



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

**ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ
ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΟΥ
ΟΧΗΜΑΤΟΣ**

Σαββάκης Πέτρος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Δρ.ΠΥΡΟΜΑΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Επ. Καθηγητής Π.Α.Δ.Α

ΑΙΓΑΛΕΩ, 2021

Η παρούσα διπλωματική εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την τριμελή εξεταστική επιτροπή, η οποία ορίστηκε από την Γ.Σ. του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, σύμφωνα με το νόμο και τον εγκεκριμένο Οδηγό Σπουδών του τμήματος.

Τα μέλη της Επιτροπής ήταν:

- Πυρομάλης Δημήτριος (Επιβλέπων)
- Δρόσος Χρήστος (Μέλος)
- Τσελές Δημήτριος (Μέλος)

Υπογραφές Επιτροπής:

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Σαββάκης Πέτρος του Μηνά, με αριθμό μητρώου 71445054 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Τμήματος Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών

Σαββάκης
Πέτρος



*Αφιερωμένη στους γονείς μου οι οποίοι
στέκονται πάντα δίπλα μου σε κάθε μου βήμα
και με βοηθούν με κάθε τρόπο.*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω θερμά τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν και με ενέπνευσαν κατά την εκπόνηση της.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή μου κ. Δημήτριο Πυρομάλη, για την καθοδήγηση του και την εμπιστοσύνη του όλα αυτά τα χρόνια, τόσο στην περάτωση της διπλωματικής εργασίας όσο και σε πληθώρα άλλων εργασιών και πανεπιστημιακών διαγωνισμών.

Ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Δημήτριο Ρίμπα που πρόθυμα και υπεύθυνα με στήριξε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής και για την άψογη επικοινωνία που είχαμε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω και τους Καθηγητές κ. Δημήτριο Τσελέ και κ. Χρήστο Δρόσο για την συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, εκφράζω την αγάπη μου και την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, Αγγελική και Μηνά, οι οποίοι με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η σχεδίαση και ανάπτυξη ψηφιακού διδύμου συσσωρευτή ενέργειας ηλεκτροκίνητου οχήματος με χρήση μπαταριών και συγκεκριμένα Ιόντων Λιθίου.

Συγκεκριμένα θα σχεδιαστεί σύστημα το οποίο θα κάνει καταμέτρηση Τάσης, Ρεύματος καθώς και Θερμοκρασίας των μπαταριών και της συστοιχίας.

Με την λήψη των μετρήσεων θα λαμβάνεται απόφαση από το ολοκληρωμένο σύστημα για την βέλτιστη διαχείριση της φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών.

Τα δεδομένα τα οποία θα συλλέγονται θα αποθηκεύονται και θα επεξεργάζονται στο cloud στο οποίο και θα δημιουργείται ένα ψηφιακό δίδυμο του συστήματος. Επιπρόσθετα θα μπορούμε σε πραγματικό χρόνο να προβάλλουμε τα δεδομένα που έχουμε συλλέξει.

Τέλος το ψηφιακό μοντέλο διαχείρισης συσσωρευτή ενέργειας θα βελτιώνεται με την συλλογή και αποθήκευση δεδομένων στο cloud και θα αναβαθμίζει με την πάροδο του χρόνου και το φυσικό μοντέλο.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the design and development of a digital twin of an electric vehicle's and specifically with lithium ion energy storage cells.

Specifically, a system will be designed which will measure voltage, current and temperature of the cells and the battery pack.

Upon taking the measurements, a decision will be made by the integrated system for the optimal management of the charge and discharge of the batteries.

The data that will be collected will be stored and processed in the cloud, in which a digital twin of the system will be created. In addition, we will be able to view the data we have collected in a real time UI.

Finally, the digital battery management model will improve with the collection and storage of data in the cloud and will upgrade over time the physical model.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	6
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Εξέλιξη των Ηλεκτρικών Αυτοκινήτων	18
1.2 Είδη Οχημάτων	20
1.3 Χαρακτηριστικά και Τοπολογίες Ηλεκτρικών και Υβριδικών Οχημάτων	22
1.3.1 Μονής Πηγής PEVs	22
1.3.2 Διπλών Πηγών PEVs	22
1.3.3 Πολλαπλών Πηγών PEVs	23
1.4 Πρότυπα και Προδιαγραφές Ηλεκτρικών Οχημάτων	24
1.4.1 Πρότυπα Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Ιστορική Αναδρομή.....	28
2.1 Βασικά μέρη της μπαταρίας	28
2.2 Τυπική Διαδικασία Εκφόρτισης	29
2.3 Τυπική Διαδικασία Φόρτισης	30
2.4 Θεωρητικό και Χημικό Σύστημα Μπαταρίας Ιόντων Λιθίου(Li-Ion)	30
(Πίνακας 1: Τυπικές χημικές συστάσεις και χαρακτηριστικά μπαταριών Ιόντων Λιθίου.[11])	31
2.5 Η Εξέλιξη της Τεχνολογίας των Ανόδων-Καθόδων	32
2.6 Μονάδες Αποθήκευσης Ενέργειας Μπαταρίας	33
2.7 Ποσοστό Χωρητικότητας	34
2.8 Θεωρία της Ενέργειας Gibbs, Τάσης και Χωρητικότητας της Μπαταρίας	35
2.8.1 Πραγματική Ενέργεια και Χωρητικότητα της Μπαταρίας	35
2.9 Βασικά Χαρακτηριστικά Επιλογής Μπαταριών Ιόντων Λιθίου	36
2.9.1 Όρια Τάσης Μπαταρίας Ιόντων Λιθίου και Επιπτώσεις	36
2.10 Κύριοι Λόγοι Φθοράς Μπαταρίας	37
2.11 Επίπεδα Σχεδιασμού Μπαταριών	38
2.12 Ηλεκτρονικές Διατάξεις Μπαταριών	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Σύστημα Διαχείρισης Μπαταρίας.....	40
3.2 Κυκλωματική Τοπολογία Μπαταριών	41
3.3 Χαρακτηριστικά Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας (Battery Management System)	43
3.4 Μετρήσεις Συστήματος Μπαταρίας	44
3.4.1 Μέτρηση Τάσης	44
3.4.2 Μέτρηση Θερμοκρασίας	45
3.4.3 Μέτρηση Θερμοκρασίας με Χρήση NTC	45
(Πίνακας 3: Θερμοκρασία - Καμπύλη Αντίστασης PANR 103395-408)	46
(Πίνακας 4: Συντελεστές Steinhart – Hart)	47

(Πίνακας 5: Προδιαγραφών PANR 103395-408).....	47
3.4.4 Μέτρηση Ρεύματος.....	47
3.5 Αισθητήρια.....	47
3.5.1 Current Shunt Αισθητήριο	47
3.5.2 Hall Effect Αισθητήριο	49
3.5.3 Μετασχηματιστής Ρεύματος	50
3.5.4 Πηνίο Rogowski	50
3.5.5 Σύνοψη Αισθητήρων Μέτρησης Ρεύματος.....	51
(Πίνακας 6: Ενδεικτικός πίνακας σύγκρισης αισθητήρων ρεύματος. [30]).....	52
3.6 Μέτρηση Εσωτερικής Αντίστασης Μπαταρίας.....	52
3.7 Μέθοδοι Ισοστάθμισης Μπαταριών	52
3.8 Μέθοδοι Ενεργητικής Ισοστάθμισης.....	53
3.8.1 Χρήση Πυκνωτών	53
3.8.2 Χρήση Πηνίου/Μετασχηματιστή.....	55
3.8.3 Χρήση Μετατροπέων Ενέργειας(Converters)	56
3.9 Μέθοδοι Παθητικής Ισοστάθμισης.....	59
3.9.1 Χρήση Current Shunt Balancing.....	59
3.10 Πίνακας Σύγκρισης Κυκλωμάτων Ισοστάθμισης	60
(Πίνακας 7: Σύγκριση κυκλωμάτων ισοστάθμισης. [8],[9],[31]).....	63
3.11 Μέθοδοι Μοντελοποίησης και Εκτίμησης Μπαταρίας.....	64
(Πίνακας 8: Τα τρία βασικά είδη μοντελοποίησης μπαταριών για συστήματα BMS. [27])	64
3.11.1 Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Μοντέλο	65
3.11.2 Ισοδύναμο Θερμικό Μοντέλο.....	66
3.11.3 Μοντέλο Παραγωγής Θερμότητας	66
3.11.4 Μοντέλο Μεταφοράς Θερμότητας	66
3.11.5 Μοντέλο Αγωγής Θερμότητας.....	67
3.12 Εκτίμηση Κατάστασης Φόρτισης State Of Charge (SoC)	68
3.12.1 Υπολογισμός SoC με Χρήση Αλγορίθμου Μέτρησης Κουλόμπ(Coulomb Counting)	68
3.12.2 Μετάφραση του Αλγόριθμου σε Διάγραμμα Ροής(Flowchart)	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου της μπαταρίας Ιόντων Λιθίου στο Matlab/Simulink	72
4.1 Περιγραφή Μοντέλου	72
(Πίνακας 9: Σύγκριση SoC για δύο διαφορετικές προσομοιώσεις.)	75
4.2 Γραφήματα Ρευμάτων-Τάσεων-SOC	76
4.2.1 Γραφήματα Μικρών Αποκλίσεων στο SOC	76
4.2.2 Γραφήματα Μεγάλων Αποκλίσεων στο SOC.....	78
4.3 Συσχέτιση Ρεύματος-Τάσης-SOC Κάθε Κελιού.....	80
4.4 Συμπεράσματα Βάσει Γραφημάτων.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Πρωτόκολλα Επικοινωνιών.....	86

5.2 Πρωτόκολλο Σειριακής Επικοινωνίας (SPI).....	86
5.3 Πρωτόκολλο Επικοινωνίας Controller Area Network (CAN bus)	87
5.4 Ασύρματη Εξέλιξη Των Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας Οχημάτων	88
5.4.1 Ασύρματη Εξισορρόπηση Ενέργειας Μπαταριών (wBMS).....	89
5.4.2 Σύγκριση Κυκλωμάτων BMS vs wBMS	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^θ : Cloud και Cloud Computing	91
6.2 Ψηφιακό Δίδυμο	91
6.3 Συνδυασμός Τεχνολογιών Cloud, IoT και Ψηφιακού Δίδυμου	91
6.2.1 Από το Φυσικό Επίπεδο στο Ψηφιακό Δίδυμο	92
6.2.2 Χρήση Cloud και IoT.....	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^θ : Πειραματικό Μέρος	95
7.2 Πειραματική Διάταξη	95
7.3 Εκφόρτιση Συστοιχίας Σε Ωμικά Φορτία	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^θ : Σύνοψη Σχεδίασης Συστήματος.....	100
8.2 Πλεονεκτήματα Σχεδίασης	100
8.3 Μελλοντικές Αναβαθμίσεις Και Εξέλιξη	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	102
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	106
Ολοκληρωμένο Κύκλωμα L9963E	106
Χαρακτηριστικά Πλακέτας BMS Evaluation Board - L9963	108
Προδιαγραφές Μικροελεγκτή Πλακέτας BMS SPC574S64E3	109
Σχεδιαγράμματα Κυκλωμάτων Evaluation Board - L9963E	110
Πλακέτα Τυπωμένου Κυκλώματος Evaluation Board - L9963 (4 Layers).....	115

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

(ΕΙΚΟΝΑ 1: THOMAS EDISON 1912 ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΕΙ ΤΟ ΠΡΩΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ.[1])	18
(ΕΙΚΟΝΑ 2: FERDINAND PORSCHE ΟΔΗΓΕΙ ΤΟ ΠΡΩΤΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ ΜΕ ΟΝΟΜΑ LOHNER-PORSCHE MIXTE [1].)	19
(ΕΙΚΟΝΑ 3: TESLA MODEL 3 [3])	20
(ΕΙΚΟΝΑ 4: ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟΥΣ ΔΥΟ ΒΑΣΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ(EVS) Α) HEV B) BEV. [6]).....	21
(ΕΙΚΟΝΑ 5: ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΩΝ PEV ΜΙΑΣ ΠΗΓΗΣ. (Α) ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ BEV (Β) ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ FCEV. [5]).....	22
(ΕΙΚΟΝΑ 6: (Α) ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΚΑΙ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ(SC) (Β) ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΚΑΙ ΣΦΟΝΔΥΛΟΥ (C) ΠΑΡΑΛΛΗΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ(HACCS) (C1) ΣΕ ΣΕΙΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ(HACCS) (D) ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ(FC) (E) ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ(SC). [5]).....	23
(ΕΙΚΟΝΑ 7: (Α) ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ(FC), ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΚΑΙ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ(SC) (Β) ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ(FC),ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ(SC) ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΑΝΕΑ (PV CELLS) (C) ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ, (SC) ΚΑΙ (PV CELLS) (D) ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ, (FC) ΚΑΙ (SC). [5]).....	24
(ΕΙΚΟΝΑ 8: ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΒΑΣΕΙ ΠΡΟΤΥΠΩΝ. [7]).....	25
(ΕΙΚΟΝΑ 9: ΠΡΟΤΥΠΑ ΓΙΑ ΘΥΡΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ. [6])	26
(ΕΙΚΟΝΑ 10: ΠΡΟΤΥΠΑ ΓΙΑ ΡΕΥΜΑΤΟΔΟΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ. [6])	26
(ΕΙΚΟΝΑ 11: ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ EV ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥΣ. [6])	27
(ΕΙΚΟΝΑ 12: ΣΧΗΜΑ ΜΙΑΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ.[11])	29
(ΕΙΚΟΝΑ 13: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ(LI-ION) [20])	30
(ΕΙΚΟΝΑ 15: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ ΑΝΟΔΟΥ.[11])	32
(ΕΙΚΟΝΑ 16: ΒΑΡΟΜΕΤΡΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ RAGONE ΑΠΟ ΠΟΛΛΕΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΕ EV.[19])	34
(ΕΙΚΟΝΑ 17: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΦΘΟΡΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ.[21]).....	37
(ΕΙΚΟΝΑ 18: ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.[15])	38
(ΕΙΚΟΝΑ 19: ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΕ ΣΕΙΡΑ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΑΣΗΣ.[23])	39
(ΕΙΚΟΝΑ 20: ΣΥΝΔΕΣΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΧΩΡΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.[23])	39
(ΕΙΚΟΝΑ 21: ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΥΠΑΡΧΟΥΝ ΠΡΟΚΕΙΜΕΝΟΥ ΝΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΟΥΜΕ ΣΥΣΤΟΙΧΙΕΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ (Π.Χ 300 ΚΕΛΙΑ). ΟΝΟΜΑΖΟΝΤΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΕΛΙΩΝ(PCM) ΚΑΙ ΣΕ ΣΕΙΡΑ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΕΛΙΩΝ(SCM)[24]).	42
(ΕΙΚΟΝΑ 22: ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. [24])	43
(ΕΙΚΟΝΑ 23: ΚΥΚΛΩΜΑ ΔΙΑΙΡΕΤΗ ΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ NTC. [24])	45

(ΕΙΚΟΝΑ 24: ΤΥΠΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑ BMS ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΚΑΝΕΙ ΧΡΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ CURRENT SHUNT [24])	48
(ΕΙΚΟΝΑ 25: ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ ΡΕΥΜΑΤΟΣ CURENNT SHUNTS ΥΨΗΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ. RIEDON.COM. AVAILABLE AT: HTTPS://RIEDON.COM/RESISTORS/VIEW/DC-CURRENT-SHUNT-RS [ACCESSED 14 APR. 2021].)	48
(ΕΙΚΟΝΑ 26: ΤΥΠΙΚΗ ΕΙΚΟΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ. HALL EFFECT [ONLINE]. AVAILABLE AT: HTTPS://WWW.HIOKI.COM/FILE/CMW/HOUSEGUIDEDETAILEN/201/PDF1/?ACTION=BROWSE R [ACCESSED 15 APR. 2021])......	49
(ΕΙΚΟΝΑ 27: ΤΥΠΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΝΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ CT. BASIC ELECTRONICS TUTORIALS. (2018). CURRENT TRANSFORMER BASICS AND CURRENT TRANSFORMER THEORY. [ONLINE] AVAILABLE AT: HTTPS://WWW.ELECTRONICS-TUTORIALS.WS/TRANSFORMER/CURRENT-TRANSFORMER.HTML.).....	50
(ΕΙΚΟΝΑ 28: ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΗΝΙΟΥ ROGOWSKI.....	51
WWW.GOOGLE.COM. (N.D.). REDIRECT NOTICE. [ONLINE] AVAILABLE AT: HTTPS://WWW.GOOGLE.COM/URL?Q=HTTPS://WWW.HIOKI.COM/EN/PRODUCTS/LISTUSE/?CATEGORY%3D17&SA=D&SOURCE=EDITORS&UST=1621085221344000&USG=AOVVAW2ECPC SFXGTDLBHVEE7QZYD [ACCESSED 15 MAY 2021])......	51
(ΕΙΚΟΝΑ 29: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΙΣΟΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.).....	53
(ΕΙΚΟΝΑ 30: ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ, ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΥΚΝΩΤΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ. [31]).....	54
(ΕΙΚΟΝΑ 31: ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ, ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΝΟΣ ΠΥΚΝΩΤΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ. [31]).....	54
(ΕΙΚΟΝΑ 32: ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ, ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΝΟΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ. [31]).....	55
(ΕΙΚΟΝΑ 33: ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΚΕΛΙΩΝ, ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΗΝΙΩΝ Α) ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΜΟΝΗ Η ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΜΕΤΑΓΩΓΗ ΑΝΑ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ Β) ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΟΝΟΥ ΕΠΑΓΩΓΕΑ. [31]).....	55
(ΕΙΚΟΝΑ 34: ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΜΟΝΗΣ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ. [31]).....	56
(ΕΙΚΟΝΑ 35: ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ČUK. [31]).....	56
(ΕΙΚΟΝΑ 36: ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ BUCK/BOOST ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. [31])	57
(ΕΙΚΟΝΑ 37: ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ FLYBACK ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. [31])	57
(ΕΙΚΟΝΑ 38: ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ RAMP ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. [31])	58
(ΕΙΚΟΝΑ 39: ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ FULL-BRIDGE ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. [31])	58
(ΕΙΚΟΝΑ 40: ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ QUASI-RESONANT ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. [31])	59
(ΕΙΚΟΝΑ 41: Α) ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ CURRENT SHUNTS ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΤΑ ΚΕΛΙΑ, Β) ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ ΜΕΘΟΔΟ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ. [31]).....	59
(ΕΙΚΟΝΑ 42: ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ 2RC ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ [28].)	65

(ΕΙΚΟΝΑ 43: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ SOC ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΟΥΛΟΜΠ . [29])......	71
(ΕΙΚΟΝΑ 44: ΚΥΚΛΩΜΑ ΚΕΛΙΩΝ, ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ, MOSFERS ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΤΩΝ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΟΣ).	72
(ΕΙΚΟΝΑ 45: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΟΥ BMS ΠΟΥ ΔΕΧΕΤΑΙ ΩΣ ΕΙΣΟΔΟ ΤΟ SOC ΚΑΘΕ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΧΕΙ ΩΣ ΕΞΟΔΟ ΤΗΝ ΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΟΥ ΚΑΘΕ MOSFET ΠΡΟΚΕΙΜΕΝΟΥ ΝΑ ΚΑΝΕΙ ΤΗΝ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΣΕ ΚΑΘΕ ΚΕΛΙ)......	73
(ΕΙΚΟΝΑ 46: ΜΕΤΡΗΤΕΣ ΤΑΣΕΩΝ, SOC ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΜΑΣ ΠΑΡΕΧΟΥΝ ΤΙΣ ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΜΑΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ).	73
(ΕΙΚΟΝΑ 47: ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΟΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ INITIAL STATE-OF-CHARGE ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK).....	74
(ΕΙΚΟΝΑ 48: ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΟΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ INITIAL STATE-OF-CHARGE ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK).....	76
(ΕΙΚΟΝΑ 49: ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΟΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ INITIAL STATE-OF-CHARGE ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK).....	76
(ΕΙΚΟΝΑ 50: ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΟΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ INITIAL STATE-OF-CHARGE ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK).....	77
(ΕΙΚΟΝΑ 51: ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΟΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ INITIAL STATE-OF-CHARGE ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK).....	78
(ΕΙΚΟΝΑ 52: ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΟΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ INITIAL STATE-OF-CHARGE ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK).....	79
(ΕΙΚΟΝΑ 53: ΧΕΙΡΟΚΙΝΗΤΟΣ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ INITIAL STATE-OF-CHARGE ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ SIMULINK).....	80
(ΕΙΚΟΝΑ 54: CELL1).....	81
(ΕΙΚΟΝΑ 55: CELL2).....	81
(ΕΙΚΟΝΑ 56: CELL3).....	82
(ΕΙΚΟΝΑ 57: CELL4).....	82
(ΕΙΚΟΝΑ 58: CELL5).....	83
(ΕΙΚΟΝΑ 59: CELL6).....	83
(ΕΙΚΟΝΑ 60: ΤΥΠΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΟΥ ΓΡΑΦΤΗΚΕ ΣΤΟ BLOCK CONTROL ALGORITHM ΣΤΟ SIMULINK ΓΙΑ ΝΑ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΚΑΤΑΛΛΗΛΩΣ ΤΑ MOSFETS ΓΙΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ).	85
(ΕΙΚΟΝΑ 61: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ SPI ΜΕ ENA MASTER KAI 3 SLAVES. WIKIPEDIA. (2021). SERIAL PERIPHERAL INTERFACE. [ONLINE] AVAILABLE AT: HTTPS://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/SERIAL_PERIPHERAL_INTERFACE#/MEDIA/FI LE:SPI_THREE_SLAVES.SVG [ACCESSED 29 APR. 2021].)	86
(ΕΙΚΟΝΑ 62: ΤΥΠΙΚΗ ΣΥΝΔΕΣΗ KOMBOY CAN BUS. WIKIPEDIA. (2021). CAN BUS. [ONLINE] AVAILABLE AT: HTTPS://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/CAN_BUS#/MEDIA/FI LE:CAN_NODE.PNG [ACCESSED 29 APR. 2021].)	87
(ΕΙΚΟΝΑ 63: ΤΥΠΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΚΤΥΟΥ CAN BUS ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ, ΜΕ ΥΠΟΔΙΚΤΥΑ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΣΕ ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΚΟΜΒΟ ΚΑΙ ΚΑΤΑΛΗΓΟΥΝ ΣΕ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΟ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ ΕΝΔΕΙΞΕΩΝ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ. HUYBRECHTS, T., VANOMMEL, Y., BLONROCK, D., VAN BAREL, G. AND HELLINCKX, P. (2017). AUTOMATIC REVERSE ENGINEERING OF CAN BUS DATA USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES. ADVANCES ON P2P, PARALLEL, GRID, CLOUD AND INTERNET COMPUTING, [ONLINE] PP.751–761.	

AVAILABLE AT: HTTPS://LINK.SPRINGER.COM/CHAPTER/10.1007/978-3-319-69835-9_71 [ACCESSED 13 DEC. 2019].)	88
(ΕΙΚΟΝΑ 64: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΤΑΙΡΕΙΑ HMIAGΩΓΩΝ TEXAS INSTRUMENTS. ROOS, G. (2021). TI LAUNCHES ASIL-D COMPLIANT WIRELESS BATTERY MANAGEMENT SYSTEM. [ONLINE] ELECTRONIC PRODUCTS.	
AVAILABLE AT: HTTPS://WWW.ELECTRONICPRODUCTS.COM/TI-LAUNCHES-ASIL-D- COMPLIANT-WIRELESS-BATTERY-MANAGEMENT-SYSTEM/# [ACCESSED 27 MAY 2021].)	.89
(ΕΙΚΟΝΑ 65: ΤΥΠΙΚΗ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ BMS ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ THN TEXAS INSTRUMENTS.)	90
(ΕΙΚΟΝΑ 66: ΤΥΠΙΚΗ ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ WBMS ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ THN TEXAS INSTRUMENTS.)	90
(ΕΙΚΟΝΑ 67: ΣΧΕΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ CLOUD BMS ΠΟΥ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΕΞΙ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ: 1) ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ, 2) ΣΥΣΤΗΜΑ BMS-SLAVE Ο ΟΠΟΙΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΙΑ, 3) ΣΥΣΤΗΜΑ ΙΟΤ ΟΠΟΥ ΣΥΛΛΕΓΕΙ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ 4) ΣΥΣΤΗΜΑ CLOUD ΓΙΑ ΝΑ ΑΠΟΦΗΚΕΥΤΟΥΝ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ, 5) ΣΥΣΤΗΜΑ API ΠΟΥ ΚΑΝΕΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΓΙΑ ΝΑ ΤΑ ΜΕΤΑΒΙΒΑΣΕΙ ΣΕ ΚΩΔΙΚΑ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΑ οποια χρησιμοποιούνται από το 6) ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ UI ΓΙΑ ΝΑ ΤΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΟΥΝ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΤΟΝ ΤΕΛΙΚΟ ΧΡΗΣΤΗ. [17]).	92
(ΕΙΚΟΝΑ 68: ΚΥΒΕΡΝΟ-ΦΥΣΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΟΛΑ ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΑΠΑΡΤΙΖΟΥΝ ΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΤΟΥ ΔΙΔΥΜΟ. [41].	93
(ΕΙΚΟΝΑ 69: ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΙΘΑΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΣΥΛΛΕΓΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΕΝΑ BMS ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΟΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΕΞΟΔΟΥ. [41]).	93
(ΕΙΚΟΝΑ 70: ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ STSW-L9963 ΤΗΣ STMICROELECTRONICS[36]).	94
(ΕΙΚΟΝΑ 72: BREAKOUT BOARD ΣΕ ΔΙΑΤΡΗΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ).	96
(ΕΙΚΟΝΑ 73: ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΣΕΙΡΙΑΚΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ L9963E ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ SPC574S64E3.).	96
(ΕΙΚΟΝΑ 74: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.)	97
(ΕΙΚΟΝΑ 75: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗ ΜΕ BUCK/BOOST CONVERTER ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΟ 3 LEDS ΩΜΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ 2.5 WATTS.)	98
(ΕΙΚΟΝΑ 76: ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗ ΜΕ BUCK/BOOST CONVERTER ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΟ HEATBED ΑΠΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΕΚΤΥΠΩΤΗ ΩΜΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ 300 WATTS.)	99

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

(ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΤΥΠΙΚΕΣ ΧΗΜΙΚΕΣ ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ.[11]).....	31
(ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ - ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ PANR 103395-408).	46
(ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ STEINHART – HART).....	47
(ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ PANR 103395-408).....	47
(ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΡΕΥΜΑΤΟΣ. [30]).....	52
(ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΙΣΟΣΤΑΘΜΙΣΗΣ. [8],[9],[31]).....	63
(ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΤΑ ΤΡΙΑ ΒΑΣΙΚΑ ΕΙΔΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ BMS. [27])	64
(ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΣΥΓΚΡΙΣΗ SOC ΓΙΑ ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ.).....	75

AKΡΩΝΥΜΙΑ

ADC	Analog to Digital Converter
API	Application Programming Interface
BAT	Battery
BEEP	Battery Evaluation and Early Prediction
BEV	Battery Electric Vehicle
BLE	Bluetooth Low Energy
BMS	Battery Management System
CAN	Controller Area Network
Cd	Cadmium
CT	Current Transformer
Cu	Copper
DER	Distributed Energy Resource
DOD	Depth of Discharge
ECM	Equivalent Circuit Model
ECM	Equivalent Circuit Model
ECU	Electronic Control Unit
EMI	Electromagnetic interference
EV	Electric Vehicle
EVGI	Electric Vehicle Grid Integration
FCEV	Fuel Cell Stack Electric Vehicle
GAN	Gallium Nitride
HACC	Hydraulic Accumulator
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HPF	High Pass Filter
IC	Integrated Circuit
ICE	Internal Combustion Engines
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IOT	Internet Of Things
LCO	Lithium Cobalt Oxide
LFP	Lithium Ferro Phosphate
LIB	Lithium-Ion Battery
LiMO ₂	Metal Oxide
LixC ₆	Lithic Coal
LMO	Lithium Manganese Oxide
NCA	Nickel Cobalt Aluminium
NEC	National Electric Code
NFPA	National Fire Protection Association
Ni	Nickel
NMC	Nickel Manganese Cobalt
NTC	Negative Temperature Coefficient
OCV	Open Circuit Voltage
Pb	Lead

PCM	Parallel Cell Module
PEV	Pure Electric Vehicle
PV	Photovoltaic
PWM	Pulse Width Modulation
SAE	Society of Automotive Engineers
SC	Supercapacitor
SCM	Serial Cell Module
Si	Silicon
SIC	Silicon Carbide
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
SOL	State of Life
SOP	State of Power
SPI	Serial Peripheral Interface
TMS	Thermal Management System
UI	User Interface
UL	Underwriters Laboratories
wBMS	Wireless Battery Management System
Zn	Zinc

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Εξέλιξη των Ηλεκτρικών Αυτοκινήτων

Ηλεκτρικό όχημα (EV) ονομάζεται το σύστημα εκείνο το οποίο χρησιμοποιεί έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες για την κίνηση του. Η ενέργεια στους ηλεκτρικούς κινητήρες παρέχεται κατά κύριο λόγο από μπαταρίες οι οποίες αποθηκεύουν χημική ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η ιστορία των πρώτων ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων ξεκίνησε περίπου στα μέσα του 1828 και οφείλεται σε πολλούς ανθρώπους. Συγκεκριμένα ο Anyos Jedlik δημιούργησε ένα πρώιμο πρωτότυπο του ηλεκτρικού κινητήρα και τον χρησιμοποίησε σε ένα μικρής κλίμακας ηλεκτρικό όχημα. Μεταξύ των ετών 1832-1839 ο Robert Anderson εφευρίσκει ένα όχημα το οποίο και αυτό κινηθεί με την χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Την συνέχεια έδωσαν το 1835 ο Καθηγητής Sibrandus Stratingh και ο βοηθός του Christopher Becker οι οποίοι έφτιαξαν ένα ηλεκτροκίνητο όχημα, το οποίο είχε ως μέσω τροφοδοσίας μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Αργότερα ο William Morrison το 1889 ο οποίος και έφερε το πρώτο ηλεκτροκίνητο αυτοκίνητο στις Ηνωμένες Πολιτείες με αποτέλεσμα να εξάψει το ενδιαφέρον στους Αμερικανούς πολίτες. Μάλιστα η προτίμηση του κοινού πρός τα ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα είχε αρχίσει ήδη να γίνεται ορατή διότι είχαν εύκολη οδήγηση και ήταν αθόρυβα σε σχέση με εκείνα της εσωτερικής καύσης και ατμομηχανών της εποχής. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα στα τέλη του αιώνα το ένα τρίτο της αγοράς αυτοκινήτων της Αμερικάνικης αγοράς να αποτελείται από ηλεκτροκίνητα. Το 1901 ο διάσημος εφευρέτης Thomas Edison μαζί και με άλλους επιστήμονες προσπαθούν να βρουν τρόπους της βελτίωσης της μπαταρίας των οχημάτων (Εικόνα 1)[1]. Σειρά είχε ο Ferdinand Porsche (1901) ιδρυτής της διάσημης Sport αυτοκινητοβιομηχανίας, ο οποίος κατασκεύασε το πρώτο υβριδικό ηλεκτρικό όχημα, που αποθήκευε την ηλεκτρική ενέργεια σε μπαταρίες και είχε και κινητήρα εσωτερικής καύσης βενζίνης (Εικόνα 2)[2]. Η επόμενη δεκαετία ήταν λαμπρή για τα ηλεκτροκίνητα οχήματα με παραδείγματα μαζικής παραγωγής όπως το Μοντέλο T παραγωγής της εταιρείας Ford, οι πωλήσεις του οποίου ανέρχονταν στις ένα εκατομμύριο, αριθμό τεράστιο για την εποχή. Το έτος 1935 είναι το τέλος της λαμπρής πρώτης εποχής ηλεκτροκίνητων οχημάτων, διότι με την ανακάλυψη νέων πηγών πετρελαίου στο Τέξας είχε ως αποτέλεσμα την μείωση του κόστους βενζίνης ως άμεσο αντίκτυπο τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα να είναι η πλέον μοναδική προτίμηση της αγοράς [1]-[2].



(Εικόνα 1: Thomas Edison 1912 παρουσιάζει το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο. [1])



(Εικόνα 2: Ferdinand Porsche οδηγεί το πρώτο υβριδικό αυτοκίνητο με όνομα Lohner-Porsche Mixte [1].)

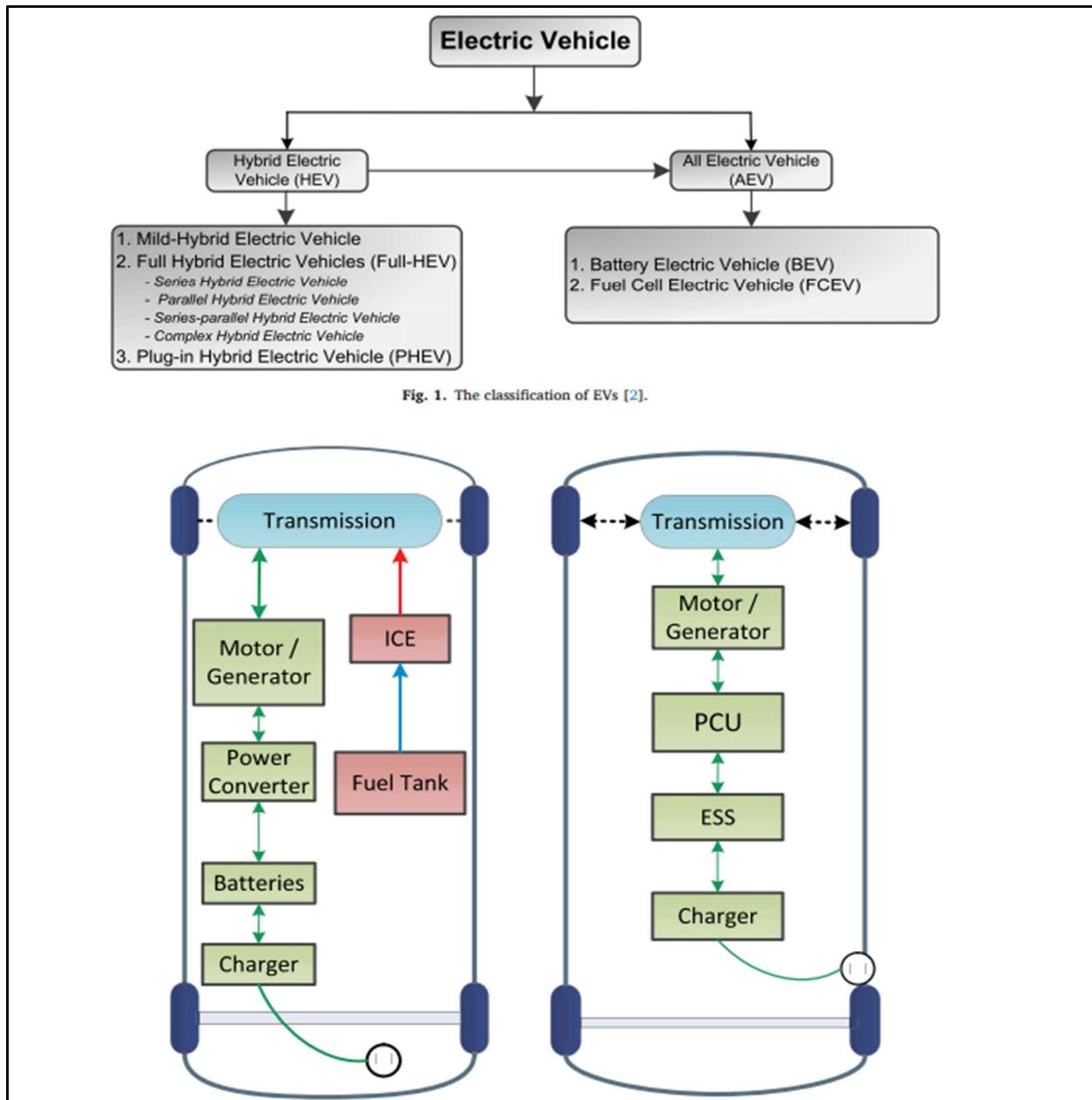
Στην διάρκεια του 1973 πολλές μεγάλες βιομηχανίες αυτοκινήτων ξεκινούν να δείχνουν το ενδιαφέρον τους για χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας στα αυτοκίνητα. Ένα ιδιαίτερα επιτυχημένο μοντέλο αποτελεί το Sebring-Vanguard's CitiCar όπου ο αριθμός πωλήσεων του ανέρχεται σε περισσότερες από δύο χιλιάδες με διάρκεια μπαταρίας ογδόντα με ενενήντα χιλιομέτρων. Η δημοτικότητα αυτού του μοντέλου καθιστά την εταιρεία το 1975 ώς την έκτη μεγαλύτερη στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το τέλος της δεύτερης εποχής συμβαίνει περίπου το 1980 όπου η αγορά αποφασίζει ότι το υψηλό κόστος και οι χαμηλές αποδόσεις σε αποστάσεις δεν μπορούν να ανταγωνιστούν τα οχήματα εσωτερικής καύσης. Η ουσιαστική ανάκαμψη των ηλεκτροκίνητων αμαξών ξεκινάει το 2006, όπου και μία νεοφυής επιχείρηση με το όνομα Tesla ξεκινάει να παρουσιάζει ένα πρωτότυπο αγωνιστικό μοντέλο το οποίο μπορεί να διανύσει πάνω από 250 χιλιόμετρα. Σημαντικός σταθμός στην ιστορία του ηλεκτροκίνητου οχήματος αποτελεί επίσης το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο υβριδικό όχημα της General Motors εν ονόματι Chevy Volt το οποίο και επαναφορτίζεται σε σταθμούς φόρτισης. Στα τέλη του 2012 είναι αισθητή η μείωση της τιμής των υβριδικών οχημάτων και αυτό ωθήθηκε από τις ανακαλύψεις στο τομέα της μπαταρίας τις οποίες και είχε κάνει το Τμήμα Ενέργειας. Αυτό είχε ως άμεσο αποτέλεσμα η αγορά να γίνει πιο ελκυστική για μεγαλύτερο κοινό. Από το 2016 μέχρι και σήμερα εταιρείες όπως η Tesla, Chevrolet, Nissan, Hyundai και Renault έχουν καταφέρει να αγγίξουν το 3% της συνολικής αγοράς αυτοκινήτων. Αριθμός που αυξάνεται ραγδαία αναφορικά το 2019 πουλήθηκαν 2.1 εκατομμύρια ηλεκτροκίνητα οχήματα παγκοσμίως από τα 7.2 εκατομμύρια. Η τεχνολογία αυτή λόγω του περιβαλλοντικού της αποτυπώματος σε σχέση με τα οχήματα εκπομπής ρύπων, καθώς και η αύξηση τόσο των αποδόσεων όσο και η μείωση κόστους θα αποτελέσουν παράγοντες οι οποίοι θα οδηγήσουν τα επόμενα χρόνια σε ακόμα πιο ραγδαία αύξηση των ηλεκτροκίνητων οχημάτων [1].



(Εικόνα 3: Tesla Model 3 [3])

1.2 Είδη Οχημάτων

Τα συμβατικά οχήματα τα οποία χρησιμοποιούν μόνο κινητήρα εσωτερικής καύσης(ICE) καταναλώνουν ορυκτά καύσιμα και εκπέμπουν αέρια όπως οξείδια του άνθρακα, υδρογονάνθρακες και οξείδια του αζώτου, όπου είναι και τα πιο επικίνδυνα [4],[5]. Για να ξεπεραστούν τα ζητήματα της περιβαλλοντικής και ενεργειακής κρίσης αναπτύχθηκαν τα υβριδικά οχήματα(HEVs) τα τελευταία χρόνια. Οι τεχνολογίες των HEVs παρέχουν βελτίωση της οικονομίας καυσίμων και επιτρέπουν στα HEV να εκλύουν στο περιβάλλον λιγότερες εκπομπές σε σύγκριση με τον συμβατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE), ωστόσο τα HEVs δεν μπορούν να επιλύσουν πλήρως τα προαναφερθέντα θέματα. Έτσι, τα HEVs είναι μόνο ένα προσωρινό βήμα για την ανάπτυξη από ICE σε καθαρά ηλεκτρικά οχήματα (PEVs). Για αυτό το κύριο λόγο είναι σημαντικό να αναπτυχθούν PEVs. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μπορούν όπως αντιλαμβανόμαστε να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες τα Υβριδικά(HEVs) και τα Ηλεκτρικά(EVs) , τα EVs είναι επανδρωμένα μόνο με ηλεκτρικούς κινητήρες. Η ροή ισχύος τους και τα βασικά τους χαρακτηριστικά μπορούμε να τα δούμε στην (Εικόνα 4).

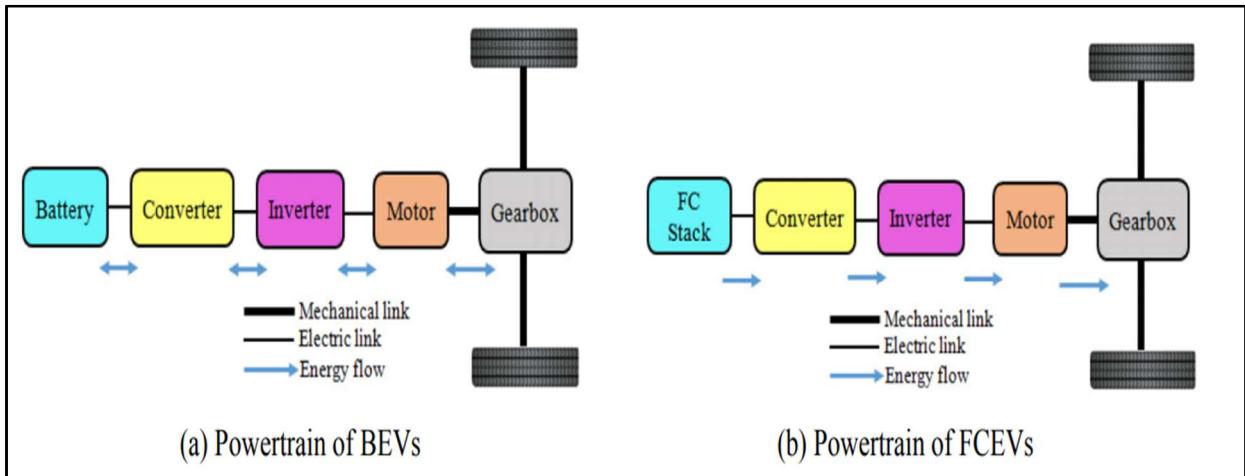


(Εικόνα 4: Τοπολογία και ροή ισχύος στους δύο βασικούς τύπους Ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) a) HEV
b) BEV. [6])

1.3 Χαρακτηριστικά και Τοπολογίες Ηλεκτρικών και Υβριδικών Οχημάτων

1.3.1 Μονής Πηγής PEVs

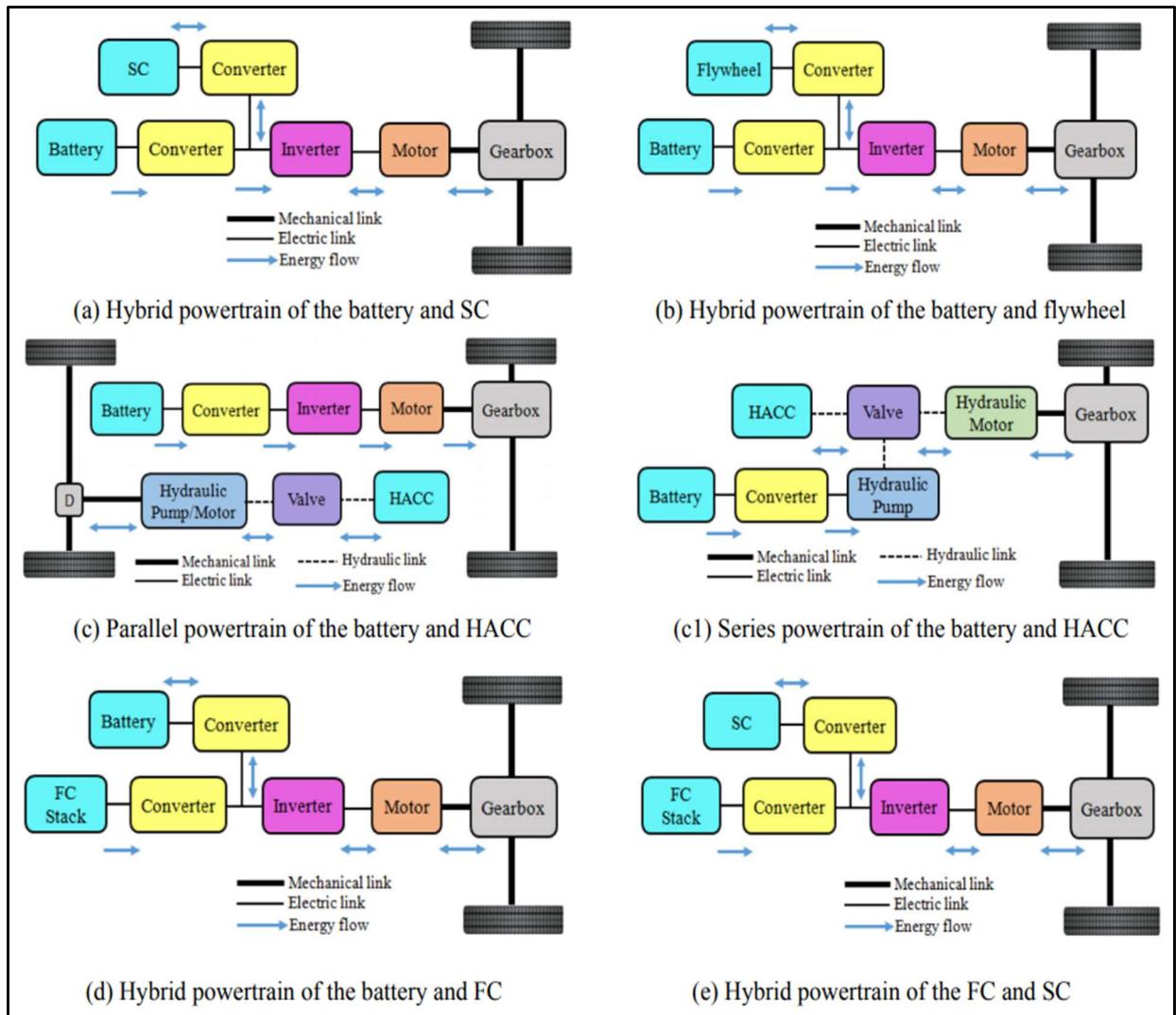
Τα ηλεκτρικά οχήματα μονής πηγής(BEV) έχουν μόνο μία πηγή τροφοδοσίας ενέργειας για να κινήσουν το όχημα. Ωστόσο έχουν πολύ περιορισμένο εύρος στα χιλιόμετρα που μπορούν να διανύσουν (Εικόνα 5.a). Ένα άλλο είδος PEV είναι το FCEV το οποίο κάνει χρήση δεξαμενής υδρογόνου, μετατροπέα ισχύος και ηλεκτρικού κινητήρα (Εικόνα 5.b)[3]. Η δεξαμενή υδρογόνου είναι το κύριο στοιχείο τροφοδοσίας του οχήματος και αποτελεί ανταγωνιστική λύση, διότι λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες, καθώς και έχει υψηλή πυκνότητα ισχύος.[5]



(Εικόνα 5: Διαμορφώσεις συστήματος ισχύος των PEV μίας πηγής. (a) Σύστημα μετάδοσης κίνησης BEV
(b) Σύστημα μετάδοσης κίνησης FCEV. [5])

1.3.2 Διπλών Πηγών PEVs

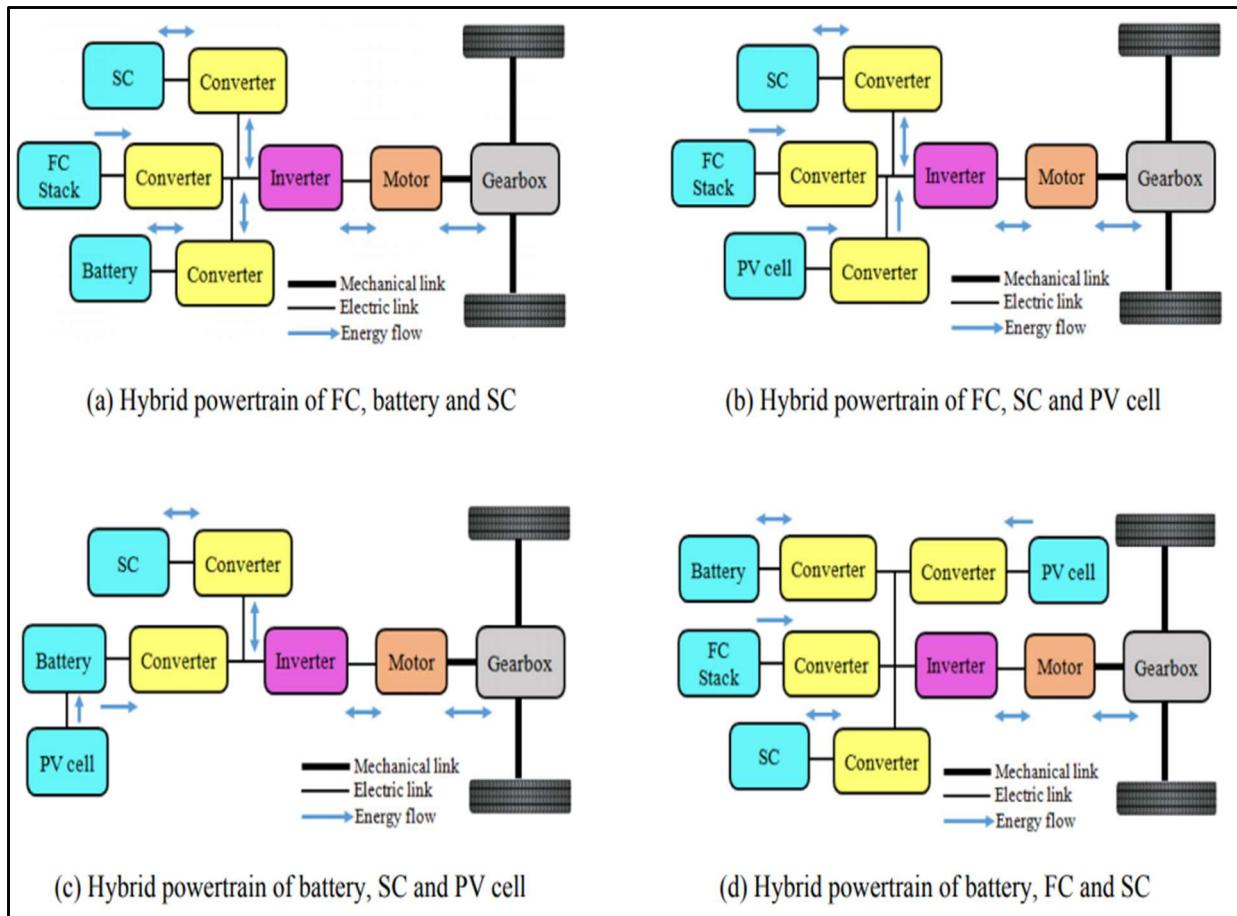
Τα διπλής πηγής ηλεκτρικά οχήματα συνδυάζουν δύο διαφορετικές πηγές ενέργειας προκειμένου να καλύψουν τα μειονεκτήματα που έχουν δημιουργήσει με τη χρήση μόνο μίας. Υπάρχουν πληθώρα συνδυασμών διπλών πηγών στην βιβλιογραφία. Κάποια από αυτά είναι συνδυασμοί μπαταριών και κυψελών καυσίμου ή χρήση γεννήτριας [5]. Στην παρακάτω (Εικόνα 6) παρατίθενται κάποιες από αυτές τις τοπολογίες.



(Εικόνα 6: (a) Υβριδικό σύστημα μετάδοσης κίνησης με χρήση μπαταριών και υπερπυκνωτών(SC) (b) Υβριδικό σύστημα μετάδοσης κίνησης με χρήση μπαταριών και σφρόνδυλου (c) Παράλληλο σύστημα μετάδοσης κίνησης με χρήση μπαταριών και υδραυλικών συσσωρευτών(HACCs) (c1) Σε σειρά σύστημα μετάδοσης κίνησης με χρήση μπαταριών και υδραυλικών συσσωρευτών(HACCs) (d) Υβριδικό σύστημα κίνησης της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου(FC) (e) Υβριδικό σύστημα μετάδοσης κίνησης της κυψέλης καυσίμου και των υπερπυκνωτών(SC). [5])

1.3.3 Πολλαπλών Πηγών PEVs

Τα ηλεκτρικά οχήματα πολλαπλών πηγών είναι εξοπλισμένα με τουλάχιστον τρεις πηγές ενέργειας. Η ενσωμάτωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να μπορούν να εκπληρώσουν πλήρως τις ενεργειακές απαιτήσεις του κινητήρα και να διευκολύνουν την δυναμική απόδοση του συστήματος [5]. Επιπρόσθετα οι πολλαπλές πηγές καθιστούν το σύστημα πιο αποτελεσματικό και ευέλικτο. Ενδεικτικά μπορούμε να δούμε μερικούς συνδυασμούς στην (Εικόνα 7).



(Εικόνα 7: (a) Υβριδικό σύστημα μετάδοσης κίνησης με χρήση κυψέλης καυσίμου(FC), μπαταριών και υπερπυκνωτών(SC) (b) Υβριδικό σύστημα μετάδοσης κίνησης με χρήση κυψέλης καυσίμου(FC), υπερπυκνωτών(SC) και φωτοβολταϊκών πάνελ (PV cells) (c) Υβριδικό σύστημα μετάδοσης κίνησης με χρήση μπαταρίας, (SC) και (PV cells) (d) Υβριδικό σύστημα μετάδοσης κίνησης με χρήση μπαταρίας, (FC) και (SC). [5])

1.4 Πρότυπα και Προδιαγραφές Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων(EVs) δημιουργησε νέες διαστάσεις στον τομέα των μεταφορών και στην βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας. Προκειμένου να λειτουργήσει ομαλά αυτή η νέα τεχνολογία σε όλο το κόσμο, είναι απαραίτητο να θεσπιστούν και να εγκαθυδριθούν πρότυπα από τους παγκόσμιους ρυθμιστικούς φορείς. Αυτά τα πρότυπα θα αφορούν όλες τις πτυχές του ηλεκτρικού οχήματος καθώς και το σύστημα που το περιβάλλει. Μπορούμε λοιπόν να τα χωρίσουμε σε τρεις κατηγορίες: 1) Πρότυπα εξαρτημάτων, 2) Πρότυπα συστημάτων ηλεκτρικής οδικής ολοκλήρωσης (EVGI), 3) Πρότυπα ασφαλείας [6]. Τα πρότυπα των συστημάτων ηλεκτρικής οδικής ολοκλήρωσης αφορούν την διαδικασία φόρτισης/εκφόρτισης με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά την διάρκεια φόρτισης/εκφόρτισης από το δίκτυο το EV συμπεριφέρεται σαν ενεργειακός πόρος (DER). Έτσι το όχημα πρέπει να ακολουθεί και το πρότυπο (EVGI) καθώς και το (DER). Οι κύριοι οργανισμοί που παρέχουν αυτά τα πρότυπα διασύνδεσης είναι το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) καθώς και τα Εργαστήρια Ασφαλειών (UL). Σε αντίθεση τα πρότυπα ασφαλείας και ενσωμάτωσης του EV τα πρότυπα που αφορούν το δίκτυο ορίζονται από πληθώρα οργανισμών. Με τους πιο σημαντικούς να είναι η Εθνική Ένωση Πυροπροστασίας (NFPA) και ο Εθνικός Ηλεκτρικός Κώδικας (NEC), οι οποίοι επικεντρώνονται στα μέτρα ασφαλείας. Στις Ηνωμένες Πολιτείες γίνεται χρήση των πρότυπων SAE και IEEE σε αντίθεση με την Ευρώπη η οποία χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο το πρότυπο IEC. Η Ιαπωνία έχει θεσπίσει το δικό της ξεχωριστό πρότυπο που ονομάζεται CHAdeMO και η Κίνα το Guobiao [6].

1.4.1 Πρότυπα Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο κάθε χώρα τείνει να χρησιμοποιεί δικά της πρότυπα. Μία από τις πιο σημαντικές διαφορές όλων αυτών των προτύπων είναι οι θύρες σύνδεσης του οχήματος για φόρτιση/εκφόρτιση. Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι την παρούσα στιγμή η αγορά των EVs παρέχει στους καταναλωτές τρεις κύριους τρόπους φόρτισης οι οποίοι έχουν θεσπιστεί βάση του χρόνου που μπορούν να φορτίσουν ένα EV (Εικόνα 8) [7]. Στις παρακάτω (Εικόνες 9, 10) παρατίθενται οι περισσότερες διαφορετικές θύρες καθώς και οι ρευματοδότες οι οποίοι υπάρχουν στην αγορά, καθώς και τα πρότυπα που τους διέπουν.[6] Οι κατασκευαστές τα τελευταία χρόνια προσπαθούν να συμφωνήσουν σε ένα κοινό πρότυπο θύρας-ρευματοδότη προκειμένου να υπάρχει συνδεσιμότητα κοινή για όλα τα οχήματα σε όλες τις ηπείρους. Εκτός από τις θύρες, τα πρότυπα παίζουν σημαντικό ρόλο στο σύστημα ηλεκτρικής οδικής ολοκλήρωσης στο οποίο συμμετέχουν πολλά πρότυπα (Εικόνα 11). [6]

GLOBAL EV POWER LEVEL CLASSIFICATION AND PLUG TYPES				
SAE J1772 Level	Power Rating [kW]	US	Plug Type	
		SAE J1772 Type 1	Europe	China
AC Level-1	3.7	SAE J1772 Type 1	n/a	n/a
AC Level-2	3.7–22 ≤22	SAE J1772 Type 1 Tesla	IEC62196-2 Type 2 n/a	GB/T20234 AC n/a
AC Level-3	22–43.5	SAE J3068	IEC62196-2 Type 2	GB/T20234 AC
DC Level-3	≤200	CCS Combo1 (SAE J1772 / IEC62196-3)	CCS Combo2 (IEC62196-3) Tesla Supercharger CHAdeMO (IEC62196-3 Type 4)	GB/T20234 DC

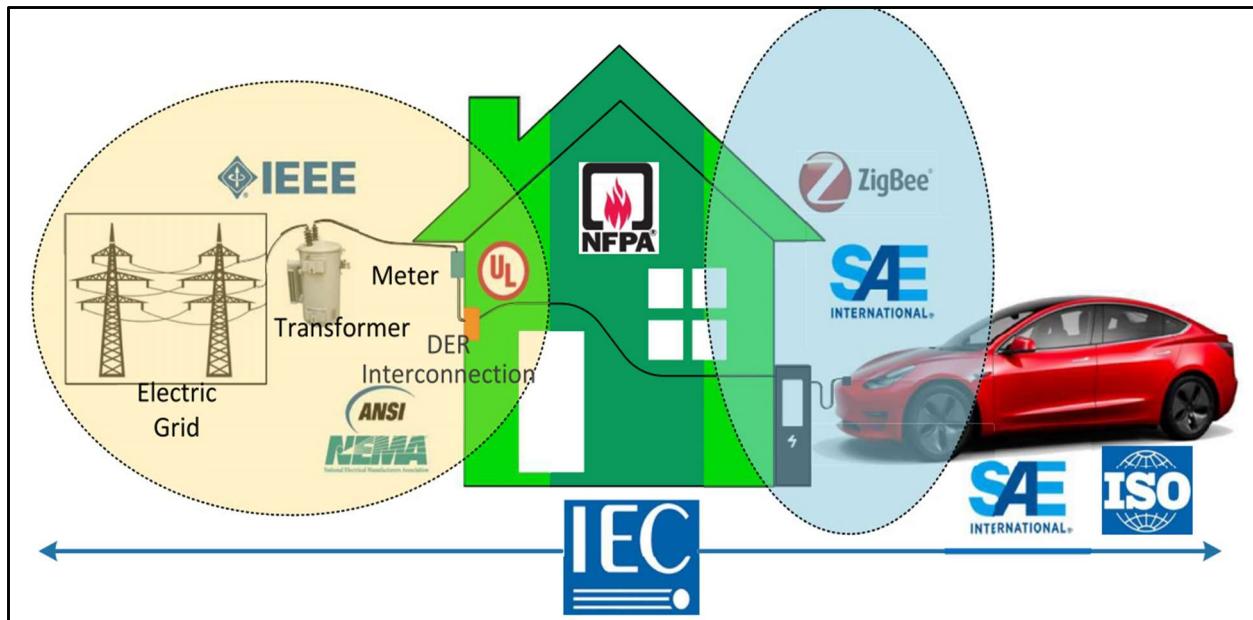
(Εικόνα 8: Ταξινόμηση και Τύποι Φόρτισης Βάσει Προτύπων. [7])

	USA	JAPAN	EU	CHINA
Single Phase/ 3-Phase AC Charging			 	
DC Fast Charging /AC-DC Combo	 Level 1 + DC SAE J1772 Combo	 Level 2 + DC JEVS G105-1993 CHAdeMO DC Fast Charging	 IEC 62196-3 Hybrid Combo	 GB/T 20234.3-2011 DC Fast charging

(Εικόνα 9: Πρότυπα για Θύρες Φόρτισης. [6])

	USA	JAPAN	EU	CHINA	
Single Phase/ 3-Phase AC Charging	 SAE J1772 Level 1, Level 2 Single phase	 SAE J1772 Level 1, Level 2 Single phase	 IEC 62196-2 Level 1, 2 Single/Three phase	 IEC 62196 Level 1,2 Single/Three Phase	
DC Fast Charging /AC-DC Combo	 SAE J1772 Level 2 + DC Combo	 Tesla Supercharger	 CHAdeMO DC Fast Charging	 IEC 62196-3 Hybrid Combo	 GB/T 20234.3-2011 DC Fast charging

(Εικόνα 10: Πρότυπα για Ρευματοδότη Φόρτισης. [6])



(Εικόνα 11: Διαφορετικά πρότυπα φόρτισης EV και περιοχές εφαρμογής τους. [6])

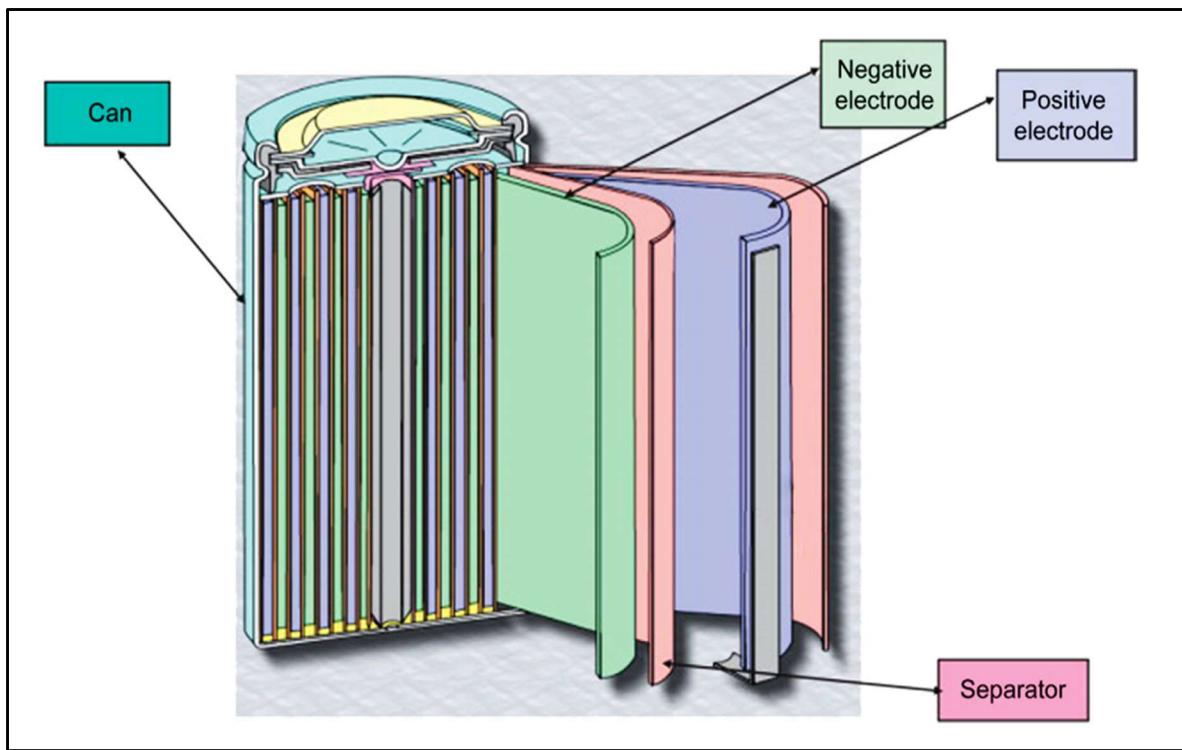
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Ιστορική Αναδρομή

Μπαταρία είναι ένα σύνολο υλικών που επιτρέπουν στην χημική ενέργεια να μετατραπεί σε ηλεκτρική. Σε περίπτωση επαναφορτιζόμενων συστημάτων η αμφίδρομη αυτή μετατροπή γίνεται σε κάθε φόρτιση και εκφόρτιση. Το μέγεθος της ενέργειας μπορεί να κυμαίνεται από ένα nW την ώρα έως και ένα MW την ώρα, ώς αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία τεράστια γκάμα προϊόντων. Η ιστορία της μπαταρίας χρονολογείται από το 150-650 μ.Χ., συγκεκριμένα βρέθηκε στην περιοχή της σημερινής Βαγδάτης, η χρήση της όμως εκείνη την εποχή παραμένει ακόμα άγνωστη. Η επόμενη εξέλιξη των μπαταριών έγινε το 1790 από τον ιταλό γιατρό Luigi Galvani, ενώ λίγα χρόνια αργότερα ο Alessandro Volta κατασκεύασε την πρώτη μπαταρία εναλλασσόμενων δίσκων Ψευδαργύρου(Zn) και Χαλκού(Cu), με κομμάτια χαρτιού εμποτισμένα σε άλμη μεταξύ των μετάλλων. Η διάταξη αυτή παρήγαγε ηλεκτρικό ρεύμα. Τον επόμενο αιώνα υπήρξαν πληθώρα ανακαλύψεων πάνω σε αυτή την τεχνολογία με μερικές από τις πιό σημαντικές να είναι η ανακάλυψη μπαταρίας Μολύβδου(Pb) οξέος από τον γάλλο φυσικό Gaston Planté(1859). Μία ακόμα καθοριστική ανακάλυψη το 1899 από τον Σουηδό Waldemar Jungner, ήταν η δημιουργία της πρώτης μπαταρίας Νικελίου(Ni)-Καδμίου(Cd). Συγκεκριμένα οι μπαταρίες Ιόντων Λιθίου έκαναν την εμφάνιση τους το 1970 από τον Άγγλο χημικό M.Stanley Whittingham στο πανεπιστήμιο του Binghamton ενώ εργαζόταν πάνω σε ένα έργο για την εταιρεία Exxon. Μετά το 1900 ξεκίνησαν να εμφανίζονται σε διάφορα είδη συσκευών καθώς και σε μικρής κλίμακας ηλεκτροκίνητα οχήματα.

2.1 Βασικά μέρη της μπαταρίας

Με τον όρο “κελί” μιας μπαταρίας αναφερόμαστε στην μικρότερη μεμονωμένη ηλεκτροχημική μονάδα που μπορεί να παρέχει τάση, η οποία και εξαρτάται από τον συνδυασμό των χημικών ουσιών και ενώσεων που έχουν επιλεγεί για την κατασκευή του προκείμενου κελιού. Συνήθως οι μπαταρίες αποτελούνται από συστοιχίες πολλών κελιών με περίβλημα και πιθανώς και έλεγχο και προστασία εμφωλευμένα στην θήκη που έχουν τοποθετηθεί όπως φαίνεται στην (Εικόνα 12) Για τα επαναφορτιζόμενα γνωρίζουμε ότι αποτελούνται από την άνοδο, την κάθοδο, τον ηλεκτρολύτη και τον μονωτή-διαχωριστή[8] :

1. Η άνοδος(ή αρνητικό ηλεκτρόδιο) δηλώνει το ηλεκτρόδιο στο οποίο λαμβάνει χώρα η οξειδωση κατά τη διάρκεια του κύκλου εκφόρτισης.[16]
2. Η κάθοδος(ή θετικό ηλεκτρόδιο) είναι το μέρος του κελιού το οποίο λαμβάνει τα ηλεκτρόνια από εξωτερικό κύκλωμα.[16]
3. Ο ηλεκτρολύτης είναι ένας ιοντικός αγωγός που παρέχει το μέσο για εσωτερική μεταφορά ιοντικού φορτίου μεταξύ των ηλεκτροδίων.[16]
4. Ο Μονωτής παρέχει φυσική μόνωση μεταξύ των θετικών και αρνητικών ηλεκτροδίων. Είναι ταυτόχρονα ιοντικός αγωγός αλλά παραμένει και ηλεκτρονικός μονωτής. Η λειτουργία του είναι να αποτρέψει εσωτερικό βραχυκύκλωμα μεταξύ των θετικών και αρνητικών ηλεκτροδίων, το οποίο και θα προκαλούσε εσωτερική εκφόρτιση και θα καθιστούσε το κελί μη λειτουργικό.[11]



(Εικόνα 12: Σχήμα μιας κυλινδρικής μπαταρίας Ιόντων Λιθίου.[11])

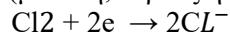
2.2 Τυπική Διαδικασία Εκφόρτισης

Η ηλεκτροχημική ενέργεια στην άνοδο ευνοεί την χημική διαδικασία κατά την οποία, απελευθερώνονται ηλεκτρόνια σε εξωτερικό κύκλωμα και θετικά φορτισμένα ιόντα στον ηλεκτρολύτη. Επιπρόσθετα το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο οδηγεί στην διαδικασία αποδοχής ηλεκτρονίων από εξωτερικό κύκλωμα και θετικά φορτισμένων ιόντων από τον ηλεκτρολύτη. Το αποτέλεσμα της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών του κελιού καλείται ως τάση κελιού ή ηλεκτροκινητική δύναμη(ή ηλεκτρομαγνητικό πεδίο). Αυτή η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να απελευθερωθεί και να μετατραπεί σε έργο μόνο όταν υπάρχει διέξοδος στα θετικά φορτισμένα ιόντα να κινηθούν από το αρνητικό ηλεκτρόδιο στο θετικό. Ο ηλεκτρολύτης αποτελεί ένα πάντα ανοιχτό μέσο το οποίο μπορούν να διαπεράσουν τα θετικά φορτισμένα ιόντα, ωστόσο ο μονωτής αποτρέπει την κίνηση των ηλεκτρονίων αποτρέποντας με αυτό τον τρόπο το βραχυκύκλωμα. Για να μπορέσουν τα ηλεκτρόνια να κινηθούν θα πρέπει ένα εξωτερικό κύκλωμα να συνδέσει τα θετικά και τα αρνητικά ηλεκτρόδια. Όταν συνδεθεί το εξωτερικό κύκλωμα το κελί εκκενώνει την ενέργεια του μέσα στο κύκλωμα ώς συνέπεια η αποθηκευμένη ηλεκτροχημική ενέργεια να μετατρέπεται σε ηλεκτρική.[16]

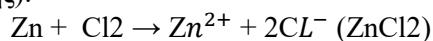
Χημικός τύπος αρνητικού ηλεκτροδίου : ανοδική αντίδραση (οξείδωση, απώλεια ηλεκτρονίων)



Θετικό ηλεκτρόδιο: καθοδική αντίδραση (μείωση, κέρδος ηλεκτρονίων)



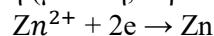
Συνολική αντίδραση (εκφόρτισης):



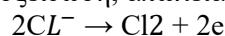
2.3 Τυπική Διαδικασία Φόρτισης

Στα κελιά τα οποία δεν είναι επαναφορτιζόμενα η διαδικασία εκφόρτισης μπορεί να πραγματοποιηθεί μονάχα μία φορά εφόσον οι χημικές ενώσεις της δεν είναι αναστρέψιμες. Στα επαναφορτιζόμενα κελιά αυτή η χημική αντίδραση είναι αναστρέψιμη. Οι αρχικές χημικές ενώσεις μπορούν να ανασυσταθούν με την εφαρμογή ηλεκτρικού δυναμικού στα άκρα των ηλεκτροδίων με την άσκηση υψηλότερου δυναμικού από εκείνο που έχει στα άκρα του το κελί. Με αυτόν τον τρόπο εγχύεται ενέργεια μέσα στο κελί, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια και τα θετικά ιόντα να κινούνται πρός το θετικό ηλεκτρόδιο και πίσω στο αρνητικό, επομένως να αποθηκεύεται ενέργεια. Κατά την διάρκεια της φόρτισης, τα κατιόντα κινούνται από το θετικό προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο μέσα από το εξωτερικό κύκλωμα.[16]

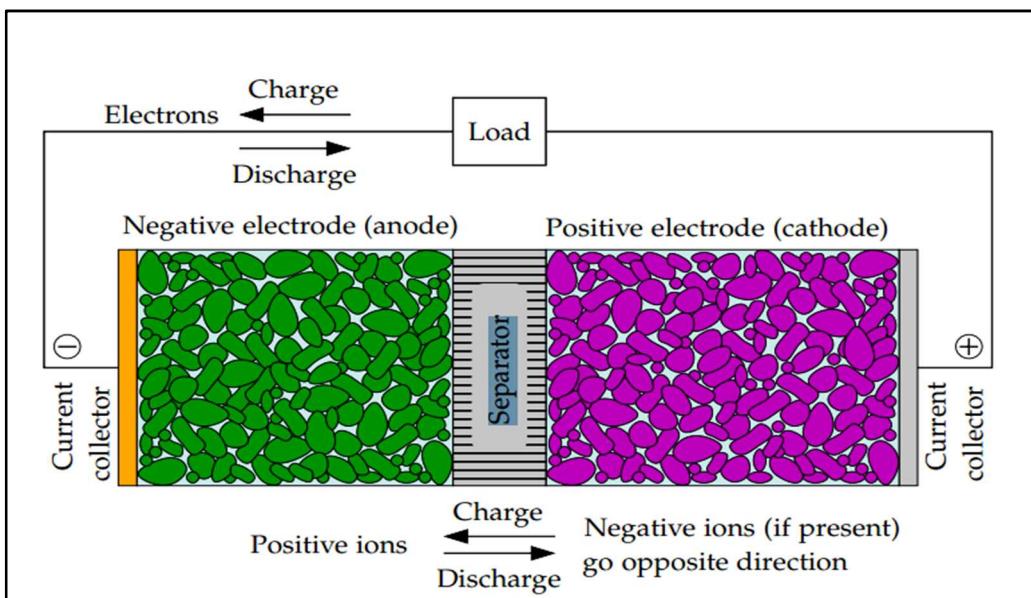
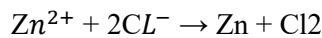
Αρνητικό ηλεκτρόδιο: καθοδική αντίδραση (μείωση, κέρδος ηλεκτρονίων):



Θετικό ηλεκτρόδιο: ανοδική αντίδραση (οξείδωση, απώλεια ηλεκτρονίων):



Συνολική αντίδραση (φόρτιση):



(Εικόνα 13: Ενδεικτικό διάγραμμα μπαταρίας Ιόντων Λιθίου(Li-Ion) [20])

2.4 Θεωρητικό και Χημικό Σύστημα Μπαταρίας Ιόντων Λιθίου(Li-Ion)

Το κελί μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου έχει κάθοδο η οποία δημιουργείται από Μεταλλικό Οξείδιο(LiMO₂) και η άνοδος δημιουργείται από Άνθρακα(C) σε μορφή γραφίτη. Κατά την διάρκεια της φόρτισης το λίθιο απελευθερώνει θετικά ιόντα από το οξείδιο μεταλλου λιθίου τα οποία κινούνται από την κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη πρός την άνοδο όπου ενώνονται με το ηλεκτρόδιο του άνθρακα έχοντας ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό Λιθιωμένου Άνθρακα(LixC₆). Ο ηλεκτρολύτης είναι ουσιαστικά ένα άλας λιθίου υψηλής αγωγιμότητας που διευκολύνει την κίνηση του κατιόντος του λιθίου. Η αντίδραση στην κάθοδο παράγει μία τάση περίπου του ήμισυ του κελιού (1 volt), ενώ παράλληλα η άνοδος παράγει περίπου 3 volts επομένως η συνολική τάση ανέρχεται στα 4 volts. Το μεταλλο λιθίου μπορεί να αποθηκεύσει στην άνοδο μόνο σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτή η συσσώρευση λιθίου είναι γνωστή ως κρύσταλλος δενδρίτη. Ο δενδρίτης μπορεί να οδηγήσει σε βραχυκύκλωμα στην κάθοδο διεισδύοντας στο διαχωριστικό μονωτή. Το φαινόμενο μνήμης δεν διέπει

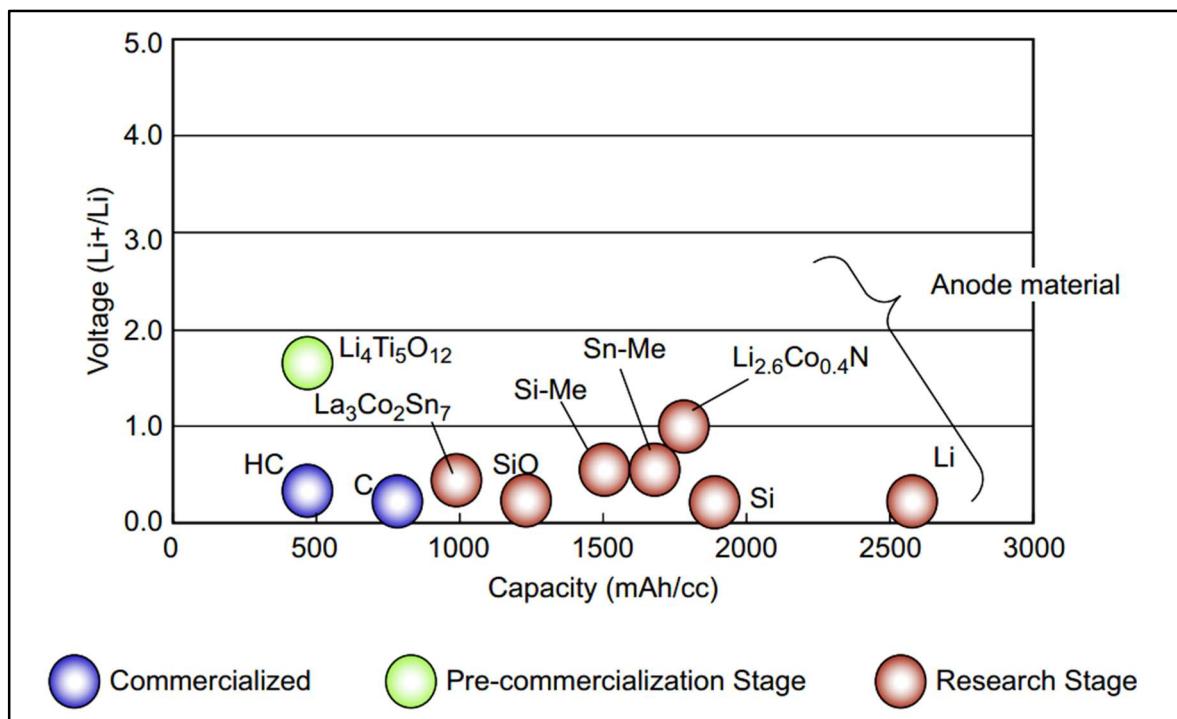
το κελί ιόντων λιθίου με αποτέλεσμα να χάνει ενεργειακή χωρητικότητα με την πάροδο του χρόνου και των εκφορτίσεων-φορτίσεων. Οι κύκλοι εκφορτίσεων-φορτίσεων έχουν ώς αντίκτυπο την μηχανική θραύση των ηλεκτροδίων και την μείωση της ζωής της μπαταρίας. Ένα άλλο είδος Li-Ion μπαταριών είναι οι Λιθίου Τιτανίου(Lit), οι οποίες έχουν στην άνοδο του τιτάνιο αντί για γραφίτη και αυτό τις καθιστά πιο αποδοτικές με μεγαλύτερο περιθώριο ζωής. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι η μειωμένη εσωτερική αντίσταση και η δυνατότητα λειτουργίας σε χαμηλές θερμοκρασίες που την καθιστούν ελκυστική επιλογή για Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα(HEVs). Οι νεότερες Li-Ion χρησιμοποιούν προηγμένα υλικά για την άνοδο όπως κράματα που έχουν ώς βάση το Πυρίτιο(Si), αυτό έχει ώς αποτέλεσμα την επίτευξη αύξησης χωρητικότητας ενέργειας.[11]

	Lithium Iron Phosphate	Lithium Manganese Oxide	Lithium Titanate	Lithium Cobalt Oxide	Lithium Nickel Cobalt Aluminum	Lithium Nickel Manganese Cobalt
Cathode chemistry descriptor	LFP	LMO	LTO	LCO	NCA	NMC
Specific energy (Wh/kg)	80-130	105-120	70	120-150	80-220	140-180
Energy density (Wh/L)	220-250	250-265	130	250-450	210-600	325
Specific power (W/kg)	1400-2400	1000	750	600	1500-1900	500-3000
Power density (W/L)	4500	2000	1400	1200-3000	4000-5000	6500
Volts (per cell) (V)	3.2-3.3	3.8	2.2-2.3	3.6-3.8	3.6	3.6-3.7
Cycle life	1000-2000	>500	>4000	>700	>1000	1000-4000
Self-discharge (% per month)	<1%	5%	2-10%	1-5%	2-10%	1%
Cost (per kWh)	\$400-\$1200	\$400-\$900	\$600-\$2000	\$250-\$450	\$600-\$1000	\$500-\$900
Operating temperature range (°C)	-20 to +60	-20 to +60	-40 to +55	-20 to +60	-20 to +60	-20 to +55

(Πίνακας 1: Τυπικές χημικές συστάσεις και χαρακτηριστικά μπαταριών Ιόντων Λιθίου.[11])

2.5 Η Εξέλιξη της Τεχνολογίας των Ανόδων-Καθόδων

Τα τελευταία χρόνια γίνεται έντονη ερεύνα στο χημικό μέρος των κελιών, με αποτέλεσμα νέες καινοτομίες, τόσο στην χημεία των ανόδων όσο και των καθόδων. Παρόλα αυτά οι περισσότερες ανακαλύψεις παραμένουν ακόμα σε εργαστηριακό επίπεδο. Στην παρακάτω (Εικόνα 15) [4] που αφορά τις ανόδους υπάρχει η τάση για αύξηση ενέργειας όσο κινούμαστε πρός υλικά όπως υλικά όπως πυρίτιο και κασσίτερο.



(Εικόνα 15: Σύγκριση Απόδοσης Υλικών Ανόδου.[11])

Προκειμένου όμως να επιτευχθεί η ευρεία χρήση τους θα πρέπει να ξεπεραστούν κάποια βασικά εμπόδια, όπως ότι ο κασσίτερος και το πυρίτιο εμφανίζουν ογκομετρική ανάπτυξη μεταξύ 250-300% κατά τους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης με αποτέλεσμα να έχουν μειωμένη διάρκεια ζωής. Όσον αφορά στην εξέλιξη των καθόδων οι πιο κύριες χημικές συστάσεις που συναντάμε είναι : LFP, NMC, LCO, NCA και LMO. Με την αύξηση της παραγωγής των EVs οι μπαταρίες NMC(Nickel Manganese Cobalt) έχουν αρχίσει να κερδίζουν την αγορά λόγω της υψηλότερης ενεργειακής τους πυκνότητας και υψηλότερης τάσης που παρέχουν.[11],[13]

2.6 Μονάδες Αποθήκευσης Ενέργειας Μπαταρίας

Μία μπαταρία μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια η τιμή αυτής της ενέργειας ονομάζεται Joule και συμβολίζεται με το γράμμα J. Η μονάδα αυτή πήρε το όνομα της από τον Άγγλο φυσικό James Joule (1818-1889). Η ισχύς της ενέργειας ορίζεται ως το έργο που παράγεται ανά κάθε δευτερόλεπτο. Η μονάδα ισχύος είναι τα Watts(W) και η εξίσωση που τα ορίζει είναι η εξής:

$$\text{Ενέργεια} = \text{Ισχύς} \times \text{Χρόνο} \quad (\text{με μονάδα μέτρησης το } 1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}) \quad (1)$$

Παρόλα αυτά ένα Joule αποτελεί μία πολύ μικρή κλίμακα ενέργειας και για αυτό είναι υφίσται να χρησιμοποιούμε ως μέσο μέτρησης τα Watt-Hour(Δηλαδή Watt ανά ώρα). Ένα Watt-Hour ορίζεται ως[7]:

$$1 \text{ Wh} = 3.600 \text{ Ws} = 3.600 \text{ J} \quad (2)$$

Η βατώρα είναι συχνά χρησιμοποιούμενο μέσο μέτρησης ενέργειας σε εφαρμογές που αφορούν ηλεκτρικά οχήματα, επιπλέον είναι χρήσιμο να εκφράσουμε την ενέργεια σε Kilowatt-Hour(Δηλαδή Kilo-Watt ανά ώρα-κιλοβατώρα). Μία Kilowatt-Hour(κιλοβατώρα) ορίζεται ως:

$$1 \text{ kWh} = 3.600 \text{ 000Ws} = 3.600.000 \text{ J} \quad (3)$$

Μια κοινή ποσότητα μέτρησης που σχετίζεται με την αποθήκευση ενέργειας της μπαταρίας είναι η χωρητικότητα, με την μονάδα Αμπέρ ανά Ήρα (Ah). Η μονάδα του ρεύματος I είναι το ampere(σύμβολο A). Η μονάδα είναι πήρε το όνομά της από τον André-Marie Ampère (1775–1836), Γάλλο φυσικό και μαθηματικό όπου έζησε μέσω της Γαλλικής Επανάστασης και της ναπολεόντειας εποχής και συνέβαλε στην ανακάλυψη του ηλεκτρομαγνητισμού. Η τυπική μονάδα στο σύστημα SI για το φορτίο Q είναι το Coulomb (σύμβολο C), που ονομάστηκε από τον Γάλλο Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806), ο οποίος έπαιξε σπουδαία δουλειά στον τομέα των ηλεκτροστατικών και ανέπτυξε το νόμο του Coulomb σχετικά με τις δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων. Η εξίσωση έχει την μορφή[14]:

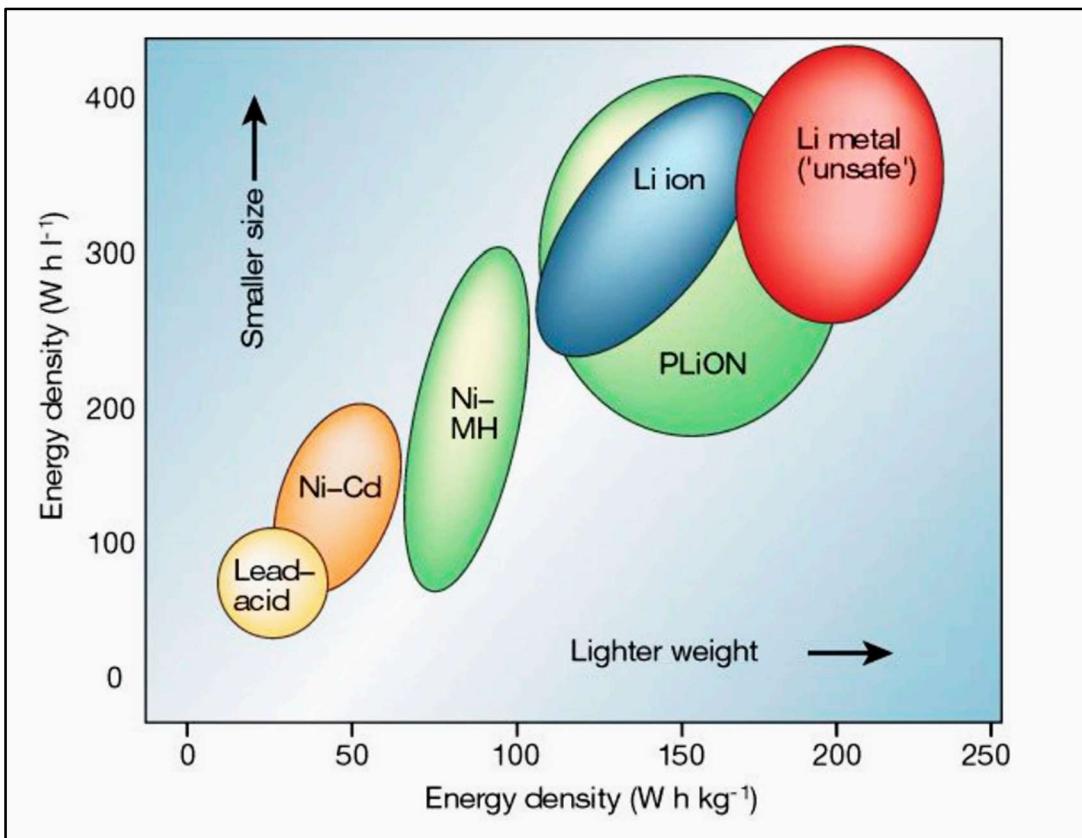
$$\text{Φόρτιση (Charge)} = \text{Ρεύμα} \times \text{Χρόνο} \quad \text{ή} \quad Q = It \quad (\text{Με μονάδες μέτρησης } 1C = 1 \text{ As}) \quad (4)$$

Παρόλα αυτά και πάλι ένα Coulomb αποτελεί μία πολύ μικρή κλίμακα ενέργειας και για αυτό υφίσται να χρησιμοποιούμε ως μέσο μέτρησης τα Ampere-Hour(Δηλαδή Ampere ανά ώρα). Ένα Ampere-Hour ορίζεται ως:

$$1 \text{ Ah} = 3.600 \text{ As} = 3.600 \text{ C} \quad (5)$$

Τέλος η χωρητικότητα εκφράζεται ως Ampere-Hours και μπορεί να συσχετιστεί με την ενέργεια σε Watt-Hours πολλαπλασιάζοντας την χωρητικότητα με την τάση(V) στα άκρα της μπαταρίας:

$$\text{Ενέργεια} = \text{Χωρητικότητα} \times \text{Τάση} \quad (\text{Με μονάδες μέτρησης } 1J=1As \times V) \quad (6)$$



(Εικόνα 16: Βαρομετρικό διάγραμμα πυκνότητας ενέργειας Ragone από πολλές από τις τεχνολογίες μπαταριών που χρησιμοποιούνται σε EV.[19])

2.7 Ποσοστό Χωρητικότητας

Προκειμένου να περιγράψουμε μία μπαταρία είναι συνηθισμένο να χρησιμοποιούμε την τιμή C. Το C σε αυτή την περίπτωση σημαίνει ρυθμός χωρητικότητας και όχι η μονάδα των coulombs. Το ποσοστό C είναι ένα μέτρο του πόσο γρήγορα το η μπαταρία φορτίζεται ή αποφορτίζεται σε σχέση με τη μέγιστη χωρητικότητά της. Για παράδειγμα, ένας ρυθμός 1C εκφορτίζει την μπαταρία με σταθερό ρεύμα σε μία ώρα, ενώ ένας ρυθμός 10C αποφορτίζει την μπαταρία με το δεκαπλάσιο ρεύμα (1C). Ένα ποσοστό C / 3 αποφορτίζει την μπαταρία στο ένα τρίτο του ρεύματος 1C.[14]

2.8 Θεωρία της Ενέργειας Gibbs, Τάσης και Χωρητικότητας της Μπαταρίας

Όταν λαμβάνει χώρα μία αντίδραση(άμεσα εξαρτώμενη από το θερμοδυναμικό της μέγεθος), υπάρχει μείωση της ελεύθερης ενέργειας στο σύστημα, το οποίο μπορεί να μεταφραστεί και ως[14]-[16]:

$$\Delta G^0 = -nFE^0 \quad (7)$$

n = Πλήθος ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στην αντίδραση

E^0 = Τυπικό δυναμικό τάσης (V)

F = Σταθερά Faraday ίση με $\approx 96.500 \text{ C}$

‘Αλλες τυπικές μονάδες μέτρησης είναι :

Πυκνότητα ενέργειας ανά κιλό $\rightarrow \text{KJ/kg}$

Πυκνότητα ογκομετρικής ενέργειας $\rightarrow \text{J/cm}^3$

Ειδική πυκνότητα ισχύος $\rightarrow \text{W} \times \text{h/L}$

Η θεωρία Gibbs αναφέρει ότι κάθε χημική αντίδραση στην οποία πραγματοποιείται μεταφορά φορτίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ηλεκτροχημική ενέργεια και να αποθηκευτεί. Σε γενική μορφή η εξίσωση αυτή μπορεί να γραφτεί ως:



Η ελεύθερη ενέργεια Gibbs ύπο τυπικές αντιδράσεις μπορεί να υπολογιστεί με το άθροισμα όλων των Gibbs ελεύθερων ενεργειών που σχηματίζουν τα αντιδρώντα και προϊόντα του συστήματος μας:

$$\Delta_r G = \gamma \Delta_f G_c + \delta \Delta_f G_D - (\alpha \Delta_f G_A + \beta \Delta_f G_B) \quad (9)$$

Η θεωρητική τάσης καθορίζεται από τα ενεργά στοιχεία και τον τύπο τους σε κάθε κελί. Ο υπολογισμός της γίνεται από τα δεδομένα πού έχουν συλλεχθεί από την ελεύθερη ενέργεια, είτε ακόμα και πειραματικά. Το Τυπικό-Θεωρητικό δυναμικό μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

Anode(Δυναμικού Οξείδωσης Ανόδου) + Cathode(Δυναμικού Αναγωγής Καθόδου) = Θεωρητικό δυναμικό κελιού

2.8.1 Πραγματική Ενέργεια και Χωρητικότητα της Μπαταρίας

Η χωρητικότητα ενός κελιού μπαταρίας μπορεί να καθοριστεί από την ενέργεια του, για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη η ποσότητα και η τάση του ηλεκτρικού φορτίου. Η τιμή η οποία απορρέει από αυτή την μέτρηση προκύπτει ότι είναι η μέγιστη τιμή χωρητικότητας που μπορεί να εκλυθεί από το ηλεκτροχημικό αυτό σύστημα. Ο μαθηματικός της τύπος είναι ως εξής:

$$\text{Watt-hour(Wh)} = \text{Voltage(V)} \times \text{Ampere-hour(Ah)} \quad (10)$$

2.9 Βασικά Χαρακτηριστικά Επιλογής Μπαταριών Ιόντων Λιθίου

Ο λόγος της επιλογής ανάπτυξης συσσωρευτή ενέργειας ηλεκτροκίνητου οχήματος με μπαταρίες που έχουν ως χημική βάση τα Ιόντα Λιθίου έγινε διότι εκτιμάται βάσει ερευνών ότι μέχρι το 2030 θα έχει κατακλύσει την αγορά με ποσοστά που αγγίζουν το 80-90%. Παρακάτω μπορούμε να δούμε κάποια από τα κύρια χαρακτηριστικά που τις κάνουν ελκυστική ώς επιλογή:

- Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα
- Υψηλή μέση τάση εξόδου (~3.6V), η οποία είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες Ni-Cd(Νικελίου Καδμίου) και Ni-Mh(Νικελίου Μετάλλου).
- Υψηλή ισχύς εξόδου που μπορεί να φτάσει τα 300 W / kg για μικρό χρονικό διάστημα.
- Χαμηλή αυτοεκφόρτιση λιγότερη από 3% ανά μήνα, δηλαδή λιγότερο από το μισό ποσοστό των μπαταριών Ni-Cd και Ni-MH.
- Δεν έχουν φαινόμενο μνήμης το οποίο διαφέρει στις Ni-Cd και Ni-MH, αυτό οδηγεί σε πιο αποδοτικούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης άρα και σε αύξηση απόδοσης της μπαταρίας.
- Γρήγορη φόρτιση και εκφόρτιση, η χωρητικότητα μπορεί να είναι έως και 80% της ονομαστική χωρητικότητας κατά την φόρτιση με ρυθμό 1 C.
- Υψηλή Coulomb απόδοση με αυτή να παραμένει κοντά στο 100% μετά τον πρώτο κύκλο.
- Μεγάλο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας (-40°C to +70°C)
- Χωρίς ανάγκη για συντήρηση, καθώς οι ανεπιθύμητες αντιδράσεις που μπορούν να συμβούν είναι ελάχιστες σε σύγκριση με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που χρησιμοποιούν υδατικούς ηλεκτρολύτες.
- Χωρίς να έχουν σοβαρό περιβαλλοντολογικό αποτύπωμα, είναι και ο λόγος που αποκαλούνται ως “πράσινες” μπαταρίες.[16]

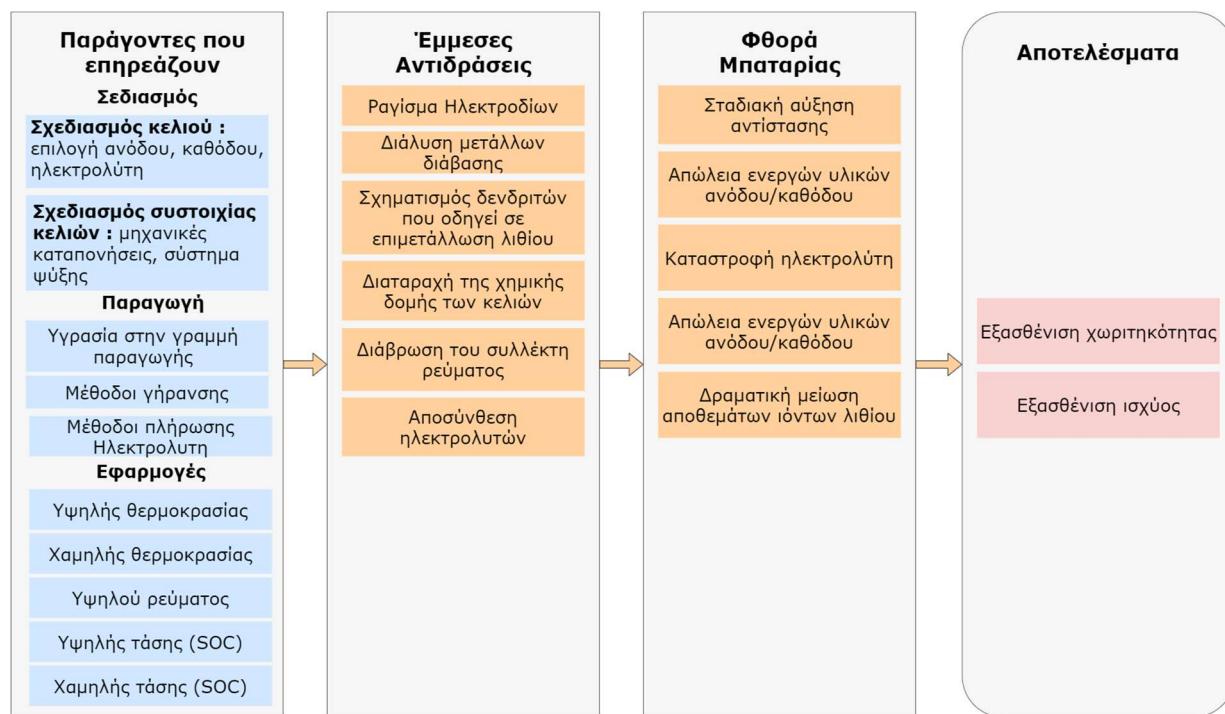
2.9.1 Όρια Τάσης Μπαταρίας Ιόντων Λιθίου και Επιπτώσεις

Τα κελιά είναι αρκετά ευαίσθητα σε τάσεις εκτός της περιοχής λειτουργίας τους, η ζώνη ασφαλείας που πρέπει να λειτουργούν είναι μεταξύ 2.5 με 4.2Volts(κάποιες φορές μπορούν να φτάσουν μέχρι τα 4.35V ανάλογα με το υλικό που είναι κατασκευασμένα). Όταν η μπαταρία δεν λειτουργεί σε αυτό το εύρος τάσεων υπάρχει μεγάλο ενδεχόμενο να υπάρξει πρόωρη γήρανση των κελιών ακόμα και κίνδυνος έκρηξης. Σημαντικά χαρακτηριστικά ασφαλείας που πρέπει να έχει κάθε κελί είναι[9]:

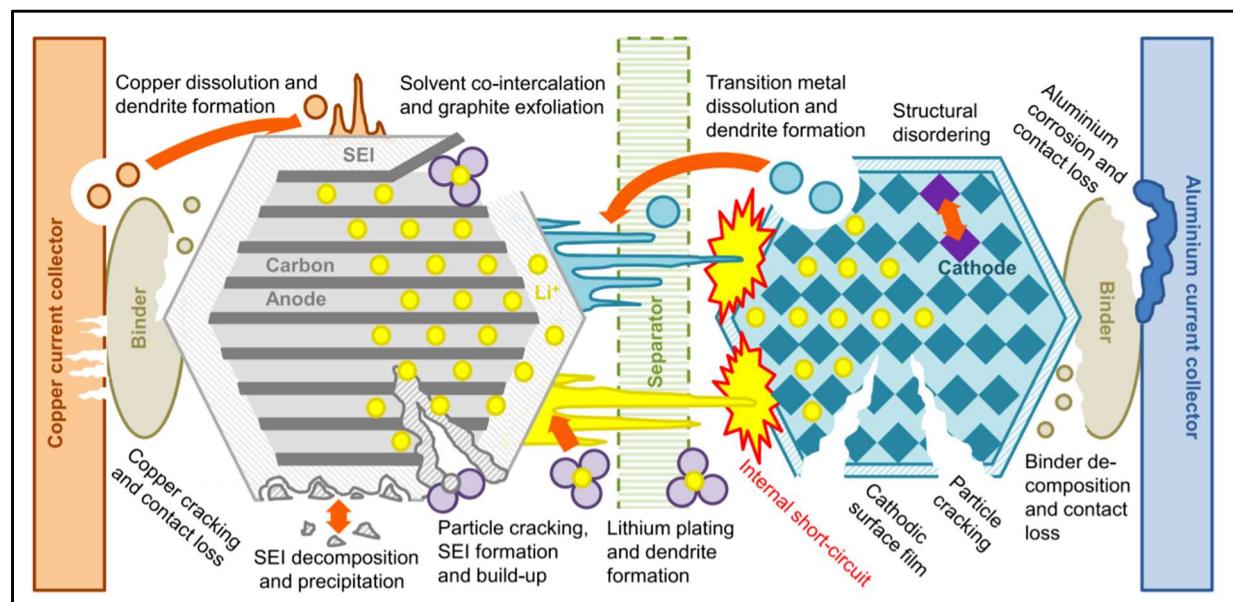
- Διαχωριστή-Μονωτή απενεργοποίησης (για περίπτωση υπερθέρμανσης)
- Άκρο εξαερισμού το οποίο μπορεί να εκτονωθεί σε περίπτωση ακραίας εσωτερικής πίεσης
- Θερμικό διακοπτικό μέσο λόγω υπέρμετρης τάσης ή υπερφόρτισης.

2.10 Κύριοι Λόγοι Φθοράς Μπαταρίας

Η φθορά των κελιών μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες, όπως υπέρταση καθώς και να διαρρεύσει από μέσα τους παραπάνω από το επιτρεπόμενο ρεύμα. Ένας άλλος καθοριστικός παράγοντας στην γήρανση και την φθορά τους είναι η θερμοκρασία. Πρέπει το περιβάλλον που βρίσκονται να μην ξεπερνάει τις θερμοκρασίες που αναγράφει ο κατασκευαστής στο φυλλάδιο χρήσης τους. Παρακάτω (Πίνακας 2), (Εικόνα 17) μπορούμε να δούμε πιο αναλυτικά τα στάδια και τους μηχανισμούς που μπορούν να οδηγήσουν στην φθορά τους[21],[22].



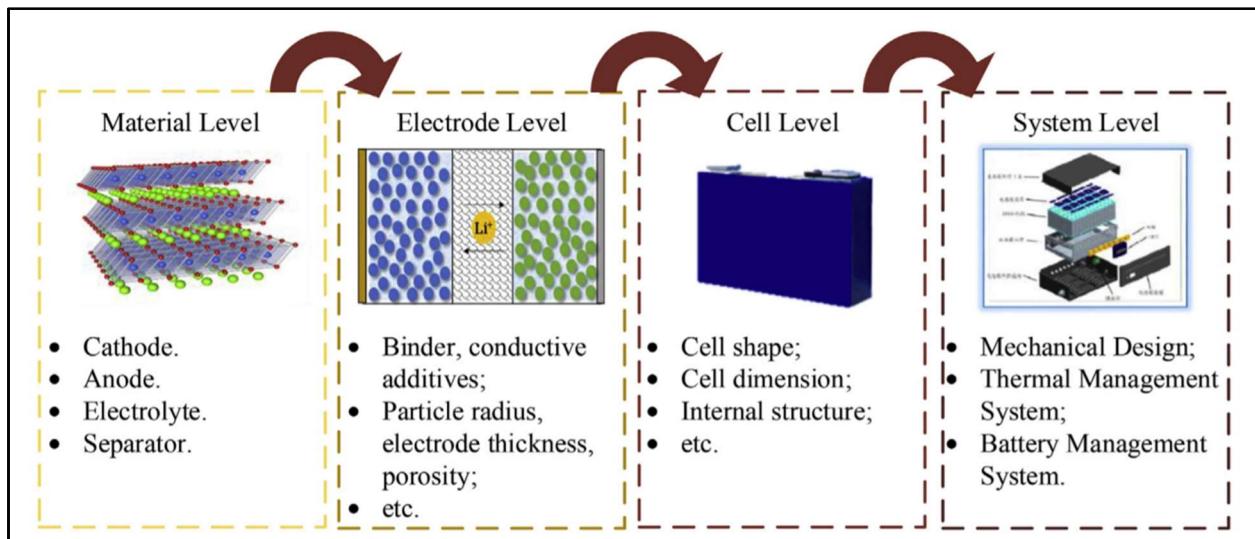
(Πίνακας 2: Παράγοντες και τρόποι οι οποίοι επηρεάζουν την φθορά και την γήρανση των κελιών.)



(Εικόνα 17: Μηχανισμοί φθοράς μπαταριών ιόντων λιθίου.[21])

2.11 Επίπεδα Σχεδιασμού Μπαταριών

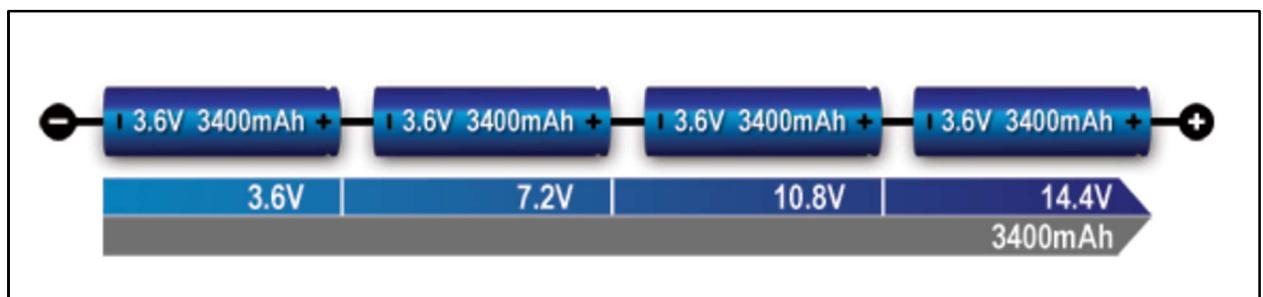
Για να καταλήξουμε από την σχεδίαση στην παραγωγή μπαταριών διανύουμε μερικά σημαντικά στάδια. Αυτά τα στάδια αφορούν το σχεδιασμό υλικών και των βασικών στοιχείων της μπαταρίας όπως η άνοδος, η κάθοδος, ο μονωτής και ο ηλεκτρολύτης της. Εν συνεχεία οδηγούμαστε στο επίπεδο σχεδιασμού των ηλεκτροδίων το οποίο μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Οι πιο σημαντικοί παράμετροι στο σχεδιασμό τους αποτελούνται από το ποσοστό αναλογίας καθόδου και ανόδου ενεργών υλικών, καθώς και το μέγεθος των σωματιδίων και του πάχους τους. Το επόμενο στάδιο αφορά τον μηχανικό και σχηματικό σχεδιασμό του κελιού, όπως το τί είδους διαστάσεις και σχήμα πρόκειται να έχει όταν παραχθεί. Αυτό το στάδιο λαμβάνει υπόψη περιορισμούς διαστάσεων καθώς και χρησιμοποιεί με κατάλληλο τρόπο σχήματα για την παροχή καλύτερης ψύξης στην μπαταρία. Τελευταία στάδιο είναι ο σχεδιασμός του συστήματος που τις περισσότερες φορές αφορά την διαχείριση ενέργειας της μπαταρίας (BMS-Battery Management System), όπως επίσης και την διαχείριση την θερμική(TMS-Thermal Management System). (Εικόνα 18)[22]



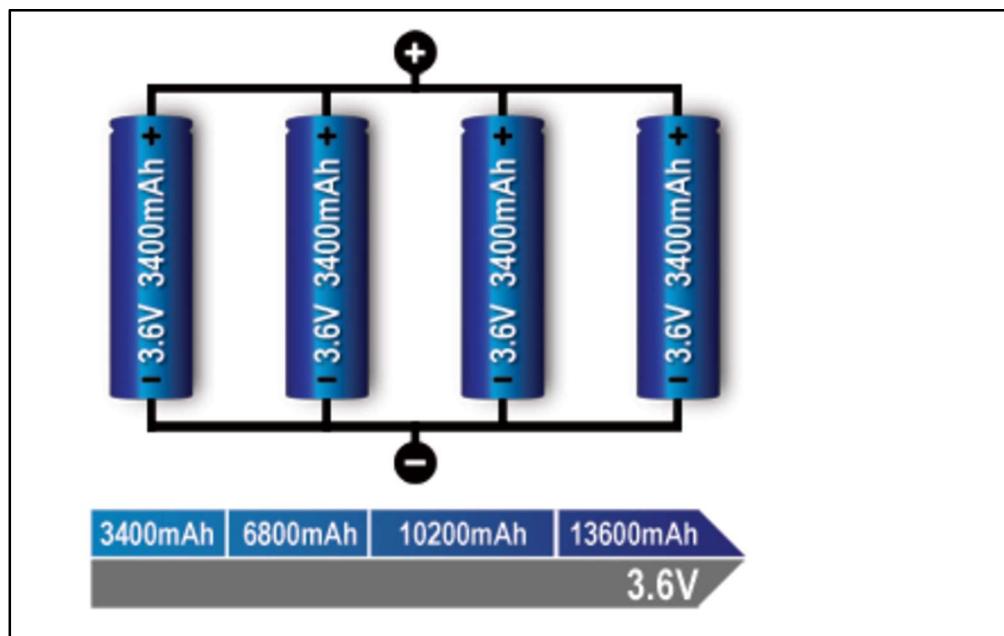
(Εικόνα 18: Επίπεδα Σχεδιασμού Μπαταριών.[15])

2.12 Ηλεκτρονικές Διατάξεις Μπαταριών

Οι μπαταρίες επιτυγχάνουν τις επιθυμητές τάσεις που χρειαζόμαστε σε κάθε εφαρμογή, συνδέοντας τα κελιά τους σε σειρά προκειμένου να αθροιστεί η τάση και παράλληλα να αυξηθεί η συνολική ενεργειακή χωρητικότητα. Κάποιες μπαταρίες μπορεί να περιέχουν μέσα τους συνδέσεις κελιών σε σειρά και παράλληλα, προκειμένου να επιτύχουν την επιθυμητή τάση εξόδου[23]. Η πιο κλασική ορολογία στο εμπόριο είναι όταν χαρακτηρίζουμε μία μπαταρία π.χ. 4s2p δηλαδή έχει εσωτερικά της τέσσερα κελιά σε σειρά και δύο παράλληλα (Εικόνες 19, 20).



(Εικόνα 19: Σύνδεση σε σειρά τεσσάρων κελιών για αύξηση τάσης.[23])



(Εικόνα 20: Σύνδεση παράλληλα τεσσάρων κελιών για αύξηση χωρητικότητας.[23])

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Σύστημα Διαχείρισης Μπαταρίας

Οι μέθοδοι και οι αλγόριθμοι που θα αναφέρουμε, τυπικά μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε είδος συστήματος διαχείρισης ενέργειας μπαταριών(Battery Management System - BMS). Ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας εμπεριέχει τόσο ενσωματωμένα ηλεκτρονικά, όσο και συστήματα λογισμικού, προκειμένου να φέρει είς πέρας την διαχείριση των μπαταριών.

Οι πρωταρχικοί σκοποί ενός συστήματος διαχείρισης μπαταριών είναι:

- Πρώτον, να φροντίζει να παρέχει ασφάλεια στον χειριστή του συστήματος της μπαταρίας. Το σύστημα διαχείρισης (BMS) θα πρέπει να ανιχνεύει μη ασφαλείς συνθήκες λειτουργίας και να ανταποκρίνεται άμεσα. Αυτό μπορεί να απαιτεί να αποσυνδέει και να απομονώνει την μπαταρία από το φορτίο, καθώς και να προσφέρει στον χρήστη κάποιου είδους προειδοποίηση μέσα από ένα σύστημα όπως μία οθόνη ή με την ένδειξη φωτοαντιστάσεων.
- Δεύτερον, να προστατεύει τα κελιά των μπαταριών σε περιπτώσεις βλάβης ή κατάχρησης. Αυτό μπορεί να απαιτεί ενεργή παρέμβαση υπό τον έλεγχο λογισμικού ή εξειδικευμένων ηλεκτρονικών, τα οποία μπορούν να ανιχνεύσουν αστοχίες και να απομονώσουν τα αστοχικά εξαρτήματα από την υπόλοιπη μπαταρία και από το φορτίο που τροφοδοτεί.
- Τρίτον, να φροντίζουν την λειτουργία της μπαταρίας μέσα στα προβλεπόμενα όρια τα οποία παρέχει ο κατασκευαστής της προκειμένου να παρατείνουν την διάρκεια ζωής της. Ο BMS το επιτυγχάνει αυτό συντονίζοντας και ελέγχοντας τον ελεγκτή φορτίου που τροφοδοτεί. Θα πρέπει να του παρέχει τα όρια ισχύος τα οποία μπορεί να αντλήσει από την μπαταρία καθώς και όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά προκειμένου να μην υπάρξει υπερφόρτωση της.
- Τέταρτον, προκειμένου να διασφαλίζουμε την ομαλή λειτουργία της μπαταρίας μας θα πρέπει εξ αρχής το σύστημα που θα σχεδιαστεί να πληροί αυστηρά τις λειτουργικές του προδιαγραφές. Έτσι, για παράδειγμα, δεν θα επιτρέψει σε μια μπαταρία να αποφορτιστεί μέχρι να μην μπορεί να αποδώσει την ονομαστική της ισχύ εκφόρτισης, ούτε θα επιτρέψει στο πακέτο να φορτιστεί τόσο πολύ ώστε να μην μπορεί να λάβει την ονομαστική της ισχύ φόρτισης σε οποιαδήποτε στιγμή .

3.2 Κυκλωματική Τοπολογία Μπαταριών

Η ηλεκτρική ισχύς υπολογίζεται ως ηλεκτρικό ρεύμα πολλαπλασιασμένο επί τάσης:

$$P = V * I \quad (11)$$

Επομένως, οι μπαταρίες υψηλής ισχύος πρέπει να παρέχουν είτε υψηλό ρεύμα, είτε υψηλή τάση ή και τα δύο. Για να πετύχει ο σχεδιασμός προκειμένου να έχουμε μέγιστη ισχύ, ο μηχανικός της μπαταρίας πρέπει να λάβει αποφάσεις σχετικά με την τοπολογία της συσκευασίας. Ποιο πρέπει να είναι το εύρος τάσης και το ρεύμα αιχμής. Η χημεία ενός μεμονωμένου κελιού καθορίζει το εύρος τάσης του. Έτσι ώστε για τα πακέτα υψηλής τάσης πρέπει να συνδέσουμε πολλαπλά κελιά σε σειρά. Η τάση πακέτου είναι σε αυτή την περίπτωση το άθροισμα των μεμονωμένων τάσεων κελιού. Εάν όλες οι τάσεις κελιών θεωρηθούν ίσες, τότε έχουμε ότι :

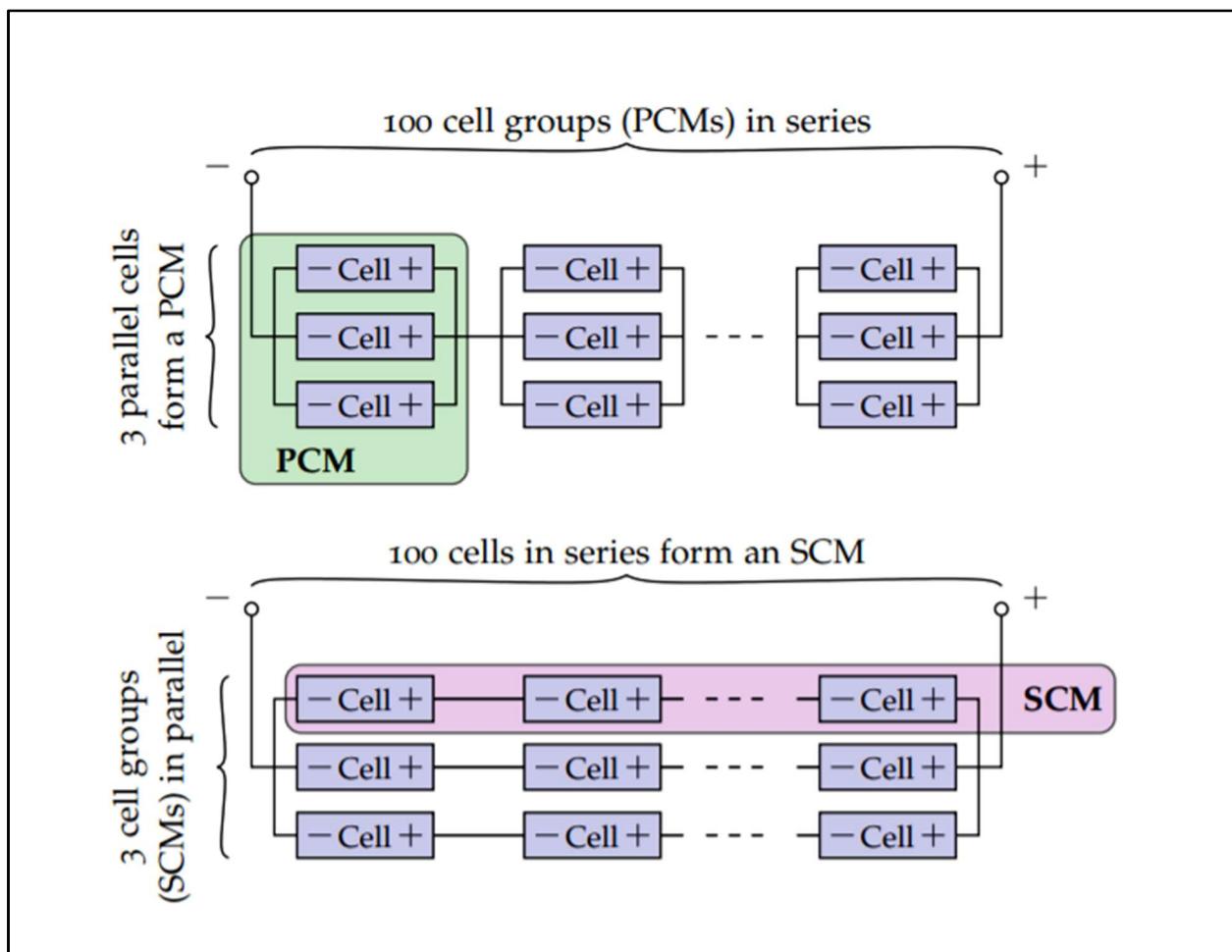
$$V_{\text{pack}} = N_s \times V_{\text{cell}} \quad (12)$$

όπου η τοπολογία της μπαταρίας συνδέει σειρές κελιών N_s σε σειρά. Η κατασκευή του κελιού θέτει όρια στο μέγιστο ρεύμα μπορεί να το διαπεράσει, έτσι για πακέτα υψηλού ρεύματος πρέπει να συνδέσουμε παράλληλα τα κελιά. Το ρεύμα μίας μπαταρίας ορίζεται ως το άθροισμα των ρευμάτων που διέρχονται από τα μεμονωμένα κελιά που συνδέονται παράλληλα. Εάν όλα τα ρεύματα θεωρηθούν ίσα τότε έχουμε αυτό ότι :

$$I_{\text{pack}} = N_p \times I_{\text{cell}} \quad (13)$$

όπου η τοπολογία της μπαταρίας συνδέει παράλληλα τα κύτταρα N_p . Η βέλτιστη επιλογή της τοπολογίας των μπαταριών είτε σε σειρά είτε παράλληλα επιλέγεται προκειμένου να επιτευχθεί η απαίτηση σχεδιασμού μέγιστης ισχύος των συστοιχιών μπαταριών, η οποία καθορίζεται κατά κύριο λόγο από οικονομικούς παράγοντες και παράγοντες ασφάλειας. Οι ομάδες μονάδων που ονομάζονται κυψέλες συνήθως σχεδιάζονται για να έχουν μέγιστη τάση μικρότερη από 50 V για ασφάλεια, δεύτερον για την συνολική τάση της μπαταρίας η οποία πρέπει να διατηρείται γενικά σε λιγότερο από 600 V διότι τα ηλεκτρονικά ισχύος που λειτουργούν σε υψηλότερες τάσεις είναι προς το παρόν πολύ ακριβά (SICs, GANs). Μέσα σε αυτές τις ευρείες τάσεις, όταν σχεδιάζετε για να ικανοποιήσετε μια απαίτηση ζήτησης ισχύος, οι υψηλότερες τάσεις τείνουν να προτιμώνται από τα υψηλότερα ρεύματα για την ελαχιστοποίηση των απωλειών αντίστασης ισχύος τόσο στην καλωδίωση όσο και στην εσωτερική αντίσταση που έχει η μπαταρία (υπολογίζεται ως $i^2 \text{ pack} \times R$). Αυτό επιτρέπει επίσης τη χρήση καλωδίων με μικρότερη διάμετρο (και χαμηλότερο κόστος) ως κλίμακα απώλειας ισχύος με το τετράγωνο ρεύματος έναντι γραμμικά μόνο με αντίσταση. (Εικόνα 21) [5][24],[25]

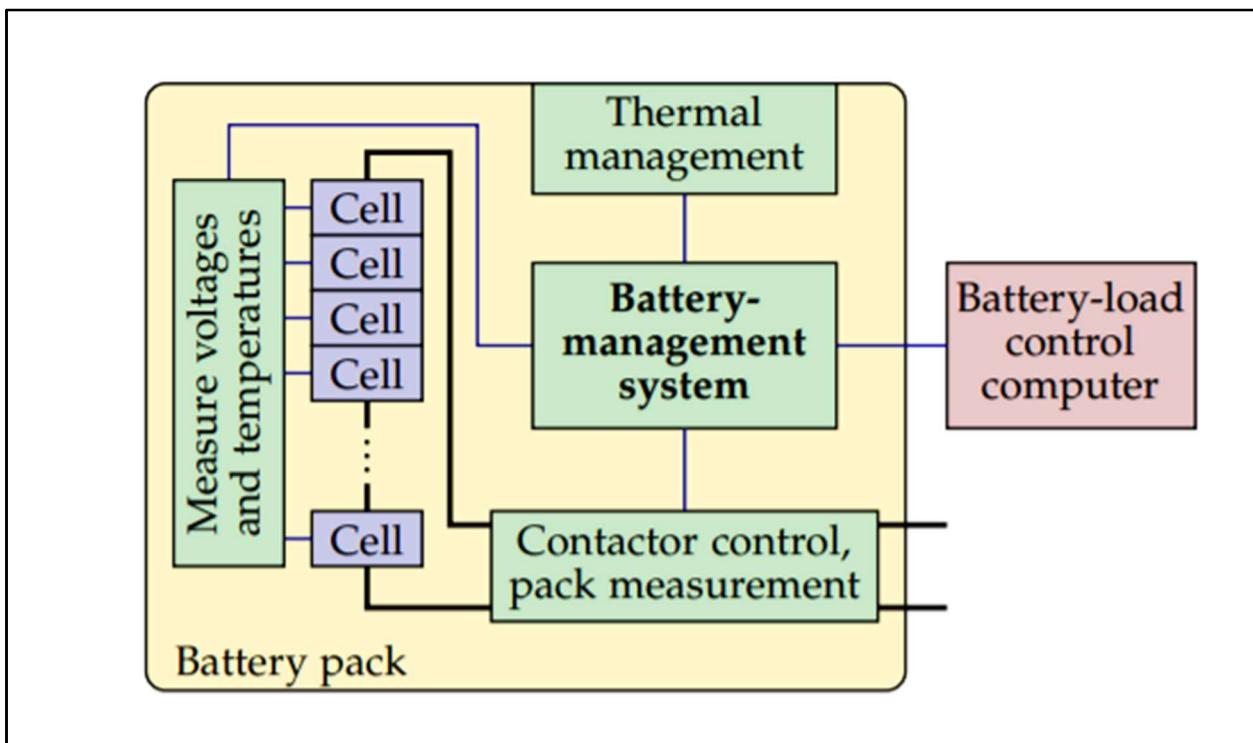
Ο σχεδιασμός της μπαταρίας είναι συχνά τμηματικός. Δηλαδή πρώτα δημιουργείται και βελτιστοποιείται μία μικρή ομάδα κελιών και έπειτα μεταβαίνουμε σε σύνδεση συστοιχιών σε σειρά ή παράλληλα, προκειμένου να επιτύχουμε τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της μπαταρίας μας. Αυτό μας επιτρέπει να μπορούμε να επαναχρησιμοποιησουμε ένα συγκεκριμένο σχεδιασμό μπαταριών που έχουμε επιλέξει. Στην παρακάτω (Εικόνα 21) παρατηρούμε μόνο τις δύο ακραίες περιπτώσεις. Αρχικά παρατηρούμε το σύστημα παράλληλων κυψελίδων (PCM) στο οποίο τα κελιά είναι παράλληλα μεταξύ τους. Στο πρώτο σχήμα βλέπουμε ότι η συστοιχία δημιουργεί μία μπαταρία που απαρτίζεται από 300 κελιά εκ των οποίων συνδέονται ανά τρία παράλληλα μεταξύ τους και έπειτα σε σειρά με την επόμενη τριάδα. Έπειτα βλέπουμε το σύστημα στο οποίο οι κυψελίδες είναι σε σειρά (SCM) μεταξύ τους γίνεται σύνδεση παράλληλα μεταξύ τους. Μπορούμε να σχεδιάσουμε πακέτα μπαταριών και σύστημα διαχείρισης μπαταριών για οποιαδήποτε προσέγγιση. Τις περισσότερες φορές, ωστόσο, χρησιμοποιούμε κάτι ανάμεσα σε αυτά τα πλαίσια. Για παράδειγμα, μία μονάδα 3P6S έχει δεκαοκτώ κελιά διαμορφωμένα με τρία κελιά ενσύρματα παράλληλα και έξι κελιά σε σειρά. Η ισχύς και η ενέργεια της μονάδας είναι και οι δύο περίπου δεκαοκτώ φορές.



(Εικόνα 21: Δύο διαφορετικές προσεγγίσεις υπάρχουν προκειμένου να διαμορφώσουμε συστοιχίες μπαταριών (π.χ 300 κελιά). Ονομάζονται παράλληλη συστοιχία κελιών(PCM) και σε σειρα συστοιχία κελιών(SCM)[24]).

3.3 Χαρακτηριστικά Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας (Battery Management System)

Στην παρακάτω (Εικόνα 22) βλέπουμε όλα τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας (BMS). Αυτά περιλαμβάνουν την μπαταρία που μέσα της περιέχει όλες τις συστοιχίες κελιών, τα ηλεκτρονικά συστήματα που περιλαμβάνουν τα αισθητήρια και τα υπολογιστικά συστήματα αυτόματου ελέγχου καθώς και σύστημα θερμικής διαχείρισης. Τα ηλεκτρονικά μπορούν να υλοποιηθούν και σε ολοκληρωμένο κύκλωμα-μονολιθικό σχέδιο είτε μπορούν να υπάρχουν σαν ξεχωριστά στοιχεία που έχουν διαφορετική λειτουργικότητα και είναι κατανεμημένα σε ολό το σύστημα της μπαταρίας. Για παράδειγμα, το παρών σχέδιο δείχνει τα στοιχεία ανίχνευσης τάσης και θερμοκρασίας κελιών ως διακριτά από την ανίχνευση και τον έλεγχο της συσκευασίας και από τη συνολική διαχείριση της μπαταρίας, όλα μέσα στα όρια μιας συνολικής μπαταρίας, η οποία σχεδιάζεται ως το κίτρινο μπλοκ-σύστημα. Σε ένα ηλεκτρικό όχημα, ο υπολογιστής ελέγχου του φορτίου της μπαταρίας είναι και ο συνολικός ελεγκτής οχήματος (Electronic Control Unit - ECU). Σε άλλες εφαρμογές, ο αντίστοιχος ελεγκτής θα ήταν διασυνδεδεμένος. [20],[24]



(Εικόνα 22: Εσωτερικά χαρακτηριστικά συστήματος διαχείρισης ενέργειας. [24])

Ανεξάρτητα από την τοπολογία που έχει το ηλεκτρονικό σύστημα οι λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος διαχείρισης ενέργειας μπορούν να χωριστούν σε (5) :

1. Έλεγχος μετρήσεων και υψηλών τάσεων : Το σύστημα διαχείρισης πρέπει να μετράει σε πραγματικό χρόνο τις τάσεις στα άκρα των κελιών, την θερμοκρασία τους καθώς και το ρεύμα που τις διαρρέει. Επιπλέον πρέπει να φροντίζει να ανιχνεύει άμεσα σφάλματα και να μπορεί να αποσυνδέσει το κύκλωμα σε περίπτωση κινδύνου.
2. Προστασία : Το BMS σύστημα πρέπει να περιλαμβάνει ηλεκτρονικά τα οποία διασφαλίζουν για την ασφάλεια του χρήστη όπως και της μπαταρίας σε περιπτώσεις υπερ-φόρτισης, υπερ-αποφόρτισης, υπερβολικού ρεύματος, βραχυκυκλώματος καθώς και ακραίων θερμοκρασιών.
3. Σύστημα Διασύνδεσης-Επικοινωνίας : Το σύστημα πρέπει τακτικά να επικοινωνεί με την εφαρμογή και να διασφαλίζει ότι η μπαταρία λειτουργεί και έχει την επιθυμητή κατάσταση η οποία έχει προκαθοριστεί από τον χρήστη. Θα πρέπει συγκεκριμένα να αναφέρει την διαθέσιμη τιμή της ενέργειας, της ισχύς καθώς και άλλους δείκτες που θεωρούνται χρήσιμοι για να γνωρίζουμε την παρούσα κατάσταση της μπαταρίας.
4. Διαχείριση των Επιδόσεων : Το σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να εκτιμήσει την κατάσταση φόρτισης (State Of Charge - SOC) για όλα τα κελιά της μπαταρίας ξεχωριστά και να υπολογίσει τα διαθέσιμα όρια ενέργειας και ισχύος. Τέλος θα πρέπει να μπορεί να ισορροπήσει τις τάσεις μεταξύ των κελιών.
5. Διαγνωστικό Πρόγραμμα : Το BMS πρέπει να είναι σε θέση να εκτιμήσει την κατάσταση υγείας (State Of Health - SOH), καθώς και την εκτίμηση διάρκειας ζωής (State Of Life - SOL) των κελιών της μπαταρίας.

3.4 Μετρήσεις Συστήματος Μπαταρίας

3.4.1 Μέτρηση Τάσης

Σε μία μπαταρία η οποία αποτελείται από κελιά ιόντων-λιθίου θα πρέπει να μετριούνται όλες οι μεμονωμένες τάσεις στα άκρα των κελιών. Η μέτρηση αυτή μπορεί να αποτελεί μία από τις κύριες μεταβλητές εισόδου του συστήματος SOH και SOC και των αλγορίθμων που τα αποτελούν. Μέτρηση τάσης η οποία βρίσκεται εκτός ορίων δίνει ώς σήμανση τα σοβαρά προβλήματα που μπορούν να επηρεάσουν τόσο στην ζωή των μπαταριών καθώς και της ασφάλειας τους. Για παράδειγμα, η υπερφόρτιση ενός κελιού λιθίου μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες εσωτερικές χημικές αντιδράσεις που μπορούν υποβαθμίσουν την απόδοση του κελιού. Η υπερφόρτιση μπορεί να προκαλέσει μια ακολουθία συμβάντων που μπορούν να οδηγήσουν ακόμα και σε βραχυκύκλωμα των κελιών. Σε ακραίες περιπτώσεις, οποιοδήποτε από αυτά τα συμβάντα μπορεί να προκαλέσει θερμική διαφυγή, όπου η θερμότητα που παράγεται από την αντίδραση στο εσωτερικό του κελιού ή το βραχυκύκλωμα να επιταχύνει τους μηχανισμούς αστοχίας, με αποτέλεσμα την πυρκαγιά της μπαταρίας ή ακόμα και να οδηγήση σε έκρηξη. Επιπλέον δεν μπορούμε να υποθέσουμε ότι όλα τα κελιά έχουν ταυτόχρονα την ίδια τάση και έτσι δεν μπορούμε να παραλείψουμε τη μέτρηση τάσης σε ένα κελί ιόντων λιθίου. Ορισμένοι σχεδιαστές πυριτίου όπως Analog Devices, STMicroelectronics, Texas Instruments, Microchip, NXP, Renesas, έχουν βοηθήσει τον σχεδιαστή ηλεκτρονικών συσκευών BMS σχεδιάζοντας ολοκληρωμένα κυκλώματα (Integrated Circuits - ICs) που μπορούν να βοηθήσουν στη μέτρηση της τάσης των κελιών. Πρόκειται για συσκευές χαμηλού κόστους με ελάχιστη ή καθόλου επεξεργασία και παρέχουν δυνατότητες γενικού σκοπού. Εφαρμόζουν τη δύσκολη εργασία μέτρησης αναλογικών τάσεων με υψηλή ακρίβεια, υψηλή απόρριψη και γρήγορη απόκριση σε περιβάλλοντα υψηλής ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (EMI), υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής δύνησης, όπως

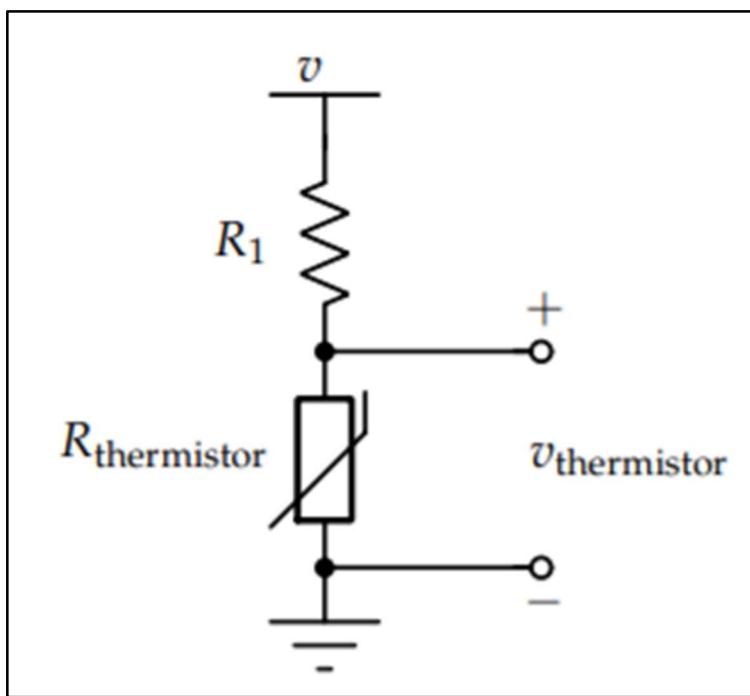
συναντώνται σε μια εφαρμογή οχημάτων. Ένα ενιαίο IC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση των τάσεων ενός αριθμού κελιών που συνδέονται σε σειρά, και δύο Ολοκληρωμένα κυκλώματα (ICs) μπορούν συχνά να τοποθετηθούν παράλληλα για σχεδιασμούς οι οποίοι είναι ανθεκτικοί σε σφάλματα.

3.4.2 Μέτρηση Θερμοκρασίας

Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω το σύστημα της μπαταρίας εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία η οποία αναπτύσσεται σε αυτή και έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής της αντίστασης. Πρέπει να γνωρίζουμε λοιπόν τη θερμοκρασία των κελιών για να μπορούμε να προβλέψουμε την μελλοντική απόδοση της. Ένα σύστημα BMS πρέπει να μπορεί να μετράει τη θερμοκρασία για να ελέγχει το σύστημα θερμικής διαχείρισης και να διατηρεί τις θερμοκρασίες της μπαταρίας σε μια ασφαλή περιοχή. Στην ιδανική περίπτωση, θα μετρήσουμε την εσωτερική θερμοκρασία κάθε κελιού ξεχωριστά. Ωστόσο, τα κελιά δεν παράγονται μαζικά με ενσωματωμένους αισθητήρες θερμοκρασίας, επομένως πρέπει να βασιστούμε σε μετρήσεις εξωτερικών θερμοκρασιών των κελιών. Επιπλέον, καθώς υπάρχει ένα κόστος ανά αισθητήρα, (NTCs) θα θέλαμε να ελαχιστοποιήσουμε τον συνολικό αριθμό των απαιτούμενων αισθητήρων. Με ένα ακριβές θερμικό μοντέλο, μπορούμε να τοποθετήσουμε έναν περιορισμένο αριθμό αισθητήρων θερμοκρασίας οι οποίοι θα βρίσκονται εξωτερικά σε ένα ή περισσότερα κελιά ανά μονάδα και στη συνέχεια να εκτιμήσουμε τις εσωτερικές θερμοκρασίες όλων των κυψελών.

3.4.3 Μέτρηση Θερμοκρασίας με Χρήση NTC

Το κύριο μαζικής παραγωγής αισθητήριο μέτρησης θερμοκρασίας είναι το NTC (Negative Temperature Coefficient). Όπως γνωρίζουμε όλες οι αντιστάσεις μεταβάλλονται με τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Ένα θερμίστορ είναι φτιαγμένο προκειμένου να εκμεταλλεύεται αυτές τις διακυμάνσεις. Η αντίσταση στα NTCs λειτουργεί αντίστροφα με την θερμοκρασία ενώ τα θερμίστορ (PTCs) έχουν αντίσταση η οποία λειτουργεί άμεσα σε σχέση με την θερμοκρασία. Προκειμένου να μετρήσουμε την αντίσταση θα κάνουμε χρήση κυκλώματος διαιρέτη τάσης, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 23).



(Εικόνα 23: Κύκλωμα διαιρέτη τάσης για την μέτρηση θερμοκρασίας του αισθητήρα NTC. [24])

Οι τύποι που διέπουν το κύκλωμα για τον υπολογισμό ρεύματος και τάσης είναι οι εξής:

$$I = \frac{V}{R1 + R_{Thermistor}} \quad (14)$$

Όπου $V_{Thermistor} = I * R_{Thermistor}$ (15)

$$V_{Thermistor} = \frac{R_{Thermistor}}{R1 + R_{Thermistor}} * V \quad (16)$$

Η τιμή της $R1$ έχει επιλεχθεί έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια ισχύος από το κύκλωμα του αισθητήρα, ενώ ταυτόχρονα παρέχει πιο χρήσιμο εύρος στις μετρήσεις του $V_{Thermistor}$.

Η γενική εξίσωση που διέπει το σύστημα και μειώνει το σφάλμα της μέτρησης της θερμοκρασίας είναι η εξίσωση Stein Hart και Hart.

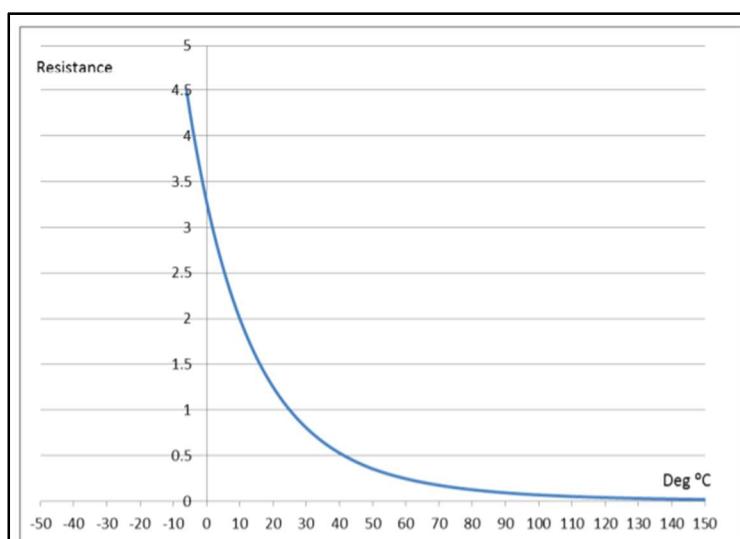
$$T = \frac{1}{a + b (\ln RT / R25) + c b (\ln RT / R25)^2 + d (\ln RT / R25)^3} \quad (17)$$

T: Η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin.

R: Η αντίσταση στο αισθητήριο, η οποία μετράται σε Ohms.

C: Είναι οι συντελεστές Steinhart – Hart, οι οποίοι ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο και το μοντέλο του θερμίστορ και το εύρος θερμοκρασίας που ενδιαφέρει.[24],[25],

Συγκεκριμένα στην εφαρμογή μας θα χρησιμοποιήσουμε το NTC με κωδικό : PANR 103395-408 το οποίο έχει ως πίνακα X.X[6] γραφήματος το εξής:



(Πίνακας 3: Θερμοκρασία - Καμπύλη Αντίστασης PANR 103395-408)

Με αποτελέσματα μεταβλητών :

R_T / R_{25} Range	a	b	c	d
3.279 – 66.97	3.357296E-03	2.508334E-04	4.189372 E-06	-6.240867E-08
0.3507-3.363	3.354016E-03	2.541522 E-04	3.730922 E-06	-7.881561E-08
0.0637-0.3507	3.361395E-03	2.582266 E-04	5.885012 E-07	-2.823586 E-08
0.0169-0.0637	3.351295E-03	2.500181 E-04	-1.7255607 E-07	-4.356943 E-08

(Πίνακας 4: Συντελεστές Steinhart – Hart)

Electrical Specifications

Resistance @ 25° C	10 kΩ ±5%
Isolation Voltage between Lead and Lug	2500 VAC
Operating Temperature Range	-50 °C to 150 °C
Dissipation Constant	8 mW / °C
Thermal Time Constant	10 seconds
Material Constant (Beta)	3950 °K ±1%
ROHS Compliant	Yes
MSL (moisture sensitivity level)	2

(Πίνακας 5: Προδιαγραφών PANR 103395-408)

3.4.4 Μέτρηση Ρεύματος

Ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας θα πρέπει να μπορεί να μετρήσει το ρεύμα που διαρρέει την μπαταρία. Επιπλέον ένας λόγος που θα πρέπει να μετράμε το ρεύμα που την διαρρέει είναι προκειμένου να το αποθηκεύσουμε σαν είσοδο στο BMS μας διότι αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές μεταβλητές για να καθορίσουμε το SOC και SOH μέσο των υπολογιστικών μας αλγορίθμων. Υπάρχουν τέσσερα ηλεκτρονικά στοιχεία τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να πάρουμε μετρήσεις ρεύματος: Αισθητήρες ρεύματος Shunts, Hall Effect, Μετασχηματιστές ρεύματος καθώς και Rogowski πηνία. Παρακάτω θα αναλύσουμε συνοπτικά το καθένα, αν και στην εφαρμογή μας καταλήγουμε να χρησιμοποιήσουμε αισθητήρα ρεύματος shunt λόγω κόστους και εύκολης εγκατάστασης.

3.5 Αισθητήρια

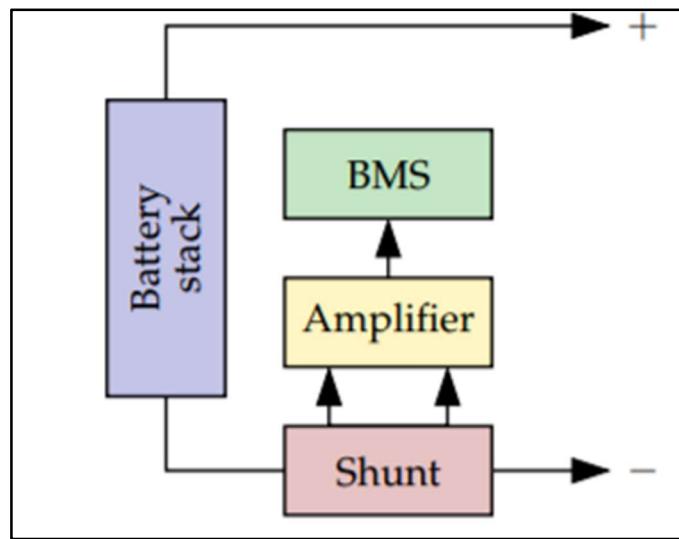
3.5.1 Current Shunt Αισθητήριο

Ένα αισθητήριο current shunt είναι μία αντίσταση (R-Shunt) πολύ χαμηλής τιμής (π.χ 0.1mΩ) και υψηλής ακριβείας, η οποία τοποθετείται σε σειρά με την μπαταρία και συνήθως στον αρνητικό της πόλο. Η πτώση τάσης στα άκρα του αισθητήρα (V-Shunt) μετριέται από έναν κλασικό αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα σήματος (Analog-to-Digital Converter ADC). Προκειμένου να υπολογίσουμε το ρεύμα που το διαρρέει χρησιμοποιούμε τον τύπο του Ohm :

$$I - Shunt = \frac{V - Shu}{R - Shu} \quad (18)$$

Εφόσον η αντίσταση που θα έχει το αισθητήριο θα είναι πολύ μικρή προκειμένου να αποφύγουμε μεγάλες απώλειες ενέργειας λόγω θερμότητας που θα εκλύει η αντίσταση, έτσι και η πτώση τάσης άκρα της θα είναι εξίσου μικρή. Για αυτό το λόγο πρίν μετρηθεί από τον μικροελεγκτή μας συνήθως πρώτα εισέρχεται ως είσοδος σε έναν ενισχυτή για να αυξήσει την τιμή στο εύρος που μπορεί να μετρήσει ο

μικροελεγκτής. Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε που συνήθως τοποθετούμε ένα current shunt στο κύκλωμα διαχείρισης ενέργειας (Εικόνα 24) καθώς και μία τυπική (Εικόνα 25) αισθητήριων ρεύματος.



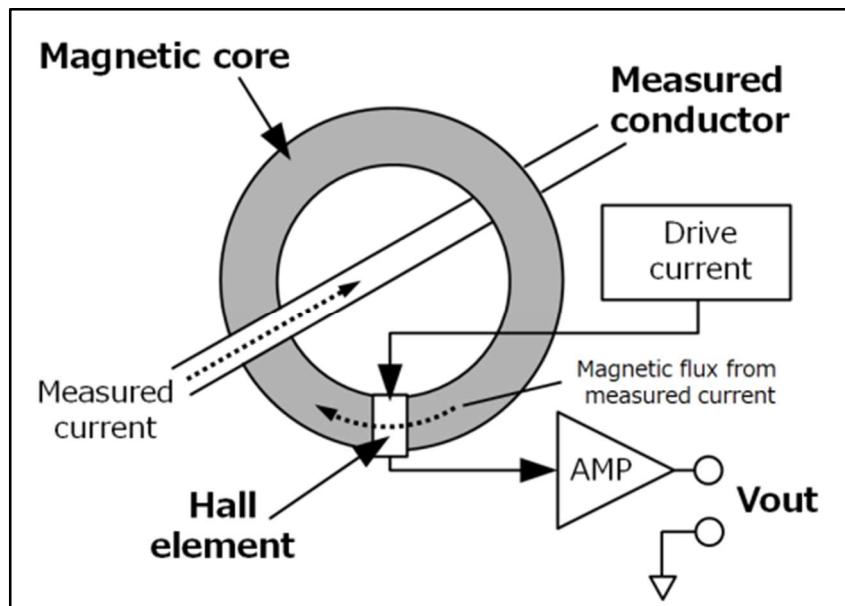
(Εικόνα 24: Τυπικό σχεδιάγραμμα BMS το οποίο κάνει χρήση αισθητήρα μέτρησης ρεύματος current shunt [24])



(Εικόνα 25: Αισθητήρια ρεύματος current shunts υψηλής ισχύος. riedon.com. Available at: <https://riedon.com/resistors/view/dc-current-shunt-rs> [Accessed 14 Apr. 2021].)

3.5.2 Hall Effect Αισθητήριο

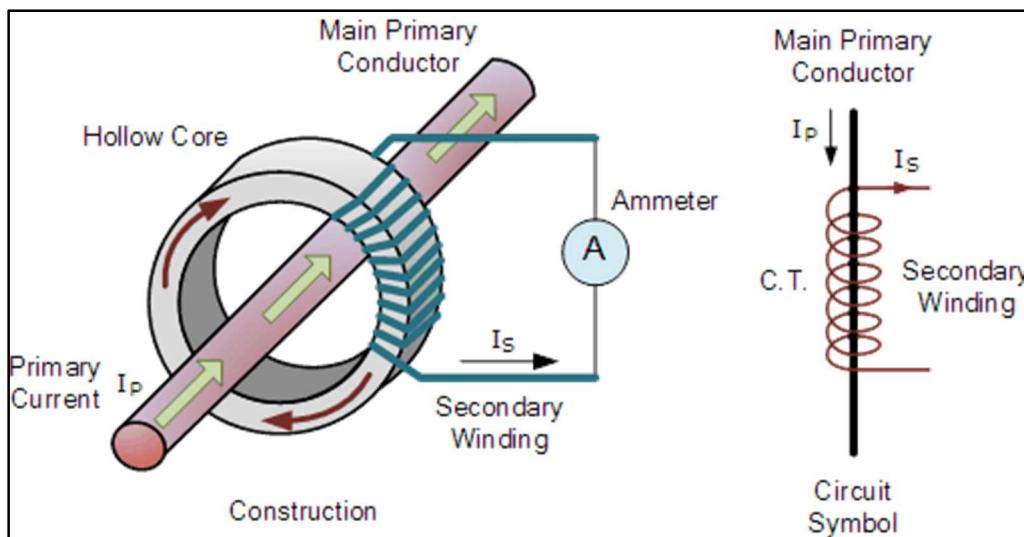
Οι αισθητήρες Hall Effect μπορούν να μετρήσουν το ρεύμα που διαρρέει ένα κύκλωμα με χρήση μαγνητικής επαγωγής (Εικόνα 26) Ουσιαστικά η τάση εξόδου είναι ευθέως ανάλογη με την ισχύ που έχει το μαγνητικό πεδίο. Το κύριο πλεονέκτημα αυτών των αισθητήρων είναι η απομόνωση που έχουν από το κυρίως κύκλωμα της μπαταρίας που είναι υψηλης ισχύος. Με αποτέλεσμα να μην αυξάνεται το κόστος για περαιτέρω ειδικό κύκλωμα απομόνωσης. Ένα όμως συχνό πρόβλημα των Hall Effect είναι η μετατόπιση μέτρησης του ρεύματος στο μηδενικό ρεύμα η οποία αυξάνεται συνήθως με την πάροδο του χρόνου και με τις διαφορές θερμοκρασίας. Ωστόσο μπορεί να μηδενιστεί με σωστή χρήση λογισμικού (μπορεί να μηδενίζεται όταν το ρεύμα είναι σίγουρα μηδέν, δηλαδή όταν η επαφή που κλείνει το κύκλωμα μας είναι ανοιχτή, άρα και δεν το διαρρέει ρεύμα). Με αυτό τον τρόπο συχνά μπορεί το BMS να κάνει καλιμπράρισμα.



(Εικόνα 26: Τυπική εικόνα συστήματος αισθητήρα. Hall Effect [online]. Available at: <https://www.hioki.com/file/cmw/hdUseGuideDetailEn/201/pdf1/?action=browser> [Accessed 15 Apr. 2021].)

3.5.3 Μετασχηματιστής Ρεύματος

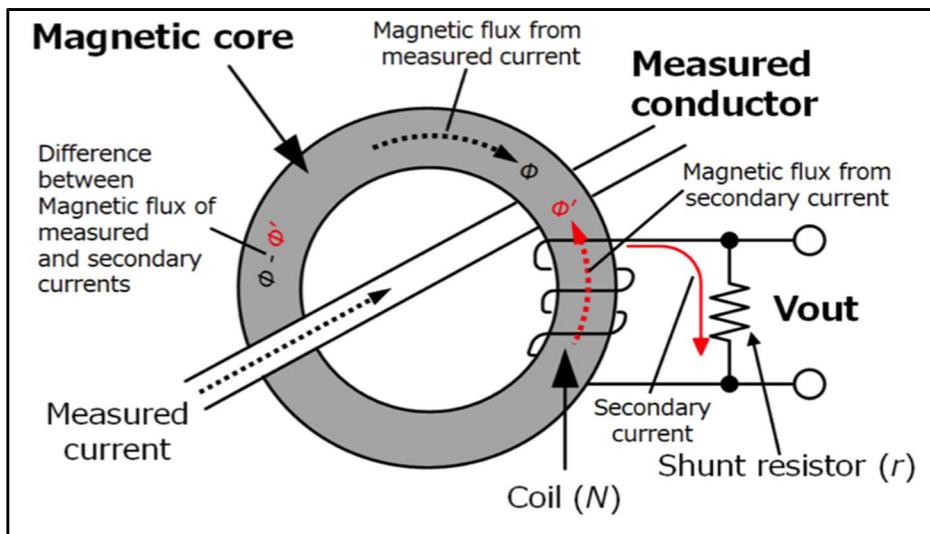
Ο μετασχηματιστής ρεύματος (Current Transformer - CT) μετατρέπει το πρωτεύον ρεύμα σε μικρότερης έντασης στο δευτερεύον πηνίο του. Το αισθητήριο CT αποτελεί έναν από τους πιο συχνούς αισθητήρες μέτρησης ρεύματος διότι μπορεί να μετρήσει υψηλά ρεύματα με πάρα πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας. Λόγω του μαγνητικού ρεύματος που αναπτύσσεται σε αυτούς συνήθως έχουν μία μικρή μετατόπιση φάσης της τάξεως 0.1° - 0.3° . Για αυτό το λόγω χρειάζεται πάντα να είναι καλιμπραρισμένο πάνω στην εφαρμογή μας προκειμένου να μην λάβει λάθος μετρήσεις σε χαμηλά φορτία. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι το υλικό που έχει κατασκευαστεί ο πυρήνας το οποίο είναι φερρίτης μπορεί να πάθει κορεσμό σε υψηλά ρεύματα. Εάν αυτό συμβεί και μαγνητιστεί ο πυρήνας θα αυξηθεί η υστέρηση μετρήσεις που έχει και θα λαμβάνουμε λάθος μετρήσεις.



(Εικόνα 27: Τυπικό κύκλωμα ενός μετασχηματιστή ρεύματος CT. Basic Electronics Tutorials. (2018). Current Transformer Basics and Current Transformer Theory. [online] Available at: <https://www.electronics-tutorials.ws/transformer/current-transformer.html>.)

3.5.4 Πηνίο Rogowski

Στην πιο απλή του μορφή ένα πηνίο Rogowski είναι ένα πηνίο ομοιόμορφα τυλιγμένο N στροφών ανα μέτρο πάνω σε ένα μη μαγνητικό υλικό διατομής A. Ουσιαστικά μετράμε το μαγνητικό πεδίο που παράγει το ρεύμα του αγωγού που περιβάλλει το αισθητήριο Rogowski, στο οποίο δημιουργεί μία επαγόμενη τάση η οποία είναι ανάλογη με τον ρυθμό μεταβολής του ρεύματος που μετράμε. Με την προϋπόθεση ότι το πηνίο αποτελεί κλειστό βρόχο χωρίς ασυνέχειες.



(Εικόνα 28: Αρχή λειτουργίας του πηνίου Rogowski.

[www.google.com. \(n.d.\). Redirect Notice. \[online\] Available at: https://www.google.com/url?q=https://www.hioki.com/en/products/listUse/?category%3D17&sa=D&source=editors&ust=1621085221344000&usg=AOvVaw2ecPCsFxGtdlBHvee7QzyD \[Accessed 15 May 2021\].\)](https://www.google.com/url?q=https://www.hioki.com/en/products/listUse/?category%3D17&sa=D&source=editors&ust=1621085221344000&usg=AOvVaw2ecPCsFxGtdlBHvee7QzyD)

3.5.5 Σύνοψη Αισθητήρων Μέτρησης Ρεύματος

Όταν νέες τεχνολογίες όπως τα ηλεκτρικά οχήματα τείνουν να καταναλώνουν μεγαλύτερη ενέργεια τόσο υπάρχει αυξημένη ανάγκη για βέλτιστοποίηση και ακρίβεια στην μέτρηση του ρεύματος του συστήματος τους. Το πηνίο Rogowski αποτελεί κορυφαία τεχνολογία σε πολύ υψηλές μετρήσεις ρεύματος. Συνδυάζει ευρύτερη απόδοση φάσματος και αξιοπιστία σε σχέση με τους CT και Hall Effect αισθητήρες. Ωστόσο είναι μια πολύ πιο ακριβή λύση. Στην περίπτωση της εφαρμογής μας το βέλτιστο αισθητήριο είναι το Current Shunt το οποίο είναι και πάρα πολύ φθηνό σε κόστος σε σχέση με τα άλλα, καθώς και παρέχει αρκετά καλή ακρίβεια για την εφαρμογή μας. Παρακάτω βλέπουμε ενδεικτικά έναν (Πίνακας 6) σύγκρισης των αισθητήρων με τα θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά τους.

Τεχνολογία	Current Shunt	Hall Effect	Μετασχηματιστής Ρευματος	Rogowski Πηνίο
Κόστος	Πολύ Χαμηλό	Υψηλό	Μέτριο	Χαμηλό
Εύρος γραμμικότητας της μέτρησης	Πολύ Καλό	Κακό	Καλό	Πολύ Καλό
Δυνατότητα μέτρησης υψηλού ρεύματος	Πολύ Κακή	Καλή	Καλή	Πολύ Καλή
Κατανάλωση ρεύματος	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Χαμηλή
Κορεσμός υψηλού ρεύματος DC	Όχι	Ναι	Ναι	Όχι

Μεταβολές μέτρησεων με διακυμάνσεις στην θερμοκρασία	Μέτριες	Υψηλές	Χαμηλές	Χαμηλές
Πρόβλημα μετατόπισης σε ρεύματα DC	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι
Πρόβλημα υστέρησης μέτρησης	Όχι	Ναι	Ναι	Όχι

(Πίνακας 6: Ενδεικτικός πίνακας σύγκρισης αισθητήρων ρεύματος. [30])

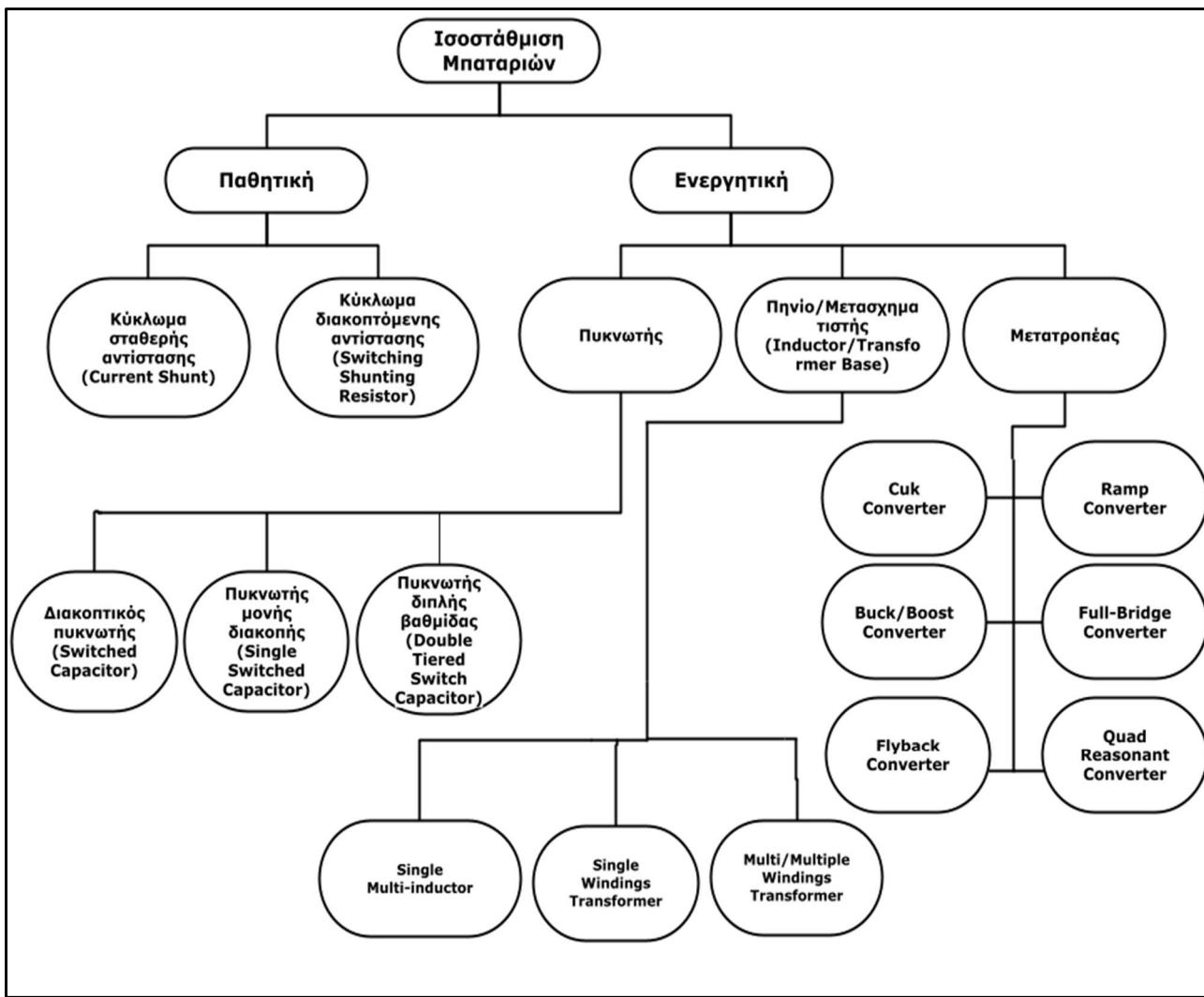
3.6 Μέτρηση Εσωτερικής Αντίστασης Μπαταρίας

Η μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την κατάσταση της μπαταρίας και τον κύκλο ζωής της. Θα πρέπει λοιπόν να υπολογίσουμε τόσο την αντίσταση R όσο και την σύνθετη αντίσταση Z η οποία περιλαμβάνει στοιχεία όπως τα πηνία και τους πυκνωτές. Το φυλλάδιο που παρέχει ο κατασκευαστής των μπαταριών INR-21700-40T δίνει ονομαστική εσωτερική αντίσταση $\leq 20m\Omega$. Έπειτα από μέτρηση που έγινε με χρήση ψηφιακού παλμογράφου, γεννήτρια κυματομορφών και πολύμετρου κατέληξα στην ίδια τιμή με αυτή που μας παρέχει ο κατασκευαστής με μία μικρή απόκλισης της τάξεως $\leq 20m\Omega \pm 0.1m\Omega$.

3.7 Μέθοδοι Ισοστάθμισης Μπαταριών

Η ισοστάθμιση των μπαταριών είναι απαραίτητη σε πληθώρα εφαρμογών όπου έχουμε συχνή φόρτιση ή και μεγάλο πλήθος συστοιχιών μπαταριών. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μεθοδολογίες ισοστάθμισης των μπαταριών στην βιβλιογραφία και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Στατικές μέθοδοι : Μέθοδοι οι οποίες εκτελούνται πριν την συστοιχία των μπαταριών είτε δεν τις ελέγχει το BMS.
- Δυναμικές μέθοδοι : Μέθοδοι οι οποίες μπορούν να ελεγχθούν άμεσα από το BMS και διαχωρίζονται σε ενεργές και παθητικές.



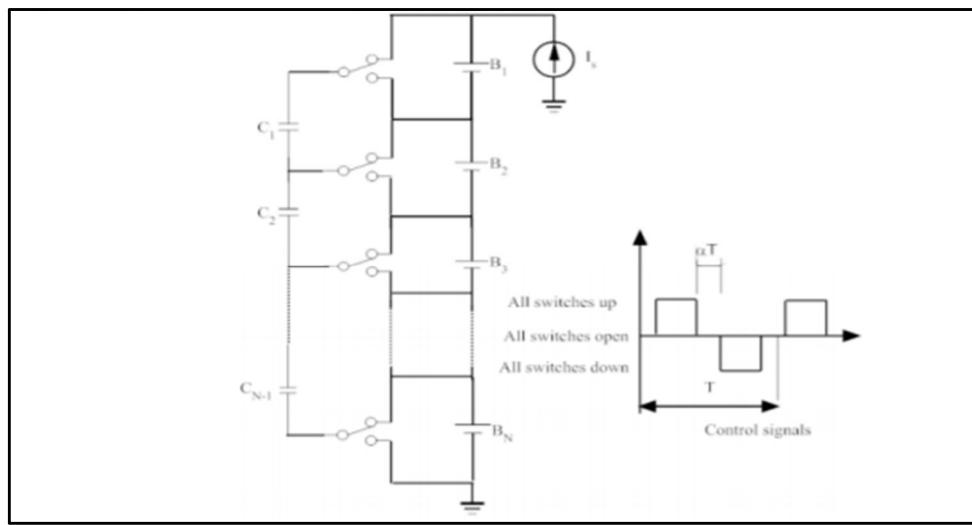
(Εικόνα 29: Ενδεικτικός πίνακας μεθόδων ισοστάθμισης μπαταριών.)

3.8 Μέθοδοι Ενεργητικής Ισοστάθμισης

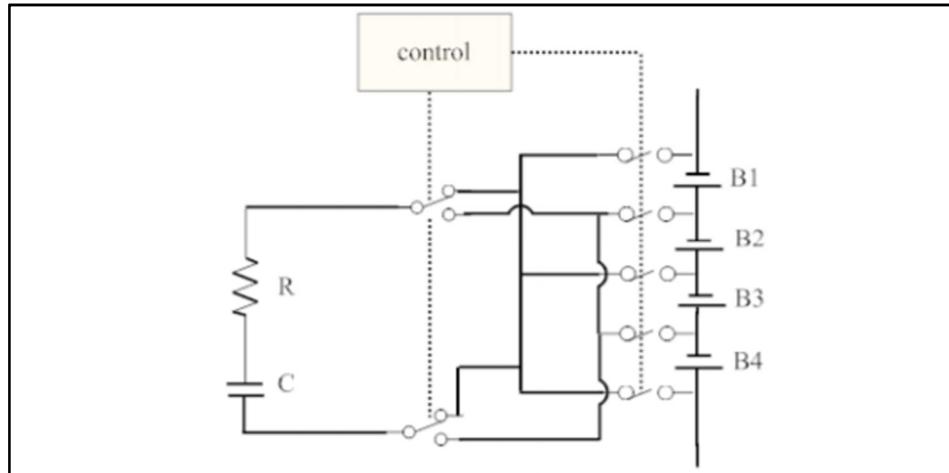
Η μέθοδος της ενεργητικής ισοστάθμισης μεταφέρει το πλεόνασμα ενέργειας ενός κελιού σε ένα άλλο έτσι ώστε όλα να είναι ισοσταθμισμένα στην ίδια τάση. Υπάρχει μεγάλο εύρος μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να το καταφέρουμε αυτό με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες ενέργειας. Παρακάτω παρατίθενται οι πιο βασικές μέθοδοι ενεργητικής ισοστάθμισης.

3.8.1 Χρήση Πυκνωτών

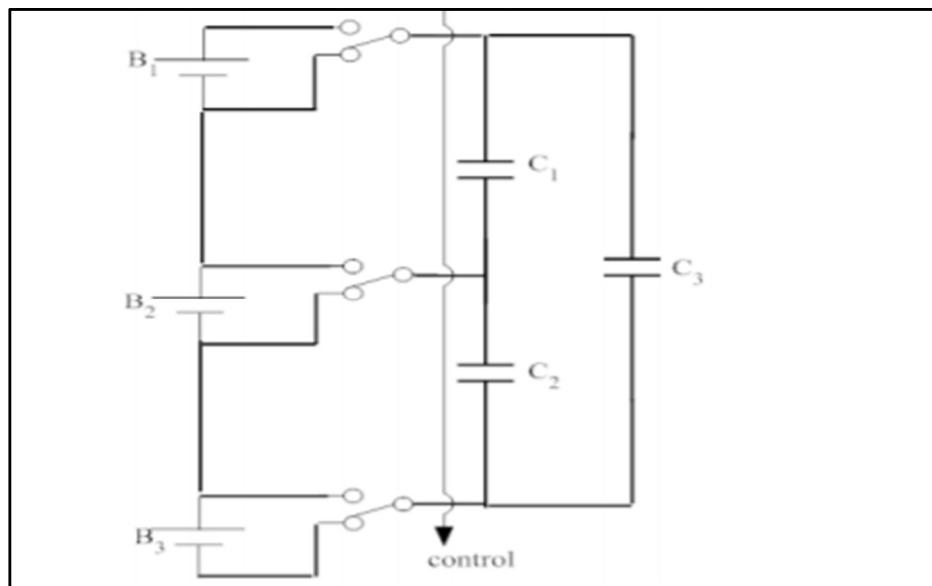
Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν τους πυκνωτές ως κύριο στοιχείο προκειμένου να αποθηκεύσουν την ενέργεια των κελιών που έχουν υψηλότερη τάση σε σχέση με άλλα της συστοιχίας είναι τρεις. Η πρώτη κάνει χρήση πυκνωτών και διακοπών δύο θέσεων οι οποίοι όταν ενεργοποιούνται, ενεργοποιούν το κύκλωμα στον παράλληλο πυκνωτή προκειμένου να φορτιστεί και έπειτα να αποφορτιστή στα κελιά τα οποία έχουν μειωμένη τάση (Εικόνα 30). Μία κλασική παραλλαγή του κυκλώματος είναι η χρήση πολλών διακοπών που όταν ενεργοποιούνται φορτίζουν ένα μόνο πυκνωτή (Εικόνα 31) [7]. Τελευταία παραλλαγή του κυκλώματος είναι η χρήση πυκνωτών παράλληλα (Double-tiered switched capacitors), οι οποίοι έχουν την ίδια λειτουργία με τα παραπάνω κυκλώματα (Εικόνα 32). [8]



(Εικόνα 30: Κύκλωμα εξισορρόπησης ενέργειας συστοιχίας κελιών, με χρήση πυκνωτών και ελεγχόμενων διακοπτών. [31])



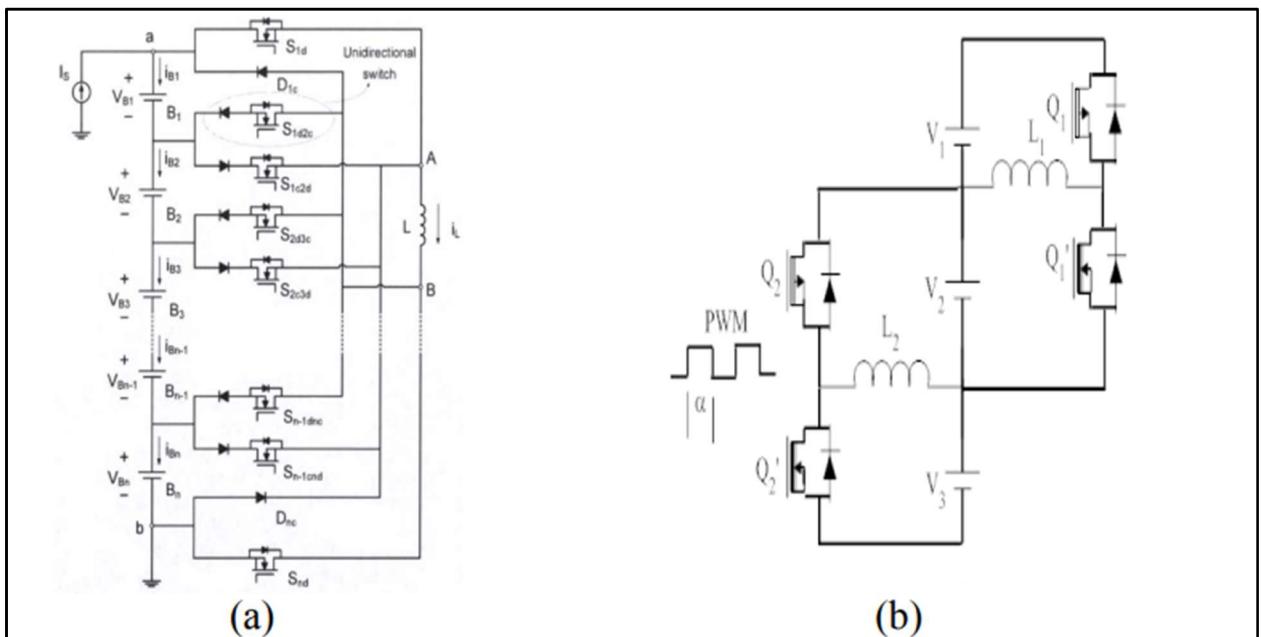
(Εικόνα 31: Κύκλωμα εξισορρόπησης ενέργειας συστοιχίας κελιών, με χρήση ενός πυκνωτή και ελεγχόμενων διακοπτών. [31])



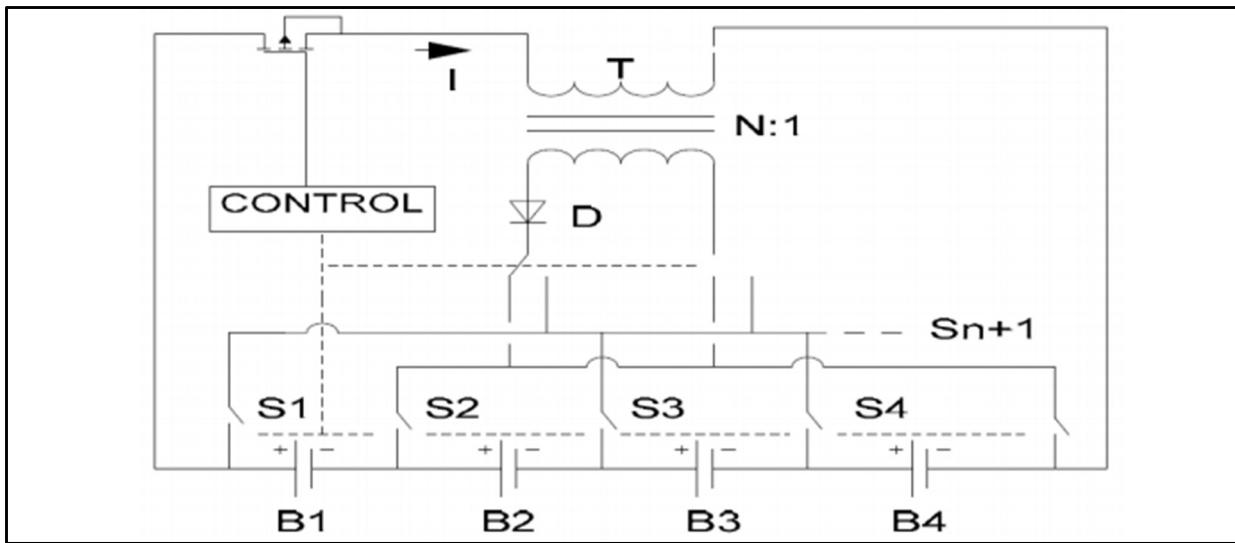
(Εικόνα 32: Κύκλωμα εξισορρόπησης ενέργειας συστοιχίας κελιών, με χρήση ενός πυκνωτών παράλληλων και ελεγχόμενων διακοπτών. [31])

3.8.2 Χρήση Πηνίου/Μετασχηματιστή

Η χρήση της μεθόδου αυτής διασφαλίζει γρηγορότερη μεταφορά της ενέργειας, άρα και πιο τάχιστη εξισορρόπηση της συστοιχίας. Το μειονέκτημα που έχουν αυτά τα κυκλώματα είναι το υψηλό κόστος λόγω των μετασχηματιστών. Επιπλέον λόγω της υψηλής συχνότητας μεταγωγής του κυκλώματος θα πρέπει παράλληλα σε κάθε μπαταρία να υπάρχει πυκνωτής HPF(High-Pass Filter) ο οποίος να φιλτράρει την υψηλή συχνότητα. Ενδεικτικά στις επόμενες (Εικόνες 33,34) βλέπουμε κυκλώματα που κάνουν την χρήση πηνίου/μετασχηματιστή και χρησιμοποιούν και άλλα στοιχεία προκειμένου να ελέγχουν το σύστημα. Στην (Εικόνα 33.b) γίνεται έλεγχος του κυκλώματος με χρήση διακοπτών που οδηγούνται από τον μικροελεγκτή με PWM(Pulse Width Modulation). Άλλη μία μέθοδος είναι αυτή του μετασχηματιστή μονής περιέλιξης η οποία μεταφέρει την ενέργεια από όλη την συστοιχία στα “αδύναμα” κελιά με την χρήση των διακοπτών (Εικόνα 34).



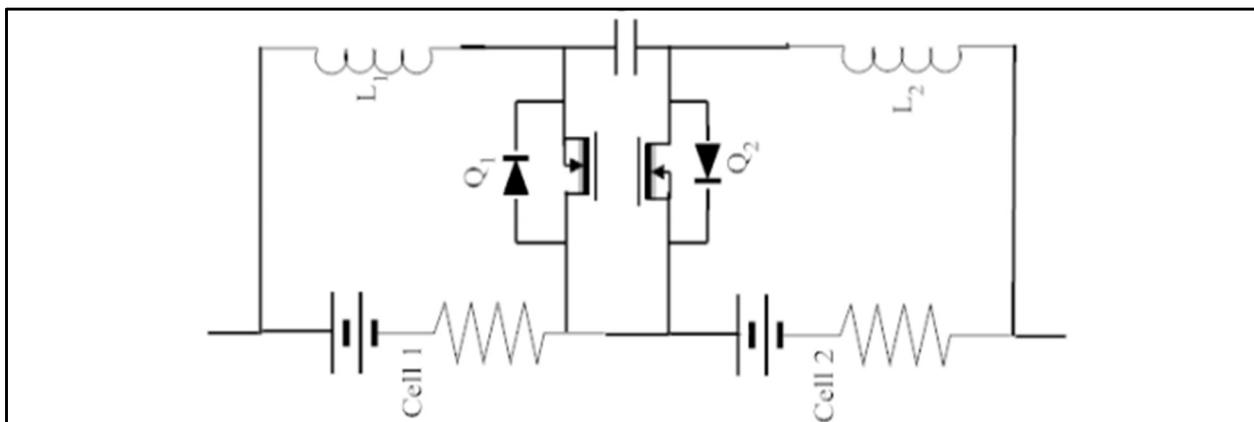
(Εικόνα 33: Κύκλωμα εξισορρόπησης ενέργειας συστοιχίας κελιών, με χρήση πηνίων a) Κύκλωμα μεταγωγής σε μονή ή πολλαπλή μεταγωγή άνα συστοιχία b) Κύκλωμα μονού επαγωγέα. [31])



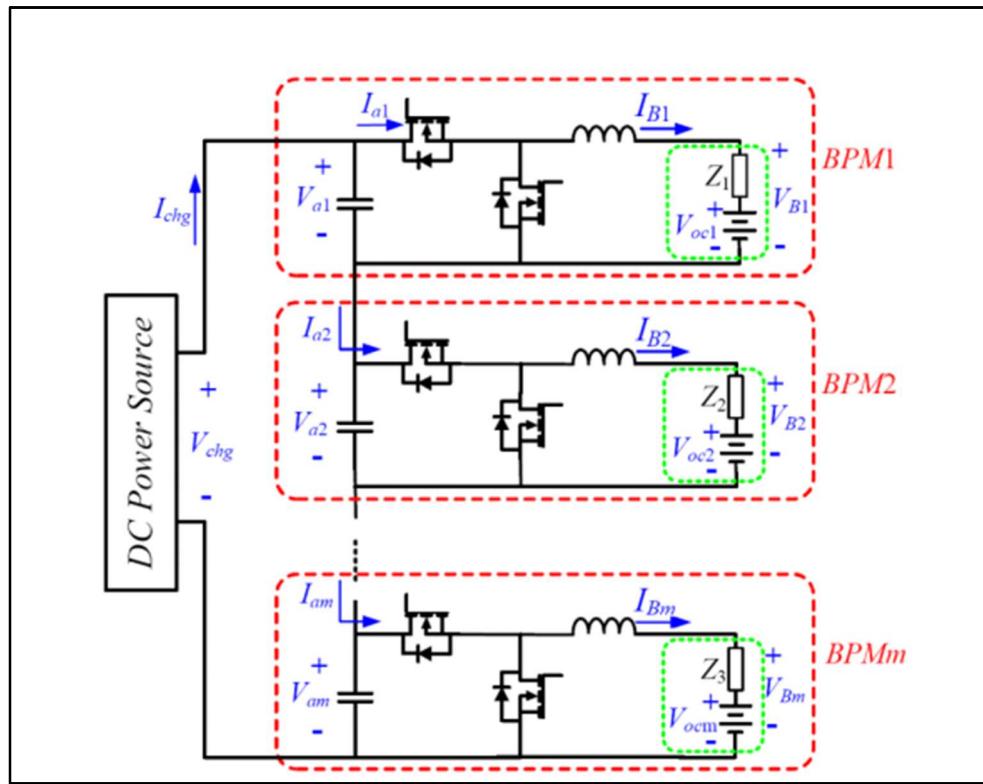
(Εικόνα 34: Κύκλωμα εξισορρόπησης ενέργειας με χρήση μετασχηματιστή μονής περιέλιξης. [31])

3.8.3 Χρήση Μετατροπέων Ενέργειας(Converters)

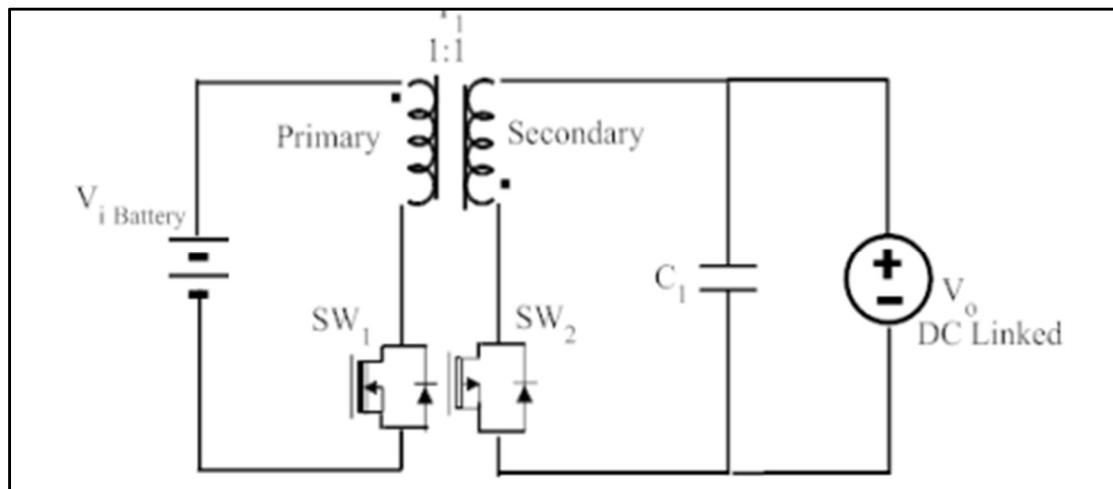
Οι μετατροπείς ενέργειας έχουν διάφορες κατηγορίες όπως: Ćuk, Buck ή Buck/Boost, Flyback, Ramp, Full-Bridge και Quasi-Resonant. Όλες αυτές οι μέθοδοι είναι ελεγχόμενες άλλα δυστυχώς έχουν υψηλότερο κόστος συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους. Συγκεκριμένα ο μετατροπέας Ćuk αποτελείται από δύο επαγωγείς, δύο διακόπτες και έναν πυκνωτή και μεταφέρει την ενέργεια μεταξύ δύο γειτονικών κελιών προκειμένου να εξισορροπήσει τις τάσεις τους (Εικόνα 35). Μία άλλη ακόμα πιο συχνή μέθοδος είναι αυτή των Buck(Step-Down) και Boost(Step-Up) μετατροπέων στην οποία υπάρχουν πολλές εναλλακτικές στα κυκλώματα που κάνουν την χρήση τους. Ακολουθούν την ίδια λογική λειτουργίας με τις υπόλοιπες μεθόδους, στην παρακάτω (Εικόνα 36) [9] παρατίθενται μια εκδοχή τους. Τέλος παρατίθενται ενδεικτικά τα κυκλώματα των μεθόδων Flyback, Ramp, Full-Bridge και Quasi-Resonant στις (Εικόνες 37, 38, 39, 40).



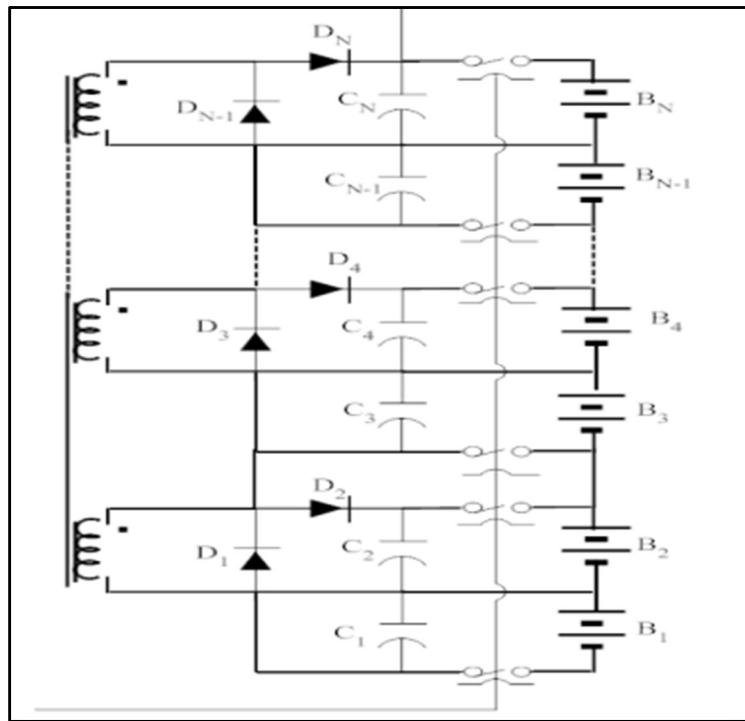
(Εικόνα 35: Κύκλωμα εξισορρόπησης ενέργειας με χρήση κυκλώματος μετατροπέα Ćuk. [31])



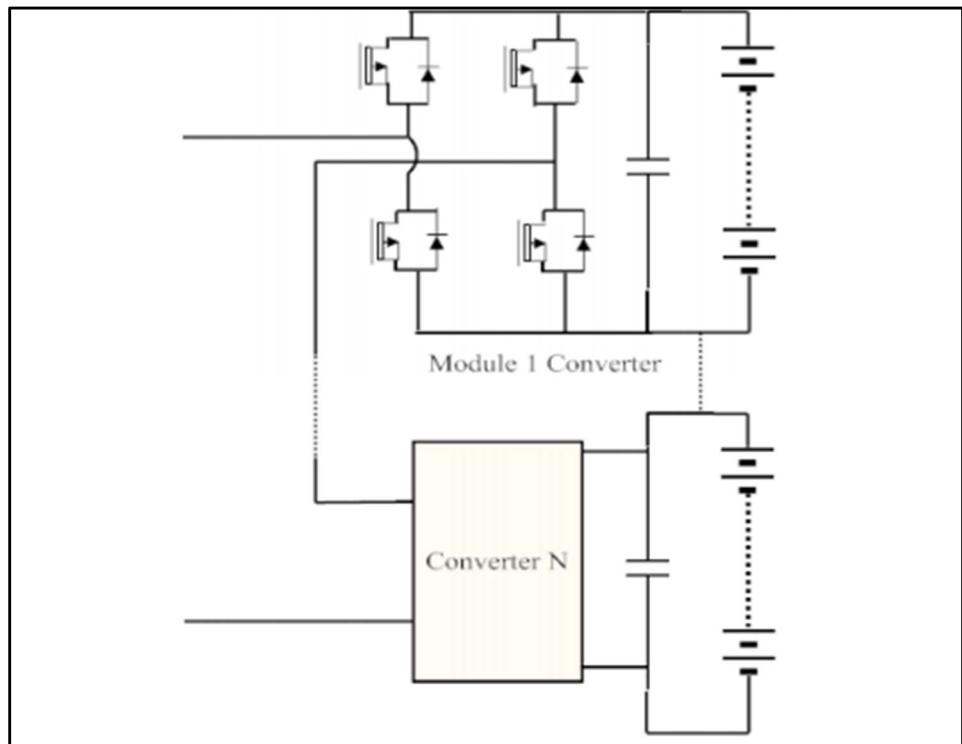
(Εικόνα 36: Κύκλωμα εξισορρόπησης ενέργειας με χρήση κυκλώματος Buck/Boost μετατροπέα ενέργειας. [31])



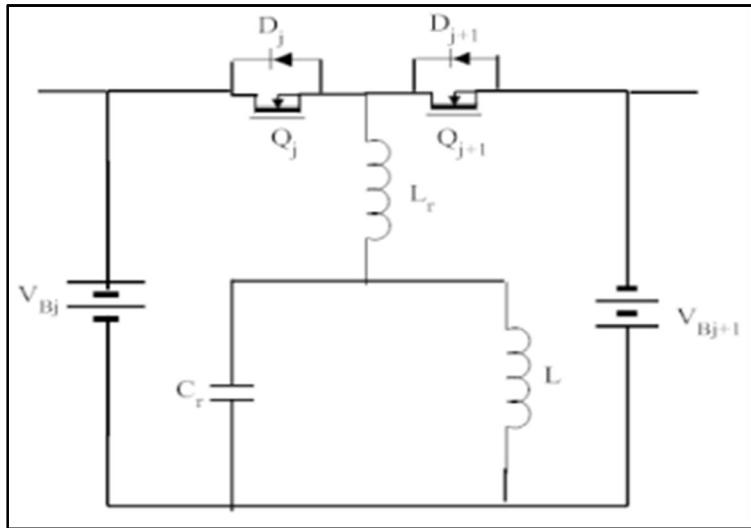
(Εικόνα 37: Κύκλωμα εξισορρόπησης ενέργειας με χρήση κυκλώματος Flyback μετατροπέα ενέργειας. [31])



(Εικόνα 38: Κύκλωμα εξισορρόπησης ενέργειας με χρήση κυκλώματος Ramp μετατροπέα ενέργειας. [31])



(Εικόνα 39: Κύκλωμα εξισορρόπησης ενέργειας με χρήση κυκλώματος Full-Bridge μετατροπέα ενέργειας. [31])



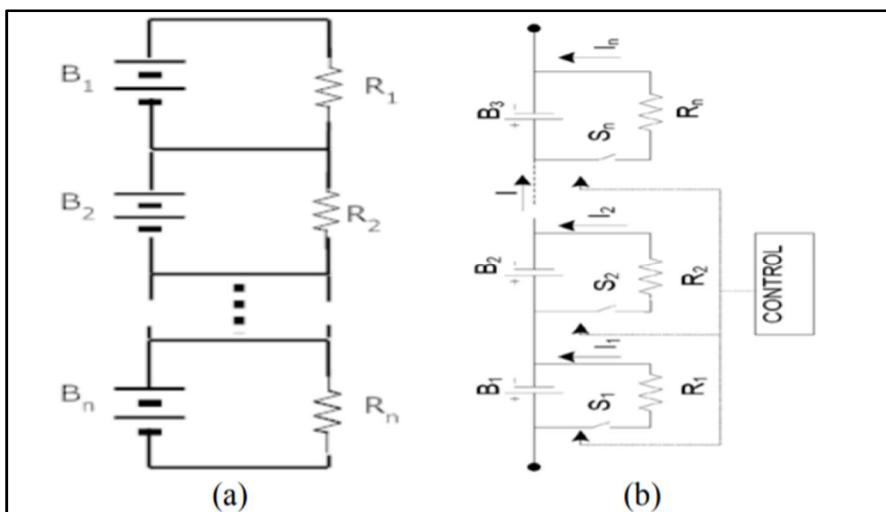
(Εικόνα 40: Κύκλωμα εξισορρόπησης ενέργειας με χρήση κυκλώματος Quasi-Resonant μετατροπέα ενέργειας. [31])

3.9 Μέθοδοι Παθητικής Ισοστάθμισης

Οι πιο σημαντικοί μέθοδοι παθητικής ισοστάθμισης παρατίθενται αναλύονται παρακάτω.

3.9.1 Χρήση Current Shunt Balancing

Η χρήση αντίστασης σε σειρά αποτελεί την πιο απλοϊκή μέθοδο εξισορρόπησης ενέργειας. Ο τρόπος λειτουργίας της είναι να αφαιρεί την περίσσεια ενέργεια από την τα κελιά που έχουν υψηλότερη τάση. Με σκοπό όλα τα κελιά να εξισορροπηθούν στην ίδια τάση. Υπάρχουν δύο διαφορετικά κυκλώματα που μπορούν να κάνουν χρήση της αντίστασης σε σειρά. Η πρώτη μέθοδος (Εικόνα 41.α[10]) παρακάμπτει το συνεχές ρεύμα που διαρρέει τα κελιά και το οδηγεί στις αντιστάσεις σε σειρά, κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται σε μπαταρίες μολύβδου οξέος και νικελίου. Η δεύτερη μέθοδος βασίζεται στο να αφαιρεί το ρεύμα που διαρρέει τα κελιά υψηλότερης τάσης με χρήση διακοπτών ή ρελέ και να το οδηγεί σε αντίσταση. Το βασικό μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι η περισσεία ενέργεια εκλύεται σε θερμότητα κατά την εξισορρόπηση των κελιών.



(Εικόνα 41: α) Κύκλωμα εξισορρόπησης με χρήση current shunts παράλληλα στα κελιά, β) ελεγχόμενο κύκλωμα που χρησιμοποιεί μέθοδο διακοπτών και παράλληλων αντιστάσεων για την εξισορρόπηση των κελιών. [31])

3.10 Πίνακας Σύγκρισης Κυκλωμάτων Ισοστάθμισης

Σε εφαρμογές μικρής κλίμακας που το κόστος πρέπει να παραμείνει μικρό συνήθως χρησιμοποιούμε το κύκλωμα αντίστασης σε σειρά (current shunt) όπως και επιλέχθηκε στην παρούσα διπλωματική. Εάν το σύστημα χρειάζεται απλό έλεγχο τότε γίνεται χρήση των μεθόδων εναλλασσόμενων πυκνωτών (switching capacitors), που όμως έχει μεγάλη χρονική διάρκεια μέχρι να εξισορροπήσουν την συστοιχία μπαταριών. Στην περίπτωση που θέλουμε ταχεία εξισορρόπηση γίνεται επιλογή της μεθόδου εναλλασσόμενων πηνίων, με βασικό αρνητικό τον πιο δύσκολο έλεγχο και τις μαγνητικές απώλειες ενέργειας. Τέλος οι μετατροπείς ενέργειας (Buck/Boost) αποτελούν την βέλτιστη επιλογή για εφαρμογές μεσαίες και υψηλής ενέργειας ευρεία χρήση σε HEVs και PHEVs. Ωστόσο έχουν ταχύτατη εξισορρόπηση της συστοιχίας και πολύ μικρές απώλειες ενέργειας, παρόλα αυτά έχουν μεγάλο μέγεθος και υψηλό κόστος. Παρακάτω παρατίθενται ένας (Πίνακας 7) όλων των μεθόδων που συνελέχθησαν από την βιβλιογραφία και μια ενδεικτική σύγκριση τους.

Τύπος Κυκλώματος Εξισορρόπησης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Fixed Resistor	<ul style="list-style-type: none"> Φθηνή και απλή στην εφαρμογή λόγο μικρού μεγέθους. 	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλές απώλειες ενέργειας.
Current Shunt	<ul style="list-style-type: none"> Φθηνή και απλή στην εφαρμογή, με μεγάλο ποσοστό ακρίβειας. Γίνεται χρήση της τόσο σε φόρτιση όσο και εκφόρτιση. Κατάλληλο για HEV και EV. 	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλές απώλειες ενέργειας. Η αντίσταση πρέπει να έχει μεγάλο μέγεθος για να μπορεί να εκλύει σωστά στο περιβάλλον την ενέργεια που απορροφά πάνω της. Απαραίτητη η διαχείριση της εκλυόμενης θερμότητας της.
Switched Capacitor	<ul style="list-style-type: none"> Απλός έλεγχος, χρήση του τόσο σε φόρτιση όσο και εκφόρτιση. Δεν χρειάζεται έλεγχος με χρήση κλειστού βρόχου. 	<ul style="list-style-type: none"> Χαμηλό ποσοστό ακρίβειας. Υψηλός αριθμός εξαρτημάτων διακοπτών.
Single Switched Capacitor	<ul style="list-style-type: none"> Απλός έλεγχος, χρήση του τόσο σε φόρτιση όσο και εκφόρτιση. Χρήση μόνο ενός πυκνωτή με ελάχιστους διακόπτες. 	<ul style="list-style-type: none"> Απαραίτητος υπολογιστικός έλεγχος για να επιτευχθεί η κατάλληλη λειτουργία του.

	<ul style="list-style-type: none"> • Κατάλληλο για HEV και EV. 	
Double Tiered Switched Capacitor	<ul style="list-style-type: none"> • Μειωμένος χρόνος εξισορρόπησης σε λιγότερο από το ένα τέταρτο του κυκλώματος switched capacitor. • Χρήση σε φόρτιση όσο και εκφόρτιση κατάλληλο για HEV και EV. 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλός αριθμός εξαρτημάτων διακοπτών.
Modularized Switched Capacitor	<ul style="list-style-type: none"> • Χρήση σε φόρτιση όσο και εκφόρτιση. 	<ul style="list-style-type: none"> • Απαιτείται σύνθετος έλεγχος για την σωστή λειτουργία του.
Single Inductor	<ul style="list-style-type: none"> • Ταχύτατη εξισορρόπηση. 	<ul style="list-style-type: none"> • Απαιτείται σύνθετος έλεγχος για την σωστή λειτουργία του. • Απαιτούνται πυκνωτές φιλτραρίσματος για υψηλή συχνότητα μεταγωγής.
Multi-Inductor	<ul style="list-style-type: none"> • Ταχύτατη εξισορρόπηση. • Πολύ υψηλή αποδοτικότητα. 	<ul style="list-style-type: none"> • Χρειάζεται ακριβής ανίχνευση τάσης. • Μόνο λειτουργία φόρτισης. • Απαιτούνται πυκνωτές φιλτραρίσματος για υψηλή συχνότητα μεταγωγής.

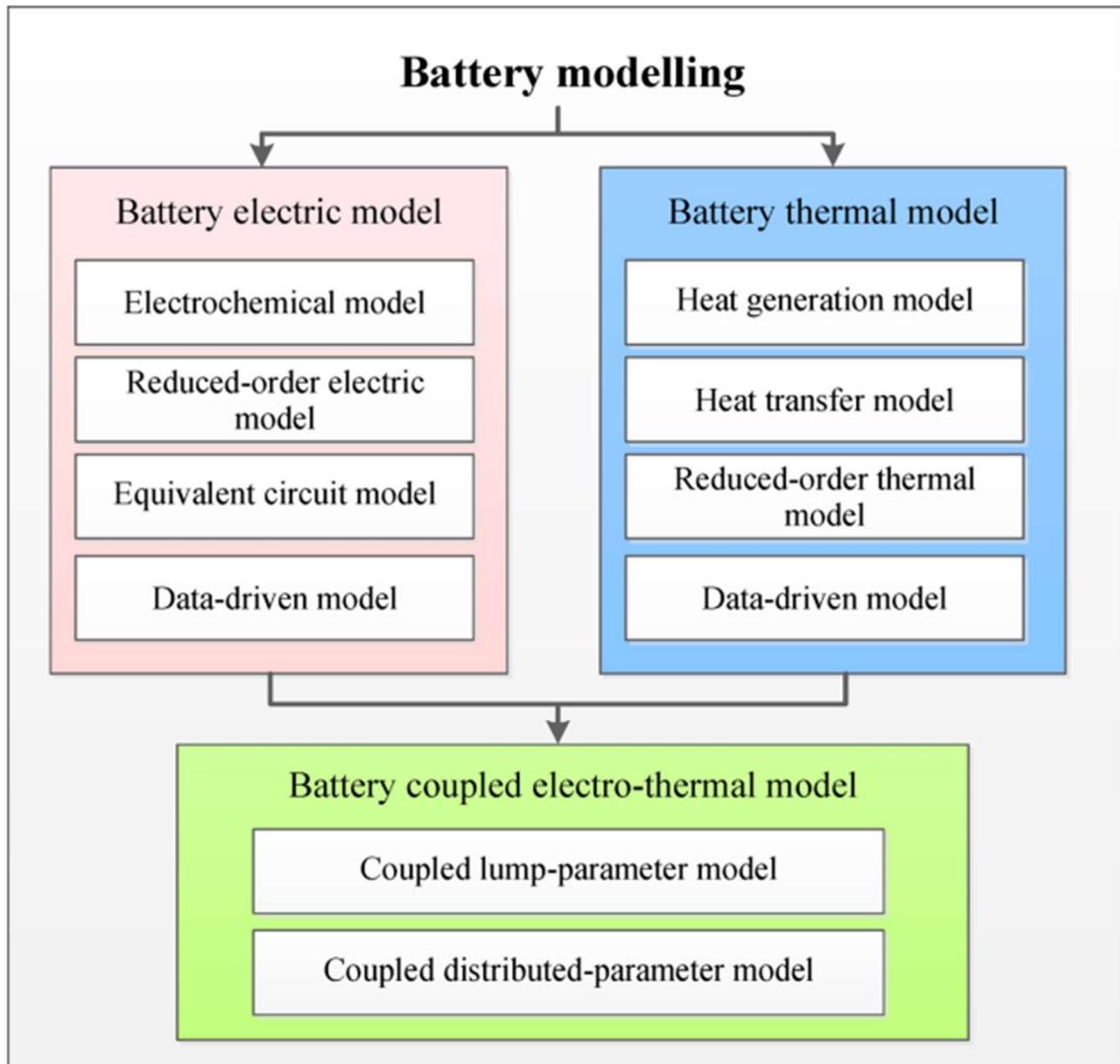
Single Windings Transformer	<ul style="list-style-type: none"> • Ταχύτατη εξισορρόπηση. • Πολύ χαμηλές μαγνητικές απώλειες. 	<ul style="list-style-type: none"> • Απαιτείται σύνθετος έλεγχος για την σωστή λειτουργία του με υψηλό κόστος για την εφαρμογή του. • Για να προστεθούν περαιτέρω κελιά χρειάζεται εκ νέου αλλαγή του πυρήνα του μετασχηματιστή.
Multi Windings Transformer	<ul style="list-style-type: none"> • Ταχύτατη εξισορρόπηση. • Δεν απαιτείται έλεγχος με χρήση κλειστού βρόχου. • Κατάλληλο για HEV και EV. 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος και σύνθετος έλεγχος. • Για να προστεθούν περαιτέρω κελιά χρειάζεται εκ νέου αλλαγή του πυρήνα του μετασχηματιστή.
Multiple Transformers	<ul style="list-style-type: none"> • Ταχύτατη εξισορρόπηση. • Μπορούν εύκολα να προστεθούν νέα κελιά στο σύστημα. 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος και σύνθετος έλεγχος. • Απώλειες από μαγνητική ενέργεια.
Modularized Switching Transformer	<ul style="list-style-type: none"> • Κατάλληλο για HEV και EV. • Ταχύτατη εξισορρόπηση. 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος και σύνθετος έλεγχος.
Ćuk Converter	<ul style="list-style-type: none"> • Κατάλληλο για HEV και EV. • Υψηλή αποδοτικότητα. 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος και σύνθετος έλεγχος. • Χρειάζεται ακριβής ανίχνευση τάσης.
Buck-Boost Converter	<ul style="list-style-type: none"> • Εύκολη προσαρμογή σε πληθώρα συστημάτων. 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος και σύνθετος έλεγχος.

Flyback Converter	<ul style="list-style-type: none"> • Εύκολη προσαρμογή σε μεγάλο αριθμό κελιών. • Κατάλληλο για HEV και EV. 	<ul style="list-style-type: none"> • Χρειάζεται ακριβής ανίχνευση τάσης.
Ramp Converter	<ul style="list-style-type: none"> • Ομαλή μεταγωγή με χρήση φθηνού μετασχηματιστή. 	<ul style="list-style-type: none"> • Σύνθετος έλεγχος.
Full-Bridge Converter	<ul style="list-style-type: none"> • Ιδανικό για κάθε είδους σύστημα που αφορά μεταφορικά μέσα. 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος και σύνθετος έλεγχος.
Quasi-Resonant Converter	<ul style="list-style-type: none"> • Απλή εφαρμογή, με καλό ποσοστό ακρίβειας. • Διακόπτες που κάνουν χρήση μικρού ρεύματος και δεν καταπονούν το σύστημα και αυξάνουν την αποδοτικότητα του. 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος και σύνθετος έλεγχος.

(Πίνακας 7: Σύγκριση κυκλωμάτων ισοστάθμισης. [8],[9],[31])

3.11 Μέθοδοι Μοντελοποίησης και Εκτίμησης Μπαταρίας

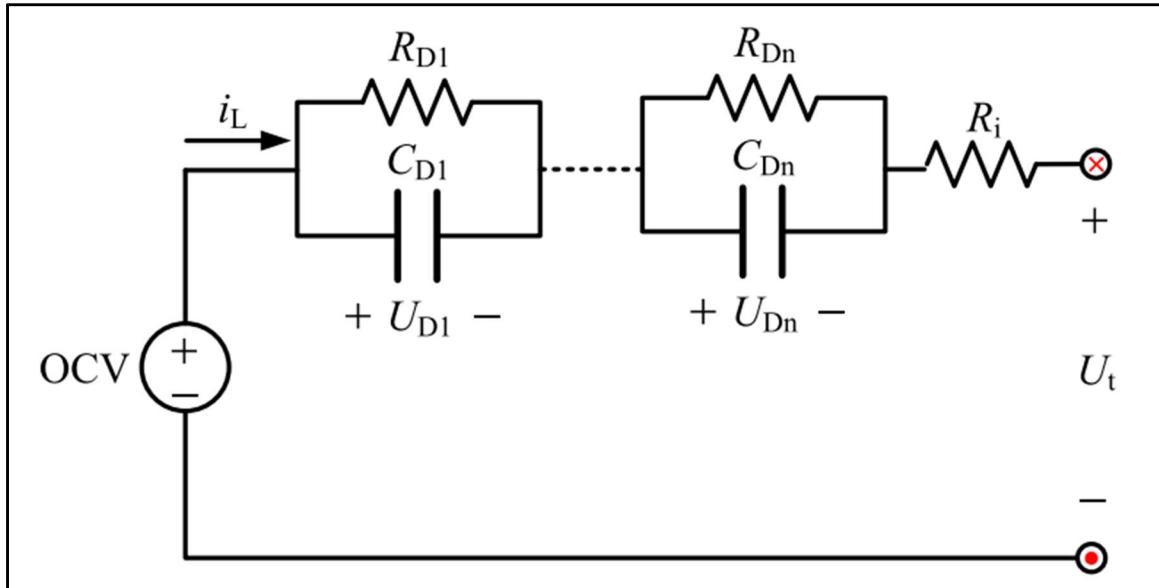
Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμα μοντέλα προσομοίωσης μπαταριών τα οποία έχουν διαφορετικά επίπεδα ακριβείας, επιπλέον έχει αυξηθεί και η πολυπλοκότητα τους. Αυτά τα μοντέλα κατά κύριο λόγο κατηγοριοποιούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες : 1) Ηλεκτρικό μοντέλο 2) Θερμικό μοντέλο και 3) Μοντέλο σύζευξης. (Πίνακας 8) Στην παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε κατά κύριο λόγο με το Ηλεκτρικό και με το Θερμικό μοντέλο ως προσομοίωση της συμπεριφοράς της μπαταρίας.



(Πίνακας 8: Τα τρία βασικά είδη μοντελοποίησης μπαταριών για συστήματα BMS. [27])

3.11.1 Ισοδύναμο Ηλεκτρικό Μοντέλο

Το μοντέλο (ECM-Equivalent Circuit Model) εφαρμόζεται ευρέως στα συστήματα διαχείρισης ενέργειας μπαταριών διότι είναι αρκετά αξιόπιστο και εύκολα υλοποιήσιμο. Χρησιμοποιεί ηλεκτρικά στοιχεία, όπως αντιστάσεις, πυκνωτές και πηγές τάσης προκειμένου να δημιουργήσει ένα κύκλωμα το οποίο έχει ίδια τάση στα άκρα του και συμπεριφέρεται όπως μία μπαταρία. Μπορεί να περιγράψει τις περισσότερες δυναμικές της συμπεριφορές με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον έχει καλή δυνατότητα εφαρμογής και επεκτασιμότητας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για να προσεγγιστεί το SoC. Στην (Εικόνα 42) βλέπουμε ένα ECM το οποίο περιέχει βρόχους αντιστάσεων παράλληλα με πυκνωτές. Συγκεκριμένα το μοντέλο αποτελείται από τρία επιμέρους στοιχεία 1) Πηγή τάσης η οποία χρησιμοποιεί OCV (Open Circuit Voltage), για να καθορίσει την πηγή τάσης της μπαταρίας 2) Ωμική τάση η οποία αναπαριστά την ηλεκτρική αντίσταση από πληθώρα διαφορετικών εξαρτημάτων των μπαταριών όπως όταν συσσωρεύεται ή αποβάλλεται το ηλεκτρικό φορτίο από τις στρώσεις της μπαταρίας στο οποίο και δημιουργείται αντίστοιχη αντίσταση. 3) Χρησιμοποιούμε δύο βρόχους RC για τον προσδιορισμό της παροδικής απόκρισης για την τάση στα άκρα της μπαταρίας. Συγκεκριμένα ο πρωτεύον αποτελεί την σταθερά μικρού χρόνου της μπαταρίας η οποία χρησιμοποιείται ως ανατροφοδότηση. Το δευτερεύον αναπαριστά τις διαδικασίες διάχυσης. Το μοντέλο εξαρτάται άμεσα από το ρεύμα που το διαρρέει και την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται. Παρακάτω βλέπουμε ενδεικτικά μία αναπαράσταση του κυκλώματος.



(Εικόνα 42: Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος 2RC ισοδύναμου κυκλώματος [28].)

Οι συναρτήσεις που εκφράζουν αυτό το κύκλωμα είναι οι εξής :

$$\begin{cases} \dot{U}_{Di} = -\frac{1}{R_{Di}C_{Di}}U_{Di} + \frac{1}{C_{Di}}I_L \\ U_t = U_{oc} - I_L R_i - \sum_{i=1}^n U_{Di} \end{cases} \quad (19)$$

3.11.2 Ισοδύναμο Θερμικό Μοντέλο

Η θερμική συμπεριφορά είναι επίσης μία πολύ βασική πτυχή στα BMS των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, καθώς μπορεί η θερμοκρασία να παίξει ζωτικό ρόλο και στην απόδοση τους και στην διάρκεια ζωής των μπαταριών που τα αποτελούν. Πληθώρα θερμικών μοντέλων έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια τα οποία διερευνούν την συμπεριφορά της θερμοκρασίας στο σύστημα. Τα πιο γνωστά ισοδύναμα μοντέλα είναι : 1) Μοντέλο παραγωγής θερμότητας 2) Μοντέλο μεταφοράς θερμότητας 3) Μοντέλο αγωγής θερμότητας και τέλος 4) Μοντέλο που βασίζεται στην συλλογή δεδομένων.

3.11.3 Μοντέλο Παραγωγής Θερμότητας

Οι τρεις πιο συχνοί αλγόριθμοι παραγωγής θερμότητας που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής :

$$Q1 = RI^2 \quad (20)$$

$$Q2 = I(V - OCV) \quad (21)$$

$$Q3 = I(V - OCV) + IT \frac{d OCV}{dT} \quad (22)$$

R: Εσωτερική αντίσταση μπαταρίας

I: Ρεύμα που την διαρρέει

V: Τάση στα άκρα της

OCV: Τάση ανοικτού κυκλώματος μπαταρίας

Q1: Παραγωγή θερμότητας η οποία κατά κύριο λόγο παράγεται από την διέλευση του ρεύματος μέσα από την εσωτερική αντίσταση.

Q2: Παραγωγή θερμότητας από την διαφορά δυναμικών στους βρόχους RC.

Q3: Παραγωγή θερμότητας από το θερμοδυναμικό αξίωμα της εντροπίας η οποία μεταβάλλεται, καθώς και παραγωγή θερμότητας σύμφωνα με το νόμο του Joule.

3.11.4 Μοντέλο Μεταφοράς Θερμότητας

Οι πιο συχνοί αλγόριθμοι μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται κάνουν χρήση συναρτήσεων τριών διαστάσεων και μερικών παραγώγων προκειμένου να ερευνήσουν την κατανομή θερμότητας μέσα στην μπαταρία όπως βλέπουμε παρακάτω :

$$\frac{\partial p C p T3}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(kx \frac{\partial T3C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(ky \frac{\partial T3C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(kz \frac{\partial T3C}{\partial z} \right) + Q \quad (23)$$

p: Πυκνότητα μπαταρίας

Cp: Θερμική πυκνότητα που έχει η μπαταρία

K3C: Συντελεστής θερμοαγωγιμότητας μπαταρίας (Απορρέει από τις τρεις διαστάσεις: kx, ky, kz)

Q: Η τιμή παραγωγής θερμότητας της μπαταρίας

Εάν υποθέσουμε ότι η κατανομή της θερμοκρασίας της μπαταρίας στο εσωτερικό της σε κάθε επίπεδο στρωμάτωσης είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη, τότε μπορούμε να κάνουμε χρήση της συνάρτησης για μόνο μία διάσταση.

$$\frac{\partial pCpT1C}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(kx \frac{\partial T1C}{\partial x} \right) + Q \quad (24)$$

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε το μοντέλο των τριών διαστάσεων μπορούμε να αποσπάσουμε την εικόνα σε όλο το μήκος της μπαταρίας, το οποίο μπορεί να μας βοηθήσει να βρούμε συγκεκριμένα σημεία της στα οποία αναπτύσσεται παραπάνω θερμοκρασία. Για το μονοδιάστατο μοντέλο μπορούμε να δούμε την διακύμανση της θερμοκρασίας πρός μία κατεύθυνση. Συνήθως όμως το υπολογιστικό κόστος αυτών των δύο μοντέλων για εφαρμογές πραγματικού χρόνου είναι πολύ μεγάλο και συνήθως τα χρησιμοποιούμε σε προσομοιώσεις πριν θέσουμε σε πραγματική λειτουργία το σύστημα μας.

3.11.5 Μοντέλο Αγωγής Θερμότητας

Εάν υποθέσουμε ότι η κύρια μεταφορά θερμότητας είναι μέσω της αγωγής της μπαταρίας και ότι η θερμοκρασία κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την μπαταρία, τότε μπορούμε να κάνουμε χρήση του μοντέλου θερμότητας δύο σταδίων με τις εξής συναρτήσεις :

$$\begin{cases} C_{q1} dT_{in}/dt = k_1(T_{sh} - T_{in}) + Q \\ C_{q2} dT_{sh}/dt = k_1(T_{in} - T_{sh}) + k_2(T_{amb} - T_{sh}) \end{cases} \quad (25)$$

T_{in}: Εσωτερική θερμοκρασία της

T_{sh}: Θερμοκρασία επιφάνειας της

T_{amb}: Θερμοκρασίας περιβάλλοντος

C_{q1}: Θερμική χωρητικότητα εσωτερικού μπαταρίας

C_{q2}: Θερμική χωρητικότητα επιφάνειας μπαταρίας

k₁: Αγωγιμότητα θερμότητας μεταξύ επιφάνειας και εσωτερικού μπαταρίας

k₂: Αγωγιμότητα θερμότητας μεταξύ ατμόσφαιρας που έρχεται σε επαφή η μπαταρία και της επιφάνειας της

Με τον σωστό καθορισμό των εξαρτημάτων μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα γραμμικό μοντέλο χαμηλότερης τάξης που να χαρακτηρίζει και να προσομοιώνει το σύστημα μας αρκετά καλά. Με σκοπό να το μεταφέρουμε στο πεδίο των συχνοτήτων για να το απλοποιήσουμε. Οι τιμές που θα πάρουμε ως αποτέλεσμα θα είναι πολύ κοντά σε αυτές του μοντέλου των τριών διαστάσεων που αναφέραμε προηγουμένως.

3.12 Εκτίμηση Κατάστασης Φόρτισης State Of Charge (SoC)

Η εκτίμηση κατάστασης φόρτισης (SoC) αποτελεί ένα από τα πιό σημαντικά θέματα στον τομέα των μπαταριών. Ο ακριβής καθορισμός του SoC μιας μπαταρίας μπορεί να αποτρέψει απρόσμενες αντιδράσεις του συστήματος και να αποτρέψει τις μπαταρίες από υπερ-φόρτιση ή υπερ-αποφόρτιση. Γεγονότα τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν μόνιμη ζημιά στην μπαταρία. Πολλές μέθοδοι εκτίμησης φόρτισης έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία, ωστόσο δεν είναι όλες χρήσιμες και εύκολα εκτελέσιμες σε πραγματικό χρόνο. Οι περισσότερες κλασσικές μέθοδοι χρησιμοποιούν σαν δεδομένα εισόδου την τάση στα άκρα της μπαταρίας και την εσωτερική της αντίσταση που εύκολα μπορούν να μετρηθούν και μπορούν να προσεγγίσουν σχετικά καλά την κατάσταση φόρτισης της. Παρόλα αυτά οι παράμετροι αυτοί που χρησιμοποιούνται αλλάζουν συχνά με τις βαθιές αποφορτίσεις της μπαταρίας DoD(Depth of Discharge), όπως και με τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Επιπλέον επηρεάζονται άμεσα από το SoH που έχει η κάθε μπαταρία, με αποτέλεσμα όλοι αυτοί οι παράγοντες να καθιστούν δυσκολότερη την δημιουργία έγκυρου μοντέλου SoC. [29]

3.12.1 Υπολογισμός SoC με Χρήση Αλγορίθμου Μέτρησης Κουλόμπ (Coulomb Counting)

Ο αλγόριθμος μέτρησης κουλόμπ ουσιαστικά υπολογίζει την εναπομένουσα χωρητικότητα που έχει απομείνει στην μπαταρία υπολογίζοντας την ενέργεια που εισέρχεται και εξέρχεται από την μπαταρία στα άκρα της. Αυτή η μέθοδος προϋποθέτει μακροχρόνια παρακολούθηση της συμπεριφοράς της μπαταρίας καθώς και αποθήκευση των δεδομένων προκειμένου να γίνεται σύγκριση, γεγονός που την καθιστά δύσκολη και κοστοβόρα σε εφαρμογή πραγματικού χρόνου. Ωστόσο με την αύξηση της τεχνολογίας και τις παραπάνω απαιτήσεις έχουμε αναπτύξει εξελιγμένα συστήματα όπως αυτά των ηλεκτρικών οχημάτων PCM(Powertrain Control Module) τα οποία έχουν εμφωλευμένες μεγάλες μνήμες και μεγάλη υπολογιστική ισχύ προκειμένου να μπορούν να υπολογίσουν το SoC των μπαταριών με μεγαλύτερη ακρίβεια με την χρήση του αλγόριθμου μέτρησης κουλόμπ. Παρακάτω εξηγούμε αναλυτικά πως δουλεύει ο αλγόριθμος αυτός ο οποίος εφαρμόζεται αντίστοιχα στην πειραματική μας υλοποίηση. Η εκλυόμενη χωρητικότητα (Qreleasable) μίας λειτουργικής μπαταρίας είναι η εκλυόμενη χωρητικότητα όταν είναι πλήρως αποφορτισμένη. Το SoC εκφράζεται με την διαίρεση του Qreleasable με την ονομαστική χωρητικότητα που δίνει ο κατασκευαστής της μπαταρίας.

$$SoC = \frac{Q_{releasable}}{Q_{rated}} * 100\% \quad (26)$$

Μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία θα πρέπει να έχει Qreleasable = QMAX το οποίο μπορεί να είναι για διαφορετικό κατά ένα βαθμό με την ονομαστική χωρητικότητα(Qrated) που μας παρέχει ο κατασκευαστής λόγω μικρών αποκλίσεων. Με αυτό τον υπολογισμό μπορούμε να προσεγγίσουμε έως ένα βαθμό και το SoH της μπαταρίας μας.

$$SoH = \frac{QMAX}{Q_{rated}} * 100\% \quad (27)$$

Όταν η μπαταρία αποφορτίζεται, το DoD της μπορεί να περιγραφεί σαν το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αποφορτιστεί σε σχέση με το Qrated. (όπου το Qreleased είναι η χωρητικότητα που αποφορτίζεται με οποιοδήποτε ρεύμα.)

$$DoD = \frac{Q_{released}}{Q_{rated}} * 100\% \quad (28)$$

Το Ib είναι το ρεύμα φόρτισης/αποφόρτισης, η διαφορά του DoD σε περίοδο λειτουργίας (τ) μπορεί να υπολογιστεί από:

$$\Delta DoD = \frac{-\int_{t0}^{t0+\tau} Ib(t)dt}{Q_{rated}} * 100\% \quad (29)$$

(όπου το Ib είναι θετικό για φόρτιση και αρνητικό για αποφόρτιση και το Δ συσσωρεύεται σαν άθροισμα με την πάροδο της λειτουργίας)

$$DoD(t) = DoD(t0) + \Delta DoD \quad (30)$$

Χωρίς να λάβουμε υπόψη μας τις λειτουργικές διακυμάνσεις και την γήρανση της μπαταρίας το SoC μας εκφράζεται ως :

$$SoC(t) = 100\% - DoD(t) \quad (31)$$

Για να βελτιώσουμε την ακρίβεια του αλγόριθμου μας η λειτουργική αποδοτικότητα εκφράζεται ως n ο τύπος μας μεταφράζεται πλέον ως:

$$DoD(t) = DoD(t0) + n\Delta DoD \quad (32)$$

(όπου το n είναι ίσο με το n_c κατά την διάρκεια φόρτισης και n_d κατά την διάρκεια εκφόρτισης)

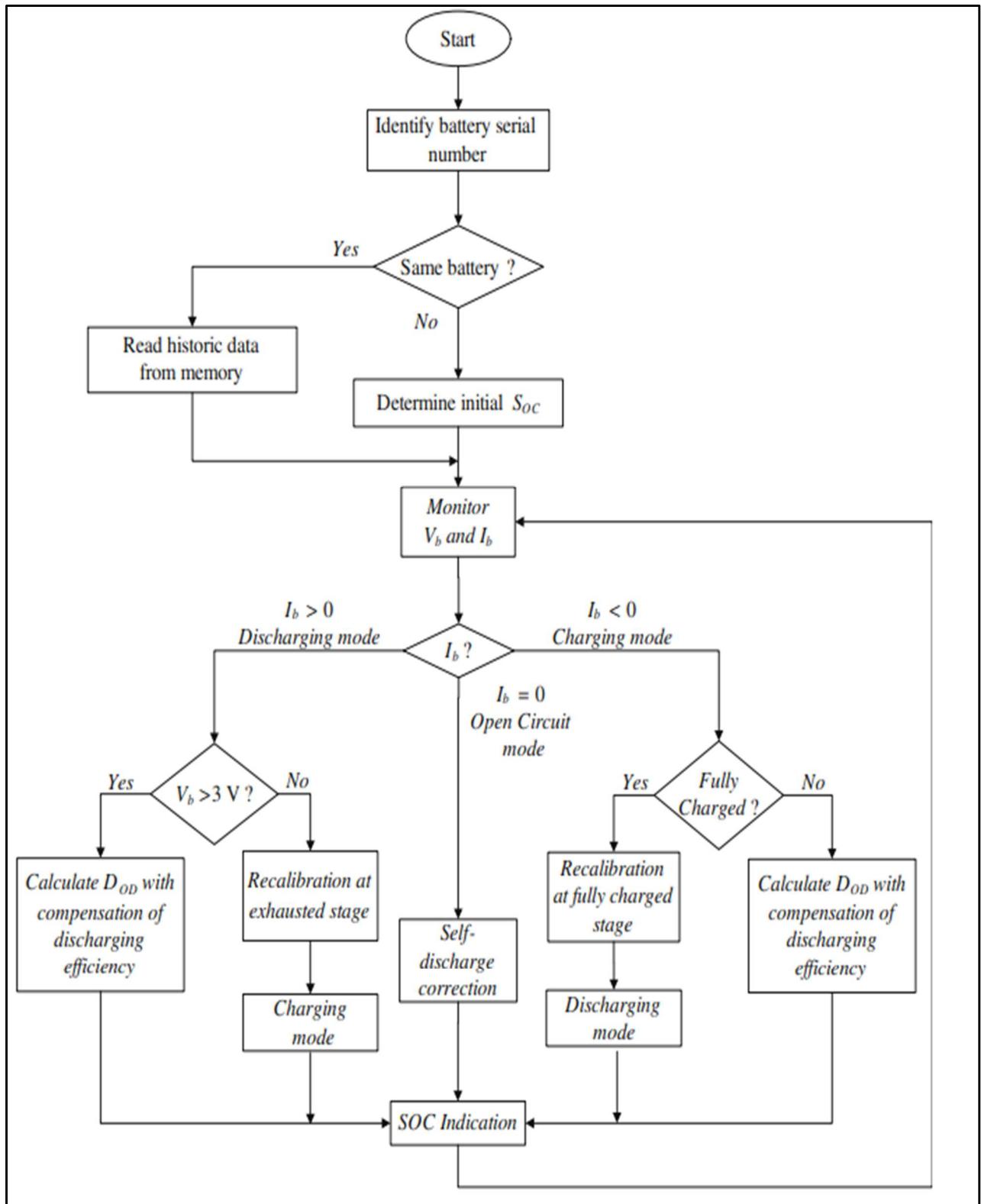
3.12.2 Μετάφραση του Αλγόριθμου σε Διάγραμμα Ροής(Flowchart)

Η προτεινόμενη μέθοδος εκτίμησης φόρτισης μπορεί να περιγραφεί αναλυτικότερα με την χρήση διαγράμματος ροής (Εικόνα 43). Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί το flowchart είναι ο εξής: Αρχικά τα ιστορικά δεδομένα που έχουμε συλλέξει από την μπαταρία ανακτώνται από την μνήμη του μικροελεγκτή μας. Εάν δεν υπάρχουν αποθηκευμένα δεδομένα για μία νέα μπαταρία τότε υποθέτουμε ότι το SoH είναι σε ποσοστό 100%. Προτείνεται πάντα οι μπαταρίες να είναι πλήρως φορτισμένες πρίν τοποθετηθούν για εκτίμηση στο σύστημα μας. Όταν όμως δεν συμβαίνει αυτό τότε γίνεται εκτίμηση του SoC με την χρήση μεθόδου ανοιχτού κυκλώματος OCV. Η μέθοδος μας βασίζεται στην παρακολούθηση της τάσης της μπαταρίας(Vb) καθώς και του ρεύματος της(Ib). Η κατάσταση λειτουργίας της μπαταρίας μπορεί να γίνει γνωστή από την ποσότητα και την κατεύθυνση που έχει το ρεύμα που την διαρρέει. Επιπρόσθετα όταν η μπαταρία βρίσκεται σε ανοιχτό κύκλωμα και την διαρρέει μηδενικό ρεύμα λαμβάνεται υπόψη η διαδικασία αυτοεκφόρτισης της με την πάροδο του χρόνου. Το DoD προσθέτει την χαμένη ενέργεια στην κατάσταση εκφόρτισης για να γνωρίζει το επιπρόσθετο ποσό που θα πρέπει να παρέχει στην επόμενη φόρτιση. Μετά από αυτή την υπολογιστική διόρθωση φόρτισης/εκφόρτισης, λαμβάνει χώρα ένας πιο ακριβής υπολογισμός. Η μπαταρία θεωρείται εξαντλημένη όταν η τάση της έχει πέσει κάτω από 3 Volts. Σε αυτή την περίπτωση η μπαταρία σταματά να χρησιμοποιείται και εισέρχεται σε διαδικασία φόρτισης. Ταυτόχρονα θα πρέπει να γίνει μία επανάληψη του καλιμπραίσματος του SoH. Επιπρόσθετα όταν φτάσει στην μέγιστη τάση που έχουμε προκαθορίσει(Vb) και το ρεύμα(Ib) τείνει να φτάσει στην χαμηλότερη τιμή του θα πρέπει ξανά να υπολογίσουμε το SoH.

$$SoC(t) = SoH(t) - DoD(t) \quad (33)$$

$$SoH \Leftarrow SoC - DoD \quad (34)$$

Οπως βλέπουμε από τον τύπο (27) το SoH είναι ανάλογο του QMAX, το οποίο είναι ίσο με το DoD όταν η μπαταρία έχει αποφορτιστή πλήρως. Καταλήγουμε στο ότι στην πράξη η ποιότητα μέτρησης του SoH μπορεί να έχει ακρίβεια όταν φορτίζουμε και αποφορτίζουμε πλήρως την μπαταρία. [29]



(Εικόνα 43: Διάγραμμα ροής για την εκτίμηση SoC μέσω της μεθόδου μέτρησης κουλόμπ . [29])

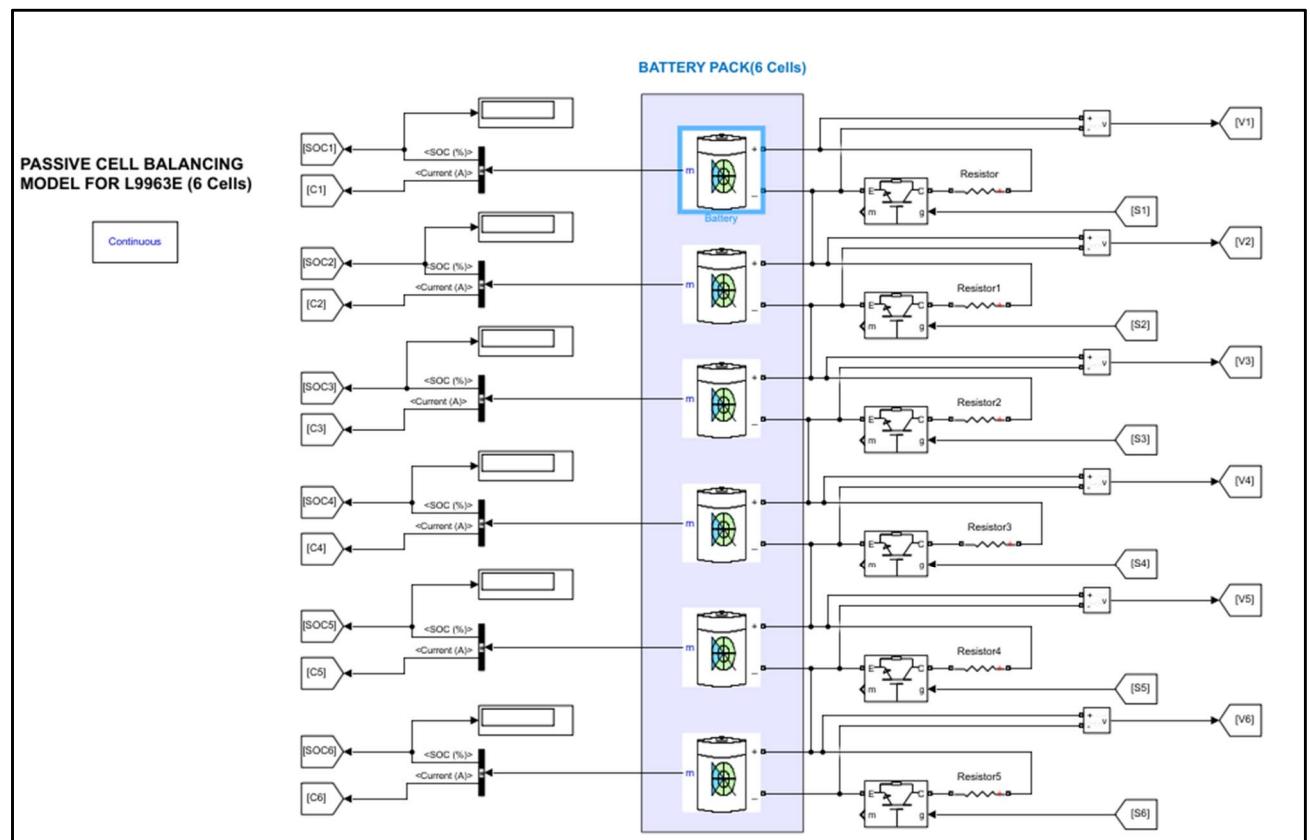
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου της μπαταρίας Ιόντων Λιθίου στο Matlab/Simulink

4.1 Περιγραφή Μοντέλου

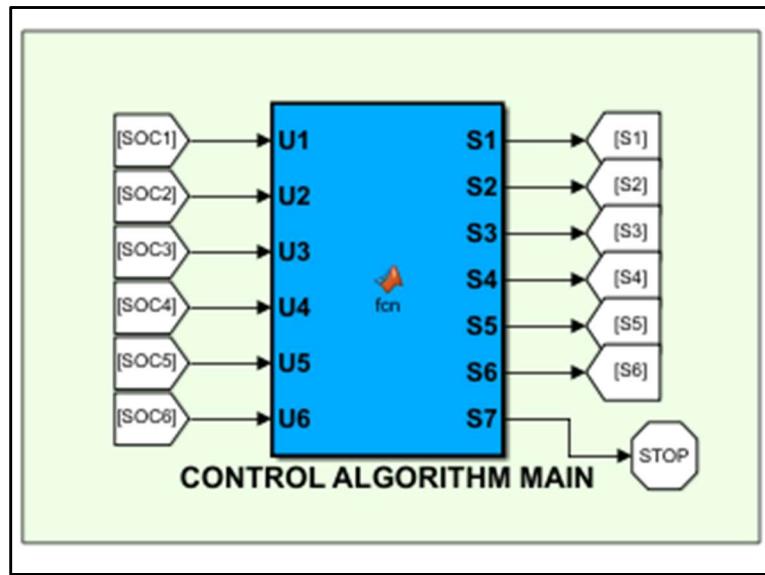
Αρχικό βήμα προκειμένου να προσομοιώσουμε το σύστημα μας ήταν ο καθορισμός των στοιχείων και των βιβλιοθηκών που θα χρησιμοποιήσουμε στο λογισμικό πρόγραμμα Matlab/Simulink(2020b). Τα κυκλώματα που μοντελοποιήθηκαν στο Simulink είναι τα εξής:

1. Κύκλωμα συστάδας (6) μπαταριών Ιόντων Λιθίου (Συμπεριλαμβανομένου φυσικού μοντέλου).
2. Κύκλωμα παθητικής εξισορρόπησης ενέργειας με χρήση (6) αντιστάσεων και (6) Mosfets τα οποία ενεργοποιούνται όταν ο υπολογιστικός αλγόριθμος το θεωρήσει σωστό.
3. Κύκλωμα το οποίο περιλαμβάνει τον αλγόριθμο διαχείρισης του συστήματος για την εξισορρόπηση των μπαταριών. Λαμβάνει υπόψη της τάσεις, ρεύματα και State Of Charge της συστάδας και της κάθε μπαταρίας ξεχωριστά.

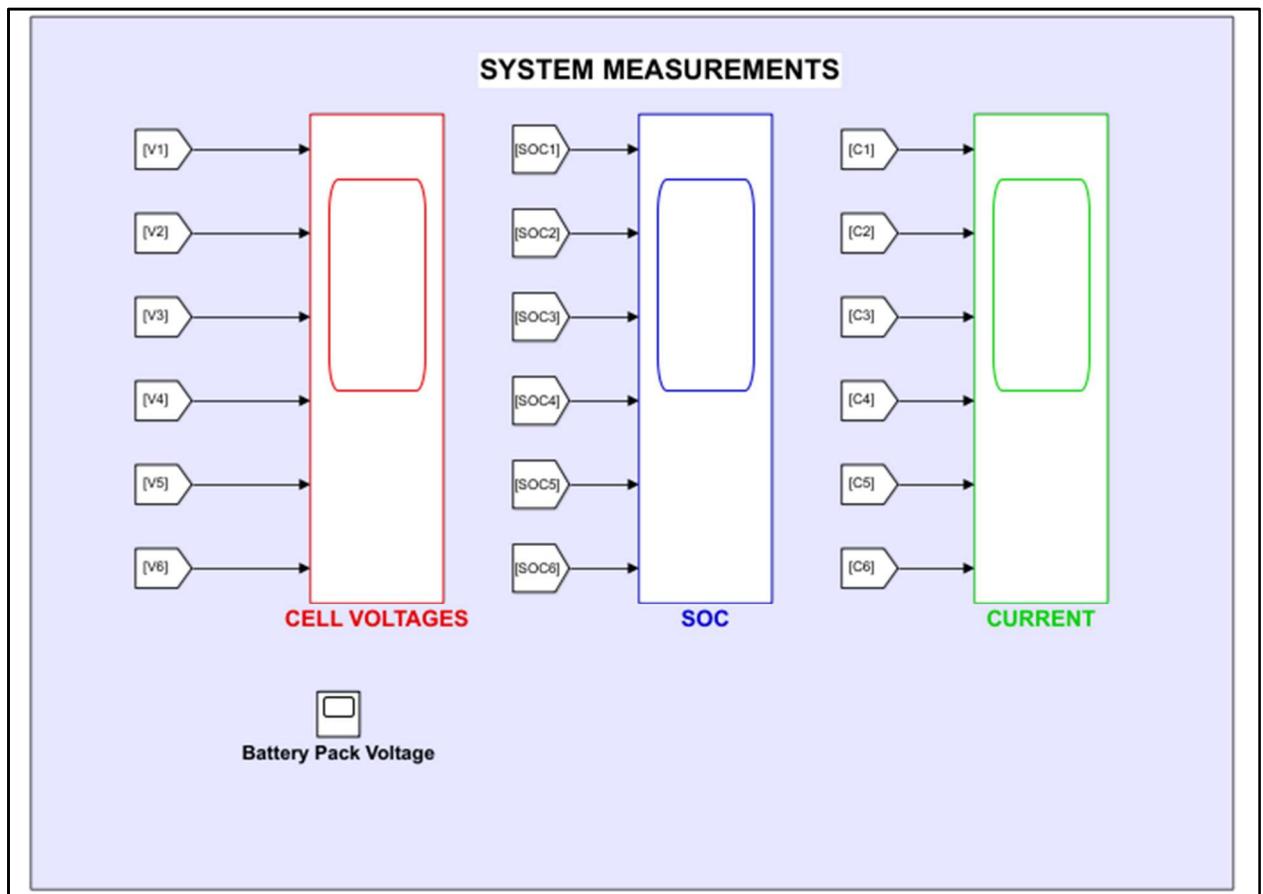
Παρακάτω βλέπουμε τα επιμέρους συστήματα:



(Εικόνα 44: Κύκλωμα κελιών, αντιστάσεων, Mosfers και μετρητών τάσης και ρεύματος).

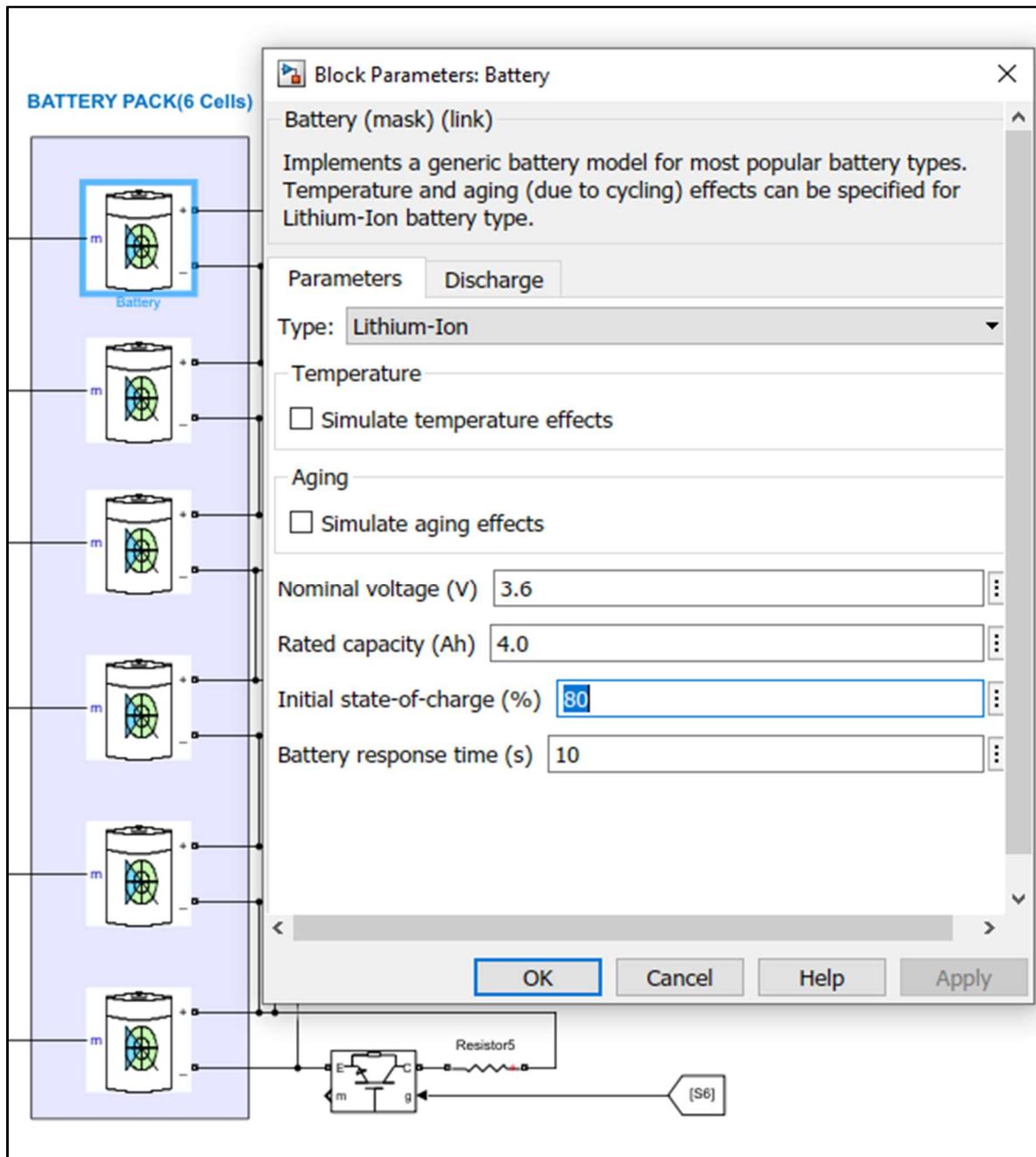


(Εικόνα 45: Αλγόριθμος του BMS που δέχεται ως είσοδο το SOC κάθε μπαταρίας και έχει ως έξοδο την τάση εισόδου του κάθε Mosfet προκειμένου να κάνει την εξισορρόπηση σε κάθε κελί).



(Εικόνα 46: Μετρητές τάσεων, SOC και ρεύματος που μας παρέχουν τις γραφικές μας παραστάσεις).

Το κύκλωμα αποτελεί μία ενδεικτική προσομοίωση ενός απλού σχετικά BMS προκειμένου να κάνουμε χρήση της ίδιας λογικής και στο υλικό (Hardware) της εφαρμογής μας με την χρήση της μεθόδου Coulomb Counting για να έχουμε το βέλτιστο δυνατό έλεγχο και επίβλεψη του Battery Pack μας. Στην προσομοίωση μας χρησιμοποιούμε ενδεικτικά ποσοστά Initial State Of Charge των κελιών μας και τα επιλέγουμε χειροκίνητα σε κάθε κελί ξεχωριστά. (Εικόνα 47)



(Εικόνα 47: Χειροκίνητος καθορισμός των Initial State-Of-Charge της κάθε μπαταρίας στο περιβάλλον Simulink).

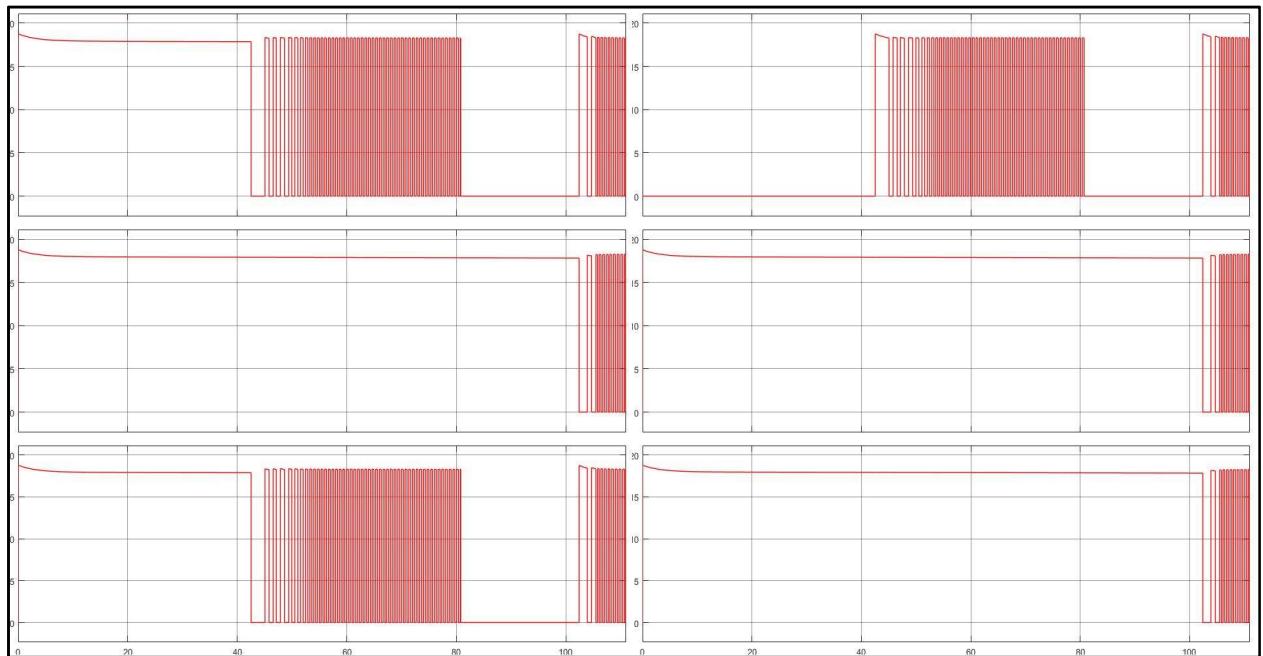
Προκειμένου να δούμε τι απόκριση έχει το μοντέλο μας δοκιμάσαμε διάφορες παραλλαγές προσομοιώσεων. Οι διαφορές αφορούσαν τόσο τα επίπεδα φόρτισης που έχει το κάθε κελί, όπως και το φορτίο που αποφορτίζονται. Στην προσομοιώση έγινε χρήση ωμικού φορτίου και συγκεκριμένα αντιστάσεων. Σε αντίθεση με την πραγματική BMS εφαρμογή μας που δοκιμάστηκε τόσο με ωμικό όσο και με επαγωγικό φορτίο. Παρατηρήθηκε ότι σε αποκλίσεις μεγαλύτερες του 30-40% (SOC) μεταξύ των κελιών οδηγούν σε πολύ μεγαλύτερους χρόνους εξισορρόπησης και σε λιγότερο ομαλές γραφικές παραστάσεις τάσεων και ρευμάτων. Ενδεικτικές παραστάσεις για μικρές και μεγάλες αποκλίσεις.

	CELL1	CELL2	CELL3	CELL4	CELL5	CELL6
State Of Charge με μικρή απόκλιση	85%	85%	90%	80%	90%	90%
State Of Charge με μεγάλη απόκλιση	60%	85%	90%	25%	90%	55%

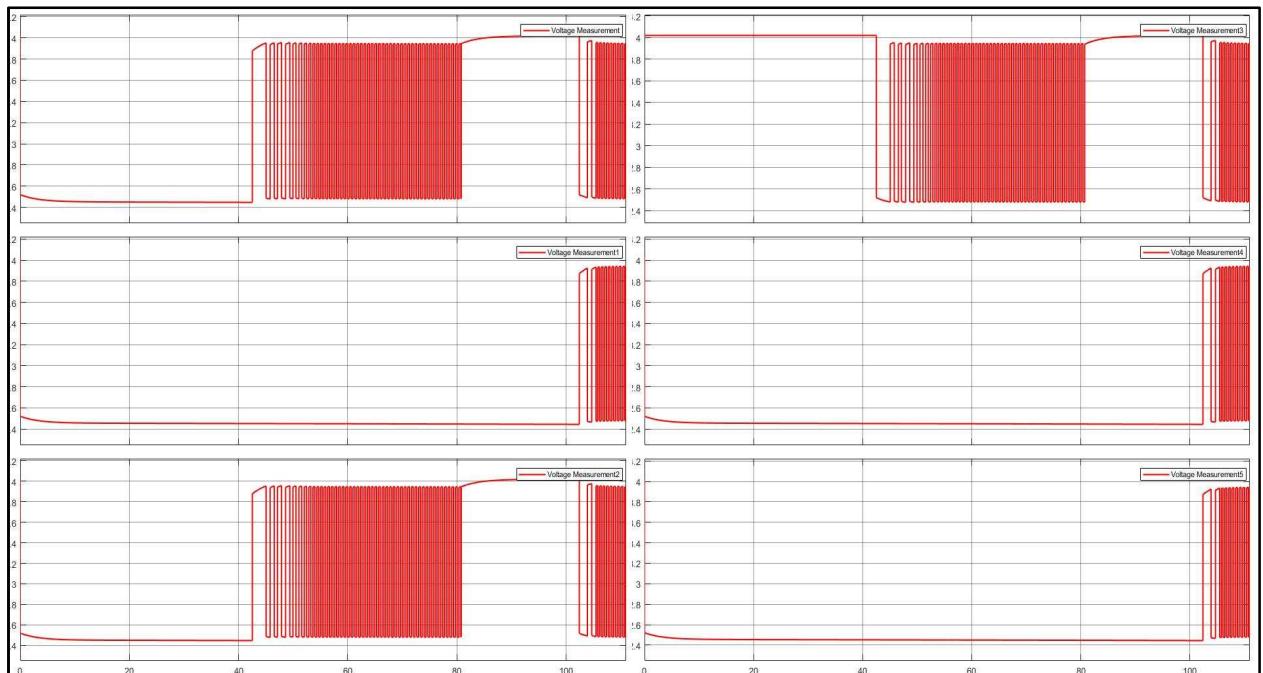
(Πίνακας 9: Σύγκριση SoC για δύο διαφορετικές προσομοιώσεις.)

4.2 Γραφήματα Ρευμάτων-Τάσεων-SOC

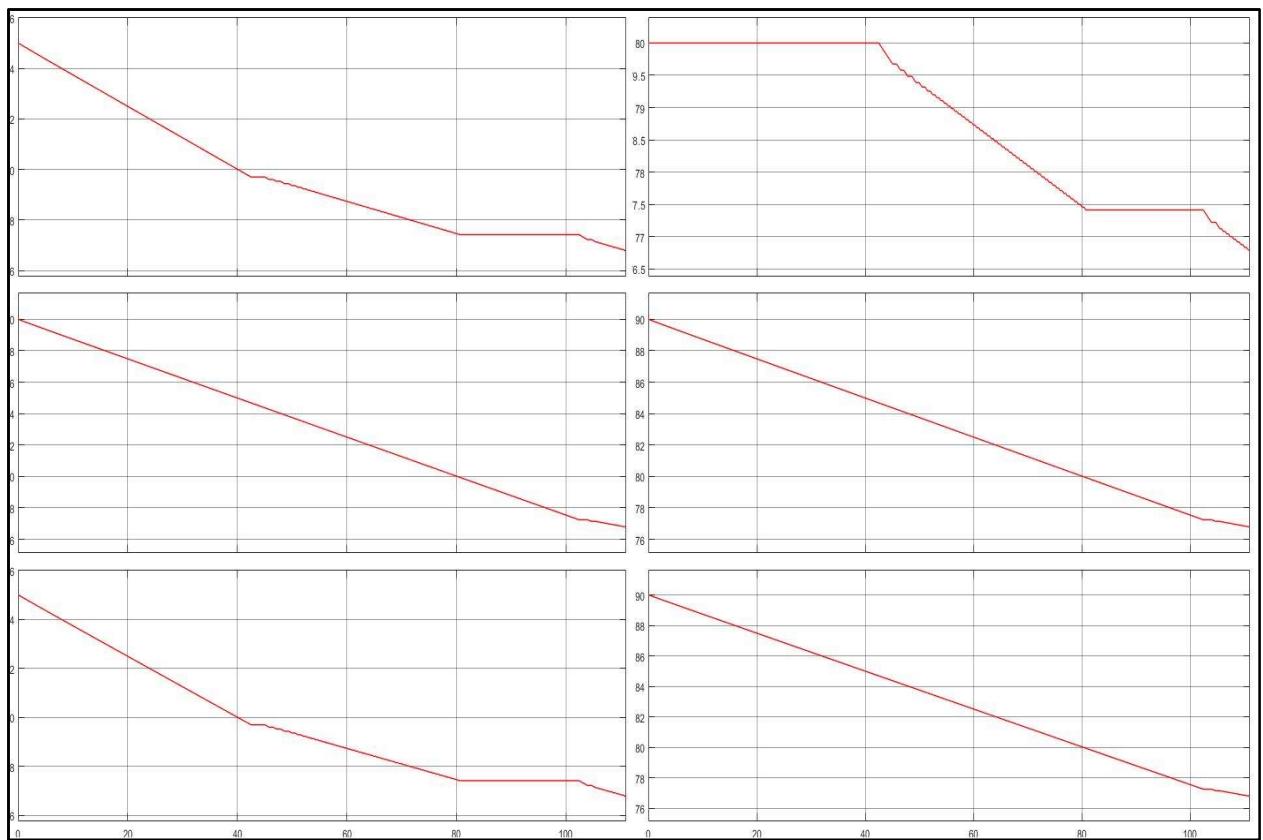
4.2.1 Γραφήματα Μικρών Αποκλίσεων στο SOC



(Εικόνα 48: Χειροκίνητος καθορισμός του Initial State-Of-Charge της κάθε μπαταρίας στο περιβάλλον Simulink).

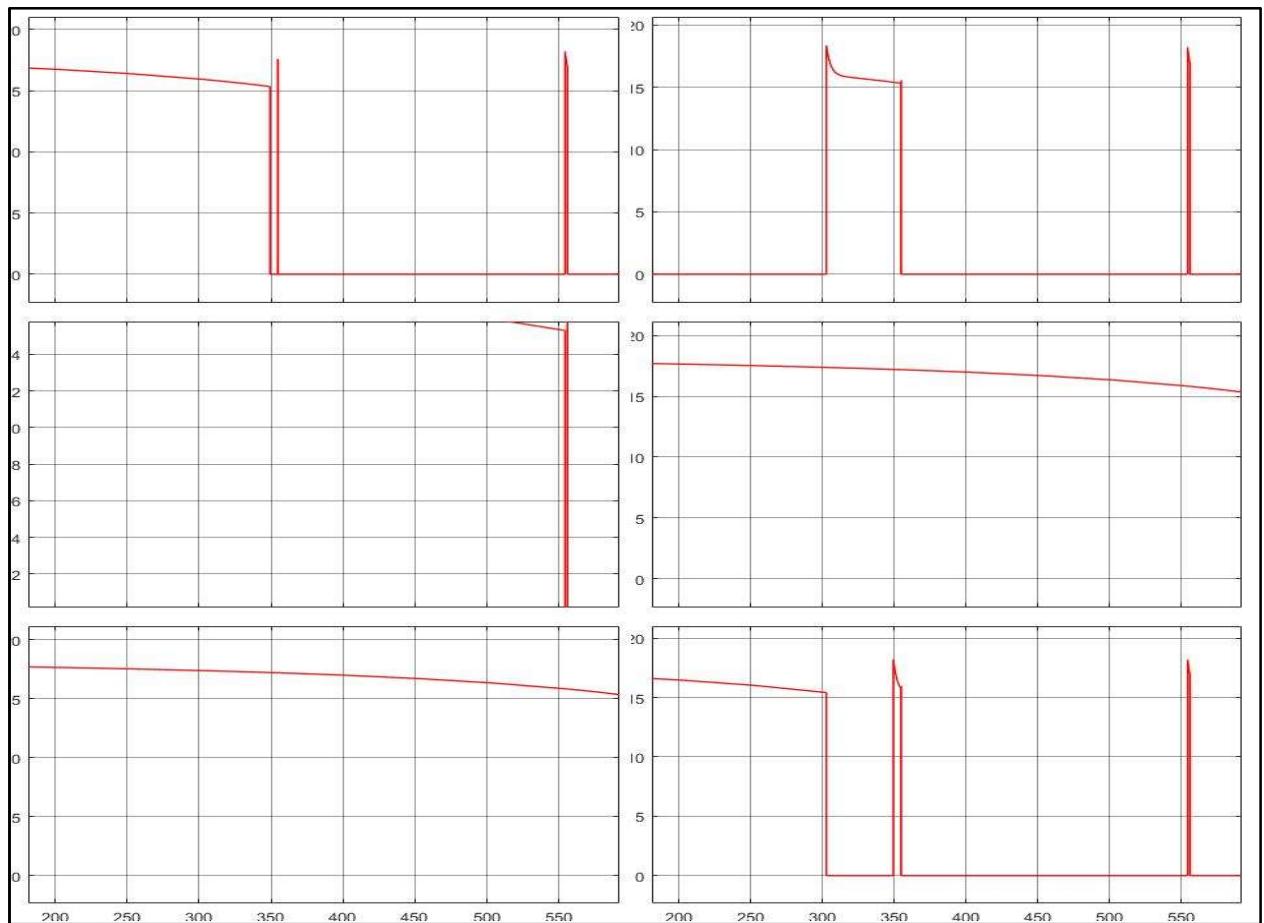


(Εικόνα 49: Χειροκίνητος καθορισμός του Initial State-Of-Charge της κάθε μπαταρίας στο περιβάλλον Simulink).

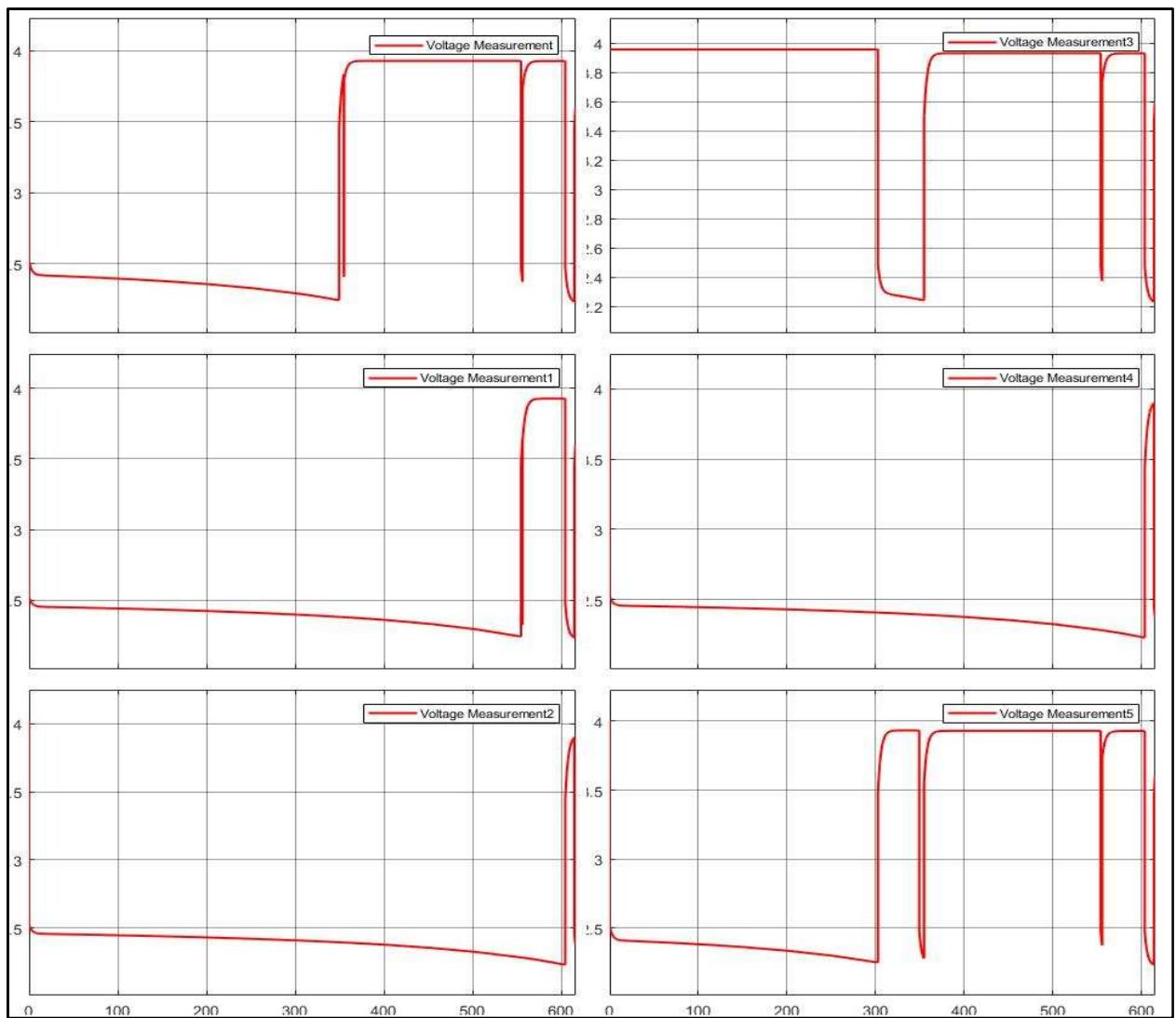


(Εικόνα 50: Χειροκίνητος καθορισμός του Initial State-Of-Charge της κάθε μπαταρίας στο περιβάλλον Simulink).

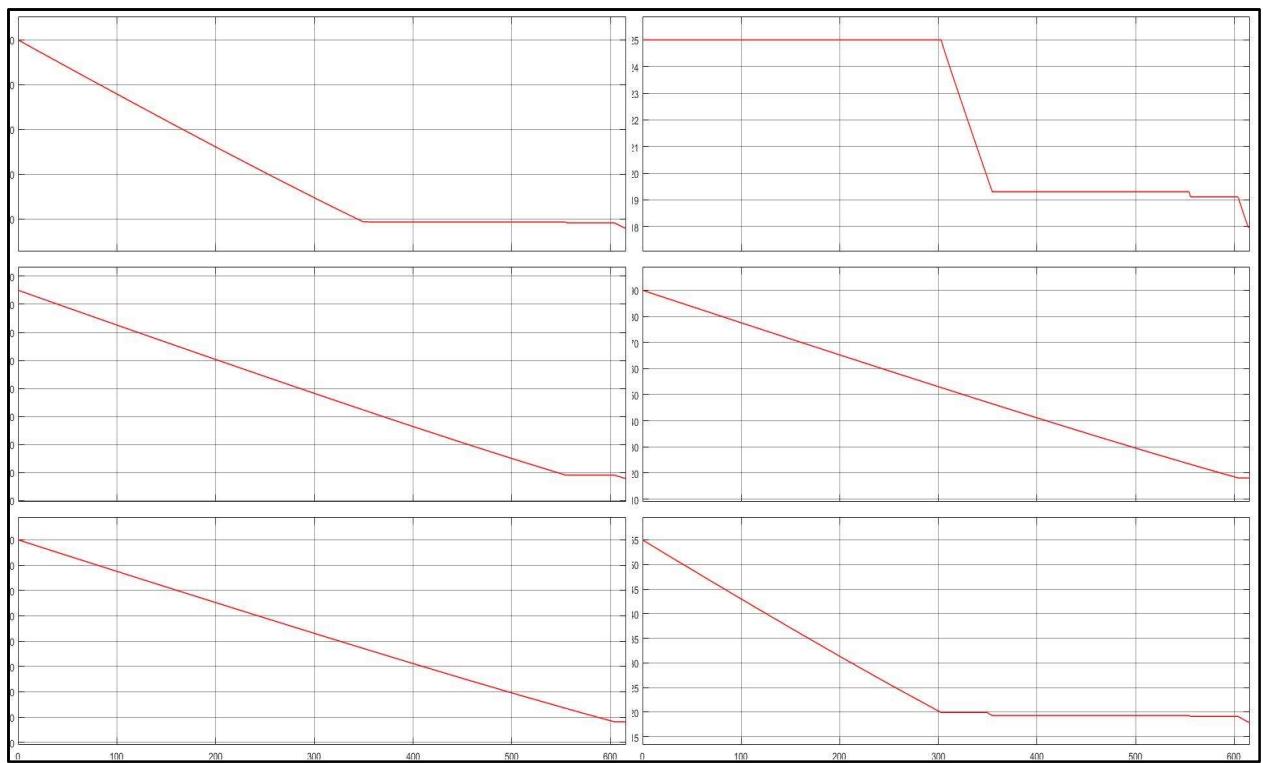
4.2.2 Γραφήματα Μεγάλων Αποκλίσεων στο SOC



(Εικόνα 51: Χειροκίνητος καθορισμός του Initial State-Of-Charge της κάθε μπαταρίας στο περιβάλλον Simulink).



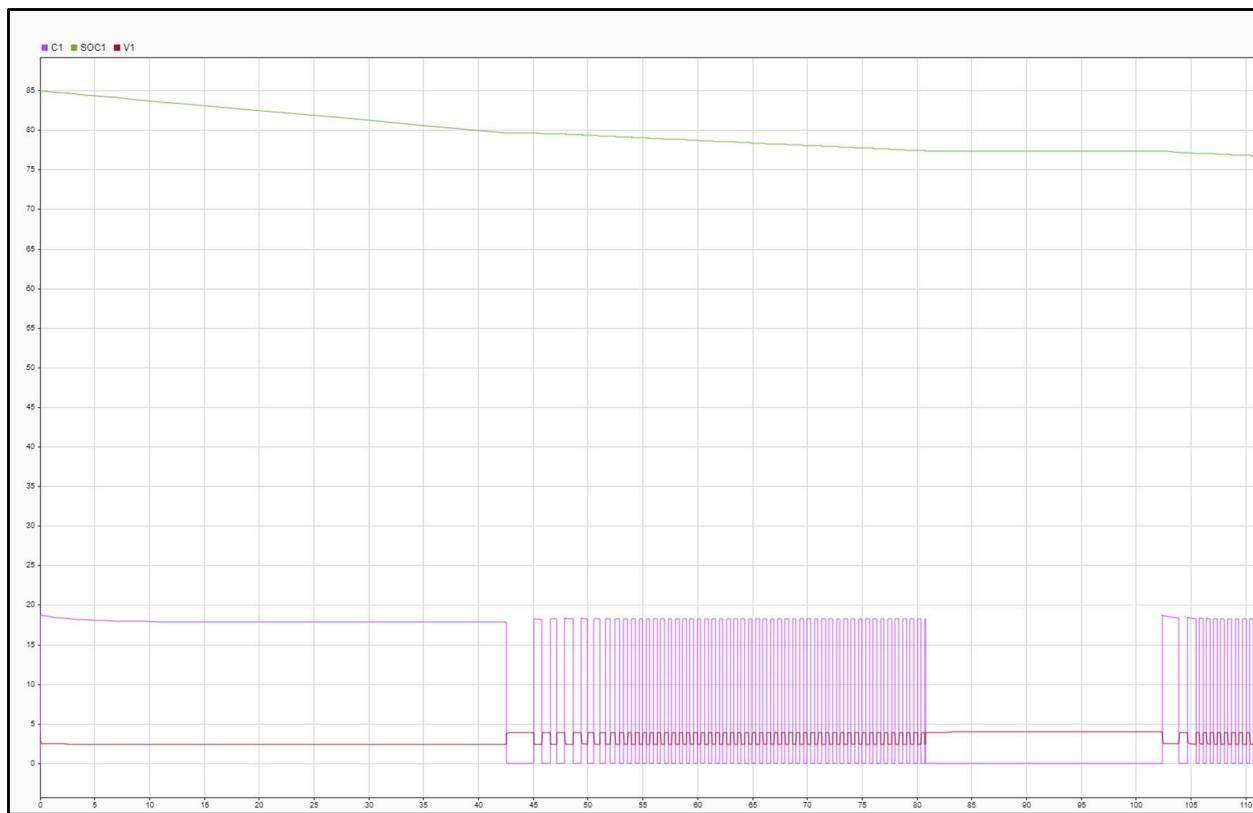
(Εικόνα 52: Χειροκίνητος καθορισμός του Initial State-Of-Charge της κάθε μπαταρίας στο περιβάλλον Simulink).



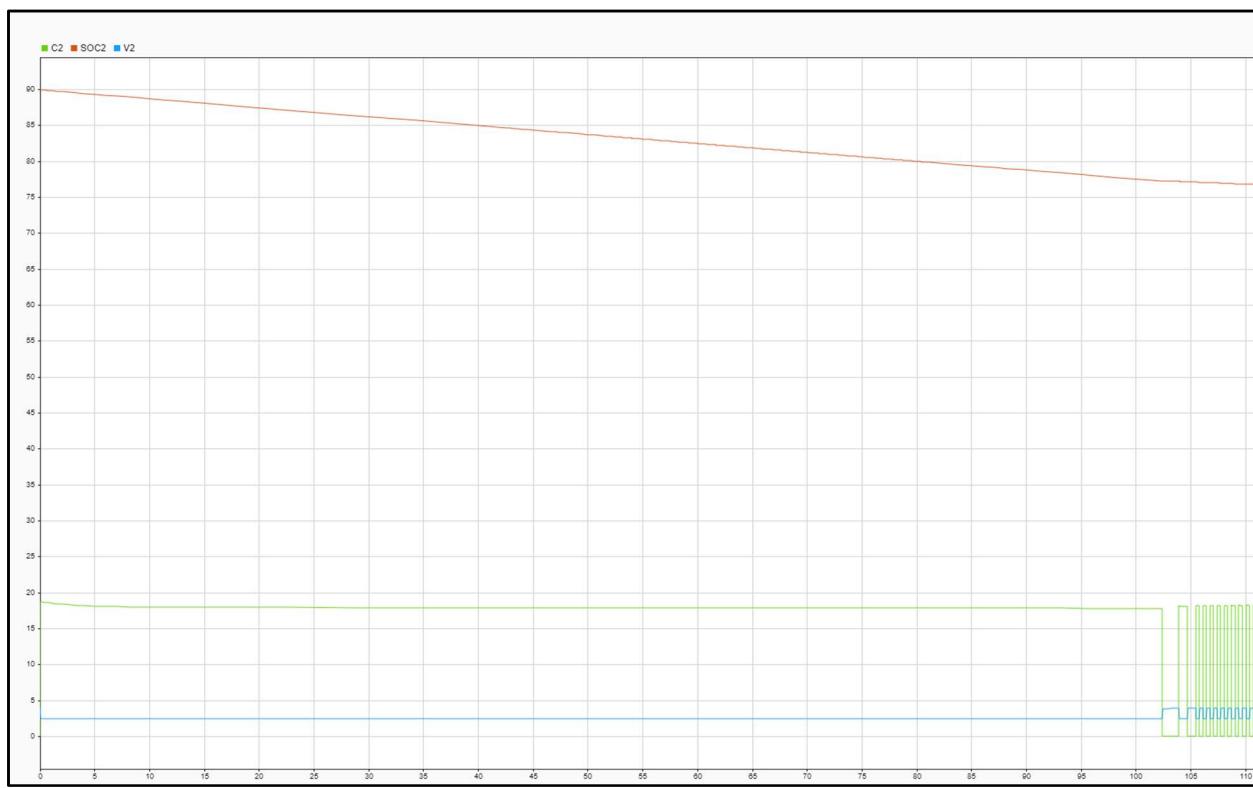
(Εικόνα 53: Χειροκίνητος καθορισμός των Initial State-Of-Charge της κάθε μπαταρίας στο περιβάλλον Simulink).

4.3 Συσχέτιση Ρεύματος-Τάσης-SOC Κάθε Κελιού

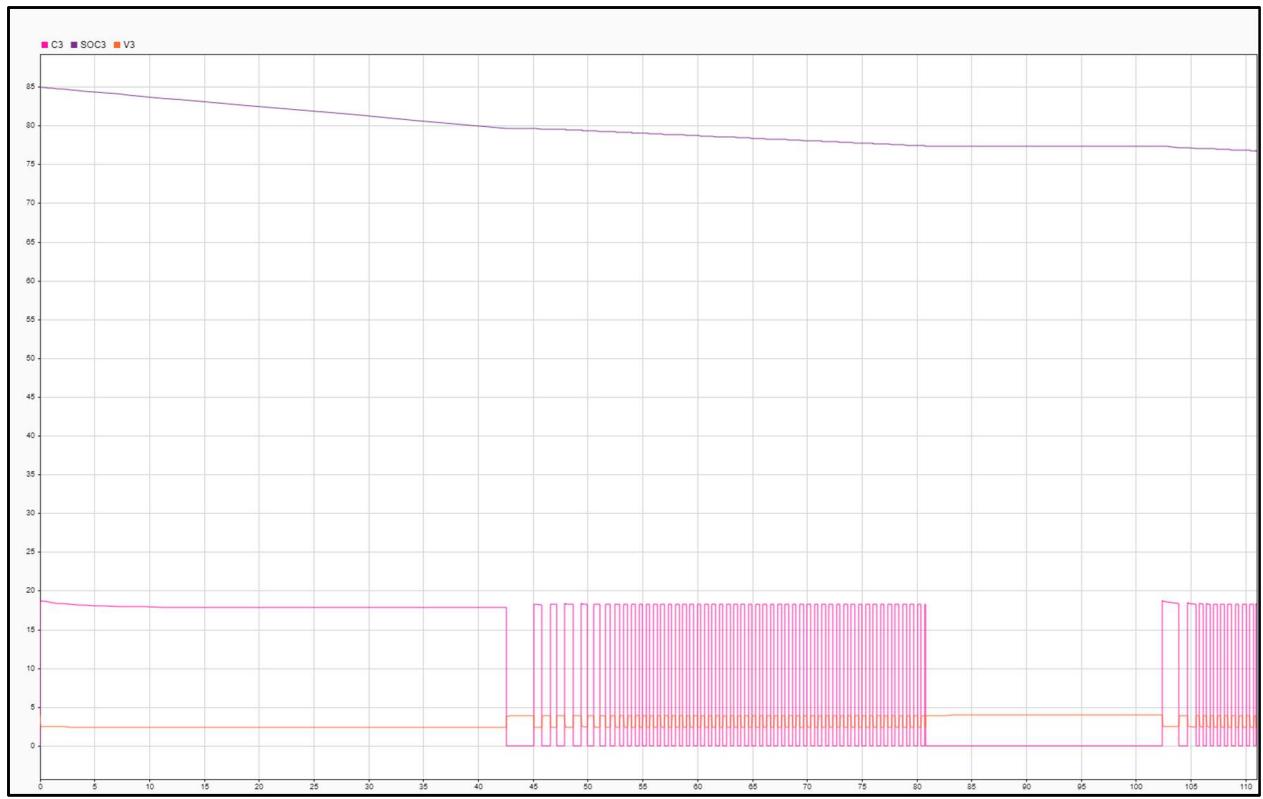
Βλέπουμε την συσχέτιση που έχει κάθε κελί με την τάση του, το ρεύμα του και το SOC πως φορτίζεται και αποφορτίζεται προκειμένου να εξισορροπήσει όλη την συστοιχία μαζ(οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις αφορούν την προσομοίωση με τα SOC τα οποία έχουν μικρές αποκλίσεις) .



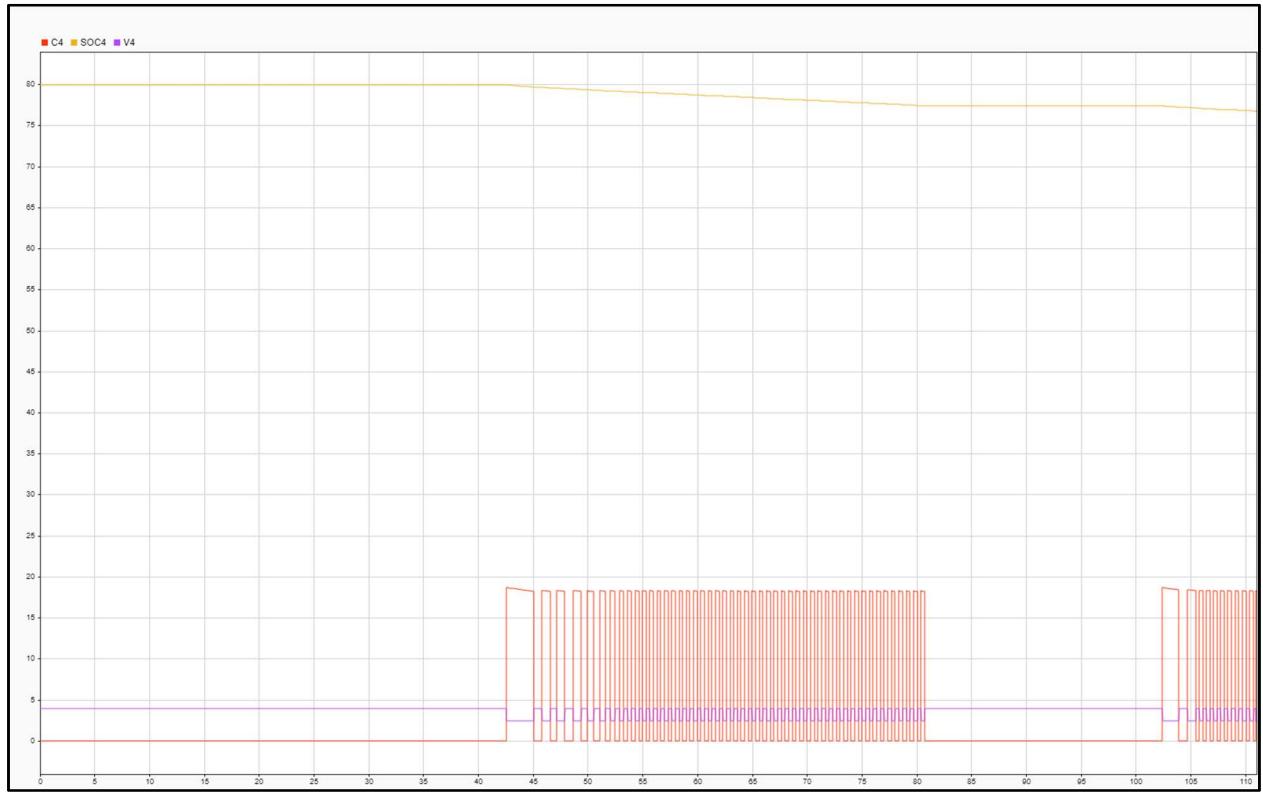
(Εικόνα 54: Cell1).



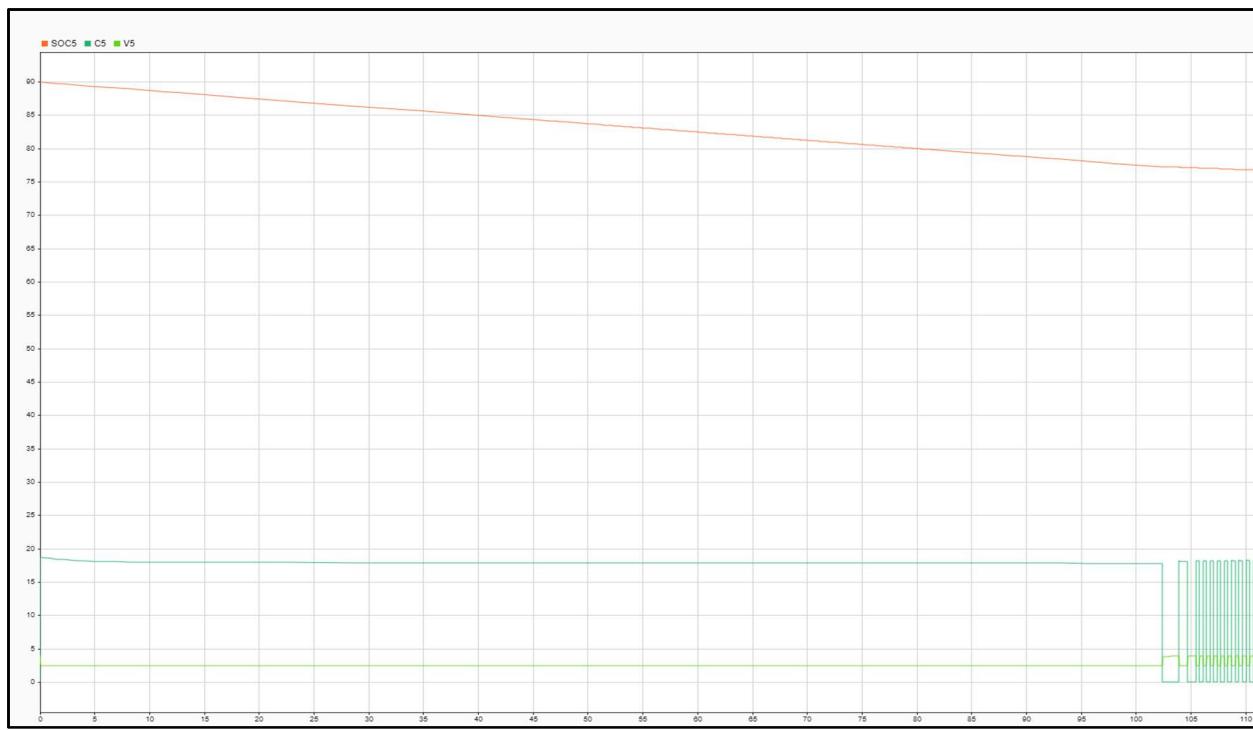
(Εικόνα 55: Cell2).



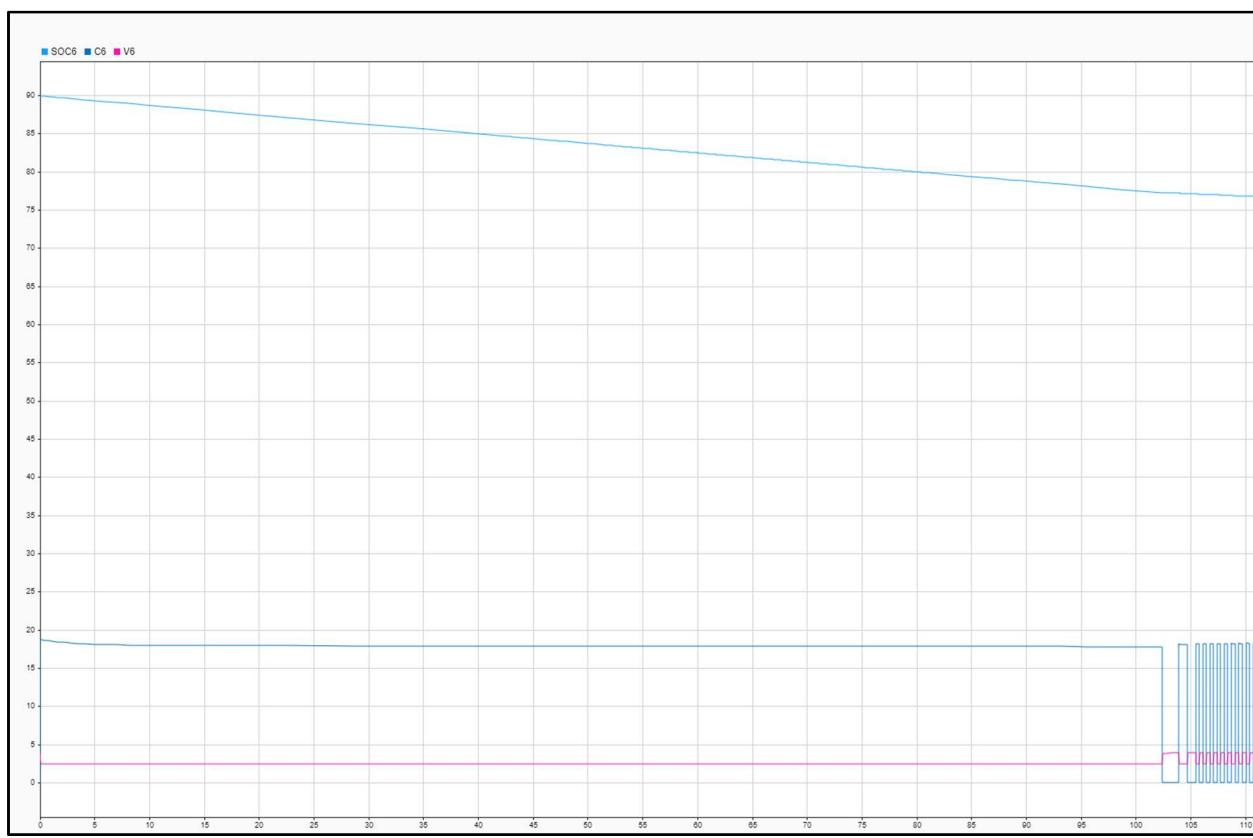
(Εικόνα 56: Cell3).



(Εικόνα 57: Cell4).



(Εικόνα 58: Cell5).



(Εικόνα 59: Cell6).

4.4 Συμπεράσματα Βάσει Γραφημάτων

Η διάρκεια του πειράματος ήταν 1500 δευτερόλεπτα και το φορτίο ήταν ωμικό. Παρατηρήθηκε ότι χωρίς την χρήση BMS οι τάσεις παραμένουν σε χαμηλότερα ποσοστά. Συγκεκριμένα έπειτα από αρκετές ιδεατές προσομοιώσεις βρέθηκε ένα ποσοστό βελτίωσης του συστήματος με χρήση BMS του εύρους 1-3% με κύριο παράγοντα να έχουν οι αποκλίσεις των SOC μεταξύ των μπαταριών. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε σύγκρινε κάθε στιγμή την τάση κάθε μπαταρίας και ενεργοποιεί το κάθε Mosfet έτσι ώστε να φορτιστεί ή να αποφορτιστεί κατάλληλα η κάθε μία.

```
function [S1,S2,S3,S4,S5,S6,S7] = fcn(U1,U2,U3,U4,U5,U6)

U1=U1*1000;
U2=U2*1000;
U3=U3*1000;
U4=U4*1000;
U5=U5*1000;
U6=U6*1000;

U1=int32(U1);
U2=int32(U2);
U3=int32(U3);
U4=int32(U4);
U5=int32(U5);
U6=int32(U6);

if((U1>U2) || (U1>U3) || (U1>U4) || (U1>U5) || (U1>U6) || (U1>U6))
    S1=1;
else
    S1=0;
end

if((U2>U1) || (U2>U3) || (U2>U4) || (U2>U5) || (U2>U6))
    S2=1;
else
    S2=0;
end

if((U3>U2) || (U3>U1) || (U3>U4) || (U3>U5) || (U3>U6))
    S3=1;
else
    S3=0;
end

if((U4>U2) || (U4>U3) || (U4>U1) || (U4>U5) || (U4>U6))
    S4=1;
else
    S4=0;
end

if((U5>U2) || (U5>U3) || (U5>U4) || (U5>U1) || (U5>U6))
    S5=1;
else
    S5=0;
end

if((U6>U2) || (U6>U3) || (U6>U4) || (U6>U5) || (U6>U1))
    S6=1;
else
    S6=0;
end
```

```
if((U1==U2)&&(U2==U3)&&(U3==U4)&&(U4==U5)&&(U5==U6))  
    S7=1;  
else  
    S7=0;  
end
```

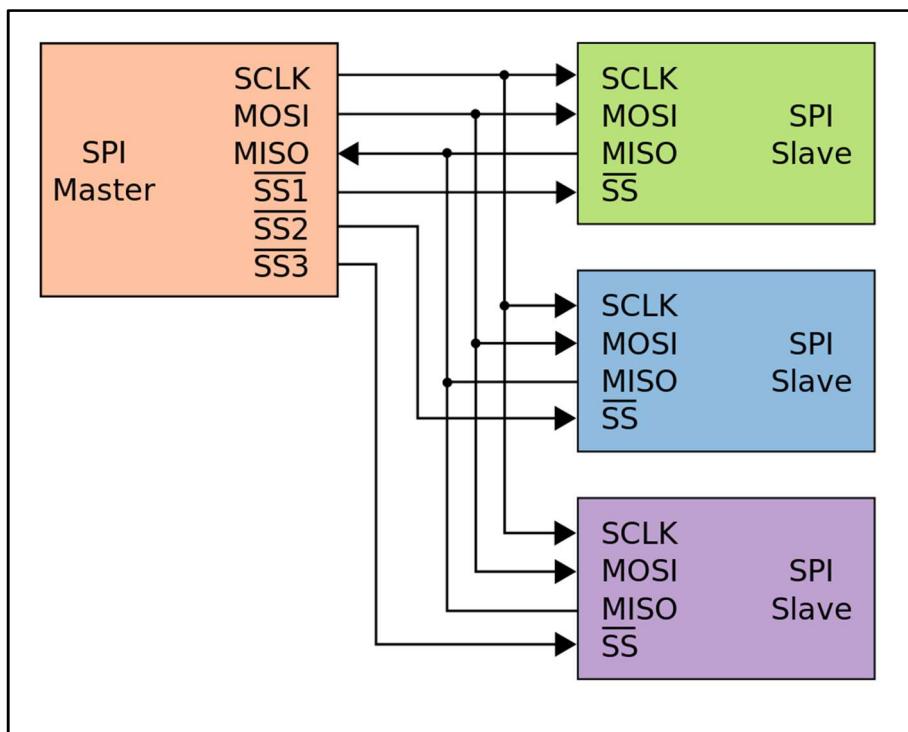
(Εικόνα 60: Τυπικός κώδικας που γράφτηκε στο Block Control Algorithm στο Simulink για να ενεργοποιούνται καταλλήλως τα Mosfets για εξισορρόπηση).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Πρωτόκολλα Επικοινωνιών

Πολλά συστήματα (BMS) κάνουν χρήση ενσύρματων πρωτοκόλλων επικοινωνίας SPI(Serial Peripheral Interface) ή CAN bus(Controller Area Network) για να επικοινωνούν με τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, τα αισθητήρια μέτρησης τάσης-ρεύματος καθώς και με τον μικροελεγκτή του συστήματος, έτσι ώστε να μεταβιβάσουν τα δεδομένα και να τα επεξεργαστούν κατάλληλα. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και προκειμένου να μειωθούν τα υλικά που χρησιμοποιούμε, οδηγηθήκαμε τα τελευταία χρόνια και στην χρήση ασύρματων πρωτοκόλλων.

5.2 Πρωτόκολλο Σειριακής Επικοινωνίας (SPI)

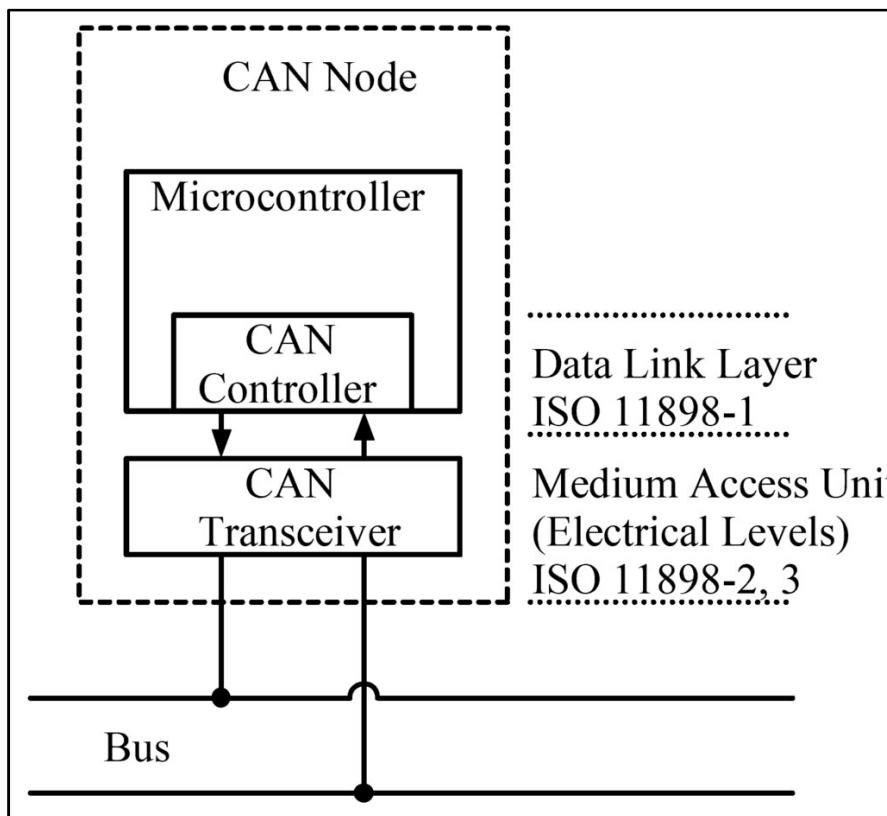
Το πρωτόκολλο επικοινωνίας SPI είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα, στο οποίο μπορεί να τελείται αμφιδρομη(Full-Duplex) επικοινωνία ή μονόδρομη(Half-Duplex) μεταξύ δύο συσκευών(Μικροελεγκτών, Αισθητήρων κλπ). Ένας τυπικός δίαυλος επικοινωνίας αποτελείται από 4 σήματα(συνδέσεις), το Master Out Slave In(MOSI), το Master In Slave Out(MISO), τον χρονιστήρολοι συστήματος Serial Clock (SCK) καθώς και το SS(Slave Select). Το SCK αποτελεί το ρυθμό μετάδοσης που προκαθορίζεται από το σύστημα και συνήθως η πλευρά που το παρέχει αυτό το σήμα είναι του ελεγκτή και τα περιφερειακά το δέχονται ως σήμα εντολής, το μετράμε σε Baud Rate. Το SS αποτελεί το σήμα στο οποίο ο ελεγκτής επιλέγει σε ποιο περιφερειακό αισθητήριο θα μεταβιβάσει ή θα αντλήσει δεδομένα. Στην παρακάτω (Εικόνα 61) [11] βλέπουμε ένα κλασικό διάγραμμα σύνδεσης SPI.[25]



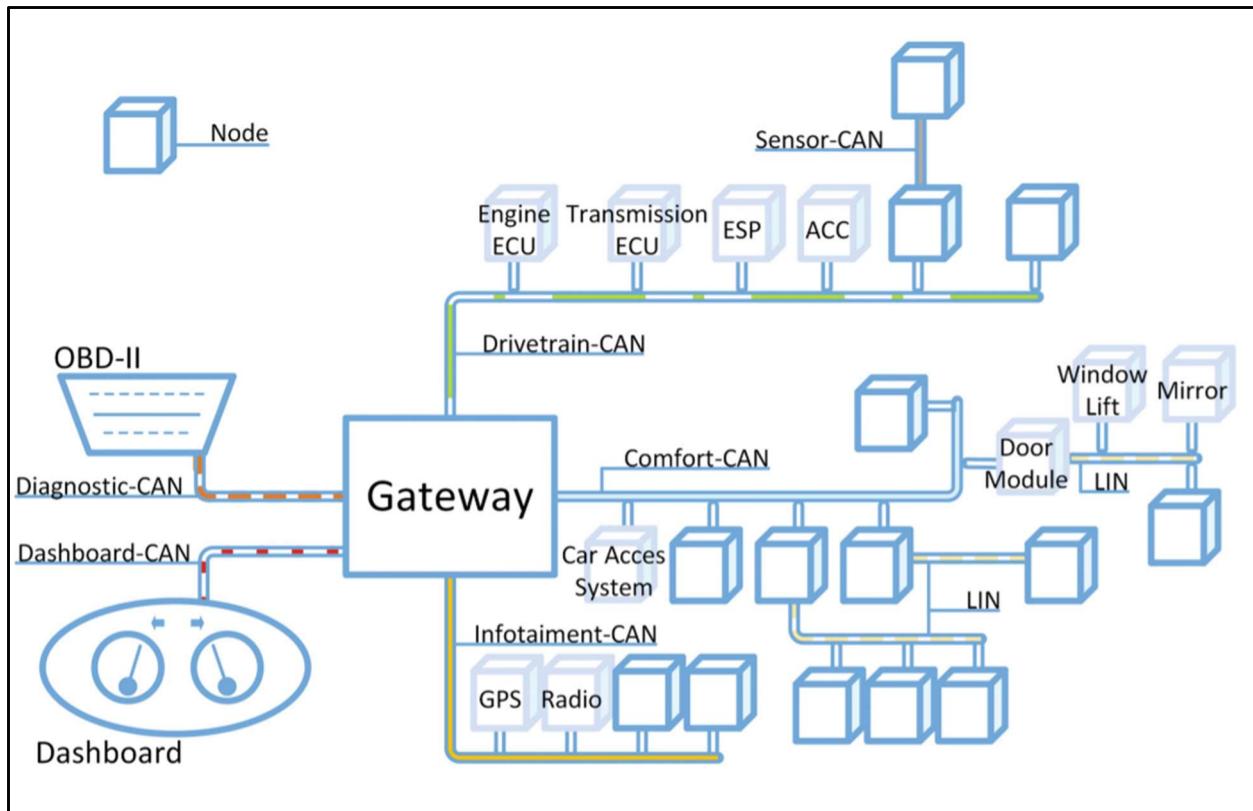
(Εικόνα 61: Διάγραμμα σύνδεσης SPI με ένα Master και 3 Slaves. Wikipedia. (2021). Serial Peripheral Interface. [online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface#/media/File:SPI_three_slaves.svg [Accessed 29 Apr. 2021].)

5.3 Πρωτόκολλο Επικοινωνίας Controller Area Network (CAN bus)

Το CAN bus αποτελεί ένα πρωτόκολλο σειριακής επικοινωνίας και είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε συστήματα τα οποία έχουν σκληρές συνθήκες. Συγκεκριμένα είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε χώρους όπως βιομηχανικές εγκαταστάσεις και σε αυτοκίνητα όπου υπάρχουν έντονοι θόρυβοι(EMI) καθώς και αντίξοες συνθήκες. Αρχικά εφευρέθηκε από την εταιρεία Bosch και αργότερα κωδικοποιήθηκε στο πρότυπο ISO11898-1, το CAN ορίζει την σύνδεση των δεδομένων με το φυσικό επίπεδο σε ένα σύστημα(Open Systems Interconnection OSI), παρέχοντας μια λύση στην δικτύωση σε συστήματα χαμηλού επιπέδου που χρειάζονται μεγάλη ταχύτητα επικοινωνίας. Συγκεκριμένα αναπτύχθηκε προκειμένου να μειωθούν τα καλώδια μέσα σε ένα όχημα, έτσι ώστε η κάθε ξεχωριστή μονάδα ελέγχου(ECU) να επικοινωνεί μόνο με ένα ζεύγος καλωδίων. Το CAN χρησιμοποιεί ID(ταυτότητα) σε κάθε μήνυμα του δικτύου ώστε να καθορίζει την προτεραιότητα που έχει το κάθε μήνυμα και με ποιά σειρά θα σταλεί. Αυτός ο τρόπος χρησιμοποιείται προκειμένου να λύνονται διενέξεις μεταξύ ταυτόχρονων μηνυμάτων που μπορούν να σταλούν. Το πιο σύνηθες μοντέλο προϋποθέτει το κύκλωμα να είναι γραμμικό και να τερματίζεται σε κάθε άκρο. Θα πρέπει να φροντίζουμε το τερματικό αισθητήριο να έχει σύνδεση με γείωση και πιθανός και ένα πυκνωτή για απαλοιφή θορύβων. Για τα συστήματα αυτοκινήτων έχει αναπτυχθεί ακόμα πιο εξελιγμένη έκδοση του CAN η οποία επιτρέπει στις συσκευές να εισέρχονται σε κατάσταση απενεργοποίησης όσο δεν λειτουργούν. Στην παρακάτω (Εικόνα 62) βλέπουμε ένα τυπικό δίκτυο CAN bus.[25]



(Εικόνα 62: Τυπική σύνδεση κόμβου CAN bus. Wikipedia. (2021). CAN bus. [online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus#/media/File:CAN_Node.png [Accessed 29 Apr. 2021].)



(Εικόνα 63: Τυπικό μοντέλο δικτύου CAN bus αυτοκινήτου, με υποδίκτυα που συνδέονται σε κεντρικό κόμβο και καταλήγουν σε διαγνωστικό και στον πίνακα ενδείξεων του οχήματος. Huybrechts, T., Vanommeslaeghe, Y., Blonrock, D., Van Barel, G. and Hellinckx, P. (2017). Automatic Reverse Engineering of CAN Bus Data Using Machine Learning Techniques. Advances on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing, [online] pp.751–761. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-69835-9_71 [Accessed 13 Dec. 2019].)

5.4 Ασύρματη Εξέλιξη Των Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας Οχημάτων

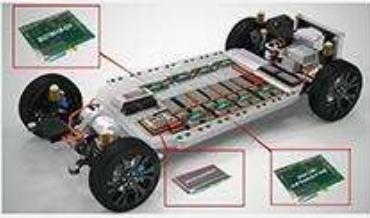
Τα τελευταία χρόνια γίνεται η προσπάθεια να αντικατασταθούν ώς ένα βαθμό τα ενσύρματα δίκτυα στα οχήματα από ασύρματα. Με σκοπό την μείωση των καλωδίων που συνήθως κυμαίνεται από 3 έως 4 χιλιόμετρα για ένα κοινό αμάξι. Αυτό θα έχει αντίκτυπο τόσο στην μείωση κατανάλωσης όσο και στο περιβαλλοντολογικό αποτύπωμα.

5.4.1 Ασύρματη Εξισορρόπηση Ενέργειας Μπαταριών (wBMS)

Η χρήση wBMS στοχεύει στην παροχή ασύρματης σύνδεσης μεταξύ του συστήματος διαχείρισης μπαταριών και της συστοιχίας των μπαταριών. Με αυτό τον τρόπο θέλει να αντικαταστήσει της παραδοσιακές ενσύρματες συνδέσεις και την τοπολογία αλυσίδας(Daisy Chain Connection). Κατά κύριο λόγο κάνουμε χρήση του πρωτοκόλλου BLE(Bluetooth Low Energy).

BMS today and tomorrow

Wired is today's industry standard

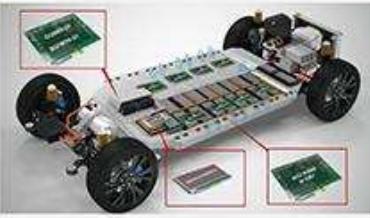


- Today's choice for implementing our parts with wired daisy chain communications interface
- Widely perceived to be a safe standard

Robust daisy chain communications

- ASIL D capable communications support a single twisted-pair interface that can be connected in ring architecture for reliable communications in the event of a cable break

Wireless reduces cost and weight



- Cable failures are costly. Warranty repairs and replacing the battery cell are expensive
 - The leading failures occur with the wiring harness and connectors
 - Eliminates miles of cabling, significantly reducing weight

Inherently isolated

- Each cell-monitoring unit would naturally be isolated from one another to avoid noisy communications lines
- No need for daisy chain isolation components on external BOM

(Εικόνα 64: Σύγκριση των δύο συστημάτων διαχείρισης ενέργειας από την εταιρεία ημιαγωγών Texas Instruments. Roos, G. (2021). TI launches ASIL-D compliant wireless battery management system. [online] Electronic Products. Available at: <https://www.electronicproducts.com/ti-launches-asil-d-compliant-wireless-battery-management-system/#> [Accessed 27 May 2021].)

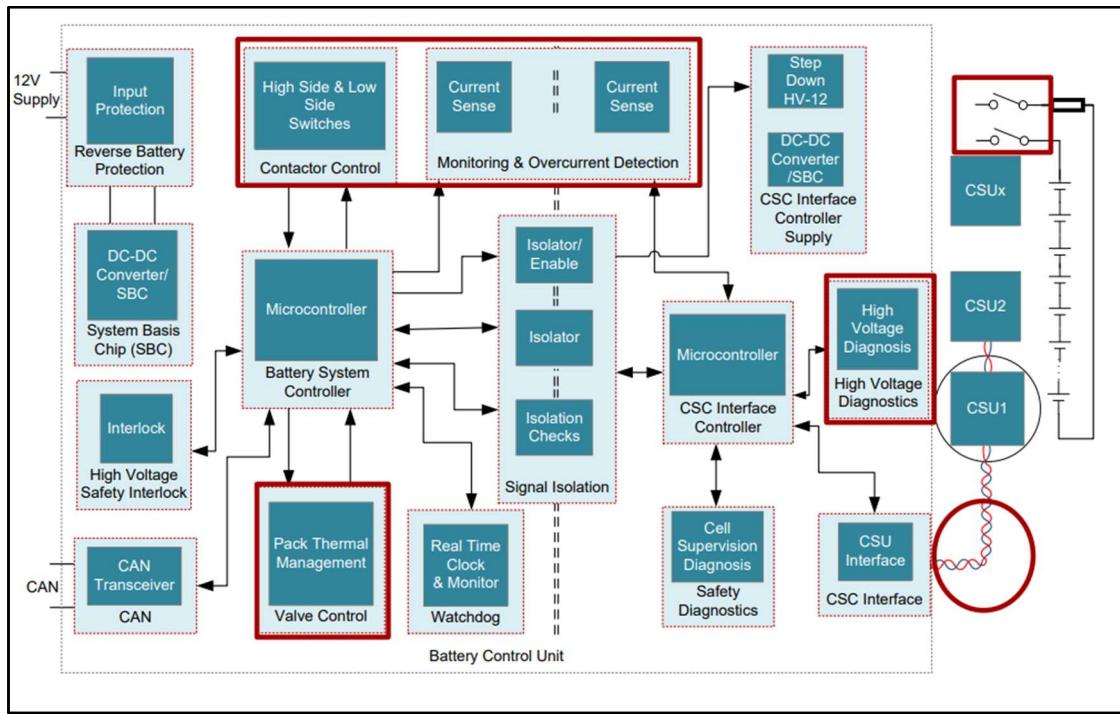
5.4.2 Σύγκριση Κυκλωμάτων BMS vs wBMS

Πλεονεκτήματα του wBMS:

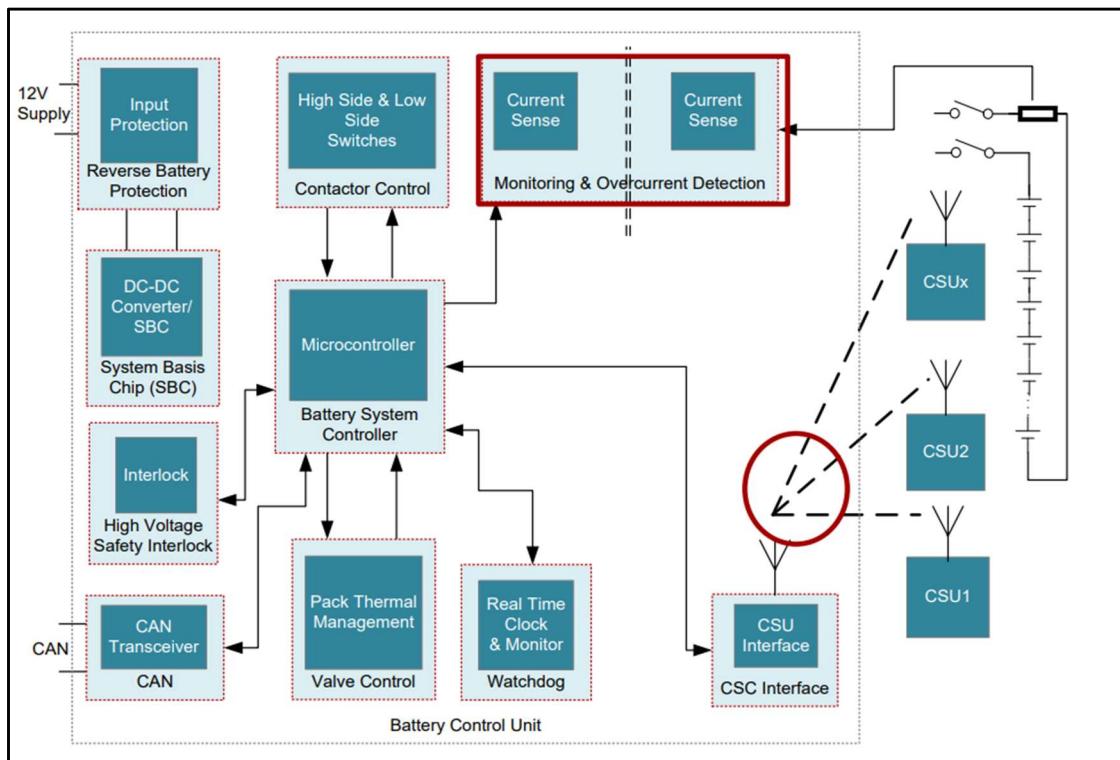
- Βελτιωμένη αξιοπιστία με την εξάλειψη πολύπλοκων ενσύρματων συνδέσεων.
- Χαμηλότερο κόστος και βάρος.
- Μειωμένη πολυπλοκότητα καλωδίωσης για πολύ μεγάλες συστοιχίες κελιών.
- Πιο ευέλικτη και πιο εξελιγμένη τοποθέτηση μπαταριών σε οχήματα HEVs/EVs.
- Απόλυτα συγχρονισμένες χρονικά μετρήσεις σε κάθε κόμβο μπαταριών.
- Δεν χρειάζεται κύκλωμα γαλβανικής απομόνωσης μεταξύ του BMS και του ECU.

Μειονεκτήματα του wBMS που είναι σε στάδιο επίλυσης:

- Ασφάλεια
- Αξιοπιστία
- Ποιότητα



(Εικόνα 65: Τυπική ενσύρματη σύνδεση BMS σύμφωνα με την Texas Instruments.)



(Εικόνα 66: Τυπική ασύρματη σύνδεση wBMS σύμφωνα με την Texas Instruments.)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: Cloud και Cloud Computing

Το Cloud είναι η παροχή και διαθεσιμότητα κατ' απαίτηση υπηρεσιών που αφορούν την αποθήκευση δεδομένων από υπολογιστές συμπεριλαμβανομένων των Διακομιστών, των Servers αποθήκευσης δεδομένων, του Λογισμικού, καθώς και την ανάλυση στοιχείων και πληροφοριών. Οδηγεί σε ταχύτερη καινοτομία και με την χρήση του Cloud Computing το σύστημα θεωρητικά αποκτά απεριόριστους υπολογιστικούς πόρους για να επιτελέσει όποια διαδικασία επιθυμεί.

6.2 Ψηφιακό Δίδυμο

Ο όρος Ψηφιακό Δίδυμο υπάρχει από το 2002 και είχε δημιουργηθεί σε συστήματα κατά κύριο λόγο αεροναυπηγικής που είχαν μεγάλο κόστος δημιουργίας και προσομοίωσης. Τα τελευταία χρόνια ο όρος έχει ξανά έρθει στο προσκήνιο χάρεις την 4η Βιομηχανική Επανάσταση 4.0, καθώς και τις τεχνολογίες IoT. Ο όρος Digital Twin ουσιαστικά σημαίνει ότι μία διαδικασία-σύστημα μεταφέρεται στον ψηφιακό κόσμο. Ο συνδυασμός που έχουμε πλέον τόσο του φυσικού συστήματος όσο και του εικονικού μας επιτρέπει να μπορούμε να αντλήσουμε περισσότερα δεδομένα από αυτό, καθώς και να προσομοιώσουμε καταστάσεις που δύσκολα μπορούμε ή έχουν υψηλό κόστος να δημιουργηθούν στο φυσικό μοντέλο. Ως αποτέλεσμα το ψηφιακό δίδυμο προωθεί ταχύτατα την καινοτομία σε κάθε τομέα.

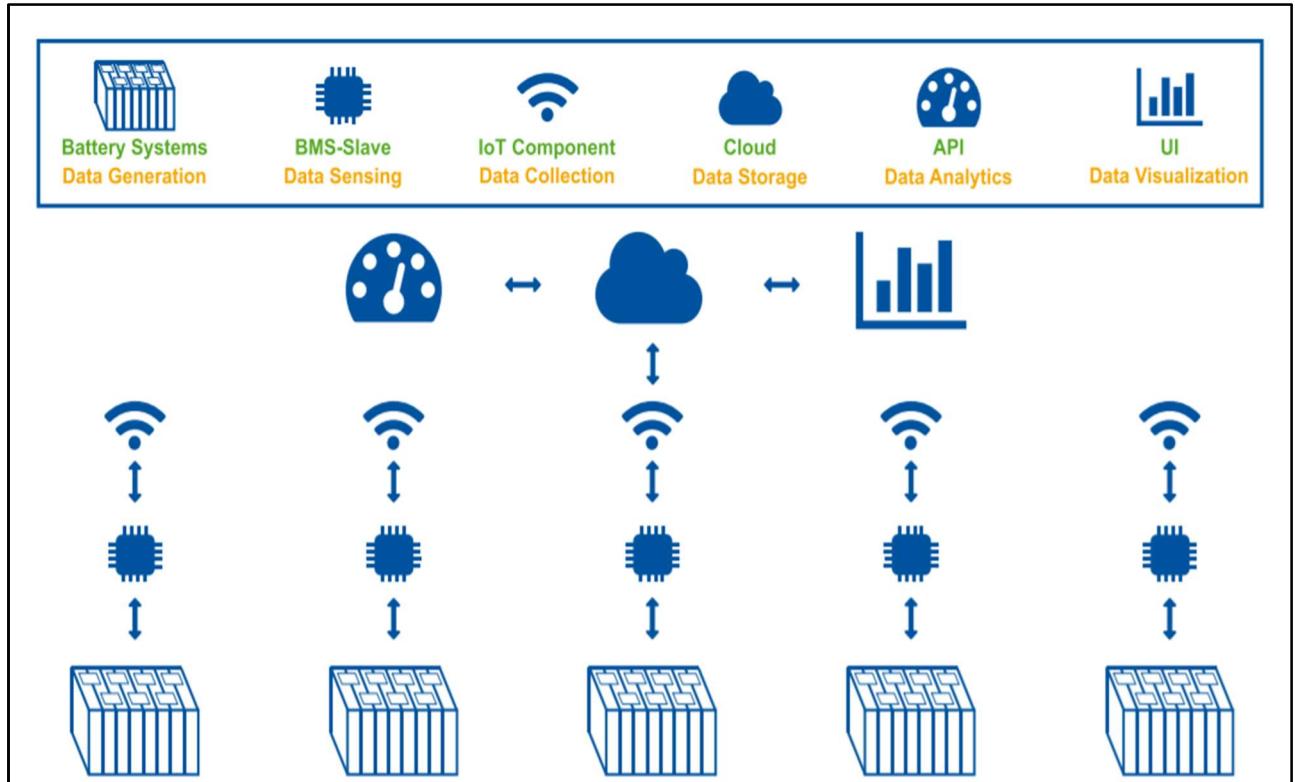
6.3 Συνδυασμός Τεχνολογιών Cloud, IoT και Ψηφιακού Δίδυμου

Η χρήση των τεχνολογιών Cloud και IoT θα προσφέρει προστιθέμενη αξία στα σύστημα BMS, καθώς και πληθώρα άλλων θετικών χαρακτηριστικών που θα αναλυθούν σε αυτό το κεφάλαιο. Η τελευταία και πιο υπερσύγχρονη εκδοχή συστημάτων BMS χρησιμοποιεί δύο συστήματα ένα το οποίο είναι ο BMS-Master και συνήθως και έναν BMS-Slave οι οποίοι μπορούν να συνυπάρχουν σε μία πλακέτα ή και ξεχωριστά απομακρυσμένα το ένα από το άλλο συνδεδεμένα με κάποιο πρωτόκολλο επικοινωνίας. Λόγο των πολύπλοκων πράξεων και των απαιτητικών αλγόριθμων που τελεί ο Master και την πληθώρα των μπαταριών που έχει να ελέγξει, καθώς και της πεπερασμένης του μνήμης οδηγούμαστε στην λύση του σχεδιασμού ενός συστήματος Master το οποίο να είναι στο Cloud. Με αυτήν την λύση η υπολογιστική δύναμη που επιθυμεί κάθε σύστημα μπορεί να επιλεχθεί ανάλογα. Επιπρόσθετα μπορούμε να επιλέξουμε τους κατάλληλους αλγόριθμους βελτιστοποίησης με γνώμονα την πολυπλοκότητα κάθε συστήματος. Επιπλέον μπορεί να γίνει δημιουργία ψηφιακού διδύμου για την ταυτόχρονη προσομοίωση και συνεχείς βελτίωση του BMS. Ένα άλλο θετικό χαρακτηριστικό είναι ότι όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται και μπορούν να διαμοιραστούν για να υπάρχει συνεχείς βελτίωση των φυσικών μοντέλων. Όλα αυτά τα δεδομένα μπορούν να επεξεργαστούν απομακρυσμένα οποιαδήποτε στιγμή και να φίλτραριστούν και να χρησιμοποιηθούν ακόμα και από μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης. Ως αποτέλεσμα όλων των παραπάνω θα μπορούμε να προβλέψουμε καλύτερα την γήρανση των μπαταριών και να αυξήσουμε την διάρκεια ζωής τους, καθώς και να αυξήσουμε την ασφάλεια του συστήματος μας. Παρακάτω παρατίθενται τα κύρια θετικά χαρακτηριστικά:

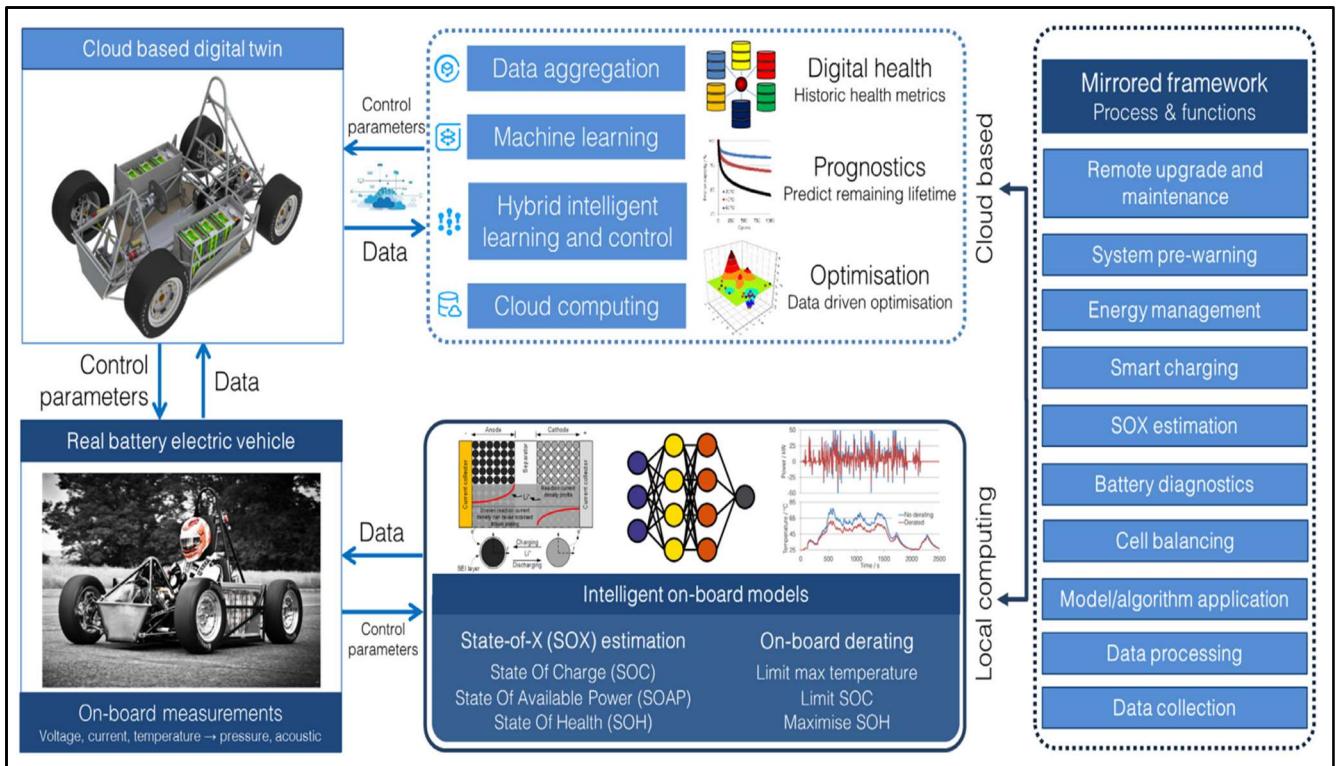
- Συνεχείς παρακολούθηση του συστήματος
Συνεχείς και ακριβής παρακολούθηση της κατάστασης της μπαταρίας με προηγμένους διαγνωστικούς αλγόριθμους, που υποστηρίζονται από υψηλή υπολογιστική ισχύ που παρέχει το Cloud.
- Προγνωστικά σε όλη την διάρκεια ζωής τους συστήματος
Ακριβής πρόβλεψη της γήρανσης των μπαταριών με χρήση Machine Learning που θα βασίζεται σε πλήρης δεδομένα του κύκλου ζωής κάθε κελιού.
- Ανίχνευση σφαλμάτων και πρόβλεψη αυτών
Άμεσος εντοπισμός σφαλμάτων του συστήματος σε όλα του τα επίπεδα, καθώς και αύξηση της αξιοπιστίας του και της ασφάλειας του.

6.2.1 Από το Φυσικό Επίπεδο στο Ψηφιακό Δίδυμο

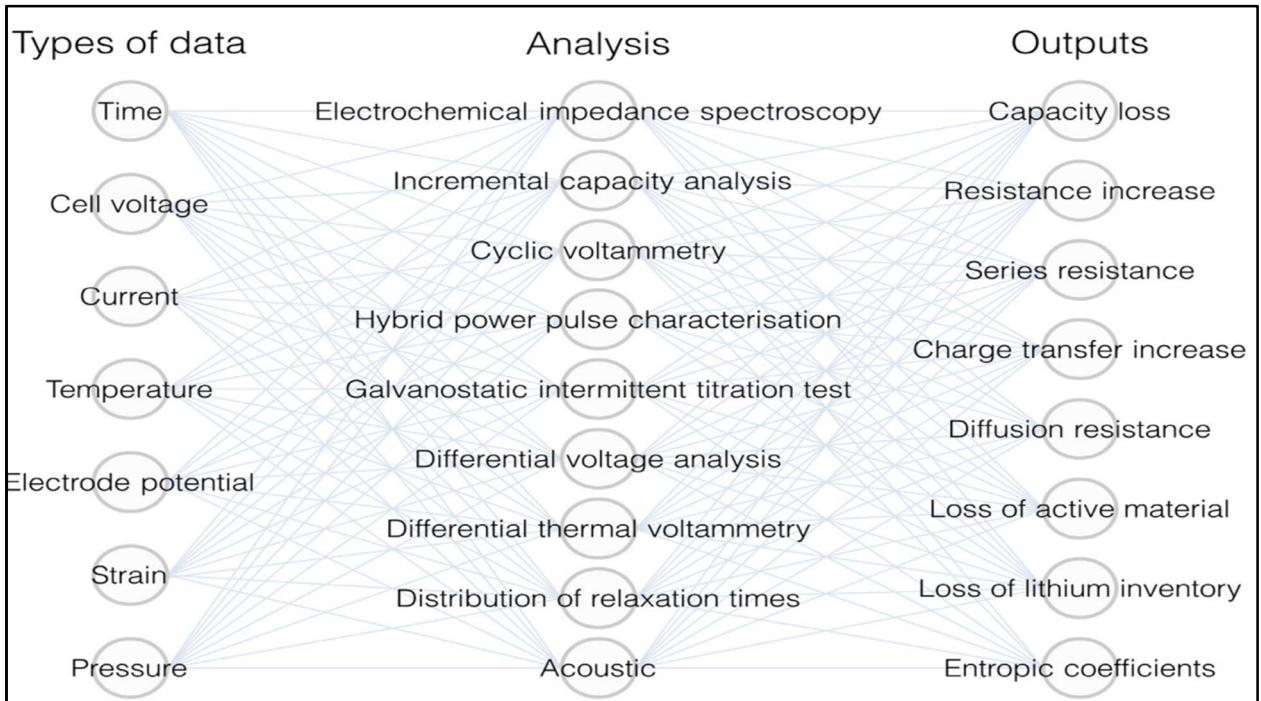
Με την γεφύρωση του φυσικού επιπέδου και του ψηφιακού επιπέδου επιτυγχάνουμε την απρόσκοπτη συλλογή δεδομένων. Οι θετικές πτυχές του Cloud BMS είναι πολλές τόσο στο Υλισμικό(Hardware) όσο και στο Λογισμικό(software). Οι επιλογές που ξεκλειδώνονται σε ένα BMS που είναι στο Cloud είναι πολλές, παρακάτω (Εικόνα 67) βλέπουμε ένα ενδεικτικό σχεδιάγραμμα το οποίο αποτελεί όλα τα στάδια από την συστοιχία μπαταριών το φυσικό επίπεδο, μέχρι και την μεταφορά δεδομένων στο Cloud, καθώς και την γραφική τους απεικόνιση σε ένα UI(User Interface).[17],[39]



(Εικόνα 67: Σχεδιάγραμμα των Cloud BMS που αποτελείται από έξι υποσυστήματα: 1) Σύστημα μπαταριών για την παραγωγή δεδομένων, 2) Σύστημα BMS-Slave ο οποίος αποτελείται από αισθητήρια, 3) Σύστημα IoT όπου συλλέγει τα δεδομένα των αισθητήρων 4) Σύστημα Cloud για να αποθηκευτούν τα δεδομένα, 5) Σύστημα API που κάνει χρήση του για να τα μεταβιβάσει σε κώδικα τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται από το 6) Συστήματα UI για να τα απεικονίσουν τα δεδομένα στον τελικό χρήστη. [17]).



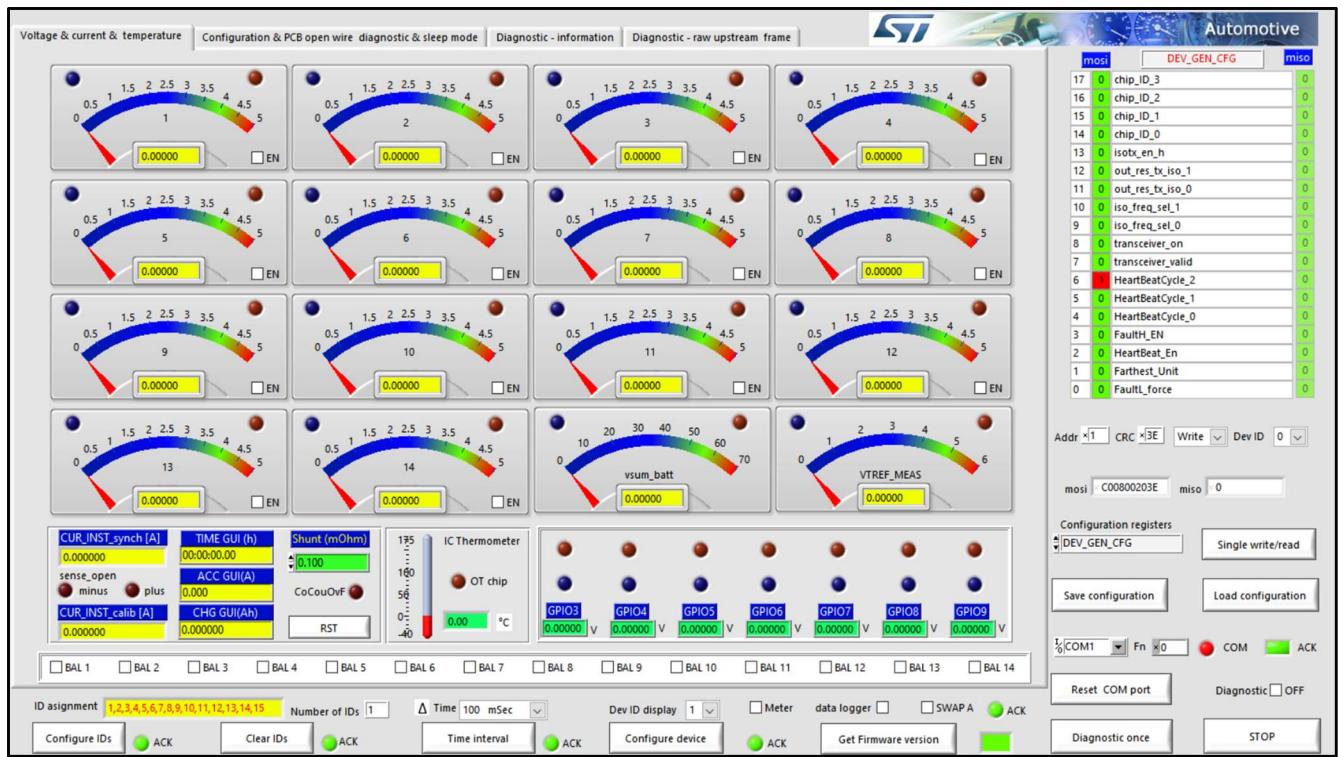
(Εικόνα 68: Κυβερνο-Φυσικό Σύστημα για Ηλεκτρικά Οχήματα και όλα τα στοιχεία που απαρτίζουν το ψηφιακό του δίδυμο. [41]).



(Εικόνα 69: Διαφορετικά πιθανά δεδομένα που συλλέγονται από ένα BMS ηλεκτρικού οχήματος και οι τεχνικές ανάλυσης και πληροφορίες εξόδου. [41]).

6.2.2 Χρήση Cloud και IoT

Στην παρούσα διπλωματική έγινε χρήση ενός τοπικού προσωπικού Server, ο οποίος αναπαριστά το Cloud. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από την πλακέτα και μεταβιβάστηκαν στο Cloud με χρήση του πρωτοκόλλου SPI για λόγους πειραματικούς. Το UI που χρησιμοποιήθηκε μας το παρείχε η εταιρία STMicroelectronics και ονομάζεται STSW-L9963. Παρακάτω μπορούμε να δούμε μια ενδεικτική του (Εικόνα 70), θα αναλυθεί είς βάθος στο Κεφάλαιο 7. Το πρόγραμμα αυτό μας παρέχει την δυνατότητα να αποθηκεύουμε όλα τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σε αρχείο Plain Text το οποίο με την χρήση API που δημιουργήθηκε με χρήση της γλώσσας Python μας επιτρέπει να τα επεξεργαστούμε και να τα ανεβάζουμε ταυτόχρονα στο Cloud. Η ιδέα επηρεάστηκε άμεσα από το πρώτο λογισμικό(BEEP) που έχει δημιουργηθεί σε αρχικό στάδιο για να κάνει πρόβλεψη και μοντελοποίηση της κατάστασης των μπαταριών μέσω του Cloud.[36],[42]



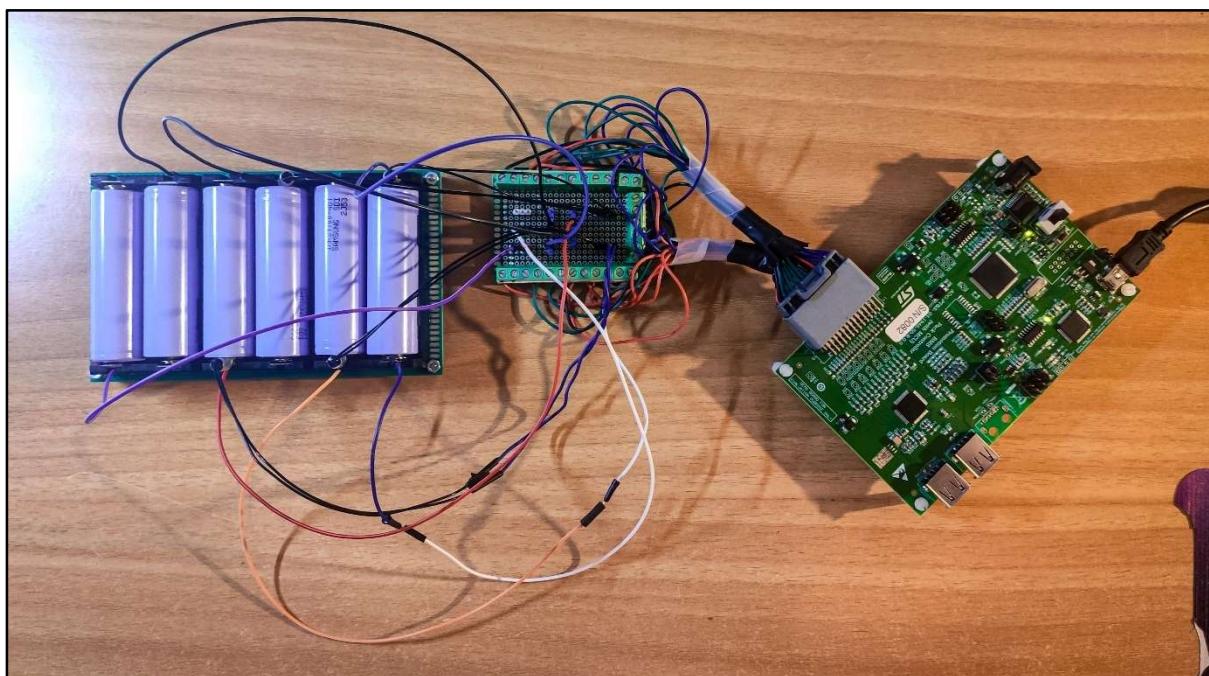
(Εικόνα 70: Γραφικό περιβάλλον του προγράμματος STSW-L9963 της STMicroelectronics[36]).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: Πειραματικό Μέρος

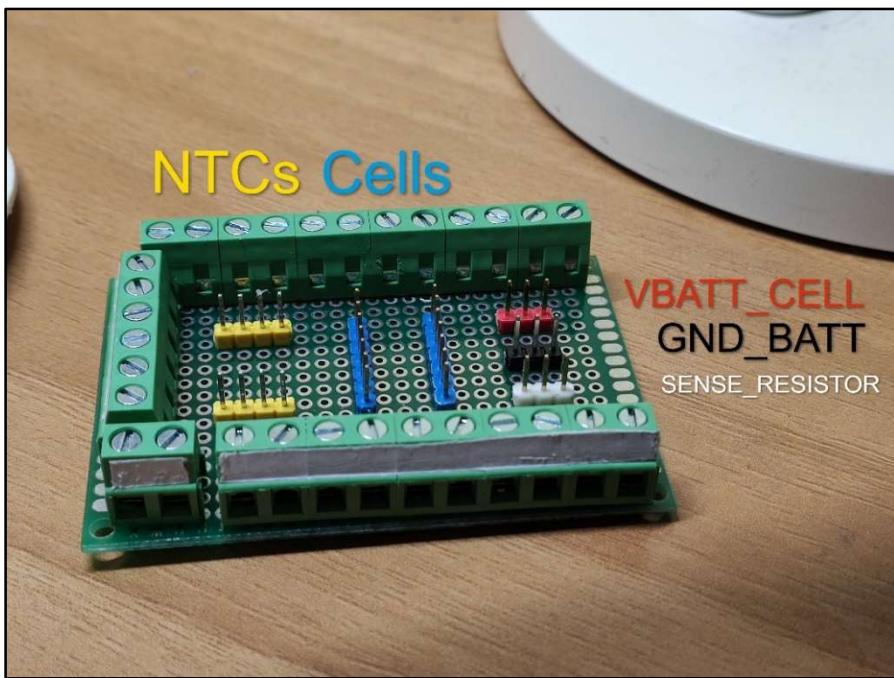
Σε αυτή την ενότητα θα περιγράψουμε το πείραμα το οποίο έγινε προκειμένου να δοκιμάσουμε την λειτουργητική του συστήματος σε πραγματικό περιβάλλον. Το πείραμα κατά κύριο λόγο έγινε προκειμένου να αποδείξουμε την λειτουργικότητα του συστήματος. Τα αποτελέσματα επικεντρώνονται κυρίως στην ομαλή λειτουργία του λογισμικού με το υλισμικό.

7.2 Πειραματική Διάταξη

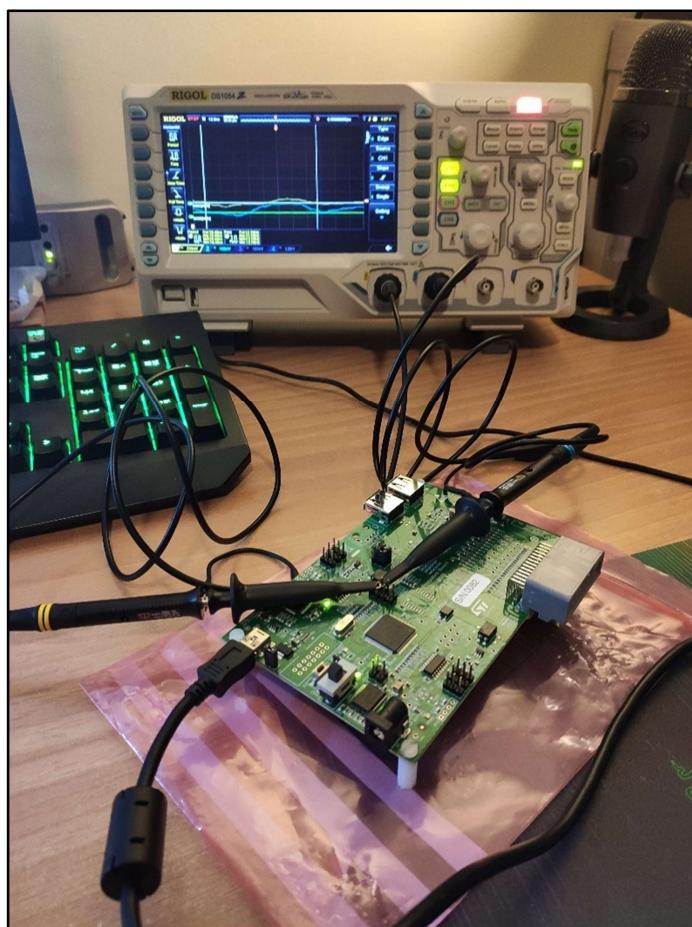
Κατά το πειραματικό μέρος χρησιμοποιήθηκε μία συστοιχία έξι μπαταριών Samsung INR-21700-40T σε σειρά. Επιπλέον έγινε χρήση του Evaluation Board - L9963, καθώς και δημιουργήθηκε Breakout Board σε διάτρητη πλακέτα για τις ανάγκες του πειράματος και της βέλτιστης δυνατής δρομολόγησης των καλωδίων από το Evaluation Board στην συστοιχία. Επιπλέον κάθε μπαταρία είχε συνδεδεμένο πάνω στον αρνητικό της πόλο αισθητήριο NTC για την μέτρηση της θερμοκρασίας της σε πραγματικό χρόνο. Έπιπρόσθετα έγινε δοκιμή τριών διαφορετικών τύπων NTCs τα οποία έιχαν διαφορετικές αποκρίσεις στην ταχύτητα καταγραφής της θερμοκρασίας (ενδεικτικά 3.5 - 6 - 10 δευτερολέπτων) και συνδέονται με CAN BUS επικοινωνία στο ολοκληρωμένο κύκλωμα L9963E και έπειτα στον μικροελεγκτή SPC574S64E3. Όλα τα δεδομένα κατά την διάρκεια των πειραμάτων αποθηκευόνται(μέσω API) και απεικονίζονται στο γραφικό περιβάλλον STSW-L9963. Παρακάτω βλέπουμε εικόνες από την σύνδεση τους.



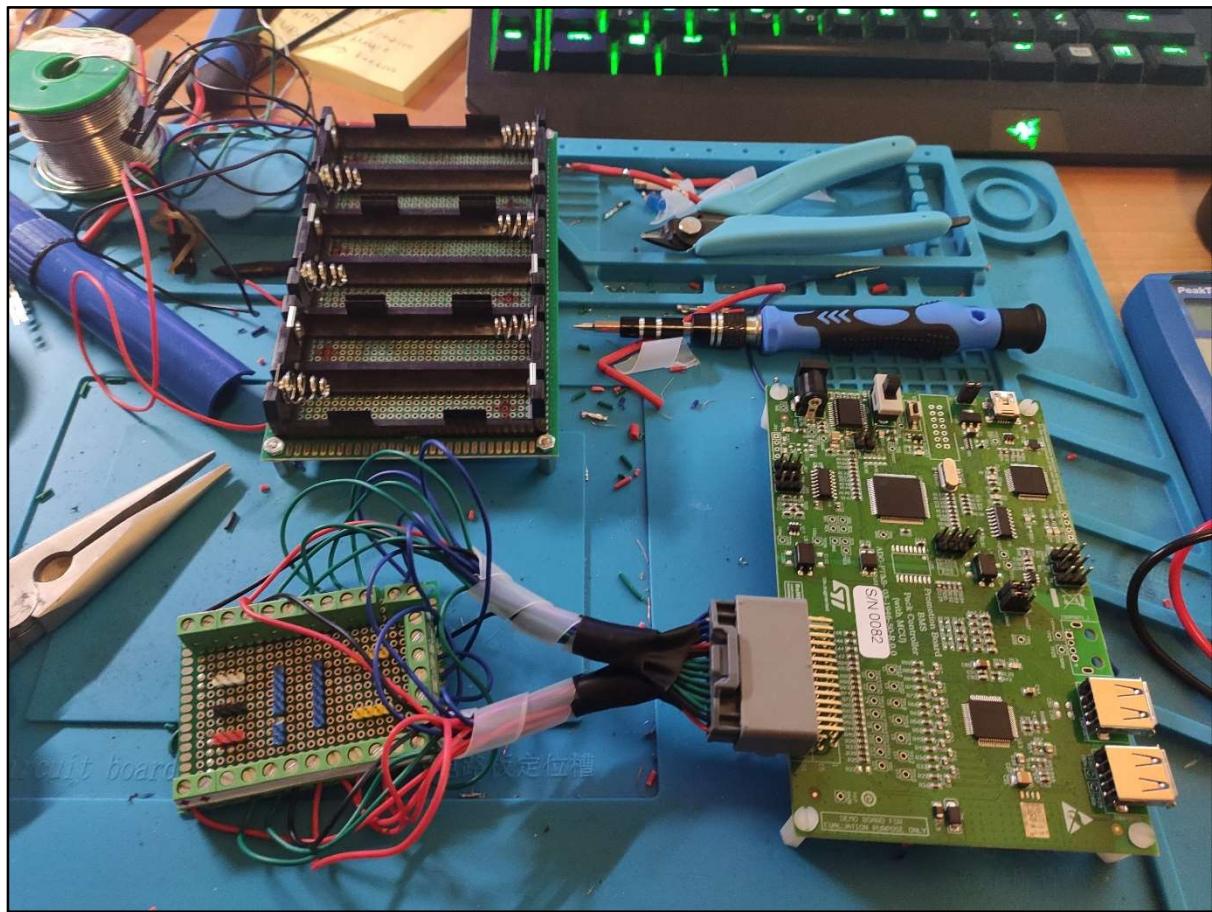
(Εικόνα 71: Σύνδεση συστοιχίας μπαταριών με Breakout και Evaluation Kit L9963E.)



(Εικόνα 72: Breakout Board σε διάτρητη για την βέλτιστη δρομολόγηση των καλωδίων)



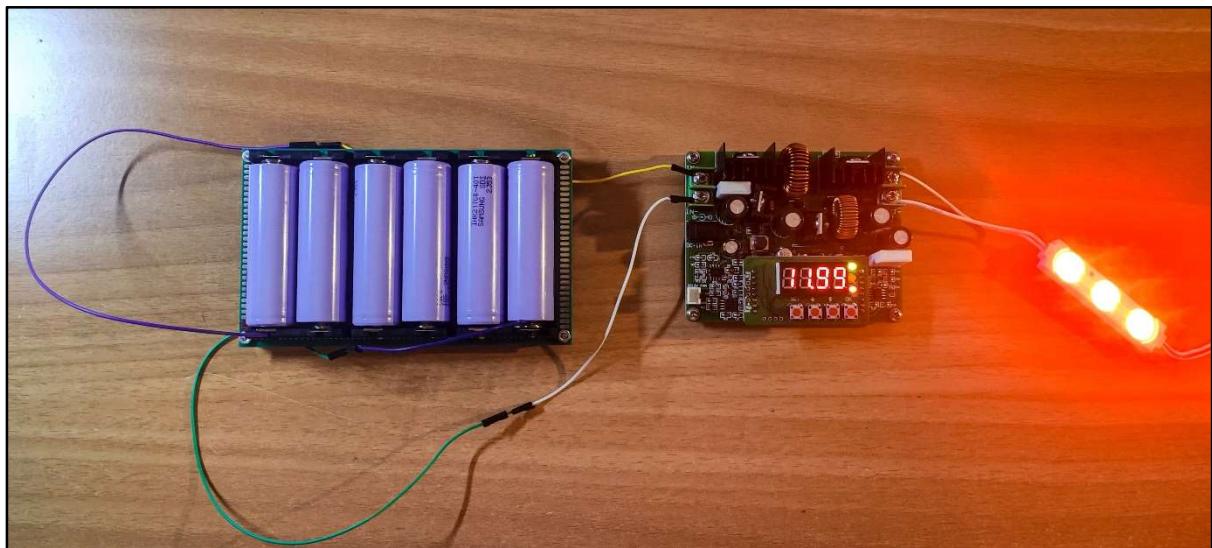
(Εικόνα 73: Μέτρηση σημάτων σειριακής μεταξύ ολοκληρωμένου κυκλώματος L9963E και μικροελεγκτή SPC574S64E3.)



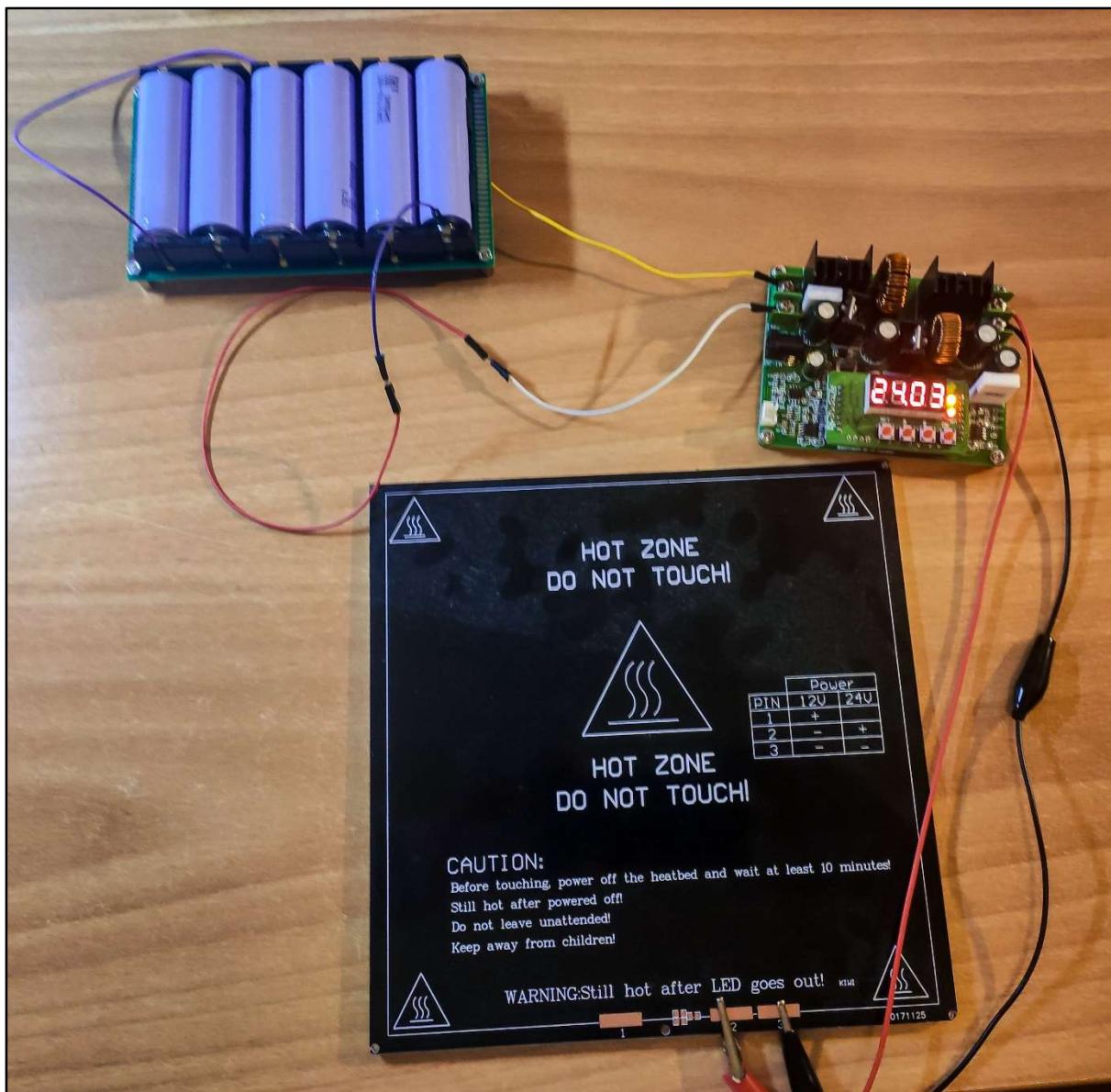
(Εικόνα 74: Φωτογραφία κατά την διάρκεια δημιουργίας του συστήματος.)

7.3 Εκφόρτιση Συστοιχίας Σε Ωμικά Φορτία

Το σύστημα δοκιμάστηκε με την χρήση Buck/Boost Converter για την εκφόρτιση του σε ενδεικτεικά ωμικά φορτία. Συγκεκριμένα σε εν σειρά 3 Leds με ισχύ 2.5 Watts με αντίσταση 60Ω και τροφοδοσία 12 Volts. Καθώς και σε Heatbed τρισδιάστατου εκτυπωτή ισχύς 300 Watts με αντίσταση 4Ω και τροφοδοσία 24 Volts.



(Εικόνα 75: Συστοιχία μπαταριών συνδεδεμένη με Buck/Boost Converter και φορτίο 3 Leds ωμικού φορτίου 2.5 Watts.)



(Εικόνα 76: Συστοιχία μπαταριών συνδεδεμένη με Buck/Boost Converter και φορτίο Heatbed από τρισδιάστατο εκτυπωτή ωμικού φορτίου 300 Watts.)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: Σύνοψη Σχεδίασης Συστήματος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε αναλυτικά ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ισορροπιστή Ιόντων Λιθίου(Li-Ion), αφού πρώτα αναφέραμε διεξοδικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, καθώς και την χημική τους υπόσταση. Το σύστημα χωρίζεται σε επιμέρους υποσυστήματα τα οποία είναι :

- Κύκλωμα Ισοστάθμισης
- Κύκλωμα απομόνωσης τάσης κάθε κελιού
- Κύκλωμα απομόνωσης θερμοκρασίας κάθε κελιού και όλης της συστοιχίας
- Breakout διάτρητη πλακέτα για δρομολόγηση των καλωδίων και χρηστικότητα
- Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος της συστοιχίας με αισθητήριο Current Shunt
- Κύκλωμα μικροελεγκτή και ένδειξης των μετρήσεων σε γραφικό περιβάλλον
- Σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης των μετρήσεων με χρήση API
- Σύστημα ανάπτυξης φυσικού μοντέλου της μπαταρίας Ιόντων Λιθίου με χρήση Simulink
- Σύστημα βελτίωσης του φυσικού μοντέλου διαχείρισης ενέργειας με συλλογή μετρήσεων με την πάροδο του χρόνου με την χρήση του ψηφιακού διδύμου.

Τέλος υλοποιήθηκαν όλα τα παραπάνω υποσυστήματα και συνδέθηκαν με επιτυχία ώστε να προκύψει το τελικό σύστημα που σχεδιάστηκε.

8.2 Πλεονεκτήματα Σχεδίασης

Το σύστημα που αναπτύχθηκε αποτελεί μία ολοκληρωμένη λύση συστήματος διαχείρισης ενέργειας μπαταριών η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε ηλεκτρικά οχήματα, όσο και σε οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή απαιτεί μεγάλο πλήθος μπαταριών και εξισσορόπηση των τάσεων τους. Επιπλέον οι μετρήσεις οι οποίες γίνονται σε πραγματικό χρόνο παρέχουν μεγαλύτερη ασφάλεια και ομαλή λειτουργία των μπαταριών. Ως αποτέλεσμα αυξάνεται το προσδόκιμο ζωής τους. Τέλος με την δημιουργία του ψηφιακού διδύμου και την μεταφόρτωση των δεδομένων στο Cloud παρέχουμε πηγή δεδομένων και σε άλλα συστήματα να κάνουν χρήση του ήδη ανεπτυγμένου φυσικού μοντέλου.

8.3 Μελλοντικές Αναβαθμίσεις Και Εξέλιξη

Μέσα από τις γνώσεις που αποκτήθηκαν στην διπλωματική εργασία υπάρχουν ορισμένα σημεία που μπορούν να αναπτυχθούν περαιτέρω. Ένα παράδειγμα είναι η επέκταση πλήθους των μπαταριών με χρήση κόμβων οι οποίοι θα επικοινωνούν με ασύρματο τρόπο μέσω Bluetooth Mesh και η τελική υλοποίηση ενός υπερσύγχρονου συστήματος wBMS. Ένα άλλο κομμάτι που δεν θίγτηκε είς βάθος και θα μπορούσε να προσφέρει προστιθέμενη αξία στο σύστημα μας, είναι η εφαρμογή και ανάπτυξη πίστριπλοκων αλγορίθμων εξισσορόπησης ενέργειας, χρησιμοποιώντας δεδομένα όπως SoC, SoH, SoL και SoP. Με σκοπό την αύξηση απόδοσης του συστήματος και του προσδόκιμου ζωής των μπαταριών. Τέλος θα μπορούσε να αναπτυχθεί περαιτέρω το ψηφιακό δίδυμο, έτσι ώστε να παρέχει παραπάνω δεδομένα για το σύστημα και την κατάσταση που βρίσκεται σε σύγκριση με παρόμοια συστήματα σαν αυτό που υπάρχουν στο Cloud.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

- [1] Energy.Gov (2019). *Timeline: History of the Electric Car*. [online] Energy.gov. Available at: <https://www.energy.gov/timeline/timeline-history-electric-car>.
- [2] Wikipedia Contributors (2019). *History of the electric vehicle*. [online] Wikipedia. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_electric_vehicle.
- [3] Tesla (2000). *Model 3 | Tesla*. [online] Tesla.com. Available at: <https://www.tesla.com/model3>.
- [4] Tie, S.F. and Tan, C.W. (2013). A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, pp.82–102.
- [5] Li, Z., Khajepour, A. and Song, J. (2019). A comprehensive review of the key technologies for pure electric vehicles. *Energy*, 182, pp.824–839.
- [6] Das, H.S., Rahman, M.M., Li, S. and Tan, C.W. (2019). Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p.109618.
- [7] Khaligh, A. and D'Antonio, M. (2019). Global Trends in High-Power On-Board Chargers for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(4), pp.3306–3324.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

- [8] Plett, G.L. (2015). *Battery management systems. I Battery modeling* / Gregory L. Plett. Boston Artech House.
- [9] Plett, G.L. (2016). *Battery management systems. Volume II, Equivalent-circuit methods*. Boston: Artech House.
- [10] Weicker, P. (2014). *A systems approach to lithium-ion battery management*. Boston: Artech House.
- [11] Warner, J.T. (2015). *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design : Chemistry, Components, Types and Terminology*. Amsterdam: Elsevier.
- [12] Shriram Santhanagopalan, Kandler Smith, Neubauer, J., Kim, G.-H., Keyser, M., Pesaran, A.A. and National Renewable Energy Laboratory (U.S (2015). *Design and analysis of large lithium-ion battery systems*. Boston: Artech House.
- [13] Andrea, D. (2010). *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Boston ;

London: Artech House.

[14] Hayes, J.G. and Goodarzi, G.A. (2018). *Electric powertrain : energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles*. Hoboken, Nj: John Wiley & Sons.

[15] Yuping Wu (2015). *Lithium-Ion Batteries Fundamentals and Applications*. Crc Press.

[16] Reddy, T.B. and Linden, D. (2011). *Linden's handbook of batteries*. New York [Etc.] McGraw-Hill Cop.

[17] Li, W., Rentemeister, M., Badeda, J., Jöst, D., Schulte, D. and Sauer, D.U. (2020). Digital twin for battery systems: Cloud battery management system with online state-of-charge and state-of-health estimation. *Journal of Energy Storage*, 30, p.101557.

[18] Qu, X., Song, Y., Liu, D., Cui, X. and Peng, Y. (2020). Lithium-ion battery performance degradation evaluation in dynamic operating conditions based on a digital twin model. *Microelectronics Reliability*, 114, p.113857.

[19] Miao, Y., Hynan, P., von Jouanne, A. and Yokochi, A. (2019). Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*, [online] 12(6), p.1074. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/6/1074>.

[20] Battery Management Systems Volume I Battery Modeling - (Based on Fig. 1 of Stetzel, K., Aldrich, L., Trimboli, M.S., and Plett, G., “Electrochemical state and internal variables estimation using a reduced-order physics-based model of a lithium-ion cell and an extended Kalman filter,” *Journal of Power Sources*, 278, 2015, pp. 490–505.)

[21] Birk, C.R., Roberts, M.R., McTurk, E., Bruce, P.G. and Howey, D.A. (2017). Degradation diagnostics for lithium ion cells. *Journal of Power Sources*, [online] 341, pp.373–386. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775316316998?via%3Dihub> [Accessed 7 Jan. 2020].

[22] Han, X., Lu, L., Zheng, Y., Feng, X., Li, Z., Li, J. and Ouyang, M. (2019). A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle. *eTransportation*, 1, p.100005.

[23] Batteryuniversity.com. (2018). *Serial and Parallel Battery Configurations and Information*. [online] Available at: https://batteryuniversity.com/learn/article/serial_and_parallel_battery_configurations

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

[24] Battery Management Systems, Volume II: Equivalent-Circuit Methods. (2015). Norwood: Artech House.

[25] Weicker, P. (2014). *A systems approach to lithium-ion battery management*. Boston: Artech House.

[26] Wikipedia. (2020). *Hall-effect sensor*. [online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Hall-effect_sensor.

[27] Liu, K., Li, K., Peng, Q. and Zhang, C. (2018). A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 14(1), pp.47–64.

[28] Xiong, R., Cao, J., Yu, Q., He, H. and Sun, F. (2018). Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles. *IEEE Access*, [online] 6, pp.1832–1843. Available at:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8168251#:~:text=Critical%20Review%20on%20the%20Battery%20State%20of%20Charge>.

[29] Ng, K.S., Moo, C.-S., Chen, Y.-P. and Hsieh, Y.-C. (2009). Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 86(9), pp.1506–1511.

[30] www.analog.com. (n.d.). *Current Sensing for Energy Metering | Analog Devices*. [online] Available at: <https://www.analog.com/en/technical-articles/current-sensing-for-energy-metering.html>.

[31] Daowd, M., Omar, N., Van Den Bossche, P. and Van Mierlo, J. (n.d.). *Passive and Active Battery Balancing comparison based on MATLAB Simulation*. [online] . Available at: https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20140122_144859_35513_M._Daowd_N._Omar_P._Van_Den_Bossche_J._Van_Mierlo__Passive_and_Active_Battery_Balancing_comparison_based_on_MATLAB_Simulation.pdf [Accessed 17 May 2021].

[32] Waldmann, T., Scurtu, R.-G., Richter, K. and Wohlfahrt-Mehrens, M. (2020). 18650 vs. 21700 Li-ion cells – A direct comparison of electrochemical, thermal, and geometrical properties. *Journal of Power Sources*, 472, p.228614.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

[33] Wikipedia. (2021). *Serial Peripheral Interface*. [online] Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface#/media/File:SPI_three_slaves.svg [Accessed 29 Apr. 2021].

[34] Huybrechts, T., Vanommeslaeghe, Y., Blontrock, D., Van Barel, G. and Hellinckx, P. (2017). Automatic Reverse Engineering of CAN Bus Data Using Machine Learning Techniques. *Advances on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing*, [online] pp.751–761. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-69835-9_71 [Accessed 13 Dec. 2019].

[35] Lara, D. and Porter, D. (n.d.). *Cable replacement using wireless technologies in automotive*. [online] . Available at: https://www.ti.com/lit/ml/slyp670/slyp670.pdf?ts=1622108768209&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F [Accessed 27 May 2021].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

- [36]www.st.com. (n.d.). *STSW-L9963 - EVAL-L9963 Graphical User Interface - STMicroelectronics*. [online] Available at: <https://www.st.com/en/embedded-software/stsw-l9963.html> [Accessed 2 Jul. 2021].
- [37]Wikipedia Contributors (2019). *Cloud computing*. [online] Wikipedia. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_computing.
- [38]azure.microsoft.com. (n.d.). *What Is Cloud Computing? A Beginner's Guide | Microsoft Azure*. [online] Available at: <https://azure.microsoft.com/en-us/overview/what-is-cloud-computing/#cloud-deployment-types>.
- [39]Qu, X., Song, Y., Liu, D., Cui, X. and Peng, Y. (2020). Lithium-ion battery performance degradation evaluation in dynamic operating conditions based on a digital twin model. *Microelectronics Reliability*, 114, p.113857.
- [40]Lukas Merkle, Alexander Salinas Segura, Jan Torben Grumme, Markus Lienkamp (2020) Architecture of a Digital Twin for Enabling Digital Services for Battery Systems.
- [41]Wu, B., Widanage, W.D., Yang, S. and Liu, X. (2020). Battery digital twins: Perspectives on the fusion of models, data and artificial intelligence for smart battery management systems. *Energy and AI*, 1, p.100016.
- [42]Herring, P., Balaji Gopal, C., Aykol, M., Montoya, J.H., Anapolsky, A., Attia, P.M., Gent, W., Hummelshøj, J.S., Hung, L., Kwon, H.-K., Moore, P., Schweigert, D., Severson, K.A., Suram, S., Yang, Z., Braatz, R.D. and Storey, B.D. (2020). BEEP: A Python library for Battery Evaluation and Early Prediction. *SoftwareX*, 11, p.100506

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ολοκληρωμένο Κύκλωμα L9963E

Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα (L9963E) λειτουργεί ώς επιβλέπων σε συστοιχίες μπαταριών Li-Ion. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές οχημάτων και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Μπορεί να επιβλέπει έως 14 μπαταρίες για συστήματα που χρειάζονται τροφοδοσίες όπως τα 48V, αλλά και υψηλότερες. Κάθε μπαταρία την επιβλέπει με υψηλή ακρίβεια μετρώντας το ρεύμα που την διαπερνά και χρησιμοποιώντας την τεχνική Coulomb Counting. Επιπλέον μπορεί να μετρήσει την θερμοκρασία των μπαταριών με αισθητήρια NTCs (μέχρι 7 άνα IC). Τα δεδομένα όλα αυτά μεταδίδονται μέσω του πρωτόκολλου SPI ή απομονωμένου πρωτοκόλλου. Πολλά ολοκληρωμένα L9963E μπορούν να συνδεθούν σε σύνδεση Daisy Chain, προκειμένου να επικοινωνούν με έναν μικροεπεξεργαστή μέσω της απομονωμένης επικοινωνίας, με μεγάλες ταχύτητες, χαμηλό EMI και αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων. Επιπλέον παρέχει Παθητική Εξισορρόπηση μέσο του καναλιού προγραμματισμού του που παρέχει normal mode καθώς και low power mode (silent balance). Η εξισορρόπηση μπορεί να τερματιστεί αυτόματα με χρήση εσωτερικού χρονιστή. Επιπρόσθετα το ολοκληρωμένο κύκλωμα μας παρέχει 9 GPIOs για εξωτερικό έλεγχο. Τέλος διαθέτει ένα ολοκληρωμένο σύνολο εντοπισμού σφαλμάτων και λειτουργίες ειδοποίησης για να πληρούν τις προδιαγραφές ασφαλείας.



life.augmented

L9963E

Datasheet

Automotive Multicell battery monitoring and balancing IC

TQFP 10x10 64L
exposed pad down

Features



- AEC-Q100 qualified
- Measures 4 to 14 cells in series, with 0 μ s desynchronization delay between samples. Supports also busbar connection without altering cell results
- Coulomb counter supporting pack overcurrent detection in both ignition on and off states. Fully synchronized current and voltage samples
- 16-bit voltage ADC with maximum error of ± 2 mV in the [0.5 – 4.3] V range, after soldering, in [-40; +105] °C Tj range
- 2.66 Mbps isolated serial communication with regenerative buffer, supporting dual access ring. Less than 4 μ s latency between start of conversion of the 1st and the 31st device in a chain. Less than 4 ms to convert and read 96 cells in a system using 8 L9963E and L9963T transceiver. Less than 8 ms to convert and read 210 cells in a system using 15 L9963E and L9963T transceiver. Less than 16 ms to convert and read 434 cells in a system using 31 L9963E and L9963T transceiver. Supports both XFMR and CAP based isolation
- 200 mA passive internal balancing current for each cell in both normal and silent-balancing mode. Possibility of executing cyclic wake up measurements. Manual/Timed balancing, on multiple channels simultaneously; Internal/External balancing
- Fully redundant cell measurement path, with ADC Swap, for enhanced safety and limp home functionality
- Intelligent diagnostic routine providing automatic failure validation. Redundant fault notification through both SPI Global Status Word (GSW) and dedicated FAULT line
- Two 5 V regulators supporting external load connection with 25 mA (VCOM) and 50 mA (VTREF) current capability
- 9 GPIOs, with up to 7 analog inputs for NTC sensing
- Robust hot-plug performance. No Zeners needed in parallel to each cell
- Full ISO26262 compliant, ASIL-D systems ready

Product status link		
L9963E		

Product summary		
Order code	Package	Packing
L9963E		Tray
L9963E-TR	TQFP64EP	Tape and Reel

Product label		

Application

- Automotive: 48 V and high-voltage battery packs
- Backup energy storage systems and UPS
- E-bikes, e-scooters
- Portable and semi-portable equipment

Description

Χαρακτηριστικά Πλακέτας BMS Evaluation Board - L9963



EVAL-L9963E-MCU

Data brief

L9963E BMS IC evaluation board



Features

- Measures from 4 to 14 cells in series, with 0 µs desynchronization delay between samples. Supports also busbar connection without altering cell results
- Coulomb counter supporting pack overcurrent detection in both ignition on and off states
- Fully synchronized current and voltage samples
- 16-bit voltage measurement
- 2.66 Mbps isolated serial communication with regenerative buffer, supporting dual access ring
- Transformer based isolation
- Up to 4 analog inputs for NTC sensing, plus PCB temperature sensing
- Onboard microcontroller SPC574S64E3 with 32-bit Power Architecture MCU for automotive chassis and safety applications
- Onboard L9001 regulator as microcontroller power supply
- Hot plug dedicated circuit

Description

The EVAL-L9963E-MCU is a hardware tool for evaluation of L9963E, automotive chip for battery management applications. It can be used for the development of a 48 V battery management system (BMS) or as lower stage of a distributed BMS (depending on total battery voltage. Additional stages can be added thanks to EVAL-L9963E-NDS).

Product status link

[EVAL-L9963E-MCU](#)

Product summary

Order code	EVAL-L9963E-MCU
Reference	EVAL-L9963E-MCU evaluation board

EVAL-L9963E-MCU allows the user to connect up to 14 channels for cell voltage sensing, one channel for current sensing, and up to 4 analog input for temperature sensing (plus an additional on-board NTC to sense PCB temperature). The board provides an onboard microcontroller with preloaded GUI (graphical user interface) firmware intended to be used with STSW-L9963E PC GUI.

Προδιαγραφές Μικροελεγκτή Πλακέτας BMS SPC574S64E3

Ο μικροελεγκτής SPC574S64E3 ανήκει στην οικογένεια μικροελεγκτών SPC574Sx, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που αφορούν οχήματα και συστήματα ασφαλείας. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή συνοψίζονται στην παρακάτω σελίδα περιληπτικά:

ST life.augmented

SPC574S60E3, SPC574S64E3

32-bit Power Architecture microcontroller for automotive ASILD applications

Datasheet - production data



eTQFP100 (14 x 14 x 1.0 mm)

Features

- AEC-Q100 qualified
- High performance e200z4d dual core
 - 32-bit Power Architecture technology CPU
 - Core frequency as high as 140 MHz
 - Dual issue 5-stage pipeline in-order execution core
 - Variable Length Encoding (VLE)
 - Core MPU
 - Floating Point, End-to-End Error Correction
 - 8 KB instruction cache with error detection code
 - 32 KB local data RAM and 4 KB data cache along with 8 KB instruction cache
- 1600 KB (1.5 MB code + 64 KB data) on-chip flash memory: supports read during program and erase operations, and multiple blocks allowing EEPROM emulation
- 128 KB on-chip RAM (96 KB on chip RAM + 32 KB local data RAM)
- Multi-channel direct memory access controller (eDMA) with 32 channels
- Comprehensive new generation ASILD safety concept
 - ASILD SEooC approach (Safety Element out of Context)
 - FCCU for collection and reaction to failure notifications
 - Memory Error Management Unit (MEMU) for collection and reporting of error events in memories
 - End-to-end Error Correction Code (e2eECC) logic
- Cyclic redundancy check (CRC) unit
- 8 enhanced 12-bit SAR analog converters
 - 2 sets of: 3 ADCs and one supervisor ADC
 - 1.5 µs conversion time at 12 MHz
 - Up to 32 physical channels
 - Dual Programmable CTU
- 4 general purpose eTimer units (6 channels each)
- 4 FlexPWM units
 - 2 (4 channels each) used for motor control with hardware synchronization between the control systems
 - 2 (2 channels each) used for SWG emulation
- Communication interfaces
 - 4 LINFlexD modules
 - 4 deserial serial peripheral interface (DSPI) modules
 - 2 MCAN interfaces with advanced shared memory scheme (808 x 32-bit words for MCAN0 and 520 x 32-bit words for MCAN1) and CAN-FD support
 - 1 FlexRay module with 2 channels, 128 message buffers
 - 2 SENT interfaces (3 channels each)
- Dual phase-locked loops with stable clock domain for peripherals and FM modulation domain for computational shell
- Nexus Class 3 debug and trace interface
- On-chip CAN/UART Bootstrap loader with BAF. Physical Interface (PHY) can be UART
- Advanced and flexible supply scheme
 - On-chip voltage regulator for 1.2 V core logic supply. Bypass mode supported for external 1.2 V core logic supply
 - 3.3 V or 5 V IO and ADC supply (2 independent power domains available)
- Junction temperature range -40 °C to 150 °C

Σχεδιαγράμματα Κυκλωμάτων Evaluation Board - L9963E



EVAL-L9963E-MCU
Board schematics

3 Board schematics

Figure 2. Board schematic (1/5)

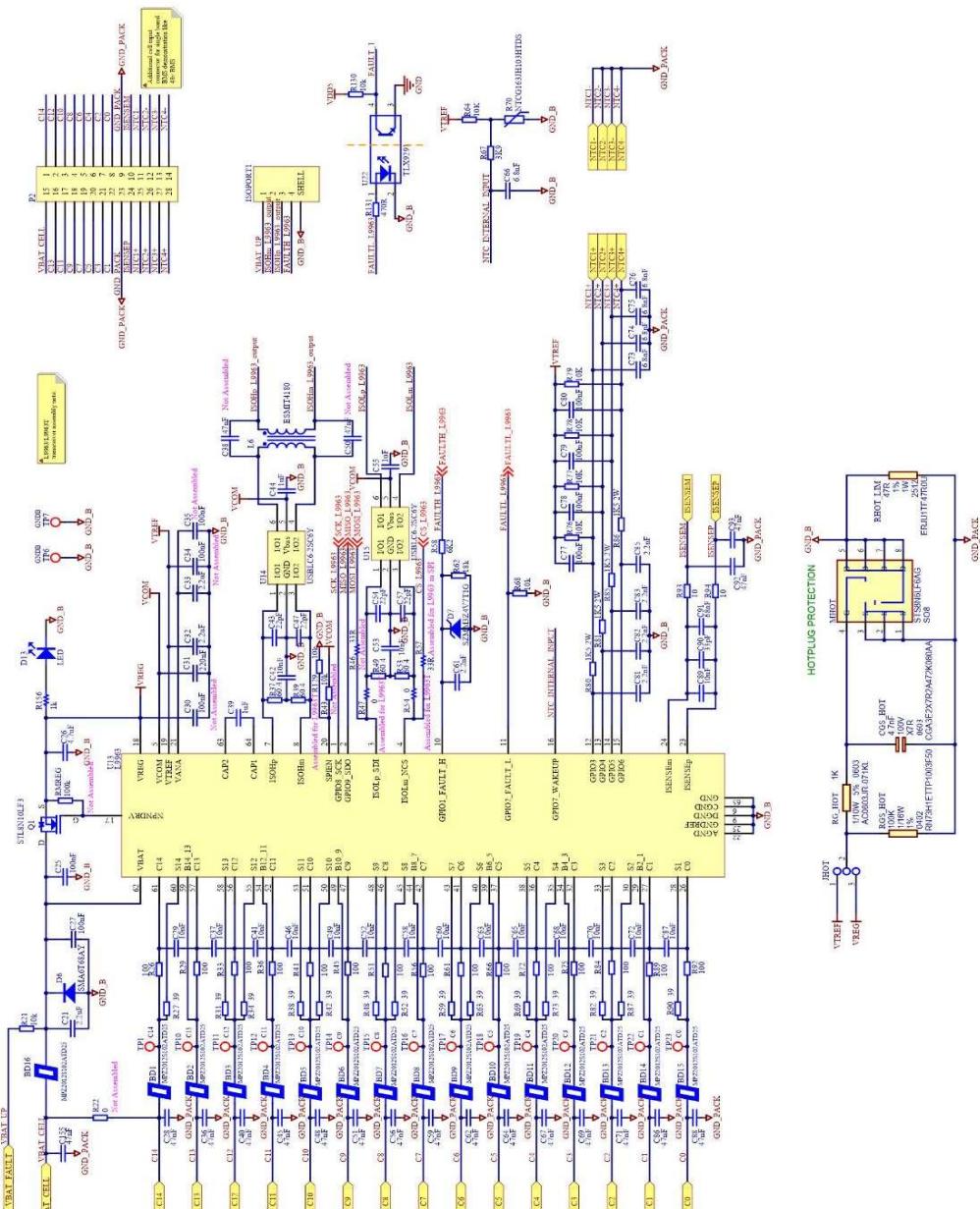


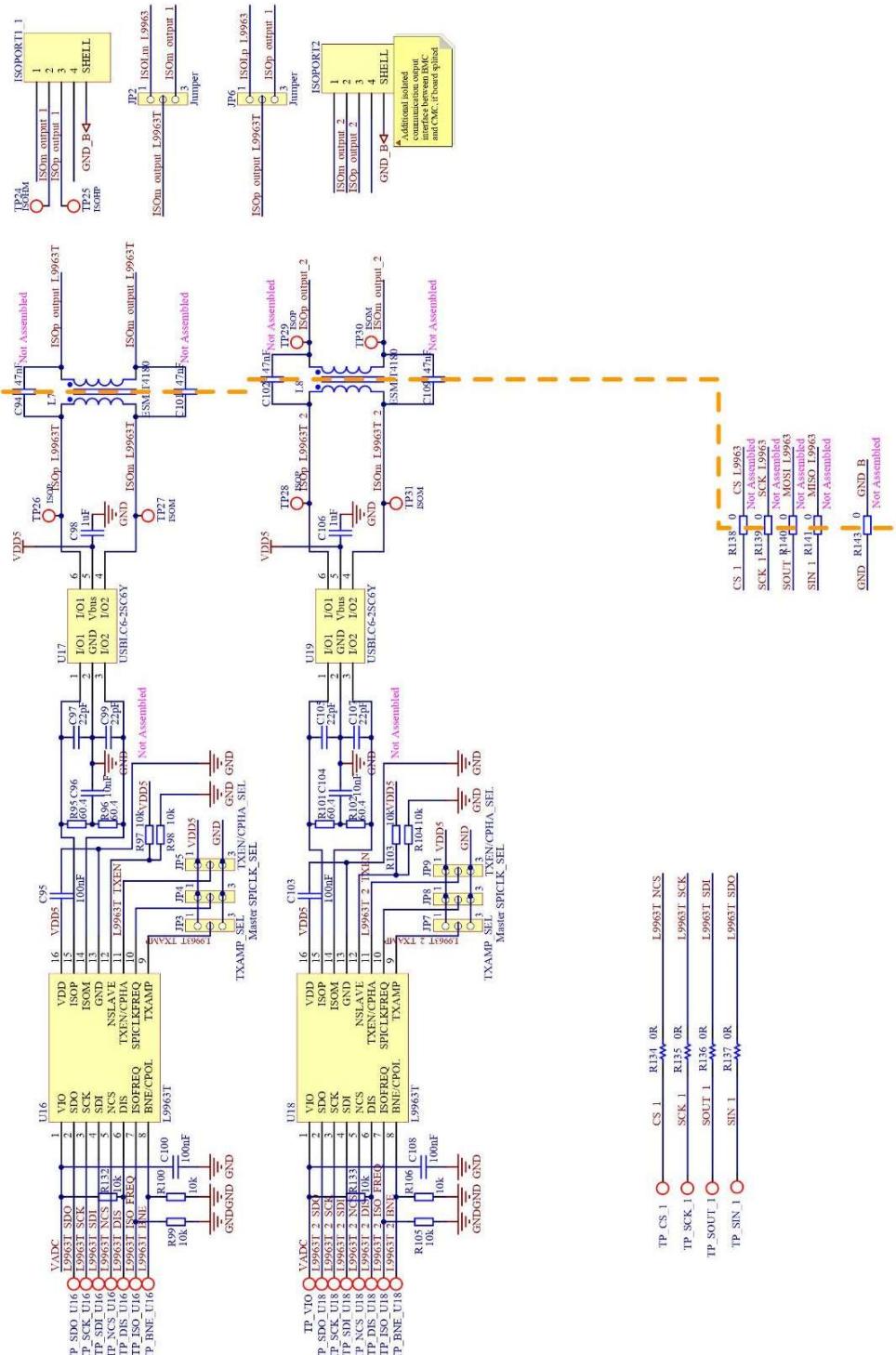
Figure 3. Board schematic (2/5)


Figure 4. Board schematic (3/5)

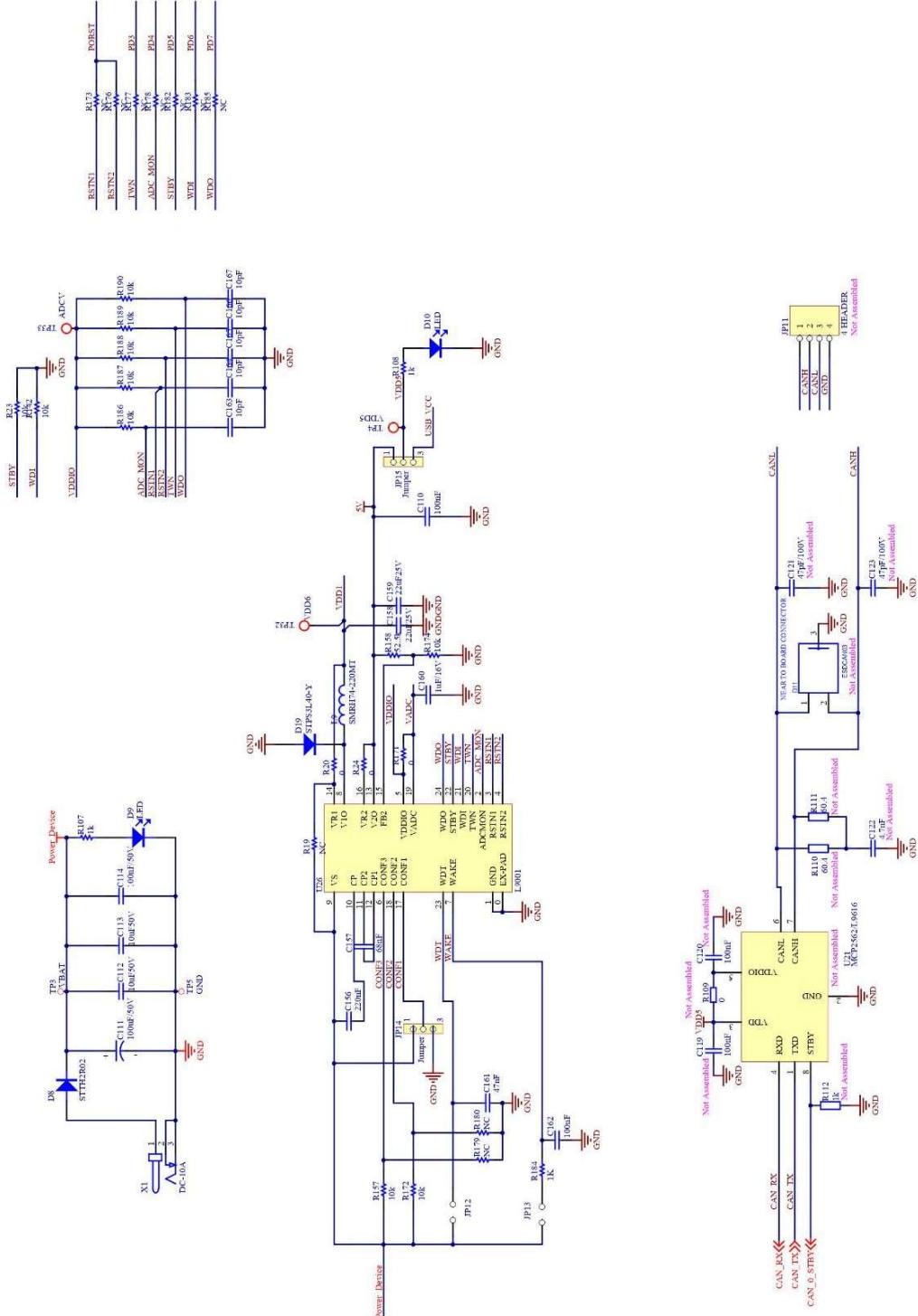


Figure 5. Board schematic (4/5)

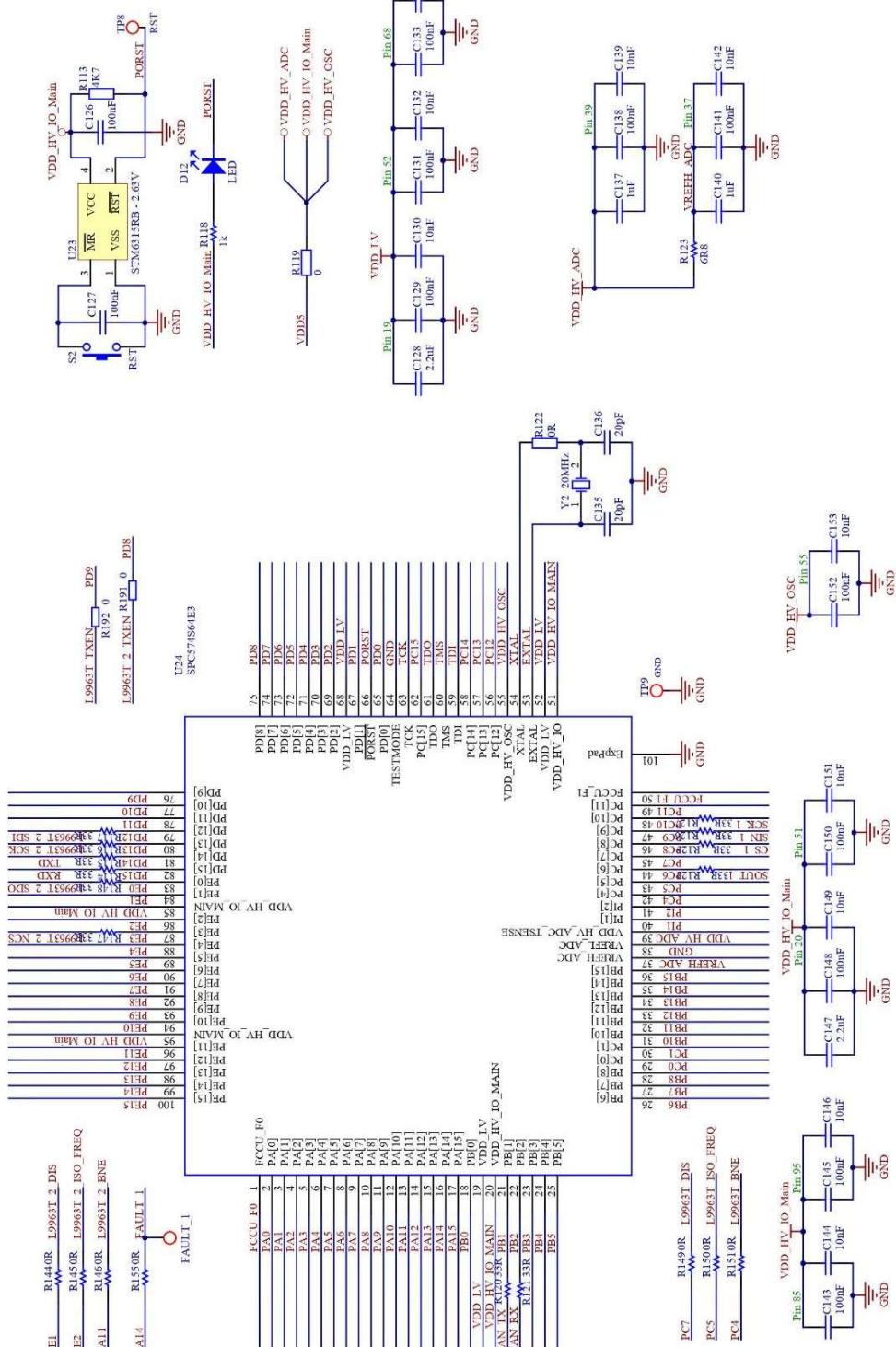
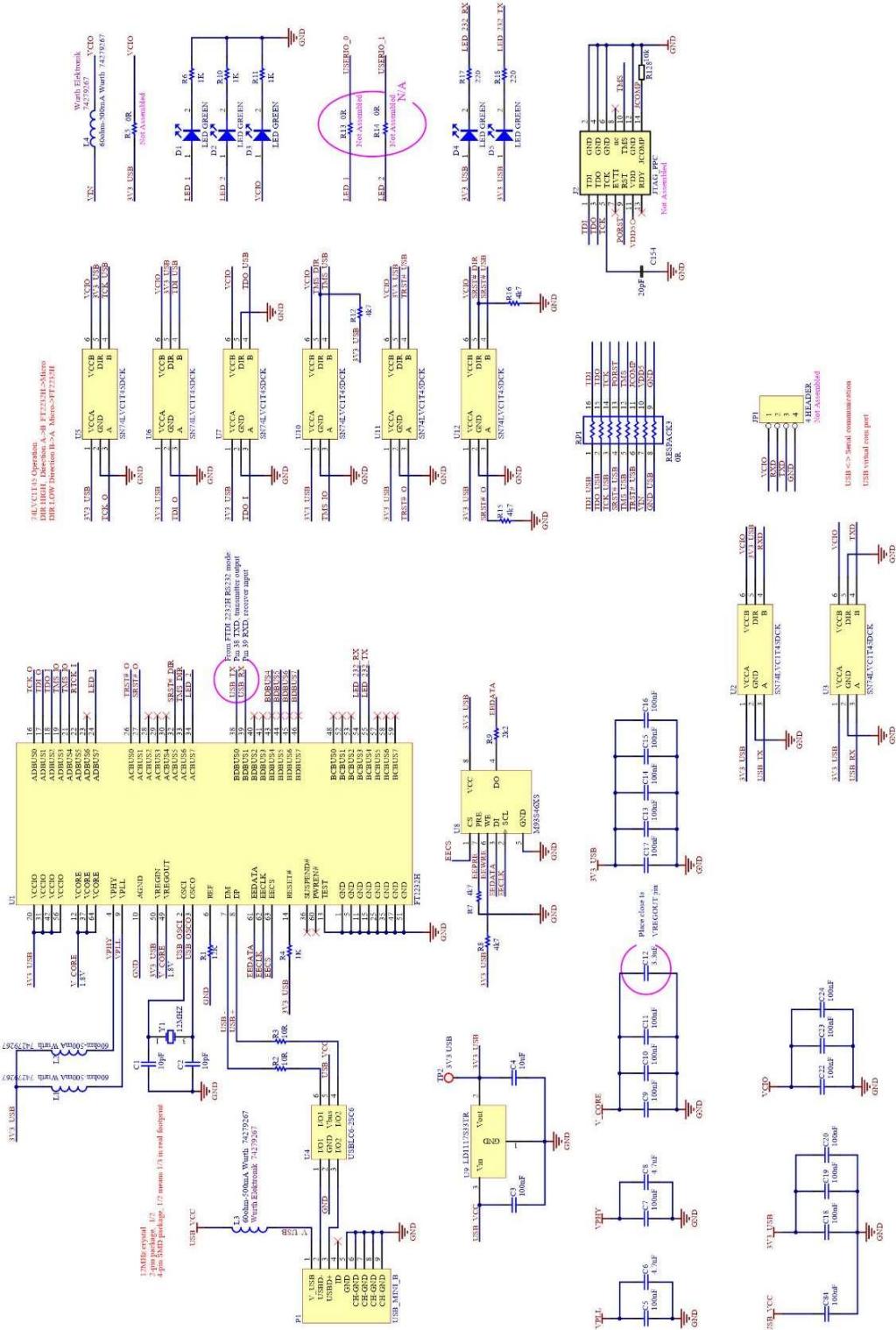


Figure 6. Board schematic (5/5)

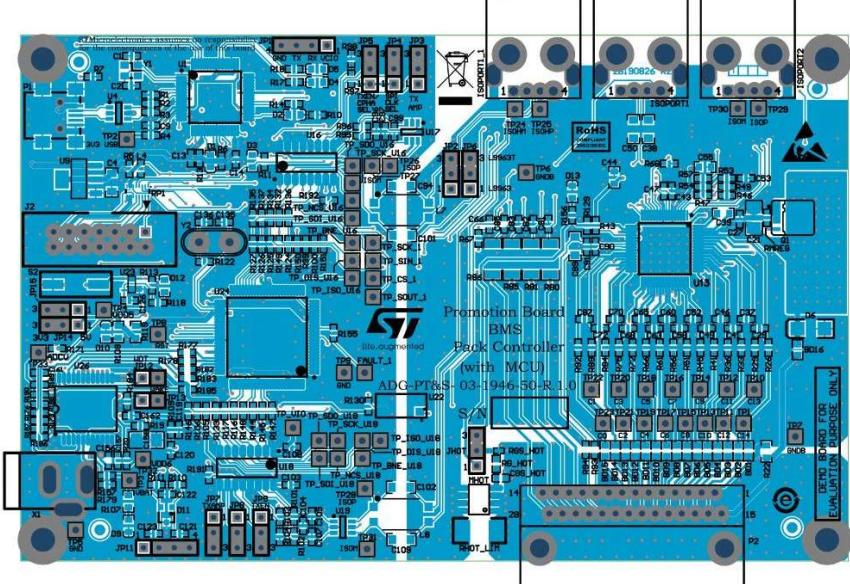


Πλακέτα Τυπωμένου Κυκλώματος Evaluation Board - L9963 (4 Layers)

EVAL-L9963E-MCU
Board layout

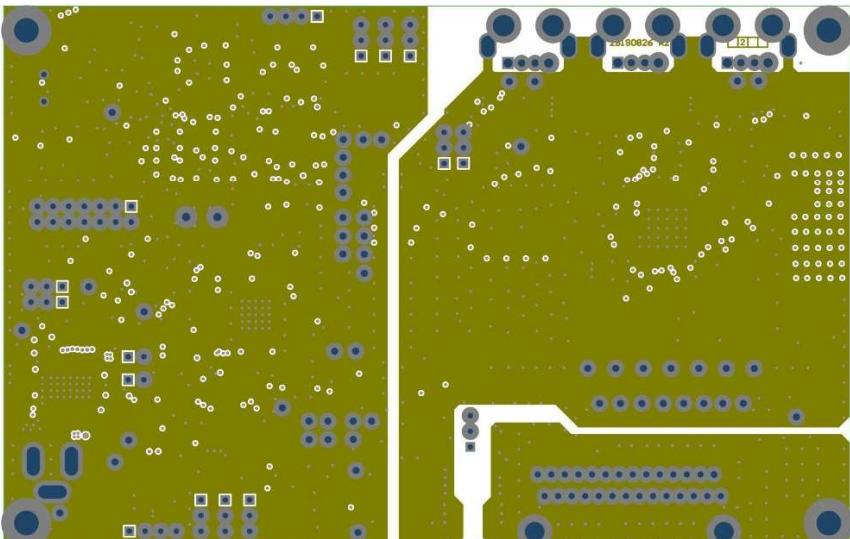
4 Board layout

Figure 7. Assembly top



The assembly top view shows the top surface of the four-layer PCB. It features several key components: a central microcontroller (U1), a power management IC (U2), and various sensors and connectors. Labels on the board include "Promotion Board", "BMS", "Pack Controller (with MCU)", "S/N", and "ADG-PT8S-03-1946-50-R1.0". A prominent blue rectangular area in the center is labeled "STMicroelectronics". A vertical text on the right edge reads "DEMO BOARD FOR ONLY EVALUATION PURPOSE".

Figure 8. Inner 1



The inner 1 view shows the internal structure of the four-layer PCB. It displays the green copper layers and the via holes connecting the top and bottom layers. The central vertical via column is clearly visible, along with numerous other vias and pads distributed across the board.

DB4438 - Rev 1

page 9/13

Figure 9. Inner 2

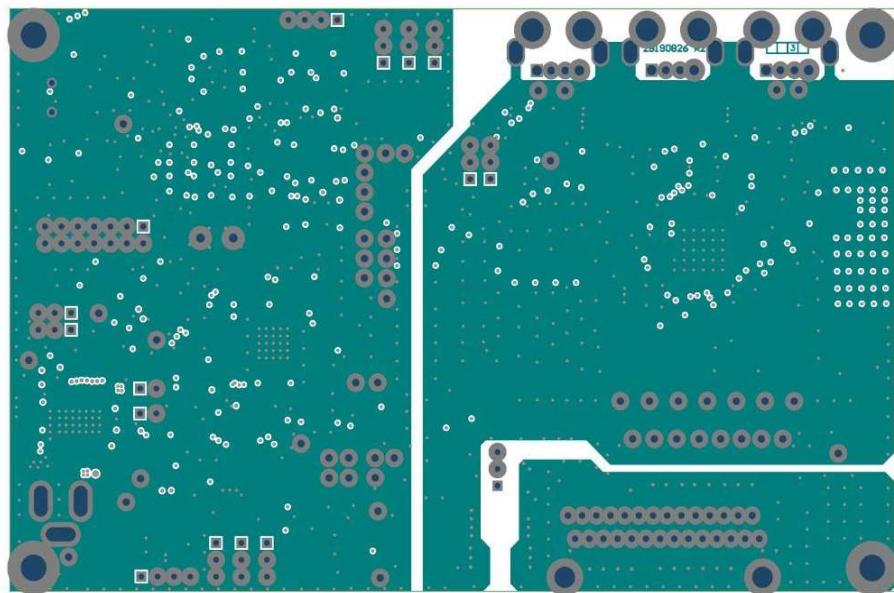


Figure 10. Assembly bottom

