ισχύος. Τέτοιες περιπτώσεις είναι η εκκίνηση και η επιτάχυνση του οχήματος όπου η στροφές του δρομέα του ηλεκτροκινητήρα πρέπει να αυξηθούν και να δώσουν μεγαλύτερη ροπή στον άξονα. Όπως αναφέρθηκε ο κύριος λόγος χρήσης των υπερπυκνωτών στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι η γρήγορη φόρτιση και αποφόρτιση τους. Αυτό τους καθιστά ιδανικούς για την αποθήκευση και την παροχή ενέργειας σε καταστάσεις που απαιτούν ταχεία απόκριση, όπως κατά την επιτάχυνση, την εκκίνηση αλλά και κατά την πέδηση. Ειδικότερα στην περίπτωση της πέδησης οι υπερπυκνωτές είναι εξαιρετικοί στη συλλογή και αποθήκευση της ενέργειας που παράγεται κατά τη διάρκεια της. Αυτή η ενέργεια μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία του οχήματος, αυξάνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας. Ακόμη ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στην επικράτηση των υπερπυκνωτών είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Μπορούν να αντέξουν εκατοντάδες χιλιάδες κύκλους φόρτισης αποφόρτισης χωρίς να υποβαθμίζονται σημαντικά. Μάλιστα αυτή τους η ιδιότητα ισχύει και για μη ιδανικές συνθήκες λειτουργίας. Για παράδειγμα οι υπερπυκνωτές έχουν μεγάλη αντοχή σε ακραίες θερμοκρασίες. Συνεπώς μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών χωρίς να μειωθεί η απόδοση τους.[9] [12]

2.2 Είδη υπερπυκνωτών

Οι υπερπυκνωτές χωρίζονται σε τρεις ομάδες ανάλογα με τον μηχανισμό με τον οποίο αποθηκεύουν ενέργεια.



Σχήμα 3: Οι 3 βασικές ομάδες υπερπυκνωτών βασιζόμενες στον μηχανισμό αποθήκευσης ενέργειας[4]

Οι 3 ομάδες υπερπυκνωτών είναι οι ηλεκτροχημικοί υπερπυκνωτές διπλής στρώσης (EDLCs), οι ψευδοπυκνωτές και οι υβριδικοί υπερπυκνωτές.

<u>Α. Ηλεκτροχημικοί υπεπρυκνωτές διπλής στρώσης (EDLCs):</u>

Οι ηλεκτροχημικοί υπερπυκνωτές διπλής στρώσης είναι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας που συνδυάζουν χαρακτηριστικά από τους παραδοσιακούς πυκνωτές και τις μπαταρίες. Παρέχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος και ταχύτητα φόρτισης αποφόρτισης, ενώ έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής.

Η αρχή λειτουργίας των υπερπυκνωτών EDLC βασίζεται στην ηλεκτροστατική αποθήκευση ενέργειας. Η διαδικασία αποθήκευσης ενέργειας είναι μια φυσική διαδικασία, χωρίς χημική αντίδραση και η διαδικασία είναι εντελώς αναστρέψιμη κάτι που διαφέρει από την ηλεκτροχημική αποθήκευση ενέργειας των μπαταριών. Εφόσον τα θετικά και αρνητικά ιόντα απορροφώνται στην επιφάνεια μεταξύ του στερεού ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη, αντίστοιχα, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4, προκαλείται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο στερεών ηλεκτροδίων, επιτυγχάνοντας έτσι αποθήκευση ενέργειας.

Κατά τη φόρτιση, υπό την επίδραση της έλξης φορτίου στο στερεό ηλεκτρόδιο, τα θετικά και αρνητικά ιόντα στον ηλεκτρολύτη συγκεντρώνονται στις επιφάνειες των δύο στερεών ηλεκτροδίων, αντίστοιχα.

Κατά την αποφόρτιση, το κατιόν και το ανιόν αφήνουν την επιφάνεια του στερεού ηλεκτροδίου και επιστρέφουν στο σώμα του ηλεκτρολύτη. Ταυτόχρονα, το αποθηκευμένο φορτίο απελευθερώνεται μέσω του εξωτερικού κυκλώματος για την παροχή ρεύματος στο φορτίο.[8]

Β. Ψευδοπυκνωτές:

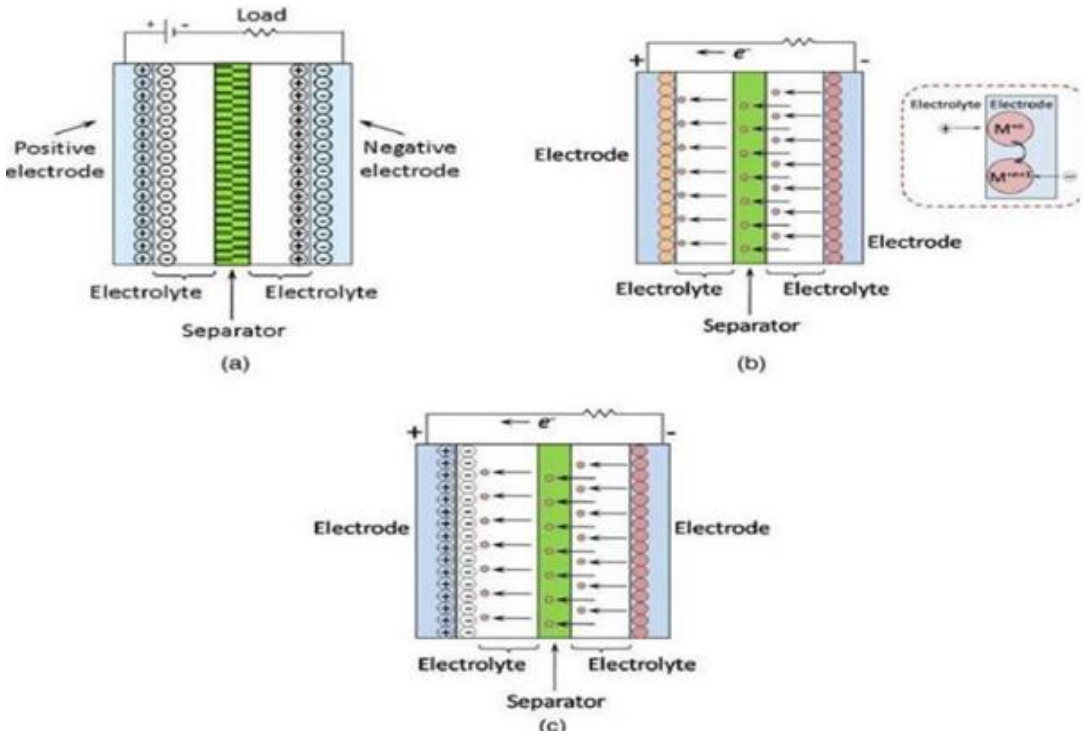
Οι ψευδοπυκνωτές είναι τύποι υπερπυκνωτων με ηλεκτρόδια από μεταλλικό οξείδιο ή αγώγιμο πολυμερές με υψηλό υλικό ηλεκτροχημικής ψευδοχωρητικότητας. Ο μηχανισμός αποθήκευσης του φορτίου είναι ο Φαρανταϊκός μηχανισμός, όπως οι αντιδράσεις οξείδωσης-αναγωγής, που περιλαμβάνουν τη μεταφορά φορτίου μεταξύ του ηλεκτρολύτη και του ηλεκτροδίου. Στην περίπτωση εφαρμογής τάσης στον ψευδοπυκνωτή, η αναγωγή και η οξείδωση συμβαίνουν στο υλικό του ηλεκτροδίου. Στο σχήμα 4 φαίνεται πως αυτό περιλαμβάνει τη διέλευση του φορτίου μέσα από μια διπλή στιβάδα με αποτέλεσμα το Φαρανταϊκό ρεύμα να διέρχεται μέσα από το κελί του υπερπυκνωτή. Επιπλέον, ο Φαρανταϊκός μηχανισμός που εμπλέκεται στους ψευδοπυκνωτές τους επιτρέπει να επιτυγχάνουν μεγάλη ειδική χωρητικότητα και ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τους υπερπυκνωτές διπλής στρώσης (EDLCs).[4]

Γ. Υβριδικοί υπερπυκνωτές:

Οι υβριδικοί υπερπυκνωτές βασίζουν τη λειτουργία τους σε ασύμμετρα ηλεκτρόδια, ένα εκ των οποίων είναι κυρίως ηλεκτροστατικό ενώ το άλλο έχει ηλεκτροχημική χωρητικότητα. Επίσης, συνδυάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά των ψευδοπυκνωτών και των υπερπυκνωτών διπλής στιβάδας (EDLCs) σε έναν ενιαίο υπερπυκνωτή (SC).

Παρόλο που οι υβριδικοί υπερπυκνωτές είχαν εξερευνηθεί λιγότερο σε σύγκριση με τους ψευδοπυκνωτές και τους EDLCs, οι προσπάθειες επεκτείνονταν όσον αφορά τη δημιουργία βελτιωμένων υβριδικών υπερπυκνωτών και την ανάπτυξη πιο ακριβών ποσοτικών μοντέλων. Εκτός από την αύξηση της εστίασης στη δημιουργία υπερπυκνωτών υψηλής ενέργειας και μεγάλης διάρκειας ζωής, η τεράστια ευκολία ρύθμισης της απόδοσης και του σχεδιασμού των υβριδικών υπερπυκνωτών τους οδήγησε να ξεπεράσουν τους EDLCs ως η κύρια κατηγορία υπερπυκνωτών. Ο μηχανισμός αποθήκευσης φορτίου συνδυάζει τους δύο προηγούμενους τύπους. Οι υβριδικοί υπερπυκνωτές χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες που διαφοροποιούνται μέσω της διαμόρφωσης των ηλεκτροδίων τους, σε ασύμμετρους, σε σύνθετους και σε τύπου μπαταρίας.[4]

Στο σχήμα 4 παρουσιάζεται ο τρόπος αποθήκευσης ενέργειας για κάθε ένα από τα τρία αυτά είδη υπερπυκνωτών που αναφέρθηκαν.



Σχήμα 4: Τρόπος αποθήκευσης ενέργειας για κάθε ένα είδος υπερπυκνωτή. (a) EDLC, (b) Ψευδοπυκνωτές, (c) Υβριδικοί υπερπυκνωτές[4]

Στην ηλεκτροκίνηση, οι υβριδικοί υπερπυκνωτές έχουν επικρατήσει σε σχέση με τους απλούς ψευδοπυκνωτές και τους υπερπυκνωτές διπλής στρώσης. Οι κύριοι λόγοι για αυτήν την υπεροχή είναι:

- <u>Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα:</u>

Οι υβριδικοί υπερπυκνωτές συνδυάζουν την ηλεκτροχημική χωρητικότητα των ψευδοπυκνωτών με την ηλεκτροστατική αποθήκευση ενέργειας των EDLCs. Αυτό τους επιτρέπει να παρέχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, δηλαδή να αποθηκεύουν περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου ή μάζας σε σύγκριση με τους EDLCs.

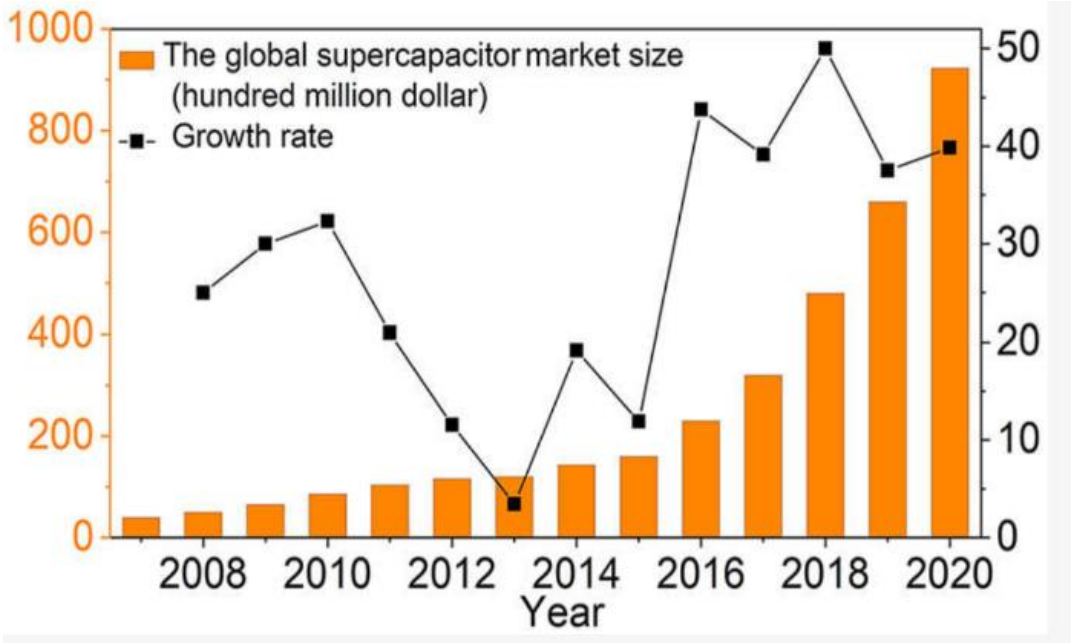
- <u>Υψηλή ισχύς:</u>

Οι υβριδικοί υπερπυκνωτές είναι ικανοί να παρέχουν υψηλή ισχύ κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση, κάτι που είναι κρίσιμο για εφαρμογές όπως η ηλεκτροκίνηση όπου απαιτείται γρήγορη απελευθέρωση ενέργειας και υψηλή απόδοση.

- <u>Ευκολία ρύθμισης απόδοσης και σχεδιασμού:</u>

Οι υβριδικοί υπερπυκνωτές επιτρέπουν την εύκολη ρύθμιση και βελτιστοποίηση της απόδοσής τους για διάφορες εφαρμογές. Αυτό είναι κρίσιμο για την αποτελεσματική χρήση τους σε ποικίλες συνθήκες λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων και άλλων εφαρμογών ηλεκτροκίνησης.

Στο σχήμα 5 παρουσιάζεται η ανάπτυξη των υπερπυκνωτών στην αγορά από το 2007 μέχρι το 2020.



Σχήμα 5: Η ανάπτυξη των υπερπυκνωτών στην αγορά από το 2007 μέχρι το 2020[7]

Παρατηρείται πως η χρήση τους άρχισε να αυξάνεται ραγδαία από το 2018 μέχρι σήμερα κάτι που δείχνει πόσο σημαντικοί είναι για τις σύγχρονες εφαρμογές στην ηλεκτροκίνηση και πως οι ιδιότητες τους έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον των αυτοκινητοβιομηχανιών.

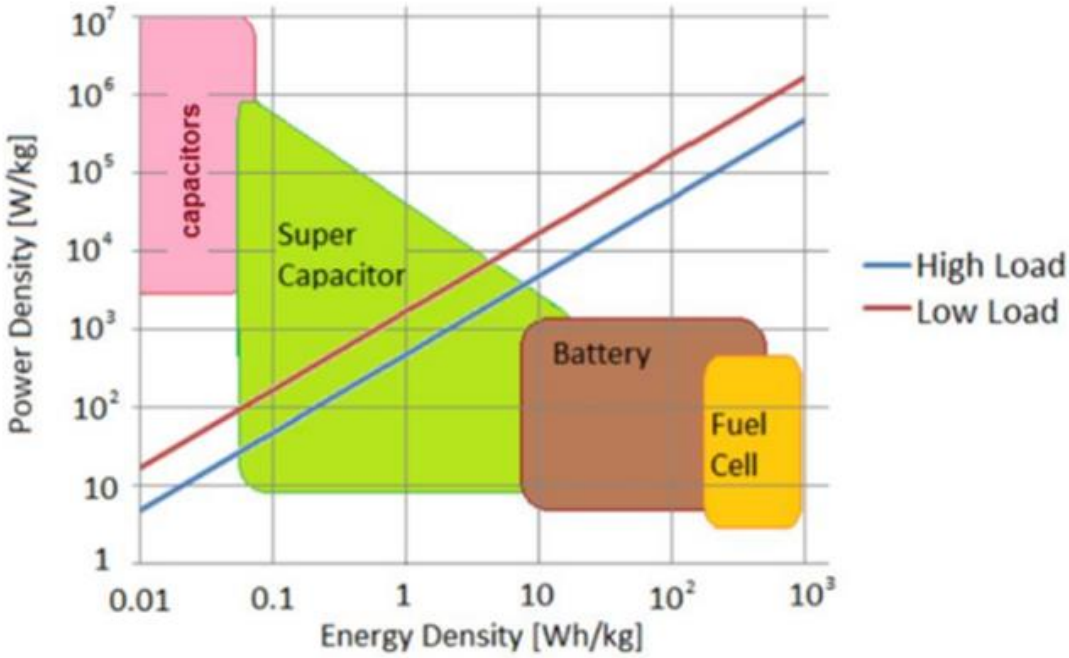
2.3 Σύγκριση μπαταρίας και υπερπυκνωτή

Παρά τη τεράστια ανάπτυξη που έχουν οι υπερπυκνωτές τα τελευταία χρόνια οι μπαταρίες είναι ένα πολύ βασικό στοιχείο των ηλεκτρικών οχημάτων και όσα πλεονεκτήματα και αν έχουν οι υπερπυκνωτές έναντι των μπαταριών δεν είναι ακόμα εφικτό να αντικατασταθούν πλήρως οι μπαταρίες από αυτούς. Ο λόγος είναι πως και οι ίδιες οι μπαταρίες παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σχετικά με τους υπερπυκνωτές. Η πιο σημαντική διαφορά μεταξύ των μπαταριών και των υπερπυκνωτών είναι πως οι μπαταρίες έχουν υψηλή πυκνότητα ενέργειας ενώ οι υπερπυκνωτές έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος.[7]

Οι μπαταρίες λόγω της υψηλής πυκνότητας ενέργειας, μπορούν να αποθηκεύουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα μάζας. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν μακροχρόνια αποθήκευση ενέργειας, που αυτό είναι μία κρίσιμη παράμετρος στα ηλεκτρικά οχήματα. Δηλαδή μπορούν να προσφέρουν στο σύστημα μεγάλη αυτονομία. Ωστόσο, οι μπαταρίες έχουν γενικά χαμηλότερη πυκνότητα ισχύος που επηρεάζει το πόσο γρήγορα μπορούν να παρέχουν ενέργεια. Οι υπερπυκνωτές από την άλλη πλευρά υπερέχουν στην πυκνότητα ισχύος επιτρέποντάς τους να παρέχουν και να απορροφούν ενέργεια πολύ πιο γρήγορα από τις μπαταρίες. Αυτό τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογές

που απαιτούν γρήγορους κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης όπως η αναγεννητική πέδηση στα οχήματα και τα συστήματα εφεδρικής τροφοδοσίας.

Ωστόσο, οι υπερπυκνωτές έχουν σημαντικά χαμηλότερη πυκνότητα ενέργειας σε σύγκριση με τις μπαταρίες περιορίζοντας τη χρήση τους σε εφαρμογές όπου η μακροχρόνια αποθήκευση ενέργειας είναι κρίσιμη. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο οι υπερπυκνωτές δεν μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τις μπαταρίες σε ένα ηλεκτρικό όχημα, καθώς ένα σύστημα τροφοδοσίας βασιζόμενο αμιγώς στη χρήση υπερπυκνωτών ως βασική πηγή ενέργειας θα είχε μικρή αυτονομία.[7] [12]



Σχήμα 6: Σχέση μεταξύ πυκνότητας ενέργειας και πυκνότητας ισχύος για μπαταρίες και υπερπυκνωτές[4]

Εξίσου σημαντική διαφορά είναι ο ρυθμός φόρτισης-αποφόρτισης καθώς και οι κύκλοι ζωής τους. Οι υπερπυκνωτές μπορούν να φορτίζουν και να αποφορτίζονται πολύ πιο γρήγορα από τις μπαταρίες συχνά μέσα σε δευτερόλεπτα, όπως είναι εμφανές και στον πίνακα 4, και μπορούν να αντέξουν έναν μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης χωρίς σημαντική υποβάθμιση. Αυτό οφείλεται στον ηλεκτροστατικό μηχανισμό αποθήκευσης φορτίου τους που είναι λιγότερο καταπονητικός για τα υλικά σε σύγκριση με τις χημικές αντιδράσεις στις μπαταρίες.

Οι μπαταρίες, ενώ φορτίζουν και αποφορτίζουν πιο αργά, έχουν μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας και πιο σταθερή τάση εξόδου κατά την αποφόρτιση. Ωστόσο, υποφέρουν από μικρότερο κύκλο ζωής λόγω της φθοράς στα ηλεκτρόδια και τον ηλεκτρολύτη κατά τους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης.[13]

Ιδιότητες	Πυκνωτές	Υπερπυκνωτές	Μπαταρίες
Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	<0.1	1-10	10-100
Ειδική ισχύς (W/kg)	10000	500-10000	<1000
Χρόνος Αποφόρτισης (sec)	10^{-6} – 10^{-3}	S to min	0.3-3h
Χρόνος Φόρτισης (sec)	10^{-6} – 10^{-3}	S to min	1-5h
Κουλομπική απόδοση (Coulombic efficiency) (%)	100	85-98	70-85
Κύκλος ζωής (κύκλοι)	Σχεδόν Άπειροι	>500000	1000

Πίνακας 4: Συγκεντρωτικά στοιχεία για πυκνωτές, υπερπυκνωτές και μπαταρίες όσον αφορά πυκνότητες ενέργειας, ισχύος και χρόνους φόρτισης και αποφόρτισης[7]

Στα ηλεκτρικά οχήματα είναι γνωστό ότι η πηγή ενέργειας επηρεάζεται από τους εξωτερικούς παράγοντες και ιδιαίτερα από την θερμοκρασία. Οι υπερπυκνωτές είναι πολύ αποδοτικοί με ελάχιστη απώλεια ενέργειας κατά τους κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης και λειτουργούν καλά σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Έχουν επίσης χαμηλότερη εσωτερική αντίσταση που μεταφράζεται σε λιγότερη παραγωγή θερμότητας κατά τη λειτουργία. Οι μπαταρίες, ενώ είναι γενικά αποδοτικές, μπορεί να υποφέρουν από μειωμένη απόδοση και διάρκεια ζωής σε ακραίες θερμοκρασίες.

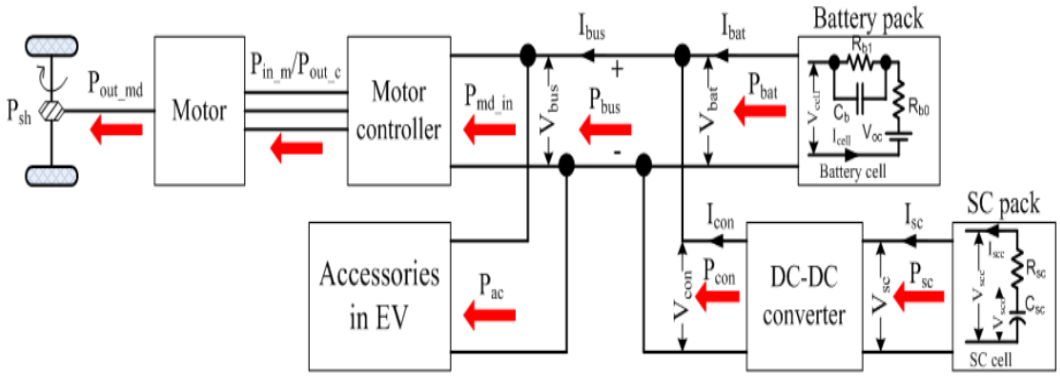
Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα που εξάγονται είναι πως οι υπερπυκνωτές δεν έχουν την δυνατότητα να αντικαταστήσουν πλήρως τις μπαταρίες και να είναι αυτοί η κύρια πηγή τροφοδοσίας ενέργειας του κινητήρα σε ένα ηλεκτρικό όχημα. Όπως αναφέρθηκε ήδη οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται ως 2^{η} πηγή τροφοδοσίας με την βασική να είναι οι μπαταρίες. Έτσι το σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας του οχήματος μετατρέπεται σε υβριδικό. Το υβριδικό αυτό σύστημα έχει τα πλεονεκτήματα τόσο από τις μπαταρίες όσο και από τους υπερπυκνωτές. Η ανάλυση του συστήματος αυτό αναλύεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο κεφάλαιο 3.

Κεφάλαιο 3: Υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας ηλεκτρικών αυτοκινήτων (HESS)

3.1 Γενικά περί HESS

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας είναι ένα από τα σημαντικά συστατικά στα ηλεκτρικά οχήματα. Γενικά, ένα τέτοιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αποτελείται από ένα ή και περισσότερα μέσα αποθήκευσης ενέργειας. Το τελευταίο ονομάζεται υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (HESS), όπως το υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία-υπερπυκνωτή. Όπως είναι γνωστό, η μπαταρία έχει υψηλή ειδική ενέργεια και χαμηλή ειδική ισχύ. Αντίθετα, ο υπερπυκνωτής έχει υψηλή ειδική ισχύ και χαμηλή ειδική ενέργεια. Προφανώς, η δυναμική απόδοση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτή είναι καλύτερη από αυτή του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία. Συνεπώς, το υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία-υπερπυκνωτή μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία. Επιπλέον, ο υπερπυκνωτής έχει το πλεονέκτημα της γρήγορης φόρτισης και το υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία-υπερπυκνωτή μπορεί να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.[5] [11]

Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα HESS και όλες οι ροές διανομής ισχύος σε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο:



Σχήμα 7: Το HESS ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου και οι ροές ισχύος από και προς το σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας[5]

Στα δεξιά φαίνεται τόσο το πακέτο (pack) των μπαταριών όσο και το pack των υπερπυκνωτών. Αν παρατηρήσει κανείς θα δει πως στην έξοδο του pack των υπερπυκνωτών υπάρχει ένας μετατροπέας DC-DC. Ο μετατροπέας αυτός βρίσκεται εκεί για να υπάρχει η δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος από και προς τους υπερπυκνωτές, η

χρησιμότητα του οποίου αναλύεται παρακάτω. Στα αριστερά του σχήματος 7 υπάρχει ο ηλεκτρικός κινητήρας και οι απαραίτητοι ελεγκτές για τη σωστή λειτουργία του, δηλαδή να υπάρχουν οι σωστές ρυθμίσεις στις στροφές του δρομέα ανάλογα με την ζήτηση του φορτίου, όπως για παράδειγμα στην εκκίνηση που η ζήτηση ισχύος είναι αυξημένη και έτσι οι στροφές πρέπει να αυξηθούν.

3.2 Πλεονεκτήματα των HESS έναντι των ESS (energy storage system)

Το ESS (σύστημα αποθήκευσης ενέργειας) στα ηλεκτρικά οχήματα αναφέρεται στο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό το σύστημα περιλαμβάνει την μπαταρία ή το σύνολο των μπαταριών που αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια η οποία χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα του οχήματος. Εκτός από τις μπαταρίες, το ESS μπορεί να περιλαμβάνει και άλλα εξαρτήματα, όπως το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας (BMS), το σύστημα ψύξης και τα ηλεκτρονικά ισχύος που απαιτούνται για τη λειτουργία του οχήματος.

Τα υβριδικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (HESS) που περιλαμβάνουν υπερπυκνωτές προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα απλά συστήματα που βασίζονται μόνο σε μπαταρίες. Αναλυτικότερα τα πιο βασικά από αυτά είναι:

- <u>Απόδοση:</u>

Οι υπερπυκνωτές έχουν πολύ υψηλή ειδική ισχύ, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την αντιμετώπιση αιχμών ισχύος, όπως κατά την επιτάχυνση και την εκκίνηση ενός ηλεκτρικού οχήματος. [5]

- <u>Επέκταση ζωής της μπαταρίας:</u>

Η χρήση υπερπυκνωτών για την αντιμετώπιση αιχμών ισχύος μειώνει την καταπόνηση των μπαταριών, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Οι μπαταρίες δεν χρειάζεται να υποστηρίξουν ταχεία φόρτιση και αποφόρτιση, που μπορούν να προκαλέσουν φθορά και μείωση της χωρητικότητάς τους με την πάροδο του χρόνου.

- <u>Ταχύτερη Φόρτιση και αποφόρτιση:</u>

Οι υπερπυκνωτές μπορούν να φορτίζονται και να αποφορτίζονται πολύ γρήγορα σε σύγκριση με τις μπαταρίες

- <u>Ενεργειακή απόδοση:</u>

Η ταχεία απόκριση των υπερπυκνωτών στη ζήτηση ισχύος βελτιώνει τη συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος. Οι υπερπυκνωτές μπορούν να διαχειρίζονται τις αιχμές ισχύος πιο αποτελεσματικά, μειώνοντας τις απώλειες ενέργειας.[5]

- Βελτιστοποίηση της κατανομής ισχύος:

Ένα υβριδικό σύστημα με υπερπυκνωτές μπορεί να βελτιστοποιήσει την κατανομή ισχύος μεταξύ μπαταρίας και υπερπυκνωτή, εξασφαλίζοντας ότι κάθε στοιχείο λειτουργεί στο βέλτιστο επίπεδο απόδοσής του. Οι υπερπυκνωτές μπορούν να παρέχουν στιγμιαία ισχύ, ενώ οι μπαταρίες παρέχουν συνεχή ενέργεια για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους.

- Μειωμένο κόστος:

Αν και οι υπερπυκνωτές μπορεί να είναι ακριβότεροι από τις μπαταρίες ανά μονάδα ενέργειας, η χρήση τους για τη διαχείριση αιχμών ισχύος μπορεί να μειώσει τις απαιτήσεις για μπαταρίες υψηλής ισχύος, οι οποίες είναι πιο ακριβές. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε συνολικό μειωμένο κόστος του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.

- Αξιοπιστία:

Λόγω της μεγαλύτερης ανθεκτικότητας των υπερπυκνωτών σε κύκλους φόρτισης και αποφόρτισης, το σύστημα γίνεται πιο αξιόπιστο και απαιτεί λιγότερη συντήρηση σε σύγκριση με ένα σύστημα που βασίζεται μόνο σε μπαταρίες.

3.3 Η χρήση του DC μετατροπέα

Στα περισσότερα σύγχρονα HESS αν όχι σε όλα υπάρχει ένας DC μετατροπέας στην έξοδο του pack των υπερπυκνωτών. Όπως ήδη αναφέρθηκε ο λόγος χρήσης του είναι η δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος από και προς το πακέτο (pack) των υπερπυκνωτών. Γιατί όμως τοποθετείται μόνο στην έξοδο των υπερπυκνωτών και όχι και στων μπαταριών;

Η απάντηση βρίσκεται στον πολύ μικρό χρόνο φόρτισης των υπερπυκνωτών. Είναι γνωστό πως οι υπερπυκνωτές χρειάζονται πολύ λιγότερο χρόνο από ότι οι μπαταρίες για να φορτιστούν. Έτσι σε περιπτώσεις όπου η ροή ισχύος είναι αντίθετη, δηλαδή όταν μεταφέρεται ρεύμα από την ηλεκτρική μηχανή προς το σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας οι υπερπυκνωτές μπορούν να αποθηκεύσουν αυτή την ενέργεια πολύ πιο γρήγορα από ότι οι μπαταρίες.

Στην περίπτωση που δεν υπήρχε ο DC μετατροπέας, όταν η μηχανή έμπαινε σε λειτουργία γεννήτριας, η ενέργεια που θα μεταφερόταν προς το σύστημα τροφοδοσίας θα χανόταν καθώς θα αδυνατούσε να αποθηκευτεί από κάποια πηγή. Έτσι όλη αυτή η ενέργεια θα μετατρεπόταν σε απώλειες και δεν θα αξιοποιούνταν στη συνέχεια με αποτέλεσμα στις επιταχύνσεις να χρησιμοποιούνταν οι μπαταρίες και να ερχόταν πολύ πιο γρήγορα στην πλήρη αποφόρτιση τους.

Η περιγραφή αυτού του συστήματος θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μία περίπτωση αναγεννητικής πέδησης.

Κεφάλαιο 4: Πειραματική διαδικασία και προσομοιώσεις

4.1 Εισαγωγή στα εργαλεία προσομοίωσης

Για την προσομοίωση των στοιχείων του υβριδικού συστήματος τροφοδοσίας ενέργειας, δηλαδή τη μπαταρίας και του υπερπυκνωτή, χρησιμοποιήθηκαν δύο βασικά λογισμικά, το lt-spice και το simulink. Σε αυτή την ενότητα γίνεται μία ανάλυση της λειτουργίας των δύο αυτών λογισμικών.

Lt-spice:

Το lt-spice είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο στην υλοποίηση μπαταριών και υπερπυκνωτών, καθώς επιτρέπει την προσομοίωση και ανάλυση της συμπεριφοράς αυτών των στοιχείων σε διάφορα κυκλώματα και σενάρια. Μπορεί να προσομοιώσει τη φόρτιση, την αποφόρτιση και τον κύκλο ζωής μπαταριών, επιτρέποντας την αξιολόγηση της απόδοσης και της διάρκειας ζωής τους υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης. Επιπλέον, για υπερπυκνωτές, το lt-spice μπορεί να αναλύσει τη δυναμική απόκριση και τις χαρακτηριστικές τους υπό υψηλά ρεύματα και χαμηλές θερμοκρασίες. Με αυτό το τρόπο πραγματοποιείται πιο εύκολα και με μεγαλύτερη ακρίβεια η πειραματική διαδικασία των μπαταριών και των υπερπυκνωτών, καθώς μέσω των προσομοιώσεων λύνονται αρκετά προβλήματα πριν την φυσική υλοποίηση τους.[15]

Τα κύρια στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή στο lt-spice είναι αντιστάσεις, πυκνωτές, πηγές τάσης και ρεύματος, πηνία και φορτία.

Simulink:

Το simulink, ως ένα από τα εργαλεία της πλατφόρμας MATLAB, είναι ένα ευέλικτο και ισχυρό περιβάλλον προσομοίωσης και μοντελοποίησης δυναμικών συστημάτων. Στην υλοποίηση μπαταριών και υπερπυκνωτών, το simulink παίζει κρίσιμο ρόλο, επιτρέποντας τη δημιουργία μοντέλων που λαμβάνουν υπόψη μια ποικιλία παραμέτρων και λειτουργικών συνθηκών.[16]

Για τις μπαταρίες, το simulink επιτρέπει την προσομοίωση της ηλεκτροχημικής συμπεριφοράς και των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους. Μπορούν να μοντελοποιηθούν παράμετροι όπως η χωρητικότητα, η τάση αποφόρτισης, η εσωτερική αντίσταση και οι θερμικές επιδράσεις. Αυτές οι προσομοιώσεις επιτρέπουν την ανάλυση της απόδοσης των μπαταριών σε διάφορα σενάρια χρήσης, όπως η φόρτιση και η αποφόρτιση υπό διαφορετικά ρεύματα, καθώς και η επίδραση εξωτερικών παραγόντων όπως η θερμοκρασία. Επίσης, το simulink επιτρέπει την προσομοίωση της γήρανσης των

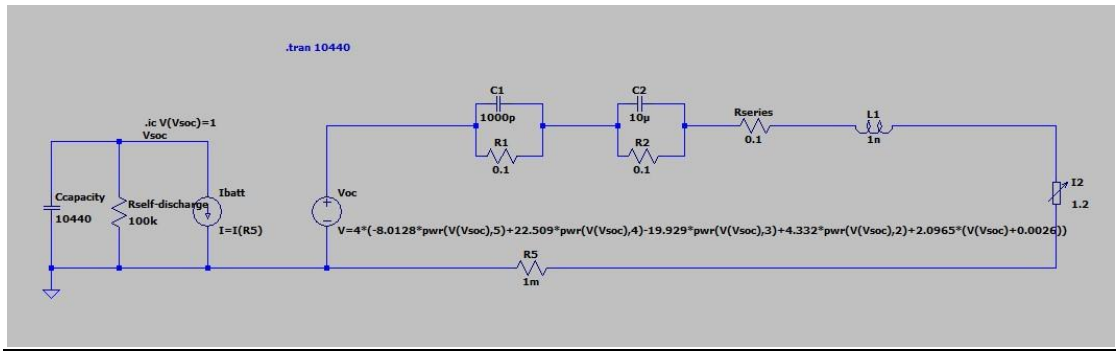
μπαταριών και την πρόβλεψη της μείωσης της χωρητικότητας με την πάροδο του χρόνου, βοηθώντας τους σχεδιαστές να αξιολογήσουν τη διάρκεια ζωής του προϊόντος.

Οι υπερπυκνωτές, με τη δυνατότητα ταχείας φόρτισης και αποφόρτισης, απαιτούν εξίσου λεπτομερή μοντελοποίηση. Το simulink διευκολύνει τη δημιουργία μοντέλων που περιλαμβάνουν την ιδιόρρυθμη απόκριση των υπερπυκνωτών σε υψηλά ρεύματα και τις μεταβατικές καταστάσεις. Τα μοντέλα μπορούν να εξετάσουν τη συμπεριφορά της εσωτερικής αντίστασης, της ηλεκτρικής χωρητικότητας και των θερμικών φαινομένων, παρέχοντας πλήρη εικόνα της λειτουργίας των υπερπυκνωτών σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Επίσης, μπορεί να αναλυθεί η συμπεριφορά τους σε συνδυασμό με άλλες πηγές ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, για τη δημιουργία υβριδικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

4.2 Προσομοίωση στοιχείων υβριδικού συστήματος

4.2.1 Μοντελοποίηση μπαταρίας

1. Προσομοίωση μπαταρίας στο lt-spice:

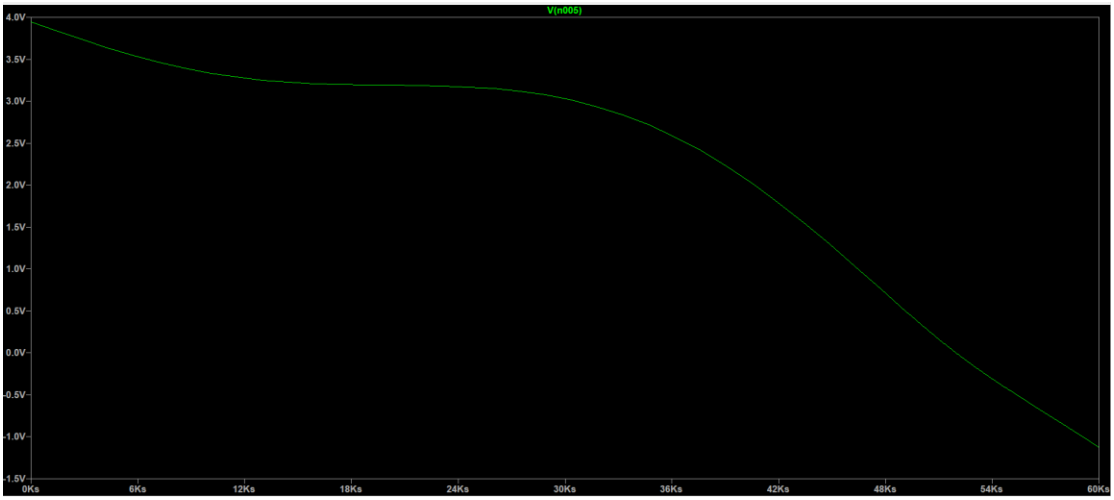


Σχήμα 8: Το μοντέλο της μπαταρίας Li-ion σε περιβάλλον lt-spice

Στο αριστερό μέρος βρίσκεται η χωρητικότητα της μπαταρίας σε Farad. Οι μπαταρίες έχουν χωρητικότητα 2900 mAh οι οποίες αντιστοιχούν σε 10440 Farad. Επίσης υπάρχει η αντίσταση αυτοεκφόρτισης η οποία είναι και σε αυτή τη περίπτωση πολύ μεγάλη λόγω του ότι η μπαταρία αυτοεκφορτίζεται με πολύ αργό ρυθμό. Η πηγή ρεύματος I_{batt} αντιστοιχεί στο ρεύμα φορτίου.

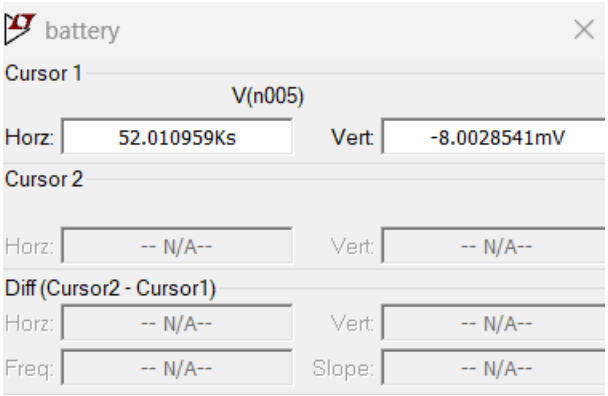
Το δεξί μέρος είναι το εσωτερικό της μπαταρίας (εσωτερική αντίσταση κλπ). Οι τιμές τις εσωτερικής αντίστασης και των υπόλοιπων εσωτερικών χαρακτηριστικών της μπαταρίας καθορίστηκαν με βάση την προσομοίωση.

Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με DC φορτίο στα 0.2 A.

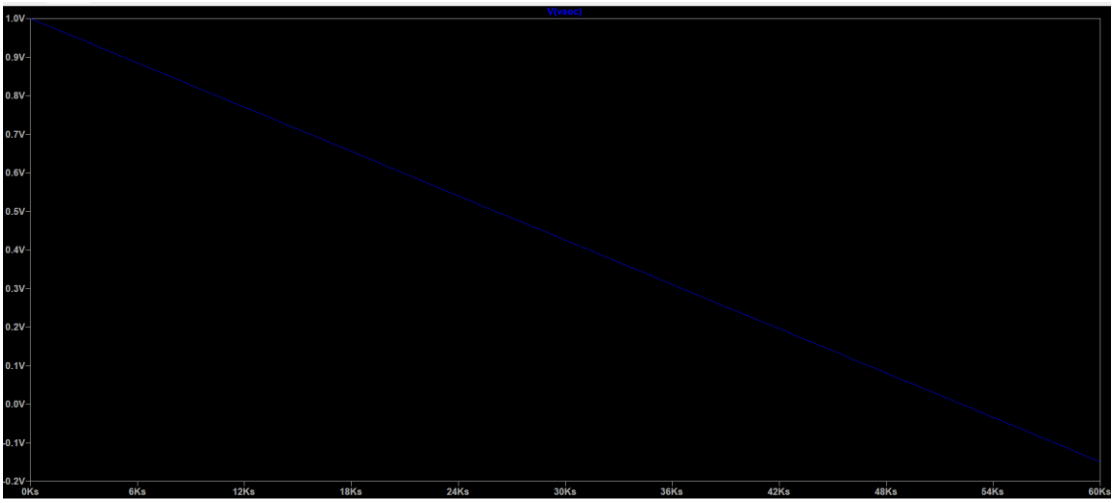


Σχήμα 9: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για DC φορτίο στα 0.2 A

Παρατηρείται ότι η μπαταρία εκφορτίζεται πλήρως σε χρόνο 52 ksec, τα οποία αντιστοιχούν σε 14.5 ώρες. Από τη μορφή της καμπύλης συμπεραίνεται ότι καθώς εκφορτίζεται η μπαταρία η τάση της αρχικά μειώνεται με πολύ μικρό ρυθμό. Σε χρόνο περίπου t = 8.5 ωρών η τάση της μπαταρίας έχει πέσει από τα 3.9 Volt στα 3 Volt, ενώ στη συνέχεια σε χρονικό διάστημα Δt = 6 ωρών από τα 3 Volt η τάση μηδενίζεται. Αυτό συμβαίνει λόγω της πτώσης του SOC της μπαταρίας. Όταν αρχικά η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη το SOC ισούται με 100% και κατά την αποφόρτιση της μπαταρίας πέφτει. Όσο βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα (70%-100%) η τάση της μπαταρίας πέφτει με χαμηλό ρυθμό όπως φαίνεται και στην καμπύλη. Όταν όμως το SOC μειώνεται σε πιο χαμηλά ποσοστά η πτώση στην τάση είναι εμφανώς πιο γρήγορη και μπορεί να τείνει να είναι και κατακόρυφη σε περίπτωση που η μπαταρία έχει υποστεί γήρανση, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου η μπαταρία έχει εξαντλήσει πολλούς κύκλους ζωής.



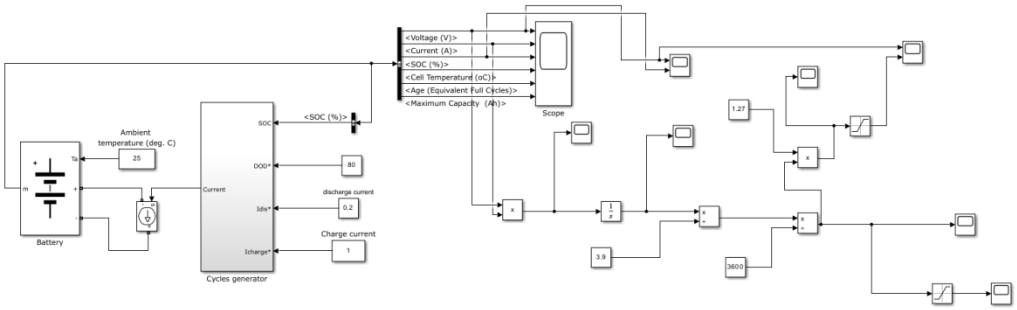
Σχήμα 10: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης με τη χρήση των cursors σε περιβάλλον lt-spice



Σχήμα 11: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για το SOC της μπαταρίας

Παρατηρείται ότι το SOC μηδενίζεται στον ίδιο χρόνο που μηδενίζεται και η τάση της μπαταρίας όπως ήταν αναμενόμενο σε χρόνο 14.5 ωρών. Στις 8.5 ώρες όπου αρχίζει η πτώση στην τάση να είναι μεγαλύτερη το SOC είναι σε ποσοστό περίπου 50%.

2. Προσομοίωση μπαταρίας σε matlab και simulink:



Σχήμα 12: Το μοντέλο της μπαταρίας Li-ion σε περιβάλλον simulink

Το σύστημα αποτελείται από την μπαταρία, από μία ελεγχόμενη πηγή ρεύματος και από τον ρυθμιστή των κύκλων ζωής της μπαταρίας.

Οι παράμετροι που έχουν χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση της μπαταρίας αφορούν το κάθε cell (μονάδα μπαταρίας) ξεχωριστά και όχι το pack(πακέτο) των τριών μπαταριών που έχουν στη έξοδο τους 12 Volts, όπως θα περιγραφεί παρακάτω στις πειραματικές μετρήσεις.

Τα χαρακτηριστικά του μοντέλου της μπαταρίας είναι τα εξής:

Ονομαστική τάση: 3.7 Volts

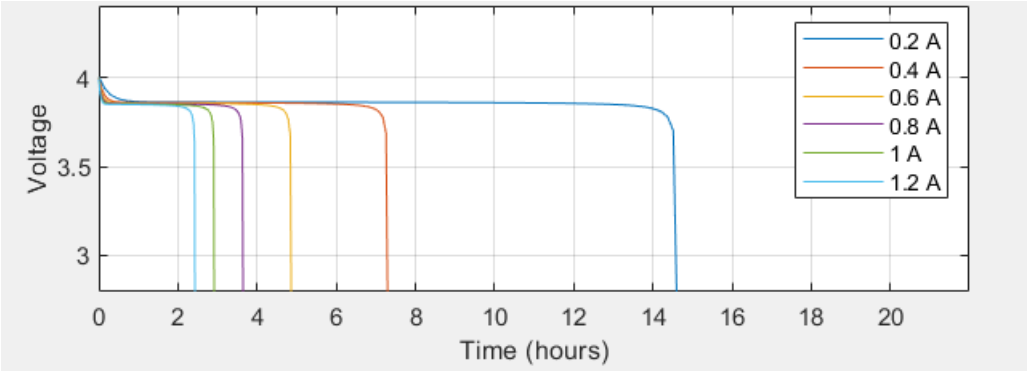
Τάση πλήρους φόρτισης: 4 Volts

Χωρητικότητα: 2900 mAh

Cutt-off Voltage: 2.775 Volts

Το μοντέλο του cycles generator παίρνει ως εισόδους τα ρεύματα φόρτισης και αποφόρτισης της μπαταρίας και κάθε φορά επιλέγεται αν θα φορτίζεται ή θα αποφορτίζεται η μπαταρία.

Παρακάτω παρουσιάζεται η συμπεριφορά της μπαταρίας για διάφορες τιμές του ρεύματος. Καθώς στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν το εργαστήριο για την διάταξη το ρεύμα που τραβούσε ο κινητήρας από τις μπαταρίες ήταν 0.2 A (ενώ το ρεύμα που τραβάει ο κινητήρας όταν έχει ονομαστικό φορτίο στο άξονα του είναι 1.2), οι τιμές των ρευμάτων που έχουν ενταχθεί στη προσομοίωση είναι από 0.2 A μέχρι 1.2 A.

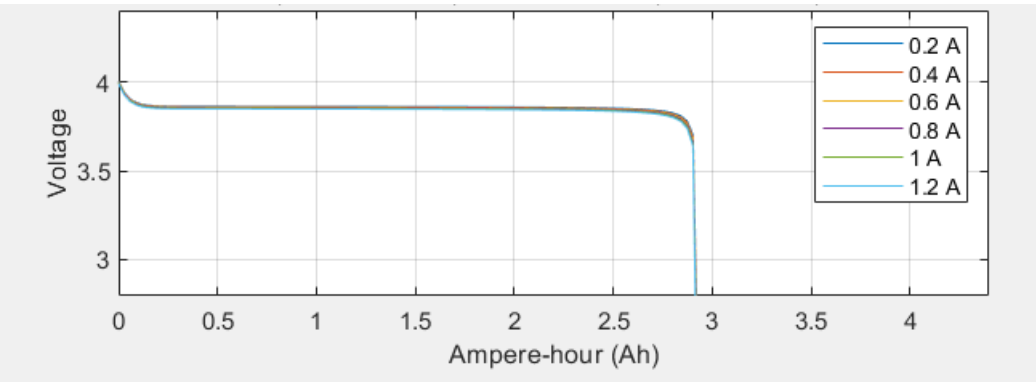


Σχήμα 13: Η συμπεριφορά της μπαταρίας για διάφορες τιμές ρεύματος φορτίου

Το αποτέλεσμα αυτής της προσομοίωσης είναι ανάλογο με το αποτέλεσμα της προσομοίωσης στο lt-spice καθώς η μπαταρία εκφορτίζεται πλήρως σε χρονικό διάστημα 14.5 ωρών. Παρόλα αυτά η μορφή είναι λίγο διαφορετική καθώς η τάση μειώνεται με ελάχιστο ρυθμό για τις πρώτες 14 ώρες και στα τελευταία 30 λεπτά παρατηρείται μία απότομη σχεδόν κατακόρυφη μείωση.

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων του κινητήρα η τάση μηδενίζεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα όπως ήταν αναμενόμενο καθώς όσο μεγαλύτερο ρεύμα απορροφά το φορτίο της μπαταρίας τόσο πιο γρήγορα η ίδια αποφορτίζεται.

Επίσης πραγματοποιήθηκε προσομοίωση για την τάσης της μπαταρίας σε σχέση με την χωρητικότητα της σε Ah.

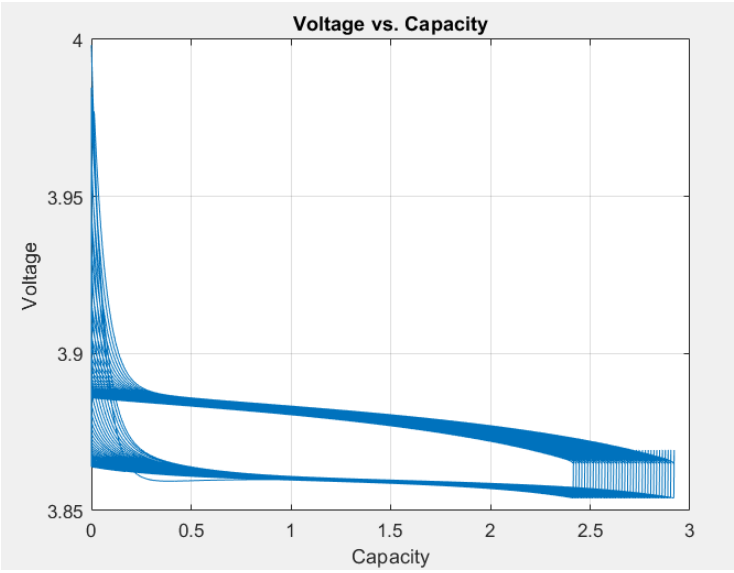


Σχήμα 14: Η σχέση μεταξύ της τάσης και της χωρητικότητας της μπαταρίας για διάφορες τιμές του ρεύματος φορτίου

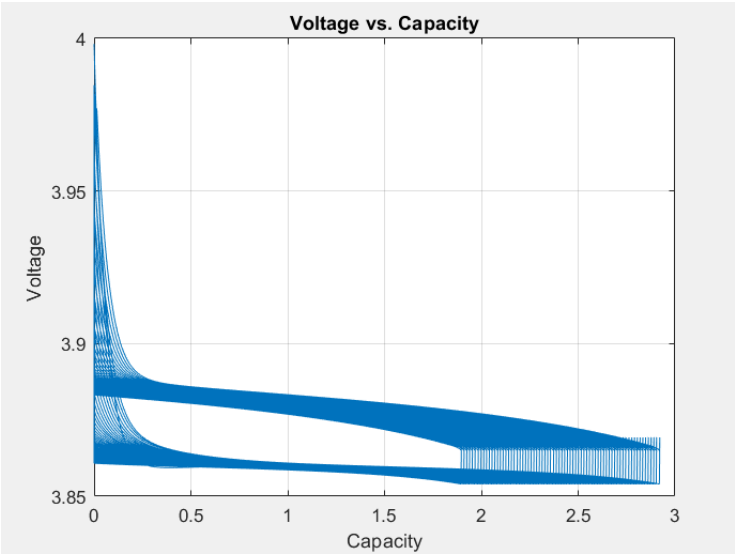
Όπως φαίνεται οι διαφορές στο ρεύμα είναι πολύ μικρές και δεν είναι ευδιάκριτη η διαφορά από την κάθε καμπύλη. Για τέτοιες τάξεις ρευμάτων η συμπεριφορά της τάσης σε σχέση με την χωρητικότητα είναι σχεδόν ίδια.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με στόχο να ελεγχθεί το πως ανταποκρίνεται η μπαταρία μετά το πέρας μερικών κύκλων ζωής. Κατά την προσομοίωση το ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας έχει οριστεί στο 1 A και το ρεύμα αποφόρτισης στα 0.2 A όπως ακριβώς και στη διαδικασία του πειράματος στο εργαστήριο. Για πλήρη φόρτιση των μπαταριών χρειάζονται περίπου 2.5 με 3 ώρες, ενώ για πλήρη αποφόρτιση όπως αναφέρθηκε και παραπάνω χρειάζονται περίπου 14.5 ώρες. Το συμπέρασμα είναι πως ένας πλήρης κύκλος φόρτισης-αποφόρτισης μιας μπαταρίας διαρκεί περίπου 17 ώρες.

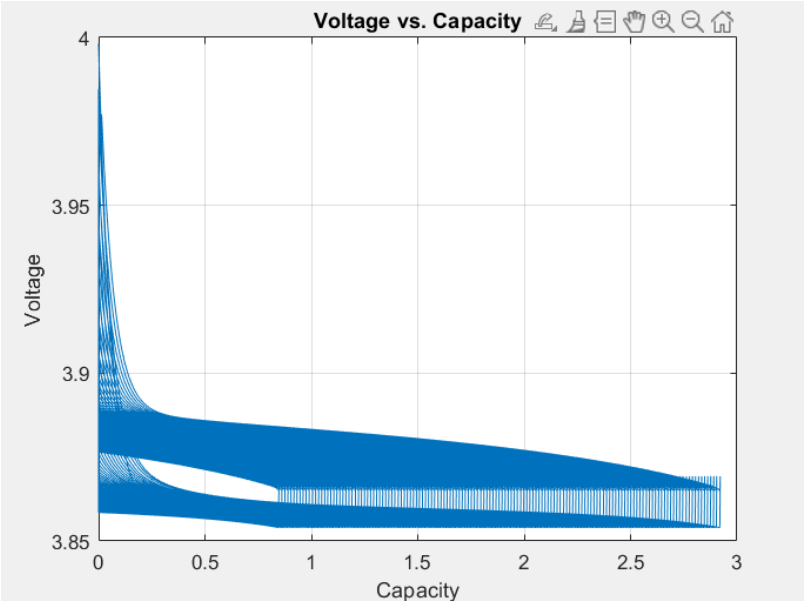
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης για τη σχέση τάσης-χωρητικότητας της μπαταρίας:



Σχήμα 15: Προσομοίωση για 36 κύκλους ζωής της μπαταρίας



Σχήμα 16: Προσομοίωση για 72 κύκλους ζωής της μπαταρίας



Σχήμα 17: Προσομοίωση για 144 κύκλους ζωής της μπαταρίας

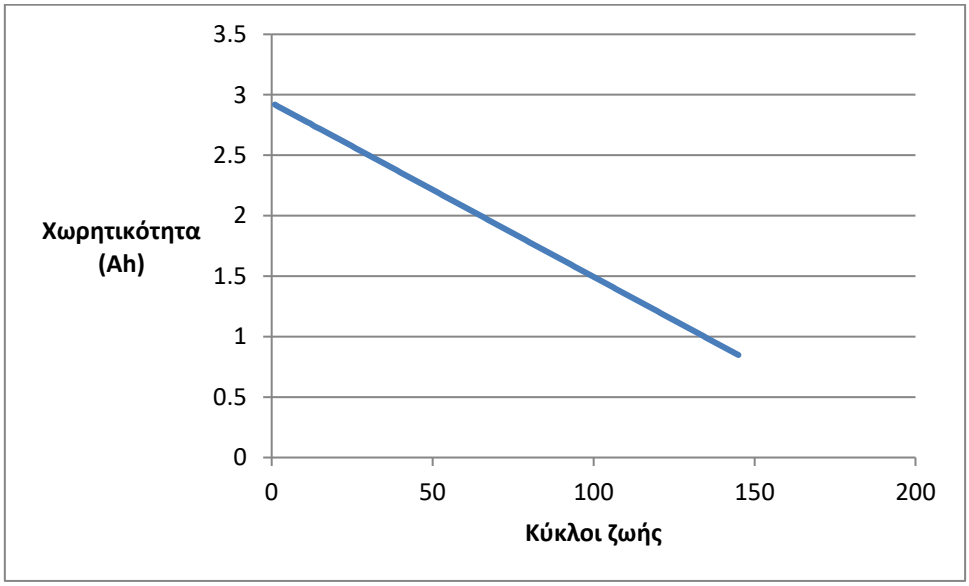
Από το αποτελέσματα που προέκυψαν παρατηρείται ότι όσο περισσότερες φορές αποφορτιστεί και φορτιστεί ξανά η μπαταρία, δηλαδή όσοι περισσότεροι κύκλοι λειτουργίας της περάσουν τόσο περισσότερο θα μειώνεται και η χωρητικότητα της. Μετά το πέρας των πρώτων 36 κύκλων ζωής η χωρητικότητα που χρησιμοποιεί η μπαταρία κατά την αποφόρτιση της έχει μειωθεί κοντά στις 2.4 Ah. Αυτό σημαίνει ότι μετά από 36 κύκλους ζωής η χωρητικότητα της μπαταρίας έχει μειωθεί περίπου κατά 0.5 Ah. Στη συνέχεια με τον διπλασιασμό του αριθμού των κύκλων φαίνεται πως η χωρητικότητα έχει μειωθεί αρκετά περίπου στις 1.9 Ah. Περαιτέρω αύξηση στους κύκλους ζωής επιφέρει αντίστοιχη μείωση στη χωρητικότητα της μπαταρίας. Τελικά έπειτα από 144 κύκλους ζωής η χωρητικότητα έχει πέσει κάτω από τη 1 Ah κάτι που καθιστά την μπαταρία πολύ αδύναμη για την εφαρμογή μας, καθώς η φθορά έχει υποβαθμίσει σε πολύ μεγάλο βαθμό την απόδοση της.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της χωρητικότητας της μπαταρίας ανά 10 κύκλους ζωής. Επιπλέον αναγράφονται και οι τιμές της χωρητικότητας για τους κύκλους 36, 72 και 144.

Κύκλος ζωής	Χωρητικότητα της μπαταρίας (Ah)
1	2.9193
10	2.7891
20	2.6466
30	2.5022
36	2.4167
40	2.3576
50	2.2151
60	2.0705
70	1.9257
72	1.8972
80	1.7809
90	1.6388
100	1.4946
110	1.3503
120	1.2080
130	1.0636
140	0.9190
144	0.8620
145	0.8478

Πίνακας 5: Η χωρητικότητα της μπαταρίας με το πέρας των κύκλων ζωής της

Η ακόλουθη καμπύλη προκύπτει από τις παραπάνω τιμές, δηλαδή τη σχέση μεταξύ της χωρητικότητας της μπαταρίας συναρτήσει του αριθμού των κύκλων ζωής της.



Σχήμα 18: Η χωρητικότητα της μπαταρίας σε Ah συναρτήσει των κύκλων ζωής

Παρατηρείται πως η μείωση στη χωρητικότητα της μπαταρίας με το πέρας των κύκλων ζωής της είναι σταθερή. Μία καινούργια μπαταρία έχει χωρητικότητα 2.9 Ah και όσο περνάν οι κύκλοι ζωής της, δηλαδή όσες περισσότερες φορές φορτίζεται και αποφορτίζεται αυτή η

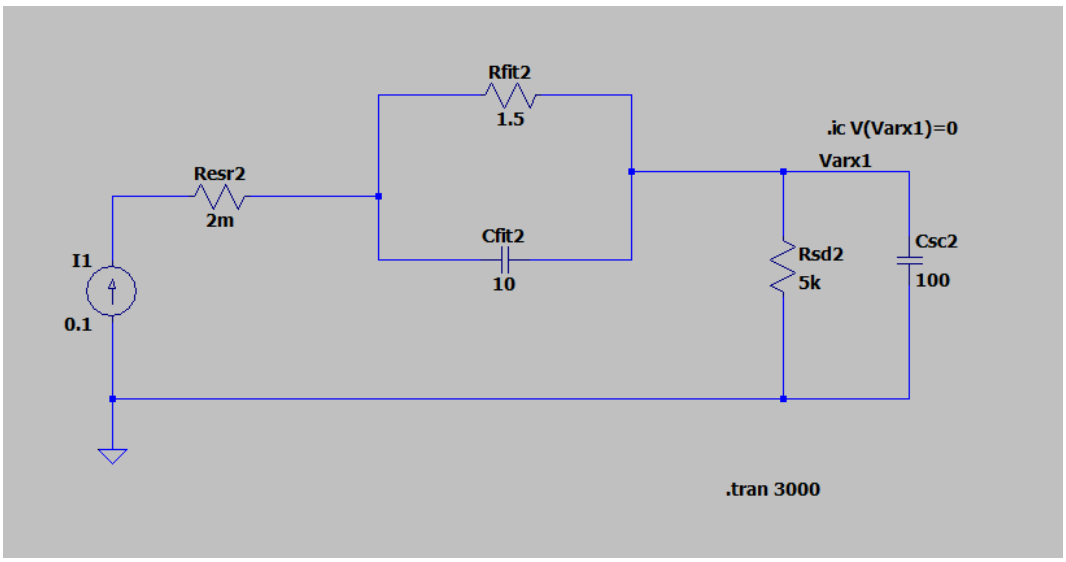
χωρητικότητα μειώνεται. Βλέπουμε ότι μετά από 145 κύκλους ζωής η χωρητικότητα έχει μειωθεί περίπου στις 0.8 Ah κάτι που την καθιστά πολύ αδύναμη για την τροφοδοσία του κινητήρα και την σωστή λειτουργία της διάταξης. Σε περιπτώσεις όπως αυτή όπου η απόδοση της μπαταρίας έχει μειωθεί αισθητά λόγω της φθοράς που έχει υποστεί η χρήση των υπερπυκνωτών θα πρέπει να είναι όλο και πιο συχνή για την τροφοδοσία του κινητήρα και να μην ενεργοποιούνται μόνο σε περιπτώσεις αυξημένης ζήτησης ισχύος, όπως είναι η εκκίνηση. Συμπερασματικά οι υπερπυκνωτές μετά το πέρας ορισμένου αριθμού κύκλων μπαταρίας (στη συγκεκριμένη περίπτωση μετά από 135 κύκλους όπου η χωρητικότητα πέφτει κάτω από τη 1 Ah ή για μεγαλύτερη σιγουριά μετά από 100 κύκλους όπου η ίδια πέφτει κάτω από τις 1.5 Ah), θα πρέπει να χρησιμοποιούνται και ως πηγή τροφοδοσίας του κινητήρα όταν αυτός βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του και όχι μόνο σε περιπτώσεις μεταβατικών φαινομένων.

4.2.2 Μοντελοποίηση υπερπυκνωτή

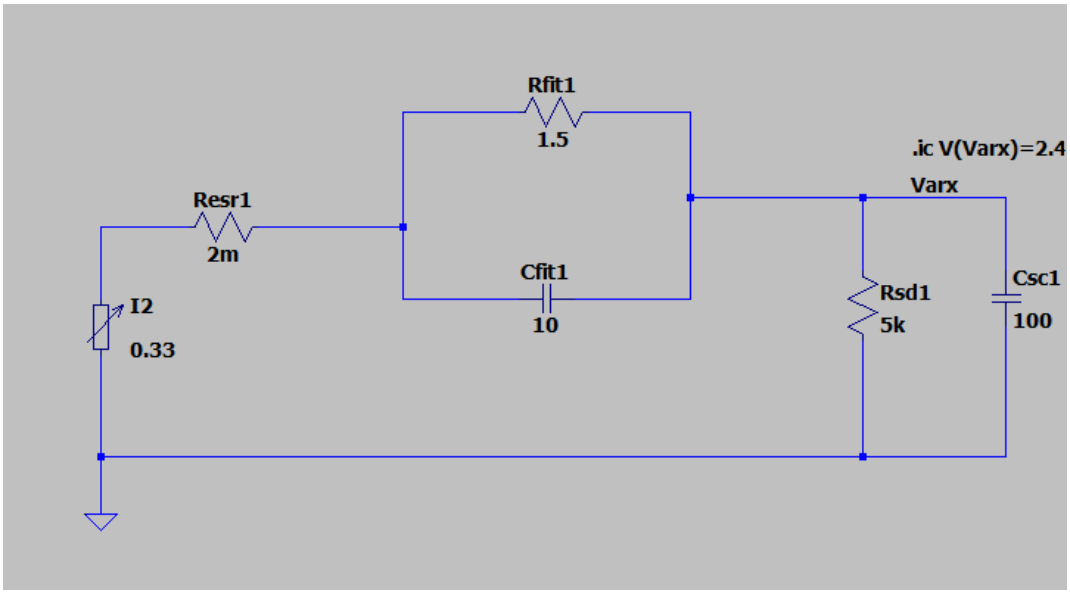
1. Προσομοίωση υπερπυκνωτή στο lt-spice

Υλοποιήθηκε ένα μοντέλο υπερπυκνωτή στο lt-spice στο οποίο πραγματοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις.

Η 1η προσομοίωση αντιστοιχεί στη φόρτιση του υπερπυκνωτή με σταθερή τάση στα 5Volt και σταθερό ρεύμα στα 0.1 A, ενώ η 2η αντιστοιχεί στην αποφόρτιση του με ρεύμα ίσο με 0.33 A. Στην αποφόρτιση επιλέχθηκε σταθερό ρεύμα φορτίου ίσο με 0.33 A για το λόγο ότι στις μετρήσεις του εργαστηρίου το ρεύμα ξεκίνησε αρχικά από τα 0.4 A και μειώθηκε μέχρι τα 0.25 A όταν ο υπερπυκνωτής αποφορτίστηκε. Συνεπώς η μέση τιμή του ρεύματος θα είναι περίπου στα 0.33 A.



Σχήμα 19: Το μοντέλο του υπερπυκνωτή για την φόρτιση σε περιβάλλον lt-spice



Σχήμα 20: Το μοντέλο του υπερπυκνωτή για την αποφόρτιση σε περιβάλλον lt-spice

Όπου:

C_{sc} = χωρητικότητα του υπερπυκνωτή = 100 Farad

R_{sd} = αντίσταση αυτοεκφόρτισης του υπερπυκνωτή

Καθώς η αυτοεκφόρτιση σε έναν υπερπυκνωτή γίνεται αρκετά αργά προβλέφθηκε μία μεγάλη τιμή σε αυτή την αντίσταση ίση με R_{sd} = 5 kΩ.

Η αντίσταση R_{esr} υπολογίζεται από πειραματικά δεδομένα για κάθε υπερπυκνωτή ξεχωριστά μέσα από την μεταβολή της τάσης σε κάποια απότομη διακύμανση του ρεύματος. Αυτή η αντίσταση συνήθως παίρνει τιμές από 2 mΩ μέχρι 3 mΩ. Στο συγκεκριμένο μοντέλο έχει οριστεί ίση με R_{esr} = 2 mΩ.

Η αντίσταση R_{fit} και ο πυκνωτής C_{fit} χρησιμοποιούνται για να βελτιωθεί η ακρίβεια των δυναμικών διεργασιών και την φόρτιση και την αποφόρτιση του υπερπυκνωτή. Πραγματοποιώντας κάποιες δοκιμές συμπεραίνεται πως οι τιμές που ορίσαμε είναι αρκετά ικανοποιητικές.

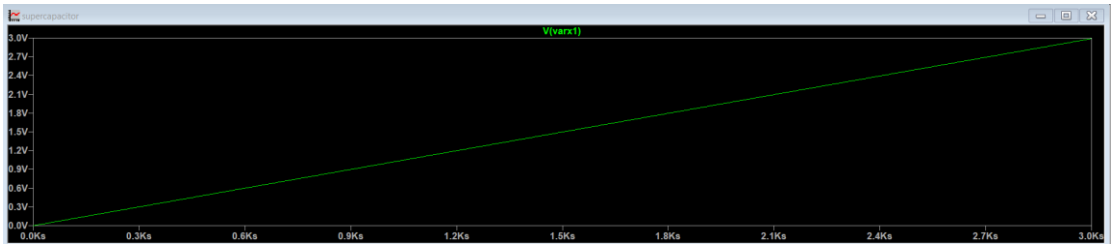
Οι αρχικές τιμές των τάσεων των υπερπυκνωτών που ορίσαμε στις προσομοιώσεις είναι:

<u>Για την φόρτιση:</u> V_0 = 0 Volt, δηλαδή πλήρως αποφορτισμένος.

<u>Για την αποφόρτιση:</u> V_0 = 2.4 Volt. Ορίσαμε την αρχική τιμή της τάσης 2.4 Volt και όχι 2.7 Volt που είναι η τάση του υπερπυκνωτή στη πλήρη φόρτιση, γιατί στο εργαστήριο φορτίσαμε τους υπερπυκνωτές μέχρι η τάση τους να φτάσει στα 2.6 Volt, αλλά μέχρι να εκκινήσουν οι μετρήσεις για την αποφόρτιση τους (χρονικό διάστημα περίπου 5-10 λεπτών) είχαν αυτοεκφορτιστεί και η τιμή της τάσης τους ήταν κοντά στα 2.4 Volt.

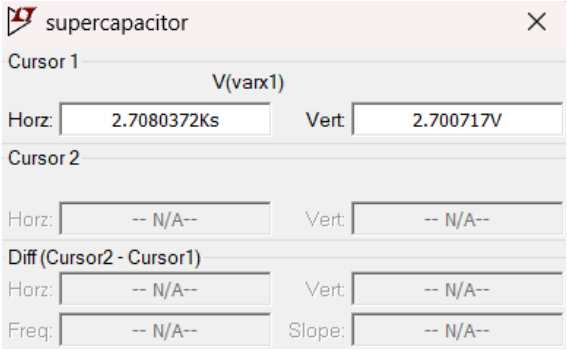
Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων:

<u>Για την φόρτιση:</u>



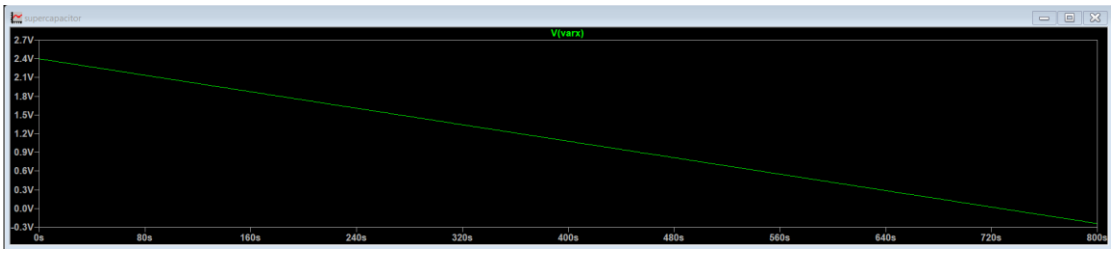
Σχήμα 21: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την φόρτιση του υπερπυκνωτή σε περιβάλλον lt-spice

Όπως φαίνεται ο χρόνος που απαιτείται για να φορτιστεί πλήρως ο υπερπυκνωτής, δηλαδή να φτάσει η τάση στα άκρα του να είναι ίση με 2.7 Volt, με σταθερό ρεύμα 0.1 A είναι 2700 sec που αντιστοιχούν σε 45 λεπτά.



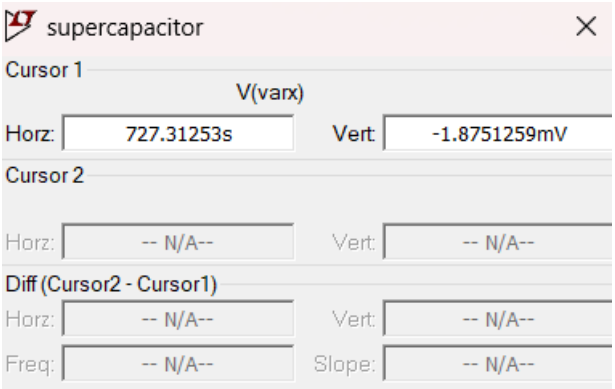
Σχήμα 22: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης φόρτισης με τη χρήση των cursors σε περιβάλλον lt-spice

<u>Για την αποφόρτιση:</u>



Σχήμα 23: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την αποφόρτιση του υπερπυκνωτή σε περιβάλλον lt-spice

Το χρονικό διάστημα που χρειάστηκε για να εκφορτιστεί πλήρως ο υπερπυκνωτής με αρχική τιμή τάσης στα 2.4 Volt είναι 730 sec που αντιστοιχούν σε 12 λεπτά. Προφανώς η αποφόρτιση του υπερπυκνωτή είναι πολύ πιο γρήγορη από την φόρτιση του.



Σχήμα 24: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης αποφόρτισης με τη χρήση των cursors σε περιβάλλον lt-spice

Τόσο στη φόρτιση όσο και στην αποφόρτιση του υπερπυκνωτή παρατηρείται ότι η αύξηση και η πτώση της τάσης αντίστοιχα είναι σχεδόν γραμμική με το χρόνο σε αντίθεση με την μπαταρία που η μείωση της τάσης γίνεται απότομα μετά το πέρας ενός ορισμένου χρονικού διαστήματος.

2. Σχέση μεταξύ ρεύματοςφορτίου και χρόνου αποφόρτισης του υπερπυκνωτη

Προκειμένου να δούμε την συμπεριφορά του υπερπυκνωτή για διάφορες τιμές ρεύματος φορτίου πραγματοποίησαμε δοκιμές στο lt-spice σε ένα εύρος ρευμάτων από 0.05 A εώς 1.5 A με βήμα 0.05 A.

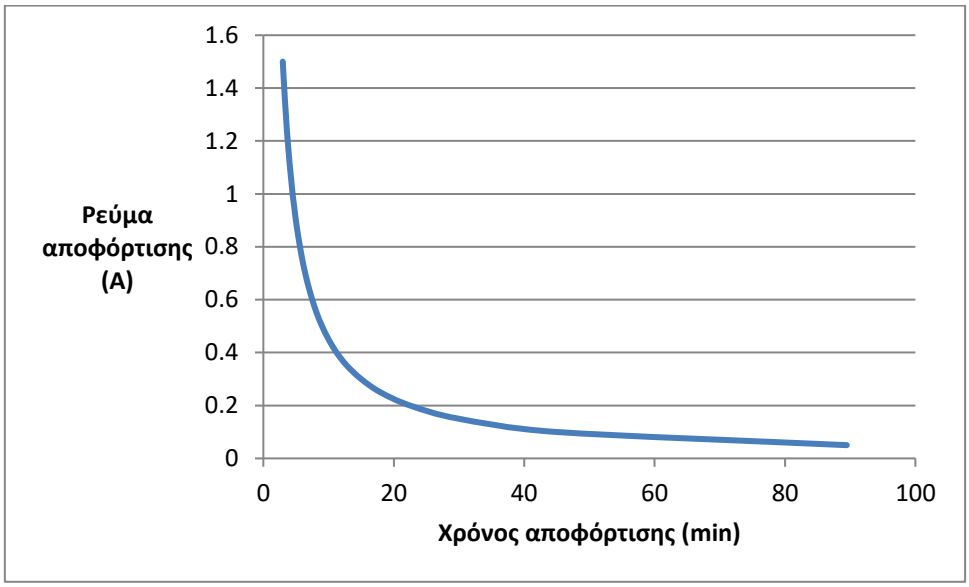
Τα αποτελέσματα στους χρόνους αποφόρτισης αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

Ρεύμα αποφόρτισης (A)	Χρόνος αποφόρτισης (min)
0,05	89,5
0,1	45
0,15	29,95
0,2	22,5
0,25	17,95
0,3	15
0,35	12,9
0,4	11,3
0,45	10
0,5	9
0,55	8,2
0,6	7,5
0,65	7
0,7	6,4
0,75	6
0,8	5,6
0,85	5,3
0,9	5
0,95	4,8
1	4,5

1,05	4,3
1,1	4
1,15	3,9
1,2	3,7
1,25	3,6
1,3	3,45
1,35	3,3
1,4	3,2
1,45	3
1,5	2,9

Πίνακας 6: Οι χρόνοι αποφόρτισης του υπερπυκνωτή για τις διάφορες τιμές του ρεύματος φορτίου

Ακολουθεί η καμπύλη που προκύπτει από τις παραπάνω τιμές.



Σχήμα 25: Καμπύλη για τον χρόνο αποφόρτισης του υπερπυκνωτή για τις διάφορες τιμές του ρεύματος φορτίου

Όπως είναι ευδιάκριτο και από την καμπύλη ο χρόνος αποφόρτισης του υπερπυκνωτή για την μικρότερη τιμή του ρεύματος φορτίου στα 0.05 A είναι 89.5 min. Με την αύξηση του ρεύματος μέχρι και τα 0.5 A παρατηρείται μία ραγδαία μείωση στο χρόνο αποφόρτισης του με αυτόν να ισούται με 9 min για ρεύμα 0.5 A. Η περαιτέρω αύξηση του ρεύματος δεν έχει τόσο μεγάλη επιρροή στο χρόνο αποφόρτισης του υπερπυκνωτή καθώς από τα 9 min όταν το ρεύμα αυξήθηκε μέχρι τα 1.5 A ο χρόνος αποφόρτισης έπεσε στα 2.9 min. Παρόλα αυτά είναι μία αισθητή διαφορά που παίζει σημαντικό ρόλο στη τροφοδοσία του κινητήρα καθώς σε περιπτώσεις εκκίνησης ή επιτάχυνσης που το ρεύμα αυξάνεται αρκετά πρέπει να είναι γνωστός ο χρόνος που μπορεί να λειτουργήσει ο υπερπυκνωτής και να τροφοδοτήσει τον κινητήρα με αυτό το ρεύμα.

Οι δοκιμές για διάφορες τιμές του ρεύματος φορτίου του υπερπυκνωτη πραγματοποιήθηκαν για να εξεταστεί η συμπεριφορά του υπερπυκνωτή για μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων καθώς οι υπερπυκνωτές σε ένα υβριδικό σύστημα τροφοδοσία ηλεκτρικού κινητήρα μπαίνουν σε λειτουργία όταν η ζήτηση σε ισχύ είναι αυξημένη, δηλαδή στις

εκκινήσεις και στις επιταχύνσεις του οχήματος, όπως αναφέρθηκε και λίγο παραπάνω. Σε τέτοιες περιπτώσεις το ρεύμα που αντλεί ο κινητήρας από το σύστημα τροφοδοσίας του είναι εμφανώς αυξημένο σχετικά με αυτό στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συνεπώς είναι σημαντική ακόμα και η διαφορά ενός λεπτού στην αυτονομία του υπερπυκνωτή σε τέτοιες τιμές ρεύματος.

4.3 Πειραματικές μετρήσεις μπαταριών

Για τις πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν τα εξής εξαρτήματα:

- 3 μπαταρίες Li-ion 2900 mAh, 3.7 Volt
- Ένας μικροελεκτής PWM
- Ένας DC κινητήρας 12 Volt, 1.2 A

SKU: EMH-1174

Specifications:

- Motor type: JM37-3530. (JGB37)
- Operating voltage: between 6 ~15V.
- Free-run speed at 12V: 295 RPM.
- Free-run current at 12V: 120mA.
- Stall current at 12 V: 1.2A.
- Stall torque at 12V: 15N/cm (1.52kg.cm).
- Gear ratio: 1:10.
- Gear Type: All Metal.
- Shaft Diameter: Ø6mm D-Shape.
- Gear Box size L: 19 mm.
- Weight: 177g.

Σχήμα 26: Το datasheet του κινητήρα των 12 Volt και 1.2 A

Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων ο κινητήρας τροφοδοτούνταν από τις 3 μπαταρίες οι οποίες ήταν συνδεδεμένες σε σειρά και ενδιάμεσα τους συνδέσαμε τον μικροελεκτή PWM έτσι ώστε να μπορούμε να ελέγξουμε την ταχύτητα του κινητήρα.

Ο μικροελεκτής PWM συνοδεύεται από ένα διακόπτη που κάνει πολύ εύκολο τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα. Έτσι ο PWM μπορεί να ελέγξει τις στροφές του κινητήρα από 10% εώς 100%. Ακόμη περιέχει προστασία αντίστροφης πολικότητας και προστασία υψηλού ρεύματος προκειμένου να αποφευχθεί κάποιο βραχυκύκλωμα από λανθασμένη συνδεσμολογία. Κάποια από τα βασικά μεγέθη του είναι:

Τάση λειτουργίας DC: 9V-50V

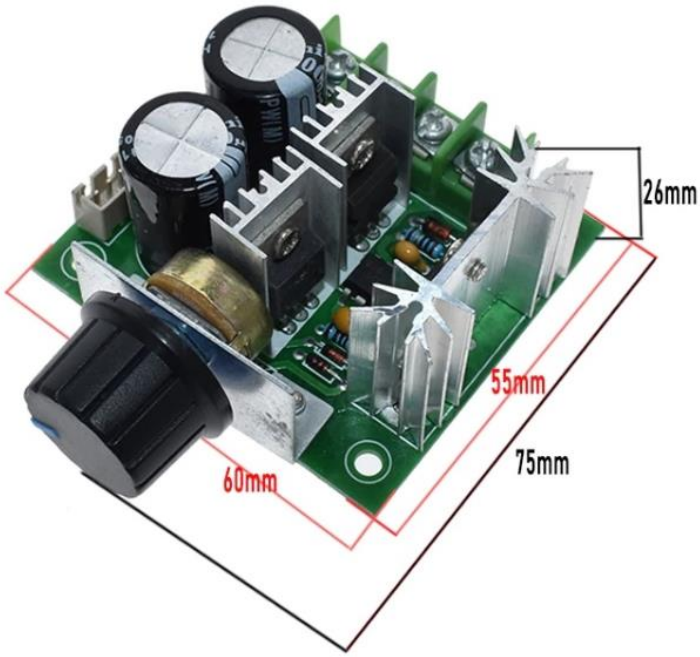
Ισχύς ελέγχου: 0.01-500W

Ονομαστικό ρεύμα: 10 A

Συχνότητα: 13 kHz

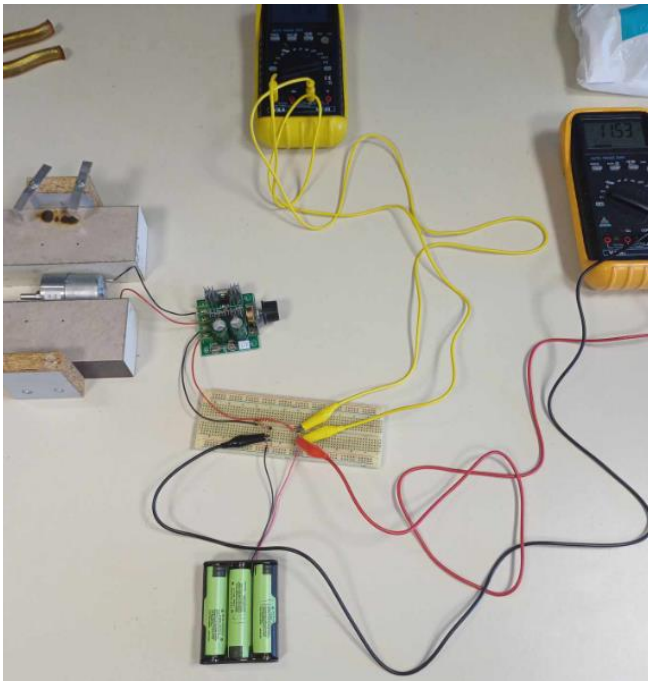
Τάση ελέγχου: 0-5V

Αντίσταση: 10 kΩ



Σχήμα 27: Ο μικροελεγκτής PWM

Πριν την αρχή των μετρήσεων οι 3 μπαταρίες ήταν πλήρως φορτισμένες και η τάση στα άκρα της κάθε μπαταρίας μετρήθηκε ίση με 4 Volt.



Σχήμα 28: Η διάταξη του πειράματος

Όπως είναι φανερό στον άξονα του κινητήρα δεν προσθέσαμε φορτίο και έτσι το ρεύμα που τραβούσε στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του από τις μπαταρίες όταν αυτές ήταν πλήρως φορτισμένες ήταν ίσο με 0.2 Ampere και όχι 1.2 Ampere που θα ήταν στο ονομαστικό του φορτίο.

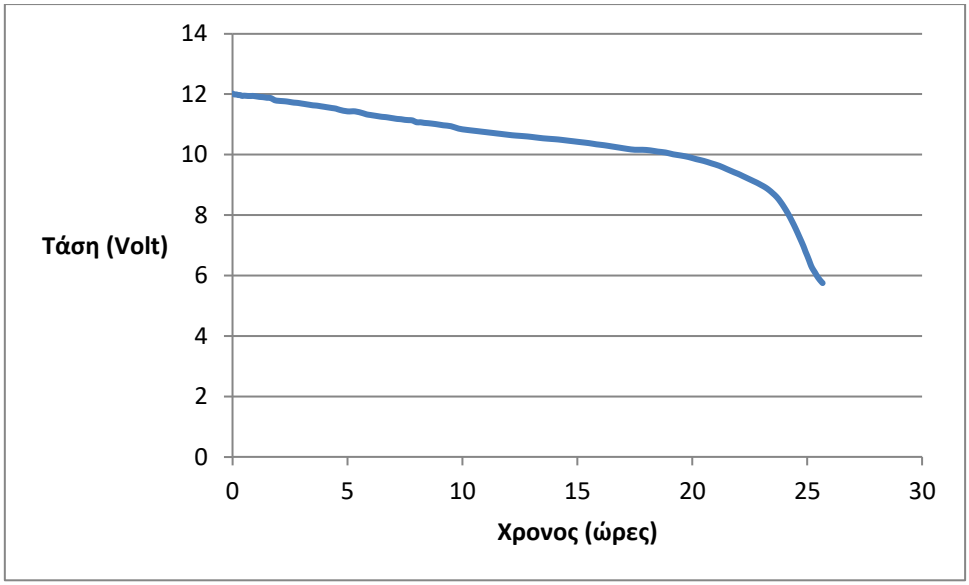
Πριν την έναρξη των μετρήσεων στη μόνιμη κατάσταση πραγματοποιήθηκαν 3 δοκιμές εκκίνησης του κινητήρα έτσι ώστε να ληφθεί το μέγιστο ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα:

1η εκκίνηση: V = 12.01 Volts και I_{max} = 0.3 A

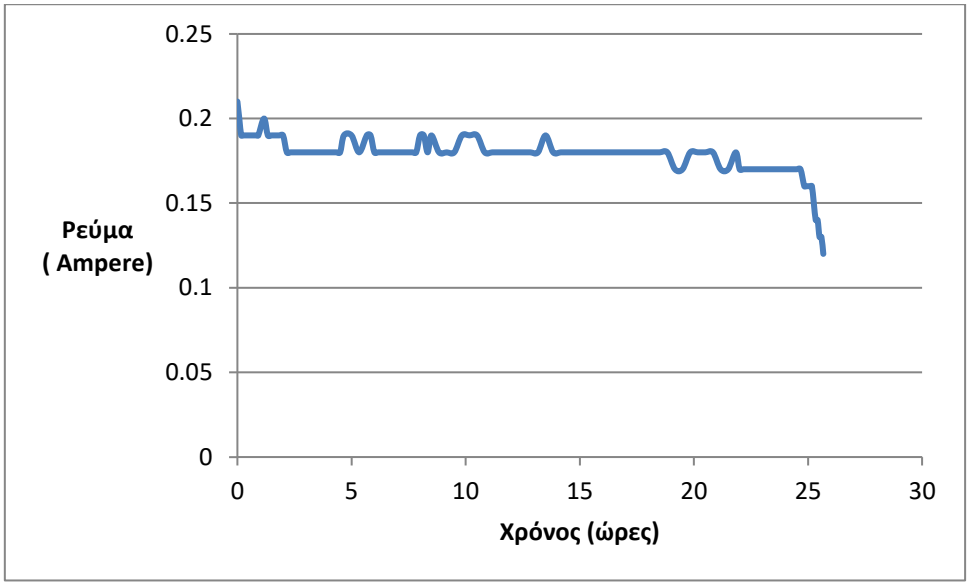
2η εκκίνηση: V = 12.02 Volts και I_{max} = 0.27 A

3η εκκίνηση: V = 12.04 Volts και I_{max} = 0.43 A

Μετά από μετρήσεις διάρκειας περίπου 25 ωρών στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα και σε μέγιστες στροφές τα αποτελέσματα για το ρεύμα και την τάση των μπαταριών είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 29: Τάση στα άκρα του πακέτου των τριών μπαταριών



Σχήμα 30: Το ρεύμα των μπαταριών προς τον κινητήρα

Όπως φαίνεται από τις καμπύλες παρατηρούμε ότι η τάση στα άκρα του pack (πακέτου) των μπαταριών ξεκινάει από τα 12 Volts και μειώνεται με αργό ρυθμό μέχρι μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, κοντά στις 24 ώρες λειτουργίας, όπου οι μπαταρίες παρουσιάζουν απότομη μείωση στην απόδοση τους. Το ίδιο συμβαίνει και με το ρεύμα όταν φτάσει εκείνη η χρονική στιγμή που πέφτει η τάση παρατηρούμε πως το ρεύμα που τροφοδοτεί τον κινητήρα πέφτει και αυτό.

Επίσης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων όταν η τάση στα άκρα του pack των μπαταριών έπεσε κάτω από τα 7 Volts τότε ο δρομέας του κινητήρα ξεκίνησε να περιστρέφεται με εμφανώς χαμηλότερη ταχύτητα. Όταν η τάση έπεσε κάτω από τα 6 Volts τότε ο δρομέας του κινητήρα ίσα που περιστρεφόταν και όταν πλέον η τάση έφτασε στα 5.75 Volts τότε ο κινητήρας σταμάτησε.

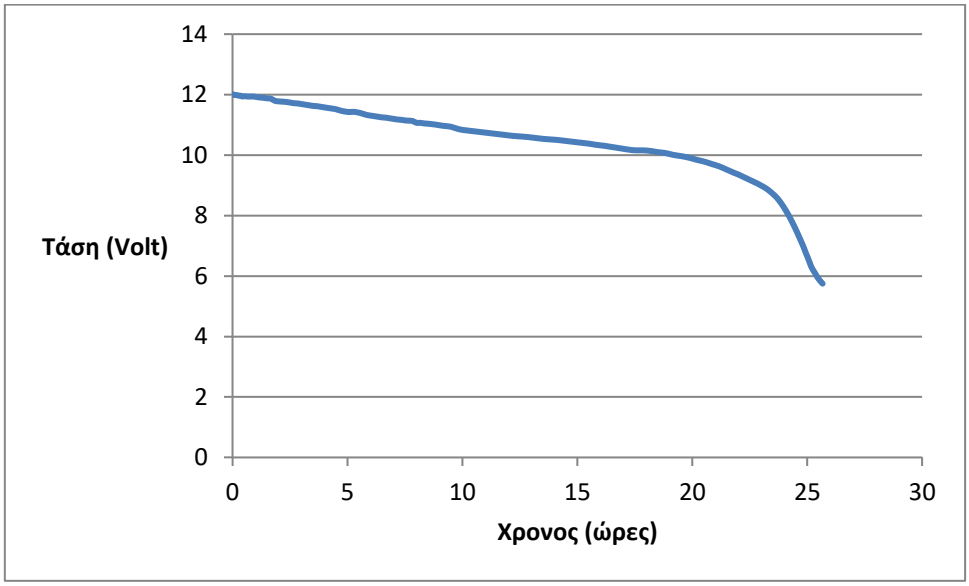
Στο τέλος του πειράματος μετρήθηκε και η τάση στα άκρα της κάθε μπαταρίας ξεχωριστά.

Τελική τιμή τάσης 1ης μπαταρίας: 2.27 Volts

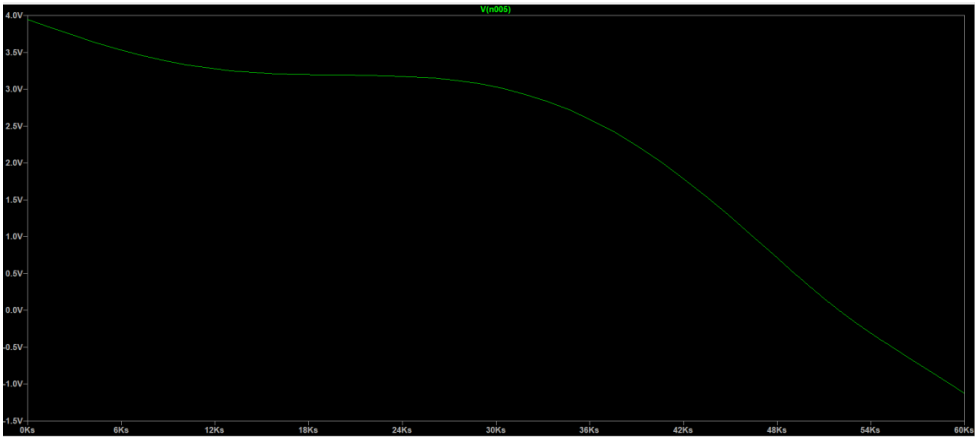
Τελική τιμή τάσης 2ης μπαταρίας: 1.678 Volts

Τελική τιμή τάσης 3ης μπαταρίας: 2.939 Volts

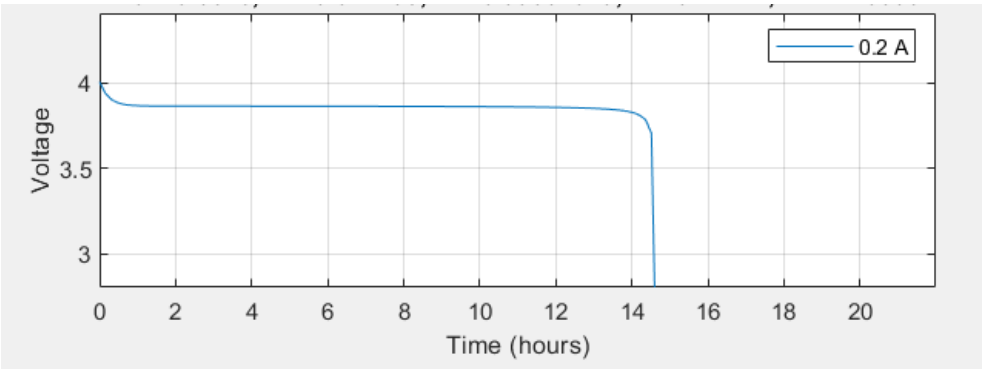
Τέλος γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τόσο στο lt-spice, όσο και στο simulink.



Σχήμα 31: Η τάση στα άκρα του πακέτου των τριών μπαταριών σύμφωνα με τις πειραματικές μετρήσεις



Σχήμα 32: Η τάση στα άκρα των μπαταριών σύμφωνα με την προσομοίωση σε περιβάλλον lt-spice



Σχήμα 33: Η τάση στα άκρα των μπαταριών σύμφωνα με την προσομοίωση σε περιβάλλον simulink

Και στις τρεις καμπύλες παρατηρούμε παρόμοια συμπεριφορά με μικρή μεταβολή στην τάση τις πρώτες ώρες και ξαφνική μείωση αυτής σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στις δύο προσομοιώσεις η αποφόρτιση της μπαταρίας γίνεται σε χρόνο 14.5 ωρών ενώ στις εργαστηριακές μετρήσεις χρειάστηκαν περίπου 25 ώρες έτσι ώστε να σταματήσει ο κινητήρας να περιστρέφεται και συνεπώς να αποφορτιστούν οι μπαταρίες. Αυτή η απόκλιση μπορεί να υπάρχει λόγω του ότι οι μπαταρίες είναι καινούργιες και μόλις στον 1° κύκλο ζωής τους και για αυτό το λόγω έχουν μηδενικές φθορές και η απόδοση τους είναι αυξημένη.

4.4 Συσχέτιση τάσης-χωρητικότητας της μπαταρίας

Μια μπαταρία Li-ion έχει ονομαστική τάση περίπου 3.6V με 3.7V και όταν είναι πλήρως φορτισμένη μπορεί να φτάσει τα 4.2V. Όταν η μπαταρία φτάνει σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης, δηλαδή όταν αρχίζει να αδειάζει η τάση πέφτει κάτω από 3V.

Η χωρητικότητα της μπαταρίας εκφράζει την ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που μπορεί να παρέχει μια μπαταρία στη διάρκεια μιας ώρας και μετράται σε Ah. Συνεπώς για τον υπολογισμό της χωρητικότητας της μπαταρίας χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

Χωρητικότητα (Ah) = Ρεύμα (A) × Χρόνος (h)

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων το ρεύμα του φορτίου λαμβάνεται σταθερό και ίσο με 0.2 A.

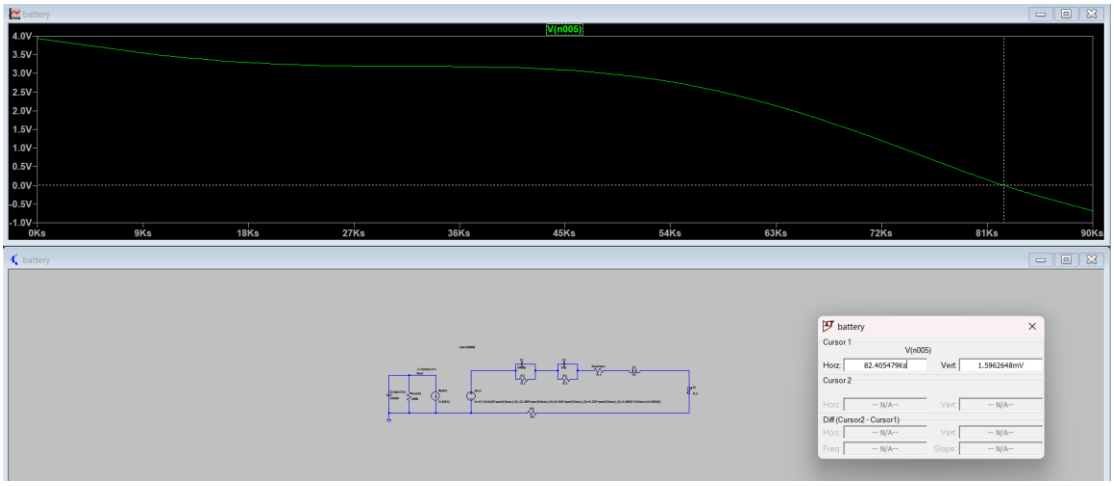
Για να σταματήσει να λειτουργεί ο κινητήρας χρειάστηκαν 25.67 h ενώ για να πέσει η τάση των μπαταριών κάτω από τα 3 Volts χρειάστηκαν 23 h. Σύμφωνα με την συνδεσμολογία του πειράματος δεν ήταν δυνατόν να μετράται η τάση της κάθε μπαταρίας ξεχωριστά. Έτσι όταν η τάση του πακέτου των τριών μπαταριών έφτασε στα 9 Volts, δηλαδή μετά από λειτουργία 23 ωρών, συμπεράναμε πως εκείνη τη χρονική στιγμή η κάθε μπαταρία έφτασε στα 3 Volts.

Η συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας σύμφωνα με τις μετρήσεις είναι:

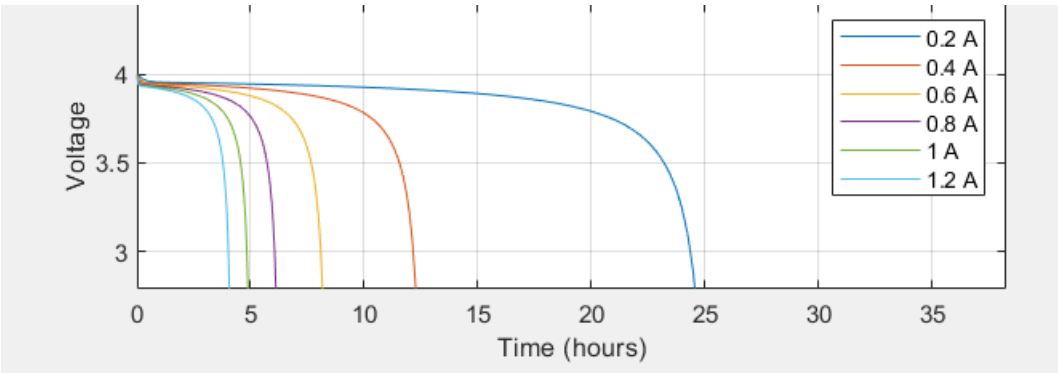
Χωρητικότητα = 0.2 A × 23 h = 4600 mAh

Στο κατάστημα από το οποίο προμηθευτήκαμε τις μπαταρίες αναφερόταν ότι η χωρητικότητα τους είναι 2900mAh. Αυτή η διαφορά μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι οι μπαταρίες είναι καινούργιες και αργούν πολύ να εκφορτιστούν.

Πραγματοποιήθηκε μία προσομοίωση σε περιβάλλον lt-spice και simulink για σταθερό ρεύμα φορτίου στα 0.2 A και χωρητικότητα ίση με 4600 mAh και προέκυψε το εξής αποτέλεσμα:



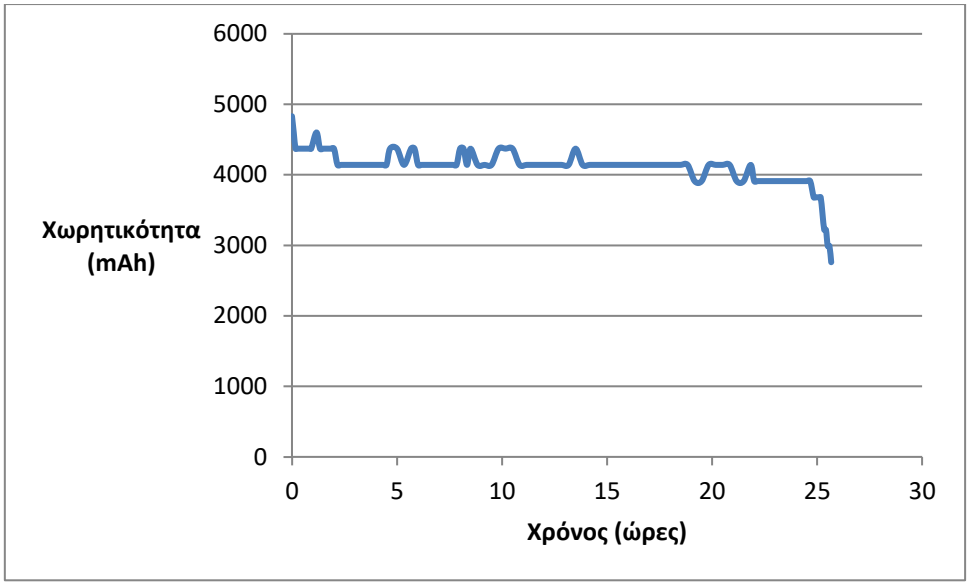
Σχήμα 34: Η τάση στα άκρα της μπαταρίας για προσομοίωση με ρεύμα φορτίου 0.2 A και χωρητικότητα 4600 mAh σε περιβάλλον lt-spice



Σχήμα 35: Η τάση στα άκρα της μπαταρίας για προσομοίωση με ρεύμα φορτίου 0.2 A εώς 1.2 A και χωρητικότητα 4600 mAh σε περιβάλλον simulink

Παρατηρούμε ότι και στις δύο προσομοιώσεις το αποτέλεσμα είναι το ίδιο με τις μετρήσεις στο εργαστήριο, δηλαδή ο χρόνος αποφόρτισης είναι κοντά στις 23 ώρες.

Για την εύρεση της καμπύλης της χωρητικότητας σε σχέση με το χρόνο συνδυάσαμε την στήλη του ρεύματος(από τις μετρήσεις στο εργαστήριο) με τις 23 ώρες, δηλαδή τις ώρες που χρειάστηκαν για να αποφορτιστούν οι μπαταρίες και στη συνέχεια ξαναπολλαπλασιάσαμε με το 1000 για να μετατραπεί το αποτέλεσμα σε mAh.



Σχήμα 36: Η χωρητικότητα των μπαταριών κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών μετρήσεων

Όπως φαίνεται η χωρητικότητα των μπαταριών είναι σχετικά σταθερή λίγο πάνω από τις 4000 mAh και όταν πέφτει απότομα η τάση πέφτει και η χωρητικότητα. Οι μικρές αυξομειώσεις οφείλονται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων υπήρχαν μικρές αυξομειώσεις στο ρεύμα από 0.17 A μέχρι 0.2 A.

4.5 Συσχέτιση τάσης-SOC της μπαταρίας

Η συσχέτιση της τάσης της μπαταρίας με το SOC της θα γίνει με την μέθοδο των ολοκληρωμάτων.

Το SOC της μπαταρίας δίνεται από τον τύπο: SOC = $\frac{Q}{Qmax}$ × 100% (1)

Όπου:

Q = εκτιμώμενη φορτισμένη ποσότητα ενέργειας της μπαταρίας.

Q_{max} = μέγιστη δυνατή φορτισμένη ποσότητα ενέργειας της μπαταρίας.

Για τον υπολογισμό του Q θα έχουμε:

Q = $\int_{t0}^{t}(Iin - Iout)dt$, όπου το I_{in} στην δική μας περίπτωση είναι μηδέν.

Υπάρχει το αρνητικό πρόσημο, οπότε για τον υπολογισμό του Q θα λάβουμε την απόλυτη τιμή.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό του Q είναι η εξής:

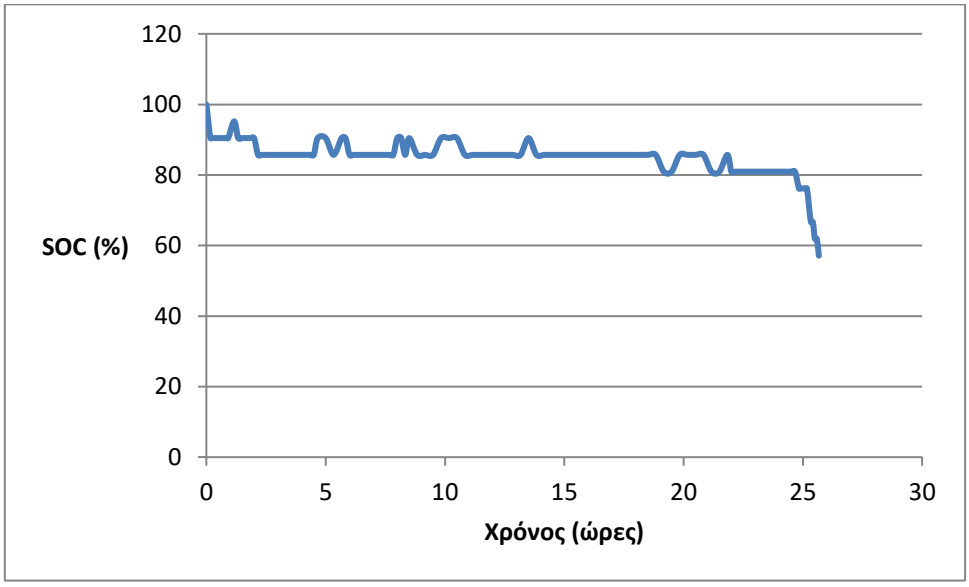
Q = $\int_{t0}^{t}(Iin - Iout)dt$ => Q = I_{out} × (t-t_0)

Συνεπώς εφαρμόστηκε η παραπάνω διαδικασία στις τιμές των μετρήσεων που λήφθηκαν από το εργαστήριο. Η κάθε τιμή του ρεύματος που μετρήθηκε πολλαπλασιάστηκε με το χρονικό διάστημα ενδιάμεσα των μετρήσεων, δηλαδή με τα 10 min και στη συνέχεια έγινε η μετατροπή τους σε Coulombs.

Για τον υπολογισμό του Q_{max} λήφθηκε υπόψη προφανώς η 1η μέτρηση όταν το ρεύμα ήταν 0.21 A, δηλαδή στη μέγιστη τιμή του.

Άρα Q_{max} = 2.1 A*min = 126 Coulombs

Τέλος για να προκύψει το τελικό αποτέλεσμα του SOC εφαρμόστηκε η σχέση (1).



Σχήμα 37: Το SOC των μπαταριών κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών μετρήσεων

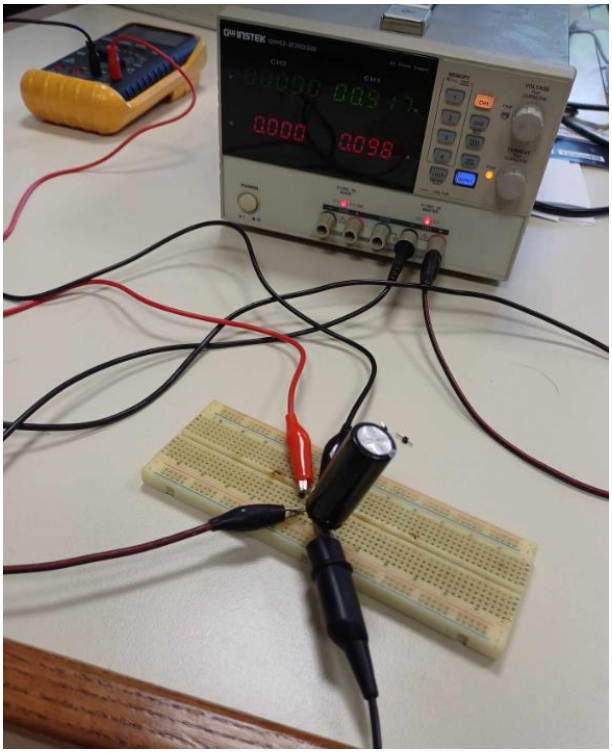
Όπως βλέπουμε το SOC ακολουθεί την συμπεριφορά του ρεύματος της μπαταρίας και πέφτει απότομα στις 23 ώρες όπου η τάση των μπαταριών πέφτει στα 3 Volt.

4.6 Πειραματικές μετρήσεις υπερπυκνωτών

Για τη λήψη των μετρήσεων στο εργαστήριο χρησιμοποιήθηκαν υπερπυκνωτές των 100 Farad.

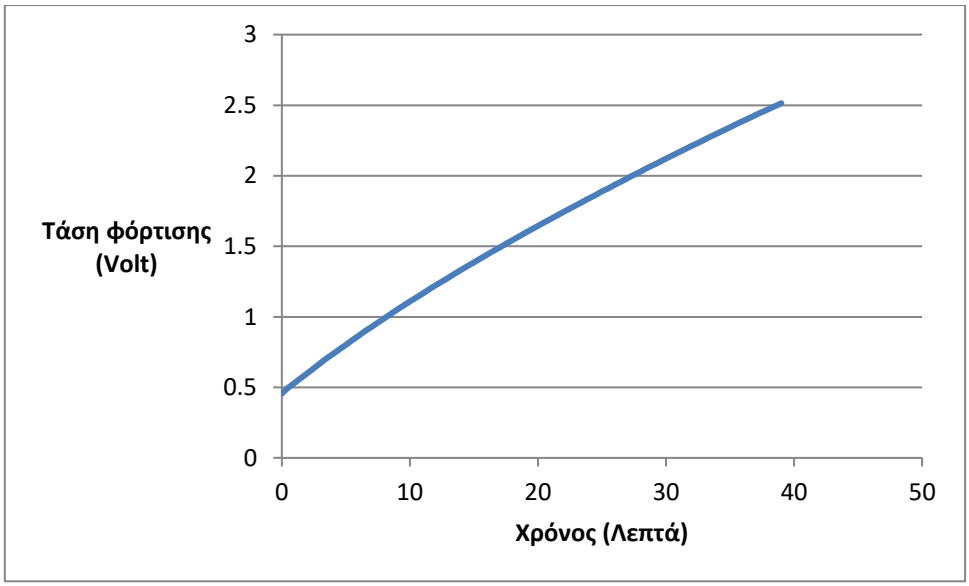
4.6.1 Φόρτιση υπερπυκνωτών

Συνδέσαμε τους 2 υπερπυκνωτές στη γεννήτρια και την ρυθμίσαμε να τροφοδοτεί ρεύμα 0.1 A με σταθερή DC τάση 5 Volt.

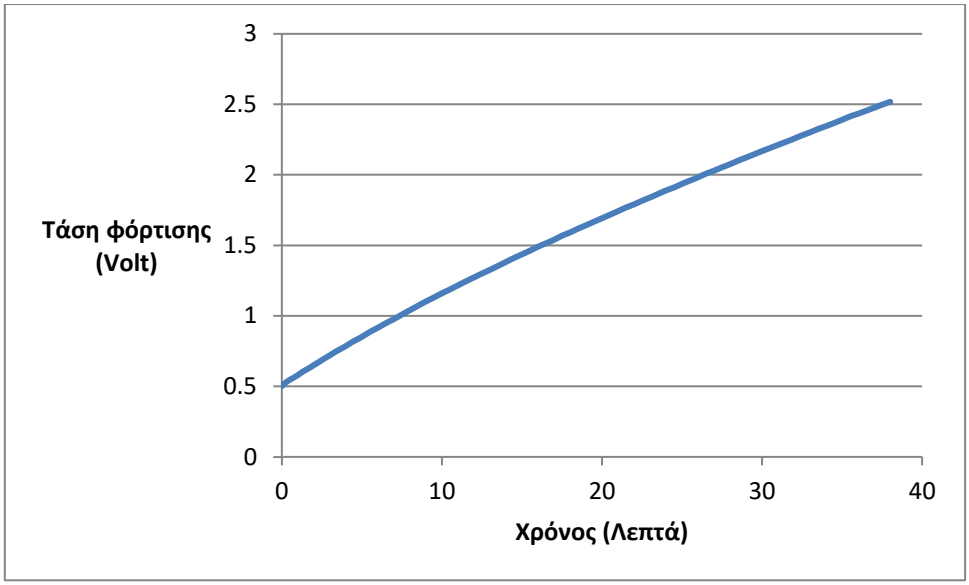


Σχήμα 38: Η φόρτιση του υπερπυκνωτή μέσω της γεννήτριας GW INSTEK GPD-2303s

Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για την φόρτιση των δύο υπερπυκνωτών.



Σχήμα 39: Η τάση φόρτισης του υπερπυκνωτή 1 των 100 Farad σε σχέση με το χρόνο



Σχήμα 40: Η τάση φόρτισης του υπερπυκνωτή 2 των 100 Farad σε σχέση με το χρόνο

Η αρχική τάση των υπερπυκνωτών πριν ξεκινήσει η φόρτιση ήταν αντίστοιχα 0.455 Volt και 0.502 Volt. Όπως φαίνεται και από τις καμπύλες που προέκυψαν από τις μετρήσεις το χρονικό διάστημα που χρειάστηκε ο κάθε υπερπυκνωτής για να φτάσει σε τάση ακροδεκτών ίση με 2.5 Volt είναι περίπου 40 λεπτά. Στη προσομοίωη μέσω lt-spice ο χρόνος που χρειάστηκε για να φορτιστεί πλήρως ο υπερπυκνωτής ήταν 45 λεπτά. Παρόλα αυτά στη προσομοίωση ο υπερπυκνωτής είχε αρχική τιμή τάσης τα 0 Volt. Συνεπώς συμπεραίνουμε πως οι μετρήσεις που λήφθηκαν στο εργαστήριο είναι πολύ κοντά στα αποτελέσματα της προσομοίωσης τόσο στον χρόνο φόρτισης όσο και στη μορφή της καμπύλης, καθώς η αύξηση της τάσης είναι όπως ακριβώς την περιμέναμε, δηλαδή σχεδόν γραμμική.

4.6.2 Αποφόρτιση υπερπυκνωτών

Για την αποφόρτιση τους χρησιμοποιήθηκε ένας μικρότερος κινητήρας σχετικά με αυτόν που χρησιμοποιήσαμε για την αποφόρτιση των μπαταριών, για το λόγο ότι ο προηγούμενος κινητήρας ήταν των 12 Volt και οι υπερπυκνωτές έχουν μέγιστη τάση στα άκρα τους 2.8 Volt. Ο κινητήρας των 12 Volt αδυνατούσε να εκκινήσει, λόγω της χαμηλής τάσης που προσφέρει ο υπερπυκνωτής οπότε χρησιμοποιήσαμε έναν κινητήρα των 1.5 Volt.

FA-130RA

MABUCHI MOTOR
Metal-brush motors

OUTPUT : 0.2W~2.5W (APPROX)

WEIGHT : 17g (APPROX)

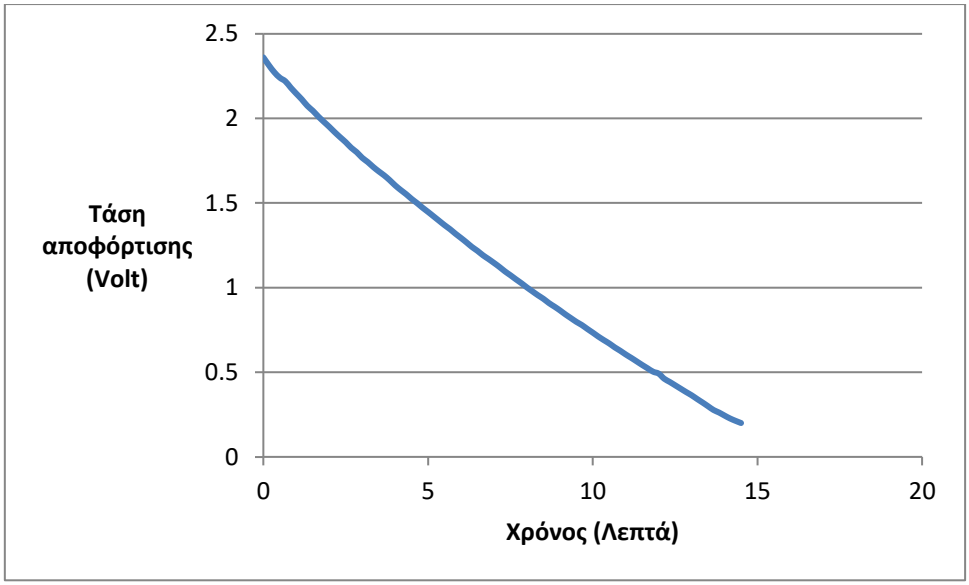
Typical Applications **Home Appliances :** Hair Dressing / Beauty Appliance
Toys and Models : Motorized Toy / Motorized Plastic Model

MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY					STALL		
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED	CURRENT	SPEED	CURRENT	TORQUE		OUTPUT	TORQUE		CURRENT
			r/min	A	r/min	A	mN·m	g·cm	W	mN·m	g·cm	A
FA-130RA-2270	1.5~3.0	1.5V CONSTANT	9100	0.20	6990	0.66	0.59	6.0	0.43	2.55	26	2.20
FA-130RA-18100	1.5~3.0	3V CONSTANT	12300	0.15	9710	0.56	0.74	7.6	0.76	3.53	36	2.10
FA-130RA-14150	1.5~4.5	3V CONSTANT	8300	0.11	6150	0.31	0.55	5.6	0.35	2.11	22	0.90

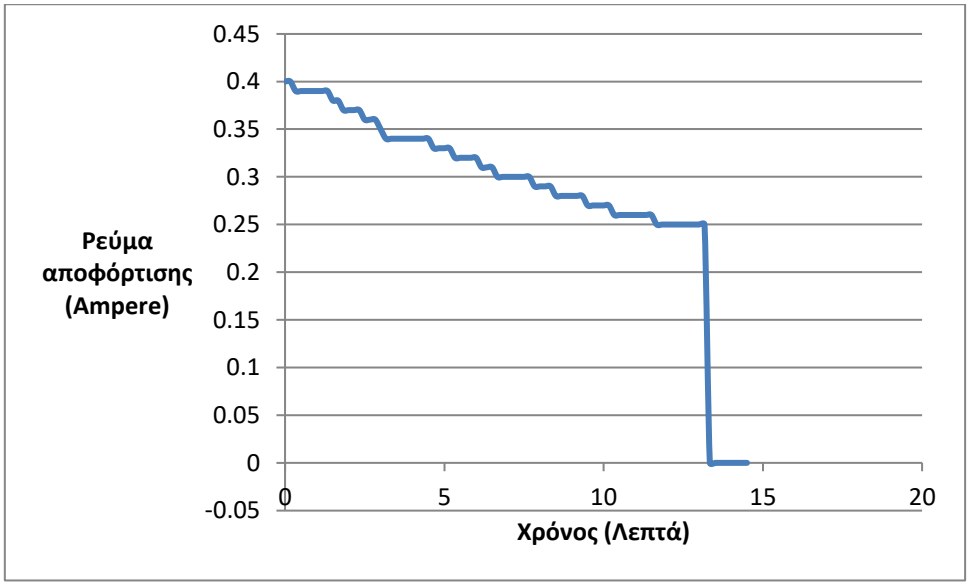
Σχήμα 41: Το datasheet του κινητήρα που χρησιμοποιήθηκε για την αποφόρτιση των υπερπυκνωτών

Αυτή τη φορά συνδέσαμε τους υπερπυκνωτές απευθείας στον κινητήρα χωρίς να παρεμβάλουμε κάποιον μικροελεγκτή PWM για να ελέγχουμε τις στροφές του δρομέα. Για αυτό το λόγο ο κινητήρας στρεφόταν με τις μέγιστες δυνατές στροφές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, ανάλογα φυσικά με την τάση στα άκρα του, η οποία αρχικά ανερχόταν στα 2,4 Volt και στη συνέχεια μειωνόταν όσο αποφορτιζόταν ο υπερπυκνωτής.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε ένα υπερπυκνωτή ξεχωριστά κατά την αποφόρτιση τους.

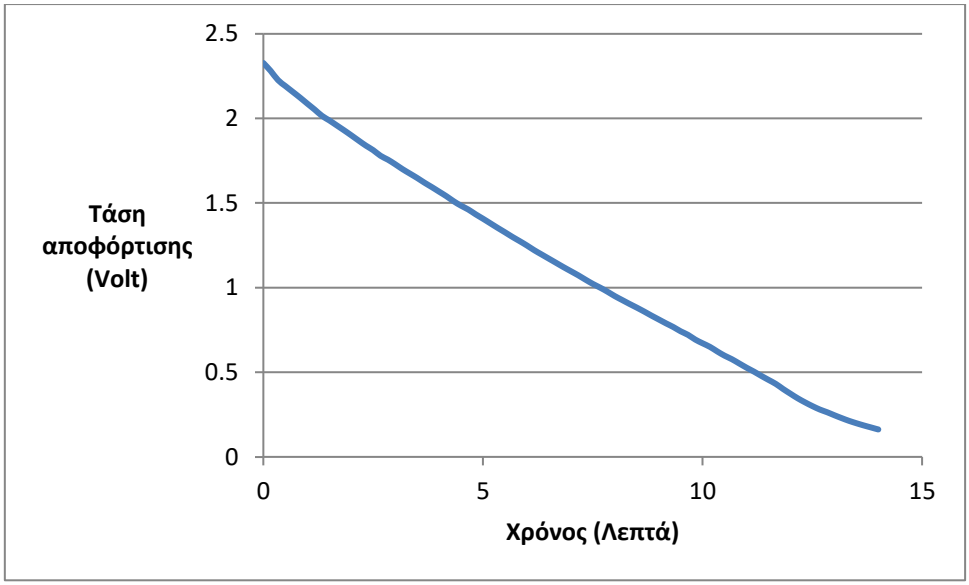


Σχήμα 42: Η τάση αποφόρτισης του υπερπυκνωτή 1 των 100 Farad σε σχέση με το χρόνο

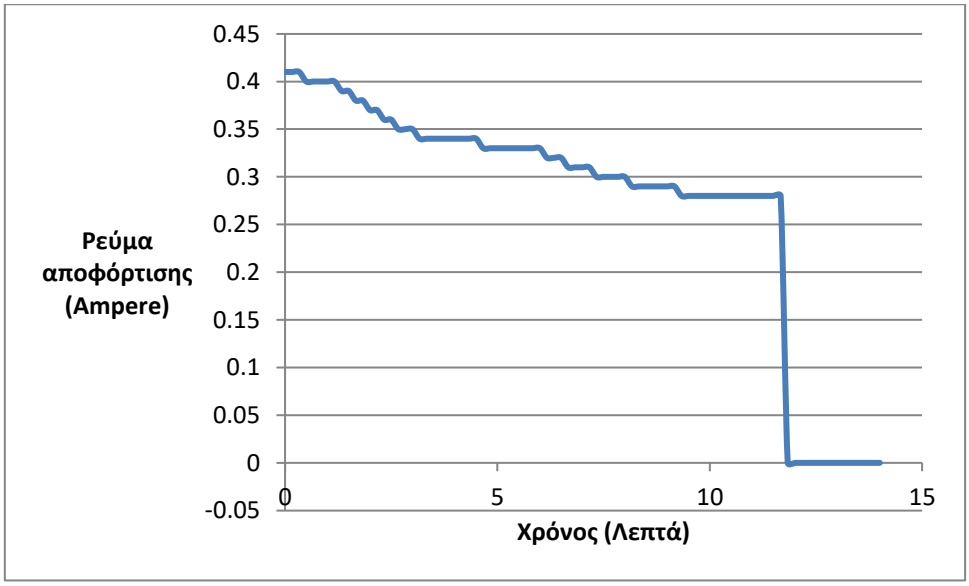


Σχήμα 43: Το ρεύμα αποφόρτισης του υπερπυκνωτή 1 των 100 Farad σε σχέση με το χρόνο

Βλέπουμε ότι ο χρόνος που χρειάστηκε για να αποφορτιστεί ο υπερπυκνωτής 1 είναι σχεδόν 15 λεπτά, ενώ στη προσομοίωση χρειάστηκαν 12 λεπτά. Αυτή η μικρή διαφορά μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το ρεύμα δεν είναι σταθερό στα 0.33 A αλλά όπως φαίνεται και παραπάνω ξεκινάει από τα 0.4 A και στη συνέχεια πέφτει μέχρι τα 0.25 A. Ο απότομος μηδενισμός του ρεύματος κοντά στα 14 λεπτά υποδηλώνει την ακινητοποίηση του κινητήρα καθώς η τιμή της τάσης στα άκρα του η οποία προέρχεται από τον υπερπυκνωτή είναι πλέον κάτω από τα 0.5 Volt και δεν είναι ικανή να κινήσει τον δρομέα του κινητήρα. Τέλος η μορφή της καμπύλης τόσο της τάσης όσο και του ρεύματος αποφόρτισης είναι αυτό που περιμέναμε καθώς παρατηρείται μία σχεδόν γραμμική μείωση στη τάση, ενώ το ρεύμα μειώνεται και αυτό με σχεδόν σταθερό ρυθμό μέχρι την ακινητοποίηση του δρομέα.



Σχήμα 44: Η τάση αποφόρτισης του υπερπυκνωτή 2 των 100 Farad σε σχέση με το χρόνο



Σχήμα 45: Το ρεύμα αποφόρτισης του υπερπυκνωτή των 100 Farad σε σχέση με το χρόνο

Όσον αφορά την αποφόρτιση του 2ου υπερπυκνωτή παρατηρούμε ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα καθώς οι δύο υπερπυκνωτές είναι πανομοιότυποι και βρίσκονται και στον ίδιο κύκλο ζωής.

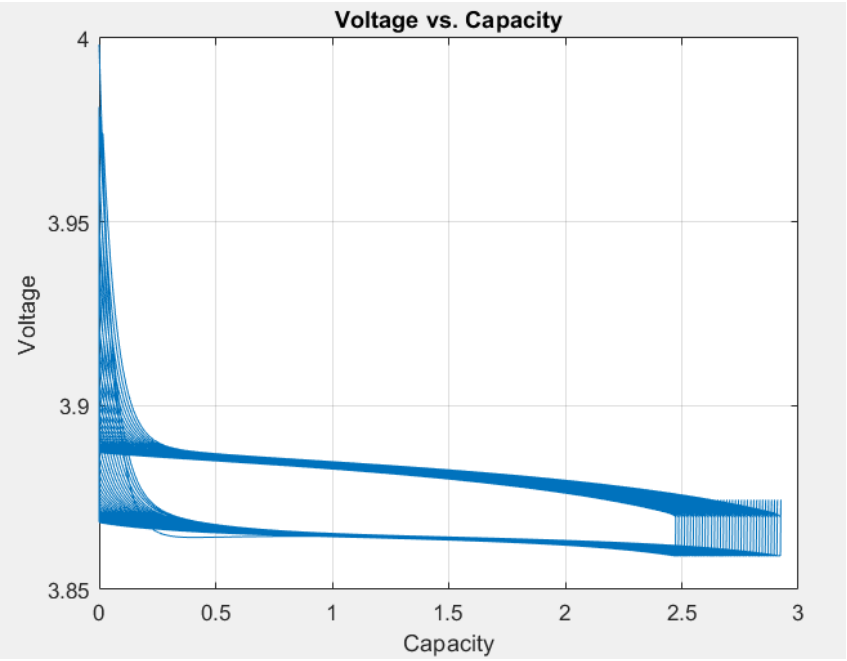
4.7 Βελτίωση στην απόδοση αυτονομίας των μπαταριών με τη χρήση HESS

Στον πίνακα 7, όπου παρουσιάζονται οι λειτουργικές καταστάσεις του ελεγκτή του υβριδικού συστήματος είναι εμφανές πως η μπαταρία προστατεύεται σε περιπτώσεις υψηλής ζήτησης ισχύος από τον κινητήρα, αλλά και σε περιπτώσεις όπου το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι χαμηλό. Οι τελευταίες αντιστοιχούν στη λειτουργική κατάσταση Z του ελεγκτή, όπου το SOC των μπαταριών είναι κάτω από το 20%. Αυτό σημαίνει πως οι υπερπυκνωτές σε κάθε περίπτωση θα αποφορτίζονται πλήρως πρώτοι από τις μπαταρίες, οι οποίες θα αποφορτίζονται πλήρως μόνο σε πολύ ειδικές περιπτώσεις(οι καταστάσεις αυτές αναλύονται στο κεφάλαιο 5).

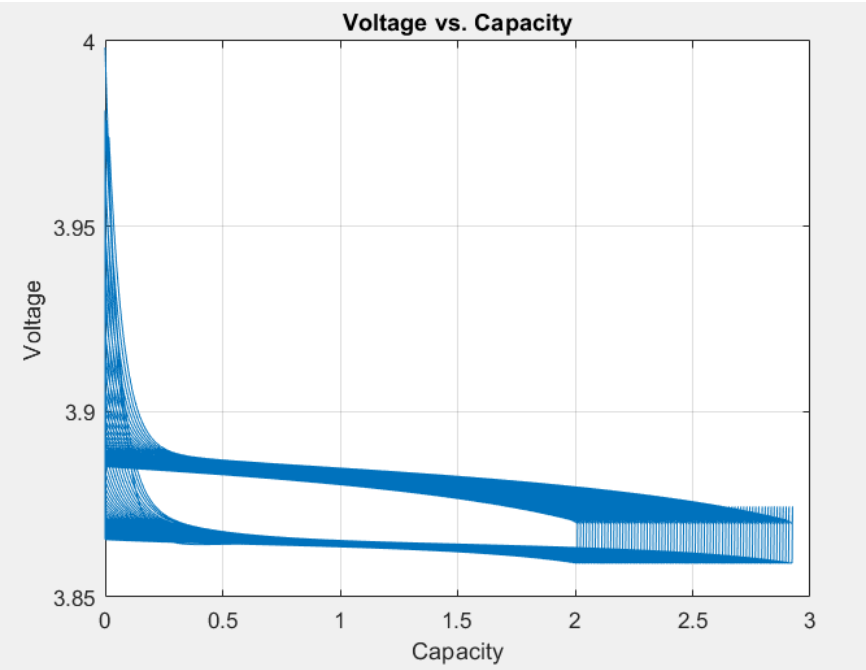
Το συμπέρασμα που εκλαμβάνουμε είναι πως ενώ οι υπερπυκνωτές θα αποφορτίζονται πλήρως τακτικά (και θα επαναφορτίζονται μέσω της αντίθετης ροής ισχύος σε περιπτώσεις πέδησης), οι μπαταρίες θα φθάνουν σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης (σε SOC μικρότερο του 20%) πολύ σπάνια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής των μπαταριών καθώς όσο πιο συχνά το SOC των μπαταριών φτάνει σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα τόσο περισσότερο φθείρονται οι ίδιες.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι ίδιες προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν και στο κεφάλαιο 4.2.1 για πολλούς κύκλους ζωής των μπαταριών με τη διαφορά πως σε αυτή τη περίπτωση λαμβάνουμε υπόψη την ύπαρξη των υπερπυκνωτών και του ελεγκτή.

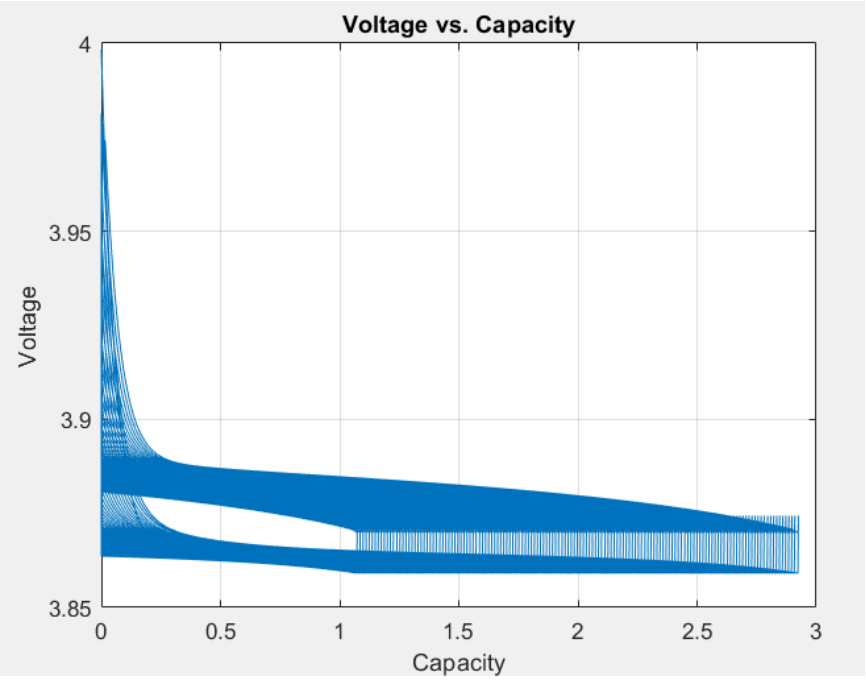
Όπως και στις προσομοιώσεις του κεφαλαίου 4.2.1 το ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας έχει οριστεί στο 1 A και το ρεύμα αποφόρτισης στα 0.2 A όπως ακριβώς και στη διαδικασία του πειράματος στο εργαστήριο.



Σχήμα 45(α): Προσομοίωση για 36 κύκλους ζωής της μπαταρίας στο υβριδικό σύστημα



Σχήμα 45(β): Προσομοίωση για 72 κύκλους ζωής της μπαταρίας στο υβριδικό σύστημα



Σχήμα 45(γ): Προσομοίωση για 144 κύκλους ζωής της μπαταρίας στο υβριδικό σύστημα

Όπως και στο σύστημα τροφοδοσίας χωρίς τους υπερπυκνωτές έτσι και σε αυτή τη περίπτωση η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται με την πάροδο των κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης της. Η διαφορά είναι πως στο υβριδικό σύστημα η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται με χαμηλότερο ρυθμό και έπειτα από 145 κύκλους η χωρητικότητα της είναι πιο υψηλή από ότι στο μη υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας.

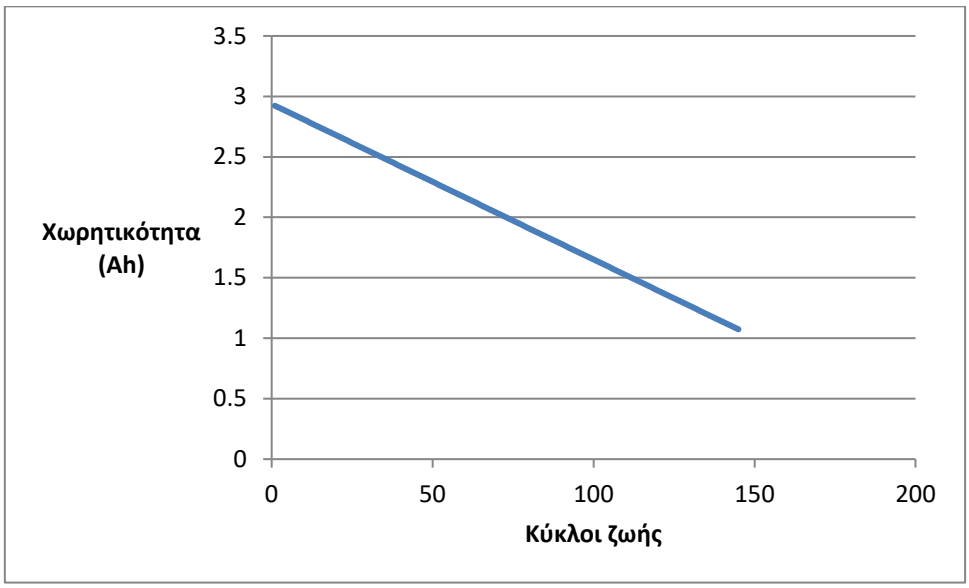
Στον πίνακα 8 εμφανίζονται οι τιμές της χωρητικότητας της μπαταρίας ανά 10 κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης της. Επιπλέον εμφανίζονται και οι τιμές της για τους κύκλους 36, 72 και 144.

Κύκλος ζωής	Χωρητικότητα της μπαταρίας (Ah)
1	2.9228
10	2.8088
20	2.6798
30	2.5508
36	2.4746
40	2.4217
50	2.2947
60	2.1655
70	2.0362
72	2.0108
80	1.9070
90	1.7803
100	1.6515
110	1.5225
120	1.3936
130	1.2666
140	1.1374
144	1.0866
145	1.0739

Πίνακας 7: Η χωρητικότητα της μπαταρίας με το πέρας των κύκλων ζωής της στο υβριδικό σύστημα

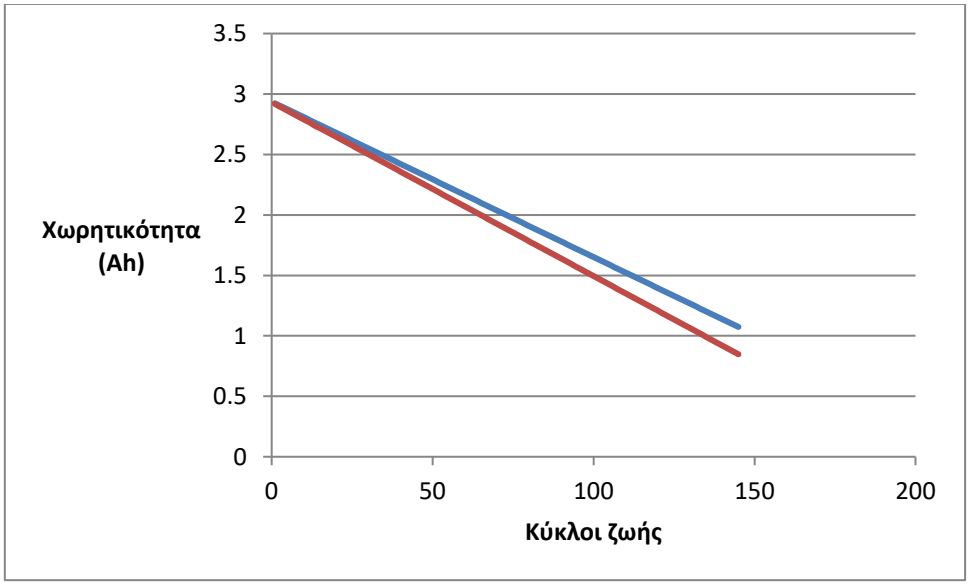
Από μία σύγκριση του πίνακα 8 με τον πίνακα 5 παρατηρούμε πως μετά από 50 κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης της μπαταρίας η χωρητικότητα της στο απλό σύστημα τροφοδοσίας έχει μειωθεί στις 2.2151 Ah, ενώ στο υβριδικό σύστημα στις 2.2947 Ah. Μετά από 100 κύκλους οι χωρητικότητες έχουν γίνει 1.4946 Ah και 1.6515 Ah αντίστοιχα. Και τελικά μετά από 145 κύκλους γίνονται 0.8478 Ah και 1.0739 Ah αντίστοιχα. Συνεπώς η βελτίωση στην απόδοση της μπαταρίας είναι σημαντική με την προσθήκη των υπερπυκνωτών και την δημιουργία του υβριδικού συστήματος τροφοδοσίας.

Η ακόλουθη καμπύλη προκύπτει από τις παραπάνω τιμές, δηλαδή παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ της χωρητικότητας της μπαταρίας συναρτήσει του αριθμού των κύκλων ζωής της στο υβριδικό σύστημα.



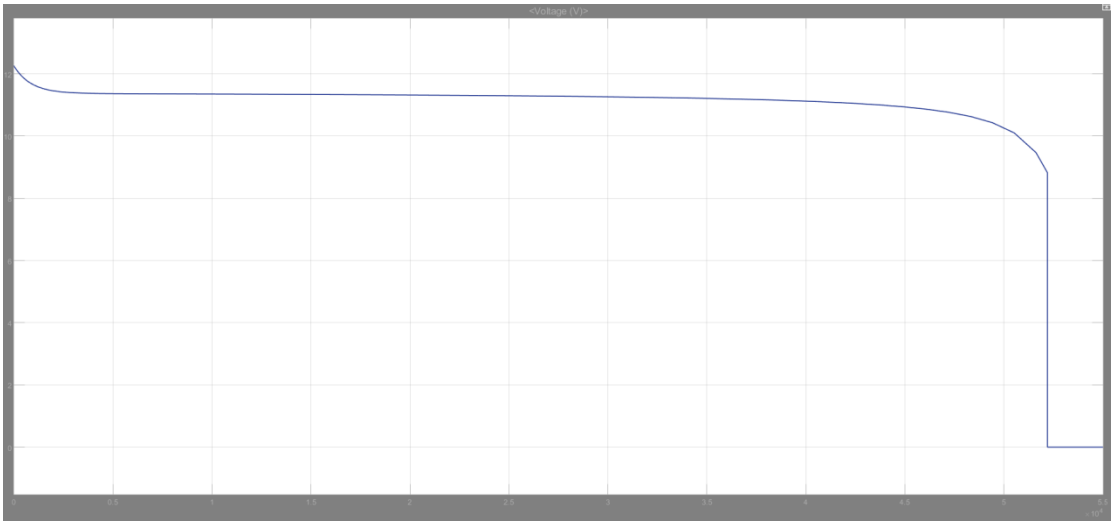
Σχήμα 45(δ): Η χωρητικότητα της μπαταρίας σε Ah συναρτήσει των κύκλων ζωής στο υβριδικό σύστημα

Στο σχήμα 76 γίνεται η σύγκριση στη πτώση της χωρητικότητας της μπαταρίας στα δύο συστήματα τροφοδοσίας, όπου είναι εμφανές πως η πτώση τάσης στο υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας είναι μικρότερη.

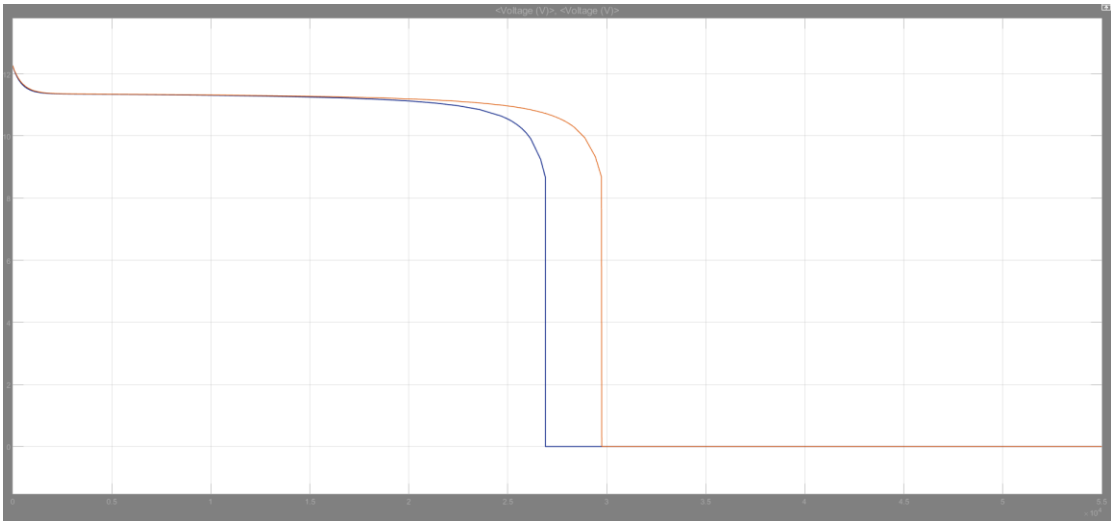


Σχήμα 45(ε): Η χωρητικότητα της μπαταρίας σε Ah συναρτήσει των κύκλων ζωής (η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στο απλό σύστημα τροφοδοσίας και η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στο υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας)

Τέλος παρουσιάζονται προσομοιώσεις αποφόρτισης της μπαταρίας προκειμένου να γίνει αντιληπτή η μείωση στην αυτονομία του συστήματος με το πέρας των κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης της μπαταρίας. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με φορτίο τον ηλεκτρικό κινητήρα DC, η ζήτηση ρεύματος του οποίου είναι ίση με 0.2 A.



Σχήμα 45(στ): Αποφόρτιση της μπαταρίας που βρίσκεται στον 1ο κύκλο ζωής της



Σχήμα 45(ζ): Αποφόρτιση της μπαταρίας που βρίσκεται στον 100ο κύκλο ζωής της(η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στο υβριδικό σύστημα με υπερπυκνωτή και η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στο απλό σύστημα χωρίς υπερπυκνωτή)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο η αυτονομία του συστήματος στον 1° κύκλο ζωής της μπαταρίας για ρεύμα φορτίου ίσο με 0.2 A είναι 14.5 ώρες.

Στο σχήμα 78 φαίνεται η πτώση στην αυτονομία του συστήματος στον 100° κύκλο. Η αυτονομία του υβριδικού συστήματος στον 100° κύκλο ζωής της μπαταρίας είναι 8.25 ώρες, ενώ στο απλό σύστημα τροφοδοσίας είναι 7.5 ώρες. Συμπεραίνουμε πως χρησιμοποιώντας τους υπερπυκνωτές και φτιάχνοντας το υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας του κινητήρα βελτιώσαμε την αυτονομία του συστήματος στον 100° κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης κατά 45 λεπτά.

Κεφάλαιο 5: Υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας μπαταρίας-υπερπυκνωτή

5.1 Η ιδέα πίσω από τη μοντελοποίηση του υβριδικού συστήματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι σημαντικό το σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας ενός ηλεκτρικού οχήματος να έχει και μεγάλη αυτονομία αλλά και υψηλή απόδοση ακόμα και με το πέρας ορισμένων κύκλων ζωής των μπαταριών. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό στη περίπτωση ενός υβριδικού συστήματος όπου συνδυάζονται τα χαρακτηριστικά των μπαταριών και των υπερπυκνωτών έτσι ώστε το σύστημα να έχει την καλύτερη δυνατή ανταπόκριση σε κάθε λειτουργική κατάσταση του ηλεκτρικού κινητήρα. Έτσι στη συνέχεια μοντελοποιείται ένα υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας με τη χρήση τόσο των μπαταριών όσο και των υπερπυκνωτών, η λειτουργία του οποίου βασίζεται σε έναν ελεγκτή, ο οποίος περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια.

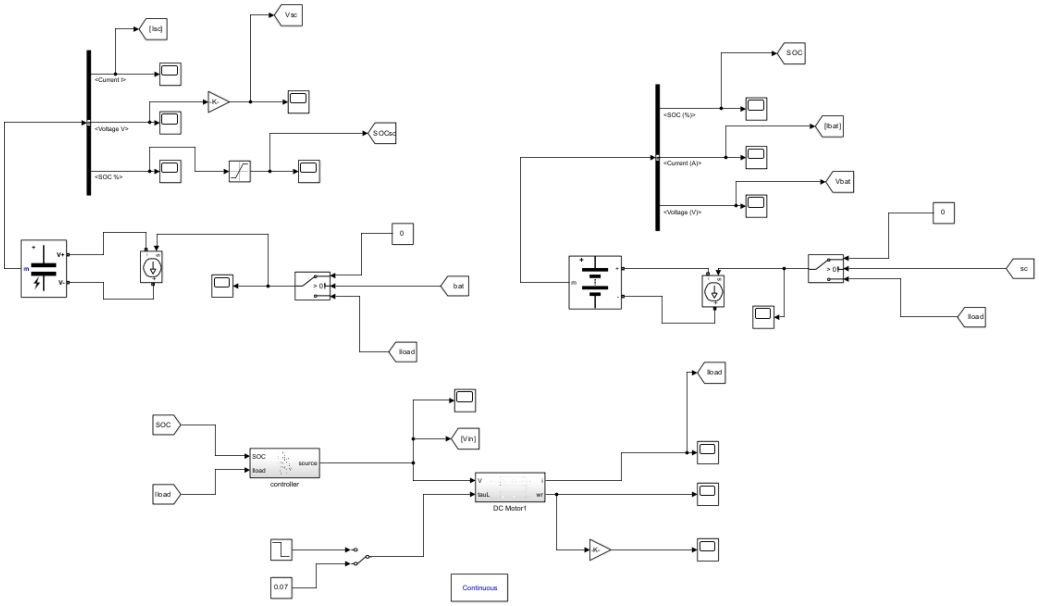
Στο άρθρο του *X.D. Xue* αναλύεται η λειτουργία ενός υβριδικού συστήματος που χρησιμοποιεί μπαταρίες και υπερπυκνωτές και η επίδραση που έχει αυτή η μέθοδος στη μείωση των απωλειών ισχύος.

Όπως και στη δική μας περίπτωση το σύστημα βασίζεται σε έναν ελεγκτή. Η λειτουργία του ελεγκτή του *X.D. Xue* βασίζεται αποκλειστικά στο SOC των μπαταριών και των υπερπυκνωτών, όπου ανάλογα με την τιμή του SOC της κάθε πηγής ενέργειας αποφασίζεται ποια πηγή θα χρησιμοποιηθεί (μπαταρία ή υπερπυκνωτές) σε κάθε χρονική στιγμή.

Στη δική μας περίπτωση και όπως θα αναλυθεί παρακάτω ο ελεγκτής βασίζεται τόσο στο SOC των δύο πηγών ενέργειας όσο και στο ρεύμα του ηλεκτρικού κινητήρα, δηλαδή στη λειτουργική του κατάσταση. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε λειτουργική κατάσταση ελέγχεται και ο κινητήρας εκτός από τις πηγές ενέργειας κάτι που κάνει το σύστημα πιο σύγχρονο και το φέρνει πιο κοντά στη φιλοσοφία συστημάτων των σύγχρονων ηλεκτρικών οχημάτων.

5.2 Η υλοποίηση του υβριδικού συστήματος τροφοδοσίας ενέργειας

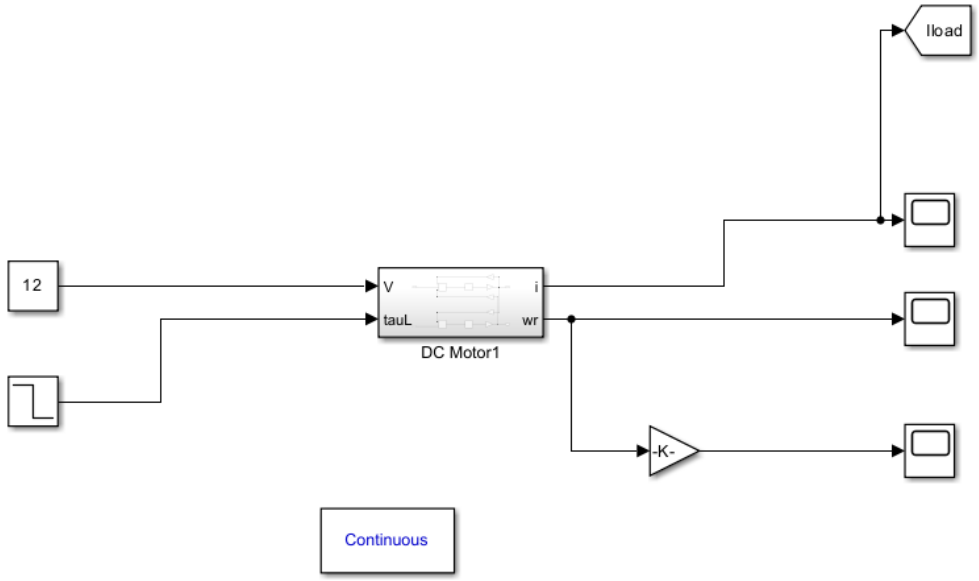
Το σύστημα που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια είναι βασισμένο στις μετρήσεις και στις προσομοιώσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο προηγούμενο μέρος της εργασίας. Με βάση λοιπόν τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο για τις μπαταρίες όσο και για τους υπερπυκνωτές υλοποιήθηκε ένα υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας ενός DC ηλεκτρικού κινητήρα σε περιβάλλον simulink.



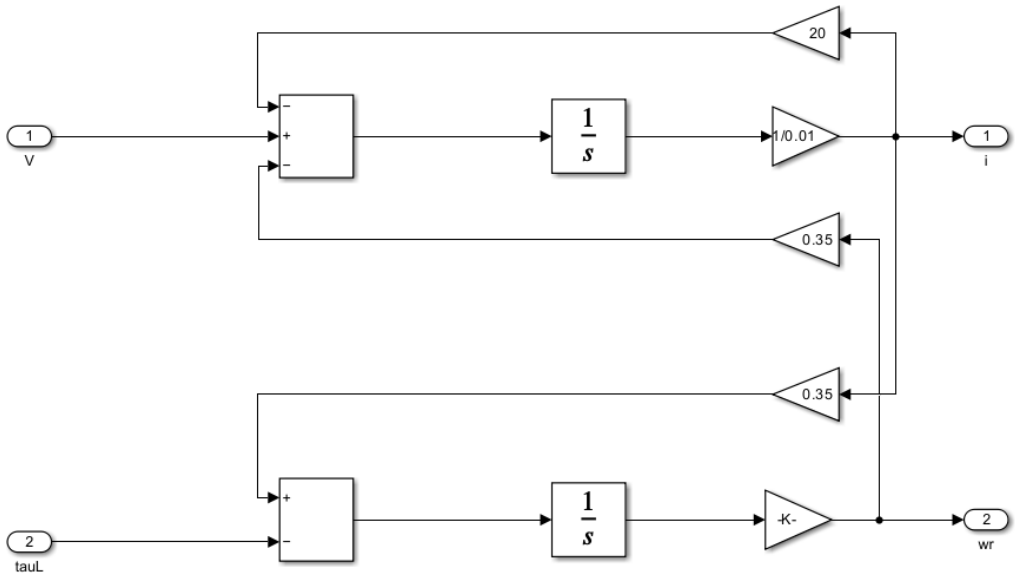
Σχήμα 46: Το ολοκληρωμένο υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας του DC κινητήρα (HESS)

Σε αυτό το σύστημα στα δεξιά βρίσκεται το σύστημα των μπαταριών, στα αριστερά αυτό των υπερπυκνωτών και κάτω βρίσκεται ο DC ηλεκτροκινητήρας με έναν ελεγκτή που θα αναλυθεί διεξοδικά στη συνέχεια. Προτού όμως αναλύσουμε την λειτουργία του ελεγκτή και γενικότερα την λειτουργία του ολοκληρωμένου συστήματος ας αναλύσουμε το κάθε κομμάτι της υλοποίησης ξεχωριστά.

5.2.1 Ο ηλεκτρικός κινητήρας DC



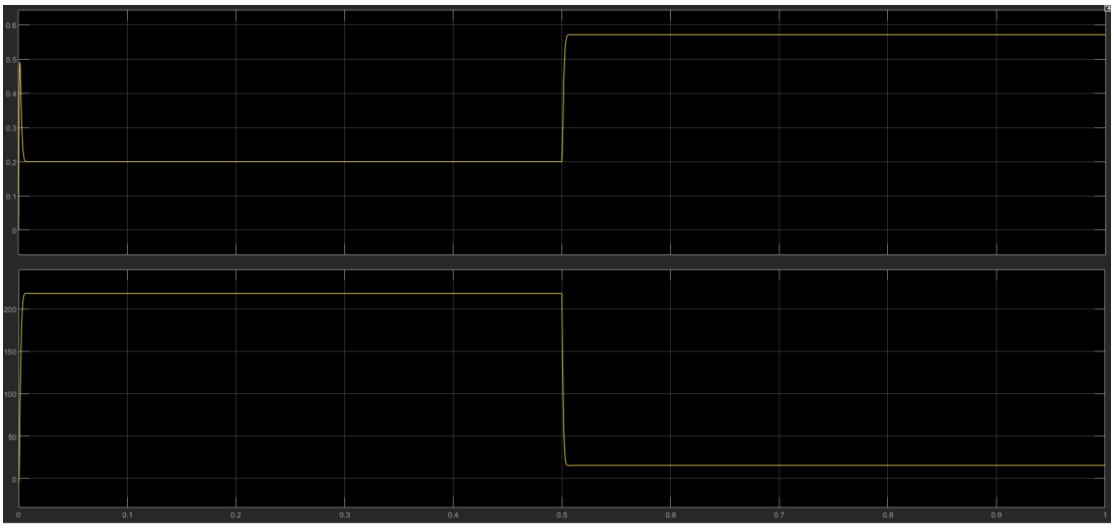
Σχήμα 47: Ο DC ηλεκτρικός κινητήρας σε περιβάλλον simulink.



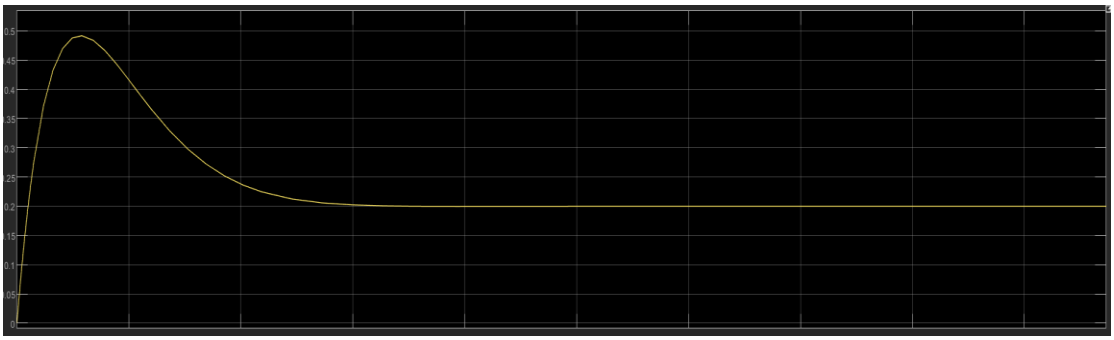
Σχήμα 48: Η εσωτερική υλοποίηση του DC Motor1

Ο κινητήρας στις παραπάνω εικόνες αντιστοιχεί στον κινητήρα που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη των μετρήσεων της τάσης και του ρεύματος των μπαταριών, το datasheet του οποίου βρίσκεται παραπάνω. Από εκεί μπορεί κανείς να δει πως με τροφοδοσία 12 Volt και χωρίς κάποιο φορτίο στον άξονα του δρομέα *η* μηχανή τραβάει ρεύμα 0.2 A και στρέφεται

με 295 RPM, ενώ στις εκκινήσεις υπό αυτές τις συνθήκες το ρεύμα κυμαίνεται από 0.3 A – 0.5 A.



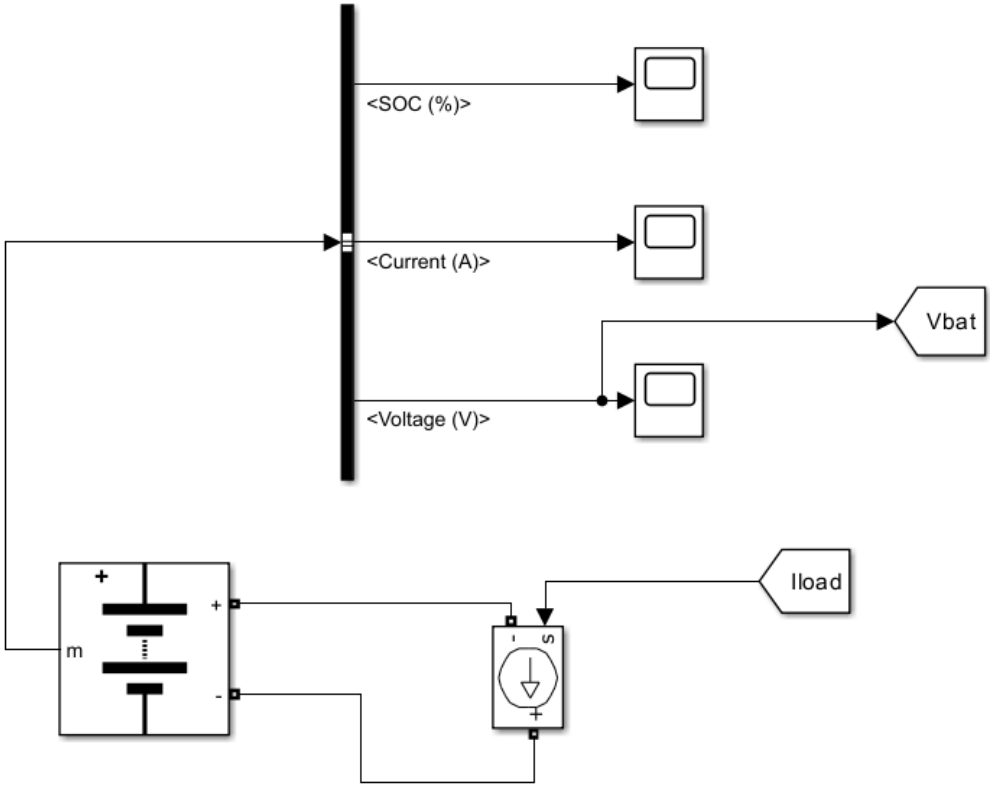
Σχήμα 49: Ρεύμα και στροφές της μηχανής αντίστοιχα για προσομοίωση χωρίς φορτίο στον δρομέα μέχρι τα 0.5 sec και μετέπειτα προσθήκη φορτίου.



Σχήμα 50: Η ανύψωση του ρεύματος του κινητήρα κατά την εκκίνηση.

Όπως φαίνεται η ηλεκτρική μηχανή δουλεύει όπως περιμέναμε καθώς χωρίς φορτίο στο δρομέα το ρεύμα είναι 0.2 A και οι στροφές είναι αρκετά κοντά στις επιθυμητές. Όταν μπαίνει φορτίο στον δρομέα το ρεύμα αυξάνεται και οι στροφές πέφτουν όπως είναι αναμενόμενο σε μια ηλεκτρική μηχανή. Τέλος το ρεύμα στην εκκίνηση δεν ξεπερνά τα 0.5 A όπως ακριβώς και στην εφαρμογή στο εργαστήριο.

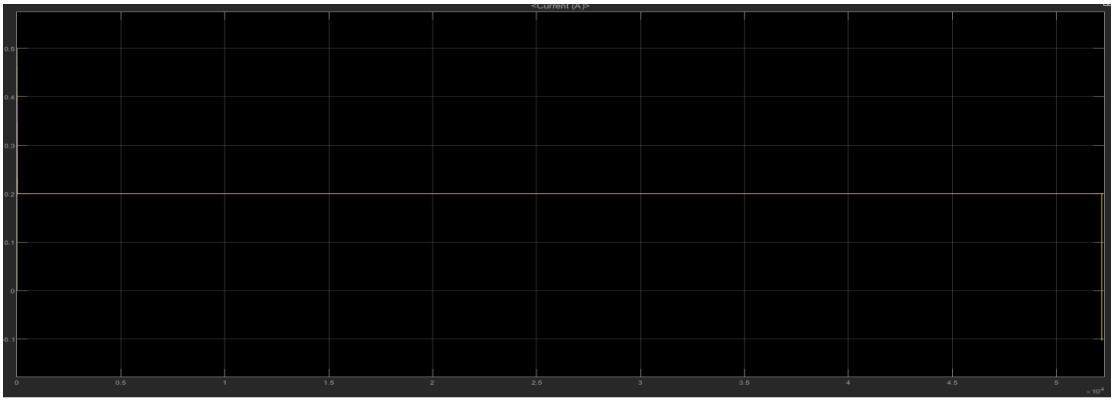
5.2.2 *Το pack των* μπαταριών



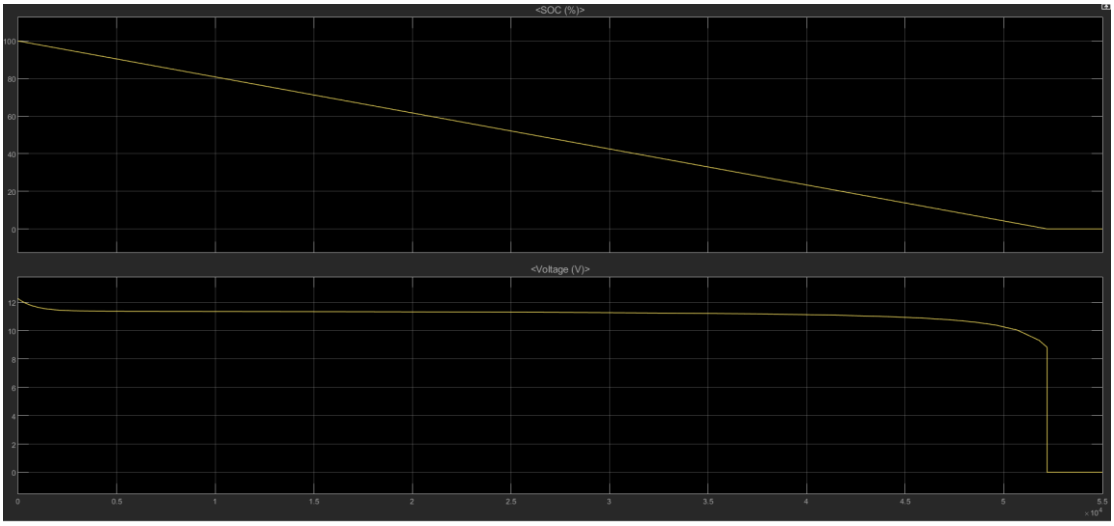
Σχήμα 51: Το pack(πακέτο) των μπαταριών σε περιβάλλον simulink.

Το pack(πακέτο) των μπαταριών έχει υλοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε η τάση στα άκρα τους να ξεκινάει από τα 12 Volt σε πλήρη φόρτιση και εφαρμόζοντας κάποιο φορτίο αυτή η τάση να εξασθενεί. Αυτή είναι και η διαφορά με το προηγούμενα μοντέλα που υλοποιήθηκαν σε lt-spice και simulink καθώς σε εκείνες τις υλοποιήσεις προσομοιωνόταν τη κάθε μπαταρία ξεχωριστά, δηλαδή με τάση πλήρους φόρτισης 4 Volt. Σε αυτό το μοντέλο έχουμε ένα pack τριών μπαταριών όπου στην έξοδο τους έχουν τάση 12 Volt όπως ακριβώς και στην εφαρμογή στο εργαστήριο, για να μπορεί να τροφοδοτηθεί ο DC κινητήρας.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι με τάση εισόδου της μηχανής την τάση εξόδου του pack των μπαταριών και ρεύμα φορτίου της μπαταρίας το ρεύμα εξόδου του κινητήρα. Αρχικά πραγματοποιήθηκε μία προσομοίωση με κενό φορτίο στον άξονα της μηχανής και στη συνέχεια με προσθήκη φορτίου μετά από κάποια χρονική στιγμή.

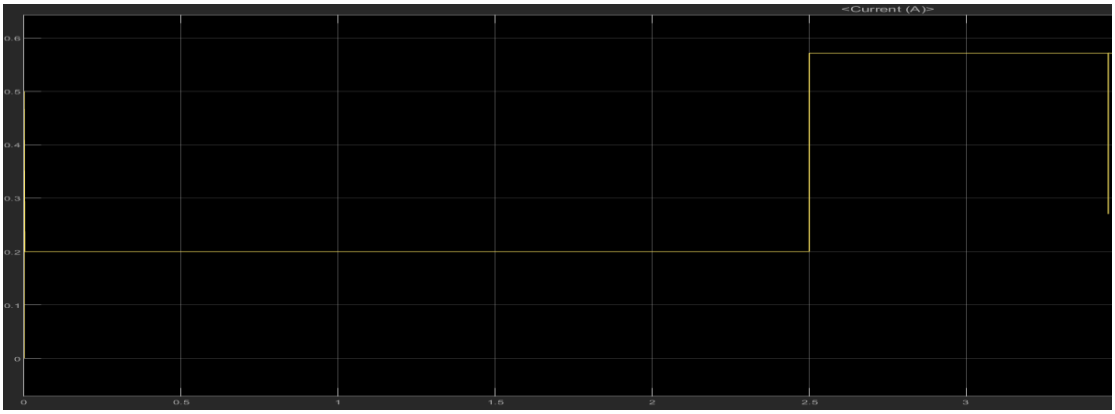


Σχήμα 52: Το ρεύμα του pack των μπαταριών για κενό φορτίο στον άξονα της μηχανής.

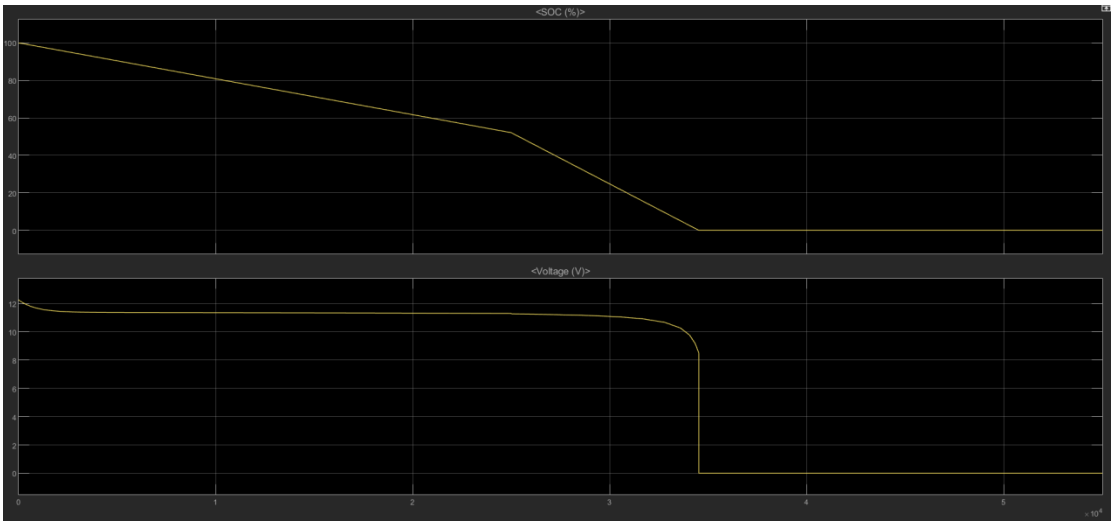


Σχήμα 53: Το SOC και η τάση στα άκρα του pack των μπαταριών για κενό φορτίο στον άξονα της μηχανής.

Το ρεύμα των μπαταριών αντιστοιχεί στο ρεύμα της ηλεκτρικής μηχανής, δηλαδή στην εκκίνηση παρατηρείται μία ανύψωση κοντά στα 0.5 A και στη συνέχεια έχει σταθερή τιμή στα 0.2 A μέχρις ότου να αποφορτιστούν οι μπαταρίες και να μηδενιστεί το ρεύμα τόσο της μηχανής όσο και των μπαταριών. Το SOC και η τάση των μπαταριών έχουν την μορφή που περιμέναμε. Το SOC πέφτει σταθερά και τελικά μηδενίζεται σε χρόνο 52000 sec που αντιστοιχούν σε 14.5 ώρες. Όπως και σε όλες τις προηγούμενες προσομοιώσεις έτσι και εδώ η αποφόρτιση των μπαταριών παίρνει τον ίδιο ακριβώς χρόνο των 14.5 ωρών. Η τάση στα άκρα του pack των μπαταριών ξεκινάει από την αρχική τιμή των 12 Volt όντας πλήρως φορτισμένες και ακολουθεί την συμπεριφορά των μπαταριών Li-ion. Αυτό σημαίνει πως όσο το SOC βρίσκεται σε μέτρια και ψηλά επίπεδα η πτώση τάσης είναι πολύ μικρή, ενώ μετά από μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή και πιο συγκεκριμένα όταν η τάση του pack των μπαταριών φτάσει στα 9 Volt παρατηρείται μία σχεδόν κατακόρυφη πτώση στην τάση. Όταν η τάση του pack είναι 9 Volt, σημαίνει πως κάθε cell μπαταρίας έχει τάση 3 Volt.



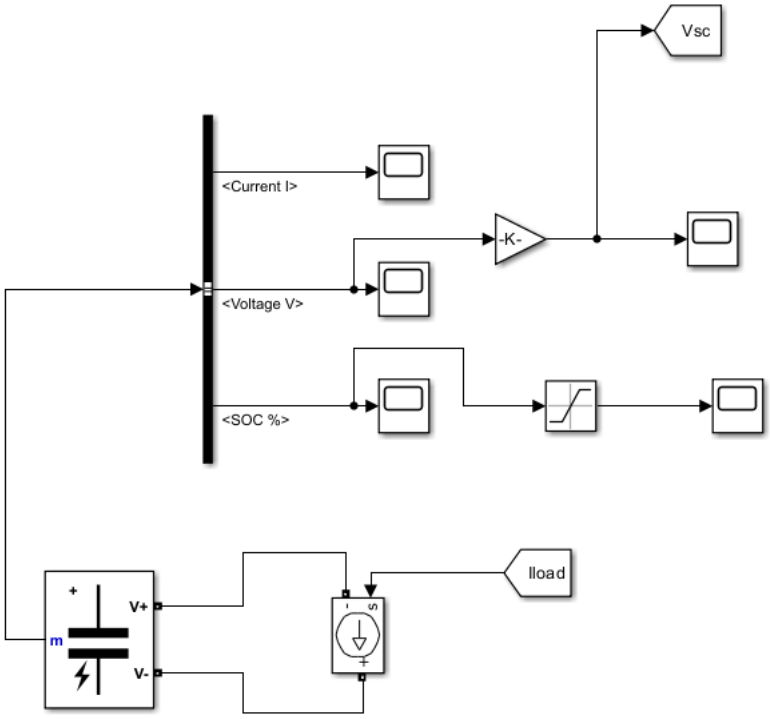
Σχήμα 54: Το ρεύμα του pack των μπαταριών για κενό φορτίο στον άξονα και μετέπειτα προσθήκη φορτίου.



Σχήμα 55: Το SOC και η τάση στα άκρα του pack των μπαταριών για κενό φορτίο στον άξονα και μετέπειτα προσθήκη φορτίου.

Το ρεύμα αντιστοιχεί στο ρεύμα της μηχανής οπότε ήταν αναμενόμενο να αυξηθεί με την προσθήκη φορτίου. Όσον αφορά το SOC των μπαταριών βλέπουμε πως με την αύξηση του φορτίου και κατ' επέκταση με την αύξηση του ρεύματος φορτίου το SOC μειώνεται με γρηγορότερο ρυθμό. Έτσι και η τάση του pack μηδενίζεται πολύ πιο γρήγορα, όπως έχει ήδη αναλυθεί στα προηγούμενα κεφάλαια της εργασίας.

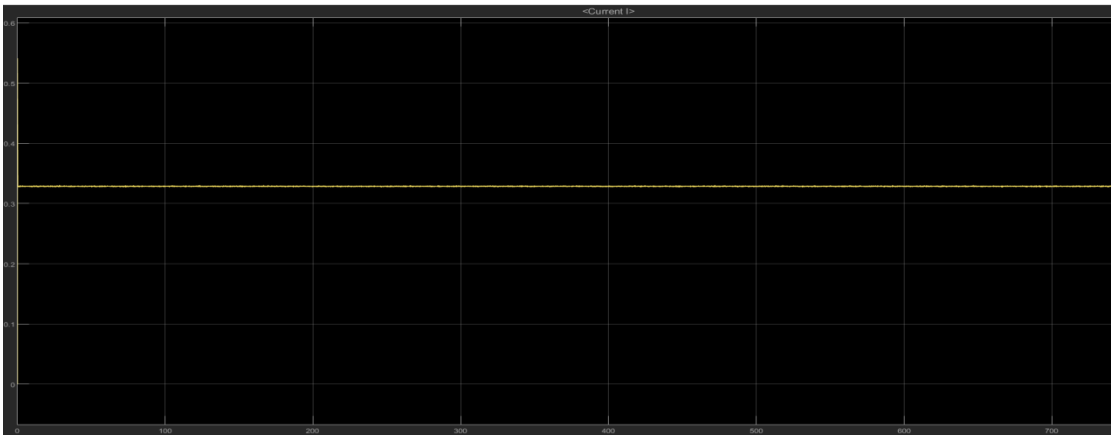
5.2.3 Ο υπερπυκνωτής ως πηγή τροφοδοσίας



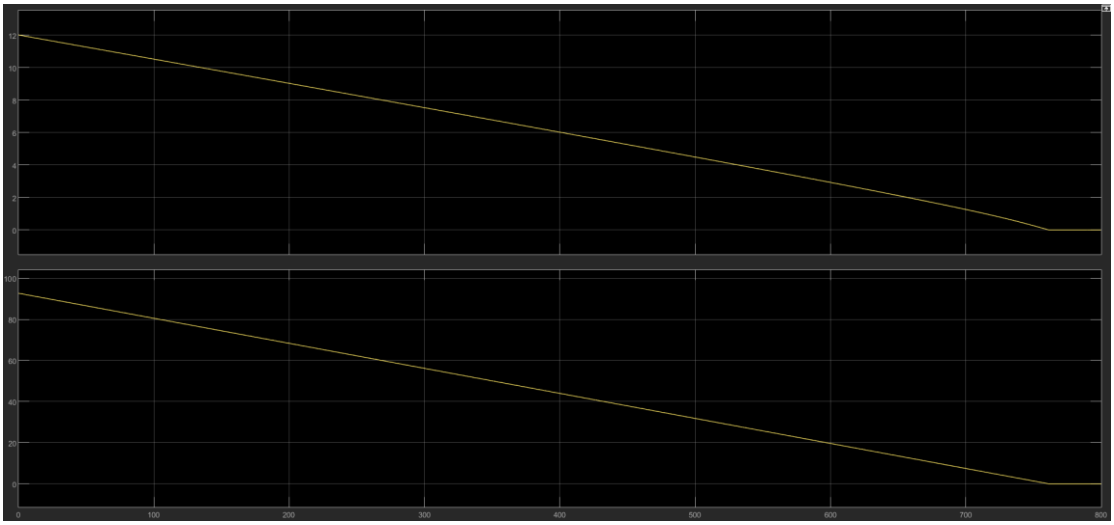
Σχήμα 56: Το pack(πακέτο) των υπερπυκνωτών σε περιβάλλον simulink

Στην έξοδο της τάσης του υπερπυκνωτή έχει τοποθετηθεί ένας ανυψωτής τάσης έτσι ώστε στην έξοδο του υπερπυκνωτή η τάση να είναι η επιθυμητή. Η τάση στην έξοδο του θα πρέπει να είναι 12 Volt στη πλήρη φόρτιση για να μπορεί να τροφοδοτήσει την μηχανή.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι οι αντίστοιχες με την περίπτωση των μπαταριών μόνο που στην περίπτωση του υπερπυκνωτή υπάρχει ένα ελάχιστο φορτίο στον άξονα του δρομέα ώστε να τροφοδοτείται με 0.33 A όπως και στις δοκιμές στο εργαστήριο αντί κενού φορτίου και στη συνέχεια πραγματοποιείται μία προσομοίωση με μετέπειτα προσθήκη φορτίου.

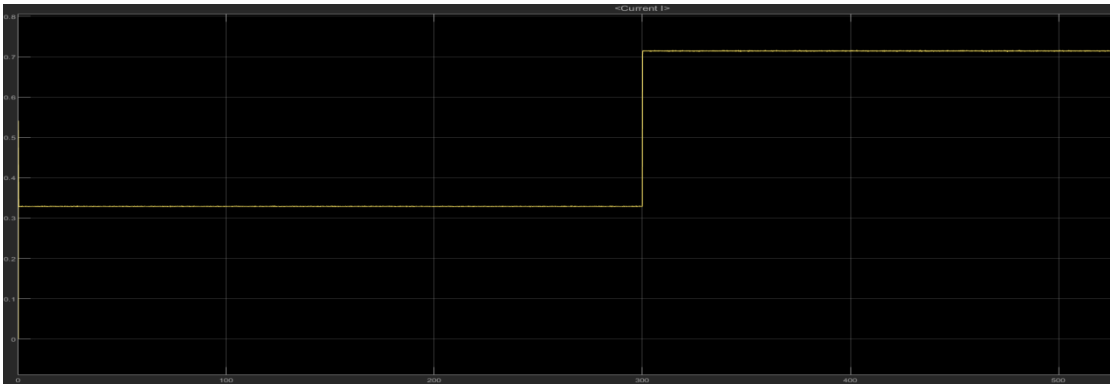


Σχήμα 57: Το ρεύμα του υπερπυκνωτή για ελάχιστο φορτίο στο άξονα του δρομέα της μηχανής.

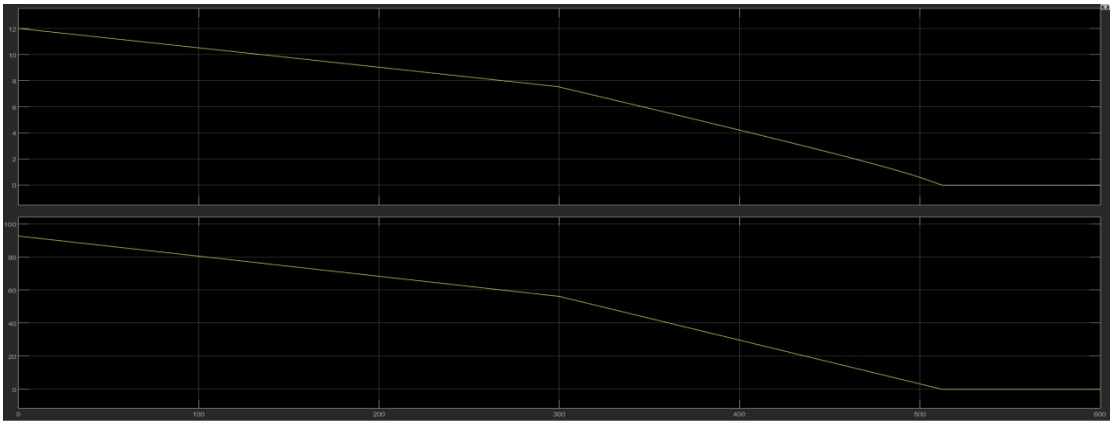


Σχήμα 58: Η τάση στην έξοδο του υπεπρπυκνωτή και το SOC του για ρεύμα φορτίου 0.33 A.

Τα ρεύμα όπως και στην περίπτωση της μπαταρίας ακολουθεί την συμπεριφορά του ρεύματος της μηχανής, δηλαδή παρουσιάζει μία ανύψωση στην εκκίνηση και στην συνέχεια λαμβάνει την τιμή για την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της μηχανής. Η τάση και το SOC του μειώνονται γραμμικά όπως ήταν αναμενόμενο και μηδενίζονται σε χρόνο 755 sec, δηλαδή σε 12.5 λεπτά, όπως ακριβώς και στα πειράματα του εργαστηρίου.



Σχήμα 59: Το ρεύμα του υπερπυκνωτή με μετέπειτα προσθήκη φορτίου στον άξονα της μηχανής.



Σχήμα 60: Η τάση και το SOC του υπεπρυκνωτή για μετέπειτα προσθήκη φορτίου στον άξονα της μηχανής.

5.2.4 Ο ελεγκτής του υβριδικού συστήματος τροφοδοσίας

Ο ελεγκτής σε αυτό το σύστημα είναι ένα πολύ βασικό και θεμελιώδες μέρος του καθώς το μετατρέπει από ένα απλό σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας σε ένα υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας. Ο ελεγκτής που υλοποιήθηκε βασίζεται τόσο στα αποτελέσματα των μετρήσεων όσο και στα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών και είναι προσαρμοσμένος έτσι ώστε να βελτιώσει την λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος τροφοδοσίας.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των εργαστηριακών δοκιμών εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:

Στη περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο στον άξονα το ρεύμα που ζητάει στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι 0.2 A, ενώ στις δοκιμές εκκίνησης του εργαστηρίου παρατηρήθηκε ρεύμα 0.3 A – 0.5 A. Προφανώς όταν προστεθεί κάποιο φορτίο στον άξονα τότε η τιμή του ρεύματος τόσο στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όπως και στα μεταβατικά φαινόμενα (π.χ. εκκίνηση), το ρεύμα που ζητάει ο κινητήρας αυξάνεται.

Ακόμη από τις εργαστηριακές μετρήσεις παρατηρήθηκε πως όταν η τάση στα άκρα του pack των τριών μπαταριών πέφτει κάτω από τα 6 Volt ο δρομέας του κινητήρα δυσκολεύεται πολύ να περιστραφεί και σταματάει συνεχώς. Εκείνη είναι η στιγμή που οι μπαταρίες δεν μπορούν πλέον να περιστρέψουν τον κινητήρα. Καθώς το pack των μπαταριών αποτελείται από τρεις μπαταρίες η τάση της κάθε μπαταρίας εκείνη τη στιγμή αναλογικά θα είναι 2 Volt. Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις όταν η τάση της μπαταρίας είναι ίση με 2 Volt το SOC της είναι 21%, άρα περίπου 20%.

<u>Σύμφωνα με τις παραπάνω πληροφορίες του εργαστηρίου και των προσομοιώσεων προκύπτουν οι καταστάσεις λειτουργίας του ελεγκτή:</u>

Κατάσταση Α:

Αν η τιμή του SOC/τάσης του pack των μπαταριών είναι πάνω από 80%/10.14 Volt και το ρεύμα του κινητήρα είναι κάτω από 0.5 A τότε ο κινητήρας θα τροφοδοτείται από τις

μπαταρίες. Αυτό σημαίνει ότι όταν το SOC της μπαταρίας είναι πάνω από το 80% τόσο στη μόνιμη κατάσταση όσο και στις εκκινήσεις θα χρησιμοποιείται το pack των μπαταριών.

Κατάσταση Β:

Αν η τιμή του SOC/τάσης του pack των μπαταριών είναι πάνω από 80%/10.14 Volt και το ρεύμα του κινητήρα είναι πάνω από 0.5 A τότε ο κινητήρας θα τροφοδοτείται από τους υπερπυκνωτές. Αυτό σημαίνει ότι για ακόμα μεγαλύτερα ρεύματα από τις εκκινήσεις, όπως για παράδειγμα την προσθήκη φορτίου στον άξονα του κινητήρα τότε θα χρησιμοποιείται το pack των υπερπυκνωτών.

Κατάσταση Γ:

Αν η τιμή του SOC/τάσης του pack των μπαταριών είναι ενδιάμεσα στις τιμές 80%/10.14 Volt και 20%/6 Volt και το ρεύμα του κινητήρα είναι κάτω από 0.21 A τότε θα χρησιμοποιούνται οι μπαταρίες. Δηλαδή όταν το SOC των μπαταριών είναι ενδιάμεσα στο 80% και το 20% τότε οι μπαταρίες δεν θα χρησιμοποιούνται ούτε για εκκινήσεις, αλλά μόνο σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Κατάσταση Δ:

Αν η τιμή του SOC/τάσης του pack των μπαταριών είναι ενδιάμεσα στις τιμές 80%/10.14 Volt και 20%/6 Volt και το ρεύμα του κινητήρα είναι πάνω από 0.21 A τότε θα χρησιμοποιείται το pack των υπερπυκνωτών.

Κατάσταση Ε:

Αν η τιμή του SOC/τάσης του pack των μπαταριών είναι κάτω από 20%/6 Volt και το SOC του pack των υπερπυκνωτών είναι μεγαλύτερο του μηδενός τότε θα χρησιμοποιούνται ο υπερπυκνωτές ανεξαρτήτως ρεύματος.

Κατάσταση ΣΤ:

Αν το ρεύμα του κινητήρα είναι πάνω από 0.5 A, τότε θα χρησιμοποιείται το pack των υπερπυκνωτών ανεξαρτήτως SOC της μπαταρίας.

Κατάσταση Ζ:

Αν η τιμή του SOC/τάσης του pack των μπαταριών είναι κάτω από 20%/6 Volt και το SOC του pack των υπερπυκνωτών είναι μηδέν τότε θα χρησιμοποιείται το pack των μπαταριών ανεξαρτήτως ρεύματος.

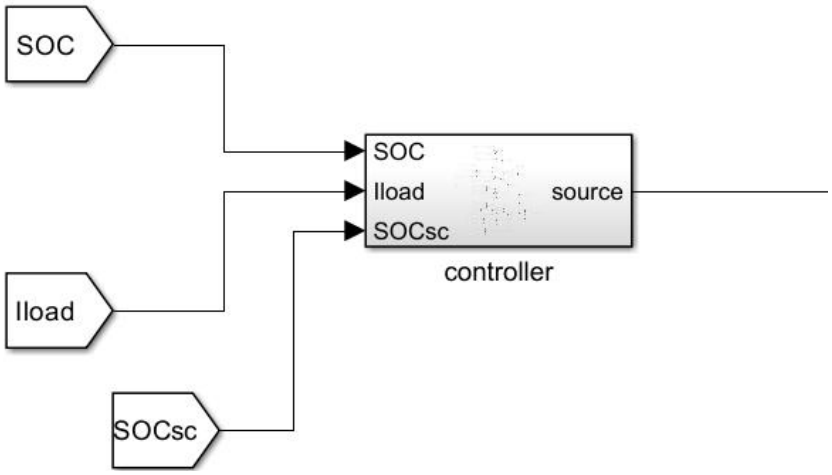
Κατάσταση Η:

Αν το ρεύμα της μηχανής είναι αρνητικό, κάτι που σημαίνει ότι έχει μπει σε λειτουργία γεννήτριας το ρεύμα θα επιστρέφει στο pack των υπερπυκνωτών.

Σημείωση: Βασικός όρος για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το pack των υπερπυκνωτών σε όλες τις παραπάνω καταστάσεις είναι το SOC τους να είναι μεγαλύτερο του μηδενός.

Κατάσταση	Ρεύμα ηλεκτρικής μηχανής (A)	SOC μπαταριών (%)	SOC υπερπυκνωτών (%)	Τροφοδοσία ηλεκτρικής μηχανής
Α	< 0.5	>80%	-	Pack μπαταριών
Β	> 0.5	>80%	> 0	Pack SC
Γ	< 0.21	20% <SOC< 80%	-	Pack μπαταριών
Δ	> 0.21	20% <SOC< 80%	> 0	Pack SC
Ε	-	< 20%	> 0	Pack SC
ΣΤ	>0.5	-	>0	Pack SC
Ζ	-	< 20%	= 0	Pack μπαταριών
Η	< 0	-	-	Pack SC

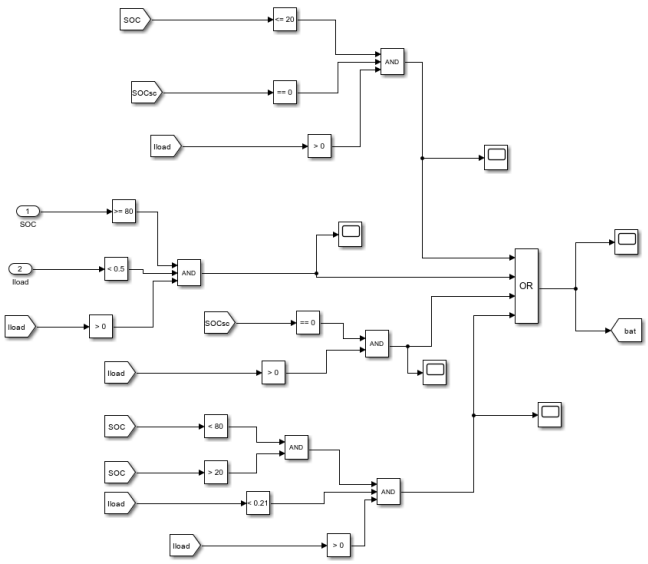
Πίνακας 8:Το διάγραμμα των λειτουργικών καταστάσεων του ελεγκτή.



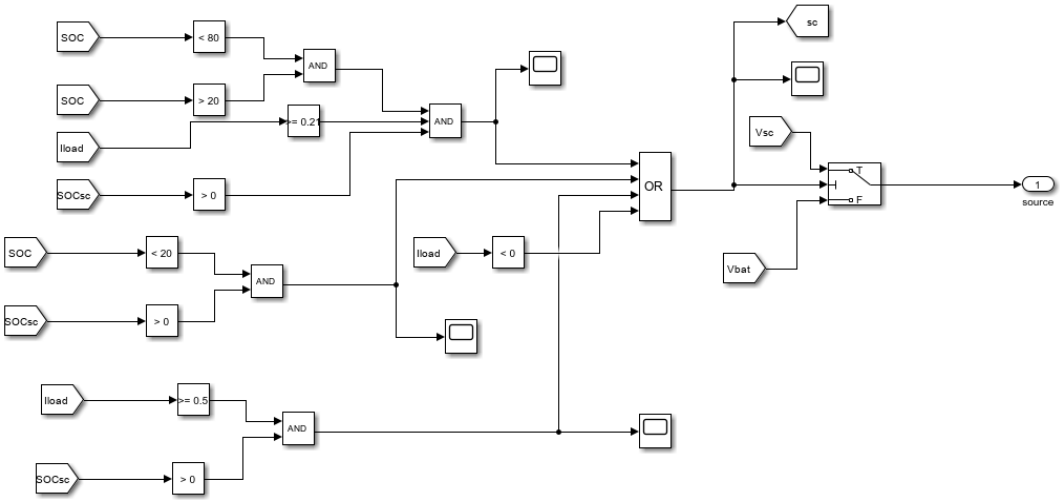
Σχήμα 61: Το block του ελεγκτή στο simulink.

Όπως φαίνεται ο ελεγκτής έχει τρεις εισόδους και μία έξοδο. Πρακτικά τα σήματα που παράγονται από τον ελεγκτή και χρησιμοποιούνται στη συνέχεια του συστήματος είναι τρία στα οποία θα υπάρξουν αναφορές στη συνέχεια. Οι τρεις είσοδοι του ελεγκτή αντιστοιχούν στις τρεις συνθήκες της κάθε κατάστασης, δηλαδή στο ρεύμα της μηχανής, στο SOC των μπαταριών και στο SOC των υπερπυκνωτών. Η έξοδος που είναι εμφανής αντιστοιχεί στη τάση εισόδου της μηχανής.

Η υλοποίηση στο εσωτερικό του ελεγκτή έχει πραγματοποιηθεί κατά κύριο λόγο με λογικές πύλες και χωρίζεται σε δύο μέρη. Το ένα μέρος αντιστοιχεί στις περιπτώσεις όπου ικανοποιούνται οι καταστάσεις Α, Γ και Ζ, δηλαδή όταν η μηχανή τροφοδοτείται από τις μπαταρίες, και το άλλο μέρος αντιστοιχεί στις περιπτώσεις όπου ικανοποιούνται οι καταστάσεις Β, Δ, Ε, ΣΤ και Η, δηλαδή όταν η μηχανή τροφοδοτείται από τους υπερπυκνωτές.



Σχήμα 62: Το πρώτο μέρος του ελεγκτή.



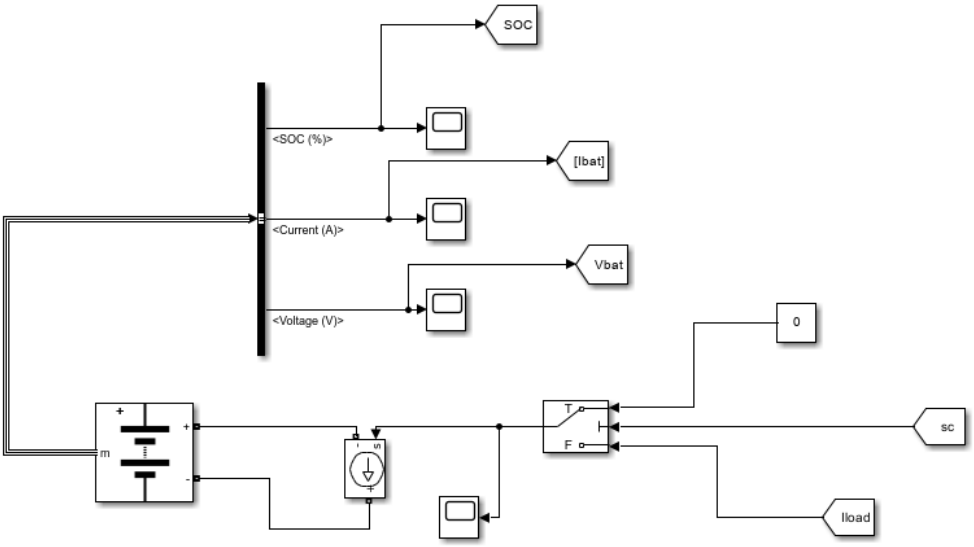
Σχήμα 63: Το δεύτερο μέρος του ελεγκτή.

Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι παράγονται δύο επιπλέον σήματα, ένα από κάθε μέρος του ελεγκτή. Από το πρώτο μέρος παράγεται το σήμα << bat >> και από το δεύτερο μέρος παράγεται το σήμα << sc >>. Αυτά τα δύο σήματα παίρνουν τιμές αποκλειστικά 0 και 1 και είναι τα σήματα που αποφασίζουν ποια πηγή (μπαταρίες ή υπερπυκνωτές) θα τροφοδοτήσει την ηλεκτρική μηχανή. Τόσο το σήμα << bat >> όσο και το σήμα << sc >> αποτελούν εξόδους μιας λογικής πύλης OR. Αυτό σημαίνει ότι αν ικανοποιείται έστω και μία συνθήκη από τις εισόδους αυτής της πύλης, τότε η έξοδος παίρνει την τιμή 1, αλλιώς παίρνει την τιμή μηδέν. Η κάθε είσοδος των δύο λογικών πυλών OR αντιστοιχεί σε μία κατάσταση λειτουργίας του ελεγκτή. Αν το σήμα << bat >> είναι 1 τότε χρησιμοποιείται το pack των μπαταριών για τροφοδοσία, ενώ αν είναι το σήμα << sc >> 1 τότε χρησιμοποιείται το pack των υπερπυκνωτών. Να σημειωθεί ότι σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να πάρουν και τα δύο σήματα την τιμή 1 ταυτόχρονα.

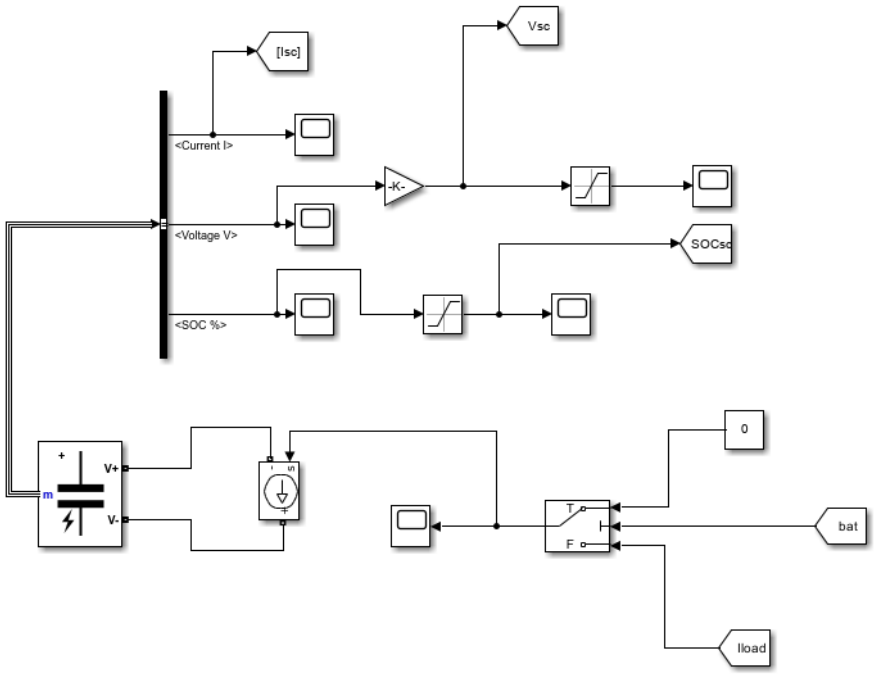
Στο δεύτερο μέρος του ελεγκτή έχει προστεθεί επιπλέον και ένας διακόπτης στο δεξί μέρος του συστήματος, ο οποίος αποφασίζει ποια τάση θα μπει ως είσοδο στη μηχανή, δηλαδή ποια θα είναι η βασική έξοδος του ελεγκτή. Με λίγα λόγια αποφασίζει αν η μηχανή θα τροφοδοτείται από τις μπαταρίες ή από τους υπερπυκνωτές. Η λειτουργία του διακόπτη είναι πολύ απλή καθώς παίρνει ως σήμα ελέγχουν το << sc >> και αν αυτό είναι μεγαλύτερο του μηδενός, δηλαδή 1, τότε περνάει στην έξοδο την τάση των υπερπυκνωτών. Σε αντίθετη περίπτωση περνάει στην έξοδο την τάση των μπαταριών.

Συνοψίζοντας ο ελεγκτής όπως ήδη αναφέρθηκε έχει τρία σήματα εξόδου. Ένα είναι το βασικό σήμα εξόδου που αντιστοιχεί στην τάση εισόδου της μηχανής και μπορεί να είναι είτε η τάση στα άκρα των μπαταριών είτε η τάση στα άκρα των υπερπυκνωτών. Τα άλλα δύο σήματα εξόδου είναι τα σήματα ελέγχου << bat >> και << sc >>, τα οποία χρησιμοποιούνται για την λήψη της απόφασης όσον αφορά το ποια πηγή θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε κατάσταση λειτουργίας της μηχανής.

Πως όμως χρησιμοποιούνται αυτά τα δύο σήματα ελέγχου για να λειτουργεί σωστά τόσο το pack των μπαταριών όσο και το pack των υπερπυκνωτών;



Σχήμα 64: Το pack των μπαταριών με την συνθήκη ελέγχου στην είσοδο του.

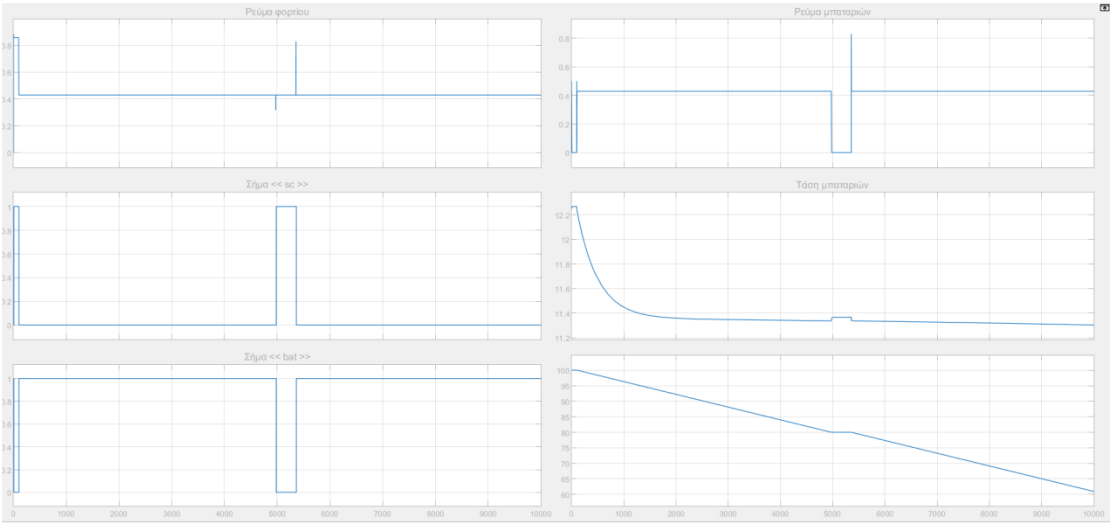


Σχήμα 65: Το pack των υπερπυκνωτών με την συνθήκη ελέγχου στην είσοδο του.

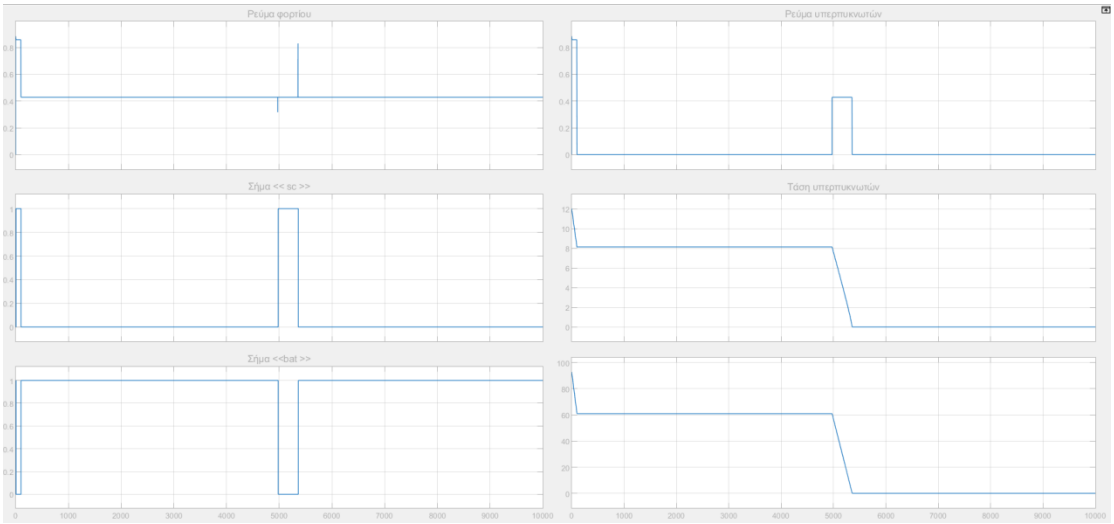
Και στις δύο εικόνες στα δεξιά φαίνεται το σύστημα ελέγχου και λήψης της απόφασης για το αν θα χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη πηγή τροφοδοσίας. Είναι ένα απλό σύστημα με ένα διακόπτη για την κάθε περίπτωση. Στη περίπτωση των μπαταριών το σήμα ελέγχου είναι το << sc >>, όπου αν το << sc >> είναι 1 τότε δεν περνάει το ρεύμα της μηχανής ως φορτίο στις μπαταρίες καθώς βρίσκεται σε λειτουργία το pack των υπερπυκνωτών. Σε αντίθετη περίπτωση που το << sc >> είναι 0 περνάει κανονικά το ρεύμα από τις μπαταρίες. Αντίστοιχη είναι και η λειτουργία του συστήματος των υπερπυκνωτών με την διαφορά ότι το σήμα ελέγχου είναι το << bat >>. Τα σήματα << bat >> και << sc >> έχουν χρησιμοποιηθεί επίτηδες αντίθετα, δηλαδή το σήμα << bat >> στο pack υπερπυκνωτών και το σήμα << sc >> στο pack των μπαταριών για να αποφεύγεται η εξάρτηση των σημάτων αυτών με τα ρεύματα και τα SOC των μπαταριών και των υπερπυκνωτών και να μην χρειάζεται να μπουν block καθυστέρησης στο σύστημα.

Στη συνέχεια απεικονίζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις διάφορες καταστάσεις του ελεγκτή:

1η προσομοίωση:



Σχήμα 66: Αποτελέσματα 1ης προσομοίωσης: (α) Ρεύμα φορτίου, (β) Σήμα << sc >>, (γ) Σήμα << bat >>, (δ) Ρεύμα μπαταριών, (ε) Τάση στα άκρα των μπαταριών, (στ) SOC μπαταριών

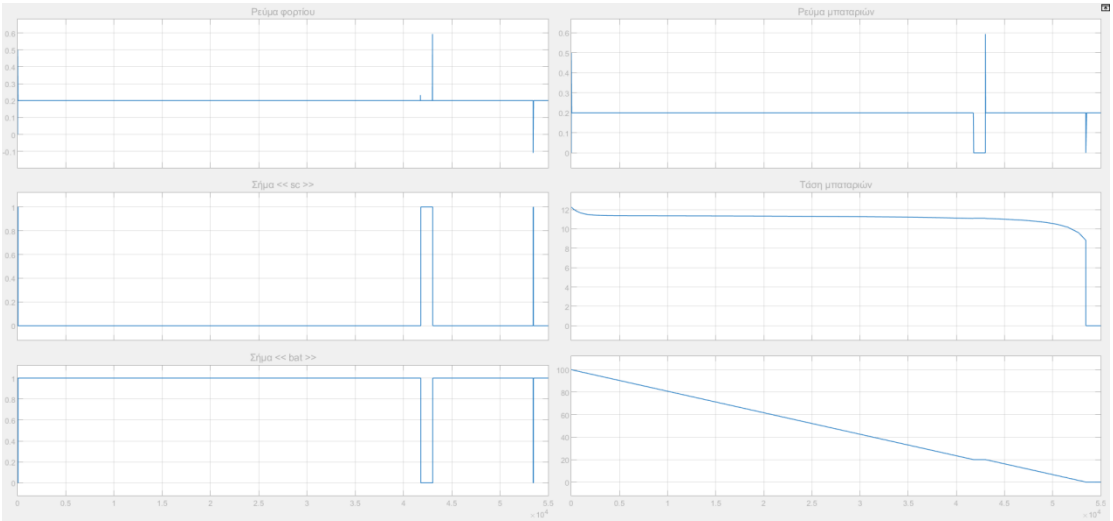


Σχήμα 67: Αποτελέσματα 1ης προσομοίωσης: (α) Ρεύμα φορτίου, (β) Σήμα << sc >>, (γ) Σήμα << bat >>, (δ) Ρεύμα υπερπυκνωτών, (ε) Τάση στα άκρα των υπερπυκνωτών, (στ) SOC υπερπυκνωτών

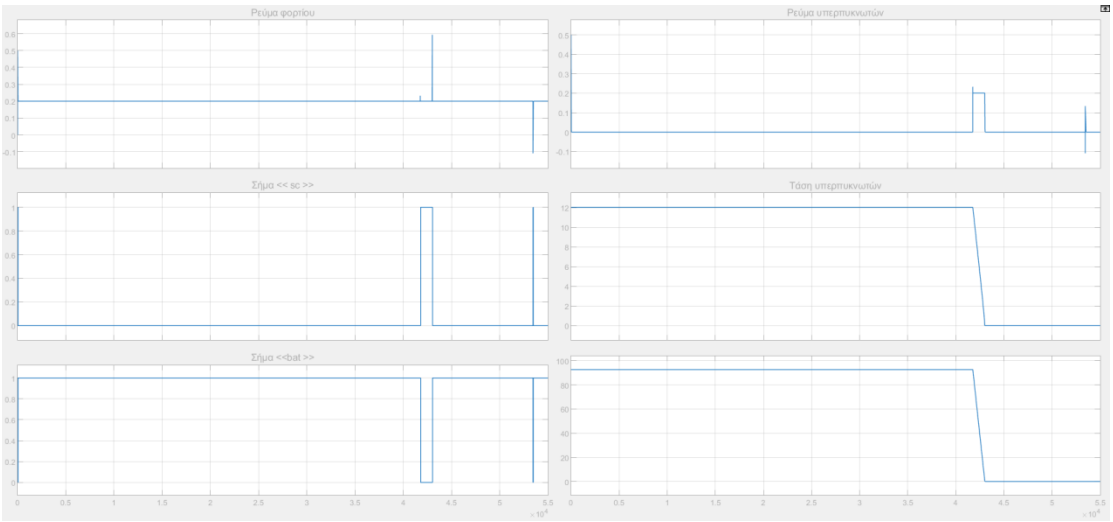
Σε αυτή τη προσομοίωση αρχικά το ρεύμα της μηχανής είναι κοντά στα 0.9 A και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται οι υπερπυκνωτές. Στη συνέχεια το ρεύμα πέφτει κοντά στα 0.45 A και μπαίνουν σε λειτουργία οι μπαταρίες. Αυτό συμβαίνει μέχρι τη στιγμή που το SOC των μπαταριών πέφτει στο 80% όπου λόγω του ότι το ρεύμα είναι μεγαλύτερο του 0.21 A ξαναμπαίνουν σε λειτουργία οι υπερπυκνωτές. Η λειτουργία τους συνεχίζεται μέχρι που μηδενίζεται το SOC τους. Έτσι ξαναμπαίνουν σε λειτουργία οι μπαταρίες μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.

Σημείωση: Λειτουργικές καταστάσεις Α, Β, Γ, Δ, ΣΤ.

2η προσομοίωση:



Σχήμα 68: Αποτελέσματα 2ης προσομοίωσης: (α) Ρεύμα φορτίου, (β) Σήμα << sc >>, (γ) Σήμα << bat >>, (δ) Ρεύμα μπαταριών, (ε) Τάση στα άκρα των μπαταριών, (στ) SOC μπαταριών

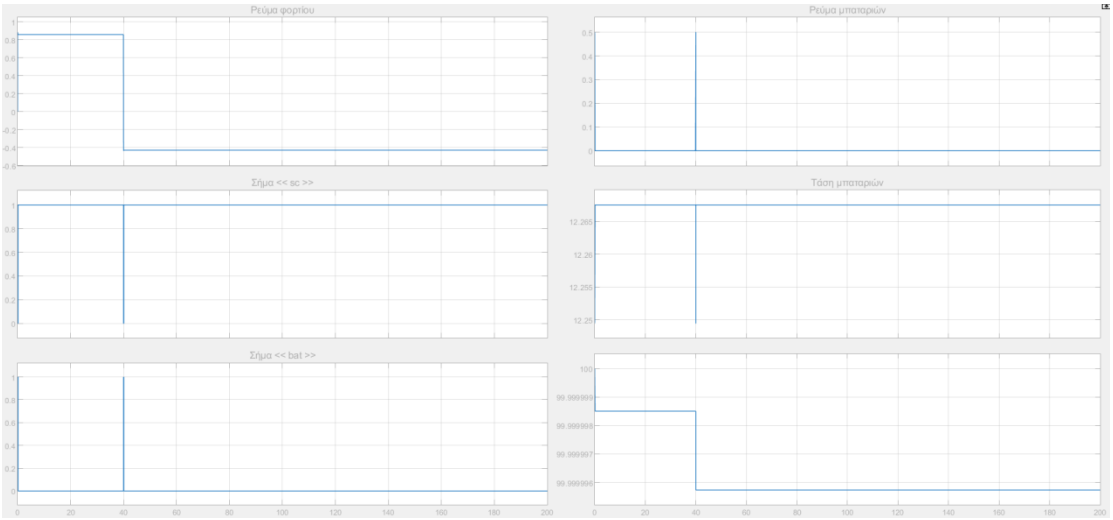


Σχήμα 69: Αποτελέσματα 2ης προσομοίωσης: (α) Ρεύμα φορτίου, (β) Σήμα << sc >>, (γ) Σήμα << bat >>, (δ) Ρεύμα υπερπυκνωτών, (ε) Τάση στα άκρα των υπερπυκνωτών, (στ) SOC υπερπυκνωτών

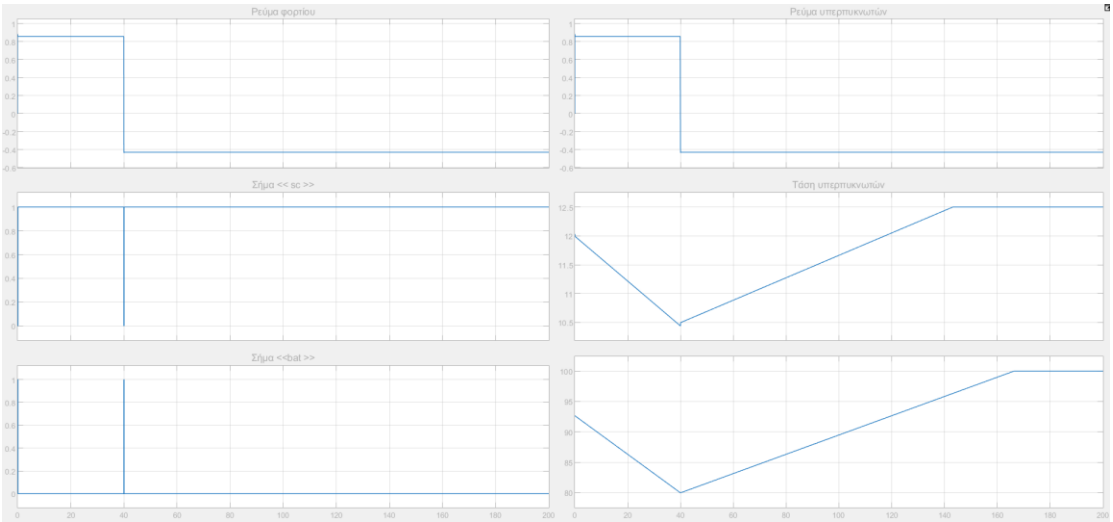
Αυτή τη φορά σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης το ρεύμα της μηχανής είναι σταθερό και ίσο με 0.2 A. Αυτό σημαίνει πως οι μπαταρίες θα αποφορτιστούν μέχρι τη στιγμή που το SOC τους θα φτάσει στο 20%, όπου θα μπουν σε λειτουργία οι υπερπυκνωτές. Οι υπερπυκνωτές θα αποφορτιστούν πολύ γρήγορα σε σχέση με τις μπαταρίες και τελικά θα ξαναμπούν σε λειτουργία οι μπαταρίες μέχρις ότου αποφορτιστούν πλήρως.

<u>Σημείωση:</u> Λειτουργικές καταστάσεις Α, Γ, Ε, Ζ.

3η προσομοίωση:



Σχήμα 70: Αποτελέσματα 3ης προσομοίωσης: (α) Ρεύμα φορτίου, (β) Σήμα << sc >>, (γ) Σήμα << bat >>, (δ) Ρεύμα μπαταριών, (ε) Τάση στα άκρα των μπαταριών, (στ) SOC μπαταριών



Σχήμα 71: Αποτελέσματα 3ης προσομοίωσης: (α) Ρεύμα φορτίου, (β) Σήμα << sc >>, (γ) Σήμα << bat >>, (δ) Ρεύμα υπερπυκνωτών, (ε) Τάση στα άκρα των υπερπυκνωτών, (στ) SOC υπερπυκνωτών

Στη 3η προσομοίωση το επίκεντρο βρίσκεται στη λειτουργία των υπερπυκνωτών, καθώς οι μπαταρίες δεν μπαίνουν σε λειτουργία σε αυτή τη περίπτωση. Αρχικά το ρεύμα της μηχανής είναι ξανά υψηλό κοντά στα 0.9 A και μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα η μηχανή μπαίνει σε λειτουργία γεννήτριας και φορτίζει τους υπερπυκνωτές. Η μηχανή μπαίνει σε λειτουργία γεννήτριας τη στιγμή που το ρεύμα της γίνεται αρνητικό. Αυτή η προσομοίωση αντιστοιχεί σε μία εφαρμογή αναγεννητικής πέδησης.

<u>Σημείωση:</u> Λειτουργικές καταστάσεις ΣΤ, Η.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Αρχικά στην εργασία συζητήθηκαν τα είδη μπαταριών και υπερπυκνωτών και πως αυτά τα στοιχεία εντάχθηκαν στη βιομηχανία της ηλεκτροκίνησης. Αναλύθηκαν τα χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά τους για διάφορα μεγέθη φορτίων και διαφορετικές λειτουργίες ηλεκτρικού κινητήρα. Τέλος συνδυάστηκαν προκειμένου να μοντελοποιηθεί ένα υβριδικό σύστημα τροφοδοσίας ενέργειας ενός σύγχρονου ηλεκτρικού οχήματος.

Όσον αφορά την συμπεριφορά των μπαταριών και των υπερπυκνωτών με φορτίο έναν DC ηλεκτρικό κινητήρα μέσω προσομοιώσεων και πειραμάτων εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα. Οι μπαταρίες ως γνωστόν λόγω της υψηλής ενεργειακής τους πυκνότητας έχουν την δυνατότητα να τροφοδοτούν τον κινητήρα για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς πτώση στην απόδοση τους. Από την άλλη οι υπερπυκνωτές έχουν εμφανώς μικρότερη αυτονομία, παρόλα αυτά η φόρτιση τους πραγματοποιούνταν πολύ πιο γρήγορα. Όλα τα παραπάνω βέβαια ισχύουν πριν εμφανιστεί το φαινόμενο της γήρανσης των μπαταριών, καθώς παρατηρήθηκε πως η απόδοση των μπαταριών μειώνεται σημαντικά με το πέρας των κύκλων ζωής τους και η χωρητικότητα τους μπορεί να πέσει σε πολύ χαμηλά επίπεδα ακόμα και στο 20%-30% της αρχικής της τιμής.

<u>Πιο συγκεκριμένα:</u>

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για το κάθε κελί μπαταρίας ξεχωριστά με μια ελεγχόμενη πηγή ρεύματος και έναν ρυθμιστή για τους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης της μπαταρίας. Οι μπαταρίες των προσομοιώσεων ήταν των 2.9 Ah και πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για ρεύμα φορτίου από 0.2 A εώς 1.2 A. Για ρεύμα φορτίου 0.2 A, η μπαταρία εκφορτίστηκε πλήρως σε χρονικό διάστημα 14.5 ωρών, όπου η τάση της μειωνόταν με ελάχιστο ρυθμό για τις πρώτες 14 ώρες και στα τελευταία 30 λεπτά παρατηρήθηκε μία απότομη σχεδόν κατακόρυφη μείωση. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων του κινητήρα η τάση μηδενίστηκε σε μικρότερο χρονικό διάστημα όπως ήταν αναμενόμενο καθώς όσο μεγαλύτερο ρεύμα απορροφά το φορτίο της μπαταρίας τόσο πιο γρήγορα η ίδια αποφορτίζεται.

Στη συνέχεια εκτελέστηκαν προσομοιώσεις πολλών κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης της μπαταρίας με σκοπό να εντοπιστεί το σημείο όπου οι μπαταρίες χάνουν σημαντικό μέρος της απόδοσης τους. Συμπεράναμε πως με σταθερό ρεύμα αποφόρτισης 0.2 A και σταθερό ρεύμα φόρτισης 1 A, με το πέρας 145 κύκλων, η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται από τις 2.9 Ah στις 0.8 Ah κάτι που την καθιστά πολύ αδύναμη για την τροφοδοσία ενός κινητήρα. Έτσι μετά το πέρας ορισμένου αριθμού κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης (στη

συγκεκριμένη περίπτωση μετά από 135 κύκλους όπου η χωρητικότητα πέφτει κάτω από τη 1 Ah ή για μεγαλύτερη σιγουριά μετά από 100 κύκλους όπου η ίδια πέφτει κάτω από τις 1.5 Ah), θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως πηγή τροφοδοσίας του κινητήρα και μία 2η πηγή, στη συγκεκριμένη περίπτωση οι υπερπυκνωτές.

Με τις ίδιες συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης εκτελέστηκαν πειράματα σε μπαταρίες στο εργαστήριο. Όπως φάνηκε στα σχήματα 29 και 30 τα αποτελέσματα ήταν πανομοιότυπα με αυτά των προσομοιώσεων με τη διαφορά ότι στο εργαστήριο τα πειράματα έγιναν σε πακέτο τριών μπαταριών. Στη αποφόρτιση η τάση στα άκρα του πακέτου των μπαταριών εκκίνησε από τα 12 Volt και μειωνόταν με αργό ρυθμό μέχρι μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, κοντά στις 24 ώρες λειτουργίας(αυτό συνέβη λόγω του ότι οι μπαταρίες βρισκόταν στον 1ο κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης τους και είχαν αυξημένη απόδοση), όπου οι μπαταρίες παρουσίασαν απότομη μείωση στην απόδοση τους. Το ίδιο συνέβη και με το ρεύμα όπου όταν έφτασε εκείνη η χρονική στιγμή της απότομης πτώσης της τάσης παρατηρήθηκε απότομη πτώση και στο ρεύμα. Επίσης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων όταν η τάση στα άκρα του pack των μπαταριών έπεσε κάτω από τα 7 Volts τότε ο δρομέας του κινητήρα ξεκίνησε να περιστρέφεται με εμφανώς χαμηλότερη ταχύτητα. Όταν η τάση έπεσε κάτω από τα 6 Volts τότε ο δρομέας του κινητήρα ίσα που περιστρεφόταν και όταν πλέον η τάση έφτασε στα 5.75 Volts τότε ο κινητήρας σταμάτησε. Συσχετίσαμε επίσης την τάση των μπαταριών με την χωρητικότητα του και με το SOC τους. Τα αποτελέσματα ήταν πανομοιότυπα με την χωρητικότητα και το SOC να έχουν μικρή μείωση για τις πρώτες 24 ώρες και στη συνέχεια να παρατηρείται η απότομη μείωση τους.

Όσον αφορά τους υπερπυκνωτές πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις τόσο φόρτισης όσο και αποφόρτισης σε υπερπυκνωτές των 100 Farad. Η φόρτιση γινόταν με σταθερή τάση 5 Volt και σταθερό ρεύμα 0.1 A ενώ η αποφόρτιση με σταθερό ρεύμα 0.33 A. Σύμφωνα με τις προαναφερόμενες τιμές ο υπερπυκνωτής φορτίστηκε πλήρως σε χρονικό διάστημα 45 λεπτών και αποφορτίστηκε σε 12 λεπτά. Σε κάθε περίπτωση η αύξηση της τάσης και η μείωση της αντίστοιχα ήταν γραμμική. Επιπλέον έγιναν προσομοιώσεις για διάφορες τιμές φορτίου στους υπερπυκνωτές από 0.05 A εώς 1.5 A. Ο χρόνος αποφόρτισης του υπερπυκνωτή για την μικρότερη τιμή του ρεύματος φορτίου στα 0.05 A είναι 89.5 min. Με την αύξηση του ρεύματος μέχρι και τα 0.5 A παρατηρήθηκε μία ραγδαία μείωση στο χρόνο αποφόρτισης του με αυτόν να ισούται με 9 min. Η περαιτέρω αύξηση του ρεύματος δεν είχε τόσο μεγάλη επιρροή στο χρόνο αποφόρτισης του υπερπυκνωτή καθώς από τα 9 min όταν το ρεύμα αυξήθηκε μέχρι τα 1.5 A ο χρόνος αποφόρτισης έπεσε στα 2.9 min. Παρόλα αυτά είναι μία αισθητή διαφορά που παίζει σημαντικό ρόλο στη τροφοδοσία του κινητήρα καθώς σε περιπτώσεις εκκίνησης ή επιτάχυνσης που το ρεύμα αυξάνεται αρκετά πρέπει να είναι γνωστός ο χρόνος που μπορεί να λειτουργήσει ο υπερπυκνωτής και να τροφοδοτήσει τον κινητήρα με αυτό το ρεύμα.

Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις για τους υπερπυκνωτές με ίδιες τιμές ρεύματος και τάσης κατά την φόρτιση και αποφόρτιση και εκλάβαμε σχεδόν ίδια αποτελέσματα με τις προσομοιώσεις. Αναλυτικότερα όπως είναι εμφανές στα σχήματα 42 και 43 ο χρόνος που χρειάστηκε για να αποφορτιστεί ο υπερπυκνωτής ήταν σχεδόν 15 λεπτά, ενώ στη προσομοίωση χρειάστηκαν 12 λεπτά. Αυτή η μικρή διαφορά μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το ρεύμα δεν είναι σταθερό στα 0.33 A αλλά όπως φαίνεται και

στο σχήμα 43 ξεκινάει από τα 0.4 A και στη συνέχεια πέφτει μέχρι τα 0.25 A. Ο απότομος μηδενισμός του ρεύματος κοντά στα 14 λεπτά υποδηλώνει την ακινητοποίηση του κινητήρα καθώς η τιμή της τάσης στα άκρα του η οποία προέρχεται από τον υπερπυκνωτή είναι πλέον κάτω από τα 0.5 Volt και δεν είναι ικανή να κινήσει τον δρομέα του κινητήρα των 1.5 Volt. Τέλος η μορφή της καμπύλης τόσο της τάσης όσο και του ρεύματος αποφόρτισης είναι αυτό που περιμέναμε καθώς παρατηρείται μία σχεδόν γραμμική μείωση στη τάση, ενώ το ρεύμα μειώνεται και αυτό με σχεδόν σταθερό ρυθμό μέχρι την ακινητοποίηση του δρομέα.

Οι αδυναμίες που παρουσιάστηκαν τόσο από την πλευρά των μπαταριών όσο και από την πλευρά των υπερπυκνωτών στα πειράματα και στις προσομοιώσεις μας οδήγησαν στη δημιουργία ενός υβριδικού συστήματος τροφοδοσίας ενέργειας του κινητήρα, όπου υπάρχουν δύο πηγές ενέργειας, μία αυτή των μπαταριών και μία αυτή των υπερπυκνωτών.

Η λειτουργία του υβριδικού συστήματος βασίστηκε σε έναν ελεγκτή, ο οποίος καθορίζει σε κάθε λειτουργική κατάσταση του κινητήρα το ποια πηγή θα τον τροφοδοτήσει. Αυτό που κάνει το σύστημα πιο αξιόπιστο είναι πως ο ελεγκτής δεν λαμβάνει μόνο δεδομένα από τις καταστάσεις των πηγών τροφοδοσίας, αλλά λαμβάνει δεδομένα και από τον ηλεκτρικό κινητήρα και προσαρμόζει αναλόγως την λειτουργία του. Όπως αναφέρθηκε ήδη στην παρούσα εργασία όσο υψηλότερες είναι οι στροφές του κινητήρα τόσο μεγαλύτερο ρεύμα απαιτεί για την λειτουργία του. Επίσης και σε περιπτώσεις εκκίνησης η ζήτηση του ρεύματος είναι ιδιαίτερα αυξημένη. Λαμβάνοντας υπόψη μόνο την κατάσταση των πηγών ενέργειας, το σύστημα θα ήταν << τυφλό >> σε τέτοιου είδους μεταβατικά φαινόμενα. Για αυτό το λόγο είναι σημαντικός και ο έλεγχος της λειτουργίας του κινητήρα εκτός από αυτή των πηγών. Στις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν και τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στα σχήματα 66 μέχρι 71 είναι εμφανές πως η βασική πηγή τροφοδοσίας ενέργειας του κινητήρα είναι οι μπαταρίες και πως οι υπερπυκνωτές μπαίνουν σε λειτουργία κυρίως σε μεταβατικά φαινόμενα λειτουργίας του κινητήρα.

Με αυτό το τρόπο καταφέραμε να συνδυάσουμε τα πλεονεκτήματα της κάθε πηγής και να προγραμματίσουμε το σύστημα έτσι ώστε να εξαλειφθούν οι αδυναμίες τους. Καταφέραμε να έχουμε μεγάλη αυτονομία στο σύστημα και ταυτοχρόνως να προστατεύουμε τις μπαταρίες από ειδικές λειτουργίες του κινητήρα. Επίσης με τη χρήση του υβριδικού συστήματος αξιοποιήθηκαν και οι δυνατότητες των υπερπυκνωτών στη γρήγορη φόρτιση σε περιπτώσεις όπου η ροή ισχύος ήταν αντίθετη, δηλαδή από την πλευρά της ηλεκτρικής μηχανής προς την πηγή τροφοδοσίας.

Η πιο σημαντική όμως συνεισφορά του υβριδικού συστήματος είναι η χρήση των υπερπυκνωτών ως πηγή τροφοδοσίας σε περιπτώσεις ζήτησης υψηλής ισχύος. Όταν οι στροφές του κινητήρα αυξάνονται, όπως στην εκκίνηση και την επιτάχυνση ενός ηλεκτρικού οχήματος η χρήση των υπερπυκνωτών είναι καθοριστική καθώς οι μπαταρίες φθείρονται σημαντικά λόγω των υψηλών ρευμάτων και επιταχύνουν το φαινόμενο γήρανσης τους, με αποτέλεσμα η αντοχή τους να αυξάνεται σημαντικά.

6.2 Μελλοντική εργασία

Το υβριδικό σύστημα που υλοποιήθηκε εφαρμόστηκε για μπαταρίες και υπερπυκνωτές, οι οποίοι βρίσκονται στους πρώτους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αναφέρονται σε μπαταρίες όπου η απόδοση τους είναι υψηλή και η συμπεριφορά τους κατά την αποφόρτιση είναι σχεδόν ιδανική. Η συμπεριφορά των μπαταριών, οι οποίες έχουν υποστεί γήρανση μπορεί να διαφέρει σε έναν βαθμό από αυτή που παρουσιάστηκε. Μία σημαντική βελτίωση του υβριδικού συστήματος και κυρίως του ελεγκτή μπορεί να αποτελέσει η προσομοίωση πολλών κύκλων ζωής και η προσθήκη και αυτής της παραμέτρου στην είσοδο του ελεγκτή, προκειμένου το σύστημα να γίνει ακόμα πιο αξιόπιστο και αποδοτικό.

Επίσης εκτός των προσομοιώσεων, η μεταφορά του υβριδικού συστήματος σε εργαστηριακό περιβάλλον θα μας επιτρέψει να εξακριβώσουμε την λειτουργία του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Ακόμη θα μπορούσαμε να προσθέσουμε και μεγαλύτερα φορτία, δηλαδή κινητήρες υψηλότερων ισχύων με αποτέλεσμα να συσχετίσουμε τα αποτελέσματα με κινητήρες που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα. Σε τέτοιες περιπτώσεις απαραίτητη θα ήταν και η αντικατάσταση της χωρητικότητας μπαταριών και των υπερπυκνωτών με μεγέθη που να μπορούν να υποστηρίξουν την τροφοδοσία τόσο μεγάλων κινητήρων.

Επίσης παρόλο που η πλειοψηφία των σύγχρονων ηλεκτρικών οχημάτων χρησιμοποιεί κυρίως υβριδικά συστήματα τροφοδοσίας με δύο πηγές ενέργειας (κατά βάση μπαταρίες και υπερπυκνωτές) έχουν υπάρξει και συστήματα με περισσότερες από δύο πηγές ενέργειας κάτι που αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα του συστήματος. Κάποιες από τις βασικότερες εναλλακτικές πηγές ενέργειας στα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, τα ηλιακά πάνελ, και οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες strirling. Η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος βασισμένου στο ήδη υπάρχον υβριδικό σύστημα θα μπορούσε να αποτελέσει μία πολύ ενδιαφέρουσα εργασία για το μέλλον.

Βιβλιογραφία:

[1] https://www.researchgate.net/publication/362801333_A_Machine_Learning-based_Digital_Twin_for_Electric_Vehicle_Battery_Modeling, August 2022

[2] A Review on Recent Progress of Batteries for Electric Vehicles T. Y. Chian, W. L. J. Wei, E. L. M. Ze, L. Z. Ren, Y. E. Ping, N. Z. Abu Bakar*, M. Faizal and S. Sivakumar, December 2019

[3] A Guide to Understanding Battery Specifications MIT Electric Vehicle Team, December 2008

[4]https://www.researchgate.net/publication/354268448_A_review_on_Supercapacitors_types_and_components, August 2021

[5] Loss Analysis of Hybrid Battery-Supercapacitor Energy Storage System in EVs X. D. Xue, S. Raghu Raman , Y. C. Fong, and K. W. E. Cheng, December 2017

[6] Energy Consumption and Battery Aging Minimization Using a Q-learning Strategy for a Battery/Ultracapacitor Electric Vehicle Bin Xu1 , Junzhe Shi2,* , Sixu Li3 , Huayi Li4 , Zhe Wang1, October 2020

[7] A Review of Supercapacitors: Materials Design, Modification, and Applications Muhammad Yaseen , Muhammad Arif Khan Khattak, Muhammad Humayun , Muhammad Usman, Syed Shaheen Shah , Shaista Bibi, Bakhtiar Syed Ul Hasnain, Shah Masood Ahmad , Abbas Khan , Nasrullah Shah , Asif Ali Tahir and Habib Ullah, September 2021

[8] Aging Mechanism and Models of Supercapacitors: A Review Ning Ma, Dongfang Yang , Saleem Ria , Licheng Wang and Kai Wang, March 2023

[9] Using Supercapacitors in Electric Vehicles Adrian Thomas KYOCERA AVX Components Corporation One AVX Boulevard Fountain Inn, S.C. 29644 US, April 2022

[10] Lithium ion battery degradation: what you need to know Jacqueline S. Edge, ab Simon O'Kane,ab Ryan Prosser,ab Niall D. Kirkaldy,a Anisha N. Patel, a Alastair Hales,a Abir Ghosh,abc Weilong Ai, bd Jingyi Chen,d Jiang Yang, a Shen Li,a Mei-Chin Pang,ab Laura Bravo Diaz, a Anna Tomaszewska, d M. Waseem Marzook,a Karthik N. Radhakrishnan, a Huizhi Wang,a Yatish Patel,a Billy Wubd and Gregory J. Offer, March 2021

[11] Electrode Materials for Supercapacitors in Hybrid Electric Vehicles: Challenges and Current ProgressSivakumar Rajagopal, Rameez Pulapparambil Vallikkattil, M. Mohamed Ibrahim and Dimiter Georgiev Velev, January 2022

[12] A Control Strategy for Capacity Allocation of Hybrid Energy Storage System Based on Hierarchical Processing of Demand Power Kai Lin 1 1 University of Chinese Academy of Sciences, Yanqihu Campus, Huaibei Zhuang, Huairou, October 2020

[13] Supercapacitor – A Guide for the Design-In Process Application Note ANP077 // RENÉ KALBITZ, FRANK PUHANE, August 2020

[14]https://www.researchgate.net/publication/262731323_Performance_analysis_of_a_lead-acid_batterysupercapacitors_hybrid_and_a_battery_stand-alone_under_pulsed_loads, March 2014

[15] https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html

[16] https://www.mathworks.com/help/simulink/getting-started-with-simulink.html?s_tid=CRUX_topnav