



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών  
Υπολογιστών  
Τομέας Τεχνολογίας Πληροφορικής και  
Υπολογιστών

# Αλγόριθμοι Υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης και της Κατάστασης Υγείας σε Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΗΛΙΑΣ ΛΩΛΗΣ

Επιβλέπων : Δημήτριος Σούντρης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2022





Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών  
Υπολογιστών  
Τομέας Τεχνολογίας Πληροφορικής και  
Υπολογιστών

## Αλγόριθμοι Υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης και της Κατάστασης Υγείας σε Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΗΛΙΑΣ ΛΩΛΗΣ

Επιβλέπων : Δημήτριος Σούντρης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14η Ιουλίου 2022.

.....  
Δημήτριος Σούντρης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Γκόνοσ  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Φίλιππος Φαρμάκης  
Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Αθήνα, Ιούλιος 2022

.....  
**Ηλίας Λώλης**

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

Copyright © Ηλίας Λώλης, 2022.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Ο ακριβής υπολογισμός της Κατάστασης Φόρτισης και της Κατάστασης Υγείας στις μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι εξαιρετικά σημαντικός, ειδικά όταν οι ίδιες χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα ή σε συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, στόχος ήταν η παρουσίαση μεθόδων υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης αλλά και της Κατάστασης Υγείας με σημαντικά μεγαλύτερη ακρίβεια από τις μεθόδους που παρουσιάζονται στην διεθνή βιβλιογραφία. Πιο αναλυτικά, παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι που προτείνονται από την επιστημονική κοινότητα και εντοπίστηκαν οι πηγές σφαλμάτων τους. Στη συνέχεια, προτάθηκαν τρόποι που διορθώνουν τα σφάλματα αυτά και παρουσιάστηκαν εξ ολοκλήρου οι μέθοδοι που προτείνονται για τον υπολογισμό της Κατάστασης Φόρτισης και της Κατάστασης Υγείας. Οι μέθοδοι αυτοί, επαληθεύτηκαν χρησιμοποιώντας δεδομένα που είναι ελεύθερα προσβάσιμα στο διαδίκτυο και παρουσίασαν μεγάλη αύξηση στην ακρίβεια υπολογισμών. Τέλος, εν όψει του μεγάλου ενδιαφέροντος για έρευνα πάνω σε νέες μεθόδους υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης και της Κατάστασης Υγείας, προτάθηκαν θέματα για μελλοντικές εργασίες.

### Λέξεις κλειδιά

μπαταρίες, συσσωρευτές, κατάσταση φόρτισης, κατάσταση υγείας, ιόντων λιθίου



## **Abstract**

The accurate calculation of State of Charge and State of Health in lithium-ion batteries is extremely important, especially when they are used in electric vehicles or in electric energy storage systems. In this dissertation, the aim was to present methods for calculating the State of Charge as well as the State of Health with significantly greater accuracy than the methods presented in the international literature. The most popular methods proposed by the scientific community were presented and analyzed and their error sources were identified. Ways to correct these error sources were then suggested and the methods proposed to calculate the State of Charge and the State of Health were presented in full. These methods were verified using data that are freely accessible on the internet and showed a large increase in calculation accuracy. Finally, in view of the great interest in research on new methods for calculating the State of Charge and the State of Health, topics for future work were proposed.

## **Key words**

batteries, state of charge, state of health, soc, soh, lithium ion





## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κ. Δημήτριο Σούντρη, καθηγητή της σχολής ΗΜΜΥ του Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, ώστε να εκπονήσω το παρόν θέμα διπλωματικής.

Επιπλέον, ευχαριστώ τον κ. Φίλιππο Φαρμάκη, καθηγητή της σχολής ΗΜΜΥ του Δ.Π.Θ., για την καθοδήγηση, την πολύτιμη βοήθειά του αλλά και τις οδηγίες και συμβολές που μου προσέφερε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Γεώργιο Ζαρδαλίδη, μεταδιδάκτορα του εργαστηρίου Μικροτεχνολογίας και Νανοτεχνολογίας της σχολής ΗΜΜΥ του Δ.Π.Θ. για τις πολύτιμες παρεμβάσεις του σε σημαντικά σημεία της εργασίας μου. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές της σχολής ΗΜΜΥ του Ε.Μ.Π. για το εκπαιδευτικό τους έργο και για τα εφόδια που μου προσέφεραν.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου, την αδερφή μου και τον αδερφό μου καθώς και όλους τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου σε όλες τις εύκολες αλλά και δύσκολες στιγμές της ζωής μου.

Ηλίας Λώλης,  
Αθήνα, 14η Ιουλίου 2022



# Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
Κατάλογος πινάκων	13
Κατάλογος σχημάτων	15
1. Εισαγωγή	19
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	21
2.1 Δημοφιλέστερες χημείες	21
2.2 Σύγκριση	22
2.3 Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου	22
2.3.1 Λειτουργία μπαταριών ιόντων-λιθίου	22
2.3.2 Κατασκευή μπαταριών ιόντων-λιθίου	23
2.4 Μοντελοποίηση μπαταριών ιόντων λιθίου	25
2.4.1 Παράμετροι που επηρεάζουν την συμπεριφορά των μπαταριών	25
2.4.2 Συμπεριφορά της τάσης στις μπαταρίες ιόντων λιθίου	25
2.4.3 Ισοδύναμο Κύκλωμα	27
2.5 Χαρακτηρισμός μπαταριών ιόντων λιθίου	28
2.5.1 Εύρος τάσης	29
2.5.2 Τάση της μπαταρίας σε συνάρτηση του SoC	29
2.5.3 Θερμοκρασία λειτουργίας	30
2.5.4 Εσωτερική αντίσταση	30
2.5.5 Χωρητικότητα	32
2.5.6 Ειδική Ενέργεια	32
2.5.7 Ενεργειακή Πυκνότητα	33
2.5.8 Ειδική Ισχύς	33
2.5.9 Πυκνότητα Ισχύος	34
2.5.10 Κουλομπική Απόδοση	34
2.5.11 Ρυθμός αυτοεκφόρτισης	34
2.5.12 Απομείωση μπαταρίας & Κύκλοι Ζωής	34
3. Συστοιχίες Μπαταριών	35
3.1 Εισαγωγή	35
3.2 Συνδεσμολογία	35
3.2.1 Τρόποι συνδεσμολογίας δύο κελιών	35
3.2.2 Τρόποι συνδεσμολογίας περισσότερων από δύο κελιών	36
3.2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	36

3.3	Σύστημα Διαχείρισης Μπαταρίας . . . . .	37
3.3.1	Ευθύνες Συστημάτων Διαχείρισης Μπαταριών . . . . .	37
3.3.2	Δομή ενός Συστήματος Διαχείρισης Μπαταριών . . . . .	38
<b>4.</b>	<b>Υφιστάμενη Έρευνα . . . . .</b>	<b>43</b>
4.1	Κατάσταση Φόρτισης (SoC) . . . . .	43
4.1.1	Εισαγωγή . . . . .	43
4.1.2	Ορισμός . . . . .	43
4.1.3	Τρόποι Υπολογισμού του SOC . . . . .	43
4.2	Κατάσταση Υγείας (SoH) . . . . .	52
4.2.1	Εισαγωγή . . . . .	52
4.2.2	Ορισμός . . . . .	52
4.2.3	Τρόποι Υπολογισμού του SoH . . . . .	53
<b>5.</b>	<b>Προτεινόμενη Μεθοδολογία . . . . .</b>	<b>59</b>
5.1	Απαιτήσεις Μεθόδων Υπολογισμού SoC & SoH . . . . .	59
5.2	Κατάσταση Φόρτισης - SoC . . . . .	60
5.2.1	Αναπαράσταση της Κατάστασης Φόρτισης . . . . .	67
5.2.2	Προτεινόμενη Μεθοδολογία . . . . .	67
5.2.3	Οι πηγές σφαλμάτων και η αντιμετώπισή τους . . . . .	71
5.3	Κατάσταση Υγείας - SoH . . . . .	74
5.3.1	Προτεινόμενη Μεθοδολογία . . . . .	75
<b>6.</b>	<b>Πειραματικές Μετρήσεις . . . . .</b>	<b>79</b>
6.1	Κατάσταση Φόρτισης . . . . .	79
6.1.1	Σύνολο Δεδομένων . . . . .	79
6.1.2	Εξαγωγή δεδομένων . . . . .	85
6.1.3	Πειραματικές Μετρήσεις στους $-20^{\circ}\text{C}$ . . . . .	90
6.1.4	Πειραματικές Μετρήσεις στους $25^{\circ}\text{C}$ . . . . .	98
6.1.5	Συμπεράσματα . . . . .	105
6.2	Κατάσταση Υγείας . . . . .	105
6.2.1	Εξαγωγή Δεδομένων . . . . .	108
6.2.2	Πειραματικές μετρήσεις χωρίς σφάλμα δειγματοληψίας . . . . .	111
6.2.3	Πειραματικές μετρήσεις με σφάλμα δειγματοληψίας . . . . .	112
6.2.4	Συμπεράσματα . . . . .	114
<b>7.</b>	<b>Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία . . . . .</b>	<b>115</b>
7.1	Συμπεράσματα . . . . .	115
7.1.1	Αλγόριθμος Υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης . . . . .	115
7.1.2	Αλγόριθμος Υπολογισμού της Κατάστασης Υγείας . . . . .	115
7.2	Μελλοντική Εργασία . . . . .	116
7.2.1	Κατάσταση Φόρτισης . . . . .	116
7.2.2	Κατάσταση Υγείας . . . . .	116
	<b>Βιβλιογραφία . . . . .</b>	<b>119</b>

## Κατάλογος πινάκων

2.1	Σύγκριση διαφορετικών χημειών για ηλεκτρικούς συσσωρευτές. Δεδομένα από Tinton Dwi Atmaja και Amin, για το έτος 2015 [4]	22
3.1	Σύγκριση σε σειρά και παράλληλη συνδεσμολογία.	36
4.1	Συνοπτική παρουσίαση μεθόδων υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης.	44
4.2	Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης. Δεδομένα από την αναφορά [11].	51
4.3	Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης	53
4.4	Διαφορά της Τάσης Ανοιχτοκυκλώματος μεταξύ μίας καινούριας μπαταρίας και μίας γερασμένης μπαταρίας ( $SoH = 90\%$ ). Εξήχθη από την αναφορά [40].	55
4.5	Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού της Κατάστασης Υγείας	58
5.1	Σενάριο λανθασμένης εκτίμησης SoC του αλγορίθμου Coulomb Counting	61
5.2	Σενάριο λανθασμένης εκτίμησης SoC του αλγορίθμου Coulomb Counting. Για λόγους απλότητας δεν λαμβάνεται υπόψιν το φαινόμενο που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.2.	63
5.3	Χωρητικότητα που χάνεται (LFD) αν η αρχική θερμοκρασία είναι $20^{\circ}\text{C}$ . Δεδομένα από [20].	64
5.4	Σενάριο λανθασμένης εκτίμησης SoC του αλγορίθμου Coulomb Counting με αιτία την Κουλομπική Απόδοση. Στο παράδειγμα χρησιμοποιείται μπαταρία με Κουλομπική Απόδοση ίση με $99.5\%$ .	65
5.5	Ένταση ρεύματος και τάση στα άκρα της μπαταρίας όταν η μπαταρία θεωρείται πλήρως φορτισμένη και πλήρως εκφορτισμένη.	69
5.6	Σύγκριση απλού αλγορίθμου CC με την προτεινόμενη μέθοδο για <b>φόρτιση</b> σε χαμηλή θερμοκρασία	72
5.7	Σύγκριση απλού αλγορίθμου CC με την προτεινόμενη μέθοδο για <b>εκφόρτιση</b> σε χαμηλή θερμοκρασία. Για λόγους απλότητας δεν λαμβάνεται υπόψιν το φαινόμενο που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.2.	73
5.8	Σύγκριση του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting με τον τροποποιημένο αλγόριθμο Coulomb Counting. Στο παράδειγμα χρησιμοποιείται μπαταρία με Κουλομπική Απόδοση ίση με $99.5\%$ .	73
5.9	Συνοπτικός πίνακας σφαλμάτων και ο τρόπος αντιμετώπισής τους	74
6.1	Χαρακτηριστικά της μπαταρίας ιόντων λιθίου LG HG2. Δεδομένα από το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή [32]	79
6.2	Συλλογή των μετρήσεων που λαμβάνει χώρα στους $-20^{\circ}\text{C}$ , $-10^{\circ}\text{C}$ , $0^{\circ}\text{C}$ , $10^{\circ}\text{C}$ , $25^{\circ}\text{C}$ και $40^{\circ}\text{C}$ .	81
6.3	OCV-SOC στους $25^{\circ}\text{C}$	87
6.4	OCV-SOC στους $-20^{\circ}\text{C}$	88
6.5	Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου και του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting	97
6.6	Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου και του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting	102

6.7	Χαρακτηριστικά της μπαταρίας ιόντων λιθίου LG HG2. Δεδομένα από το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή [32] . . . . .	106
6.8	Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου Υπολογισμού του SoH, χωρίς σφάλμα δειγματοληψίας και $SoC = 60\%$ . . . . .	112
6.9	Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου Υπολογισμού του SoH. Δειγματοληψία στα 300ms από τον παλμό φόρτισης με $SoC = 60\%$ . . . . .	113
6.10	Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου Υπολογισμού του SoH. Δειγματοληψία στα 500ms από τον παλμό φόρτισης με $SoC = 60\%$ . . . . .	113

## Κατάλογος σχημάτων

2.1	Απεικόνιση μπαταρίας λιθίου από ευρεσιτεχνία του Yohsino κ.ά. [49]. 1-θετικό ηλεκτρόδιο, 2-αρνητικό ηλεκτρόδιο, 3 και 3'-ράβδος συλλογής ρεύματος, 4 και 4'-SUS, 5-πόλοι των ηλεκτροδίων, 6-περίβλημα μπαταρίας, 7-διαχωριστικό υλικό, 8-ηλεκτρολύτης . . . . .	24
2.2	1-κυλινδρική, 2-μαρσίπου και 3-πρισματική γεωμετρία. Εξήχθη από την αναφορά [22] . . . . .	24
2.3	Οι στρώσεις της ανόδου, διαχωριστικού υλικού και καθόδου. Παρατηρείται ότι σε κάθε άνοδο και κάθοδο (αρνητικό και θετικό ηλεκτρόδιο), ορισμένο κομμάτι του υλικού εξέχει (1). Όλα τα κομμάτια των φύλλων ανόδου που εξέχουν, συγκολλούνται μεταξύ τους με ακτίνες λέιζερ. Το ίδιο συμβαίνει και για τα φύλλα της καθόδου. Εξήχθη και επεξεργάστηκε από την αναφορά [24] . . . . .	25
2.4	Τρόπος τύλιξης ανόδου, διαχωριστικού υλικού και καθόδου μίας πρισματικής μπαταρίας. Εξήχθη από την αναφορά [24] . . . . .	25
2.5	Τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας στην εφαρμογή παλμού φόρτισης και πλαμού εκφόρτισης. Εξήχθη από την αναφορά [41] . . . . .	26
2.6	Απλή μοντελοποίηση μπαταρίας Li-ion . . . . .	28
2.7	Μοντελοποίηση μπαταρίας Li-ion με 2 $RC$ κυκλώματα . . . . .	28
2.8	Καμπύλη φόρτισης-εκφόρτισης μίας μπαταρίας NMC για διαφορετικές θερμοκρασίες αλλά και για ένα παλαιωμένο κελί. Εξήχθη από την αναφορά [50] . . . . .	29
2.9	Καμπύλη φόρτισης-εκφόρτισης μίας μπαταρίας $LiFePO_4$ για διαφορετικές θερμοκρασίες αλλά και για ένα παλαιωμένο κελί. Εξήχθη από την αναφορά [50] . . . . .	30
2.10	Σύγκριση της Ειδικής Ενέργειας για διαφορετικές χημείες μπαταριών. Εξήχθη από την αναφορά [29] . . . . .	33
2.11	Σύγκριση της Ενεργειακής Πυκνότητας για διάφορες χημείες μπαταριών για διαφορετικές χημείες μπαταριών. Εξήχθη από την αναφορά [33] . . . . .	33
3.1	Τρόποι συνδεσμολογίας δύο στοιχείων μεταξύ τους: (α) σε σειρά συνδεσμολογία, (β) παράλληλη συνδεσμολογία. . . . .	36
3.2	Συνδεσμολογία Συστοιχίας Μπαταριών . . . . .	37
3.3	Δομή και υποσυστήματα ενός Συστήματος Διαχείρισης Μπαταριών. . . . .	40
3.4	Δομή και υποσυστήματα ενός Συστήματος Διαχείρισης Μπαταριών. . . . .	41
4.1	Διάγραμμα Εσωτερικής αντίστασης $R_o$ με το Επίπεδο Φόρτισης (SoC) για 4 διαφορετικές, καινούριες μπαταρίας ιόντων λιθίου. Εξήχθη από την αναφορά [47]. . . . .	45
4.2	Διάγραμμα Εσωτερικής αντίστασης $R_o$ με το Επίπεδο Φόρτισης (SoC) για 4 διαφορετικές θερμοκρασίες. Εξήχθη από την αναφορά [47]. . . . .	46
4.3	Διάγραμμα Εσωτερικής αντίστασης $R_o$ με το Επίπεδο Φόρτισης (SoC) για 5 διαφορετικά κελιά με διαφορετικούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης. Εξήχθη από την αναφορά [47]. . . . .	46
4.4	Εξάρτηση της σύνθετης αντίστασης μίας μπαταρίας με την Κατάσταση Φόρτισης. Εξήχθη από την αναφορά [34]. . . . .	47
4.5	Εξάρτηση της σύνθετης αντίστασης μίας μπαταρίας με την θερμοκρασία της. Εξήχθη από την αναφορά [34]. . . . .	47

4.6	Εκτίμηση της Κατάστασης φόρτισης χρησιμοποιώντας αλγορίθμους που βασίζονται στο μοντέλο του Μαύρου Κουτιού. Εξήχθη από την αναφορά [52].	49
4.7	Δομή τρόπου υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης με τεχνικές της Θεωρίας Ελέγχου. Εξήχθη από την αναφορά [52].	50
4.8	Τάση ανοιχτοκυκλώματος για μία καινούρια μπαταρία και μία γερασμένη μπαταρία: (α) κατά την φόρτιση και (β) κατά την εκφόρτιση. Εξήχθη από την αναφορά [40].	54
4.9	Εσωτερική αντίσταση σε συνάρτηση της Κατάστασης Φόρτισης για τρία διαφορετικά κελιά με διαφορετική Κατάσταση Υγείας το καθένα (100 %, 95 % και 90 %). Εξήχθη από την αναφορά [40].	56
4.10	Nyquist Plot της σύνθετης αντίστασης για στοιχεία μπαταρίας με διαφορετικούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης. Εξήχθη από την αναφορά [34].	57
5.1	Τάση στα άκρα της μπαταρίας σε συνάρτηση της χωρητικότητας της μπαταρίας κατά την φόρτιση, για διαφορετικές θερμοκρασίες. Εξήχθη από την αναφορά [17].	62
5.2	Τάση στα άκρα της μπαταρίας σε συνάρτηση της χωρητικότητας της μπαταρίας κατά την εκφόρτιση, για διαφορετικές θερμοκρασίες. Εξήχθη από την αναφορά [17].	62
5.3	Εκφόρτιση στους $-20^{\circ}\text{C}$ και φόρτιση στους $20^{\circ}\text{C}$ μίας μπαταρίας ιόντων λιθίου.	65
5.4	Διάγραμμα ροής της μεθόδου υπολογισμού του SoC που προτείνεται.	68
5.5	Διάγραμμα ροής της μεθόδου υπολογισμού του SoH που προτείνεται.	76
5.6	Χωρητικότητα εκφόρτισης και Κουλομπική απόδοση μίας μπαταρίας NMC σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης. Εξήχθη από την αναφορά [48].	77
6.1	Εκφόρτιση με ένταση ρεύματος 1 C στους $25^{\circ}\text{C}$	82
6.2	Φόρτιση της μπαταρίας σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή στους $25^{\circ}\text{C}$	82
6.3	HPPC προφίλ εκφόρτισης στους $25^{\circ}\text{C}$	83
6.4	UDDS προφίλ εκφόρτισης στους $25^{\circ}\text{C}$	83
6.5	LA92 προφίλ εκφόρτισης στους $25^{\circ}\text{C}$	84
6.6	Εκφόρτιση με ένταση ρεύματος ίση με 1 C στους $-20^{\circ}\text{C}$	84
6.7	UDDS προφίλ εκφόρτισης στους $-20^{\circ}\text{C}$	85
6.8	LA92 προφίλ εκφόρτισης στους $-20^{\circ}\text{C}$	85
6.9	Μέτρηση HPPC από το σύνολο δεδομένων.	86
6.10	Παλμός HPPC από το σύνολο δεδομένων.	87
6.11	Διάγραμμα τάσης ανοιχτοκυκλώματος σε συνάρτηση του SoC στους $25^{\circ}\text{C}$	88
6.12	Διάγραμμα τάσης ανοιχτοκυκλώματος σε συνάρτηση του SoC στους $-20^{\circ}\text{C}$	89
6.13	Μέτρηση <u>UDDS</u> , α) $Q_{trapped}$ κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος και της μεθόδου Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας. Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει.	91





6.20	Μέτρηση <u>Mixed2</u> , α) $Q_{trapped}$ κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου <i>Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος</i> και της μεθόδου <i>Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας</i> . Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει. . . . .	100
6.21	Μέτρηση <u>Mixed3</u> , α) $Q_{trapped}$ κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου <i>Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος</i> και της μεθόδου <i>Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας</i> . Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει. . . . .	101
6.22	Μέτρηση <u>Mixed4</u> , α) $Q_{trapped}$ κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου <i>Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος</i> και της μεθόδου <i>Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας</i> . Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει. . . . .	102
6.23	Μέτρηση που περιλαμβάνει πολλές φορτίσεις/εκφορτίσεις, α) $Q_{trapped}$ κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου <i>Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος</i> και της μεθόδου <i>Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας</i> . Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει. . . . .	104
6.24	Μέτρηση ECU από το σύνολο δεδομένων. Από αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται οι 1 C Εκφορτίσεις, η DST μέτρηση, οι φορτίσεις και εκφορτίσεις με σταθερό ρεύμα και οι παλμοί φόρτισης/εκφόρτισης. . . . .	107
6.25	Μέτρηση SCU από το σύνολο δεδομένων. Από αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται οι 1 C Εκφορτίσεις και οι παλμοί φόρτισης/εκφόρτισης. . . . .	108
6.26	Παλμοί φόρτισης/εκφόρτισης στην δοκιμή αναφοράς SCU για την μέτρηση της Εσωτερικής Αντίστασης . . . . .	109
6.27	Τάση της μπαταρίας και ένταση του ρεύματος σε έναν παλμό φόρτισης. . . .	110
6.28	Εσωτερική αντίσταση σε συνάρτηση του SoC και SoH στους 25 °C. . . . .	111

## Κεφάλαιο 1

### Εισαγωγή

Ο ηλεκτρικός συσσωρευτής (ή αλλιώς μπαταρία) είναι μία συσκευή που μετατρέπει χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια και αντίστροφα. Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές χρησιμοποιούνται σε μία πληθώρα εφαρμογών, όπως οι φορητοί υπολογιστές, τα κινητά τηλέφωνα, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τα ηλεκτρικά περονοφόρα και οι συστοιχίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Ο πρώτος ηλεκτρικός συσσωρευτής θεωρείται από πολλούς πως είναι η **μπαταρία της Βαγδάτης**. Η συσκευή αυτή είναι ένα πλήλιο αγγείο ύψους περίπου 15 εκατοστών [16] όπου στο εσωτερικό του υπήρχε ένας χάλκινος κύλινδρος και μία σιδερένια ράβδος. Η συσκευή αυτή όταν γεμιζόταν με ένα όξινο υγρό (όπως για παράδειγμα κρασί ή ξύδι) εμφάνιζε τάση ανάμεσα στον χάλκινο κύλινδρο και στην σιδερένια ράβδο. Σήμερα, οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές είναι πιο πολύπλοκοι για να καλύψουν τις ολοένα και αυξανόμενες ανάγκες χωρητικότητας και ισχύος. Οι μπαταρίες χωρίζονται σε δύο είδη, τις επαναφορτιζόμενες και τις μιας χρήσης. Οι μπαταρίες μιας χρήσης, είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε εφόσον η χημική ενέργεια μετατραπεί σε ηλεκτρική, οι ίδιες να μην μπορούν να δημιουργήσουν διαφορά τάσης στους ακροδέκτες τους και να είναι πρακτικά άχρηστες. Μετά το πέρας της ζωής τους οι μπαταρίες μιας χρήσης απορρίπτονται. Από την άλλη μεριά, στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, εφόσον η χημική τους ενέργεια έχει μετατραπεί σε ηλεκτρική, μπορούν να φορτιστούν ξανά για να ξαναχρησιμοποιηθούν. Τέτοιες μπαταρίες χρησιμοποιούνται σήμερα στα κινητά τηλέφωνα, στα ηλεκτρικά οχήματα και στα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μπαταρίες μιας χρήσης χρησιμοποιούνται συνήθως σε λιγότερο απαιτητικές εφαρμογές και εκεί που η κατανάλωση ενέργειας είναι μικρή, όπως για παράδειγμα στα τηλεχειριστήρια και αριθμομηχανές. Η παρούσα διπλωματική εργασία θα αναλύσει και εξετάσει μόνο επαναφορτιζόμενους ηλεκτρικούς συσσωρευτές.

Η τεχνολογική ανάπτυξη και η ανάγκη για μεγαλύτερες και καλύτερες μπαταρίες έχει ωθήσει την επιστημονική κοινότητα να επενδύσει σημαντικούς πόρους στην έρευνα και ανάπτυξη των ηλεκτρικών συσσωρευτών. Η πρώτη ευρεία χρήση ηλεκτρικών συσσωρευτών ήταν στις αρχές του 18ου αιώνα ενώ η μεγαλύτερη ανάπτυξη των ηλεκτρικών συσσωρευτών έγινε από το 1990 και έπειτα. Από το 1991 μέχρι και το 2018, η ενεργειακή πυκνότητα αυξήθηκε από  $200 \text{ WhL}^{-1}$  σε περισσότερο από  $700 \text{ WhL}^{-1}$  ενώ η ενέργεια ανά κιλό αυξήθηκε από  $80 \text{ Whkg}^{-1}$  σε περισσότερο από  $250 \text{ Whkg}^{-1}$ . Ωστόσο, η τεχνολογική εξέλιξη στους ηλεκτρικούς συσσωρευτές θα ήταν άκαρπη αν οι ίδιοι ήταν οικονομικά ασύμφοροι για οποιαδήποτε εμπορική χρήση. Οι επιστήμονες δεν στοχεύουν μόνο στην εξέλιξη των ηλεκτρικών συσσωρευτών αλλά και σε τρόπους που θα κάνουν την παραγωγή τους πιο αποδοτική. Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές κόστιζαν τις αρχές του 1990 από 2.000 έως και 5.000 USD/KWh, ενώ το 2021, η τιμή των συσσωρευτών βρίσκεται περίπου στα 100 USD/KWh. Έρευνες εκτιμούν πως το 2050 η τιμή των ηλεκτρικών συσσωρευτών αναμένεται να βρίσκεται στα 20 USD/KWh [53].

Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές θα έχουν σημαντικό ρόλο στην απανθρακοποίηση των μεταφορών (μέσω των ηλεκτρικών οχημάτων) και στην αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην συνολική παραγωγή (αποθηκεύοντας ηλεκτρική ενέργεια σε περιόδους αυξημένης παραγωγής). Η ζήτηση των ηλεκτρικών συσσωρευτών θα συνεχίζει να αναπτύσσεται για

τουλάχιστον μέχρι και το 2030 όπου και προβλέπεται ότι θα φτάσει τις 3.500 GWh, 19 φορές περισσότερο από την ζήτηση του 2018. Μέχρι το 2030, τα ηλεκτρικά οχήματα θα οφείλονται για το μεγαλύτερο μερίδιο (95 %) της παγκόσμιας ζήτησης μπαταριών ενώ η αποθήκευση ενέργειας θα οφείλεται για το 3 % της παγκόσμιας ζήτησης.[8] Οι επαναφορτιζόμενοι ηλεκτρικοί συσσωρευτές, που αποτελούν την πλειοψηφία των μπαταριών που παράγονται, μπορούν να αποδώσουν ένα συγκεκριμένο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας πριν χρειαστούν ξανά φόρτιση. Τα συστήματα τα οποία εξυπηρετούν, όπως για παράδειγμα τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και τα κινητά τηλέφωνα, είναι απαραίτητο να γνωρίζουν ανά πάσα στιγμή την διαθέσιμη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί ο συσσωρευτής να αποδώσει πριν χρειαστεί φόρτιση. Παράλληλα, οι συσσωρευτές παρουσιάζουν υποβιβασμό των χαρακτηριστικών τους (για παράδειγμα παρουσιάζουν μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούν να αποδώσουν όταν είναι πλήρως φορτισμένοι) με την πάροδο του χρόνου αλλά και με τον αριθμό των φορτίσεων-εκφορτίσεων που έχουν γίνει. Οι δύο αυτές ανάγκες έχουν πυροδοτήσει σημαντική έρευνα από την επιστημονική κοινότητα η οποία έχει παρουσιάσει μια πληθώρα λύσεων όπου και πολλές από αυτές θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Πιο αναλυτικά, στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας θα παρουσιαστεί η επαναφορτιζόμενη μπαταρία, οι τρόποι μοντελοποίησής της και διάφορα χαρακτηριστικά της. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3 θα αναλυθούν το πώς αυτές μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους και να δημιουργήσουν Συστοιχίες Μπαταριών αλλά και θα περιγραφούν οι ευθύνες και τα δομικά στοιχεία των Συστημάτων Διαχείρισης Μπαταριών.

Στο Κεφάλαιο 4 θα αναλυθεί η υφιστάμενη έρευνα που έχει λάβει χώρα αλλά και μία σύγκριση ανάμεσα στις μεθόδους που έχουν παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία.

Στο Κεφάλαιο 5 θα παρουσιαστούν οι προτεινόμενοι μέθοδοι ενώ στο Κεφάλαιο 6 οι μέθοδοι θα επιβεβαιωθούν χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα.

Τέλος στο Κεφάλαιο 7, θα γίνει η σύνοψη της παρούσας εργασίας ενώ θα παρουσιαστούν και θέματα για μελλοντικές εργασίες.

## Κεφάλαιο 2

### Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η μπαταρίες αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια μετατρέποντάς την σε χημική, σχηματίζοντας χημικούς δεσμούς στα μόριά της. Αυτού του είδους η αποθήκευση ενέργειας ονομάζεται *Ηλεκτροχημική Αποθήκευση* και είναι η βάση λειτουργίας ενός συσσωρευτή. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές χημείες μπαταριών που κυκλοφορούν στην αγορά με πολλά μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα όταν συγκρίνονται μεταξύ τους.

Μια μπαταρία που χρησιμοποιεί Ηλεκτροχημική Αποθήκευση ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας αποτελείται από δύο μέταλλα, το θετικό ηλεκτρόδιο και αρνητικό ηλεκτρόδιο. Ανάμεσα από αυτά τα μέταλλα βρίσκεται το υλικό που ονομάζεται *Ηλεκτρολύτης*. Η χημική αντίδραση στα δύο ηλεκτρόδια μετατρέπει την χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην μπαταρία ως ηλεκτρική. Ο τύπος των ηλεκτροδίων, η χημεία του ηλεκτρολύτη και ο τρόπος κατασκευής του ηλεκτρικού συσσωρευτή είναι οι κυριότεροι λόγοι που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας. Τέτοια χαρακτηριστικά μπορεί να είναι η τάση στα άκρα της μπαταρίας, η χωρητικότητά της, η εσωτερική αντίστασή της κ.ά. [13].

#### 2.1 Δημοφιλέστερες χημείες

**Μπαταρία Μολύβδου - Οξέως** Οι μπαταρίες Μολύβδου - Οξέως έχουν σημαντικό μερίδιο αγοράς και χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, σε ηλεκτρικά περνοφόρα αλλά και ως μπαταρίες για τα συστήματα χαμηλής τάσης των οχημάτων. Είναι αρκετά δημοφιλείς λόγω της τιμής τους αλλά και της ικανότητάς τους να παρέχουν μεγάλη ένταση ρεύματος. Το χαμηλό κόστος απόκτησης και η ευρεία διαθεσιμότητά τους έχουν εδραιώσει τις μπαταρίες Μολύβδου - Οξέως στην αγορά. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά της χημείας αυτής παρουσιάζουν σημαντική πτώση με την χρήση της, κάτι το οποίο δεν συναντάται σε τέτοιο ποσοστό στους άλλους τύπους μπαταριών [28].

**Νικελίου - Ψευδαργύρου** Οι μπαταρίες Νικελίου - Ψευδαργύρου είναι γνωστές για πάνω από 1 αιώνα στην επιστήμη. Η τιμή τους είναι ανάλογη με αυτήν των μπαταριών Μολύβδου - Οξέως και των Νικελίου - Καδμίου. Έχουν ανάλογη δυνατότητα μέγιστης έντασης ρεύματος με τις Μολύβδου - Οξέως ενώ δεν περιέχουν τοξικά και διαβρωτικά μέταλλα όπως ο μόλυβδος και το κάδμιο [10].

**Νικελίου - Καδμίου** Οι μπαταρίες Νικελίου - Καδμίου χρησιμοποιούνται ευρέως στην στρατιωτική και αεροπορική βιομηχανία καθώς θεωρούνται πολύς υψηλής αξιοπιστίας, μεγάλης ζωής, με μεγάλο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας και μικρή αυτοεκφόρτιση. Οι επιδόσεις τους είναι ανάλογες των Νικελίου-Ψευδαργύρου και των Μολύβδου-Οξέως. Οι μπαταρίες Νικελίου - Καδμίου περιέχουν τοξικά υλικά, κυρίως Κάδμιο το οποίο είναι ιδιαίτερα επιβλαβές για το περιβάλλον [25].

**Ni-MH** Οι μπαταρίες Ni-MH έχουν περίπου 50 % μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και χαμηλότερη εσωτερική αντίσταση από τις Νικελίου-Καδμίου, ενώ επιτυγχάνουν περισσότε-

ρους από 3.000 κύκλους φόρτισης εκφόρτισης. Ο συγκεκριμένος τύπος μπαταριών είναι ανθεκτικός σε σφάλματα όπως υπέρταση ενώ έχει την δυνατότητα για μεγάλα ρεύματα. Οι μπαταρίες Ni-MH είναι ιδανικές για απαιτητικές χρήσεις όπως τα εργαλεία χειρός και τα ηλεκτρικά οχήματα [3].

**Ιόντων Λιθίου** Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου γνωρίζουν αυξημένη επιτυχία χάρη στις εξαιρετικές τους επιδόσεις. Αλλάζοντας το υλικό στην κάθοδο, οι επιστήμονες έχουν δημιουργήσει πολλούς διαφορετικούς τύπους μπαταριών ιόντων λιθίου με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Μερικές από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι οι λιθίου-θειούχου σιδήρου (FeS), οι φωσφορικού σιδήρου-λιθίου (LiFePO<sub>4</sub>), οι μπαταρίες πολυμερών ιόντων λιθίου (LiPo) και οι μπαταρίες λιθίου-τιτανίου (LiTiO/NiMnO<sub>2</sub>). Κάθε χημεία παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά, τα οποία μπορεί να είναι η ενεργειακή πυκνότητα, η διαφορά τάσης στους πόλους της μπαταρίας, η ασφάλεια της μπαταρίας, η ανακυκλωσιμότητα της κ.α. [23] Η παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποίησε μετρήσεις και δεδομένα από μπαταρίες ιόντων λιθίου και συνεπώς εστιάζει μόνο στην συγκεκριμένη αυτή χημεία.

## 2.2 Σύγκριση

Στον Πίνακα 2.1 συγκρίνουμε τις πιο δημοφιλείς χημείες μπαταριών που κυκλοφορούν στην αγορά.

	Ενέργεια ανά χιλιόγραμμα (Wh/kg)	Ενεργειακή πυκνότητα (Wh/L)	Κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης	Κόστος Παραγωγής (\$/kWh)
Μολύβδου Ωξέως	35	100	1000	60
Νικελίου - Καδμίου	50-80	300	2000	250-300
Λιθίου-Θειούχου Σιδήρου	150	-	1000+	110
LiFePO <sub>4</sub>	120	220	2000	350
LiPo	130-225	200-250	1200+	350
Λιθίου-Τιτανίου	80-100	-	18000	2000

**Πίνακας 2.1:** Σύγκριση διαφορετικών χημειών για ηλεκτρικούς συσσωρευτές. Δεδομένα από Tinton Dwi Atmaja και Amin, για το έτος 2015 [4]

Παρατηρούμε πως οι μπαταρίες Μολύβδου-Όξεως έχουν το πιο μικρό κόστος παραγωγής αλλά μειονεκτούν σε άλλα χαρακτηριστικά, κυρίως στην Ενέργεια ανά χιλιόγραμμα αλλά και στην Ενεργειακή Πυκνότητα. Οι μπαταρίες LiFePO<sub>4</sub> έχουν σχετικά μεγάλο κόστος παραγωγής, ωστόσο, υπερτερούν στην Ενεργειακή Πυκνότητα και στην Ενέργεια ανά χιλιόγραμμα. Οι μπαταρίες Λιθίου-Τιτανίου μπορούν να δεχθούν πολλούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης ωστόσο το κόστος τους ανά kWh είναι εξαιρετικά υψηλό συγκριτικά με τις άλλες χημείες.

## 2.3 Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου

### 2.3.1 Λειτουργία μπαταριών ιόντων-λιθίου

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει λεπτομερώς τον τρόπο λειτουργίας μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου. Όπως περιγράφηκε και νωρίτερα η μπαταρία ιόντων λιθίου αποτελείται από δύο εξαρτήματα όπου αυτά παρουσιάζουν διαφορά τάσης μεταξύ τους. Τα εξαρτήματα αυτά είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο όπου και ονομάζεται άνοδος και το θετικό ηλεκτρόδιο που ονομάζεται κάθοδος. Ανάμεσα στην άνοδο και στην κάθοδο υπάρχει ένα διαχωριστικό υλικό το οποίο

αποτελείται από μονωτικό υλικό. Το διαχωριστικό υλικό προστατεύει την μπαταρία από βραχυκύκλωμα μεταξύ της ανόδου και της καθόδου κάτι το οποίο θα συνέβαινε καθώς τα δύο αυτά υλικά είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Το διαχωριστικό υλικό είναι εμποτισμένο με μία ουσία που ονομάζεται ηλεκτρολύτης, ο οποίος δεν αλλάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητά του ωστόσο επιτρέπει στο λίθιο να διαπερνάει το διαχωριστικό υλικό. Εν συντομία, μία μπαταρία ιόντων λιθίου αποτελείται από τρεις διαφορετικές στρώσεις υλικών, την άνοδο, το διαχωριστικό υλικό εμποτισμένο με ηλεκτρολύτη και την κάθοδο. Το διαχωριστικό υλικό υπάρχει για να απομονώσει ηλεκτρικά την άνοδο και την κάθοδο, ενώ παράλληλα ο εμποτισμός του με τον ηλεκτρολύτη επιτρέπει στο λίθιο να το διαπεράσει.

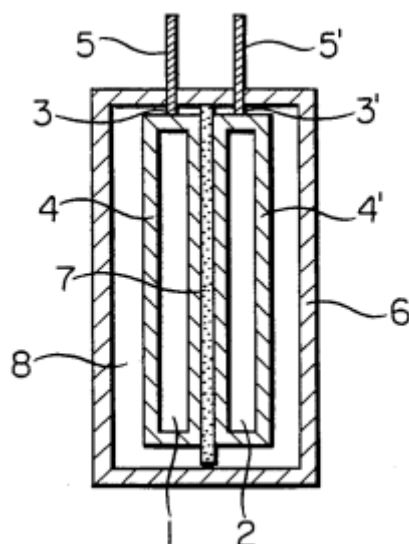
Η κάθοδος είναι το υλικό το οποίο φιλοξενεί το λίθιο. Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, όταν η μπαταρία φορτίζεται, τότε θεωρείται φορτίο το οποίο τροφοδοτείται από μια εξωτερική πηγή ρεύματος, συνεπώς, ρεύμα ρέει προς τον θετικό πόλο της μπαταρίας, δηλαδή την κάθοδο. Τα ηλεκτρόνια έχουν αντίθετη φορά από το ρεύμα συνεπώς μετακινούνται από την κάθοδο στην άνοδο μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, καθώς το διαχωριστικό υλικό είναι ηλεκτρικός μονωτής και δεν επιτρέπει τα ηλεκτρόνια να τον διασχίσουν. Παράλληλα, η ηλεκτροχημική αντίδραση στην άνοδο και στην κάθοδο μεταφέρει τα ιόντα λιθίου από την κάθοδο στην άνοδο μέσω του διαχωριστικού υλικού. Αυτή η χημική αντίδραση που έλαβε χώρα από την μετατόπιση των ηλεκτρονίων, είναι ο τρόπος με τον οποίον οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια (μεταφορά ηλεκτρονίων) σε χημική ενέργεια (μεταφορά ιόντων λιθίου από την κάθοδο στην άνοδο). Με αυτήν την μεταφορά των ιόντων λιθίου, η τάση της καθόδου (δηλαδή του θετικού πόλου της μπαταρίας) αυξάνεται ενώ αντίστοιχα, η τάση της ανόδου (αρνητικού πόλου) μειώνεται. Η διαφορά τάσης μεταξύ των δύο αυτών πόλων είναι η τάση της μπαταρίας [14].

Το ίδιο φαινόμενο, αλλά ανεστραμμένο, συναντάται και κατά την εκφόρτιση. Όταν η μπαταρία εκφορτίζεται, ρεύμα ρέει από τον θετικό πόλο της μπαταρίας προς τον αρνητικό. Τα ηλεκτρόνια ρέουν από την άνοδο προς την κάθοδο μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, ενώ τα ιόντα λιθίου ρέουν και αυτά από την άνοδο στην κάθοδο μέσω του διαχωριστικού υλικού. Αυτή η μεταφορά του λιθίου είναι αυτή που μειώνει την τάση στην κάθοδο και αυξάνει την τάση στην άνοδο με συνέπεια την μείωση της διαφοράς τάσης της μπαταρίας. Η πλήρης φόρτιση και εκφόρτιση μιας μπαταρίας ονομάζεται κύκλος φόρτισης-εκφόρτισης [14].

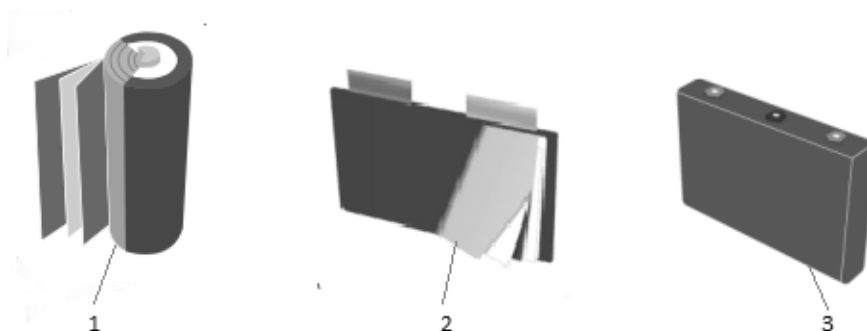
Η ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει μία μπαταρία ιόντων λιθίου ονομάζεται χωρητικότητα. Το ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας ανά πάσα χρονική στιγμή ονομάζεται State-of-Charge (SOC) και είναι μία ένδειξη για το πόσο φορτισμένη είναι η μπαταρία ανά πάσα χρονική στιγμή. Για παράδειγμα, αν μία μπαταρία μία χρονική στιγμή έχει  $SOC = 50\%$ , αυτό σημαίνει ότι από εκείνη την στιγμή και μέχρι να εκφορτιστεί πλήρως μπορεί να αντληθεί το 50% της ενέργειας που θα είχε αν ήταν πλήρως φορτισμένη. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορούν να φορτιστούν και να εκφορτιστούν χιλιάδες φορές χωρίς να υπάρχει μεγάλη μείωση στην χωρητικότητά τους [14], ωστόσο, κάθε κύκλος φόρτισης και εκφόρτισης δημιουργεί μικρή ανεπανόρθωτη ζημία στην μπαταρία κάτι το οποίο μειώνει σταδιακά την χωρητικότητά της.

### 2.3.2 Κατασκευή μπαταριών ιόντων-λιθίου

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι διαθέσιμες στην αγορά σε τρεις διαφορετικές γεωμετρίες, τις κυλινδρικές, τις μαρσίπου (pouch) και τις πρισματικές. Όλες οι γεωμετρίες περιέχουν τα ίδια εξαρτήματα (άνοδος, κάθοδος, διαχωριστικό υλικό, ηλεκτρολύτης κ.α.) ωστόσο ο τρόπος συναρμολόγησης διαφέρει από γεωμετρία σε γεωμετρία. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται τα δομικά χαρακτηριστικά μίας μπαταρίας λιθίου ενώ στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι πιο γνωστές γεωμετρίες μπαταριών που κυκλοφορούν σήμερα.



**Σχήμα 2.1:** Απεικόνιση μπαταρίας λιθίου από ευρεσιτεχνία του Yohsino κ.ά. [49]. 1-θετικό ηλεκτρόδιο, 2-αρνητικό ηλεκτρόδιο, 3 και 3'-ράβδος συλλογής ρεύματος, 4 και 4'-SUS, 5-πόλοι των ηλεκτροδίων, 6-περίβλημα μπαταρίας, 7-διαχωριστικό υλικό, 8-ηλεκτρολύτης

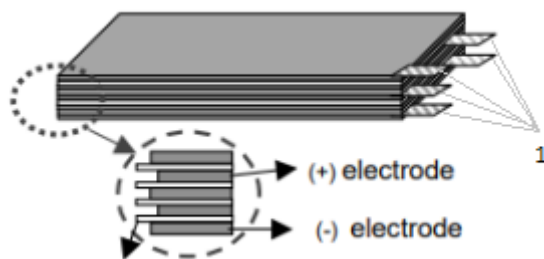


**Σχήμα 2.2:** 1-κυλινδρική, 2-μαρσίπου και 3-πρισματική γεωμετρία. Εξήχθη από την αναφορά [22]

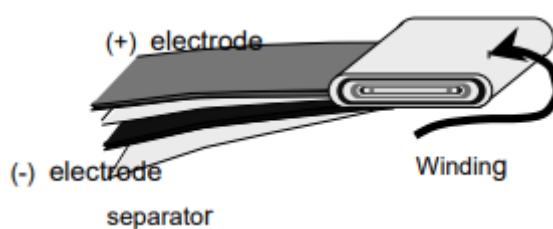
**Μπαταρίες Μαρσίπου** Οι μπαταρίες μαρσίπου αποτελούνται από πολλές στρώσεις "φύλλων" που αποτελούνται από την άνοδο, διαχωριστικό υλικό, κάθοδο, διαχωριστικό υλικό, άνοδο κ.ο.κ. όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Ορισμένες μπαταρίες μαρσίπου έχουν περισσότερες από 120 στρώσεις, όπως και φαίνεται στο Σχήμα. Όλα τα άκρα των ανόδων και καθόδων συγκολλούνται μεταξύ τους με ακτίνες λέιζερ. Τέλος, ο ηλεκτρολύτης τοποθετείται στην μπαταρία και η ίδια τυλίγεται γύρω από το υλικό περιτύλιγματος (συνήθως αλουμίνιο) και σφραγίζεται [22].

**Κυλινδρικές και πρισματικές μπαταρίες** Οι κυλινδρικές και πρισματικές μπαταρίες διαφέρουν στον τρόπο με τον οποίο τα υλικά είναι τοποθετημένα. Αντί η μπαταρία να αποτελείται από πολλά στοιβαγμένα φύλλα το ένα πάνω στο άλλο, η άνοδος, το διαχωριστικό υλικό και η κάθοδος τυλίγονται ομοιόμορφα και συνεχόμενα είτε κυλινδρικά (για τις κυλινδρικές μπαταρίες) είτε επίπεδα (για τις πρισματικές) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Αυτή η μέθοδος είναι πολύ πιο γρήγορη και αποδοτική συγκριτικά με τον τρόπο κατασκευής των μπαταριών μαρσίπου. Στο τελευταίο στάδιο παραγωγής, ο ηλεκτρολύτης τοποθετείται στην μπαταρία και η ίδια σφραγίζεται στο περιτύλιγμα της το οποίο είναι είτε κυλινδρικό είτε ορθογώνιο [22].





**Σχήμα 2.3:** Οι στρώσεις της ανόδου, διαχωριστικού υλικού και καθόδου. Παρατηρείται ότι σε κάθε άνοδο και κάθοδο (αρνητικό και θετικό ηλεκτρόδιο), ορισμένο κομμάτι του υλικού εξέχει (1). Όλα τα κομμάτια των φύλλων ανόδου που εξέχουν, συγκολλούνται μεταξύ τους με ακτίνες λέιζερ. Το ίδιο συμβαίνει και για τα φύλλα της καθόδου. Εξήχθη και επεξεργάστηκε από την αναφορά [24]



**Σχήμα 2.4:** Τρόπος τύλιξης ανόδου, διαχωριστικού υλικού και καθόδου μίας πρισματικής μπαταρίας. Εξήχθη από την αναφορά [24]

## 2.4 Μοντελοποίηση μπαταριών ιόντων λιθίου

### 2.4.1 Παράμετροι που επηρεάζουν την συμπεριφορά των μπαταριών

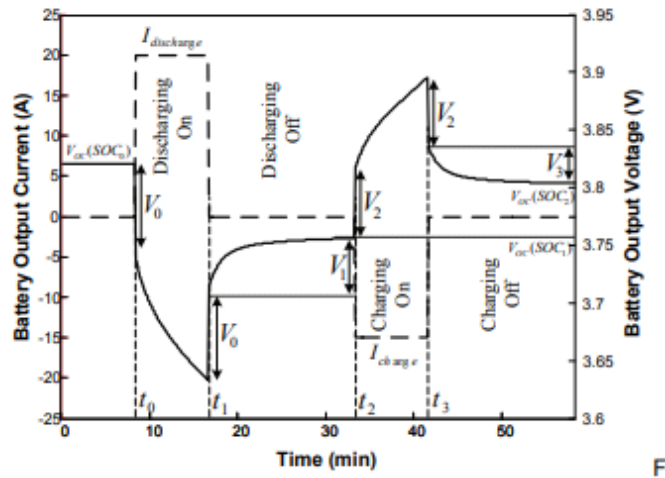
Οι μπαταρίες περιλαμβάνουν πολύπλοκους ηλεκτροχημικούς δεσμούς που καθιστά την συμπεριφορά τους εξαιρετικά σύνθετη. Η ακριβής προσομοίωση της μπαταρίας με μαθηματικά μοντέλα είναι πολύ σημαντική για την έρευνα και την ανάπτυξη των ηλεκτρικών συσσωρευτών, καθώς θεωρητικές προσεγγίσεις μπορούν να επαληθευτούν μαθηματικά χωρίς να υπάρχει ανάγκη για πειράματα με φυσική μπαταρία. Ωστόσο, η συμπεριφορά της μπαταρίας εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπου ανάμεσά τους είναι οι εξής:

- θερμοκρασία
- επίπεδο φόρτισης (SoC)
- επίπεδο υγείας μπαταρίας (SoH)
- ένταση ρεύματος φόρτισης/εκφόρτισης
- χρόνος ηρεμίας (όπου το ρεύμα από/προς την μπαταρία ισούται με 0 A)
- ατέλειες στην παραγωγική διαδικασία

### 2.4.2 Συμπεριφορά της τάσης στις μπαταρίες ιόντων λιθίου

Για να μοντελοποιηθεί μία μπαταρία ιόντων λιθίου σε ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, θα πρέπει να βρεθεί το πως η τάση στους ακροδέκτες της εξαρτάται όταν η ένταση του ρεύματος είναι η βηματική συνάρτηση. Στην Εικόνα 2.5 παρατίθεται η τάση της μπαταρίας για έναν παλμό

εκφόρτισης και έναν παλμό φόρτισης. Ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στην Τάση της μπαταρίας (σκούρα συνεχόμενη γραμμή) και στην ένταση του ρεύματος (διακεκομμένη γραμμή), ενώ ο οριζόντιος άξονα αναφέρεται στον χρόνο (σε λεπτά).



**Σχήμα 2.5:** Τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας στην εφαρμογή παλμού φόρτισης και παλμού εκφόρτισης. Εξήχθη από την αναφορά [41]

- Για  $t < t_0$ ,  $I = 0$ . Θεωρούμε ότι η μπαταρία βρίσκεται σε ηρεμία για μεγάλο χρονικό διάστημα και για αυτό ισχύει  $\frac{\partial V(t)}{\partial t} = 0$  όπου  $V(t_x)$  η τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας την χρονική στιγμή  $t_x$ .
- Την χρονική στιγμή  $t = t_0$ , ξεκινάει ο παλμός ρεύματος έντασης περίπου 20 A. Εκείνη την χρονική στιγμή, η τάση της μπαταρίας έχει μειωθεί κατά  $V_0$ . Αυτό υποδηλώνει πως η μπαταρία έχει εσωτερική αντίσταση, καθώς υπάρχει μείωση της τάσης στους ακροδέκτες της μπαταρίας.
- Για το χρονικό διάστημα από  $t_0 < t < t_1$ , υπάρχει μία εκθετική μείωση της τάσης της μπαταρίας που οφείλεται κυρίως στην μείωση του SoC αλλά και σε διάφορα άλλα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της μπαταρίας.
- Την χρονική στιγμή  $t = t_1$ , η ένταση του ρεύματος είναι μηδενική και η μπαταρία βρίσκεται σε ηρεμία. Παρατηρείται πως αμέσως η τάση αυξάνεται κατά  $V_0$  λόγω της εσωτερικής αντίστασης, καθώς δεν υπάρχει ρεύμα για να δημιουργήσει την πτώση τάσης  $V_0$  κατά μήκος της εσωτερικής αντίστασης.
- Για το χρονικό διάστημα  $t_1 < t < t_2$  παρατηρείται πως υπάρχει μικρή εκθετική αύξηση στην τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας ακόμη και αν η ένταση του ρεύματος είναι μηδενική, η οποία οφείλεται σε εσωτερικά φαινόμενά της. Ο χρόνος που περνάει από την τελευταία χρονική στιγμή όπου ισχύει  $I \neq 0$  (στην συγκεκριμένη περίπτωση την  $t_1$ ), ονομάζεται "χρόνος ηρεμίας" (relaxation time).
- Την χρονική στιγμή  $t = t_2$ , μπορεί να θεωρηθεί πως η προηγούμενη εκθετική αύξηση έχει σταματήσει (καθώς τα εσωτερικά φαινόμενα που την προκαλούν, εξασθενούν με τον χρόνο) και η μπαταρία βρίσκεται σε τάση Ανοιχτοκυκλώματος, συμβολιζόμενη με τον όρο  $V_{OCV}$ . Παρατηρούμε, πως η τάση ανοιχτοκυκλώματος, είναι μικρότερη από αυτήν της χρονικής στιγμής  $t_0^-$ , δηλαδή,  $(V_{OCV} = V(t_2^-)) < V(t_0^-)$ . Η διαφορά τάσης αυτές τις δύο χρονικές στιγμές, οφείλεται στην αποφόρτιση της μπαταρίας που έλαβε χώρα κατά το χρονικό διάστημα  $t_0 \rightarrow t_1$  και στην μεταφορά του λιθίου εσωτερικά στην μπαταρία, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.3.1.

- Την χρονική στιγμή  $t_2$ , ξεκινάει η φόρτιση της μπαταρίας με αρνητικό παλμό ρεύματος. Όπως και στην εκφόρτιση, η μπαταρία παρουσιάζει στιγμιαία διαφορά τάσης, λόγω της εσωτερικής αντίστασης. Αυτήν την φορά, επειδή η μπαταρία φορτίζεται, η διαφορά τάσης είναι θετική και ίση με  $V_2$ .
- Κατά το χρονικό διάστημα  $t_2 \rightarrow t_3$ , η μπαταρία παρουσιάζει λογαριθμική αύξηση της τάσης η οποία οφείλεται κυρίως στην φόρτισή της.
- Την χρονική στιγμή  $t_3$ , η ένταση του ρεύματος γίνεται 0 A και υπάρχει στιγμιαία μείωση της τάσης στους ακροδέκτες της μπαταρίας που οφείλονταν στην εσωτερική αντίστασή της.
- Για το χρονικό διάστημα  $t_3$  και έπειτα, υπάρχει εκθετική μείωση της τάσης όπου οφείλεται στα εσωτερικά φαινόμενα της μπαταρίας.
- Στο τέλος των μετρήσεων, παρατηρούμε πως η τάση της μπαταρίας έχει εξισορροπηθεί, είναι ίση με την τάση ανοιχτοκυκλώματος  $V_{OCV}$  και ότι  $\frac{\partial V(t)}{\partial t} \approx 0$ .

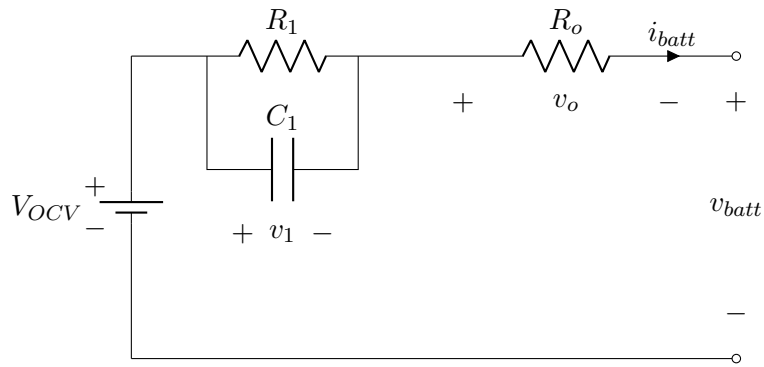
Θα πρέπει να σημειωθεί πως μερικοί κατασκευαστές ηλεκτρικών συσσωρευτών και ερευνητές θεωρούν την τάση ανοιχτοκυκλώματος  $V_{OCV}$  ίση με την τάση στα άκρα της μπαταρίας όταν η ένταση του ρεύματος είναι μηδενική. Όπως είδαμε παραπάνω στα χρονικά διαστήματα  $t_1 \rightarrow t_2$ ,  $t_3$  και έπειτα, αφού η ένταση του ρεύματος έχει γίνει μηδέν, υπάρχει το μεταβατικό φαινόμενο όπου η τάση στα άκρα της μπαταρίας αλλάζει ακόμα και αν η ένταση του ρεύματος είναι μηδέν. Όταν η μπαταρία βρίσκεται σε ηρεμία και δρα αυτό το φαινόμενο, τότε ορίζουμε ότι η μπαταρία βρίσκεται σε κατάσταση "ηρεμίας" (relaxation). Στην παρούσα εργασία, η τάση ανοιχτοκυκλώματος θεωρείται ως την τάση στα άκρα του συσσωρευτή εφόσον η ένταση του ρεύματος ισούται με μηδέν αλλά και εφόσον έχει περάσει ικανοποιητικός χρόνος ηρεμίας (relaxation time) για να τελειώσει το μεταβατικό αυτό φαινόμενο.

Σε πολλές περιπτώσεις, οι ερευνητές αμελούν πολλά από τα χαρακτηριστικά που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2.4.1 όταν μοντελοποιούν μαθηματικά μία μπαταρία ιόντων λιθίου καθώς η δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο θα λαμβάνει υπόψη του όλες τις παραμέτρους είναι εξαιρετικά δύσκολο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρουσιαστεί ο πιο γνωστός τρόπος μαθηματικής αναπαράστασης μίας μπαταρίας, το Ηλεκτρικό Μοντέλο Ισοδύναμου Κυκλώματος.

### 2.4.3 Ισοδύναμο Κύκλωμα

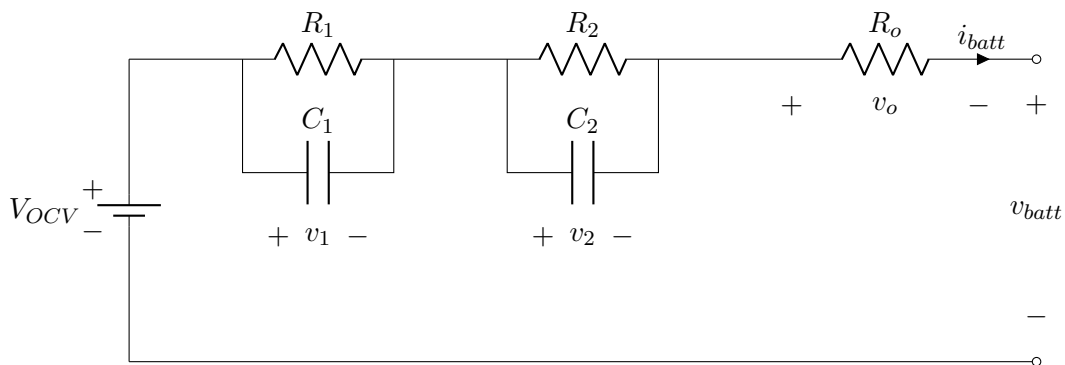
Ο πιο εύκολος τρόπος να αναπαρασταθεί μια μπαταρία ιόντων λιθίου με μαθηματικό τρόπο είναι το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.6. Στο κύκλωμα αυτό, η τάση ανοιχτοκυκλώματος της μπαταρίας είναι η  $V_{OCV}$ , ενώ η εσωτερική αντίσταση που δημιουργεί μείωση της τάσης στα άκρα της μπαταρίας κατά την εκφόρτιση και αύξηση της τάσης κατά την φόρτιση, είναι η  $R_o$ . Το  $RC$  κύκλωμα που αποτελείται από την αντίσταση  $R_1$  και  $C_1$  περιγράφει την απόκριση της τάσης του κελιού όταν η ένταση του ρεύματος είναι η βηματική συνάρτηση. Το ρεύμα που εξέρχεται από την μπαταρία ή εισέρχεται προς αυτήν συμβολίζεται με  $i_{batt}$ . Τέλος, η τάση  $u_{batt}$  είναι αυτή που μετριέται ανά πάσα στιγμή στους ακροδέκτες της μπαταρίας και περιλαμβάνει την διαφορά τάσης  $v_o$  που προκαλείται από την εσωτερική αντίσταση  $R_o$  αλλά και την διαφορά τάσης  $u_1$  από το  $RC$  κύκλωμα.

Ωστόσο, ο παραπάνω τρόπος αναπαράστασης μίας μπαταρίας ιόντων λιθίου, δεν είναι ο ιδανικός [21] καθώς έχει ορισμένα μειονεκτήματα τα οποία είναι πέρα από το πεδίο έρευνας της παρούσας εργασίας. Ένας καλύτερος τρόπος είναι να προστεθεί και δεύτερο  $RC$  κύκλωμα όπου και το κάθε ένα  $RC$  κύκλωμα περιγράφει διαφορετικά ηλεκτροχημικά φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα στην μπαταρία. Ένα τέτοιο κύκλωμα είναι το κύκλωμα του Σχήματος 2.7. Όπως και στο κύκλωμα του Σχήματος 2.6 η τάση ανοιχτοκυκλώματος συμβολίζεται με  $V_{OCV}$  ενώ η τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας συμβολίζεται με  $u_{batt}$ . Τα δύο  $RC$  κυκλώματα



Σχήμα 2.6: Απλή μοντελοποίηση μπαταρίας Li-ion

περιγράφουν διαφορετικά φαινόμενα, ενώ η τάση  $v_o$  είναι αυτή που οφείλεται στην εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας.



Σχήμα 2.7: Μοντελοποίηση μπαταρίας Li-ion με 2 RC κυκλώματα

Τα παραπάνω δύο κυκλώματα είναι σχετικά απλά ενώ υπάρχουν πιο πολύπλοκοι τρόποι στην διαθέσιμη βιβλιογραφία [21]. Στόχος της μοντελοποίησης με το Ισοδύναμο Κύκλωμα, είναι να περιγραφεί η τάση στα άκρα της μπαταρίας όταν η ένταση του ρεύματος είναι η βηματική συνάρτηση και κυρίως να περιγραφεί το φαινόμενο της αύξησης/μείωσης τάσης όταν η μπαταρία χαλαρώνει και όταν  $i_{batt} = 0$  A. Τα παραπάνω κυκλώματα δεν περιγράφουν την συμπεριφορά της μπαταρίας όταν η θερμοκρασία αλλάζει αλλά ούτε και όταν το επίπεδο φόρτισής της μειώνεται ή αυξάνεται. Αυτό είναι ένας περιορισμός που υπάρχει στην παραπάνω μοντελοποίηση αλλά είναι περισσότερο από πλήρης για την ανάπτυξη αλγορίθμων υπολογισμού του SoC και SoH, το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

## 2.5 Χαρακτηρισμός μπαταριών ιόντων λιθίου

Οι μπαταρίες είναι τόσο πολύπλοκες που διαθέτουν πολλά κριτήρια επίδοσης. Για παράδειγμα, η χωρητικότητα της μπαταρίας σε σύγκριση με την μάζα της ή το μέγεθός της είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την επιλογή μπαταριών σε ηλεκτρικά οχήματα όπου υπάρχει ανάγκη για μικρές και ελαφριές μπαταρίες με μεγάλη χωρητικότητα. Από την άλλη μεριά, τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν μπαταρίες που είναι ικανές να πραγματοποιήσουν χιλιάδες κύκλους κατά την διάρκεια ζωής τους χωρίς να υπάρχει ανάγκη για μικρές και ελαφριές μπαταρίες. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στην πολιτική αεροπορία και σε στρατιωτικούς σκοπούς έχουν ως απαραίτητο κριτήριο την αξιοπιστία και την ασφάλεια.

Πέρα από τα κριτήρια επίδοσης των μπαταριών, η χημεία της μπαταρίας μπορεί να ορίζει την συμπεριφορά της. Η τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας, η θερμοκρασία λειτουργίας της και η θερμότητα που αποβάλλεται στο περιβάλλον είναι μερικές από αυτές τις μετρικές

όπου οι μηχανικοί που επιλέγουν μπαταρίες στις εφαρμογές τους θα πρέπει να γνωρίζουν. Σε αυτό το κεφάλαιο παραθέτονται ορισμένες από τις πιο σημαντικές μετρικές των ηλεκτρικών συσσωρευτών των πιο γνωστών μπαταριών ιόντων λιθίου, τις NMC και LiFePO<sub>4</sub>.

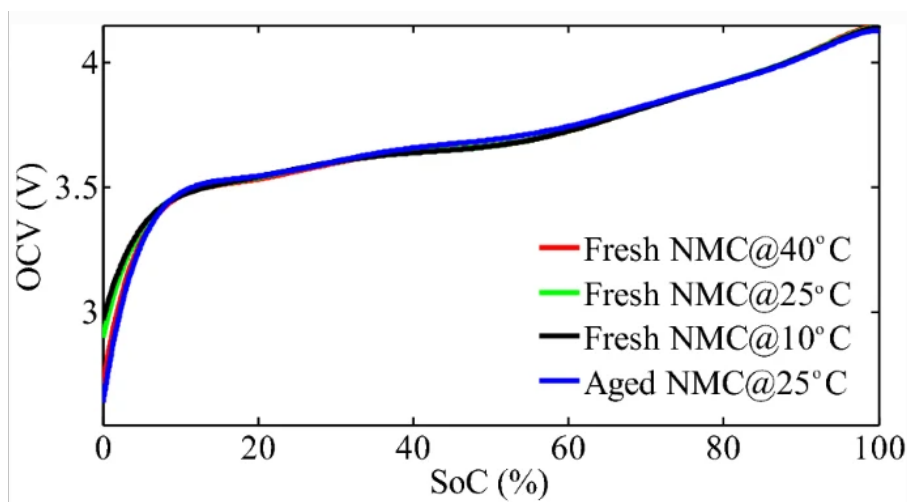
### 2.5.1 Εύρος τάσης

Οι μπαταρίες έχουν ένα συγκεκριμένο εύρος τάσης λειτουργίας το οποίο θα πρέπει να τηρείται καθόλη την διάρκεια της ζωής τους. Η μη τήρηση αυτής της προϋπόθεσης, μπορεί να μειώσει την διάρκεια ζωής της, την χωρητικότητά της αλλά και να οδηγήσει σε περιπτώσεις υπερθέρμανσης και ίσως και φωτιάς. Η χημεία της μπαταρίας ορίζει το εύρος τάσης λειτουργίας της μπαταρίας αλλά και την Ονομαστική Τάση (Nominal Voltage). Η Ονομαστική Τάση μίας μπαταρίας είναι η τάση ανοιχτοκυκλώματος στα άκρα της όταν είναι ημιφορτισμένη, δηλαδή όταν  $SoC = 50\%$ .

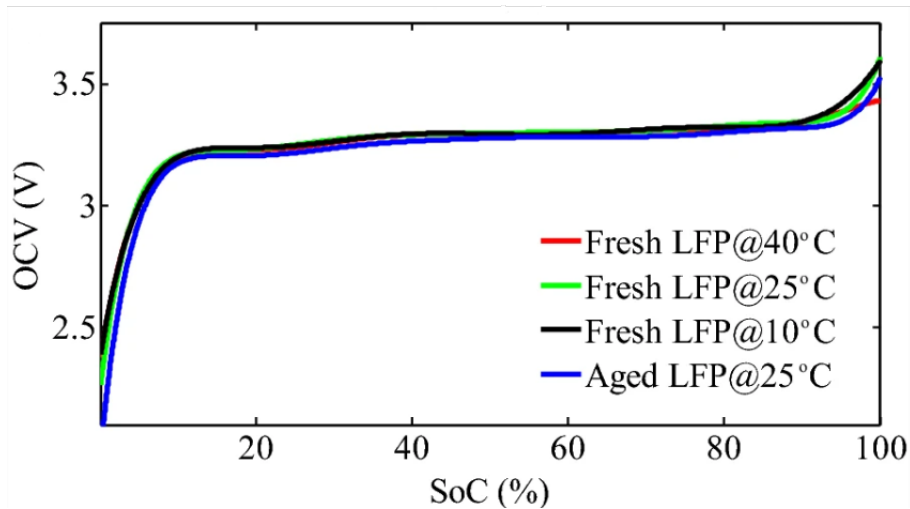
Οι μπαταρίες NMC έχουν σχεδόν το ίδιο εύρος λειτουργίας από τις LiFePO<sub>4</sub> αλλά διαφορετικό άνω και κάτω όριο τάσης. Για παράδειγμα, η μπαταρία INR18650MJ1 της εταιρίας LG-CHEM, είναι τύπου NMC και έχει εύρος τάσης λειτουργίας από 2.5V έως και 4.2V [31]. Η Ονομαστική της τάση ισούται με 3.635V [31]. Η κυλινδρική μπαταρία ACL9013 της εταιρίας Enix Energies είναι χημείας LiFePO<sub>4</sub> και εύρος τάσης λειτουργίας από 2.0V μέχρι  $3.65 \pm 0.05V$  [18]. Η Ονομαστική της τάση είναι 3.2V [18]. Όλες οι μπαταρίες χημείας NMC και LiFePO<sub>4</sub> παρουσιάζουν παρόμοιο εύρος λειτουργίας και παρόμοια ονομαστική τάση με της προαναφερόμενες.

### 2.5.2 Τάση της μπαταρίας σε συνάρτηση του SoC

Η τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας εξαρτάται από το πόσο φορτισμένη είναι η μπαταρία (SoC) και από την ένταση του ρεύματος που την διαρρέει. Το γεγονός πως η τάση εξαρτάται από το επίπεδο της φόρτισης (SoC) είναι πολύ σημαντικό καθώς μετρώντας την τάση της μπαταρίας μπορεί να προσδιοριστεί το επίπεδο φόρτισης. Συνήθως, οι μπαταρίες έχουν διαφορετική καμπύλη φόρτισης-εκφόρτισης όπου και το σχήμα τους εξαρτάται από την χημεία της μπαταρίας. Στο Σχήμα 2.8 και 2.9 φαίνεται η καμπύλη φόρτισης-εκφόρτισης για μία μπαταρία NMC και μία μπαταρία LiFePO<sub>4</sub>.



Σχήμα 2.8: Καμπύλη φόρτισης-εκφόρτισης μίας μπαταρίας NMC για διαφορετικές θερμοκρασίες αλλά και για ένα παλαιωμένο κελί. Εξήχθη από την αναφορά [50]



**Σχήμα 2.9:** Καμπύλη φόρτισης-εκφόρτισης μίας μπαταρίας LiFePO<sub>4</sub> για διαφορετικές θερμοκρασίες αλλά και για ένα παλαιωμένο κελί. Εξήχθη από την αναφορά [50]

Η καμπύλη OCV-SOC της μπαταρίας NMC διαφέρει αρκετά από αυτήν της LiFePO<sub>4</sub>. Διακρίνεται πως η τάση της μπαταρίας NMC είναι ανάλογη του επιπέδου φόρτισής της, ενώ όταν το SoC μειωθεί κάτω από 10%, τότε η τάση της μπαταρίας παρουσιάζει μεγάλη μείωση. Η τάση της μπαταρίας LiFePO<sub>4</sub> είναι σταθερή για SoC από 10% έως 90% ενώ υπάρχει μεγάλη και απότομη αύξηση της τάσης για SoC > 90%. Το ίδιο φαινόμενο συμβαίνει και για SoC < 10% όπου και εκεί παρατηρείται κατακόρυφη μείωση της τάσης. Η περιοχή από 10% έως 90% του SoC, όπου και η τάση παραμένει σχετικά σταθερή, ονομάζεται πλατώ (plateau).

### 2.5.3 Θερμοκρασία λειτουργίας

Συνήθως, οι μπαταρίες αποδίδουν το μέγιστο για μία συγκεκριμένη θερμοκρασία, την Συμβατική Θερμοκρασία. Η Συμβατική Θερμοκρασία είναι συνήθως μεταξύ 20°C και 25°C. Όσο η θερμοκρασία απομακρύνεται από αυτήν, οι επιδόσεις των μπαταριών μειώνονται. Πιο αναλυτικά, η συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας κατά την φόρτιση και εκφόρτιση μειώνεται, η εσωτερική αντίστασή της μεγαλώνει αλλά και η τάση στους ακροδέκτες ελαττώνεται. Παράλληλα, ένα σημαντικό πρόβλημα είναι ότι η ικανότητα φόρτισης σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι εξαιρετικά χαμηλή, ιδίως όταν η θερμοκρασία είναι κάτω από το μηδέν, ενώ παράλληλα η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μειώνεται αισθητά όσο η θερμοκρασία της μπαταρίας απομακρύνεται από την Συμβατική Θερμοκρασία [1].

Η πλειονότητα των εφαρμογών που χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς συσσωρευτές δεν περιλαμβάνει τρόπους με τους οποίους μπορεί να τηρηθεί η θερμοκρασία της μπαταρίας σε συγκεκριμένο εύρος. Για παράδειγμα, τα κινητά τηλέφωνα, οι φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές και τα ηλεκτρικά περνοφόρα δεν έχουν σύστημα που μπορούν να κρατούν την θερμοκρασία της μπαταρίας σταθερή, αλλά και ούτε τρόπο να αποβάλλουν την θερμική ενέργεια της μπαταρίας στο περιβάλλον. Ο περιορισμός αυτός εισάγει πολλές δυσκολίες κατά την χρήση, κυρίως στον υπολογισμό της υπολειπόμενης ενέργειας. Ωστόσο, σε πιο απαιτητικές εφαρμογές, όπως στα ηλεκτρικά οχήματα και στα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει η δυνατότητα να ψυχθεί αλλά και να θερμανθεί η μπαταρία, κρατώντας την σε θερμοκρασία που η ίδια είναι πιο αποδοτική χρησιμοποιώντας Συστήματα Διαχείρισης Θερμότητας.

### 2.5.4 Εσωτερική αντίσταση

Όπως εξηγήσαμε στο Κεφάλαιο 2.4.3, οι μπαταρίες έχουν εσωτερική αντίστασή η οποία προσθέτει διαφορά τάσης στους ακροδέκτες της μπαταρίας. Μικρή εσωτερική αντίσταση σημαίνει και μικρές θερμικές απώλειες στην μπαταρία το οποίο είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό για συμπαγείς μπαταρίες ή εκεί που η ψύξη των μπαταριών απαιτεί σημαντική ενέργεια

(π.χ. ηλεκτρικά οχήματα). Επίσης, σε εφαρμογές που δεν είναι δυνατή η ύπαρξη θερμικής διαχείρισης της μπαταρίας (δηλαδή, δεν υπάρχει σύστημα ψύξης ή και θέρμανσης), μπαταρίες με μεγάλη εσωτερική αντίσταση θερμαίνονται γρηγορότερα και φτάνουν γρηγορότερα στο ανώτατο όριο θερμοκρασίας που ορίζει ο κατασκευαστής. Σε αυτήν την περίπτωση, για να μην προκληθεί μόνιμη βλάβη της μπαταρίας, η μπαταρία θα πρέπει να ψυχθεί κάτι το οποίο σημαίνει μείωση των αποδόσεων της αλλά και προσθέτει βάρος και πολυπλοκότητα στο σύστημα μπαταριών.

Παράλληλα, η εσωτερική αντίσταση ορίζει την μέγιστη ένταση ρεύματος που μπορεί να αντληθεί από την μπαταρία, πριν η τάση στους ακροδέκτες της φτάσει στο κατώτατο όριο. Για παράδειγμα, η μπαταρία INR16850MJ1 της εταιρίας LG-CHEM, έχει εσωτερική αντίσταση, μετρημένη σε DC συνθήκες, ίση με 30 mΩ και μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα ίσο με 20 A. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.7, η τάση ανοιχτοκυκλώματος, αγνοώντας την διαφορά τάσης  $u_1$  και  $u_2$  είναι:

$$V_{OCV} - u_o - u_{batt} = 0 \quad (2.1)$$

όμως

$$u_o = i_{batt} \cdot R_o \quad (2.2)$$

Άρα

$$(2.1) \xrightarrow{(2.2)} V_{OCV} - i_{batt} \cdot R_o - u_{batt} = 0 \quad (2.3)$$

$$\Leftrightarrow V_{OCV} = i_{batt} \cdot R_o + u_{batt} \quad (2.4)$$

Με μέγιστη ένταση ρεύματος  $i_{batt} = 20 \text{ A}$ ,  $R_o = 30 \text{ m}\Omega$  η εσωτερική αντίσταση από το Datasheet του κατασκευαστή και  $u_{batt} = 2.5 \text{ V}$  το κατώτατο όριο τάσης της μπαταρίας

$$V_{OCV} = (20 \text{ A}) \cdot (30 \text{ m}\Omega) + 2.5 \text{ V} = 3.1 \text{ V}$$

Η τάση ανοιχτοκυκλώματος 3.1 V αντιστοιχεί με περίπου 8% SOC από το Σχήμα 2.8. Ο παραπάνω υπολογισμός σημαίνει πως η μέγιστη ένταση ρεύματος μπορεί να αντληθεί μόνο όταν η τάση ανοιχτοκυκλώματος είναι μεγαλύτερη από 3.1 V ή το επίπεδο φόρτισης είναι μεγαλύτερο από 8%, σε αντίθετη περίπτωση, η τάση της μπαταρίας θα πέσει κάτω από 2.5 V, όπου και απαγορεύεται.

Αν τώρα η εσωτερική αντίσταση ήταν μικρότερη, για παράδειγμα, 20, τότε από την εξίσωση (2.3) βρίσκεται ότι  $V_{OCV} = 2.9 \text{ V}$  το οποίο αντιστοιχεί με περίπου 3%. Σημαντικά μικρότερο συγκριτικά με όταν η εσωτερική αντίσταση είναι 30 mΩ

Ο παραπάνω περιορισμός που εισάγει η εσωτερική αντίσταση στην μέγιστη ένταση του ρεύματος ορίζει την συμπεριφορά της τελικής εφαρμογής όταν το επίπεδο φόρτισης μειώνεται. Για παράδειγμα, στα ηλεκτρικά οχήματα, όταν το επίπεδο φόρτισης φτάσει σε ένα κάτω όριο, η διαθέσιμη ισχύς ελαττώνεται για να μειωθεί και το μέγιστο ρεύμα που καλείται να αποδώσει η μπαταρία ώστε να μην ξεπεραστεί το κατώτατο όριο της τάσης της. Ανάλογο φαινόμενο υπάρχει και στους φορητούς υπολογιστές όπου και όταν το επίπεδο φόρτισης φτάσει σε ένα χαμηλό ποσοστό, τότε μειώνεται η φωτεινότητα της οθόνης ή/και ταχύτητα του επεξεργαστή για να ελαττωθεί και το ρεύμα που αντλείται από την μπαταρία.

Το αντίστροφο φαινόμενο συμβαίνει και κατά την διάρκεια της φόρτισης. Αν για παράδειγμα η τάση ανοιχτοκυκλώματος είναι 4.1 V, όπου και αντιστοιχεί περίπου στο  $SOC = 90\%$ , και η μπαταρία φορτίζεται με ένταση ρεύματος 10 A, τότε:

$$(2.3) \Leftrightarrow u_{batt} = V_{OCV} - i_{batt} \cdot R_o \quad (2.5)$$

με  $i_{batt} = -10\text{A}$  (αρνητικό καθώς έχει φορά προς τον θετικό πόλο της μπαταρίας),  $R_o = 30\text{m}\Omega$  και  $V_{OCV} = 4.1\text{V}$

$$(2.5) \Leftrightarrow u_{batt} = 4.1\text{V} - (-10\text{A}) \cdot (30\text{m}\Omega) \Leftrightarrow u_{batt} = 4.4\text{V} \quad (2.6)$$

όπου και σημαίνει ότι υπερέβη το άνω όριο τάσης της μπαταρίας  $4.2\text{V}$ , αλλά και η μπαταρία δεν φορτίστηκε πλήρως, καθώς η τάση ανοιχτοκυκλώματος είναι μικρότερη από  $4.2\text{V}$ .

Συνεπώς, τόσο κατά την φόρτιση όσο και κατά την εκφόρτιση, η τάση της μπαταρίας δεν θα πρέπει ποτέ να ξεπεράσει τα ανώτερα και κατώτερα όρια τάσης που θέτει ο κατασκευαστής.

### 2.5.5 Χωρητικότητα

Ίσως το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της μπαταρίας είναι η χωρητικότητά της. Η χωρητικότητα της μπαταρίας ορίζεται ως το φορτίου που μπορεί να αποδώσει όταν φορτιστεί πλήρως ( $SoC = 100\%$ ) και εκφορτιστεί μέχρις ότου  $SoC = 0\%$ . Συνήθως, οι κατασκευαστές μπαταριών ορίζουν έναν συγκεκριμένο τρόπο φόρτισης/εκφόρτισης αλλά και θερμοκρασία όπου και με αυτούς τους περιορισμούς μετράνε την συνολική χωρητικότητά της.

Για παράδειγμα, για την μπαταρία τύπου INR18650MJ1 της εταιρίας LG-CHEM, η προηγούμενη ορίζει την χωρητικότητα της μπαταρίας μετρημένη σύμφωνα με τον παρακάτω τρόπο [31]:

1. Φόρτιση της μπαταρίας στους  $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  με σταθερό ρεύμα και ίσο με  $0.5C$ . Όταν η τάση στα άκρα της μπαταρίας φτάσει τα  $4.2\text{V}$ , η ένταση του ρεύματος θα πρέπει να μειώνεται σταδιακά, ώστε η τάση να παραμένει σταθερή στα  $4.2\text{V}$ . Η φόρτιση θα πρέπει να σταματήσει όταν η ένταση του ρεύματος φόρτισης είναι ίση με  $50\text{mA}$ .
2. Πλήρης εκφόρτιση της μπαταρίας με σταθερό ρεύμα  $0.2C$  μέχρις ότου η τάση στα άκρα της μπαταρίας γίνει ίση με  $2.5\text{V}$ . Η εκφόρτιση θα πρέπει να γίνει στους  $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ . Η εκφόρτιση θα πρέπει να γίνει εντός μίας ώρας από την πλήρη φόρτιση.

Η Χωρητικότητα Φορτίου συμβολίζεται με το γράμμα  $Q$  και ορίζει το πόσο φορτίο μία μπαταρία μπορεί να αποδώσει στο εξωτερικό κύκλωμα. Ισχύει ότι  $Q = I \cdot t$ , όπου  $I$  είναι η ένταση του ρεύματος της μπαταρίας και  $t$  είναι το χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, αν μία μπαταρία είναι χαρακτηρισμένη ως  $3\text{Ah}$ , τότε  $Q = 3\text{Ah}$  το οποίο σημαίνει ότι δύναται να αντληθεί ρεύμα έντασης  $3\text{A}$  για μία ώρα (καθώς  $3\text{A} \cdot 1\text{h} = 3\text{Ah}$ ), ή ρεύμα έντασης  $1.5\text{A}$  για δύο ώρες (καθώς  $1.5\text{A} \cdot 2\text{h} = 3\text{Ah}$ ) ή  $6\text{A}$  για μισή ώρα (καθώς  $6\text{A} \cdot 0.5\text{h} = 3\text{Ah}$ ) κ.ο.κ.

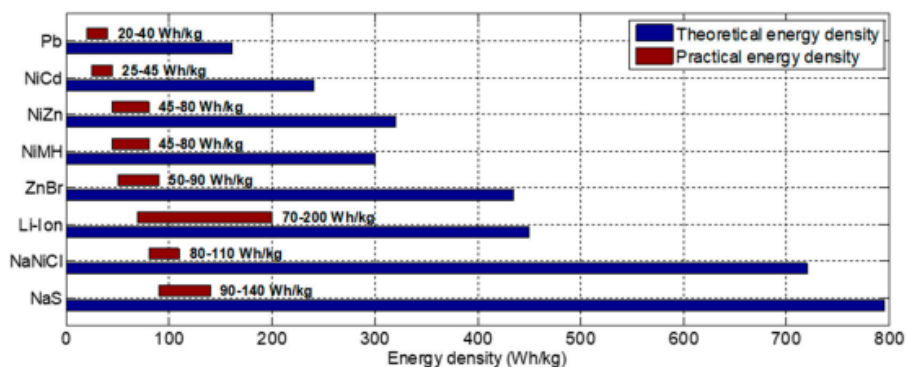
Ωστόσο, η Χωρητικότητα δεν είναι ο πιο σωστός τρόπος για να συγκριθούν 2 μπαταρίες μεταξύ τους όσον αφορά το πόση ενέργεια μπορούν να αποθηκεύσουν. Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα η ισχύς ορίζεται με το γινόμενο της τάσης επί το ρεύμα, ήτοι  $P = V \cdot I$  και η ενέργεια ως την ισχύς επί τον χρόνο, δηλαδή  $E = P \cdot t \Leftrightarrow E = V \cdot I \cdot t \Leftrightarrow E = V \cdot Q$ , συνεπώς, 2 μπαταρίες με ίδια Χωρητικότητα Φορτίου μπορεί να έχουν σημαντική διαφορά στην ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης καθώς η μία μπορεί να έχει μεγαλύτερη τάση στα άκρα της από την άλλη. Επομένως, ο πιο σωστός τρόπος σύγκρισης του ποσού της ενεργειακής αποθήκευσης είναι η Ενεργειακή Χωρητικότητα (Energy Capacity) με μονάδα μέτρηση τα  $\text{Wh}$ . Μια μπαταρία με Ενεργειακή Χωρητικότητα  $10\text{Wh}$  μπορεί να παραδώσει σε ένα εξωτερικό κύκλωμα ενέργεια  $10\text{W}$  για μία ώρα, ή  $5\text{W}$  για δύο ώρες ή  $20\text{W}$  για μισή ώρα κ.ο.κ.

### 2.5.6 Ειδική Ενέργεια

Ως Ειδική Ενέργεια ορίζεται την Ενεργειακή Χωρητικότητα ως προς την μάζα της μπαταρίας. Η μονάδα μέτρησή είναι η  $\frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ .

Σε εφαρμογές όπου η το βάρος είναι υψίστης σημασίας, όπως για παράδειγμα στην πολιτική και πολεμική αεροπορία, είναι πολύ σημαντικό να συγκριθούν δύο ηλεκτρικοί συσσωρευτές ως προς την ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύουν σε σύγκριση με το βάρος τους. Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται η σύγκριση των ειδικών βαρών για διαφορετικές χημείες μπαταριών.



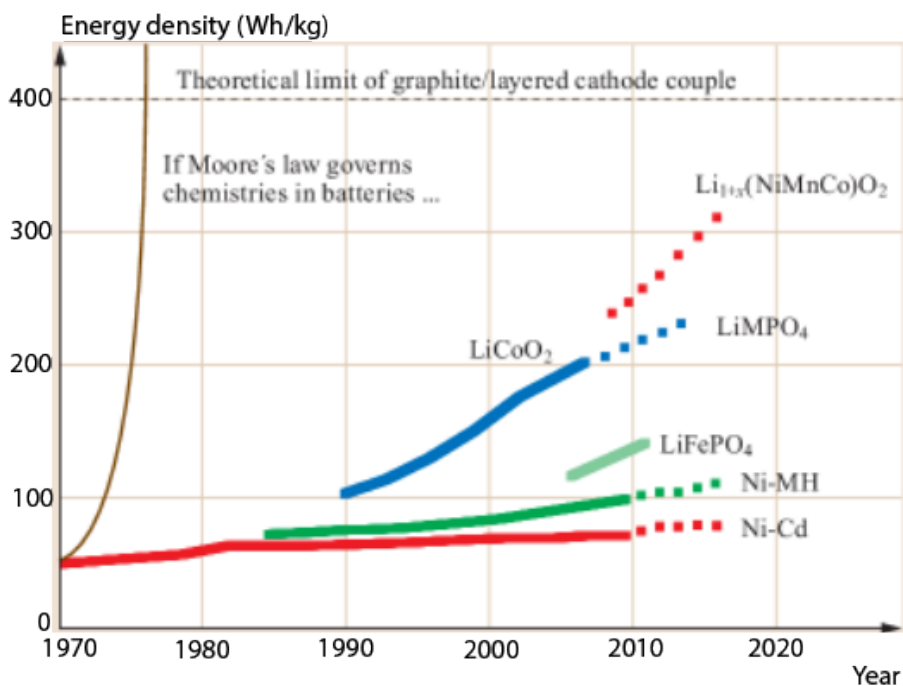


Σχήμα 2.10: Σύγκριση της Ειδικής Ενέργειας για διαφορετικές χημείες μπαταριών. Εξήχθη από την αναφορά [29]

### 2.5.7 Ενεργειακή Πυκνότητα

Ως Ενεργειακή Πυκνότητα ορίζεται το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται ανά κυβικό μέτρο όγκου. Η μονάδα μέτρησης είναι  $\frac{Wh}{m^3}$ .

Είναι ίσως ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των μπαταριών καθώς εκφράζει την αποθηκευμένη ενέργεια σε συνάρτηση του μεγέθους της μπαταρίας. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στις εφαρμογές όπου χρειάζονται μικρές και συμπαγείς μπαταρίες, όπως για παράδειγμα τα ηλεκτρικά οχήματα ή ηλεκτρικά περνοφόρα. Από το Σχήμα 2.11 διαπιστώνουμε πως υπάρχει αρκετά μεγάλη τεχνολογική πρόοδος η οποία έχει αυξήσει την Ενεργειακή Πυκνότητα των μπαταριών Li-ion.



Σχήμα 2.11: Σύγκριση της Ενεργειακής Πυκνότητας για διάφορες χημείες μπαταριών για διαφορετικές χημείες μπαταριών. Εξήχθη από την αναφορά [33]

### 2.5.8 Ειδική Ισχύς

Η Ειδική Ισχύς είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει η μπαταρία ανά χιλιόγραμμα μάζας. Η μονάδα μέτρησης είναι  $\frac{W}{kg}$ .

Η Ειδική Ισχύς ως χαρακτηριστικό είναι σημαντική όταν η μπαταρία θα πρέπει να παραδώσει

μεγάλη ισχύς ενώ η ίδια έχει μικρό βάρος.

### 2.5.9 Πυκνότητα Ισχύος

Η Πυκνότητα Ισχύς είναι η ποσότητα ισχύος που μπορεί μία μπαταρία να αποδώσει ανά κυβικό μέτρο όγκου. Η μονάδα μέτρησης είναι  $\frac{W}{m^3}$ .

Η Πυκνότητα Ισχύς είναι ιδιαίτερα σημαντική στα θερμικά οχήματα όπου και χρησιμοποιούν ηλεκτρικό συσσωρευτή για την υποστήριξη των ηλεκτρονικών τους συστημάτων.

#### 2.5.10 Κουλομπική Απόδοση

Αν μία μπαταρία φορτιστεί και εκφορτιστεί μετρώντας την χωρητικότητά της, τότε η χωρητικότητα της φόρτισης είναι πάντοτε μεγαλύτερη από την χωρητικότητα της εκφόρτισης. Η Κουλομπική Απόδοση ( $CE$ ) χρησιμοποιείται για να μετρηθεί αυτό το φαινόμενο και ορίζεται ως εξής:

$$CE = \frac{Q_{discharge}}{Q_{charge}} \quad (2.7)$$

όπου  $Q_{discharge}$  η χωρητικότητα του συσσωρευτή κατά την διάρκεια μίας πλήρης εκφόρτισης και  $Q_{charge}$  η χωρητικότητα του συσσωρευτή κατά την διάρκεια μίας πλήρης φόρτισης.

Η Κουλομπική Απόδοση είναι πάντα μικρότερη του 1 (αν το ρεύμα και η θερμοκρασία κατά την φόρτιση δεν αλλάζουν κατά την εκφόρτιση).

#### 2.5.11 Ρυθμός αυτοεκφόρτισης

Όταν οι μπαταρίες δεν χρησιμοποιούνται και βρίσκονται σε τάση ανοιχτοκυκλώματος, τότε, αυτοεκφορτίζονται μόνες τους χωρίς να υπάρχει εξωτερικό κύκλωμα. Η θερμοκρασία, το SOC αλλά και η υγείας της μπαταρίας είναι μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν τον Ρυθμό Αυτοεκφόρτισης.

#### 2.5.12 Απομείωση μπαταρίας & Κύκλοι Ζωής

Μία πλήρη φόρτιση που συνοδεύεται από μία πλήρη εκφόρτιση, ορίζεται ως ένας κύκλος φόρτισης-εκφόρτισης της μπαταρίας. Η μπαταρία έχει έναν ορισμένο αριθμό φορτίσεων και εκφορτίσεων που μπορεί να κάνει στην ζωή της. Ως Τέλος-Ζωής (End-of-life) μίας μπαταρίας ορίζεται η χρονική στιγμή όπου η διαθέσιμη χωρητικότητα ισούται με το 80% της αρχικής.

Η θερμοκρασία λειτουργίας, το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης είναι μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν τους συνολικούς κύκλους που μπορεί να πετύχει μία μπαταρία πριν η χωρητικότητά εκφόρτισης φτάσει στο τέλος ζωής της. Η μπαταρία INR18650MJ1 της εταιρίας LG-CHEM μπορεί να πραγματοποιήσει τουλάχιστον 400 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης αν φορτιστεί και εκφορτιστεί με τις συνθήκες που περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.5.5 [31].

## Κεφάλαιο 3

# Συστοιχίες Μπαταριών

### 3.1 Εισαγωγή

Οι ανάγκες που θα πρέπει να καλύψει μία μπαταρία διαφέρουν από εφαρμογή σε εφαρμογή. Ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο έχει διαφορετικές ανάγκες χωρητικότητας, μέγιστης έντασης ρεύματος και θερμοκρασίας από ότι ένα κινητό τηλέφωνο. Ένα μεσαίο ηλεκτρικό όχημα όπως το Nissan Leaf έχει μπαταρία χωρητικότητας 24 kWh [30] ενώ ένα μεγάλο ηλεκτρικό όχημα όπως το Tesla Model S έχει μπαταρία χωρητικότητας 84 kWh [42]. Η κατασκευή μίας τόσο μεγάλης μπαταρίας σε τόσο μεγάλη κλίμακα είναι δύσκολη και για αυτό οι μπαταρίες των αυτοκινήτων αποτελούνται από πολλές, πιο μικρές σε χωρητικότητα, μπαταρίες ενωμένες μεταξύ τους. Η κάθε μία από αυτές τις μπαταρίες ονομάζεται στοιχείο, και η συνολική μπαταρία ονομάζεται Συστοιχία Μπαταριών.

### 3.2 Συνδεσμολογία

Ενώνοντας πολλά διαφορετικά κελιά μεταξύ τους, οι μηχανικοί έχουν την ελευθερία να δημιουργήσουν μία Συστοιχία Μπαταριών που θα καλύπτει πλήρως όλες τις προδιαγραφές του συστήματος. Τέτοιες προδιαγραφές μπορεί να είναι η αποθηκευμένη ενέργεια, το εύρος τάσης της μπαταρίας και η μέγιστη ένταση ρεύματος.

#### 3.2.1 Τρόποι συνδεσμολογίας δύο κελιών

Οι μπαταρίες αποτελούνται από δύο ακροδέκτες και συνεπώς υπάρχουν μόνο δύο τρόποι συνδεσμολογίας μεταξύ τους, την σε σειρά και παράλληλη συνδεσμολογία. Στην σε σειρά συνδεσμολογία, ο θετικός πόλος της μίας μπαταρίας συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της επόμενης και οι δύο μη συνδεδεμένοι πόλοι του πρώτου και τελευταίου στοιχείου, γίνονται οι ακροδέκτες της συστοιχίας μπαταριών (περίπτωση (α) του Σχήματος 3.1). Στην παράλληλη συνδεσμολογία, οι θετικοί πόλοι και αρνητικοί πόλοι συνδέονται εκατέρωθεν μεταξύ τους και οι ίδιοι αποτελούν τον θετικό και αρνητικό πόλο (περίπτωση (β) του Σχήματος 3.1) της συστοιχίας μπαταριών.

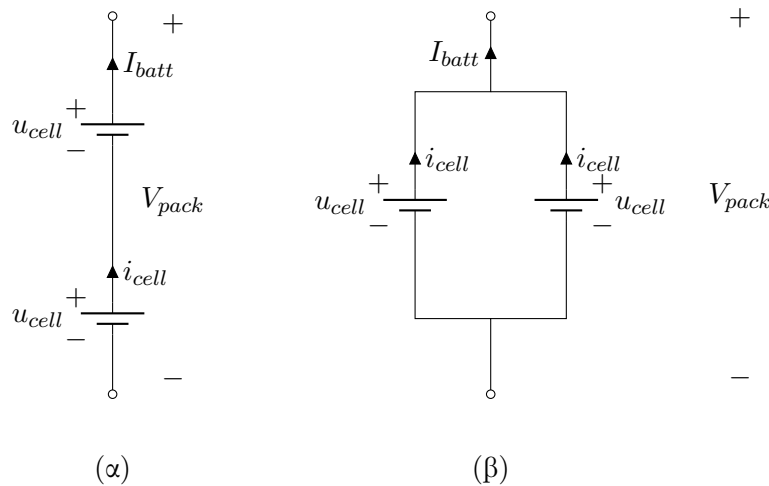
Στον Πίνακα 3.1 συγκρίνουμε ορισμένες μετρητικές των δύο αυτών τοπολογιών. Στην σε σειρά συνδεσμολογία, η συνολική τάση της μπαταρίας είναι η διπλάσια των στοιχείων, ενώ η χωρητικότητα σε Ah δεν μεταβάλλεται. Στην παράλληλη συνδεσμολογία, η συνολική τάση της μπαταρίας παραμένει σταθερή και ίση με την τάση των κελιών, ενώ η χωρητικότητα σε Ah διπλασιάζεται. Και στις δύο περιπτώσεις, η συνολική διαθέσιμη ενέργεια που αποθηκεύουν οι δύο τοπολογίες είναι η ίδια και ίση με το διπλάσιο της ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει ένα μόνο στοιχείο.

Η ισχύς που μπορεί να αποδώσει μία μπαταρία δίνεται από τον τύπο  $P = V_{batt} \cdot I_{batt}$  και εξαρτάται από την τάση  $V_{batt}$  στα άκρα της μπαταρίας και την ένταση του ρεύματος  $I_{batt}$ . Αυξάνοντας την τάση της μπαταρίας, η ένταση του ρεύματος μειώνεται, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχουν μικρότερες απώλειες στους αγωγούς, καθώς η ισχύς που χάνεται σε

αυτούς υπολογίζεται από τον τύπο  $P_{losses} = I_{batt}^2 \cdot R$ , όπου  $R$ , η αντίσταση των αγωγών. Το προηγούμενο φαινόμενο είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις εφαρμογές όπου η ενεργειακή απόδοση είναι σημαντική, όπως για παράδειγμα στα ηλεκτρικά οχήματα, όπου και οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν μπαταρίες με αρκετά υψηλή τάση όπου και κυμαίνεται από 400 V έως 800 V.

	(α)	(β)
$V_{batt}$	$2 \cdot u_{cell}$	$u_{cell}$
$i_{batt}$	$i_{cell}$	$2 \cdot i_{cell}$
Χωρητικότητα (Ah)	$C_{cell}$	$2 \cdot C_{cell}$
Αποθηκευμένη Ενέργεια (kWh)	Διπλάσια του ενός στοιχείου	Διπλάσια του ενός στοιχείου

**Πίνακας 3.1:** Σύγκριση σε σειρά και παράλληλη συνδεσμολογία.



**Σχήμα 3.1:** Τρόποι συνδεσμολογίας δύο στοιχείων μεταξύ τους: (α) σε σειρά συνδεσμολογία, (β) παράλληλη συνδεσμολογία.

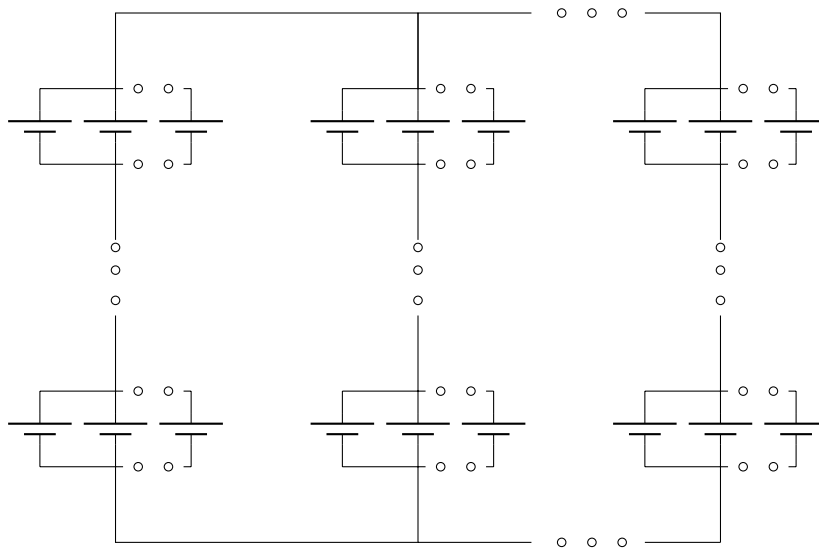
### 3.2.2 Τρόποι συνδεσμολογίας περισσότερων από δύο κελιών

Οι μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων δεν αποτελούνται από μόνο δύο στοιχεία ενωμένα μεταξύ τους, αλλά σε αρκετές δεκάδες ή και ίσως χιλιάδες. Η συστοιχία μπαταριών του Nissan Leaf 1gen αποτελείται από 192 στοιχεία ενωμένα μεταξύ τους [30]. Το Tesla Model S, αποτελείται από 7104 ξεχωριστά στοιχεία Ιόντων Λιθίου παρόμοια με το κελί INR18650-MJ1 της εταιρίας LG-CHEM που παρουσιάστηκε παραπάνω.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία πολλών στοιχείων μεταξύ τους, κάτι το οποίο θα δημιουργούσε μία συστοιχία μπαταριών.

### 3.2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Χρησιμοποιώντας πολλά στοιχεία μπαταριών και ενώνοντάς τα μεταξύ τους οι κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων, έχουν την επιλογή να χρησιμοποιήσουν κελιά τα οποία είναι ευρέως διαθέσιμα στο εμπόριο, έχουν σημαντικά χαμηλότερη τιμή λόγω της οικονομίας κλίμακας, μπορούν να αλλάζουν την τοπολογία της μπαταρίας (για παράδειγμα οι μπαταρίες των οχημάτων με αρχιτεκτονική 800 V φορτίζουν σε 400 V φορτιστές αλλάζοντας την εσωτερική



Σχήμα 3.2: Συνδεσμολογία Συστοιχίας Μπαταριών

καλωδίωση της μπαταρίας) αλλά και έχουν την δυνατότητα να επισκευάσουν την μπαταρία με πολύ μικρότερο κόστος αν ένα στοιχείο παρουσιάσει πρόβλημα.

Ωστόσο η χρήση πολλών μικρών στοιχείων παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα. Το ίσως μεγαλύτερο μειονέκτημά είναι ότι λόγω κατασκευαστικών ατελειών, οι μπαταρίες παρουσιάζουν απομείωση των χαρακτηριστικών τους με διαφορετικό ρυθμό ακόμα και αν έχουν υποστεί ακριβώς την ίδια χρήση. Ακόμα, αν ένα κελί μετατραπεί σε αντίσταση (γίνει resistive) ή παρουσιάσει εσωτερικό βραχυκύκλωμα, τότε εκτός από πιθανή αιτία πυρκαγιάς, τα υπόλοιπα παράλληλα κελιά που είναι συνδεδεμένα μεταξύ του θα το δούνε σαν εξωτερικό φορτίο και θα εξαντληθεί η χωρητικότητά τους, με αποτέλεσμα όλα τα παράλληλα κελιά να αχρηστευθούν.

### 3.3 Σύστημα Διαχείρισης Μπαταρίας

Το Σύστημα Διαχείρισης Μπαταρίας - ΣΔΜ (Battery Management System - BMS) είναι ένα σύστημα το οποίο υπάρχει σχεδόν σε κάθε συσκευή που έχει επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και είναι υπεύθυνο για την ασφάλεια, την υγεία της μπαταρίας αλλά και για τον υπολογισμό ορισμένων μετρητικών. Οι υλοποιήσεις τέτοιων συστημάτων μπορεί να είναι από πολύ απλές χρησιμοποιώντας λίγα εξαρτήματα (όπως για παράδειγμα στα κινητά τηλέφωνα) αλλά και εξαιρετικά πολύπλοκες όπως στα ηλεκτρικά οχήματα, όπου τέτοια συστήματα θα πρέπει να είναι ασφαλή, αποτελεσματικά και αξιόπιστα.

#### 3.3.1 Ευθύνες Συστημάτων Διαχείρισης Μπαταριών

##### Ασφάλεια

Η πρωταρχική ευθύνη και αρμοδιότητα ενός Συστήματος Διαχείρισης Μπαταριών είναι η *ασφάλεια*. Οι μπαταρίες μπορεί να γίνουν εξαιρετικά εύφλεκτες σε περίπτωση που ξεπεραστούν τα χαρακτηριστικά που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2.5. Για παράδειγμα, αν μία μπαταρία έχει εύρος τάσης λειτουργίας από 2.5 V έως 4.2 V, τότε αν η τάση ξεπεράσει αυτά τα όρια τότε υπάρχει υψηλός κίνδυνος καταστροφής της μπαταρίας αλλά και πυρκαγιάς. Σε τέτοια περίπτωση ένα Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών θα απομονώσει την μπαταρία και δεν θα επιτρέψει την τάση της υπερβεί τα όρια που έχει ορίσει ο κατασκευαστής. Ακόμα, το ΣΔΜ θέτει τα κριτήρια σφάλματος της μπαταρίας, ελέγχει τις τάσεις και την υγεία όλων των κελιών, ορίζει το ποσοστό φόρτισης-εκφόρτισης της μπαταρίας, ελέγχει το σύστημα για σφάλμα μόνωσης (στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα το ηλεκτρικό κύκλωμα της μονάδας κίνησης είναι ηλεκτρικά μονωμένο από τα υπόλοιπα ηλεκτρικά κυκλώματα), εποπτεύεται το κύκλωμα

μυδαλώσεως (interlock circuit, το κύκλωμα που ανιχνεύει την αποσύνδεση ενός ηλεκτρικού συνδέσμου) αλλά και σε περίπτωση σφάλματος θέτει το σύστημα σε κατάσταση ασφαλείας (safe mode ή αλλιώς limp mode).

### **Κατάσταση Μπαταρίας & Διάγνωση**

Το ΣΔΜ ελέγχει την τάση και την ένταση του ρεύματος της μπαταρίας αλλά και των κελιών που την αποτελούν. Συνδυάζοντάς τα προηγούμενα μαζί με δεδομένα από άλλους αισθητήρες (όπως για παράδειγμα, θερμοκρασίας), αλλά και ιστορικά δεδομένα, υπολογίζει την κατάσταση και την υγεία της μπαταρίας. Τέτοιοι υπολογισμοί είναι η Κατάσταση Φόρτισης (SoC), η Κατάσταση Υγείας (SoH), η υπολειπόμενη ενέργεια, ο χρόνος φόρτισης που απαιτείται, ο χρόνος μέχρι η μπαταρία να εκφορτιστεί πλήρως κ.ά. Παράλληλα, το Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών είναι υπεύθυνο να υπολογίζει και θα θέτει πιο αυστηρά κριτήρια λειτουργίας από αυτά που ορίζει ο κατασκευαστής. Για παράδειγμα, το ΣΔΜ επανυπολογίζει την μέγιστη ένταση ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης ανάλογα π.χ. με τις εξωτερικές συνθήκες.

### **3.3.2 Δομή ενός Συστήματος Διαχείρισης Μπαταριών**

Στο Σχήμα 3.4 παραθέτουμε την πιο συνηθισμένη δομή και τα υποσυστήματα ενός ΣΔΜ για μία απαιτητική εφαρμογή, όπως για παράδειγμα τα ηλεκτρικά οχήματα. Τα Συστήματα Διαχείρισης Μπαταριών σε πιο απλές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα τα κινητά τηλέφωνα, διαφέρουν αρκετά και είναι σημαντικά πιο απλά. Στο Σχήμα 3.4 παραθέτεται ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των BMS που είναι ο διαχωρισμός τους σε δύο μεγάλα υποκύκλωμα, το Κύριο Κύκλωμα (Master) και το Κύκλωμα Υπηρέτη (Slave). Το πρώτο, είναι υπεύθυνο για την συνολική διαχείριση του συστήματος και είναι αυτό που αντλεί δεδομένα και διαχειρίζεται τα άλλα υποκύκλωμα. Τα κυκλώματα Υπηρέτη είναι πολυάριθμα και ο αριθμός τους είναι ανάλογος των σε σειρά στοιχείων που υπάρχουν στη συστοιχία μπαταριών.

#### **Κύριο Κύκλωμα**

**HV BATT CONTACTORS** Οι Ηλεκτρομηχανικοί Επαφείς απομονώνουν την μπαταρία υψηλής τάσης από τα υπόλοιπα κυκλώματα όταν το όχημα βρίσκεται σταματημένο ή όταν υπάρξει κάποιο σφάλμα στην μπαταρία ή σε κάποιο άλλο υποκύκλωμα.

**ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ** Οι αισθητήρες τάσης και έντασης ρεύματος έχουν την δυνατότητα να μετρήσουν την συνολική τάση της μπαταρίας αλλά και την ένταση ρεύματός της.

**ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΦΟΡΤΙΣΗΣ** Όπως και αναφέρθηκε σε παραπάνω παράγραφο, όταν το ηλεκτρικό όχημα βρίσκεται σε ηρεμία, η μπαταρία είναι απομονωμένη από τα υπόλοιπα συστήματα και η Ηλεκτρομηχανικοί Επαφείς είναι ανοιχτοί. Όταν κάποιο σύστημα ζητήσει ρεύμα, για παράδειγμα το σύστημα κίνησης ζητήσει ρεύμα για να θέσει σε κίνηση το όχημα, τότε οι Ηλεκτρομηχανικοί Επαφείς θα πρέπει να κλείσουν ώστε να συνδέσουν την μπαταρία με αυτό. Ωστόσο, επειδή η τάση στο εξωτερικό κύκλωμα είναι μηδενική, το κλείσιμο των επαφών θα προκαλέσει τεράστια ένταση ρεύματος από την μπαταρία προς τα υπόλοιπα συστήματα, κάτι το οποίο προκαλεί με τον καιρό υποβάθμιση των χαρακτηριστικών της μπαταρίας, κίνδυνο φωτιάς αλλά και πρόβλημα στους Ηλεκτρομηχανικούς Επαφείς καθώς τα άκρα τους θα συγκολληθούν μεταξύ τους. Το Σύστημα Προφόρτισης, αυξάνει την τάση στο εξωτερικό κύκλωμα σταδιακά, ελέγχοντας την ένταση του ρεύματος. Όταν η τάση του εξωτερικού κυκλώματος γίνει ίση με την τάση της μπαταρίας, το Σύστημα Διαχείρισης Μπαταρίας δίνει εντολή να κλείσουν οι Ηλεκτρομηχανικοί Επαφείς. Θα πρέπει να σημειωθεί, πως σε ορισμένα οχήματα, το σύστημα προφόρτισης δεν αποτελεί μέρος του Συστήματος Διαχείρισης της Μπαταρίας, αλλά αποτελεί υποσύστημα του μετατροπέα συνεχούς/συνεχούς τάσης (DC/DC converter).

**PYROFUSE** Η Pyrofuse είναι ένα είδους ασφάλειας μίας χρήσης που περιέχει μία πυροτεχνική σύνθεση η οποία σε περίπτωση ανάφλεξης καταστρέφει την ασφάλεια και απομονώνει την μπαταρία από το υπόλοιπο ηλεκτρικό κύκλωμα. Η ανάφλεξη αυτής της ασφάλειας είναι ελεγχόμενη από το Σύστημα Διαχείρισης Μπαταρίας. Το ΣΔΜ, πυροδοτεί και καταστρέφει την ασφάλεια σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις όπως για παράδειγμα σε περίπτωση ατυχήματος ή σε περίπτωση βραχυκυκλώματος σε κάποιο εξωτερικό υποσύστημα.

**ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ/ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ** Ο Μετατροπέας Συνεχούς/Συνεχούς Ρεύματος μετατρέπει την τάση της μπαταρίας σε χαμηλότερη, ικανή να υποστηρίξει τα κυκλώματα ΣΔΜ. Όμως στα ηλεκτρικά οχήματα, η τάση αυτή, μπορεί να προέρχεται και από εξωτερικό μετατροπέα. Ωστόσο, σε περίπτωση αποσύνδεσης της Συστοιχίας Μπαταριών από το όχημα, το ΣΔΜ θα πρέπει να παραμένει σε λειτουργία, κάτι το οποίο προϋποθέτει την ύπαρξη χαμηλής τάσης. Συνεπώς, υπάρχει ανεξάρτητος Μετατροπέας Συνεχούς/Συνεχούς Ρεύματος ο οποίος τροφοδοτεί το ΣΔΜ σε κάθε περίπτωση.

**ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΟΝΩΣΗΣ** Τα ηλεκτρικά οχήματα περιλαμβάνουν δύο κύρια ηλεκτρικά κυκλώματα, το κύκλωμα χαμηλής τάσης και το κύκλωμα υψηλής τάσης. Τα δύο αυτά κυκλώματα είναι ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους κυρίως για την ασφάλεια του χρήστη αλλά και για δευτερεύοντες λόγους όπως για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Σε περίπτωση ύπαρξης κομμένου καλωδίου, διαρροής ψυκτικού υγρού, υπάρχει πιθανότητα τα δύο αυτά κυκλώματα να πάψουν να είναι ηλεκτρικά μονωμένα. Το Σύστημα Ελέγχου Μόνωσης, μετράει την αντίσταση μεταξύ του κυκλώματος χαμηλής τάσης και του κυκλώματος υψηλής τάσης όπου και παράγει σφάλμα αν η αντίσταση ξεπεράσει ορισμένα όρια.

**ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΑΝΔΑΛΩΣΗΣ** Το Σύστημα Μανδαλώσεως είναι ένα σύστημα που ελέγχει αν κάποιος από τους συνδέσμους καλωδίων του κυκλώματος υψηλής τάσης έχει αποσυνδεθεί. Το σύστημα αυτό υπάρχει για να προστατέψει τους χρήστες και το τεχνικό προσωπικό από επαφή με το κύκλωμα υψηλής τάσης σε περίπτωση που αφαιρεθεί ένας σύνδεσμος. Αν κάποιος σύνδεσμος αφαιρεθεί, το Σύστημα Μανδαλώσεως το ανιχνεύει και ανοίγει τους Ηλεκτρομηχανικούς Επαφείς για να απομονώσει την μπαταρία από το κύκλωμα υψηλής τάσης.

**ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ** Το υποσύστημα επικοινωνίας είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία του ΣΔΜ με τα υπόλοιπα υποσυστήματά του οχήματος. Συνήθη πρωτόκολλα επικοινωνίας είναι το CAN-BUS και το FLEXRAY.

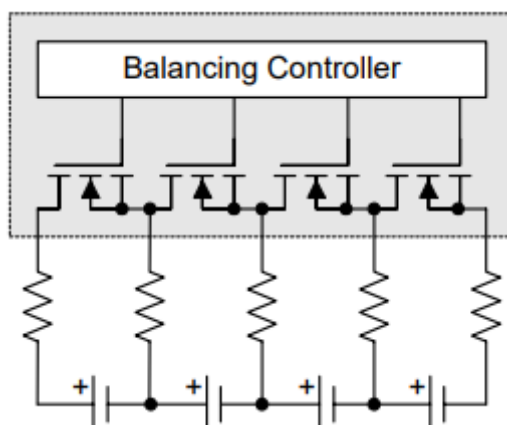
**ΜΟΝΩΜΕΝΗ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ** Τα Κυκλώματα Υπηρέτη τροφοδοτούνται από τα στοιχεία με τα οποία είναι συνδεδεμένα. Αυτό σημαίνει, πως κάθε Κύκλωμα Υπηρέτη θεωρεί ως τάση 0 V την τάση στον αρνητικό πόλο του χαμηλότερου σε σειρά στοιχείου. Αυτή η διαφορά στο επίπεδο αναφοράς μεταξύ του Κύριου Κυκλώματος και του Κύκλωμα Υπηρέτη, φέρνει την ανάγκη ύπαρξης συστήματος που θα μεταφράζει την επικοινωνία από το ένα επίπεδο αναφοράς (επίπεδο αναφοράς του Κύριου Κυκλώματος) στο άλλο (επίπεδο αναφοράς Κυκλώματος Υπηρέτη).

**ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ** Τα Συστήματα Διαχείρισης Μπαταριών είναι πολύπλοκα και ιδιαίτερα σημαντικά για την ασφάλεια των χρηστών αλλά της ίδιας της εφαρμογής. Όσο το σύστημα γερνάει, τόσο πιο πιθανό είναι να δημιουργηθεί κάποια ανωμαλία σε αυτό κάτι το οποίο θα μπορούσε να δημιουργήσει καταστάσεις που θέτουν σε κίνδυνο ζωές ανθρώπων, περιουσιών ή και του περιβάλλοντος. Για αυτόν τον λόγο, όλα τα Συστήματα Διαχείρισης Μπαταριών περιλαμβάνουν υποσυστήματα που εκτελούν διαγνωστικούς ελέγχους στο ίδιο το σύστημα ώστε σε περίπτωση ύπαρξης κάποιας ανωμαλίας, αυτό να ανιχνευτεί και ανάλογα με την επικινδυνότητά, το ΣΔΜ να προβεί στις κατάλληλες ενέργειες.

## Κύκλωμα Υπηρέτη

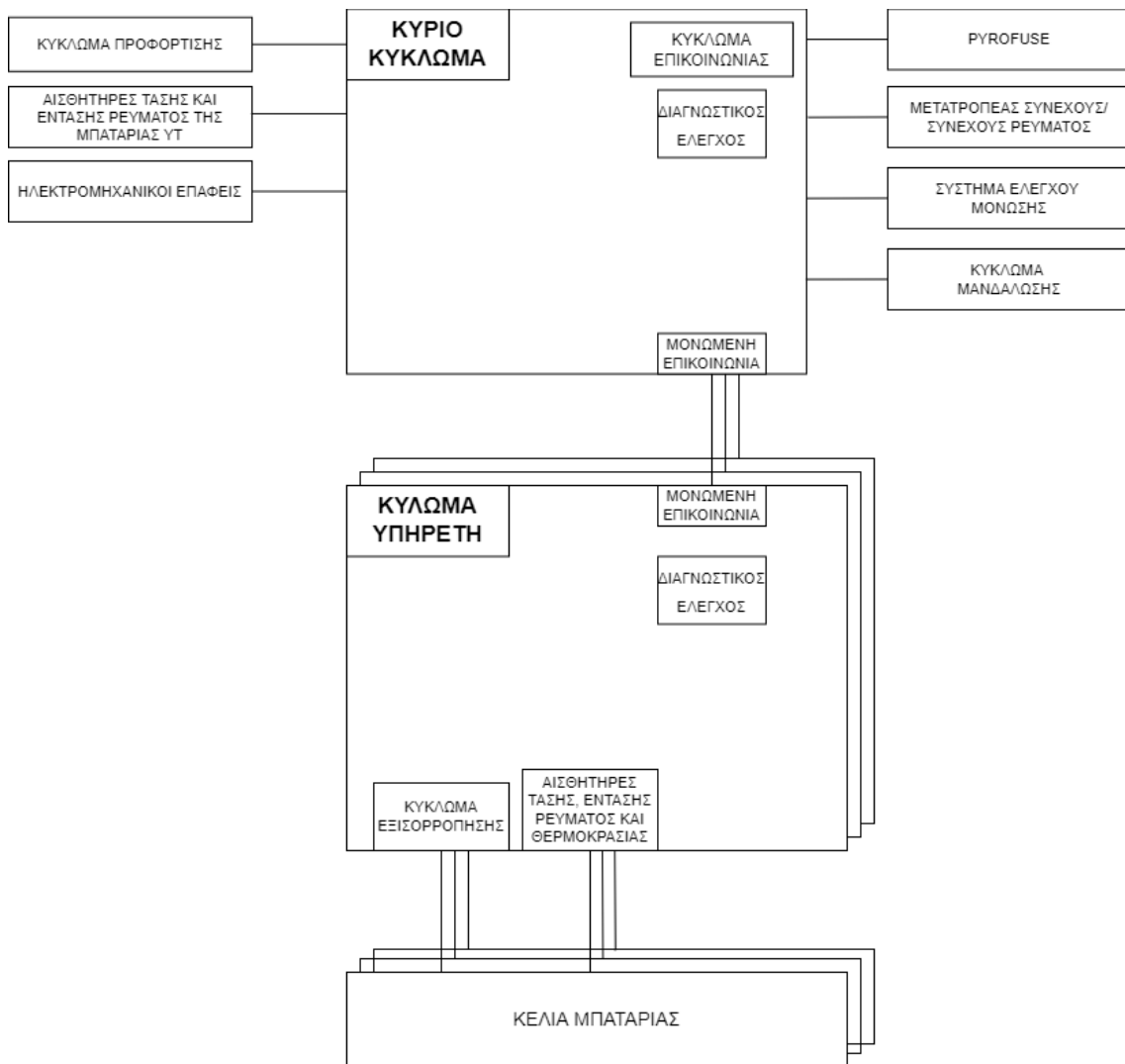
**ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΤΑΣΗΣ, ΕΝΤΑΣΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ** Τα Κυκλώματα Υπηρέτη περιλαμβάνουν αισθητήρες που μετράνε την τάση όλων των σε σειρά στοιχείων αλλά και την θερμοκρασία τους. Αυτά τα δεδομένα, μεταφέρονται στο Κυρίως Κύκλωμα και το ίδιο τα χρησιμοποιεί για να διαγνωστικούς σκοπούς.

**ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ** Στο Σχήμα 3.1 (α) περιγράφηκε ο τρόπος συνδεσμολογίας δύο στοιχείων σε σειρά. Σε αυτήν την συνδεσμολογία, το ρεύμα  $i_{cell}$  είναι το ίδιο για κάθε στοιχείο, συνεπώς, τα δύο αυτά στοιχεία αποφορτίζονται με τον ίδιο ρυθμό. Ατέλειες κατά την παραγωγική διαδικασία έχουν αποτέλεσμα την παραγωγή στοιχείων με διαφορετική χωρητικότητα το κάθε ένα, όπου και η διαφορά αυτή γίνεται εντονότερη όσο η μπαταρία γερνάει. Αν δύο στοιχεία με διαφορετική χωρητικότητα συνδεθούν σε σειρά, όπως στο Σχήμα 3.1 (α), τότε, κατά την εκφόρτιση, το στοιχείο με την χαμηλότερη χωρητικότητα θα παρουσιάζει μικρότερη τάση από τα άλλα στοιχεία. Το ίδιο συμβαίνει και κατά την φόρτιση, όπου και το στοιχείο με την χαμηλότερη χωρητικότητα θα φτάσει στο τέλος της φόρτισής του, πιο πριν από το άλλο στοιχείο. Η φόρτιση σε αυτό το σημείο θα σταματήσει, καθώς αν συνεχιστεί το στοιχείο θα ξεπεράσει το ανώτατο όριο τάσης που ορίζει ο κατασκευαστής. Αυτή η διαφορά τάσης, που μεταφράζεται και σε διαφορά διαθέσιμης χωρητικότητας στο κάθε στοιχείο, αν δεν διαχειριστεί με κάποιον τρόπο, θα αυξάνεται συνεχώς. Τα Κυκλώματα Υπηρέτη περιλαμβάνουν σύστημα Εξισορρόπησης Μπαταρίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Το κύκλωμα αυτό, με βάση τα δεδομένα από τις μετρήσεις της τάσης των κελιών, κλείνει τα τρανζίστορ και αποφορτίζει τα στοιχεία (μέσω της αντίστασης) που έχουν σημαντικά αυξημένη τάση σε σύγκριση με τα άλλα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται Εξισορρόπηση Μπαταρίας ή Battery Balancing και είναι ιδιαίτερα σημαντική για την μακροζωία της συστοιχίας.



Σχήμα 3.3: Δομή και υποσυστήματα ενός Συστήματος Διαχείρισης Μπαταριών.





Σχήμα 3.4: Δομή και υποσυστήματα ενός Συστήματος Διαχείρισης Μπαταριών.



## Κεφάλαιο 4

# Υφιστάμενη Έρευνα

### 4.1 Κατάσταση Φόρτισης (SoC)

#### 4.1.1 Εισαγωγή

Η Κατάσταση Φόρτισης ή State of Charge (SoC) της μπαταρίας είναι μία ένδειξη, υπολογισμένη από το Σύστημα Διαχείρισης Μπαταρίας, που αντικατοπτρίζει το πόσο φορτισμένη είναι η μπαταρία και συνεπώς, το πόση ενέργεια μπορεί δώσει μέχρις ότου εκφορτιστεί πλήρως. Όλα τα συστήματα που έχουν επαναφορτιζόμενες μπαταρίες διαθέτουν τρόπους υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης καθώς είναι μία ένδειξη που είναι πολύ χρήσιμη στον χρήστη.

Ο ακριβής υπολογισμός της Κατάστασης Φόρτισης είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε όλες σχεδόν τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν μπαταρίες. Μία ιατρική συσκευή που τροφοδοτείται από μπαταρία θα πρέπει να είναι σε θέση να υπολογίζει την Κατάσταση Φόρτισης της μπαταρίας σωστά, καθώς σε διαφορετική περίπτωση, μπορεί να αποβεί μοιραίο για τον ασθενή. Ένα ηλεκτρικό όχημα θα πρέπει και αυτό να ενημερώνει τον χρήστη σωστά και με μικρό σφάλμα όσον αφορά την υπολειπόμενη αυτονομία του ενώ τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που προ-πωλούν την ενέργεια που πρέπει να παραδώσουν στο μέλλον (Day-Ahead Market) θα πρέπει να είναι σε θέση να υπολογίζουν με ακρίβεια την κατάσταση φόρτισης καθώς αυτό θα έχει αρνητικό αντίκτυπο στην αξιοπιστία τους.

Ο υπολογισμός της Κατάστασης Φόρτισης είναι αρκετά σύνθετος. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν οι δυσκολίες που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν αλλά και τρόποι υπολογισμού που παρουσιάζονται στην διεθνή βιβλιογραφία.

#### 4.1.2 Ορισμός

Η Κατάσταση Φόρτισης ή αλλιώς SOC δηλώνει το πόσο φορτισμένη είναι η μπαταρία και κυμαίνεται από 0% έως και 100%. Αν μία μπαταρία έχει  $SOC = 0\%$ , τότε η μπαταρία θεωρείται τελείως εκφορτιστη και ότι δεν μπορεί να παραδώσει περισσότερη ενέργεια στο εξωτερικό κύκλωμα. Απεναντίας, αν μία μπαταρία έχει  $SOC = 100\%$ , τότε αυτή θεωρείται ότι είναι πλήρως φορτισμένη.

Μαθηματικά, το Επίπεδο Φόρτισης ορίζεται ως το υπολειπόμενο φορτίο που μπορεί να παραδώσει η μπαταρία, διαιρούμενο με το φορτίο που θα παραδίδει όταν είναι πλήρως φορτισμένη.

$$SOC = \frac{Q_{avail}}{Q_{dis}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

όπου  $Q_{avail}$  το φορτίο της μπαταρίας που μπορεί να παραδώσει την στιγμή του υπολογισμού και  $Q_{dis}$  το φορτίο της μπαταρίας που μπορεί να παραδώσει αν είναι πλήρως φορτισμένη.

#### 4.1.3 Τρόποι Υπολογισμού του SOC

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί τρόποι, μέθοδοι και μοντέλα εκτίμησης της Κατάστασης Φόρτισης μίας μπαταρίας. Στον Πίνακα 4.2 παραθέτονται μερικοί από αυτούς τους

τρόπους [11].

Κατηγορία Ένταξης	Μέθοδοι
Με απευθείας μετρήσεις	<ul style="list-style-type: none"><li>i Τάση Ανοιχτοκυκλώματος</li><li>ii Μέτρηση Εσωτερικής Αντίστασης</li><li>iii Ηλεκτροχημική Φασματοσκοπία Σύνθετης Αντίστασης</li></ul>
Με συνεχόμενες μετρήσεις	<ul style="list-style-type: none"><li>i Ολοκλήρωση ως προς το ρεύμα</li></ul>
Μηχανική Μάθηση	<ul style="list-style-type: none"><li>i Νευρωνικά Δίκτυα</li><li>ii Support Vector Machines</li><li>iii Deep Learning</li></ul>
Θεωρία Ελέγχου	<ul style="list-style-type: none"><li>i Φίλτρο Κάλμαν</li><li>ii Επεκτεταμένο Φίλτρο Κάλμαν</li><li>iii Διπλό Φίλτρο Κάλμαν</li></ul>

**Πίνακας 4.1:** Συνοπτική παρουσίαση μεθόδων υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης.

### Τάση Ανοιχτοκυκλώματος

Στο Κεφάλαιο 2.5.2 αναλύθηκε το πως η τάση ανοιχτοκυκλώματος στους ακροδέκτες της μπαταρίας εξαρτάται με την Κατάσταση Φόρτισης. Η συσχέτιση μεταξύ της τάσης ανοιχτοκυκλώματος και της Κατάστασης Φόρτισης μπορεί να γίνει είτε μέσω ενός lookup table (πίνακας που αποθηκεύει την τάση ανοιχτοκυκλώματος για κάθε Κατάσταση Φόρτισης) είτε και μαθηματικά μέσω της μεθόδου της Προσαρμογής Καμπύλης (για παράδειγμα την Πολυωνυμική Προσαρμογή). Συνήθως, σε εφαρμογές όπου υπάρχει μικρή υπολογιστική ισχύς χρησιμοποιείται η Γραμμική Προσαρμογή ακόμα και αν η ακρίβεια ελαττώνεται [5].

Το αρνητικό της παρούσας μεθόδου είναι το ότι η δειγματοληψία της τάσης ανοιχτοκυκλώματος θα πρέπει να γίνει αρκετή ώρα μετά από την στιγμή που χρησιμοποιήθηκε τελευταία φορά η μπαταρία. Πιο αναλυτικά, το Σχήμα 2.5 απεικονίζει το πως η τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος και διαπιστώθηκε πως ακόμα και αν η ένταση του ρεύματος είναι μηδέν, η τάση της μπαταρίας περνάει μία μεταβατική κατάσταση όπου και η τάση αλλάζει. Μετά από αρκετό χρονικό διάστημα, η τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας έχει εξισορροπηθεί και τότε η τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας ισούται με την τάση ανοιχτοκυκλώματος. Συνεπώς, αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί καθώς η μπαταρία χρησιμοποιείται αλλά μόνο όταν η μπαταρία βρίσκεται σε ηρεμία για μεγάλο χρονικό διάστημα όπου και τότε τα μεταβατικά φαινόμενα που προκαλούν μεταβολή της τάσης ανοιχτοκυκλώματος θα έχουν εξασθενήσει.

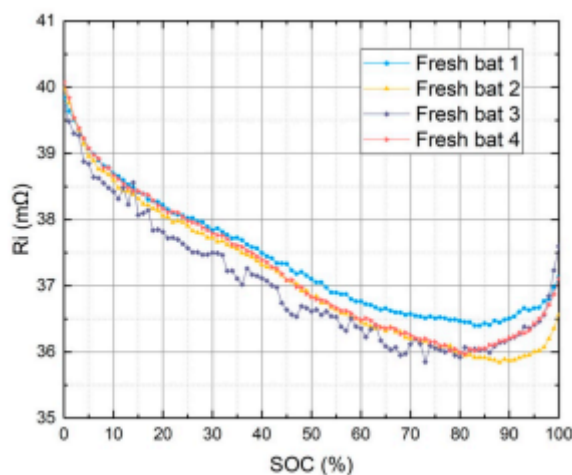
Ακόμη, ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου εύρεσης του Επιπέδου Φόρτισης με την τάση ανοιχτοκυκλώματος είναι ότι σε μερικές χημείες μπαταριών, η τάση ανοιχτοκυκλώματος παραμένει σχετικά σταθερή όσο αλλάζει το SOC. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι οι μπαταρίες χημείας  $\text{LiFePO}_4$  όπου και η τάση ανοιχτοκυκλώματος σε συνάρτηση με το SoC παρατέθηκαν στο Σχήμα 2.9. Για το εύρος Επιπέδου Φόρτισης από 15% έως 90% η τάση ανοιχτοκυκλώματος παραμένει σχετικά σταθερή κάτι το οποίο δυσκολεύει την αντιστοιχία της τάσης ανοιχτοκυκλώματος με το Επίπεδο Φόρτισης, ειδικά όταν οι μετρήσεις περιέχουν θόρυβο, ένα πολύ συχνό φαινόμενο στα ηλεκτρικά οχήματα. Σε χημείες μπαταριών που παρουσιάζεται αυτό το φαινόμενο, η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στα εύρη Επιπέδου Φόρτισης

όπου η τάση ανοιχτοκυκλώματος παρουσιάζει μεγάλο  $\frac{dV_{OCV}}{dSoC}$ , εκτός και αν ο θόρυβος και η ακρίβεια των μετρήσεων είναι ικανοποιητικές.

### Μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης

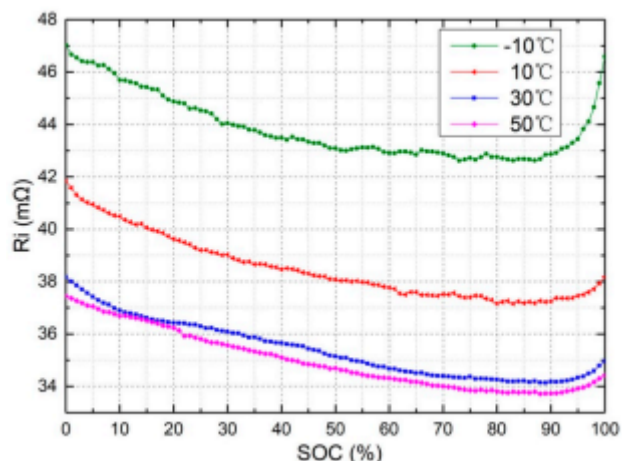
Η εσωτερική αντίσταση των μπαταριών ιόντου λιθίου εξαρτάται και από το ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας, συνεπώς αν η εσωτερική αντίσταση μπορεί να μετρηθεί από ένα Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών, τότε υπάρχει η δυνατότητα να εκτιμηθεί η Κατάσταση Φόρτισης της μπαταρίας. Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας μπορεί να μετρηθεί και όταν η ίδια βρίσκεται σε λειτουργία, κάτι το οποίο δεν είναι εφικτό με την μεθόδου της Τάσης Ανοιχτοκυκλώματος. Ένα ΣΔΜ για να υπολογίσει την εσωτερική αντίσταση, μετράει την διαφορά τάσης μεταξύ δύο χρονικών στιγμών δεδομένου του ότι αυτές τις δύο χρονικές στιγμές η ένταση του ρεύματος έχει αλλάξει κατά ένα σημαντικό βαθμό. Η διαφορά τάσης μεταξύ των δύο αυτών στιγμών οφείλεται στην εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας η οποία μπορεί και να προσδιοριστεί με τον νόμο του Ohm από το Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών. Ο τρόπος αντιστοίχισης της εσωτερικής αντίστασης με το επίπεδο φόρτισης γίνεται (όπως και με την Τάση Ανοιχτοκυκλώματος) πολύ εύκολα χρησιμοποιώντας πίνακα δεδομένων (lookup table) ή με την μέθοδο της Προσαρμογής Καμπύλης.

Ωστόσο, η μέθοδος αυτή κρύβει ορισμένα προβλήματα όπου κάνουν την χρήση της αρκετά δύσκολη για απαιτητικές εφαρμογές, όπως αυτές των ηλεκτρικών οχημάτων, όπου το επίπεδο φόρτισης θα πρέπει να καθορίζεται με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Αρχικά, η εσωτερική αντίσταση, λόγω ατελειών κατά την παραγωγή, διαφέρει από μπαταρία σε μπαταρία κάτι το οποίο αν δεν ληφθεί υπόψιν μπορεί να δημιουργήσει αρκετά μεγάλο σφάλμα στην υπολογισμένη Κατάσταση Φόρτισης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, η εσωτερική αντίσταση διαφέρει αρκετά μεταξύ των καινούριων κελιών και σε τέτοιον βαθμό που κάνει τον υπολογισμό του SoC αρκετά δύσκολο. Στο Σχήμα 4.2 παρατίθεται το πως μεταβάλλεται η εσωτερική αντίσταση σε συνάρτηση της θερμοκρασίας για ένα συγκεκριμένο κελί, ενώ το Σχήμα 4.3 δείχνει την μεταβολή της εσωτερικής αντίστασης για 5 διαφορετικά κελιά με διαφορετικούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης και συνεπώς διαφορετική υγεία.

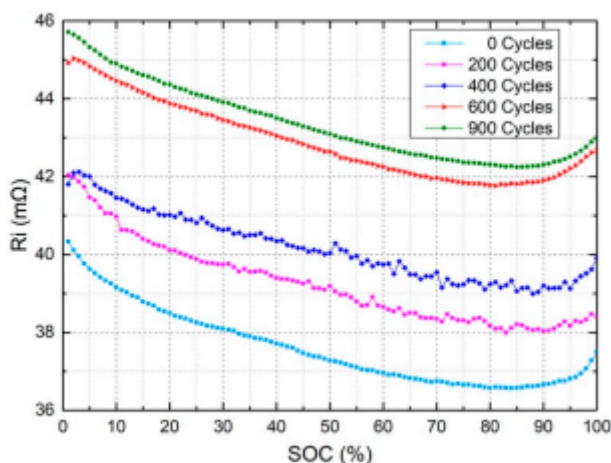


**Σχήμα 4.1:** Διάγραμμα Εσωτερικής αντίστασης  $R_o$  με το Επίπεδο Φόρτισης (SoC) για 4 διαφορετικές, καινούριες μπαταρίας ιόντων λιθίου. Εξήχθη από την αναφορά [47].

Γενικά, η μέθοδος της εσωτερικής αντίστασης για τον προσδιορισμό του Επιπέδου Φόρτισης



**Σχήμα 4.2:** Διάγραμμα Εσωτερικής αντίστασης  $R_o$  με το Επίπεδο Φόρτισης (SoC) για 4 διαφορετικές θερμοκρασίες. Εξήχθη από την αναφορά [47].



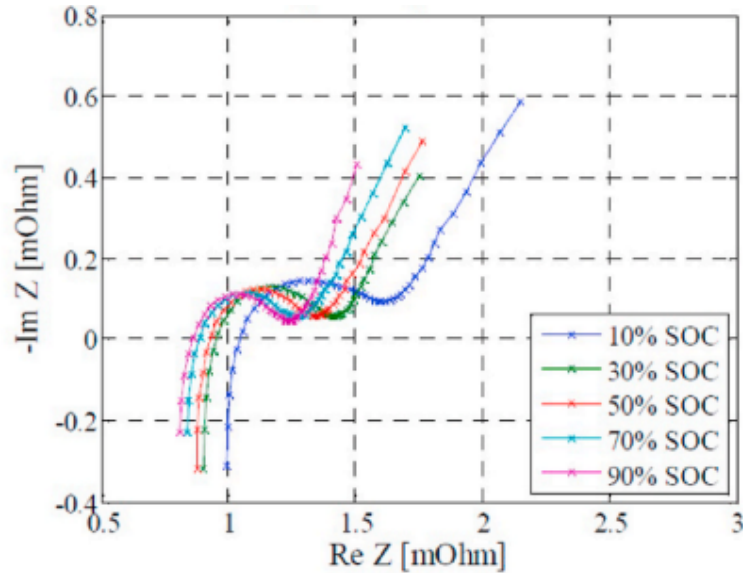
**Σχήμα 4.3:** Διάγραμμα Εσωτερικής αντίστασης  $R_o$  με το Επίπεδο Φόρτισης (SoC) για 5 διαφορετικά κελιά με διαφορετικούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης. Εξήχθη από την αναφορά [47].

είναι μία αρκετά απλή μέθοδος που απαιτεί λίγους υπολογιστικούς πόρους. Μία τέτοια μέθοδος μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμη για εφαρμογές όπου δεν έχουν μεγάλες απαιτήσεις ακρίβειας στον υπολογισμό του Επιπέδου Φόρτισης όπως για παράδειγμα ένα τηλεχειριστήριο. Το γεγονός ότι η εσωτερική αντίσταση επηρεάζεται κατά μεγάλο βαθμό από παραμέτρους όπως η υγεία της μπαταρίας και η θερμοκρασία, δυσκολεύει αρκετά τον υπολογισμό του Επιπέδου Φόρτισης σε πιο απαιτητικές εφαρμογές όπου απαιτούν μικρό σφάλμα, όπως είναι τα ηλεκτρικά οχήματα.

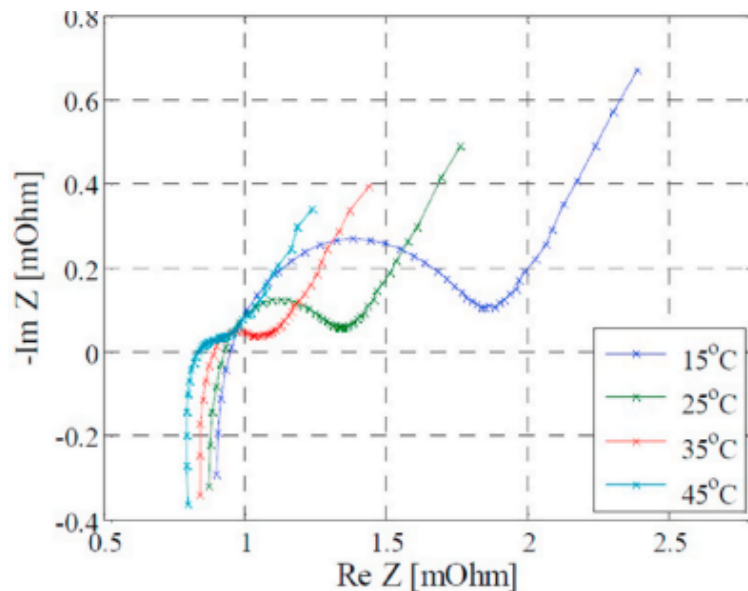
### Ηλεκτροχημική Φασματοσκοπία Σύνθετης Αντίστασης

Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάστηκε ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα για μία μπαταρία ιόντων λιθίου. Στο κύκλωμα αυτό, εκτός από την Εσωτερική Αντίσταση  $R_o$ , υπάρχουν και δύο παράλληλα  $RC$  κυκλώματα που παρουσιάζουν διαφορά τάσης  $u_1$  και  $u_2$  στους ακροδέκτες της μπαταρίας. Η μέθοδος της Εσωτερικής Αντίστασης για τον προσδιορισμό της Κατάστασης Φόρτισης μετράει μόνο την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας. Ωστόσο, τα δύο αυτά παράλληλα  $RC$  κυκλώματα μπορεί να δώσουν αρκετές πληροφορίες για την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας κάτι το οποίο η μέθοδος της Ηλεκτροχημική Φασματοσκοπία Σύνθετης Αντίστασης εκμεταλλεύεται.

Η παρούσα μέθοδος, προσδιορίζει την σύνθετη αντίσταση της μπαταρίας εφαρμόζοντας ένα ημιτονοειδές σήμα στους ακροδέκτες της μπαταρίας και μετρώντας την απόκρισή της. Η απόκριση αυτή εξαρτάται από την σύνθετη αντίσταση της μπαταρίας η οποία και προσδιορίζεται [2]. Στη συνέχεια, η μέθοδος αυτή αντιστοιχίζει την μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης με την Κατάσταση Φόρτισης χρησιμοποιώντας έναν πίνακα αναφοράς (lookup table) όπου και έχει κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας μία μπαταρία αναφοράς στο εργαστήριο.



Σχήμα 4.4: Εξάρτηση της σύνθετης αντίστασης μίας μπαταρίας με την Κατάσταση Φόρτισης. Εξήχθη από την αναφορά [34].



Σχήμα 4.5: Εξάρτηση της σύνθετης αντίστασης μίας μπαταρίας με την θερμοκρασία της. Εξήχθη από την αναφορά [34].

Η μέθοδος της Ηλεκτροχημική Φασματοσκοπίας μπορεί να προσδιορίσει την Κατάσταση Φόρτισης μίας μπαταρίας ιόντων λιθίου με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, ωστόσο, ο εξοπλισμός ο οποίος απαιτείται για τις μετρήσεις είναι αρκετά ακριβός αλλά και μεγάλος σε μέγεθος, ενώ οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που υπάρχουν στα ηλεκτρικά οχήματα δημιουργούν πρόβλημα

και θόρυβο στις μετρήσεις. Τα προηγούμενα, καθιστούν αυτήν την μέθοδο δύσκολη στην εφαρμογή. Η μέθοδος της Ηλεκτροχημικής Φασματοσκοπίας είναι ωστόσο ιδιαίτερα χρήσιμη για ερευνητικούς σκοπούς [52].

### Ολοκλήρωση ως προς το ρεύμα

Ο αλγόριθμος του Coulomb Counting είναι η πιο γνωστή και η πιο ευρέα χρησιμοποιούμενη μέθοδος υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης [19]. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει κάθε χρονική στιγμή το πόσο φορτίο έχει αφαιρεθεί από την μπαταρία και το διαιρεί με την συνολική χωρητικότητά της σύμφωνα με τον παρακάτω μαθηματικό τύπο.

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t I_{batt} dt \quad (4.2)$$

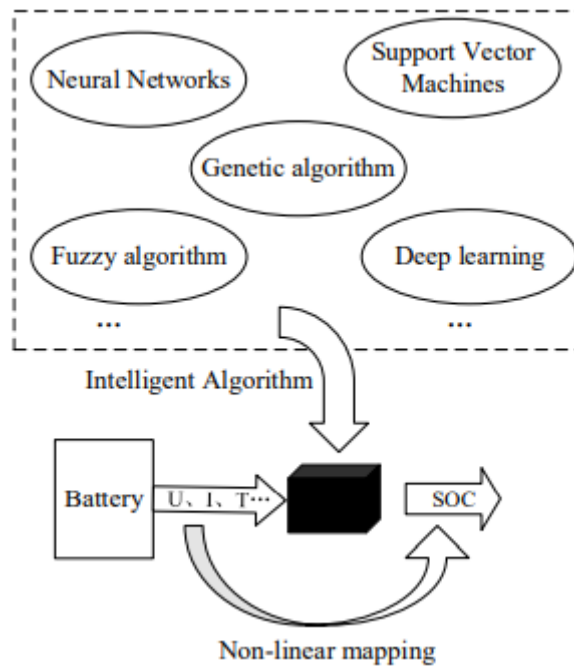
όπου  $SOC(t_0)$  είναι η αρχική μέτρηση της Κατάστασης Φόρτισης,  $C_n$  είναι η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας και  $I_{batt}$  είναι το ρεύμα της μπαταρίας. Πιο αναλυτικά, η τιμή  $SOC(t_0)$  είναι η Κατάσταση Φόρτισης πριν ρεύμα έντασης  $I_{batt}$  ρεύσει προς ή εκτός της μπαταρίας για χρονικό διάστημα  $t_0$  έως  $t$ .

Ιδανικά, ο παραπάνω τύπος υπολογίζεται στο Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών πολλές φορές το δευτερόλεπτο ή όσο συχνά το επιτρέπει η υπολογιστική ισχύς και η συχνότητα δειγματοληψίας του αισθητήρα έντασης ρεύματος. Τα σφάλματα της μαθηματικής στρογγυλοποίησης, των μετρήσεων της έντασης του ρεύματος αλλά και την μη συμπερίληψη της Κουλομπικής Απόδοσης δημιουργούν σφάλμα στον υπολογισμό της Κατάστασης Φόρτισης το οποίο συσσωρεύεται με την πάροδο του χρόνου. Οι Kiarash et al [37] βρίσκουν ότι για μία εκφόρτιση (διάρκειας 3.5 h) μίας μπαταρίας ιόντων λιθίου, το σφάλμα του αλγορίθμου Coulomb Counting είναι μόλις 1%, αν η μπαταρία φορτιστεί και εκφορτιστεί στις συνθήκες που ορίζει ο κατασκευαστής. Ωστόσο, οι Ng et al [39], σε έρευνά τους για ένα συγκεκριμένο κελί και ένα συγκεκριμένο Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών, διαπίστωσαν ότι το συσσωρευμένο σφάλμα στον αλγόριθμο Coulomb Counting ισούται με 2.43% στον 6<sup>ο</sup> κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης, ενώ στον 21<sup>ο</sup> κύκλο ισούται με 8.93%. Συνεπώς, ο αλγόριθμος Coulomb Counting είναι ένας εύκολος στην υλοποίηση αλγόριθμος, χωρίς να απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύς αλλά και ούτε ιδιαίτερο υλικό και αισθητήρες. Ωστόσο, ο ίδιος, δεν μπορεί να χρησιμοποιείται για μεγάλα χρονικά διαστήματα και θα πρέπει να συνδυαστεί με έναν άλλον πιο αξιόπιστο αλγόριθμο υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης ο οποίος και θα διορθώνει το σφάλμα που παράγει.

### Μηχανική Μάθηση

Αντί να λυθεί το πρόβλημα της εκτίμησης της Κατάστασης Φόρτισης με έναν ντετερμινιστικό αλγόριθμο, ο οποίος υποχρεώνει τους ερευνητές να έχουν μια βαθύτατη γνώση του τρόπου λειτουργίας και των χαρακτηριστικών της μπαταρίας (όπως για παράδειγμα του αλγορίθμου Coulomb Counting), υπάρχει η δυνατότητα να εκτιμηθεί η Κατάσταση Φόρτισης χρησιμοποιώντας μόνο δεδομένα από μετρήσεις, χρησιμοποιώντας αλγορίθμους της Μηχανικής Μάθησης. Σύμφωνα με τον Michie et al [36], ως Μηχανική Μάθηση "θεωρείται γενικά ό,τι περιλαμβάνει αυτόματες υπολογιστικές διαδικασίες που βασίζονται σε λογικές ή δυαδικές πράξεις, που μαθαίνουν μια εργασία από μια σειρά παραδειγμάτων". Έτσι, ο υπολογιστής, έχει την ικανότητα να μαθαίνει το πως να λύνει ένα πρόβλημα χρησιμοποιώντας μόνο δεδομένα. Συνήθως, τα μοντέλα της Μηχανικής Μάθησης, αντιμετωπίζουν το σύστημα ως ένα "μαύρο κουτί" [6] το οποίο έχει εισόδους και εξόδους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Στην παρούσα περίπτωση, το μαύρο κουτί, θεωρείται η μπαταρία και οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις οι οποίες γίνονται μέσα σε αυτή. Ως είσοδοι σε αυτό το σύστημα θεωρούνται τα δεδομένα από τα οποία ο υπολογιστής θα πρέπει να χρησιμοποιήσει ώστε να εκτιμήσει το αποτέλεσμα το οποίο είναι η Κατάσταση Φόρτισης. Η τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας, η ένταση του ρεύματος, η θερμοκρασία της κ.ά. είναι μερικά από τα δεδομένα τα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι σε έναν αλγόριθμο Μηχανικής Μάθησης.





**Σχήμα 4.6:** Εκτίμηση της Κατάστασης φόρτισης χρησιμοποιώντας αλγορίθμους που βασίζονται στο μοντέλο του Μαύρου Κουτιού. Εξήχθη από την αναφορά [52].

Οι αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης επιτρέπουν να μην χρειαστεί η λύση του προβλήματος ευθέως, ωστόσο, απαιτούν την ύπαρξη πολλών δεδομένων (ή αλλιώς "παραδειγμάτων") τα οποία και θα χρησιμοποιήσουν. Το μέγεθος των δεδομένων που απαιτούνται ορίζεται από το σφάλμα του υπολογισμού που θέλουμε να πετύχουμε αλλά και την πολυπλοκότητα του μοντέλου. Τα δεδομένα εισόδου τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση του αλγορίθμου θα πρέπει να αφορούν συνθήκες παρόμοιες με αυτές που θα κληθεί ο αλγόριθμος Μηχανικής Μάθησης να αντιμετωπίσει. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα τις περισσότερες φορές, καθώς οι πιο απαιτητικές εφαρμογές, όπως αυτές των ηλεκτρικών οχημάτων και των συστημάτων διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν να αναμεταδίδουν τις μετρήσεις τους στα εργαστήρια για την επανεκπαίδευση τέτοιων αλγορίθμων. Ωστόσο, η αρχική συλλογή τέτοιων δεδομένων είναι δύσκολη, απαιτεί πολύ χρόνο και δεν μπορεί εύκολα να λάβει χώρα σε εργαστηριακό περιβάλλον [52].

Συνοπτικά, οι αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης φαίνονται να είναι ιδανικοί για την εκτίμηση της Κατάστασης Φόρτισης καθώς δεν χρειάζεται να αναπτυχθεί ένας περίπλοκος αλγόριθμος ο οποίος θα λαμβάνει υπόψη του την πολυπλοκότητα των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που γίνονται στο εσωτερικό των μπαταριών. Ωστόσο, οι αλγόριθμοι Μηχανικής Μάθησης, εκτός από τον μεγάλο όγκο δεδομένων που χρειάζονται, απαιτούν και μεγάλη υπολογιστική ισχύς και διαθέσιμη μνήμη στο Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών.

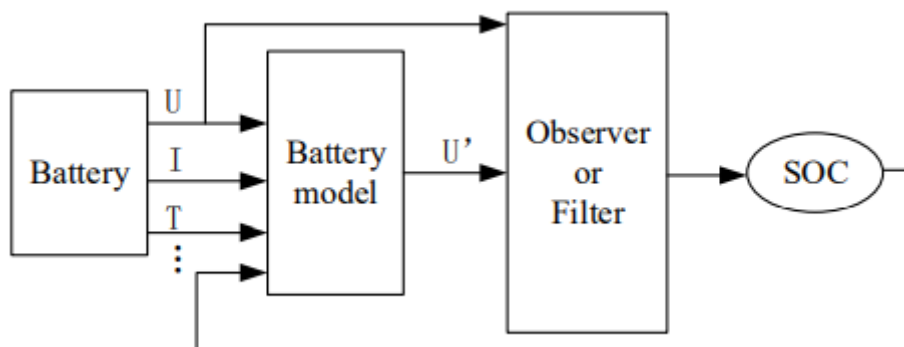
### Θεωρία Ελέγχου

Ο υπολογισμός της Κατάστασης Φόρτισης με χρήση των τεχνικών της Θεωρίας Ελέγχου χρησιμοποιεί δεδομένα όπως η τάση της μπαταρίας, η ένταση ρεύματος, η θερμοκρασία και η υπολογισμένη Κατάσταση Φόρτισης ως είσοδο σε ένα μοντέλο μπαταρίας (π.χ. το ισοδύναμο κύκλωμα που ορίστηκε στο Σχήμα 2.7). Η έξοδος αυτού του συστήματος είναι μια εκτίμηση για την τάση στα άκρα της μπαταρίας. Η πραγματική τάση στα άκρα της μπαταρίας μετρείται και υπολογίζεται το σφάλμα που το μοντέλο μπαταρίας έχει υπολογίσει. Το σφάλμα αυτό διοχετεύεται μέσω ενός φίλτρου και υπολογίζεται η τελική τιμή για την Κατάσταση Φόρτισης [52].

Ο σωστός υπολογισμός της Κατάστασης Φόρτισης εξαρτάται από την ακρίβεια του μοντέλου της μπαταρίας, καθώς το προηγούμενο παράγει την προβλεπόμενη τάση στα άκρα της μπαταρίας από την οποία εξαρτάται ο τελικός υπολογισμός της Κατάστασης Φόρτισης. Το μοντέλο της μπαταρίας είναι εξαιρετικά σύνθετο, καθώς θα πρέπει να μοντελοποιηθεί όλη η ηλεκτροχημική συμπεριφορά της μπαταρίας η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία φόρτισής της, την θερμοκρασία εκφόρτισης, την γήρανσή της κ.ο.κ.

Το φίλτρο της παραπάνω μεθόδου, μετατρέπει το σφάλμα μεταξύ της πραγματική τάσης στα άκρα της μπαταρίας και της τάσης που προέβλεψε το μοντέλο της μπαταρίας στην Κατάσταση Φόρτισης. Το πιο γνωστό φίλτρο που χρησιμοποιείται ευρέως είναι το Φίλτρο Κάλμαν (Kalman filter) ενώ το Επεκτεταμένο Φίλτρο Κάλμαν χρησιμοποιείται για το μη γραμμικό κομμάτι της μπαταρίας.

Η παραπάνω μέθοδος εξαρτάται πολύ από την μοντελοποίηση της μπαταρίας κάτι το οποίο δεν είναι εύκολο. Ακόμα, χρειάζεται μεγάλη υπολογιστική ισχύς για να υπολογιστεί η Κατάσταση Φόρτισης το οποίο είναι μεγάλο μειονέκτημα για ορισμένα Συστήματα Διαχείρισης Μπαταριών. Ωστόσο, αν χρησιμοποιηθεί ένα καλό φίλτρο, αυτή η μέθοδος υπολογισμού είναι αρκετά αξιόπιστη με πολύ μικρό σφάλμα [52].



**Σχήμα 4.7:** Δομή τρόπου υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης με τεχνικές της Θεωρίας Ελέγχου. Εξήχθη από την αναφορά [52].

### Συνοπτικός πίνακας σύγκρισης μεθόδων υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης

Στον Πίνακα 4.2 παραθέτονται συνοπτικά όλοι οι μέθοδοι υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης μαζί με τα προτερήματα και μειονεκτήματά τους.

**Πίνακας 4.2:** Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης. Δεδομένα από την αναφορά [11].

Κατηγορία Ένταξης	Μέθοδος	Προτερήματα	Μειονεκτήματα
Με απευθείας μετρήσεις	Τάση Ανοιχτοκυκλώματος	Εύκολος αλγόριθμος, δεν απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύς, πολύ μεγάλη ακρίβεια	Εφαρμόζεται μόνο όταν η μπαταρία βρίσκεται σε ηρεμία
	Μέτρηση της Εσωτερικής Αντίστασης	Εύκολη, μεγάλη ακρίβεια αν ληφθούν υπόψιν όλοι οι παράμετροι	Δύσκολο να υπολογιστεί σε ΣΔΜ, δυσκολία να ληφθούν υπόψιν όλοι οι παράμετροι που επηρεάζουν την εσωτερική αντίσταση
	Ηλεκτροχημική Φασματοσκοπία Σύνθετης Αντίστασης	Πολύ μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία	Απαιτεί ακριβό, πολύπλοκο και ογκώδες υλικό στο ΣΔΜ για να παρθούν οι μετρήσεις που απαιτούνται
Με συνεχόμενες μετρήσεις	Ολοκλήρωση ως προς το ρεύμα	Εύκολη υλοποίηση, αξιόπιστος αλγόριθμος, δεν χρειάζεται μεγάλη υπολογιστική ισχύς	Χρειάζεται καλή δειγματοληψία και μικρό σφάλμα στους αισθητήρες. Ο αλγόριθμος παράγει σφάλμα το οποίο και συσσωρεύεται
Μηχανική Μάθηση	Νευρωνικά Δίκτυα	Δεν απαιτείται μοντελοποίηση της μπαταρίας, δυνατότητα για διόρθωση του αλγορίθμου με πραγματικά δεδομένα, εκτίμηση της Κατάστασης Φόρτισης κάθε χρονική στιγμή	Χρειάζεται μεγάλος όγκος δεδομένων, η ακρίβεια εξαρτάται από το μέγεθος και την ποιότητα των δεδομένων, χρειάζεται πολύς χρόνος για να εκπαιδευτεί το μοντέλο. Απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύς στο ΣΔΜ
	Support Vector Machines	Μικρό σφάλμα στην εκτίμηση της Κατάστασης Φόρτισης	Απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύς στο ΣΔΜ. Το σφάλμα του υπολογισμού εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων και από τις παραμέτρους του αλγορίθμου (βάρος)
	Deep Learning	Αξιόπιστη μέθοδος με μικρό σφάλμα και ικανότητα επανεκπαίδευσης του αλγορίθμου στο πεδίο	Πολύπλοκη εκπαίδευση του μοντέλου και εύκολο ο αλγόριθμος να παγιδευτεί σε τοπικό ελάχιστο
Θεωρία Ελέγχου	Φίλτρο Κάλμαν	Μικρό σφάλμα υπολογισμού και πολύ αξιόπιστη. Εύκολη υλοποίηση αν υπάρχει μοντέλο μπαταρίας	Πολύ σημαντική η ποιότητα του μοντέλου. Δυσκολία στην μοντελοποίηση μπαταρίας καθώς η ίδια εξαρτάται από πολλούς παραμέτρους (πχ θερμοκρασία φόρτισης/εκφόρτισης, ένταση ρεύματος, γήρανση κ.α.), μεγάλη υπολογιστική ισχύς
	Επεκτεταμένο Φίλτρο Κάλμαν	Καλύτερη μέθοδος από το Απλό Φίλτρο Κάλμαν αν το μοντέλο μπαταρίας δεν είναι γραμμικό.	Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να παράγει πολύ μεγάλο σφάλμα και να έχει μικρή αξιοπιστία. Απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύς

## 4.2 Κατάσταση Υγείας (SoH)

### 4.2.1 Εισαγωγή

Οι μπαταρίες παρουσιάζουν απομείωση των δυνατοτήτων τους με την χρήση αλλά και με την πάροδο του χρόνου. Η χωρητικότητα της μπαταρίας, που είναι το πιο βασικό χαρακτηριστικό της, φθίνει όσο η μπαταρία χρησιμοποιείται. Συνήθως, ως τέλος ζωής των μπαταριών (End-of-life) ορίζεται η στιγμή που η διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας ισούται με το 80% της αρχικής [15]. Ωστόσο, δεν είναι μόνο η διαθέσιμη χωρητικότητα η οποία μεταβάλλεται όσο η μπαταρία γερνάει, αλλά και άλλα χαρακτηριστικά της μπαταρίας, όπως η εσωτερική αντίστασή της [26], τη τάση ανοιχτοκυκλώματος σε συνάρτηση της Κατάστασης Φόρτισης [26] αλλά και τη σύνθετη αντίσταση της μπαταρίας [35].

Οι αιτίες γήρανσης της μπαταρίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, την γήρανση που οφείλεται στην χρήση της μπαταρίας, δηλαδή στον αριθμό κύκλων φορτίσεων-εκφορτίσεων (Cycling Ageing) αλλά και τη γήρανση που οφείλεται στον χρόνο που περνάει από την στιγμή που η μπαταρία κατασκευάστηκε (Calendar Ageing) [7]. Για το Cycling Ageing, σημαντικός παράγοντας για την φθορά της μπαταρίας είναι η θερμοκρασία, η ένταση του ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης αλλά και το εύρος της Κατάστασης Φόρτισης στην οποία χρησιμοποιείται η μπαταρία (π.χ. εκφορτίσεις μόνο στο εύρος 20% - 80%) [7]. Για το Calendar Ageing, σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη γήρανση είναι η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται η μπαταρία [7]. Ο συνδυασμός των δύο αυτών αιτιών προκαλεί την συνολική γήρανση της μπαταρίας.

Ο υπολογισμός της Κατάστασης Υγείας της μπαταρίας (ώστε να προσδιοριστεί η μειωμένη χωρητικότητα του κελιού), είναι πολύ σημαντική για τον σωστό υπολογισμό της Κατάστασης Φόρτισης, καθώς η ίδια εξαρτάται από την συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας, όπως φαίνεται στην Σχέση 4.1. Συνεπώς, ακόμα και αν ο αλγόριθμος της Κατάστασης Φόρτισης είναι ακριβής αλλά η συνολική χωρητικότητα του κελιού περιέχει σφάλμα, τότε, το σφάλμα αυτό θα μεταδοθεί και στον τελικό υπολογισμό της Κατάστασης Φόρτισης. Διαπιστώνουμε λοιπόν, πως ο σωστός υπολογισμός της Κατάστασης Υγείας είναι τουλάχιστον όσο σημαντικός όσο και ο υπολογισμός της Κατάστασης Φόρτισης.

Ακόμα, η Κατάσταση Υγείας της μπαταρίας είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ασφάλεια και την αξιοπιστία των μπαταριών καθώς είναι μία παράμετρος που λαμβάνεται υπόψιν από το ΣΔΜ για τον επανυπολογισμό της μέγιστης διαθέσιμης ισχύς που η μπαταρία μπορεί να αποδώσει. Παράλληλα, η Κατάσταση Υγείας της μπαταρίας είναι ένας από τους παράγοντες που καθορίζουν την εγγύηση καλής λειτουργίας των μπαταριών που προσφέρουν οι κατασκευαστές, ενώ σαν ένδειξη μπορεί να χρησιμεύσει για την συντήρησή.

### 4.2.2 Ορισμός

Η Κατάσταση Υγείας ή αλλιώς SoH δηλώνει το πόσο η χωρητικότητα της μπαταρίας έχει μεταβληθεί σε σύγκριση με την αρχική χωρητικότητά της. Αν η μπαταρία έχει SoH = 100% τότε η ίδια θεωρείται πως η χωρητικότητά της είναι ίση με την αρχική, ενώ αν π.χ. SoH = 70% τότε η χωρητικότητά της είναι ίση με το 70% της αρχικής χωρητικότητας.

Μαθηματικά, η Κατάσταση Φόρτισης της μπαταρίας ορίζεται ως το φορτίο που μπορεί η μπαταρία να παραδώσει πλήρως φορτισμένη, διαιρούμενο με το ονομαστικό φορτίο που ορίζει ο κατασκευαστής.

$$SoH = \frac{Q_{dis}}{Q_{nom}} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

όπου  $Q_{dis}$  το φορτίο της μπαταρίας που μπορεί να παραδώσει αν είναι πλήρως φορτισμένη και  $Q_{nom}$  το ονομαστικό φορτίο εκφόρτισης που προσδιορίζει ο κατασκευαστής.

### 4.2.3 Τρόποι Υπολογισμού του SoH

Ο Πίνακας 4.3 παρουσιάζει συνοπτικά τις πιο γνωστές μεθόδους υπολογισμού της Κατάστασης Υγείας της μπαταρίας που παρουσιάζονται στην διεθνή βιβλιογραφία.

Παρατηρούμε πως πολλοί μέθοδοι που παρουσιάζονται παρακάτω, είναι οι ίδιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της Κατάστασης Φόρτισης της μπαταρίας. Αυτό συμβαίνει καθώς, στις παρακάτω μεθόδους, ο προσδιορισμός της Κατάστασης Φόρτισης εξαρτάται από την Κατάσταση Υγείας της μπαταρίας. Το προηγούμενο, μπορεί να αντιστραφεί, καθώς, γνωρίζοντας την Κατάσταση Φόρτισης, μία μέθοδος μπορεί να μας δώσει πληροφορία για την Κατάσταση Υγείας της μπαταρίας. Για παράδειγμα, για την Μέθοδο της Εσωτερικής Αντίστασης, η εσωτερική αντίσταση που μετριέται εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία, την Κατάσταση Φόρτισης και την Κατάσταση Υγείας. Συνεπώς, γνωρίζοντας δύο από τις προηγούμενες παραμέτρους υπάρχει δυνατότητα να εξαχθεί η τρίτη.

Κατηγορία Ένταξης	Μέθοδοι
Με απευθείας μετρήσεις	<ul style="list-style-type: none"> <li>i Τάση Ανοιχτοκυκλώματος σε συνάρτηση του SoC</li> <li>ii Μέτρηση Εσωτερικής Αντίστασης</li> <li>iii Ηλεκτροχημική Φασματοσκοπία Σύνθεσης Αντίστασης</li> </ul>
Με συνεχόμενες μετρήσεις	<ul style="list-style-type: none"> <li>i Ολοκλήρωση ως προς το ρεύμα</li> </ul>
Μηχανική Μάθηση	<ul style="list-style-type: none"> <li>i Νευρωνικά Δίκτυα</li> <li>ii Support Vector Machines</li> <li>iii Deep Learning</li> </ul>
Θεωρία Ελέγχου	<ul style="list-style-type: none"> <li>i Φίλτρο Κάλμαν</li> <li>ii Επεκτεταμένο Φίλτρο Κάλμαν</li> <li>iii Διπλό Φίλτρο Κάλμαν</li> </ul>

**Πίνακας 4.3:** Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης

Παρακάτω, αναλύονται συνοπτικά οι παραπάνω μέθοδοι και το πως χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της Κατάστασης Υγείας της μπαταρίας.

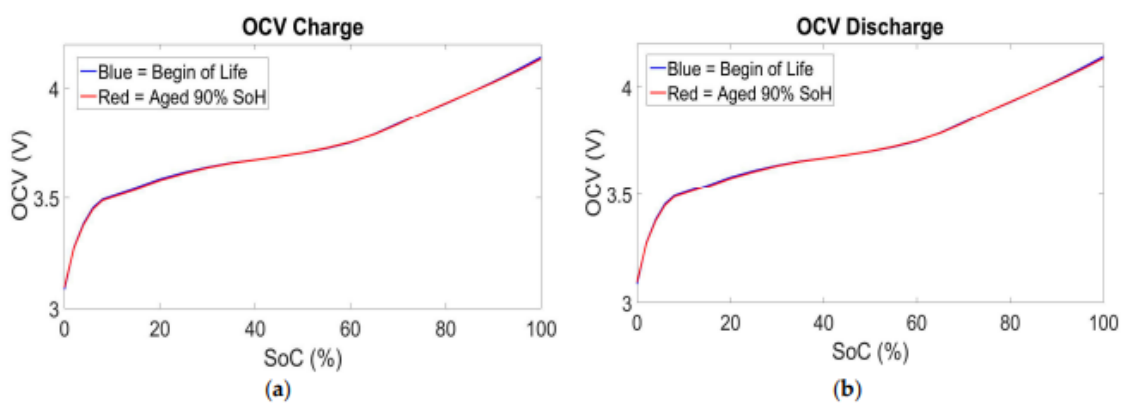
#### Τάση Ανοιχτοκυκλώματος

Η Τάση Ανοιχτοκυκλώματος της μπαταρίας σε συνάρτηση της Κατάστασης Φόρτισης μεταβάλλεται όσο η Κατάσταση Υγείας μειώνεται. Στο Σχήμα 4.8 φαίνονται δύο καμπύλες της Τάσης Ανοιχτοκυκλώματος σε συνάρτηση της Κατάστασης Φόρτισης για ένα καινούριο κελί και ένα γερασμένο. Η διαφορά τάσης  $\Delta V$  (mV) μεταξύ των δύο στοιχείων παρατίθεται στον Πίνακα 4.4. Η διαφορά τάσης είναι εντονότερη κατά την εκφόρτιση όπου και η μέγιστη διαφορά τάσης ισούται με 31.58 mV και εμφανίζεται όταν το Ποσοστό Φόρτισης ισούται με 30%. Η μικρότερη διαφορά τάσης ισούται με 9.49 mV και βρίσκεται στο  $SoC = 50\%$ .

Η διαφορά είναι αρκετά μικρή αλλά ικανή να προσδιοριστεί η Κατάσταση Υγείας μέσω αυτής. Για να μεγιστοποιηθεί η ακρίβεια, η μέτρηση της Τάσης Ανοιχτοκυκλώματος θα πρέπει να

γίνει στην Κατάσταση Φόρτισης όπου και παρουσιάζεται το μέγιστο  $\Delta V$ , δηλαδή για τις μπαταρίες του Σχήματος 4.8 όταν  $SoC = 30\%$ . Ο περιορισμός αυτός κάνει αρκετά δύσκολη την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, καθώς η εκφόρτιση του κελιού θα πρέπει να σταματήσει ακριβώς όταν  $SoC = 30\%$ , και μάλιστα, να υπάρξει ικανοποιητικός χρόνος ηρεμίας της μπαταρίας για να παρθεί η μέτρηση της Τάσης Ανοιχτοκυκλώματος.

Γενικά, αυτή η μέθοδος είναι εξαιρετικά απλή και είναι πολύ χρήσιμη σε εφαρμογές που δεν έχουν μεγάλες απαιτήσεις. Η χρήση της σε απαιτητικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα σε ηλεκτρικά οχήματα, είναι δύσκολη και δεν επιλέγεται, ιδίως εφόσον υπάρχουν μέθοδοι που είναι πιο αξιόπιστες και με μεγαλύτερη ακρίβεια.



**Σχήμα 4.8:** Τάση ανοιχτοκυκλώματος για μία καινούρια μπαταρία και μία γερασμένη μπαταρία: (α) κατά την φόρτιση και (β) κατά την εκφόρτιση. Εξήχθη από την αναφορά [40].

**Πίνακας 4.4:** Διαφορά της Τάσης Ανοιχτοκυκλώματος μεταξύ μίας καινούριας μπαταρίας και μίας γερασμένης μπαταρίας ( $SoH = 90\%$ ). Εξήχθη από την αναφορά [40].

Charge SoC (%)	Charge $\Delta V$ (mV)	Discharge SoC (%)	Discharge $\Delta V$ (mV)
0	10.00	100	10
2	2.97	98	13.91
4	5.88	96	13.88
6	6.62	94	14.83
8	4.93	92	15.79
10	4.98	90	16.63
15	5.82	85	16.59
20	5.80	80	17.59
25	5.22	75	21.15
30	2.55	70	31.58
35	1.57	65	18.13
40	0.49	60	12.93
45	0.24	55	10.94
50	0.71	50	9.49
55	1.89	45	9.51
60	2.2	40	10.96
65	1.45	35	14.02
70	3.62	30	13.74
75	0.1	25	11.92
80	1.73	20	12.41
85	0.22	15	11.83
90	3.07	10	11.61
92	3.99	8	13.25
94	5.00	6	16.78
96	6.77	4	17.35
98	7.48	2	13.48
100	8.00	0	10.00

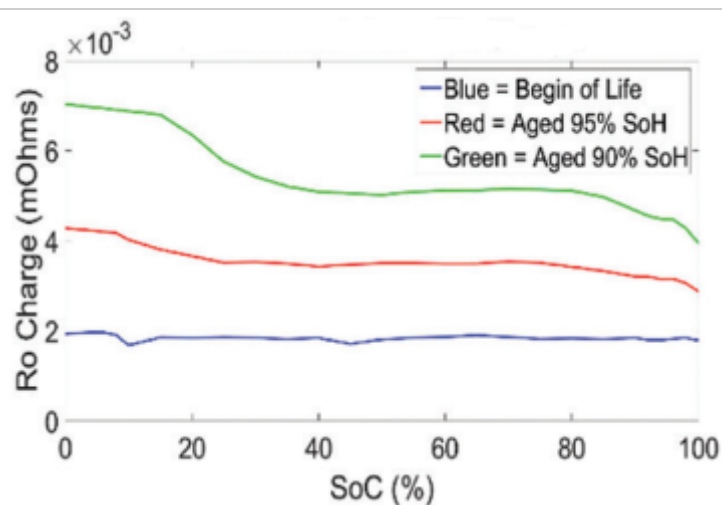
### Εσωτερική Αντίσταση

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3, η καμπύλη της εσωτερικής αντίστασης σε συνάρτηση της Κατάστασης Φόρτισης μεταβάλλεται όσο αυξάνονται οι κύκλοι φόρτισης και εκφόρτισης μίας μπαταρίας, ενώ στο Σχήμα 4.9 φαίνεται η μεταβολή της εσωτερικής αντίστασης σε συνάρτηση της Κατάστασης Φόρτισης για τρία διαφορετικά κελιά, όπου το πρώτο έχει  $SoH = 100\%$ , το δεύτερο έχει  $SoH = 95\%$  και το τρίτο έχει  $SoH = 90\%$ . Και στα δύο διαγράμματα παρατηρούμε πως η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας αυξάνεται όσο η Κατάσταση Υγείας της μπαταρίας ελαττώνεται.

Η μέθοδος αυτή μετράει την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας και χρησιμοποιεί δεδομένα όπως η Κατάσταση Φόρτισής της, την θερμοκρασία της, την ένταση ρεύματος όπου και η εσωτερική αντίσταση μετρήθηκε και εκτιμά την Κατάσταση Υγείας της μπαταρίας χρησιμοποιώντας διαγράμματα όπως το Σχήμα 4.9. Στο Σχήμα 4.9 διαπιστώνεται ότι η εσωτερική αντίσταση μίας συγκεκριμένης μπαταρίας υπερδιπλασιάζεται όταν το  $SoH$  ισούται  $95\%$ , αλλά και ότι υπερτριπλασιάζεται όταν το  $SoH$  είναι  $90\%$ . Η έντονη αύξηση της εσωτερικής αντίστασης κάνει πολύ εύκολη την εκτίμηση της Κατάστασης Υγείας, δεδομένου του ότι, υπάρχει η δυνατότητα να μετρηθεί σωστά και με μεγάλη ακρίβεια η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας από ένα ΣΔΜ.

Όπως και αναλύθηκε λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 4.1.3, η μέθοδος της Εσωτερικής Αντίστα-

σης, μπορεί να υλοποιηθεί σε ένα Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών χωρίς να χρειάζονται επιπλέον αισθητήρες πέρα από αυτούς που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3.3.2, ενώ απαιτεί και πολύ μικρή υπολογιστική ισχύς. Ωστόσο, ο θόρυβος στις μετρήσεις, η ακρίβεια και ο ρυθμός δειγματοληψίας των αισθητήρων θα πρέπει να προσδιοριστεί λεπτομερώς και να εξεταστεί το πώς επηρεάζουν την εκτίμηση του SoH.



**Σχήμα 4.9:** Εσωτερική αντίσταση σε συνάρτηση της Κατάστασης Φόρτισης για τρία διαφορετικά κελιά με διαφορετική Κατάσταση Υγείας το καθένα (100 %, 95 % και 90 %). Εξήχθη από την αναφορά [40].

### Ηλεκτροχημική Φασματοσκοπία Σύνθετης Αντίστασης

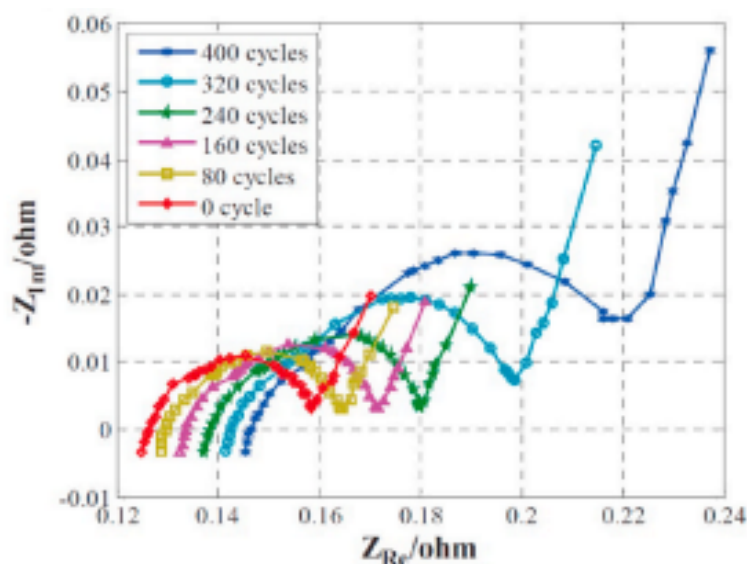
Η σύνθετη αντίσταση της μπαταρίας εξαρτάται από την Κατάσταση Υγείας της. Στο Σχήμα 4.10 παρατίθεται το Nyquist Plot της σύνθετης αντίστασης για ένα καινούριο στοιχείο αλλά και για μπαταρίες με διαφορετικούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης όπου και έχουν υποστεί γήρανση. Από το γράφημα αυτό, μπορεί να εκτιμηθεί η Κατάσταση Υγείας μίας μπαταρίας σε συνάρτηση της σύνθετης αντίστασής της.

Ωστόσο, η μέθοδος αυτή, όπως περιγράψαμε και στο Κεφάλαιο 4.1.3 απαιτεί ογκώδες και ακριβό υλικό και αισθητήρες για να παρθούν οι μετρήσεις που απαιτούνται. Η συμπερίληψη τέτοιων αισθητήρων στα Συστήματα Διαχείρισης Μπαταριών θα αυξήσει την πολυπλοκότητά τους αλλά και το κόστος κατασκευής, παράμετροι που σε τέτοια συστήματα λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν. Έτσι, η μέθοδος της Ηλεκτροχημικής Φασματοσκοπίας έχει κυρίως ερευνητική χρήση στο εργαστήριο, όπου, αν και περίπλοκη, έχει πολύ μεγάλη ακρίβεια στην εκτίμηση της Κατάστασης Υγείας μίας μπαταρίας [34].

### Ολοκλήρωση ως προς το ρεύμα

Οι κατασκευαστές μπαταριών μετράνε την χωρητικότητα των μπαταριών που κατασκευάζουν με μία συγκεκριμένη μέθοδο, όπως και αυτή που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2.5.5. Περιληπτικά, η μπαταρία φορτίζεται με σταθερή ένταση ρεύματος (Constant Current φόρτιση) μέχρις ότου η τάση στα άκρα της μπαταρίας φτάσει στο ανώτατο όριο τάσης που έχει θεσπίσει ο κατασκευαστής. Στη συνέχεια, η τάση στα άκρα της μπαταρίας παραμένει σταθερή (Constant Voltage φόρτιση) και η μπαταρία συνεχίζει να φορτίζεται. Η φόρτιση σταματάει όταν η ένταση ρεύματος γίνει ίση με 50 mA. Κατά την εκφόρτιση, η μπαταρία εκφορτίζεται με σταθερό ρεύμα έντασης 0.2 C, μέχρις ότου η τάση στα άκρα της φτάσει το κατώτατο όριο τάσης, ενώ παράλληλα, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Coulomb Counting για να μετρηθούν





**Σχήμα 4.10:** Nyquist Plot της σύνθετης αντίστασης για στοιχεία μπαταρίας με διαφορετικούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης. Εξήχθη από την αναφορά [34].

τα Ah που αντλήθηκαν από την μπαταρία. Ο τελικός υπολογισμός του αλγορίθμου Coulomb Counting είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας κατά την εκφόρτιση.

Αν η παραπάνω μέτρηση μπορεί να λάβει χώρα κατά την διάρκεια ζωής της μπαταρίας, τότε είναι δυνατή η μέτρηση της πραγματικής χωρητικότητας της μπαταρίας και συνεπώς ο προσδιορισμός της Κατάστασης Υγείας με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Ωστόσο, σε πολλές εφαρμογές, δεν είναι δυνατή η πλήρης εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα κάτι το οποίο κάνει την εφαρμογή της μεθόδου αυτής πολύ δύσκολη.

Γενικά, η παραπάνω μέθοδος είναι ο πιο ακριβής τρόπος υπολογισμού της Κατάστασης Υγείας της μπαταρίας, με το μειονέκτημα της απαίτησης της ολοκλήρωσης ενός κύκλου φόρτισης-εκφόρτισης. Χρησιμοποιείται ευρέως για ερευνητικούς σκοπούς στα εργαστήρια και στα Συστήματα Διαχείρισης Μπαταριών αν υπάρξει ποτέ φόρτιση και εκφόρτιση όπως περιγράφεται παραπάνω.

### Μηχανική Μάθηση

Στο Κεφάλαιο 4.1.3 αναλύθηκε το πως η χρήση της Μηχανικής Μάθησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμησή της Κατάστασης Φόρτισης. Η ίδια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό της Κατάστασης Υγείας της μπαταρίας χρησιμοποιώντας δεδομένα όπως η τάση της μπαταρίας, η θερμοκρασία και η Κατάσταση Φόρτισης. Οι αλγόριθμοι της Μηχανικής Μάθησης μπορούν να εκτιμήσουν την Κατάσταση Υγείας της μπαταρίας με μεγάλη ακρίβεια [46]. Ωστόσο, η μεγάλη υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για τον υπολογισμό της Κατάστασης Υγείας, η πολυπλοκότητα της μεθόδου, η δυσκολία εκπαίδευσης του αλγορίθμου και η ανάγκη ύπαρξης πολλών δεδομένων κάνουν την Μηχανικής Μάθησης δύσκολη στην εφαρμογή σε Συστήματα Διαχείρισης Μπαταριών.

### Θεωρία Ελέγχου

Μέθοδοι της Θεωρίας Ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της Κατάστασης Υγείας. Με μικρές απαιτήσεις σε αισθητήρες οι αλγόριθμοι αυτοί είναι ικανοί να εκτιμούν την Κατάσταση Υγείας σε πραγματικό χρόνο. Για τις μεθόδους αυτές υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον στην ερευνητική κοινότητα για την περαιτέρω ανάπτυξη και σχεδιασμό τέτοιων αλγορίθμων. Ωστόσο, όπως και για την εκτίμηση της Κατάστασης Φόρτισης, χρησιμοποιώντας μεθόδους της Θεωρίας Ελέγχου, θα πρέπει να υπάρχει ακριβές ισοδύναμο κύκλωμα μπαταρίας

και μεγάλη υπολογιστική ισχύς. Ωστόσο, η ακρίβεια αυτών των αλγορίθμων είναι αρκετά υψηλή κάτι το οποίο αντισταθμίζει τα αρνητικά της μεθόδου.

## Συνοπτικός πίνακας σύγκρισης μεθόδων υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης

Πίνακας 4.5: Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού της Κατάστασης Υγείας

Κατηγορία Ένταξης	Μέθοδος	Προτερήματα	Μειονεκτήματα
	Τάση Ανοιχτοκυκλώματος	Μικρή υπολογιστική ισχύς, εύκολη υλοποίηση	Πολύ μικρή ακρίβεια, δυσκολία υπολογισμού αληθινού SoC, απαίτηση για μεγάλο χρόνο ηρεμίας
Με απευθείας μετρήσεις	Μέτρηση της Εσωτερικής Αντίστασης	Εύκολη μέθοδος αν γίνει κατά την εκφόρτιση, δεν απαιτείται επιπρόσθετος εξοπλισμός	Απαιτείται μεγάλη ακρίβεια και μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας στους αισθητήρες.
	Ηλεκτροχημική Φασματοσκοπία Σύνθετης Αντίστασης	Πολύ μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία	Απαιτεί ακριβό, πολύπλοκο και ογκώδες υλικό στο ΣΔΜ για να παρθούν οι μετρήσεις που απαιτούνται
Με συνεχόμενες μετρήσεις	Ολοκλήρωση ως προς το ρεύμα	Ίδια μέθοδος με αυτήν που χρησιμοποιούν και οι κατασκευαστές. Εύκολη υλοποίηση, αξιόπιστος αλγόριθμος με πολύ μεγάλη ακρίβεια.	Πρέπει να γίνει πλήρη εκφόρτιση από $SoC = 100\%$ μέχρι και $SoC = 0\%$ με σταθερή ένταση ρεύματος.
Μηχανική Μάθηση	Νευρωνικά Δίκτυα Support Vector Machines Deep Learning		Βλ. Πίνακα 4.2
Θεωρία Ελέγχου	Φίλτρο Κάλμαν Επεκτεταμένο Φίλτρο Κάλμαν		Βλ. Πίνακα 4.2

## Κεφάλαιο 5

# Προτεινόμενη Μεθοδολογία

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η μέθοδος υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης (SoC) και της Κατάστασης Υγείας (SoH) που προτείνεται. Αρχικά, θα οριστούν οι απαιτήσεις των αλγορίθμων και στη συνέχεια θα οριστεί διαφορετικός αλγόριθμος ξεχωριστός για την Κατάσταση Φόρτισης και την Κατάσταση Υγείας. Έπειτα, θα αναγνωριστούν όλες οι πηγές σφάλματος των αλγορίθμων, όπου και για κάθε μία θα προτείνεται τρόπος επίλυσης. Τέλος, θα παρουσιαστεί διάγραμμα ροής το οποίο μπορεί να παρουσιάζει συνοπτικά όλη την λογική και την ροή των αλγορίθμων.

### 5.1 Απαιτήσεις Μεθόδων Υπολογισμού SoC & SoH

**Μεγάλη ακρίβεια υπολογισμού** Οι αλγόριθμοι της Κατάστασης Φόρτισης και της Κατάστασης Υγείας θα πρέπει να είναι σε θέση να υπολογίζουν το SoC και SoH με μεγάλη ακρίβεια. Για παράδειγμα, ο μη ακριβής υπολογισμός του SoC στα ηλεκτρικά οχήματα έχει επιπτώσεις στην προβλεπόμενη εμβέλεια του οχήματος που υπολογίζει το Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών. Αν η εμβέλεια είναι μικρότερη από την πραγματική, τότε υπάρχει χωρητικότητα η οποία μένει αναξιοποίησιμη και το όχημα χάνει την αξία του καθώς θεωρείται, λανθασμένα, πως έχει χωρητικότητα μικρότερη από την πραγματική. Απεναντίας, αν η εμβέλεια υπερεκτιμηθεί, υπάρχει κίνδυνος ο χρήστης να μην είναι σε θέση να φτάσει στον επόμενο σταθμό φόρτισης ενώ το Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών έχει προβλέψει ότι μπορεί (σύμφωνα με την υπολογισμένη εμβέλεια). Από την άλλη μεριά, ο μη σωστός υπολογισμός της Κατάστασης Υγείας δημιουργεί σφάλμα στον υπολογισμό της Κατάστασης Φόρτισης, μιας και για τον υπολογισμό της Κατάστασης Φόρτισης απαιτείται η γνώση της πλήρους χωρητικότητας εκφόρτισης της μπαταρίας. Η υποεκτίμηση της Κατάστασης Υγείας της μπαταρίας μπορεί να αποβεί εξαιρετικά κοστοβόρα για τον κατασκευαστή μπαταριών, μιας και είναι μία παράμετρος που λαμβάνεται υπόψιν στην εγγύηση καλής λειτουργίας. Τέλος, η Κατάσταση Υγείας, χρησιμοποιείται και για σκοπούς συντήρησης και ασφάλειας του οχήματος ή του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας κάτι το οποίο κάνει ακόμα πιο σημαντικό τον σωστό υπολογισμό της.

**Μικρές απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύς και μνήμης** Τα Συστήματα Διαχείρισης Μπαταριών και ειδικά αυτά που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα, θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο οικονομικά στην παραγωγή γίνεται και συνεπώς δεν δικαιολογείται η χρήση μικροελεγκτών με πολλούς υπολογιστικούς πόρους. Η χρήση τεχνικών της θεωρίας ελέγχου, δηλαδή την μοντελοποίηση της μπαταρίας και στη συνέχεια την χρήση Φίλτρου Κάλμαν ή Επεκτεταμένο Φίλτρο Κάλμαν ή η χρήση της Μηχανικής Μάθησης μπορεί εν μέρη να έχει μεγάλη ακρίβεια στην εκτίμηση αλλά αυτοί οι μέθοδοι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε χαμηλού κόστους συστήματα, όπως στα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα [44]. Τέτοιοι μέθοδοι, για να εκτιμήσουν την Κατάσταση Φόρτισης και Κατάσταση Υγείας σε πραγματικό χρόνο, χρειάζονται επεξεργαστή με ταχύτητα ρολογιού τουλάχιστον 3 GHz και με 4 έως και 8 πυρήνες. Στα ηλεκτρικά οχήματα, οι επεξεργαστές του Συστήματος Διαχείρισης Μπαταριών κυμαίνονται από 80 έως 100 MHz με 1 ή 2 πυρήνες, συνεπώς δεν είναι

ικανοί να χρησιμοποιήσουν τέτοιες μεθόδους για τον υπολογισμό του SoC και SoH [45].

**Μικρή Πολυπλοκότητα** Η Κατάσταση Φόρτισης και Κατάσταση Υγείας είναι μερικοί παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της επικινδυνότητας μίας μπαταρίας [51][12]. Τέτοιοι αλγόριθμοι είναι μέρος της Εκτίμησης Ρίσκου και Επικινδυνότητας που πραγματοποιούν οι κατασκευαστές και για αυτόν τον λόγο οι αλγόριθμοι αυτοί θα πρέπει να έχουν μικρή πολυπλοκότητα, να είναι εύκολα υλοποιήσιμοι αλλά και να μπορούν να επαληθευτούν εύκολα σε συνθήκες εργαστηρίου. Επίσης, η συμπεριφορά τους δεν θα πρέπει να εξαρτάται πολύ από τα δεδομένα, όπως γίνεται στους τρόπους της Μηχανικής Μάθησης, καθώς, η επανεκπαίδευση του μοντέλου μπορεί να σημαίνει και υποχρέωση επαλήθευσης του αλγορίθμου από την αρχή.

**Ανάγκη για επιπλέον υλικό** Οι αλγόριθμοι που επιλέγονται θα πρέπει να είναι σε θέση να εκτιμούν την Κατάσταση Φόρτισης και την Κατάσταση Υγείας μίας μπαταρίας χρησιμοποιώντας δεδομένα μόνο από τους αισθητήρες που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3.3.2. Η απαίτηση για επιπλέον αισθητήρες αυξάνει την πολυπλοκότητα του Συστήματος Διαχείρισης Μπαταριών αλλά και το κόστος του.

## 5.2 Κατάσταση Φόρτισης - SoC

Μία μέθοδος όπου πληροί όλες τις απαιτήσεις που προσδιορίζονται στο Κεφάλαιο 5.1, είναι η Ολοκλήρωση ως προς το ρεύμα ή αλλιώς Coulomb Counting. Υπενθυμίζεται πως ο αλγόριθμος Coulomb Counting, μετράει συνολικά κατά την χρήση της μπαταρίας το πόσο ρεύμα αντλήθηκε από αυτήν και το διαιρεί με την ονομαστική χωρητικότητά της. Ο τύπος του αλγορίθμου είναι ο παρακάτω:

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t I_{batt} dt \quad (5.1)$$

Η μέθοδος αυτή, όπως και περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 4.1.3, έχει μεγάλη ακρίβεια, είναι εύκολη στην υλοποίηση και δεν απαιτεί πολλούς υπολογιστικούς πόρους. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναλυθούν λεπτομερώς οι όροι της Εξίσωσης 5.1 και θα εξεταστεί το σφάλμα που εισάγει ο κάθε όρος. Εφόσον προσδιοριστούν οι πηγές σφάλματος, θα προταθούν μέθοδοι αντιμετώπισης για κάθε μία.

### Σφάλμα υπολογισμών & μετρήσεων

Ο αλγόριθμος Coulomb Counting χρησιμοποιεί δεδομένα από αισθητήρες (έντασης ρεύματος) αλλά και χρονόμετρα (ενσωματωμένα στους μικροελεγκτές) για να υπολογίσει την νέα Κατάσταση Φόρτισης. Τα δεδομένα αυτά ενδέχεται να περιέχουν θόρυβο, μικρή ακρίβεια στις μετρήσεις αλλά και μικρή δειγματοληψία. Επίσης, ο αλγόριθμος Coulomb Counting περιέχει μαθηματικές πράξεις οι οποίες κατά τον υπολογισμό τους στους μικροελεγκτές, μπορεί να υποστούν διάφορες στρογγυλοποιήσεις. Οι αλγόριθμοι όπως ο Coulomb Counting, όπου πολλές φορές το δευτερόλεπτο παρακολουθούν αισθητήρες και επανυπολογίζουν μετρητικές (book-keeping μέθοδοι) είναι περισσότερο ευαίσθητοι στα σφάλματα υπολογισμών και μετρήσεων σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, όπως για παράδειγμα την μέθοδο προσδιορισμού της Κατάστασης Φόρτισης με την χρήση της Τάσης Ανοιχτοκυκλώματος.

### Εξάρτηση από την προηγούμενη ή αρχική μέτρηση

Ο όρος  $SOC(t_0)$  στην Εξίσωση 5.1 αναφέρεται στον προηγούμενο υπολογισμό του SoC. Αν η προηγούμενη μέτρηση περιέχει σφάλμα, τότε αυτό το σφάλμα θα διοχετευτεί επ' άπειρον στον αλγόριθμο και συνεπώς στους νέους υπολογισμούς της Κατάστασης Φόρτισης. Η πιο

συχνή πηγή σφάλματος του αλγορίθμου, είναι η αρχική μέτρηση της Κατάστασης Φόρτισης την οποία και ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί για τους επόμενους υπολογισμούς.

### Χωρητικότητα μπαταρίας

Ο όρος  $C_n$  στην Εξίσωση 5.1 ισούται με την χωρητικότητα της μπαταρίας αν ήταν πλήρως φορτισμένη. Στον αλγόριθμο του Coulomb Counting, ο όρος αυτός αντιστοιχεί στην ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας που ορίζει ο κατασκευαστής με συγκεκριμένο τρόπο. Ωστόσο, η χωρητικότητα της μπαταρίας εξαρτάται από τις εξής παραμέτρους:

- Θερμοκρασία φόρτισης
- Θερμοκρασία εκφόρτισης
- Διαφορά θερμοκρασίας φόρτισης-εκφόρτισης
- Κουλομπική Απόδοση
- Κατάσταση Υγείας της μπαταρίας
- Ρεύμα φόρτισης - εκφόρτισης
- Αυτοεκφόρτιση

Από τα παραπάνω, διαπιστώνουμε ότι η χωρητικότητα που μπορεί να παραδώσει μια μπαταρία μέχρι η ίδια να θεωρηθεί πλήρως εκφορτισμένη (δηλαδή μέχρι η τάση ανοιχτοκυκλώματος να γίνει ίση με το κατώτατο όριο που ορίζει ο κατασκευαστής), εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπου και κανέναν από αυτούς δεν λαμβάνει υπόψιν του ο αλγόριθμος Coulomb Counting. Η μη συμπερίληψη αυτού του φαινομένου, δημιουργεί μεγάλο σφάλμα στον υπολογισμό της Κατάστασης Φόρτισης. Παρακάτω, παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν την χωρητικότητα της μπαταρίας.

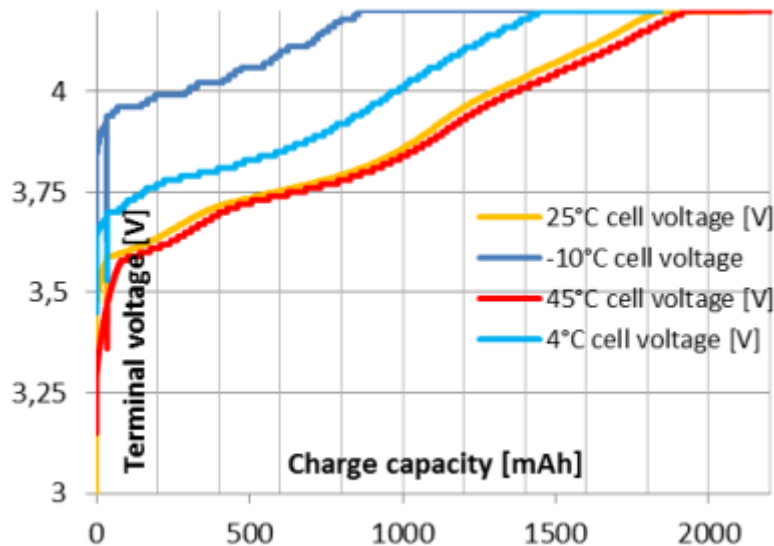
**Θερμοκρασία Φόρτισης** Μία μπαταρία έχει την ικανότητα να αποθηκεύσει την ονομαστική της χωρητικότητα μόνο στην θερμοκρασία που ορίζει ο κατασκευαστής. Όπως βλέπουμε στο Σχήμα 5.1, η χωρητικότητα φόρτισης της μπαταρίας μειώνεται όσο η θερμοκρασία μειώνεται. Για παράδειγμα, αν η μπαταρία φορτιστεί στους 4 °C, η χωρητικότητα κατά την φόρτιση ανέρχεται σε περίπου 1.82 A, ενώ η ίδια μπαταρία αν φορτιστεί στους 25 °C η χωρητικότητα φόρτισης ανέρχεται περίπου στα 2.2 A.

Η παραπάνω διαφορά στην χωρητικότητα δεν λαμβάνεται υπόψιν από τον αλγόριθμο του Coulomb Counting και μπορεί να έχει μεγάλη επίπτωση στην ακρίβειά του. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζεται ένα σενάριο φόρτισης μίας μπαταρίας όπου και η εκτίμηση του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting είναι λανθασμένη.

**Πίνακας 5.1:** Σενάριο λανθασμένης εκτίμησης SoC του αλγορίθμου Coulomb Counting

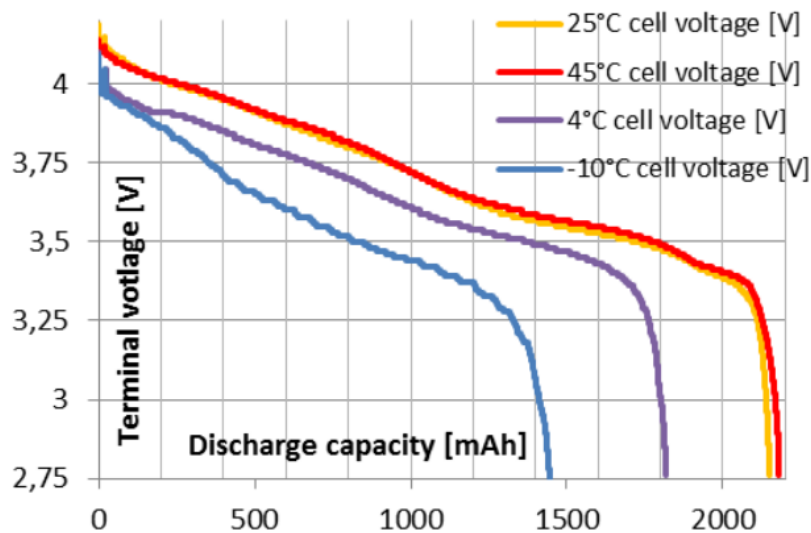
Περιγραφή	Εκτίμηση SoC
Πλήρης εκφόρτιση της μπαταρίας στους 25 °C	0 %
Αλλαγή της θερμοκρασίας από 25 °C σε 0 °C	0 %
Φόρτιση της μπαταρίας με CC-CV μέθοδο, χωρίς να αλλάξει η θερμοκρασία. Στο τέλος της φόρτισης και σύμφωνα με το Σχήμα 5.1, η μπαταρία θα απορροφήσει 1.82 A	$\frac{1.82}{2.2} \cdot 100 \% = 82.7 \%$

Σε αυτήν την περίπτωση, η φόρτιση θα σταματήσει γιατί η τάση στα της μπαταρίας θα έχει φτάσει στο ανώτατο όριο τάσης, ενώ ο αλγόριθμος Coulomb Counting θα υπολογίζει Κατάσταση Φόρτισης ίση με 82.7 %



**Σχήμα 5.1:** Τάση στα άκρα της μπαταρίας σε συνάρτηση της χωρητικότητας της μπαταρίας κατά την φόρτιση, για διαφορετικές θερμοκρασίες. Εξήχθη από την αναφορά [17].

**Θερμοκρασία Εκφόρτισης** Η θερμοκρασία εκφόρτισης είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το πόση χωρητικότητα μπορεί να παραδώσει το κελί στο εξωτερικό κύκλωμα. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 5.2, η μπαταρία αν φορτιστεί και εκφορτιστεί στους 4 °C, η χωρητικότητα εκφόρτισης (συμβολιζόμενη με  $Q_{4^{\circ}\text{C}}$ ) θα ανέρχεται περίπου στο 1.81 Ah, ενώ αν φορτιστεί και εκφορτιστεί στους 25 °C, η χωρητικότητα εκφόρτισης είναι περίπου 2.18 Ah. Η εξάρτηση της χωρητικότητας σε σχέση με την θερμοκρασία δεν λαμβάνεται υπόψιν στον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting και μπορεί να προκαλέσει μεγάλο σφάλμα στον υπολογισμό της Κατάστασης Φόρτισης, όπως στο σενάριο που περιγράφεται στον Πίνακα 5.2.



**Σχήμα 5.2:** Τάση στα άκρα της μπαταρίας σε συνάρτηση της χωρητικότητας της μπαταρίας κατά την εκφόρτιση, για διαφορετικές θερμοκρασίες. Εξήχθη από την αναφορά [17].

Στον σενάριο που περιγράφεται στον Πίνακα 5.2, η εκφόρτιση της μπαταρίας θα σταματήσει καθώς η μπαταρία θα φτάσει στο κατώτατο όριο τάσης. Ωστόσο, ο απλός αλγόριθμος

**Πίνακας 5.2:** Σενάριο λανθασμένης εκτίμησης SoC του αλγορίθμου Coulomb Counting. Για λόγους απλότητας δεν λαμβάνεται υπόψιν το φαινόμενο που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.2.

Περιγραφή	Εκτίμηση SoC
Η μπαταρία βρίσκεται στους 4 °C, με SoC = 90 %, δηλαδή έχει αποθηκευμένα $0.9 \cdot 2.18 \text{ Ah} = 1.962 \text{ Ah}$ . Αυτό μπορεί να έγινε, φορτίζοντάς την στους 25 °C και αλλάζοντας την θερμοκρασία στους 4 °C	90 %
Εκφόρτιση της μπαταρίας μέχρι το κατώτατο όριο τάσης. Συνολικά θα αποδώσει $0.9 \cdot 1.81 \text{ Ah} = 1.63 \text{ Ah}$	$\frac{1.962-1.63}{2.2} \cdot 100\% = 15.1\%$

Coulomb Counting, την στιγμή που η φόρτιση θα σταματήσει, θα έχει υπολογισμένη Κατάσταση Φόρτισης ίση με 15 %, δίνοντας μία λάθος εκτίμηση της υπολειπόμενης ενέργειας στον χρήστη.

**Διαφορά θερμοκρασίας φόρτισης-εκφόρτισης** Στις παραπάνω παραγράφους αναλύθηκε το πως η χωρητικότητα της μπαταρίας επηρεάζεται από την θερμοκρασία της. Οι χωρητικότητες που παρουσιάστηκαν, μετρήθηκαν με την προϋπόθεση ότι η φόρτιση και η εκφόρτιση της μπαταρίας λάμβανε χώρα στην ίδια θερμοκρασία. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 5.2, η χωρητικότητα του κελιού για την θερμοκρασία 4 °C, είναι περίπου 1.81 Ah. Αυτή η μέτρηση, έγινε, φορτίζοντας την μπαταρία πλήρως στους 4 °C και εκφορτίζοντάς την πλήρως, χωρίς να μεταβληθεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Ωστόσο, υπάρχει η πιθανότητα, η μπαταρία να φορτιστεί σε μία θερμοκρασία και να εκφορτιστεί σε διαφορετική. Για παράδειγμα, ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να φορτιστεί κατά την διάρκεια της ημέρας (π.χ. στους 25 °C) και να εκφορτιστεί στην διάρκεια της νύχτας (π.χ. στους 10 °C). Σε τέτοιες περιπτώσεις, θα πρέπει να βρεθεί ποια θα είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας που θα έχει κατά την εκφόρτιση, η οποία δεν ισούται με την χωρητικότητα του κελιού στους 10 °C.

Ο Feng κ.α. [20] ορίζουν ως  $LFD_{T_1 \rightarrow T_2}$  την χωρητικότητα η οποία χάνεται αν η θερμοκρασία μεταβεί από τους  $T_1$  στους  $T_2$ , με την προϋπόθεση πως ισχύει  $Q_{T_1} > Q_{T_2}$ . Πιο αναλυτικά, το  $LFD_{T_1 \rightarrow T_2}$  ορίζεται ως:

$$LFD_{T_1 \rightarrow T_2} = Q_{Cha_{T_1 \rightarrow Dis_{T_1}}} - Q_{Cha_{T_1 \rightarrow Dis_{T_2}}} \quad Q_{T_1} > Q_{T_2} \quad (5.2)$$

όπου,  $Q_{Cha_{T_1 \rightarrow Dis_{T_1}}}$  η χωρητικότητα εκφόρτισης της μπαταρίας αν φορτιστεί πλήρως σε θερμοκρασία ίση με  $T_1$  και εκφορτιστεί πλήρως σε θερμοκρασία  $T_1$ ,  $Q_{Cha_{T_1 \rightarrow Dis_{T_2}}}$  η χωρητικότητα εκφόρτισης της μπαταρίας αν φορτιστεί πλήρως σε θερμοκρασία  $T_1$  και εκφορτιστεί πλήρως σε θερμοκρασία  $T_2$ ,  $Q_{T_1}$  η χωρητικότητα εκφόρτισης της μπαταρίας αν φορτιστεί και εκφορτιστεί πλήρως στην θερμοκρασία  $T_1$  και  $Q_{T_2}$  η χωρητικότητα εκφόρτισης της μπαταρίας αν φορτιστεί και εκφορτιστεί πλήρως στην θερμοκρασία  $T_2$ .

Με άλλα λόγια, το  $LFD_{T_1 \rightarrow T_2}$ , ορίζει, την χωρητικότητα που "χάνεται" αν μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία μεταβεί από την θερμοκρασία  $T_1$  στην θερμοκρασία  $T_2$ .

Για μία μπαταρία ιόντων λιθίου, το LFD είναι ικανό να δημιουργήσει αρκετά μεγάλο σφάλμα στον αλγόριθμο Coulomb Counting, ειδικά όταν η διαφορά θερμοκρασίας φόρτισης - εκφόρτισης είναι πολύ μεγάλη. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζεται το LFD μίας μπαταρίας ιόντων λιθίου με  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ .

Από τον Πίνακα 5.3 διαπιστώνεται, πως το LFD γίνεται εντονότερο όταν η διαφορά της θερμοκρασίας φόρτισης και εκφόρτισης είναι μεγάλη. Για παράδειγμα, η φόρτιση στους 20 °C που ακολουθείται από εκφόρτιση στους 10 °C δημιουργεί  $LFD = 1 \text{ Ah}$  όπου και ο αλγόριθμος Coulomb Counting δεν το λαμβάνει υπόψιν. Αν χρησιμοποιηθεί η πραγματική χωρητικότητα

**Πίνακας 5.3:** Χωρητικότητα που χάνεται (LFD) αν η αρχική θερμοκρασία είναι 20 °C. Δεδομένα από [20].

$T_2$ (°C)	LFD (Ah)	$Q_{\text{Cha}_{T_2}-\text{Dis}_{T_2}}$ (Ah)	$Q_{\text{Cha}_{T_1}-\text{Dis}_{T_2}}$ (Ah)
20	0	100	-
10	1	98	99
0	11	82	89
-10	22	66	78
-20	47	32	53

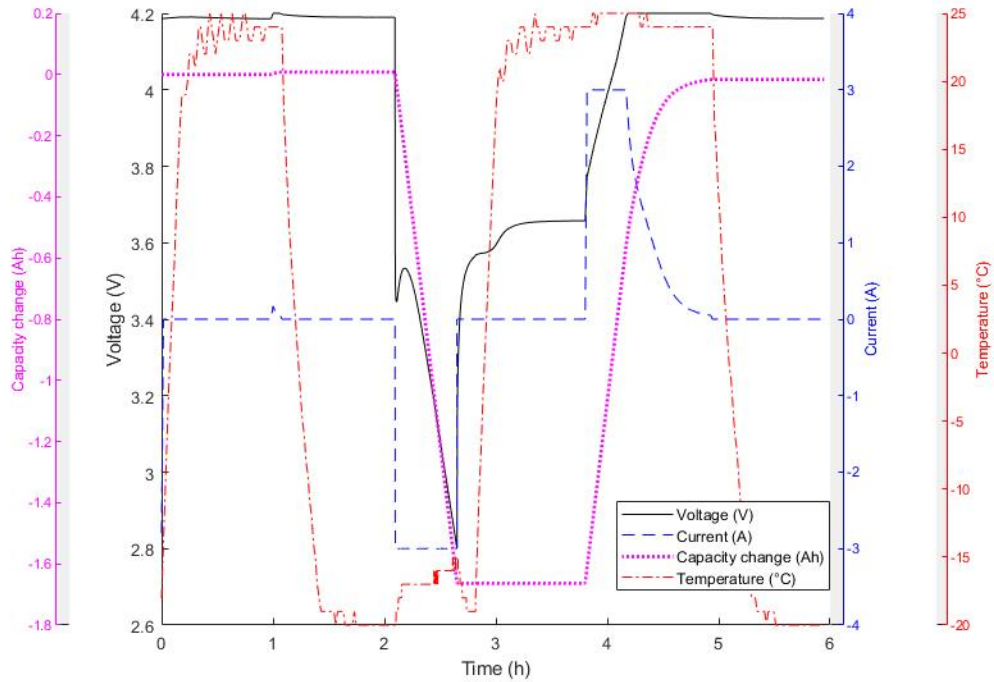
του κελιού (που εξαρτάται από την θερμοκρασία) στον αλγόριθμο Coulomb Counting, δηλαδή  $C_n = 98 \text{ Ah}$ , τότε το σφάλμα της μη συμπερίληψης του φαινομένου αυτού ισούται με περίπου 1%. Το αντίστοιχο σφάλμα που εισάγει αυτό το φαινόμενο αν έχουμε φόρτιση στους 20 °C και εκφόρτιση στους -20 °C, ισούται με περίπου 39.6%.

**Επιστροφή στην αρχική θερμοκρασία** Ο Feng κ.ά. [20] έχουν ορίσει την χωρητικότητα που χάνεται, αν η μπαταρία μεταβεί από μια υψηλή θερμοκρασία σε χαμηλή, ως  $LFD_{T_1 \rightarrow T_2}$ . Ωστόσο, η χωρητικότητα LFD που χάνεται κατά την μετάβαση από μία υψηλή θερμοκρασία σε χαμηλή δεν εξαφανίζεται απλώς από την μπαταρία, αλλά θα είναι ξανά διαθέσιμη αν η θερμοκρασία επιστραφεί στην αρχική. Για παράδειγμα, αν μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία μεταβεί από την θερμοκρασία  $T_1 = 20 \text{ °C}$  στην θερμοκρασία  $T_2 = 0 \text{ °C}$ , τότε θα χάσει  $LFD_{T_1 \rightarrow T_2} = 11 \text{ Ah}$ , δηλαδή, η διαθέσιμη χωρητικότητά εκφόρτισης στους 0 °C θα είναι  $Q_{T_1} - LFD_{T_1 \rightarrow T_2} = 100 \text{ Ah} - 11 \text{ Ah} = 89 \text{ Ah}$ . Αν όμως, μεταβεί ξανά στους 20 °C, τότε η χωρητικότητα 11 Ah που χάθηκε κατά την μετάβαση από τους 20 °C στους 0 °C θα να είναι ξανά διαθέσιμη. Στην παρούσα εργασία θα επεκταθεί ο τρόπος που προτείνεται από τους Feng κ.ά. [20] και θα παρουσιαστεί μεθοδολογία όπου η χωρητικότητα  $LFD_{T_1 \rightarrow T_2}$  θα αφαιρείται αν υπάρχει μετάβαση από υψηλή σε χαμηλή θερμοκρασία αλλά και θα προστίθεται αν η μπαταρία επιστρέψει στην αρχική θερμοκρασία.

**Απόδειξη του φαινομένου** Για την απόδειξη του παραπάνω φαινομένου, θα αναλύσουμε την συμπεριφορά μίας μπαταρίας όταν φορτιστεί σε μία θερμοκρασία και εκφορτιστεί σε διαφορετική. Τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας που χρησιμοποιήθηκε παραθέτονται στον Πίνακα 6.1. Συνοπτικά, η μπαταρία είναι κυλινδρικού τύπου, ιόντων λιθίου, με χωρητικότητα 2.8 Ah και εύρος τάσης 2.5 V - 4.2 V.

Στο πείραμα που περιγράφεται στο Σχήμα 5.3, η μπαταρία βρίσκεται αρχικά πλήρως φορτισμένη στους 25 °C. Την χρονική στιγμή  $t \approx 1.5 \text{ h}$  η θερμοκρασία μεταβαίνει στους -20 °C ενώ ισχύει  $Q_{25 \text{ °C}} > Q_{-20 \text{ °C}}$ . Έπειτα ξεκινάει η εκφόρτιση της μπαταρίας με ένταση ρεύματος ίση με 2.8 A. Η εκφόρτιση ολοκληρώνεται την χρονική στιγμή  $t \approx 2.7 \text{ h}$  όπου και αντλήθηκε συνολική χωρητικότητα ίση με 1.7 Ah. Στη συνέχεια, η θερμοκρασία της μπαταρίας αυξάνεται και επιστρέφει στους 25 °C. Εφόσον η μπαταρία μεταβεί στους 25 °C, ξεκινάει η φόρτισή της με την μέθοδο που προτείνει ο κατασκευαστής. Από το Σχήμα 5.3 φαίνεται πως η μπαταρία απορροφά συνολικά 1.7 Ah και όχι 2.7 Ah, όπως είναι η πλήρης χωρητικότητά της. Το προηγούμενο, σημαίνει πως κατά την εκφόρτιση στους -20 °C, η μπαταρία δεν εκφορτίστηκε πλήρως, καθώς αν είχε εκφορτιστεί πλήρως, τότε όταν η θερμοκρασία αυξανόταν θα απορροφούσε συνολικά 2.7 Ah, δηλαδή την πλήρη χωρητικότητά της. Αντιθέτως, ορισμένη χωρητικότητα ίση με  $2.7 \text{ Ah} - 1.7 \text{ Ah} = 1 \text{ Ah}$  παγιδεύτηκε στη μπαταρία κατά την εκφόρτιση στους -20 °C, έγινε ξανά διαθέσιμη στους 25 °C και για αυτόν τον λόγο απαιτήθηκαν μόλις 1.7 Ah για την πλήρη φόρτισή της. Το παραπάνω πείραμα αποδεικνύει ότι η μεθοδολογία της "παγιδευμένης" χωρητικότητας που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία είναι αληθής.





**Σχήμα 5.3:** Εκφόρτιση στους  $-20^{\circ}\text{C}$  και φόρτιση στους  $20^{\circ}\text{C}$  μίας μπαταρίας ιόντων λιθίου.

**Κουλομπική Απόδοση** Η Κουλομπική Απόδοση μίας μπαταρίας περιγράφει την διαφορά της χωρητικότητας φόρτισης με την χωρητικότητα εκφόρτισης. Στις μπαταρίες ιόντων λιθίου, για μία δεδομένη θερμοκρασία, η χωρητικότητα φόρτισης είναι πάντα μεγαλύτερη από την χωρητικότητα εκφόρτισης. Ο τύπος της Κουλομπικής Απόδοσης ισούται με την χωρητικότητα εκφόρτισης διά την χωρητικότητα φόρτισης, όπως και περιγράφεται στην Εξίσωση 2.7. Η Κουλομπική Απόδοση εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία που βρίσκεται η μπαταρία και την κατάσταση υγείας της. Η τιμή της κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 99.6 % μέχρι και 99.99 % [9].

Το φαινόμενο της Κουλομπικής Απόδοσης δεν λαμβάνεται υπόψιν στον αλγόριθμο Coulomb Counting. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί ως χωρητικότητα  $C_n$ , την χωρητικότητα του κελιού κατά την εκφόρτιση, η οποία όπως εξηγήσαμε και παραπάνω διαφέρει από την χωρητικότητα φόρτισης. Στον Πίνακα 5.8 περιγράφεται ένα σενάριο όπου η Κουλομπική Απόδοση δημιουργεί σφάλμα της τάξης του 0.5 %.

**Πίνακας 5.4:** Σενάριο λανθασμένης εκτίμησης SoC του αλγορίθμου Coulomb Counting με αιτία την Κουλομπική Απόδοση. Στο παράδειγμα χρησιμοποιείται μπαταρία με Κουλομπική Απόδοση ίση με 99.5 %.

Περιγραφή	Εκτίμηση SoC
Η μπαταρία βρίσκεται στους $20^{\circ}\text{C}$ , με $\text{SoC} = 100\%$	100 %
Εκφόρτιση της μπαταρίας μέχρι το κατώτατο όριο τάσης, χωρίς την αλλαγή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.	0 %
Φόρτιση της μπαταρίας σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Η συνολική χωρητικότητα που θα πάρει ισούται με $C_{Cha} = \frac{C_{Dis}}{0.995}$	100.5 %

**Κατάσταση Υγείας της Μπαταρίας** Η Κατάσταση Υγείας της μπαταρίας είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που διαμορφώνει τη διαθέσιμη χωρητικότητα εκφόρτισής της.

Ανάλογα την εφαρμογή, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορεί και να χρησιμοποιούνται μέχρι και όταν η Κατάσταση Υγείας τους φτάσει στο 70%. Συνεπώς, η αλλαγή αυτή στην χωρητικότητα που οφείλεται από την Κατάσταση Υγείας μπορεί να προκαλέσει πολύ μεγάλο σφάλμα στον τελικό υπολογισμό αν δεν ληφθεί υπόψιν, όπως ακριβώς γίνεται στον αλγόριθμο Coulomb Counting.

**Ρεύμα φόρτισης - εκφόρτισης** Οι κατασκευαστές των μπαταριών, ορίζουν στην διαδικασία μέτρησης της χωρητικότητας των κελιών που παράγουν, την ένταση ρεύματος φόρτισης/εκφόρτισης και μάλιστα, πολλοί από αυτούς παρουσιάζουν και το πως μεταβάλλεται η χωρητικότητα εκφόρτισης της μπαταρίας σε συνάρτηση της έντασης ρεύματος. Η διαδικασία μέτρησης της χωρητικότητας εκφόρτισης γίνεται υπό σταθερό ρεύμα, ίσο με αυτό που προσδιορίζει ο κατασκευαστής, μέχρις ότου η τάση στα άκρα της μπαταρίας γίνει ίση με το κατώτατο όριο τάσης. Όπως εξηγήθηκε και στο Κεφάλαιο 2.5.4, η ύπαρξη της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας προκαλεί διαφορά τάσης (συμβολιζόμενη με  $u_o$ ). Η τάση  $u_o$ , εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που διαρρέει την μπαταρία και συνεπώς, όσο μεγαλύτερο ρεύμα εκφόρτισης/φόρτισης υπάρχει, τόσο περισσότερο αυξάνεται η τάση  $u_o$ . Σύμφωνα με το Κύκλωμα 2.7, μεγάλη τάση  $u_o$  αντιστοιχεί σε μικρότερη τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας (κατά την εκφόρτιση). Συνεπώς, αν χρησιμοποιηθεί μεγάλο ρεύμα, η μπαταρία κατά την εκφόρτιση θα φτάσει γρηγορότερα στο κατώτατο όριο τάσης όπου και αναγκαστικά η εκφόρτιση θα σταματήσει. Μικρή ένταση ρεύματος, προκαλεί μικρή διαφορά τάσης  $u_o$ , όπου και κατά την εκφόρτιση, η τάση στα άκρα της μπαταρίας θα φτάσει αργότερα στο κατώτατο όριο τάσης.

Για παράδειγμα, έστω ένα κελί χωρητικότητας 200 Ah. Το κελί αυτό αν εκφορτιστεί με ρεύμα 10 Ah, θα αντληθούν 200 Ah συνολικά και η εκφόρτιση θα διαρκέσει 20 ώρες. Θεωρητικά, αν το ρεύμα εκφόρτισης γίνει 200 A, τότε η μπαταρία θα μας αποδώσει 200 Ah με συνολικό χρόνο εκφόρτισης μίας ώρας. Ωστόσο, πρακτικά, σε εκφόρτιση με ένταση ρεύματος 200 A, η εκφόρτιση διαρκεί μισή ώρα και συνολικά αντλούνται 100 Ah. Το προηγούμενο συνέβη, επειδή η τόσο μεγάλη ένταση ρεύματος δημιούργησε μεγάλη διαφορά τάσης  $u_o$  όπου και το κελί έφτασε στο κατώτατο όριο τάσης όταν αντλήθηκαν τα 100 Ah. Στο τέλος της εκφόρτισης, το στοιχείο έχει  $SoC = 50\%$  το οποίο μπορεί εύκολα να αποδειχθεί φορτίζοντάς το, όπου και θα απορροφήσει 100 Ah. Ωστόσο, αν κατά το τέλος της εκφόρτισης, συνεχίζονταν η εκφόρτιση με μικρότερη ένταση ρεύματος, τότε θα μπορούσε να αντληθεί περισσότερη χωρητικότητα από την μπαταρία.

Συνεπώς, η διαθέσιμη χωρητικότητα δεν εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος με την προϋπόθεση ότι όσο το SoC μειώνεται, η ένταση ρεύματος μειώνεται και αυτή, ώστε η διαφορά τάσης  $u_o$  να μην προκαλέσει την τάση στα άκρα της μπαταρίας να πέσει κάτω από το κατώτατο όριο τάσης. Ο προηγούμενος περιορισμός υπάρχει σε όλες τις εφαρμογές όπου χρησιμοποιούν μπαταρίες. Για παράδειγμα, στα ηλεκτρικά οχήματα όσο μειώνεται το SoC μειώνεται και η διαθέσιμη ισχύς που επιτρέπεται να παραδώσει η μπαταρία, ενώ στους φορητούς υπολογιστές μειώνεται η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς αλλά και η φωτεινότητα της οθόνης.

**Αυτοεκφόρτιση** Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.5.11 όταν μία μπαταρία βρίσκεται σε ηρεμία, χάνει την διαθέσιμη χωρητικότητα που έχει αποθηκευτεί σε αυτήν, δηλαδή αυτοεκφορτίζεται. Ο αλγόριθμος Coulomb Counting, δεν λαμβάνει υπόψιν του την αυτοεκφόρτιση της μπαταρίας, με συνέπεια, αν η μπαταρία βρεθεί σε ηρεμία για μεγάλο χρονικό διάστημα, η χωρητικότητα που χάθηκε, να μην ληφθεί υπόψιν.

Τυπικά, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χάνουν 1 - 3% της χωρητικότητάς τους κάθε μήνα [43]. Για παράδειγμα, αν μία μπαταρία ιόντων λιθίου αποθηκευτεί για έναν μήνα με αρχικό  $SoC = 70\%$ , τότε στο τέλος του μήνα το SoC θα κυμαίνεται μεταξύ 69 και 67%.

Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι μικρός και για τις περισσότερες εφαρμογές είναι αμελητέος και αγνοείται, ωστόσο, στην μέθοδο που θα παρουσιαστεί, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης θα

λαμβάνεται υπόψιν για τον υπολογισμό του SoC.

### 5.2.1 Αναπαράσταση της Κατάστασης Φόρτισης

Επειδή η μπαταρία παρουσιάζει διαφορετική χωρητικότητα ανάλογα με την θερμοκρασία, αλλά και διαφορετική χωρητικότητα με βάση την θερμοκρασία φόρτισης και εκφόρτισης, θα πρέπει να συμφωνηθεί το τι θεωρείται ως πλήρως φορτισμένη και πλήρως εκφορτισμένη μπαταρία. Για παράδειγμα, μία τελείως άδεια μπαταρία αν φορτιστεί στους 4 °C θα απορροφήσει μόνο 1.82 Ah, ενώ αν φορτιστεί στους 25 °C θα απορροφήσει 2.2 Ah. Συνεπώς, αν η φόρτιση τερματίσει στους 4 °C με την μπαταρία να έχει απορροφήσει 1.82 Ah, τότε θα πρέπει να θεωρείται η μπαταρία πλήρως φορτισμένη, ή το SoC θα πρέπει να υπολογίζεται ως  $\frac{1.82 \text{ Ah}}{2.2 \text{ Ah}} \cdot 100 \% = 82.7 \%$ ; Απεναντίας, αν μία μπαταρία φορτιστεί πλήρως στους 25 °C και εκφορτιστεί στους 4 °C, τότε θα μπορέσει να αποδώσει στο εξωτερικό κύκλωμα περίπου 1.81 Ah, ενώ είχε αποθηκευμένα 2.2 Ah επειδή ήταν πλήρως φορτισμένη. Σε αυτήν την περίπτωση, η Κατάσταση Φόρτισης που βλέπει ο χρήστης θα πρέπει να είναι 0 % στο τέλος της εκφόρτισης ή θα πρέπει είναι  $\frac{2.2 \text{ Ah} - 1.81 \text{ Ah}}{2.2} = 17.7 \%$ , καθώς υπάρχει χωρητικότητα εγκλωβισμένη στην μπαταρία η οποία δεν μπορεί να αφαιρεθεί λόγω της χαμηλής θερμοκρασία και που αν αυξηθεί η θερμοκρασία η χωρητικότητα αυτή θα είναι ξανά διαθέσιμη;

Εφόσον η Κατάσταση Φόρτισης χρησιμοποιείται από τον χρήστη για να υπολογιστεί η διαθέσιμη χωρητικότητα που μπορεί να αντλήσει, τότε είναι λογικό το SoC να είναι 0 % την στιγμή την οποία η μπαταρία δεν μπορεί να παραδώσει περισσότερα Ah στο εξωτερικό κύκλωμα. Στα παραπάνω παραδείγματα, για την εκφόρτιση στους 4 °C, θα ήταν λάθος μήνυμα προς τον χρήστη να ενημερωθεί πως το SoC ανέρχεται στο 17.7 % και στη συνέχεια η εφαρμογή να σταματήσει να λειτουργεί επειδή η μπαταρία δεν μπορεί να παραδώσει άλλη χωρητικότητα. Ομοίως, για την φόρτιση στους 4 °C, θα ήταν λάθος η φόρτιση να τελειώσει και το SoC να δείχνει 82.7 %.

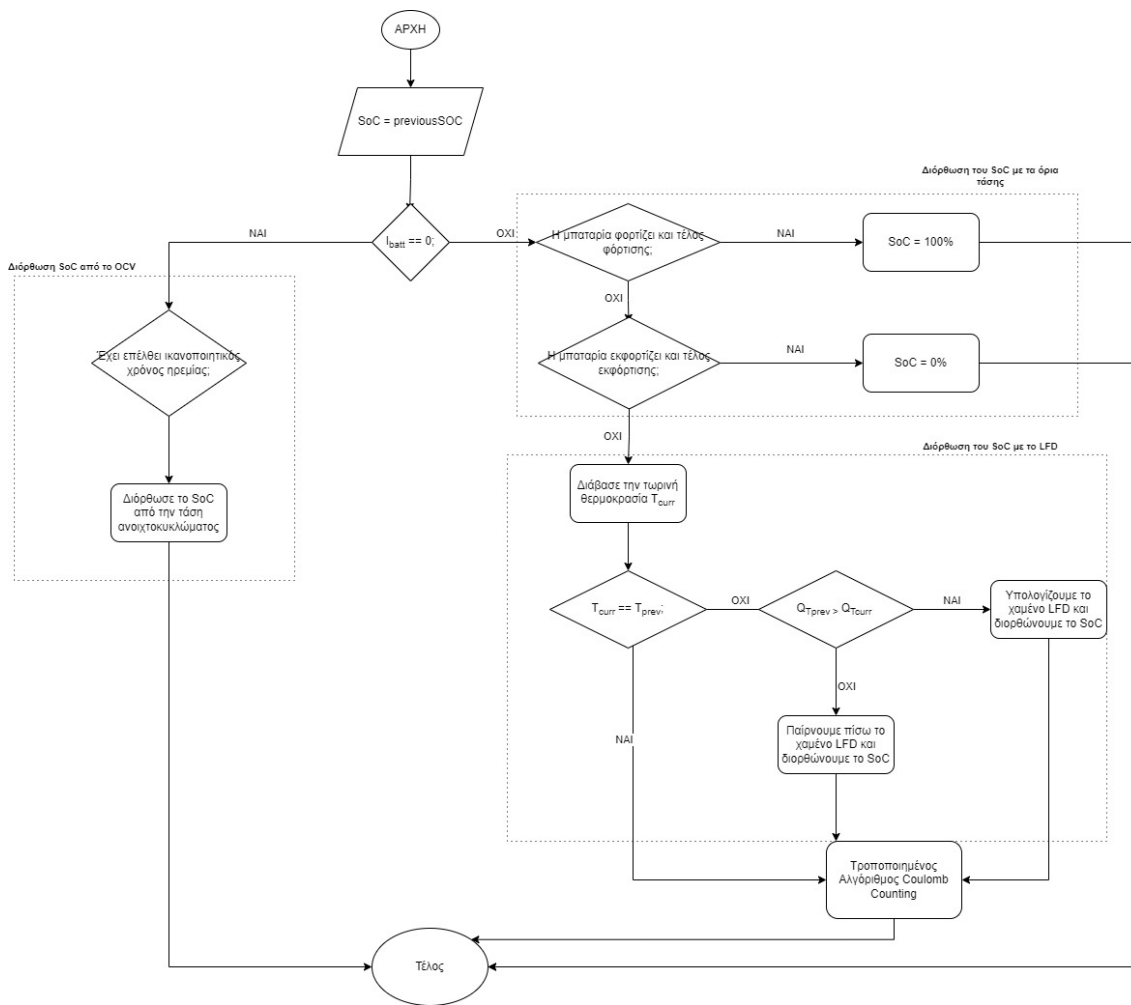
Ένας σωστός αλγόριθμος SoC θα πρέπει ανά πάσα χρονική στιγμή να υπολογίζει το SoC το οποίο θα αντικατοπτρίζει την διαθέσιμη χωρητικότητα που η μπαταρία μπορεί να διαθέσει στη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Το προηγούμενο σημαίνει πως αν η μπαταρία βρίσκεται στους 4 °C με  $SoC = 100 \%$ , τότε ο χρήστης μπορεί να αντλήσει από την μπαταρία χωρητικότητα ίση με την χωρητικότητα της μπαταρίας στους 4 °C, όπου και στο παράδειγμά μας ισούται με 1.82 Ah. Από την άλλη μεριά, αν η μπαταρία βρίσκεται στους 25 °C με  $SoC = 100 \%$ , τότε θεωρείται πως μπορεί να παραδώσει 2.2 Ah, όσο δηλαδή και η χωρητικότητα της μπαταρίας στους 25 °C. Η προηγούμενη συνθήκη, λύνει τα προβλήματα που αναφέρθηκαν στην παραπάνω παράγραφο και θέτει το SoC σαν μία ασφαλή ένδειξη για το πόση ενέργεια μπορεί, στις υπάρχουσες συνθήκες, να αποδώσει η μπαταρία.

### 5.2.2 Προτεινόμενη Μεθοδολογία

Η μέθοδος η οποία προτείνεται για τον υπολογισμό της Κατάστασης Φόρτισης της μπαταρίας βασίζεται κυρίως στην αλγόριθμο του Coulomb Counting αλλά και έχει την ικανότητα να διορθώνει την Κατάσταση Φόρτισης με άλλες μεθόδους όπως για παράδειγμα την Τάση Ανοιχτοκυκλώματος της μπαταρίας. Στο Σχήμα 5.4 παρατίθεται το διάγραμμα ροής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προγραμματισμό ενός Συστήματος Διαχείρισης Μπαταριών.

Στο διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθόδου βλέπουμε πως υπάρχουν 3 μεγάλες κατηγορίες, την Διόρθωση του SoC από το OCV (Τάση Ανοιχτοκυκλώματος), την Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης και την Διόρθωση του SoC με το LFD, οι τρεις αυτές κατηγορίες διορθώνουν το SoC ώστε να μειωθεί το σφάλμα του αλγορίθμου κατά την εκτίμηση της Κατάστασης Φόρτισης. Τέλος, αν η μπαταρία χρησιμοποιείται, δηλαδή ισχύει  $I_{batt} \neq 0$ , υπολογίζεται η νέα Κατάσταση Φόρτισης χρησιμοποιώντας μία παραλλαγή του αλγορίθμου Coulomb Counting.

Παρακάτω, αναλύονται λεπτομερώς όλα τα δομικά στοιχεία του αλγορίθμου που προτείνεται.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα ροής της μεθόδου υπολογισμού του SoC που προτείνεται.

### Διόρθωση του SoC από το OCV

Αν η μπαταρία βρίσκεται σε ηρεμία για μεγάλο χρονικό διάστημα, τότε, η Κατάσταση Φόρτισης διορθώνεται χρησιμοποιώντας την μέθοδο της Τάσης Ανοιχτοκυκλώματος όπως και εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 4.1.3.

Με την χρήση της τάσης ανοιχτοκυκλώματος για τον προσδιορισμό του SoC, υπάρχει η δυνατότητα να διορθωθούν πολλά σφάλματα που παράγει ο αλγόριθμος Coulomb Counting. Πιο αναλυτικά, το **Σφάλμα υπολογισμών & μετρήσεων** που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5.2, περιλαμβάνει το σφάλμα δειγματοληψίας, το σφάλμα θορύβου και ακριβείας των αισθητήρων αλλά και το σφάλμα στρογγυλοποιήσεων όπου και τα οποία διορθώνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα όταν η μπαταρία βρεθεί σε ηρεμία. Παράλληλα, το φαινόμενο της **Αυτοεκφόρτιση** της μπαταρίας λαμβάνεται υπόψιν στον αλγόριθμο που προτείνουμε, καθώς η αυτοεκφόρτιση προκαλεί με την πάροδο του χρόνου μείωση στην τάση ανοιχτοκυκλώματος (εφόσον η μπαταρία εκφορτίζεται) η οποία και χρησιμοποιείται συνεχώς για τον προσδιορισμό του SoC.

**Δεδομένα που απαιτούνται** Ο αλγόριθμος, για να υπολογίσει την Κατάσταση Φόρτισης θα πρέπει να γνωρίζει το πως η Τάση Ανοιχτοκυκλώματος αντιστοιχεί στην Κατάσταση Φόρτισης. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται το πως η τάση ανοιχτοκυκλώματος αντιστοιχεί στο SoC ενώ φαίνεται και πως η θερμοκρασία της μπαταρίας επηρεάζει την συσχέτιση αυτή. Παράλληλα, ο χρόνος ηρεμίας της μπαταρίας, η Κατάσταση Υγείας της αλλά και το αν η μπαταρία βρισκόταν σε φόρτιση ή εκφόρτιση πριν βρεθεί σε ηρεμία, είναι μερικοί παράμετροι που επηρεάζουν την αντιστοιχία της τάσης ανοιχτοκυκλώματος με το SoC. Για την σωστή αντιστοίχιση,

θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν όλοι οι προηγούμενοι παράμετροι και να δημιουργηθούν πολλοί πίνακες αναζήτησης (lookup-table), έναν για κάθε παράμετρο που επηρεάζει την σχέση της Τάσης Ανοιχτοκυκλώματος με το SoC.

### Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης

Η μέθοδος της διόρθωσης του SoC με τα όρια τάσης, χρησιμοποιείται όταν η μπαταρία δεν βρίσκεται σε ηρεμία, δηλαδή η ένταση ρεύματος είναι διαφορετική του μηδενός. Η διόρθωση του SoC γίνεται όταν η μπαταρία φτάσει στο άνω ή κάτω όριο τάσης για μία συγκεκριμένη ένταση ρεύματος. Το προηγούμενο μπορεί να συμβεί κατά την εκφόρτιση ή κατά την φόρτιση. Σε αυτήν την περίπτωση, το SoC τίθεται αυτομάτως 0 ή 100 %, αναλόγως αν έχει φτάσει στο άνω ή κάτω όριο τάσης. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη κατά την φόρτιση όπου και όταν η φόρτιση τερματίζει, το υπολογισμένο SoC θα ανέρχεται πάντα στο 100 %.

**Δεδομένα που απαιτούνται** Η μέθοδος προσδιορίζει το πότε η μπαταρία θεωρείται πλήρως φορτισμένη ή πλήρως εκφορτισμένη όσο η ίδια βρίσκεται σε λειτουργία. Για να συμβεί αυτό, θα πρέπει να προσδιοριστεί το ανώτατο/κατώτατο όριο τάσης μαζί με την ένταση του ρεύματος όπου και η μπαταρία θα θεωρείται πλήρως φορτισμένη/εκφορτισμένη. Για παράδειγμα, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.5.5, η μπαταρία θεωρείται πλήρως φορτισμένη αν κατά την φόρτιση η τάση στα άκρα της μπαταρίας ανέρχεται στα 4.2 V και η ένταση του ρεύματος είναι μικρότερη ή ίση με 50 mA. Αντίστοιχο όριο τάσης και έντασης ρεύματος θα πρέπει να θεσπιστεί και κατά την εκφόρτιση, το οποίο καθορίζεται πρωτίστως από την μέγιστη ένταση ρεύματος που πρέπει να παραδίδει μία μπαταρία ανά πάσα χρονική στιγμή. Στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 2.5.5, αν η μπαταρία θα έπρεπε να αποδίδει ανά πάσα χρονική στιγμή ένταση ρεύματος 1 C, τότε, ως κατώτατο όριο τάσης θα θεσπιζόταν ως το κατώτατο όριο τάσης που ορίζει ο κατασκευαστής με την μπαταρία να αποδίδει ένταση ρεύματος ίση με 1 C. Στον Πίνακα 5.5 αναλύονται τα κριτήρια με τα οποία θεωρεί ο κατασκευαστής μπαταριών την μπαταρία πλήρως φορτισμένη και πλήρως εκφορτισμένη.

**Πίνακας 5.5:** Ένταση ρεύματος και τάση στα άκρα της μπαταρίας όταν η μπαταρία θεωρείται πλήρως φορτισμένη και πλήρως εκφορτισμένη.

$V_{batt}$	$I_{batt}$	SoC
4.2 V	50 mA	100 %
2.5 V	1 C	0 %

### Διόρθωση του SoC με το LFD

Η Διόρθωση του SoC με το LFD εφαρμόζεται στην μέθοδο που προτείνουμε για να περιγράψει το πως η χωρητικότητα της μπαταρίας αλλάζει αν μία μπαταρία φορτιστεί σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία και εκφορτιστεί σε διαφορετική. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο αν η προηγούμενη μέτρηση της θερμοκρασία ( $T_{prev}$  ή  $T_1$ ) είναι διαφορετική από την υπάρχουσα ( $T_{curr}$  ή  $T_2$ ), δηλαδή, η θερμοκρασία της μπαταρίας άλλαξε και συνεπώς άλλαξε και η διαθέσιμη χωρητικότητά της.

Όπως εξηγήσαμε στο Κεφάλαιο 5.2, αν υπάρξει μετάβαση από μία θερμοκρασία σε άλλη και ισχύει  $Q_{T_{prev}} > Q_{T_{curr}}$ , δηλαδή, η χωρητικότητα πλήρης εκφόρτισης της προηγούμενης θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη από την χωρητικότητα πλήρης εκφόρτισης της τωρινής θερμοκρασίας, και αν η μπαταρία είναι έστω και λίγο φορτισμένη ( $SOC \neq 0\%$ ), τότε ορισμένη χωρητικότητα (συμβολιζόμενη με  $Q_{trapped}$ ) ανάλογη του ποσοστού φόρτισης και του  $LFD_{T_{prev} \rightarrow T_{curr}}$  θα παγιδευτεί σε αυτό και δεν θα γίνεται να αντληθεί. Η χωρητικότητα που εγκλωβίστηκε, δηλαδή η  $Q_{trapped}$ , θα είναι ξανά διαθέσιμη και θα μπορεί να αντληθεί από την μπαταρία, μόνο όταν επιστραφεί στην αρχική θερμοκρασία, δηλαδή στην  $T_{prev}$ .

Ορίζουμε την χωρητικότητα που εγκλωβίζεται στην μπαταρία όταν η θερμοκρασία αλλάζει ως εξής:

$$Q_{trapped} = SoC \cdot k \cdot LFD_{T_{prev} \rightarrow T_{curr}} \quad Q_{T_{prev}} > Q_{T_{curr}} \quad (5.3)$$

όπου  $SoC$  το Ποσοστό Φόρτισης της μπαταρίας,  $k$  είναι το  $SoH$ ,  $LFD_{T_{prev} \rightarrow T_{curr}}$  η χωρητικότητα που χάνεται κατά την μετάβαση από την θερμοκρασία  $T_{prev}$  στην  $T_{curr}$  όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη (δηλαδή  $SoC = 100\%$ ) και όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5.2,  $T_{curr}$  η τωρινή θερμοκρασία της μπαταρίας και  $T_{prev}$  η προηγούμενη θερμοκρασία της μπαταρίας.

Με την μέθοδο που προτείνουμε, όταν υπάρχει μετάβαση από θερμοκρασία  $T_{prev}$  σε  $T_{curr}$  και ισχύει  $Q_{T_{prev}} > Q_{T_{curr}}$  τότε στη μπαταρία παγιδεύεται χωρητικότητα ίση με  $Q_{trapped}$  η οποία και δεν μπορεί να αντληθεί από αυτήν και για αυτό θα πρέπει να διορθωθεί το Ποσοστό Φόρτισης της μπαταρίας. Όταν η μπαταρία επιστρέψει στην θερμοκρασία  $T_{prev}$ , τότε η χωρητικότητα  $Q_{trapped}$  που έχει παγιδευτεί θα γίνει ξανά διαθέσιμη όπου και το Ποσοστό Φόρτισης θα πρέπει να διορθωθεί ξανά. Συνεπώς, διακρίνονται δύο περιπτώσεις, η πρώτη είναι η διαδρομή προς μία θερμοκρασία που η χωρητικότητα εκφόρτισης σε αυτήν την θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από ότι ήταν πριν (π.χ. μετάβαση από την θερμοκρασία  $20^\circ\text{C}$  σε  $4^\circ\text{C}$ ) και την διαδρομή προς μία θερμοκρασία που η χωρητικότητα πλήρης εκφόρτισης αυξάνεται (π.χ. μετάβαση από  $4^\circ\text{C}$  σε  $20^\circ\text{C}$ ). Παρακάτω αναλύουμε λεπτομερώς το πως υπολογίζεται η χωρητικότητα  $Q_{trapped}$  και η διόρθωση του  $SoC$  για κάθε μία διαδρομή.

**Προς θερμοκρασία που η μπαταρία έχει χαμηλότερη χωρητικότητα** Αν η μπαταρία μεταβεί σε θερμοκρασία όπου η χωρητικότητα εκφόρτισης είναι χαμηλότερη από όσο ήταν πριν τότε παγιδεύεται η χωρητικότητα  $Q_{trapped}$  σε αυτήν. Χρησιμοποιώντας την χωρητικότητα  $Q_{trapped}$  διορθώνουμε το Ποσοστό Φόρτισης ως εξής:

$$SoC_{corrected} = \frac{SoC \cdot Q_{T_{prev}} - Q_{trapped}}{Q_{T_{curr}}} \quad (5.4)$$

όπου  $SoC_{corrected}$  το νέο διορθωμένο Ποσοστό Φόρτισης,  $SoC$  το τωρινό Ποσοστό Φόρτισης,  $Q_{T_{prev}}$  η χωρητικότητα του κελιού για θερμοκρασία  $T_{prev}$ ,  $Q_{trapped}$  η χωρητικότητα που υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 5.3 και τέλος  $Q_{T_{curr}}$  η χωρητικότητα του κελιού στην θερμοκρασία  $T_{curr}$ .

**Προς θερμοκρασία που η μπαταρία έχει υψηλότερη χωρητικότητα** Αν η μπαταρία είχε μεταβεί από την θερμοκρασία  $T_{prev}$  στην θερμοκρασία  $T_{curr}$  και ισχύει  $Q_{prev} > Q_{curr}$ , τότε εγκλωβίστηκε χωρητικότητα  $Q_{trapped}$  σε αυτήν και το Ποσοστό Φόρτισης διορθώθηκε όπως περιγράφηκε στην παραπάνω παράγραφο. Αν η ίδια μπαταρία επιστρέψει στην αρχική θερμοκρασία, δηλαδή υπάρχει μετάβαση  $T_{curr} \rightarrow T_{prev}$ , τότε η χωρητικότητα  $Q_{trapped}$  θα γίνει ξανά διαθέσιμη όπου και το  $SoC$  θα πρέπει να διορθωθεί ξανά. Σημειώνεται, πως το  $Q_{trapped}$  που γίνεται διαθέσιμο όταν η μπαταρία πάει στην θερμοκρασία  $T_{prev}$ , δεν υπολογίζεται ξανά με την Εξίσωση 5.3, αλλά είναι η χωρητικότητα που είχε υπολογιστεί κατά την μετάβαση  $T_{prev} \rightarrow T_{curr}$ .

Για την διόρθωση του  $SoC$  χρησιμοποιείται η Εξίσωση 5.4 με την μόνη διαφορά ότι η χωρητικότητα  $Q_{trapped}$  προστίθεται στην συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας:

$$SoC_{corrected} = \frac{SoC \cdot Q_{T_{prev}} + Q_{trapped}}{Q_{T_{curr}}} \quad (5.5)$$

όπου  $SoC_{corrected}$  το νέο διορθωμένο Ποσοστό Φόρτισης,  $SoC$  το τωρινό Ποσοστό Φόρτισης,  $Q_{T_{prev}}$  η χωρητικότητα του κελιού για θερμοκρασία  $T_{prev}$ ,  $Q_{trapped}$  η χωρητικότητα που υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 5.3 κατά την μετάβαση  $T_{prev} \rightarrow T_{curr}$  και τέλος  $Q_{T_{curr}}$  η χωρητικότητα του κελιού στην θερμοκρασία  $T_{curr}$ .

**Δεδομένα που απαιτούνται** Στις παραπάνω παραγράφους περιγράφηκαν τρεις διαφορετικές Εξισώσεις, 5.3, 5.4 και η 5.5. Για την υλοποίηση του αλγορίθμου είναι απαραίτητη η γνώση των παρακάτω δεδομένων:

1.  $Q_T \quad \forall T \in [T_{operating,min}, T_{operating,max}]$ , όπου  $T_{operating,min}$  η ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας της μπαταρίας και  $T_{operating,max}$  η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας της μπαταρίας
2.  $LFD_{T_1 \rightarrow T_2} \quad \forall T_1, T_2 \in [T_{operating,min}, T_{operating,max}] \quad : \quad (Q_{T_1} > Q_{T_2}) \wedge (T_1 \neq T_2)$

Συνοπτικά, είναι απαραίτητη η γνώση της χωρητικότητας πλήρης εκφόρτισης για κάθε θερμοκρασία (συμβολιζόμενη με  $Q_{T_1}$ ) αλλά και η γνώση του  $LFD_{T_1 \rightarrow T_2}$  για κάθε ζεύγος θερμοκρασιών  $T_1$  και  $T_2$ , με την προϋπόθεση ότι η χωρητικότητα  $Q_{T_1}$  είναι μεγαλύτερη από την χωρητικότητα  $Q_{T_2}$  και ότι  $T_1$  διαφορετικό του  $T_2$ . Δεν είναι απαραίτητο να μετρηθεί το  $LFD_{T_1 \rightarrow T_2}$  αν ισχύει  $Q_{T_1} < Q_{T_2}$ .

### Τροποποιημένος αλγόριθμος Coulomb Counting

Ο *Τροποποιημένος αλγόριθμος Coulomb Counting* χρησιμοποιεί το ήδη διορθωμένο SoC όπου και το χρησιμοποιεί για να υπολογίσει το νέο ποσοστό φόρτισης ολοκληρώνοντας ως προς το ρεύμα, χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$SoC(t) = SoC_{corr} - \frac{1}{kC_{I_{batt}, T_{curr}}} \int_{t_0}^t I_{batt} dt \quad (5.6)$$

όπου  $SoC_{corr}$  το διορθωμένο SoC με τις μεθόδους που περιγράφηκαν παραπάνω,  $k$  ο συντελεστής SoH,  $C_{I_{batt}, T_{curr}}$  όπως ορίζεται στην Εξίσωση 5.7 και  $I_{batt}$  η ένταση ρεύματος της μπαταρίας

Η χωρητικότητα  $C_{I_{batt}, T_{curr}}$  ορίζεται ως:

$$C_{I_{batt}, T_{curr}} = \begin{cases} Q_{cha, T_{curr}} & \text{αν } I_{batt} < 0 \\ Q_{dis, T_{curr}} & \text{αν } I_{batt} \geq 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

όπου  $Q_{cha, T_{curr}}$  η πλήρης χωρητικότητα φόρτισης της μπαταρίας αν εκφορτιστεί και φορτιστεί πλήρως στη θερμοκρασία  $T_{curr}$ ,  $Q_{dis, T_{curr}}$  η πλήρης χωρητικότητα εκφόρτισης της μπαταρίας αν φορτιστεί και εκφορτιστεί πλήρως στη θερμοκρασία  $T_{curr}$ ,  $I_{batt}$  η ένταση του ρεύματος της μπαταρίας.

Η Τροποποιημένη μέθοδος Coulomb Counting χρησιμοποιεί ως αρχική μέτρηση το διορθωμένο Ποσοστό Φόρτισης που έχει προκύψει από τις μεθόδους που περιγράφονται στις παραπάνω παραγράφους. Στη συνέχεια, χρησιμοποιεί την σταθερά  $k$ , που υπολογίζει ο αλγόριθμος της Κατάστασης Υγείας, για να περιγραφεί η απομείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας που συμβαίνει κατά την χρήση της. Η χωρητικότητα με την οποία διαιρεί ο αλγόριθμος Coulomb Counting είναι η πλήρης χωρητικότητα φόρτισης ή πλήρης χωρητικότητα εκφόρτισης και εξαρτάται αν η μπαταρία φορτίζεται ή εκφορτίζεται. Τέλος, ο αλγόριθμος ολοκληρώνει ως προς το ρεύμα για να υπολογιστεί το νέο ποσοστό φόρτισης.

### 5.2.3 Οι πηγές σφαλμάτων και η αντιμετώπισή τους

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί το πως η προτεινόμενη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5.2 επιλύει όλες τις πηγές σφάλματος του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting.

**Σφάλμα υπολογισμών μετρήσεων** Ο θόρυβος, η μικρή ακρίβεια, η μικρή δειγματοληψία των αισθητήρων αλλά και οι μαθηματικές στρογγυλοποιήσεις δημιουργούν σφάλμα στον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting. Η μέθοδος που προτείνεται χρησιμοποιεί και άλλες

μεθόδους για να διορθώσει τη Κατάσταση Φόρτισης χρησιμοποιώντας α) την τάση ανοιχτοκυκλώματος της μπαταρίας και β) αν η ίδια φορτιστεί/εκφορτιστεί πλήρως. Συνεπώς, αν υπάρχει ικανοποιητικός χρόνος ηρεμίας ώστε να διορθωθεί το SoC από την τάση ανοιχτοκυκλώματος ή αν υπάρξει πλήρης φόρτιση ή και πλήρης εκφόρτιση, τότε το Ποσοστό Φόρτισης θα διορθωθεί και τα σφάλματα που περιγράφηκαν παραπάνω θα εκμηδενιστούν. Ο απλός αλγόριθμος Coulomb Counting δεν παρέχει τέτοια δυνατότητα και συνεπώς τα σφάλματα αυτά συσσωρεύονται με την πάροδο του χρόνου.

**Εξάρτηση από την προηγούμενη ή αρχική μέτρηση** Αν η αρχική μέτρηση της Κατάστασης Φόρτισης είναι εσφαλμένη, τότε αυτό το σφάλμα θα διοχετευθεί στον αλγόριθμο Coulomb Counting. Η μέθοδος που προτείνεται δεν μπορεί να διορθώσει αυτό το εν γέννη χαρακτηριστικό του αλγορίθμου. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας τον προσδιορισμό της αρχικής Κατάστασης Φόρτισης χρησιμοποιώντας την Τάση Ανοιχτοκυκλώματος αλλά και την τάση στα άκρα της μπαταρίας κατά την φόρτιση/εκφόρτιση, τότε μπορεί το σφάλμα αυτό να μειωθεί πολύ. Παράλληλα, αν κατά τον προσδιορισμό της Κατάστασης Φόρτισης από την Τάση Ανοιχτοκυκλώματος χρησιμοποιηθούν και δεδομένα όπως η θερμοκρασία, ο χρόνος ηρεμίας και το αν η μπαταρία φορτιζόταν/εκφορτιζόταν (όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.1.3), τότε ο προσδιορισμός της Κατάστασης Φόρτισης θα έχει ακόμα μικρότερο σφάλμα.

**Θερμοκρασία Φόρτισης/Εκφόρτισης** Η χωρητικότητα φόρτισης και εκφόρτισης εξαρτώνται από την θερμοκρασία της μπαταρίας. Ο τροποποιημένος αλγόριθμος Coulomb Counting επιλύει αυτό το πρόβλημα διαιρώντας συνέχεια με την πραγματική χωρητικότητα της μπαταρίας που αυτή εξαρτάται με την θερμοκρασία της. Σε αντίθεση, ο απλός αλγόριθμος Coulomb Counting χρησιμοποιεί συνέχεια την ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας κάτι το οποίο μπορεί να δημιουργήσει μεγάλο σφάλμα αν η μπαταρία χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασία διαφορετική από την ονομαστική.

Στους Πίνακες 5.6 και 5.7 παρουσιάστηκαν αναλυτικά δύο σενάρια όπου ο απλός αλγόριθμος Coulomb Counting δημιουργεί πολύ μεγάλο σφάλμα. Παρακάτω, παρατίθενται ξανά τα δύο σενάρια μαζί με το αποτέλεσμα της μεθόδου που προτείνουμε.

**Πίνακας 5.6:** Σύγκριση απλού αλγορίθμου CC με την προτεινόμενη μέθοδο για φόρτιση σε χαμηλή θερμοκρασία

Περιγραφή	SoC απλού CC	Προτεινόμενη Μέθοδος
Πλήρης εκφόρτιση της μπαταρίας στους 25 °C	0 %	0 %
Αλλαγή της θερμοκρασίας από 25 °C σε 0 °C	0 %	0 %
Φόρτιση της μπαταρίας με CC-CV μέθοδο, χωρίς να αλλάξει η θερμοκρασία. Στο τέλος της φόρτισης και σύμφωνα με το Σχήμα 5.1, η μπαταρία θα απορροφήσει 1.82 A	$\frac{1.82}{2.2} \cdot 100 \% = 82.7 \%$	$\frac{1.82 \text{ Ah}}{1.82 \%} \cdot 100 \% = 100 \%$

**Διαφορά θερμοκρασίας φόρτισης-εκφόρτισης** Το σφάλμα που προκύπτει από την διαφορά στην θερμοκρασία φόρτισης-εκφόρτισης διορθώνεται με την εισαγωγή του LFD και του  $Q_{trapped}$ . Παράδειγμα της μεθόδου υπάρχει στον Πίνακα 5.7.

**Κουλομπική Απόδοση** Στην τροποποιημένη μέθοδο Coulomb Counting, χρησιμοποιείται ανά πάσα χρονική στιγμή η χωρητικότητα φόρτισης είτε η χωρητικότητα εκφόρτισης που έχει η μπαταρία για την συγκεκριμένη θερμοκρασία και ανάλογα αν η μπαταρία φορτίζεται ή εκφορτίζεται. Συνεπώς το φαινόμενο της Κουλομπικής Απόδοσης λαμβάνεται υπόψιν κάτι το οποίο δεν ισχύει με τον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting.



**Πίνακας 5.7:** Σύγκριση απλού αλγορίθμου CC με την προτεινόμενη μέθοδο για **εκφόρτιση** σε χαμηλή θερμοκρασία. Για λόγους απλότητας δεν λαμβάνεται υπόψιν το φαινόμενο που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.2.

Περιγραφή	Εκτίμηση SoC	
Η μπαταρία βρίσκεται στους 4 °C, με SoC = 90 %, δηλαδή έχει αποθηκευμένα $0.9 \cdot 2.18 \text{ Ah} = 1.962 \text{ Ah}$ . Αυτό μπορεί να γίνει, φορτίζοντάς την στους 25 °C και αλλάζοντας την θερμοκρασία στους 4 °C	90 %	90 %
Εκφόρτιση της μπαταρίας μέχρι το κατώτατο όριο τάσης. Συνολικά θα αποδώσει $0.9 \cdot 1.82 \text{ Ah} \approx 1.63 \text{ Ah}$	$\frac{1.962-1.63}{2.2} \cdot 100\% \approx 15.1\%$	0 %

Στον Πίνακα 5.8 παρατίθεται ένα σενάριο σύγκρισης του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting με την μέθοδο που προτείνουμε. Παρατηρούμε πως στο τέλος της φόρτισης ο απλός αλγόριθμος Coulomb Counting έχει εκτιμήσει 100.5 % SoC, καθώς η χωρητικότητα φόρτισης είναι μεγαλύτερη από την χωρητικότητα εκφόρτισης. Η προτεινόμενη μέθοδος υπολογίζει στο τέλος της φόρτισης SoC ίσο με 100 % όπου και είναι το σωστό αποτέλεσμα.

**Πίνακας 5.8:** Σύγκριση του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting με τον τροποποιημένο αλγόριθμο Coulomb Counting. Στο παράδειγμα χρησιμοποιείται μπαταρία με Κουλομπική Απόδοση ίση με 99.5 %.

Περιγραφή	Απλός CC	Προτεινόμενη μέθοδος
Η μπαταρία βρίσκεται στους 20 °C, με SoC = 100 %	100 %	100 %
Εκφόρτιση της μπαταρίας μέχρι το κατώτατο όριο τάσης, χωρίς την αλλαγή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.	0 %	0 %
Φόρτιση της μπαταρίας σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Η συνολική χωρητικότητα που θα πάρει ισούται με $C_{Cha} = \frac{C_{Dis}}{0.995}$	100.5 %	$\frac{C_{Cha}}{C_{cha}} \cdot 100\% = 100\%$

**Κατάσταση Υγείας της μπαταρίας** Στον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting η απομείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας δεν λαμβάνεται υπόψιν κάτι το οποίο μπορεί να δημιουργήσει ποσοστιαίο σφάλμα στην εκτίμηση του Ποσοστού Φόρτισης που ισούται με το Ποσοστό Υγείας της μπαταρίας. Στον τροποποιημένο αλγόριθμο Coulomb Counting εισάγεται η σταθερά  $k$  όπου ισούται με το SoH της μπαταρίας όπου και με αυτόν τον τρόπο η απομείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας λαμβάνεται υπόψιν στην μέθοδο που προτείνεται.

**Αυτοεκφόρτιση** Όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 2.5.11, αν η μπαταρία μείνει σε ηρεμία για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, τότε η ίδια αυτοεκφορτίζεται. Η αυτοεκφόρτιση θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της τάσης ανοιχτοκυκλώματος της μπαταρίας. Στην μέθοδο που προτείνεται, αν η μπαταρία βρεθεί σε ηρεμία για μεγάλο χρονικό διάστημα, τότε η Κατάσταση Φόρτισης επαναυπολογίζεται και διορθώνεται χρησιμοποιώντας την Τάση Ανοιχτοκυκλώματος της μπαταρίας. Συνεπώς, διορθώνοντας τη Κατάσταση Φόρτισης χρησιμοποιώντας την τάση ανοιχτοκυκλώματος, διορθώνεται και το οποιοδήποτε σφάλμα δημιουργείται από την αυτοεκφόρτιση της μπαταρίας.

**Συνοπτικός πίνακας σφαλμάτων**

**Πίνακας 5.9:** Συνοπτικός πίνακας σφαλμάτων και ο τρόπος αντιμετώπισής τους

Πηγή σφάλματος	Τρόπος επίλυσης
Θερμοκρασία φόρτισης/εκφόρτισης	Χρησιμοποιείται η χωρητικότητα της μπαταρίας στην θερμοκρασία που βρίσκεται
Διαφορά θερμοκρασίας φόρτισης-εκφόρτισης	Μέθοδος $LFD$ και $Q_{trapped}$
Κουλομπική Απόδοση	Διαφορετική χωρητικότητα φόρτισης και εκφόρτισης
Κατάσταση Υγείας της μπαταρίας	Σταθερά $k$
Αυτοεκφόρτιση	Η αυτοεκφόρτιση θα προκαλέσει μείωση της τάσης ανοιχτοκυκλώματος. Εφόσον η μπαταρία βρίσκεται σε ηρεμία, θα χρησιμοποιηθεί ο προσδιορισμός του SoC μέσω της Τάσης Ανοιχτοκυκλώματος και συνεπώς θα υπολογιστεί το νέο SoC μετά την αυτοεκφόρτιση

### 5.3 Κατάσταση Υγείας - SoH

Στο Κεφάλαιο 4.2.3 αναλύθηκαν οι τρόποι υπολογισμού της Κατάστασης Υγείας της μπαταρίας, μαζί με τα προτερήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου. Σε αυτό το κεφάλαιο θα προταθεί η μεθοδολογία προσδιορισμού του SoH η οποία καλύπτει όλες τις απαιτήσεις που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 5.1. Η μέθοδος που προτείνεται συνδυάζει την μέθοδο της Ολοκλήρωσης ως προς το ρεύμα αλλά και την Μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης. Παρακάτω θα αναλυθούν τα μειονεκτήματα των δύο αυτών μεθόδων και θα προταθούν τρόποι αντιμετώπισής τους.

#### Ολοκλήρωση ως προς το ρεύμα

Η Ολοκλήρωση ως προς το ρεύμα που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.2.3 είναι η πιο αξιόπιστη μέθοδος υπολογισμού της χωρητικότητας που μπορεί να αποθηκεύσει μία μπαταρία, καθώς είναι η ίδια μέθοδος που χρησιμοποιείται από τους κατασκευαστές μπαταριών για να μετρήσουν την χωρητικότητα των κελιών τους. Η μέθοδος αυτή μετράει τα Ah που αντλούνται από την μπαταρία για μία πλήρη εκφόρτιση, σε συγκεκριμένο ρεύμα και για συγκεκριμένη θερμοκρασία. Ωστόσο, η υλοποίησή της είναι αρκετά δύσκολη καθώς κατά την εκφόρτιση η ένταση ρεύματος της μπαταρίας δεν είναι σταθερή αλλά και ούτε είναι ίση με αυτήν που ορίζει ο κατασκευαστής. Παράλληλα, η εκφόρτιση μπορεί να λάβει χώρα σε θερμοκρασία διαφορετική από αυτήν που χρησιμοποιεί ο κατασκευαστής για να μετρήσει την ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας.

**Εκφόρτιση με διαφορετικό ρεύμα** Η εκφόρτιση θα πρέπει να γίνει με σταθερό ρεύμα και ίσο με αυτό που ορίζει ο κατασκευαστής ή με κάποια ένταση ρεύματος επιλογής. Στις περισσότερες εκφορτίσεις των μπαταριών η ένταση του ρεύματος αυξομειώνεται και συνεπώς δεν είναι δυνατή η εφαρμογή της μεθόδου σε τέτοιες εφαρμογές.

**Διαφορετική χωρητικότητα** Η χωρητικότητα εκφόρτισης μίας μπαταρίας εξαρτάται από την θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται, όπως και αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5.2. Η θερμοκρασία της μπαταρίας κατά την χρήση τείνει να αυξηθεί καθώς η μπαταρία περιέχει εσωτερική αντίσταση όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.5.4. Παράλληλα, η αλλαγή της θερμοκρασία περιβάλλοντος θα επηρεάσει και την θερμοκρασία της μπαταρίας κάτι το οποίο θα έχει επίπτωση στην χωρητικότητα εκφόρτισης. Συνεπώς, η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο αν η θερμοκρασία της μπαταρίας παραμένει σταθερή, καθώς σε διαφορετική περίπτωση θα

πρέπει να ληφθεί υπόψιν το πως η αλλαγή της θερμοκρασίας κατά την χρήση του αλγορίθμου επηρεάζει την χωρητικότητα της μπαταρίας.

### Μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης

Η μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του SoH όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2.5.4. Ωστόσο, η χρήση αυτής της μεθόδου από ένα Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών είναι δύσκολη καθώς θα πρέπει να βρεθεί παλμός ρεύματος φόρτισης ή εκφόρτισης σε συγκεκριμένο SoC ώστε να μετρηθεί η διαφορά τάσης στα άκρα της μπαταρίας και να προσδιοριστεί η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας με την χρήση του νόμου του Ohm.

#### 5.3.1 Προτεινόμενη Μεθοδολογία

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που προτείνεται. Περιληπτικά, χρησιμοποιείται η μέθοδος της Ολοκλήρωσης ως προς το ρεύμα αλλά και η μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης, με διάφορες παραλλαγές όπως και αναλύονται παρακάτω. Η χρήση της μεθόδου Ολοκλήρωσης ως προς το ρεύμα είναι η πρωταρχική μέθοδος υπολογισμού του SoH καθώς είναι η πιο αξιόπιστη και με μικρότερο σφάλμα. Ωστόσο, για μεγάλο χρονικό διάστημα δεν υπάρξει πλήρης εκφόρτιση και πλήρης φόρτιση της μπαταρίας, τότε χρησιμοποιείται η μέθοδος Μέτρησης της εσωτερικής αντίστασης κατά τη φόρτιση. Στα επόμενα κεφάλαια θα αναλυθεί το πως οι δύο αυτοί αλγόριθμοι προτείνονται.

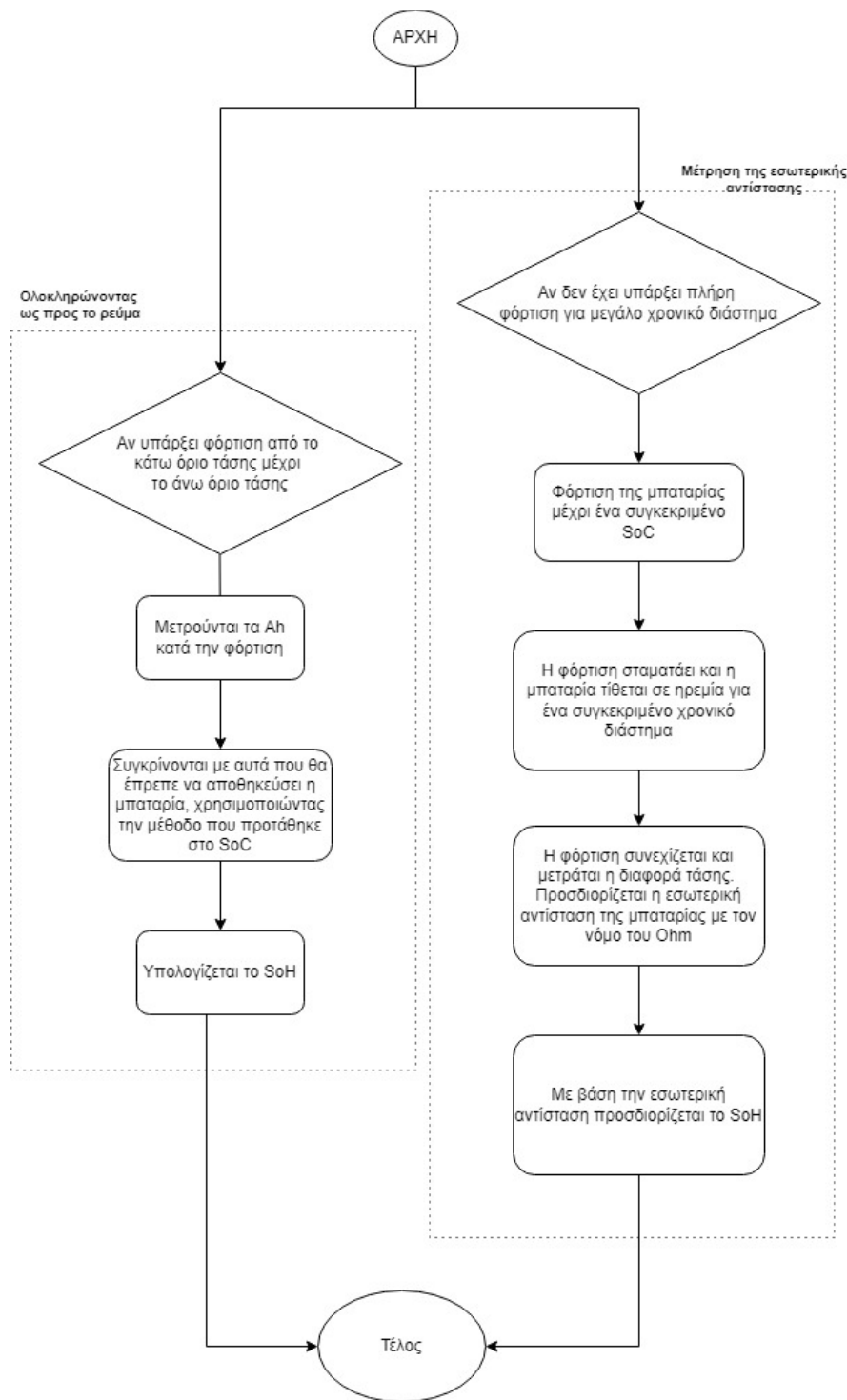
#### Ολοκλήρωση ως προς το ρεύμα

Ο Fangfang Yang κ.ά. [48] έχουν αποδείξει πως η Κουλομπική Απόδοση μίας μπαταρίας Ιόντων Λιθίου παραμένει σταθερή όσο το SoH της μπαταρίας μειώνεται. Το προηγούμενο φαίνεται στο Σχήμα 5.6, όπου και η Κουλομπική Απόδοση παρουσιάζει μία πολύ μικρή (αμελητέα) μεταβολή όσο οι κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης αυξάνονται. Εφόσον η Κουλομπική Απόδοση παραμένει σταθερή και η χωρητικότητα εκφόρτισης της μπαταρίας μειώνεται όσο αυξάνονται οι κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης, τότε αυτό προϋποθέτει πως και η χωρητικότητα φόρτισης μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό. Συνεπώς, μετρώντας τη χωρητικότητα εκφόρτισης μπορεί να προσδιοριστεί το SoH της μπαταρίας.

Η μέθοδος της Ολοκλήρωσης ως προς το ρεύμα χρησιμοποιείται όταν η μπαταρία είναι άδεια και φορτιστεί πλήρως (με τα όρια που ορίζονται στον Πίνακα 5.5). Η μέθοδος μετράει τα συνολικά Ah που απορρόφησε η μπαταρία και τα συγκρίνει με αυτά που θα απορροφούσε μία καινούρια μπαταρία. Επιλέχθηκε η εφαρμογή της μεθόδου αυτής κατά την φόρτιση, καθώς, στις περισσότερες εφαρμογές η φόρτιση γίνεται με το ίδιο ρεύμα και συνεπώς η ένταση του ρεύματος δεν θα επηρεάσει την συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας.

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος επηρεάζει την χωρητικότητα που θα αποθηκεύσει η μπαταρία, ιδίως αν αυτή μεταβληθεί κατά την φόρτιση. Ωστόσο, αν χρησιμοποιηθεί η μέθοδος προσδιορισμού του SoC (θέτοντας  $k = 1$  στην Εξίσωση 5.6) που προτάθηκε, τότε, οποιαδήποτε μεταβολή στην θερμοκρασία θα ληφθεί υπόψιν από τον αλγόριθμο και στο τέλος της φόρτισης, το υπολογισμένο SoC από τον αλγόριθμο που προτάθηκε θα ισούται με το SoH της μπαταρίας.

Συνεπώς, αν η μπαταρία εκφορτιστεί και φορτιστεί πλήρως, υπάρχει η δυνατότητα να προσδιοριστεί η Κατάσταση Υγείας με πολύ μεγάλη ακρίβεια ενώ η θερμοκρασία ή η μεταβολή της θερμοκρασίας δεν δημιουργεί σφάλμα στο υπολογισμένο SoH.

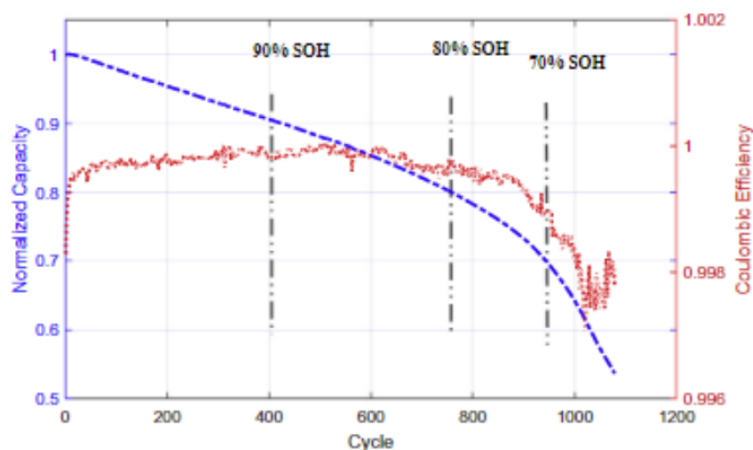


Σχήμα 5.5: Διάγραμμα ροής της μεθόδου υπολογισμού του SoH που προτείνεται.

### Μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης

Η μέθοδος της Ολοκλήρωσης ως προς το ρεύμα είναι η πρωταρχική μέθοδος υπολογισμού του SoH, όμως η ίδια απαιτεί την ύπαρξη μίας πλήρους φόρτισης της μπαταρίας. Κάτι τέτοιο, ίσως είναι αδύνατο να συμβεί σε εφαρμογές όπου και η μπαταρία σπάνια εκφορτίζεται και φορτίζεται πλήρως. Συνεπώς, η ύπαρξη μίας μεθόδου που θα μπορεί να υπολογίσει το SoH σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητη.

Όπως αναλύθηκε και στις παραπάνω παραγράφους, στις περισσότερες εφαρμογές που χρησιμοποιούν μπαταρίες, η ένταση ρεύματος κατά την φόρτιση είναι ίδια κάθε φορά. Συνεπώς, η φόρτιση μπορεί να σταματήσει σε μία συγκεκριμένη Κατάσταση Φόρτισης όπου και η μπατα-



**Σχήμα 5.6:** Χωρητικότητα εκφόρτισης και Κουλομπική απόδοση μίας μπαταρίας NMC σε συνάρτηση με τους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης. Εξήχθη από την αναφορά [48].

ρία θα βρεθεί σε ηρεμία για μικρό χρονικό διάστημα. Μεγαλύτερο διάστημα ηρεμίας θα φέρει την τάση την μπαταρίας πιο κοντά στην τάση ανοιχτοκυκλώματος, κάτι το οποίο θα αυξήσει την ακρίβεια της μέτρησης. Στη συνέχεια, η φόρτιση θα συνεχίσει, όπου και το Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών θα μετρήσει την διαφορά τάσης μεταξύ της ηρεμίας και της στιγμής που η φόρτιση ξεκινάει. Τέλος, χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm, θα υπολογιστεί η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας που έχει εκείνη την χρονική στιγμή. Έπειτα, θα υπολογιστεί η διαφορά μεταξύ της εσωτερικής αντίστασης που παρουσιάζει η μπαταρία την στιγμή της μέτρησης και της εσωτερικής αντίστασης που αυτή είχε όταν ήταν καινούρια. Το προηγούμενο συμβολίζεται με  $\Delta IR$  και υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta IR = IR_{now} - IR_{new}$$

όπου  $IR_{now}$  είναι η εσωτερική αντίσταση που έχει η μπαταρία την στιγμή της μέτρησης και  $IR_{new}$  είναι η αντίσταση της μπαταρίας που αυτή είχε όταν ήταν καινούρια.

Τέλος, το  $\Delta IR$  που υπολογίστηκε θα αναζητηθεί σε έναν πίνακα αναζήτησης (look-up table) ώστε να αντιστοιχηθεί στο ζητούμενο SoH.

Χρησιμοποιώντας την μεταβολή της εσωτερικής αντίστασης και όχι την εσωτερική αντίσταση για τον προσδιορισμό του SoH επιτρέπει την σύγκριση μπαταριών (ίδιου τύπου) ακόμα και αν αυτές παρουσιάζουν διαφορετική αρχική εσωτερική αντίσταση που μπορεί να προκληθεί από ατέλειες κατά την παραγωγή.

Η στιγμή της δειγματοληψίας της τάσης και της έντασης του ρεύματος αφήνεται στην διακριτική ευχέρεια του μηχανικού που υλοποιεί την παρούσα μέθοδο. Στο Κεφάλαιο 6.2, θα αναλυθεί μία τέτοια προσέγγιση αλλά και το πως η δειγματοληψία επηρεάζει την ακρίβεια της μεθόδου υπολογισμού του SoH για μία μπαταρία ιόντων λιθίου.



## Κεφάλαιο 6

# Πειραματικές Μετρήσεις

### 6.1 Κατάσταση Φόρτισης

Στο Κεφάλαιο αυτό θα χρησιμοποιηθούν μετρήσεις μίας πραγματικής μπαταρίας για να επαληθευτεί ο αλγόριθμος υπολογισμού του SoC που προτείνεται. Αρχικά, θα αναλυθεί η δομή και το περιεχόμενο των μετρήσεων ενώ στη συνέχεια θα αντληθούν οι πληροφορίες που απαιτούνται για να λειτουργήσει ο αλγόριθμος. Τέλος, ο τρόπος υπολογισμού που προτείνεται μαζί με την μέθοδο του απλού Coulomb Counting θα συγκριθούν με το SoC που υπολογίστηκε από την τάση ανοιχτοκυκλώματος της μπαταρίας, καθώς όπως και αναλύθηκε παραπάνω, η μέθοδος αυτή θεωρείται η πιο ασφαλής για τον προσδιορισμό της Κατάστασης Φόρτισης.

Ο αλγόριθμος του SoC θα επαληθευτεί σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, θα χρησιμοποιηθούν μετρήσεις στους 25 °C όπου και ο αλγόριθμος που προτείνεται θα κληθεί να εκτιμήσει το SoC όταν η μπαταρία φορτιστεί και εκφορτιστεί χωρίς να υπάρχει αλλαγή θερμοκρασίας. Στο δεύτερο μέρος, η μπαταρία θα φορτιστεί και εκφορτιστεί σε διαφορετική θερμοκρασία, όπου και θα αναλυθεί η εκτίμηση του SoC. Πιο συγκεκριμένα, το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει φόρτιση της μπαταρίας στους 25 °C και θα εκφόρτιση στους -20 °C. Οι θερμοκρασίες 25 °C και -20 °C επιλέχθηκαν καθώς είναι οι θερμοκρασίες που η μπαταρία παρουσιάζει την μέγιστη και την ελάχιστη χωρητικότητά της και συνεπώς η δυσκολότερη περίπτωση εκτίμησης του SoC.

#### 6.1.1 Σύνολο Δεδομένων

**Στοιχεία μπαταρίας** Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν [38] για την επιβεβαίωση του αλγορίθμου SoC είναι ελεύθερα προσβάσιμα από το διαδίκτυο υπό την άδεια CC BY 4.0. Δημοσιεύθηκαν από το McMaster University στο Οντάριο του Καναδά και περιλαμβάνουν πολλές φορτίσεις-εκφορτίσεις μίας καινούριας μπαταρίας ιόντων λιθίου. Η μπαταρία είναι μία κυλινδρική LG HG2 όπου και στον Πίνακα 6.1 παρατίθεται τα χαρακτηριστικά της.

**Πίνακας 6.1:** Χαρακτηριστικά της μπαταρίας ιόντων λιθίου LG HG2. Δεδομένα από το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή [32]

Άνω όριο τάσης	4.2 V
Κάτω όριο τάσης	2.5 V
Ονομαστική τάση	3.6 V
0.2 C Χωρητικότητα	3 Ah
1 C Χωρητικότητα	2.886 Ah

Ωστόσο, οι δημιουργοί του Συνόλου Δεδομένων έχουν θέσει πιο αυστηρό κάτω όριο τάσης της μπαταρίας. Ο κατασκευαστής θέτει ως κατώτατο όριο τάσης τα 2.5 V, ενώ στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν η εκφόρτιση σταματάει όταν η τάση φτάσει τα 2.8 V. Η επιλογή ενός διαφορετικού κάτω ορίου τάσης δημιουργεί και διαφορά στην χωρητικότητα εκφόρτισης της μπαταρίας η οποία και θα υπολογιστεί σε παρακάτω κεφάλαιο.

**Η μεθοδολογία των μετρήσεων** Μία καινούρια μπαταρία LG HG2 τοποθετήθηκε σε έναν θερμικό θάλαμο ο οποίος έχει την ικανότητα να αυξομειώσει την θερμοκρασία περιβάλλοντος της μπαταρίας. Η μπαταρία συνδέθηκε με συσκευή που έχει την ικανότητα να φορτίζει και να εκφορτίζει την μπαταρία είτε με σταθερό είτε με μεταβλητό ρεύμα. Παράλληλα, μια συσκευή μέτρησης της τάσης συνδέθηκε στους ακροδέκτες της για να καταγράφει την τάση της μπαταρίας. Τέλος, η θερμοκρασία της μπαταρίας καταγράφεται από διαφορετική συσκευή κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Στόχος της διάταξης είναι να καταγράψει την ένταση του ρεύματος, την τάση στα άκρα της μπαταρίας αλλά και την θερμοκρασία της μπαταρίας για μία σειρά από φορτίσεις και εκφορτίσεις.

**Μετρήσεις** Οι μετρήσεις που έλαβαν χώρα με την διάταξη της παραπάνω παραγράφου προσπαθούν να αποτυπώσουν την συμπεριφορά της μπαταρίας σε όλο το εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας της. Το σύνολο δεδομένων περιέχει μία συλλογή μετρήσεων η οποία έχει επαναληφθεί 6 φορές όπου και κάθε φορά έγινε σε διαφορετική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι μετρήσεις έγιναν στους  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  και  $40^{\circ}\text{C}$ .

Η συλλογή μετρήσεων παρατίθεται στον Πίνακα 6.2. Κάθε σειρά αναφέρεται σε μία πλήρη φόρτιση ή μία πλήρη εκφόρτιση. Όλες οι εκφορτίσεις γίνονται στην υπό-εξέταση θερμοκρασία, δηλαδή στους  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  ή στους  $40^{\circ}\text{C}$ . Ωστόσο, οι φορτίσεις γίνονται πάντα στους  $25^{\circ}\text{C}$ , εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά.

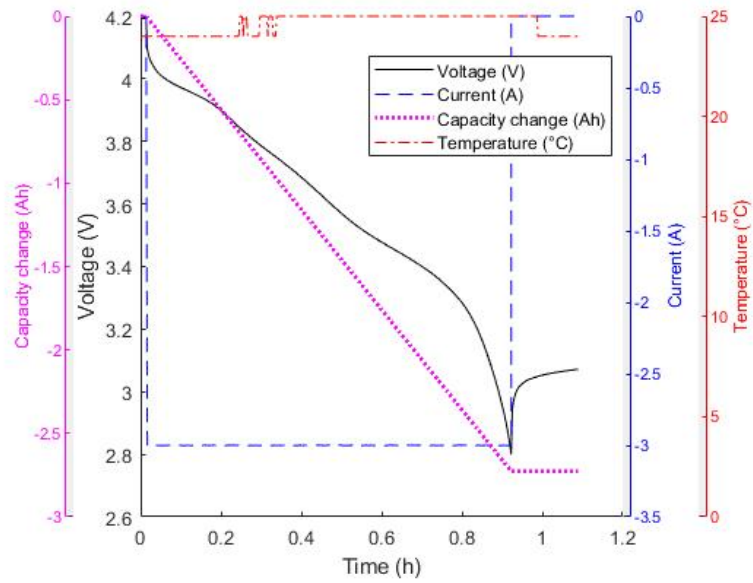
Το σύνολο δεδομένων περιλαμβάνει φορτίσεις και εκφορτίσεις υπό σταθερή ένταση ρεύματος αλλά και εκφορτίσεις που ακολουθούν κάποια δημοφιλή προφίλ οδήγησης. Το προφίλ οδήγησης είναι ένα σύνολο από δεδομένα τα οποία μπορεί να περιγράφουν την ταχύτητα του οχήματος σε συνάρτηση με τον χρόνο ή την ένταση του ρεύματος σε συνάρτηση με τον χρόνο. Τα προφίλ δημιουργούνται από ορισμένους οργανισμούς και έχουν ως σκοπό να καθιερώσουν ορισμένο προφίλ οδήγησης όπου και με βάση αυτό, οι κατασκευαστές των οχημάτων υπολογίζουν διάφορα στατιστικά για τα οχήματα που παράγουν, όπως για παράδειγμα την κατανάλωση/χλμ. Τέτοια προφίλ μπορεί να είναι το UDDS, LA92, HWFET, US06 κ.ά. Το σύνολο δεδομένων περιλαμβάνει και 9 διαφορετικά προφίλ οδήγησης με ονομασία Mixed1, Mixed2, ..., Mixed9 που έχουν παραχθεί από τους δημιουργούς του συνόλου δεδομένων.



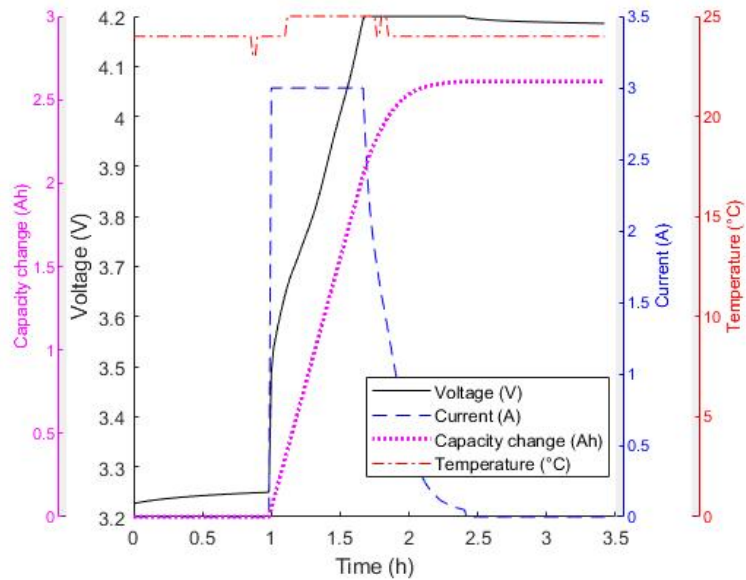
**Πίνακας 6.2:** Συλλογή των μετρήσεων που λαμβάνει χώρα στους  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  και  $40^{\circ}\text{C}$ .

Όνομα Μέτρησης	Περιγραφή
Charge.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$
HPPC_XXdegC_LGHHG2.mat	Πλήρης εκφόρτιση με προφίλ HPPC
C20DisCh_XXdegC_LGHHG2.mat	Εκφόρτιση και φόρτιση (χωρίς να αλλάξει θερμοκρασία) με ένταση ρεύματος $0.2\text{C}$
Dis_0p5C_XXdegC_LGHHG2.mat	Εκφόρτιση με $0.5\text{C}$
Dis_2C_XXdegC_LGHHG2.mat	Εκφόρτιση με $2\text{C}$
Charge1.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$
Cap_1C_XXdegC_LGHHG2.mat	Εκφόρτιση με $1\text{C}$
Charge2.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$ στους $25^{\circ}\text{C}$
UDDS_XXdegC_LGHHG2.mat	Πλήρης εκφόρτισης με προφίλ UDDS
Charge3.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$
HWFET_XXdegC_LGHHG2.mat	Πλήρης εκφόρτισης με προφίλ HWFET
Charge4.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$
LA92_XXdegC_LGHHG2.mat	Πλήρης εκφόρτισης με προφίλ LA92
Charge5.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$
US06_XXdegC_LGHHG2.mat	Πλήρης εκφόρτισης με προφίλ US06
Charge6.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$
Mixed1_XXdegC_LGHHG2.mat	Πλήρης εκφόρτιση με το Μεικτό Προφίλ 2 (Mixed2)
Charge7.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$
Mixed2_XXdegC_LGHHG2.mat	Πλήρης εκφόρτιση με το Μεικτό Προφίλ 2 (Mixed2)
Charge8.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$
Cap_1C_XXdegC_LGHHG2.mat	Πλήρης εκφόρτιση με $1\text{C}$
Charge9.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$
Mixed3_XXdegC_LGHHG2.mat	Πλήρης εκφόρτιση με το Μεικτό Προφίλ 3 (Mixed3)
Charge10.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$
Mixed4_XXdegC_LGHHG2.mat	Πλήρης εκφόρτιση με το Μεικτό Προφίλ 4 (Mixed4)
Charge11.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$
Mixed5_XXdegC_LGHHG2.mat	Πλήρης εκφόρτιση με το Μεικτό Προφίλ 5 (Mixed5)
Charge12.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$
Mixed6_XXdegC_LGHHG2.mat	Πλήρης εκφόρτιση με το Μεικτό Προφίλ 6 (Mixed6)
Charge13.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$
Mixed7_XXdegC_LGHHG2.mat	Πλήρης εκφόρτιση με το Μεικτό Προφίλ 7 (Mixed7)
Charge14.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$
Mixed8_XXdegC_LGHHG2.mat	Πλήρης εκφόρτιση με το Μεικτό Προφίλ 8 (Mixed8)
Charge15.mat	Πλήρης φόρτιση της μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$

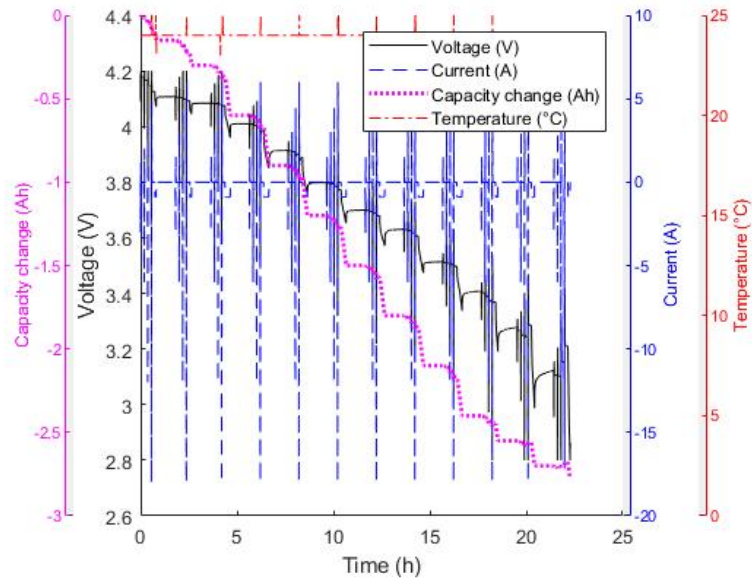
## Παράδειγμα μετρήσεων



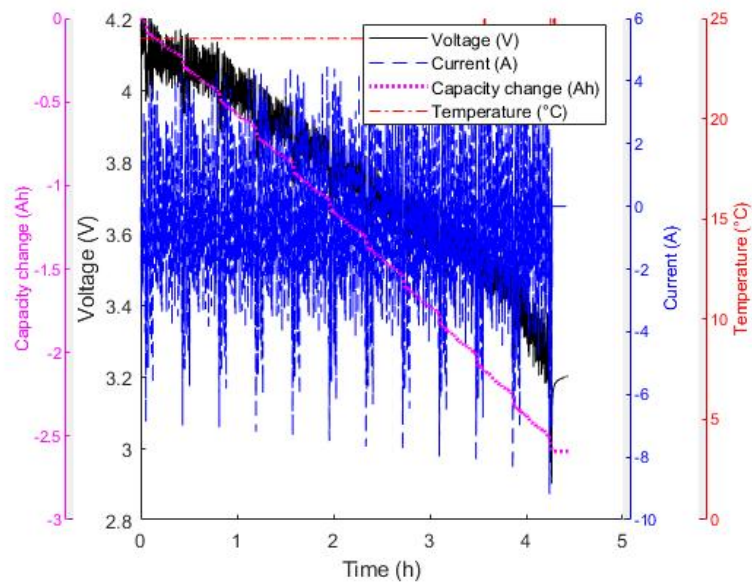
Σχήμα 6.1: Εκφόρτιση με ένταση ρεύματος 1 C στους 25 °C



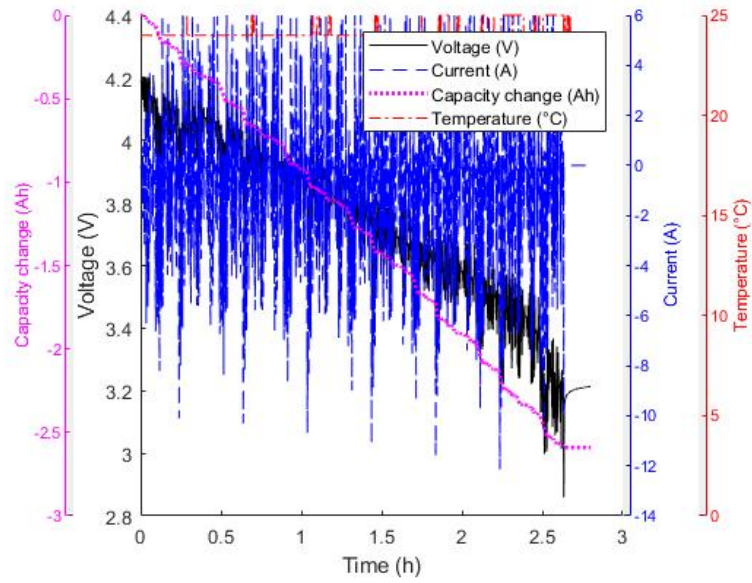
Σχήμα 6.2: Φόρτιση της μπαταρίας σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή στους 25 °C



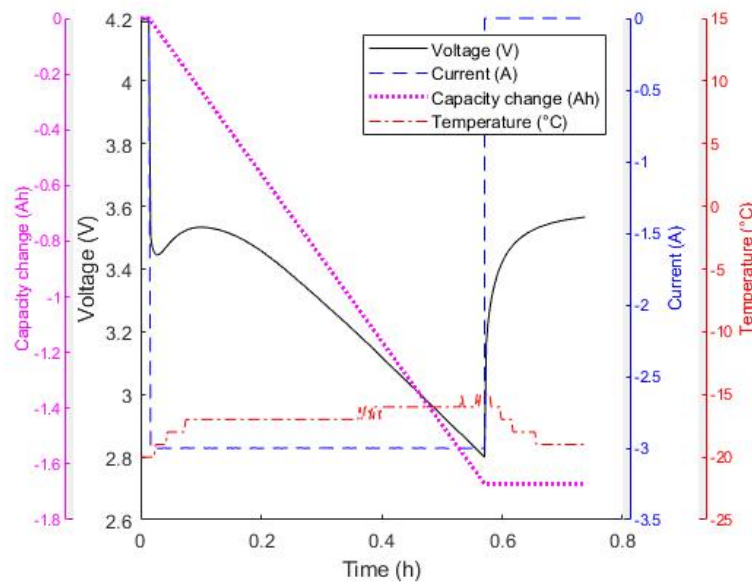
Σχήμα 6.3: HPPC προφίλ εκφόρτισης στους 25 °C



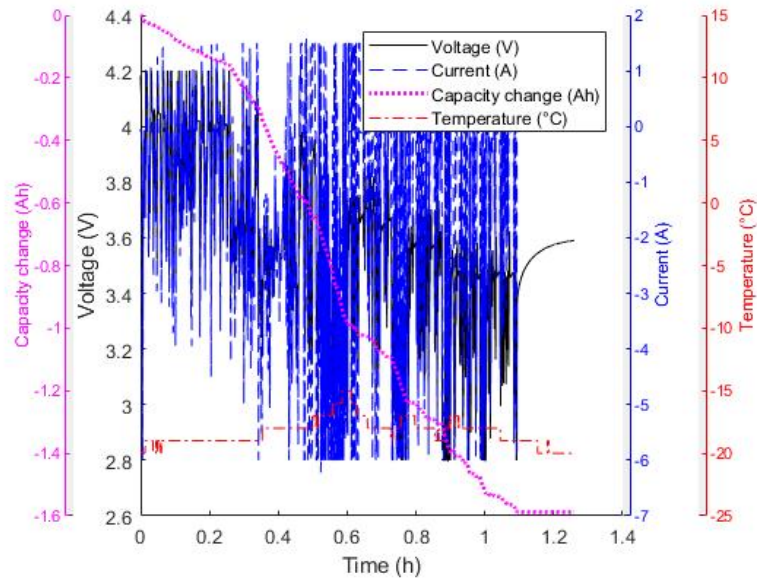
Σχήμα 6.4: UDDS προφίλ εκφόρτισης στους 25 °C



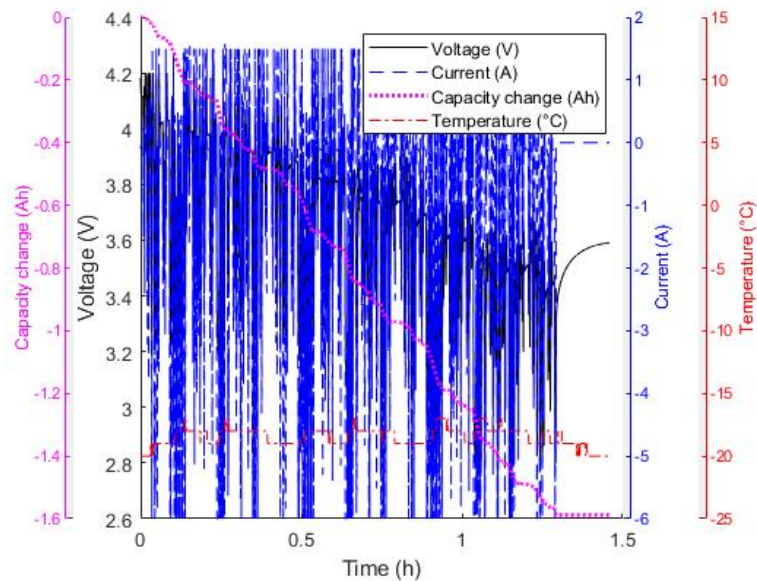
Σχήμα 6.5: LA92 προφίλ εκφόρτισης στους 25 °C



Σχήμα 6.6: Εκφόρτιση με ένταση ρεύματος ίση με 1 C στους -20 °C



Σχήμα 6.7: UDDS προφίλ εκφόρτισης στους  $-20^{\circ}\text{C}$



Σχήμα 6.8: LA92 προφίλ εκφόρτισης στους  $-20^{\circ}\text{C}$

### 6.1.2 Εξαγωγή δεδομένων

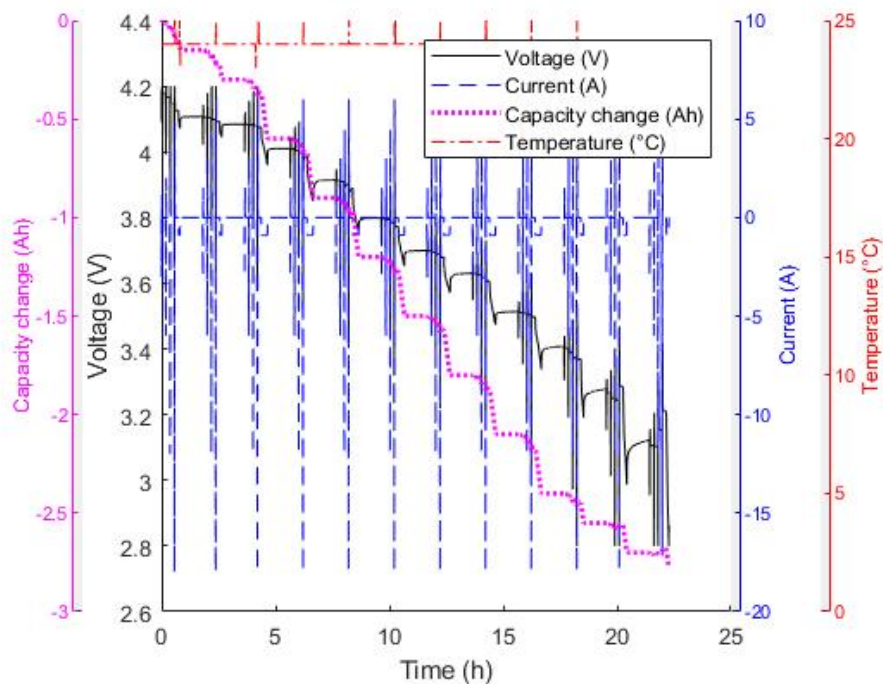
Για να λειτουργήσει ο αλγόριθμος υπολογισμού του SoC σωστά, θα πρέπει να αντληθούν από τις μετρήσεις ορισμένα δεδομένα τα οποία και ο αλγόριθμος θα τα χρησιμοποιήσει για τον υπολογισμό του SoC.

#### Τάση ανοιχτοκυκλώματος - SoC

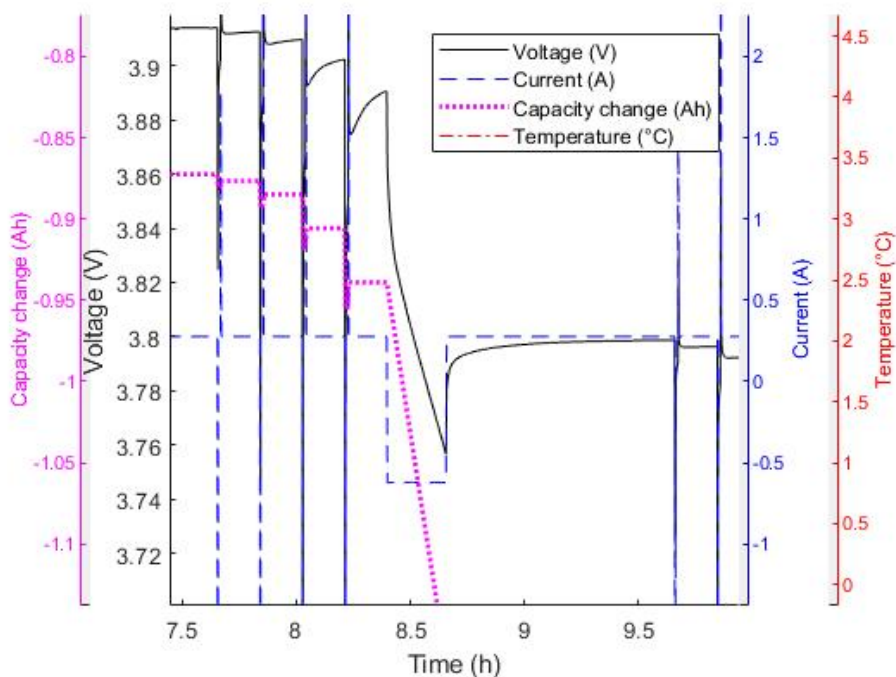
Για την επαλήθευση του αλγορίθμου θα συγκρίνουμε το υπολογισμένο SoC με το SoC που έχει υπολογιστεί με βάση την τάση ανοιχτοκυκλώματος. Για τον λόγο αυτό, θα χρειαστεί να

προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ της τάσης ανοιχτοκυκλώματος και του ποσοστού φόρτισης. Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.1.3, η τάση ανοιχτοκυκλώματος εξαρτάται από τον χρόνο ηρεμίας (με το σφάλμα να ελαττώνεται όσο ο χρόνος ηρεμίας αυξάνεται), από την θερμοκρασία, από το SoH και από το αν η μπαταρία φορτιζόταν ή εκφορτιζόταν. Στην παρούσα περίπτωση, το SoH δεν θα ληφθεί υπόψιν καθώς η εξαγωγή της καμπύλης OCV-SoC γίνεται 2 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης πριν ξεκινήσουν οι μετρήσεις. Παράλληλα, λόγω της φυσιολογίας των μετρήσεων, η σύγκριση του αλγορίθμου που προτείνεται γίνεται πάντα κατά την εκφόρτιση, συνεπώς δεν υπάρχει η ανάγκη να προσδιοριστεί η καμπύλη OCV-SoC κατά την φόρτιση παρά μόνο η καμπύλη OCV-SOC κατά την εκφόρτιση.

Για την συσχέτιση SoC-OCV θα χρησιμοποιηθεί η μέτρηση HPPC, η οποία αποτελείται από ορισμένους παλμούς έντασης ρεύματος που λαμβάνουν χώρα ανά ορισμένα ποσοστά SoC. Στο Σχήμα 6.9 παρατίθεται η μέτρηση HPPC που έγινε στους 25 °C. Παρατηρούμε πως ανάμεσα στους παλμούς έντασης υπάρχει παλμός εκφόρτισης και στη συνέχεια μεσολαβεί ένας ορισμένος χρόνος ηρεμίας μέχρι να ξεκινήσουν πάλι οι παλμοί έντασης ρεύματος. Στο Σχήμα 6.10 αποτελεί μεγέθυνση του Σχήματος 6.9 και διακρίνονται οι παλμοί έντασης ρεύματος, ο παλμός εκφόρτισης και στη συνέχεια η ηρεμία που λαμβάνει χώρα.



Σχήμα 6.9: Μέτρηση HPPC από το σύνολο δεδομένων.

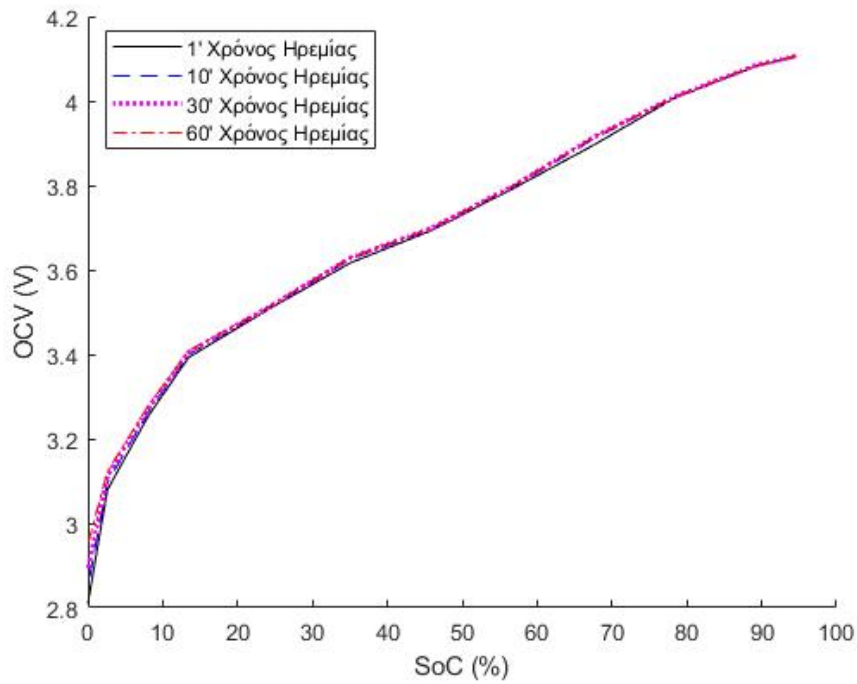


Σχήμα 6.10: Παλμός HPPC από το σύνολο δεδομένων.

Για να προσδιοριστεί η σχέση OCV-SoC, μετά το πέρας κάθε παλμού εκφόρτισης υπολογίζεται το νέο SoC της μπαταρίας και στη συνέχεια η τάση στα άκρα της δειγματοληπτείται. Το προηγούμενο, γίνεται επαναληπτικά μέχρις ότου η μπαταρία να εκφορτιστεί πλήρως. Στον Πίνακα 6.3 παρατίθενται η τάση ανοιχτοκυκλώματος της μπαταρίας σε συνάρτηση του SoC και διαφορετικό χρόνο ηρεμίας.

Πίνακας 6.3: OCV-SOC στους 25 °C

SoC	Χρόνος Ηρεμίας			
	1'	10'	30'	60'
100 %	4.19641	4.1922	4.18849	4.18579
94.59 %	4.10438	4.10589	4.10674	4.10691
89.18 %	4.08162	4.08314	4.08381	4.08415
78.34 %	4.00661	4.00897	4.00981	4.00998
67.53 %	3.89519	3.90952	3.91339	3.91407
56.72 %	3.79186	3.79523	3.79793	3.7986
45.89 %	3.69325	3.69696	3.69864	3.69915
35.08 %	3.61672	3.62481	3.62869	3.62987
24.26 %	3.508	3.51069	3.51255	3.51373
13.44 %	3.39236	3.39961	3.405	3.40804
8.02 %	3.25296	3.26274	3.2715	3.27706
2.60 %	3.07934	3.09653	3.11221	3.12266
0 %	2.81	2.85	2.89	2.95



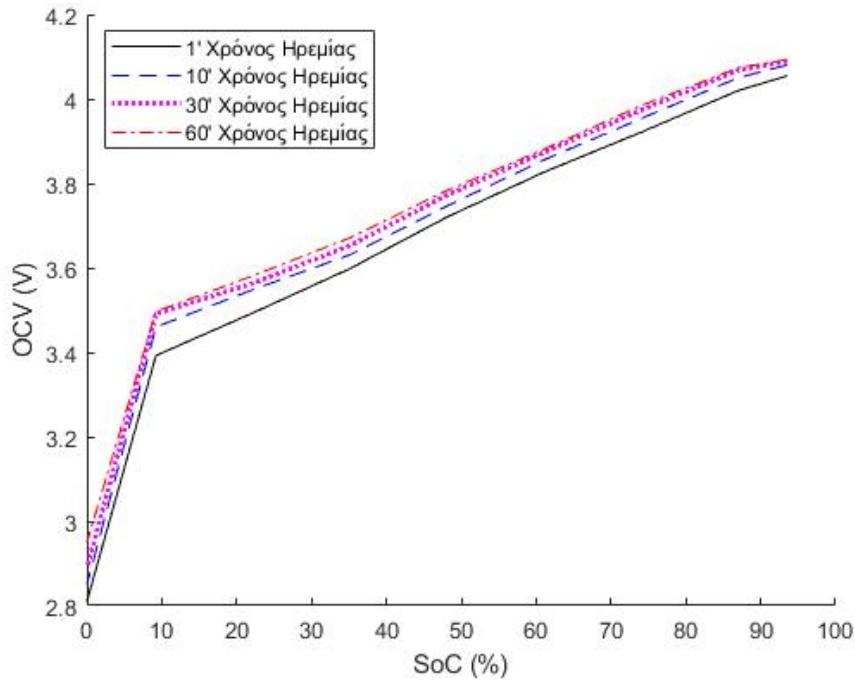
Σχήμα 6.11: Διάγραμμα τάσης ανοιχτοκυκλώματος σε συνάρτηση του SoC στους 25 °C

Με την ίδια μέθοδο προσδιορίζεται η σχέση της Τάσης Ανοιχτοκυκλώματος με το SoC για όταν η μπαταρία βρίσκεται στους  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Τα αποτελέσματα παραθέτονται στον Πίνακα 6.4 και στο Σχήμα 6.12.

Πίνακας 6.4: OCV-SOC στους  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

SoC	Χρόνος Ηρεμίας			
	1'	10'	30'	60'
93.51 %	4.05448	4.0801	4.08904	4.09292
97.02 %	4.01993	4.05027	4.0678	4.0737
74.06 %	3.92132	3.95368	3.97374	3.98436
61.1 %	3.82692	3.85591	3.87361	3.88103
48.12 %	3.72056	3.74668	3.77231	3.78343
35.15 %	3.59835	3.63105	3.65279	3.67117
22.19 %	3.4935	3.54845	3.56362	3.58132
9.22 %	3.39236	3.46012	3.49097	3.49653
0 %	2.81	2.85	2.89	2.95





Σχήμα 6.12: Διάγραμμα τάσης ανοιχτοκυκλώματος σε συνάρτηση του SoC στους  $-20^{\circ}\text{C}$

### Χωρητικότητα μπαταρίας στους $25^{\circ}\text{C}$

Για την χρήση του αλγορίθμου που προτείνεται είναι απαραίτητη η γνώση της χωρητικότητας εκφόρτισης/φόρτισης της μπαταρίας. Θα θεωρήσουμε ως χωρητικότητα εκφόρτισης την χωρητικότητα της μπαταρίας όταν αυτή εκφορτιστεί με ρεύμα ίσο με  $\frac{C}{3} = 0.9\text{ A}$ . Για τους  $25^{\circ}\text{C}$ , η χωρητικότητα της μπαταρίας αν φορτιστεί στους  $25^{\circ}\text{C}$  (με τον τρόπο που ορίζει ο κατασκευαστής) ισούται με  $2.79\text{ Ah}$  ενώ αν εκφορτιστεί με σταθερή ένταση ρεύματος  $0.9\text{ A}$ , η χωρητικότητα εκφόρτισης ισούται με  $2.777\text{ Ah}$ . Τα δεδομένα αυτά αντλήθηκαν από την μέτρηση HPPC (που εκφορτίζει με παλμούς έντασης  $0.9\text{ Ah}$ ) και χρησιμοποιώντας τον συντελεστή της Κουλομπικής Απόδοσης που παρουσιάζει η μπαταρία.

### $LFD_{25^{\circ}\text{C} \rightarrow -20^{\circ}\text{C}}$

Το  $LFD_{25^{\circ}\text{C} \rightarrow -20^{\circ}\text{C}}$  παρουσιάζει την χωρητικότητα που εγκλωβίζεται στην μπαταρία και δεν μπορεί να αντληθεί αν, στους  $25^{\circ}\text{C}$  η μπαταρία φορτιστεί πλήρως και στη συνέχεια εκφορτιστεί στους  $-20^{\circ}\text{C}$ . Ο υπολογισμός του  $LFD_{25^{\circ}\text{C} \rightarrow -20^{\circ}\text{C}}$  από τα δεδομένα είναι εύκολος καθώς είναι ήδη γνωστή η χωρητικότητα  $Q_{cha,25^{\circ}\text{C} \rightarrow dis,25^{\circ}\text{C}}$  ενώ η χωρητικότητα  $Q_{cha,25^{\circ}\text{C} \rightarrow dis,-20^{\circ}\text{C}}$  υπολογίζεται από την μέτρηση HPPC που έλαβε χώρα στους  $-20^{\circ}\text{C}$ , καθώς πριν την μέτρηση HPPC, η μπαταρία είχε φορτιστεί στους  $25^{\circ}\text{C}$ .

Η χωρητικότητα  $Q_{cha,25^{\circ}\text{C} \rightarrow dis,-20^{\circ}\text{C}}$  ισούται με  $2.31\text{ Ah}$ , συνεπώς

$$LFD_{25^{\circ}\text{C} \rightarrow -20^{\circ}\text{C}} = Q_{cha,25^{\circ}\text{C} \rightarrow dis,25^{\circ}\text{C}} - Q_{cha,25^{\circ}\text{C} \rightarrow dis,-20^{\circ}\text{C}} = 2.777\text{ Ah} - 2.31\text{ Ah} = 0.467\text{ Ah}.$$

### Χωρητικότητα μπαταρίας στους $-20^{\circ}\text{C}$

Η χωρητικότητα στους  $-20^{\circ}\text{C}$  ορίζεται ως την χωρητικότητα της μπαταρίας αν φορτιστεί και εκφορτιστεί στους  $-20^{\circ}\text{C}$ . Το προηγούμενο δεν μπορεί να οριστεί καθώς η μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε δεν είναι δυνατόν να φορτιστεί σε θερμοκρασίες κάτω του μηδενός, χωρίς

να φθαρεί. Συνεπώς, όταν η μπαταρία εκφορτίζεται σε θερμοκρασία κάτω του μηδενός, τότε αναγκαστικά η φόρτιση θα έχει γίνει για θερμοκρασία πάνω από το μηδέν. Για αυτόν τον λόγο, ως χωρητικότητα στους  $-20^{\circ}\text{C}$  θα χρησιμοποιηθεί η χωρητικότητα  $Q_{cha,25^{\circ}\text{C}\rightarrow dis,-20^{\circ}\text{C}}$ .

Ιδεατά, θα έπρεπε να βρεθεί η αληθινή χωρητικότητα της μπαταρίας  $Q_{cha,-20^{\circ}\text{C}\rightarrow dis,-20^{\circ}\text{C}}$  ή αντί για τους  $-20^{\circ}\text{C}$  να είχε επιλεχθεί θερμοκρασία όπου μπορούσε να πραγματοποιηθεί φόρτιση. Για παράδειγμα αν είχε επιλεχθεί η θερμοκρασία  $0^{\circ}\text{C}$  αντί των  $-20^{\circ}\text{C}$ , τότε, εφόσον η μπαταρία μπορεί να φορτιστεί στους  $0^{\circ}\text{C}$ , θα μπορούσαμε να γνωρίζαμε την χωρητικότητα φόρτισης και εκφόρτισης στους  $0^{\circ}\text{C}$ . Τα δεδομένα περιέχουν μετρήσεις για τους  $0^{\circ}\text{C}$ , ωστόσο, δεν υπάρχει μέτρηση φόρτισης και εκφόρτισης στους  $0^{\circ}\text{C}$  με το ίδιο ρεύμα, άρα ακόμα και αν είχε επιλεχθεί η θερμοκρασία  $0^{\circ}\text{C}$ , θα ήταν αδύνατο να υπολογιστεί η χωρητικότητα  $Q_{cha,0^{\circ}\text{C}\rightarrow dis,0^{\circ}\text{C}}$ . Το προηγούμενο είναι ένας περιορισμός του Συνόλου Δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε και δεν δύναται να αντιμετωπιστεί διαφορετικά.

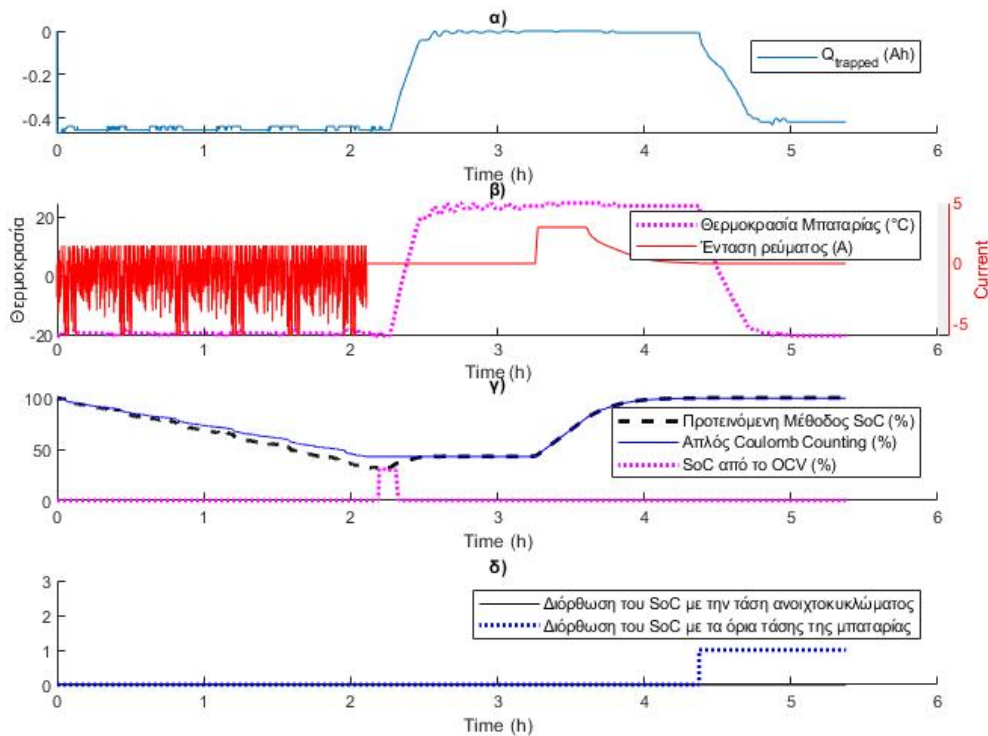
### 6.1.3 Πειραματικές Μετρήσεις στους $-20^{\circ}\text{C}$

Στο Κεφάλαιο αυτό θα παρατεθούν ορισμένες μετρήσεις από το σύνολο δεδομένων. Στις μετρήσεις αυτές θα εκτιμηθεί το SoC με την χρήση της μεθόδου που προτείνεται αλλά και με την μέθοδο του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting για έναν μόλις κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης ώστε να μην υπάρχει συσσωρευμένο σφάλμα στον απλό αλγόριθμο Coulomb counting. Οι μετρήσεις αποτελούνται από μία μπαταρία που έχει πλήρως φορτιστεί στους  $25^{\circ}\text{C}$  και η οποία εκφορτίζεται στους  $-20^{\circ}\text{C}$ . Στη συνέχεια, η θερμοκρασία αυξάνεται και επιστρέφει στους  $25^{\circ}\text{C}$  όπου και φορτίζεται και πάλι πλήρως, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.

Στο Σχήμα 6.13, αναλύεται μία τέτοια μέτρηση. Η μπαταρία έχει φορτιστεί στους  $25^{\circ}\text{C}$  και στη συνέχεια η θερμοκρασία έχει μεταβεί στους  $-20^{\circ}\text{C}$  (δεν φαίνεται στο σχήμα η φόρτιση και η αλλαγή της θερμοκρασίας). Η μέτρηση ξεκινάει χρησιμοποιώντας το προφίλ UDDS και σταματάει την στιγμή που η τάση της μπαταρίας φτάσει το κατώτατο όριο. Η μέτρηση σταματάει χωρίς η μπαταρία να έχει εκφορτιστεί πλήρως, καθώς, αν υπάρχει μεγάλη ένταση ρεύματος στο προφίλ που χρησιμοποιείται, τότε η τάση της μπαταρίας θα υπερβεί το κάτω όριο και συνεπώς η μπαταρία θα καταπονθηθεί. Η μείωση της μέγιστης έντασης ρεύματος (ώστε η μπαταρία να αποφορτιστεί πλήρως) δεν είναι δυνατή καθώς η μέτρηση πρέπει να ακολουθεί αυστηρά το προφίλ UDDS. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η εκφόρτιση σταμάτησε όταν το Ποσοστό Φόρτισης (υπολογισμένο από την τάση ανοιχτοκυκλώματος) ήταν ίσο με 28.43%. Εφόσον η αποφόρτιση ολοκληρωθεί, η μπαταρία ηρεμεί για ένα χρονικό διάστημα και στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξάνεται στους  $25^{\circ}\text{C}$ . Όταν η μπαταρία φτάσει τους  $25^{\circ}\text{C}$ , η μπαταρία φορτίζεται πλήρως και η μέτρηση τελειώνει.

Αναλυτικά στο Σχήμα 6.13:

- Τη χρονική στιγμή  $t = 0\text{ h}$ , η μπαταρία βρίσκεται στους  $-20^{\circ}\text{C}$  ενώ είχε φορτιστεί πλήρως στους  $25^{\circ}\text{C}$ . Διακρίνουμε πως το  $Q_{trapped}$ , δηλαδή η χωρητικότητα που εγκλωβίστηκε στην μπαταρία λόγω της μετάβασης  $25^{\circ}\text{C} \rightarrow -20^{\circ}\text{C}$  ισούται με περίπου 0.43 Ah.
- Στο χρονικό διάστημα  $0\text{ h} < t < 2.1\text{ h}$  η μπαταρία εκφορτίζεται χρησιμοποιώντας το προφίλ εκφόρτισης UDDS. Σε αυτό το διάστημα, το ποσοστό φόρτισης μειώνεται καθώς η μπαταρία εκφορτίζεται. Παράλληλα, διακρίνουμε πως η θερμοκρασία αυξομειώνεται καθώς η μπαταρία θερμαίνεται λόγω της χρήσης της. Το προηγούμενο έχει ως αποτέλεσμα την μικρή αυξομείωση του  $Q_{trapped}$ .
- Την χρονική στιγμή  $t \approx 2.1\text{ h}$ , η εκφόρτιση σταματάει, καθώς η ένταση ρεύματος του προφίλ UDDS είναι αρκετά μεγάλη και είχε ως αποτέλεσμα η τάση της μπαταρίας να γίνει χαμηλότερη από το κατώτατο όριο τάσης που ορίζει ο κατασκευαστής.



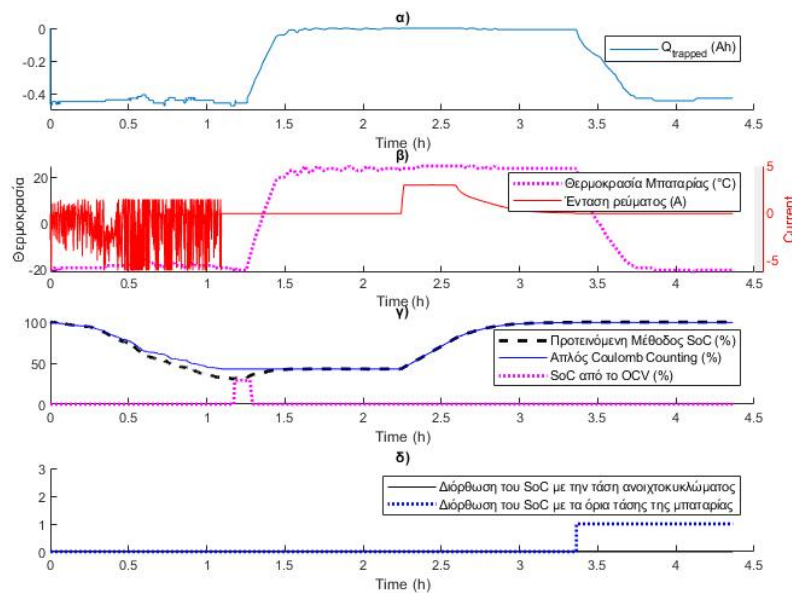
**Σχήμα 6.13:** Μέτρηση UDDS, α)  $Q_{trapped}$  κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος και της μεθόδου Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας. Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει.

- Για το χρονικό διάστημα  $2.1\text{ h} < t < 2.3\text{ h}$  η ένταση ρεύματος στην μπαταρία είναι 0 A και συνεπώς η μπαταρία βρίσκεται σε ηρεμία. Αν η μπαταρία βρισκόταν για ηρεμία για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, τότε θα μπορούσε το SoC να διορθωθεί χρησιμοποιώντας την μέθοδο Προσδιορισμού του SoC από το OCV. Ωστόσο, επειδή η ηρεμία είναι μικρή αλλά και για να μην δοθεί προβάδισμα στον αλγόριθμο που προτείνεται έναντι του απλού Coulomb Counting, η διόρθωση αυτή δεν λαμβάνει χώρα.
- Στο χρονικό διάστημα  $2.27\text{ h} < t < 2.5\text{ h}$ , η θερμοκρασία της μπαταρίας αυξάνεται και πηγαίνει τους  $25^\circ\text{C}$ . Κατά την μετάβαση αυτή παρατηρούμε πως το SoC που έχει υπολογίσει ο αλγόριθμός μας αυξάνεται ενώ το  $Q_{trapped}$  ελαττώνεται. Το προηγούμενο συμβαίνει καθώς η χωρητικότητα που είχε εγκλωβιστεί λόγω της μετάβασης  $25^\circ\text{C} \rightarrow -20^\circ\text{C}$  γίνεται ξανά διαθέσιμη καθώς η μπαταρία επιστρέφει στους  $25^\circ\text{C}$ .
- Την χρονική στιγμή  $t \approx 2.5\text{ h}$ , η θερμοκρασία της μπαταρίας είναι περίπου ίση με  $25^\circ\text{C}$  ενώ το SoC της μεθόδου που προτείνουμε ισούται με το υπολογισμένο SoC του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting.
- Το διάστημα  $2.5\text{ h} < t < 4.35\text{ h}$  η μπαταρία φορτίζεται με τον τρόπο που ορίζει ο κατασκευαστής.
- Την χρονική στιγμή  $t = 4.35\text{ h}$  η φόρτιση σταματάει καθώς η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη. Παράλληλα, εκείνη την στιγμή ενεργοποιείται ο αλγόριθμος Διόρθωσης

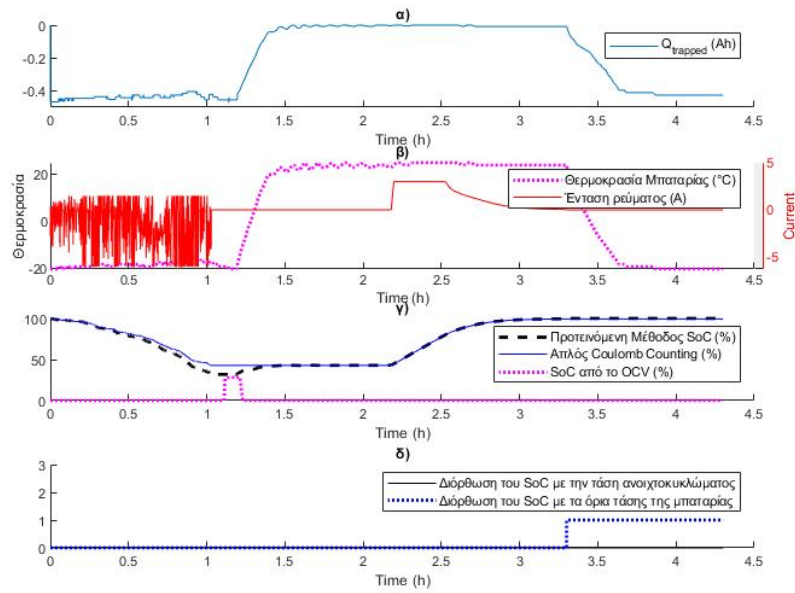
του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας και θέτει το SoC της προτεινόμενης μεθόδου ίσο με 100%.

- Για  $4.35 \text{ h} < t < 4.37 \text{ h}$ , η μπαταρία βρίσκεται σε ηρεμία και είναι πλήρως φορτισμένη.
- Για  $4.37 \text{ h} < t < 5 \text{ h}$  η θερμοκρασία της μπαταρίας επιστρέφει στους  $-20^\circ\text{C}$  ενώ το  $Q_{trapped}$  αυξάνεται καθώς ορισμένη χωρητικότητα εγκλωβίζεται ξανά εξαιτίας της μετάβασης  $25^\circ\text{C} \rightarrow -20^\circ\text{C}$ .

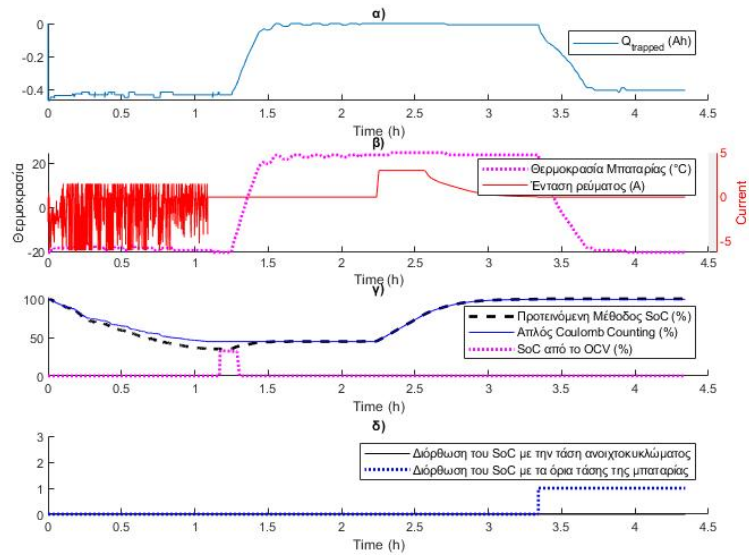
Τίδια συμπεριφορά παρουσιάζουν και οι μετρήσεις με άλλα προφίλ εκφόρτισης. Τα Σχήματα 6.14, 6.15, 6.22, 6.17 και 6.18 παραθέτουν ορισμένα από αυτά.



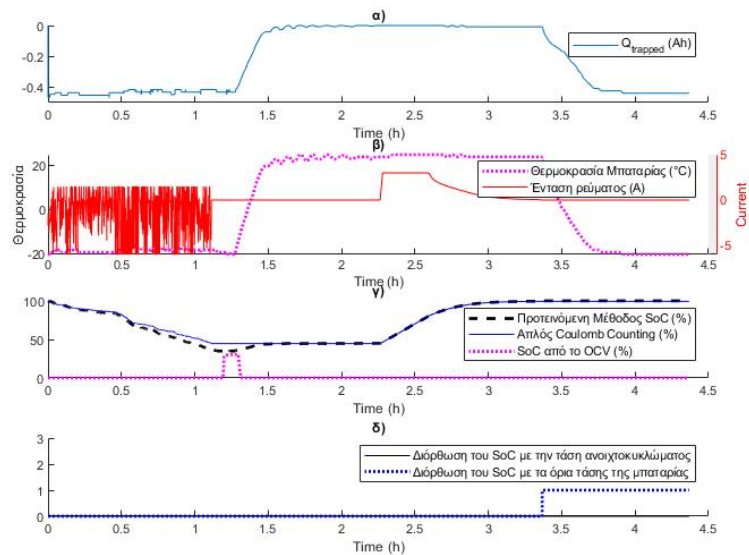
**Σχήμα 6.14:** Μέτρηση Mixed1, α)  $Q_{trapped}$  κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος και της μεθόδου Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας. Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει.



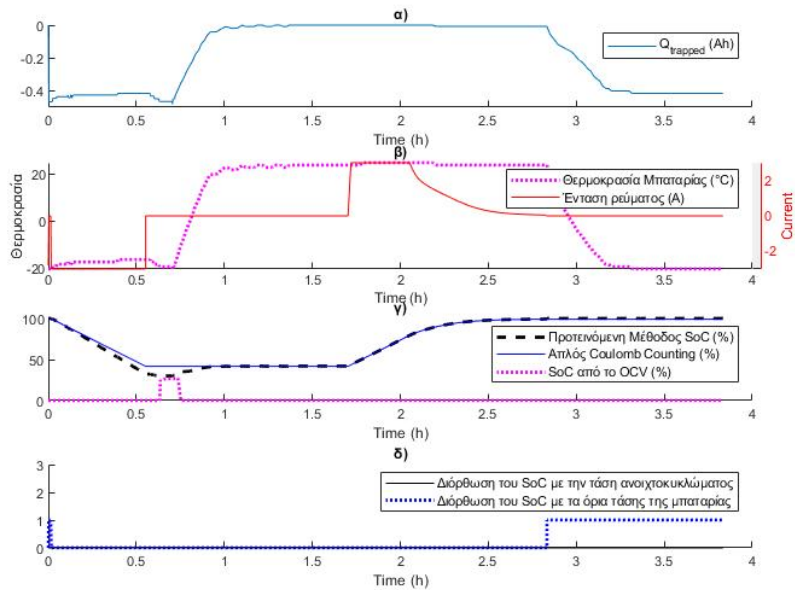
**Σχήμα 6.15:** Μέτρηση Mixed2, α)  $Q_{trapped}$  κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος και της μεθόδου Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας. Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει.



**Σχήμα 6.16:** Μέτρηση Mixed3, α)  $Q_{trapped}$  κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος και της μεθόδου Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας. Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει.



**Σχήμα 6.17:** Μέτρηση Mixed4, α)  $Q_{trapped}$  κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος και της μεθόδου Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας. Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει.



**Σχήμα 6.18:** Μέτρηση σταθερής εκφόρτισης με ένταση ρεύματος 1C, α)  $Q_{trapped}$  κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος και της μεθόδου Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας. Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει.

### Υπολογισμός σφαλμάτων και σύγκριση αλγορίθμου

Ως Σφάλμα  $e$  ορίζεται η διαφορά μεταξύ ενός εκτιμώμενου ποσού σε σχέση με το πραγματικό, δηλαδή:

$$e = y - x \quad (6.1)$$

όπου  $y$  είναι το εκτιμώμενο ποσό και  $x$  είναι το αληθινό ποσό.

Στο Κεφάλαιο αυτό θα συγκριθούν τα σφάλματα του αλγορίθμου που προτείνουμε με τον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting. Ως Κατάσταση Φόρτισης αναφοράς θα χρησιμοποιηθεί το SoC που έχει υπολογιστεί από τον αλγόριθμο προσδιορισμού του SoC από το OCV, καθώς όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.1.3, η μέθοδος αυτή περιέχει το μικρότερο σφάλμα. Για τον αλγόριθμο που προτείνεται, το εκτιμώμενο SoC θα ισούται με το SoC την στιγμή που η εκφόρτιση σταματάει. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 6.13, η χρονική αυτή στιγμή αντιστοιχεί στο  $t = 2.1$  h. Για τον αλγόριθμο του Coulomb Counting, το εκτιμώμενο SoC είναι αυτό που έχει υπολογιστεί στο τέλος της εκφόρτισης.

Τα προφίλ Mixed1,..., Mixed8 και η εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα έντασης 1 C, θα χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστεί το σφάλμα των δύο αλγορίθμων. Το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα και η Ρίζα Μέσης Τετραγωνικής Απόκλισης είναι οι δύο μετρητικές που θα χρησιμοποιηθούν για να συγκριθεί ο αλγόριθμος που προτείνεται με τον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting.

**Μέσο Απόλυτο Σφάλμα** Το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error - MAE) υπολογίζει τον μέσο όρο της απόλυτης τιμής της διαφοράς μεταξύ του εκτιμώμενου ποσού



σε σχέση με το πραγματικό για μία σειρά από μετρήσεις, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν αν το σφάλμα είναι θετικό ή αρνητικό. Στο Μέσο Απόλυτο Σφάλμα, όλες οι μετρήσεις έχουν το ίδιο βάρος. Ο τύπος υπολογισμού του MAE είναι ο εξής:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (6.2)$$

όπου  $y_i$  είναι το εκτιμώμενο ποσό,  $x_i$  το πραγματικό ποσό και  $n$  ο αριθμός των μετρήσεων.

Το μέσο απόλυτο σφάλμα είναι ο μέσος όρος των σφαλμάτων για μία σειρά από  $n$  μετρήσεις. Όσο μικρότερο το σφάλμα τόσο πιο ακριβής είναι και ο τρόπος εκτίμησης.

**Ρίζα Μέσης Τετραγωνικής Απόκλισης** Η Ρίζα Μέσης Τετραγωνικής Απόκλισης (Root Mean Square Error - RMSE) ισούται με την ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων διαιρεμένο τον αριθμό των μετρήσεων που έλαβαν χώρα. Ο τύπος του RMSE είναι ο εξής:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (6.3)$$

όπου  $y_i$  είναι το εκτιμώμενο ποσό,  $x_i$  το πραγματικό ποσό και  $n$  ο αριθμός των μετρήσεων.

Το σφάλμα RMSE λειτουργεί σχεδόν όπως το σφάλμα MAE που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ωστόσο, το σφάλμα αυτό είναι περισσότερο αυστηρό ως προς τις εκτιμήσεις που έχουν μεγάλη διαφορά από την πραγματική τιμή.

## Αποτελέσματα

Στον Πίνακα 6.5 παρατίθενται στο σφάλμα της Μεθόδου που Προτείνουμε αλλά και το Σφάλμα του Απλού Αλγορίθμου Coulomb Counting για 9 διαφορετικές μετρήσεις με διαφορετικό προφίλ εκφόρτισης κάθε φορά.

**Πίνακας 6.5:** Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου και του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting

Προφίλ Εκφόρτισης	Εκτίμηση SoC			Σφάλματα		
	Προτεινόμενη Μέθοδος	Απλός CC	Πραγματικό SoC	Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου	Σφάλμα Απλού CC	Διαφορά σφαλμάτων
Mixed1	31.77 %	28.90 %	42.80 %	2.87 %	13.90 %	-11.03 %
Mixed2	31.78 %	28.17 %	42.82 %	3.61 %	14.65 %	-11.04 %
Mixed3	35.03 %	32.13 %	44.69 %	2.90 %	12.56 %	-9.66 %
Mixed4	35.00 %	30.43 %	44.66 %	4.57 %	14.23 %	-9.66 %
Mixed5	34.63 %	31.43 %	44.58 %	3.20 %	13.15 %	-9.95 %
Mixed6	34.25 %	30.63 %	44.64 %	3.62 %	14.01 %	-10.39 %
Mixed7	34.28 %	31.18 %	44.66 %	3.10 %	13.48 %	-10.38 %
Mixed8	33.52 %	30.25 %	44.62 %	3.27 %	14.37 %	-11.10 %
1C Εκφόρτιση	30.08 %	26.74 %	41.76 %	3.34 %	15.02 %	-11.68 %
<b>Μέσο Απόλυτο Σφάλμα</b>				3.38 %	13.93 %	10.54 %
<b>Ρίζα Μέσης Τετραγωνικής Απόκλισης</b>				3.41 %	13.94 %	10.52 %

Από τον παραπάνω Πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι η μέθοδος που προτείνουμε είναι ανώτερη από την απλή μέθοδο Coulomb Counting. Η μεθόδός μας παρουσιάζει Μέσο Απόλυτο Σφάλμα ίσο με 3.38 % σε αντίθεση με τον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting που παρουσιάζει σφάλμα 13.93 % για τις ίδιες μετρήσεις. Η μέθοδος που προτείνεται έχει 4 φορές λιγότερο σφάλμα

από το σφάλμα του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting, ενώ αποδίδει ίδιας τάξης σφάλμα και στην εκφόρτιση με σταθερή ένταση ρεύματος 1 C αλλά και στα Προφίλ Εκφόρτισης.

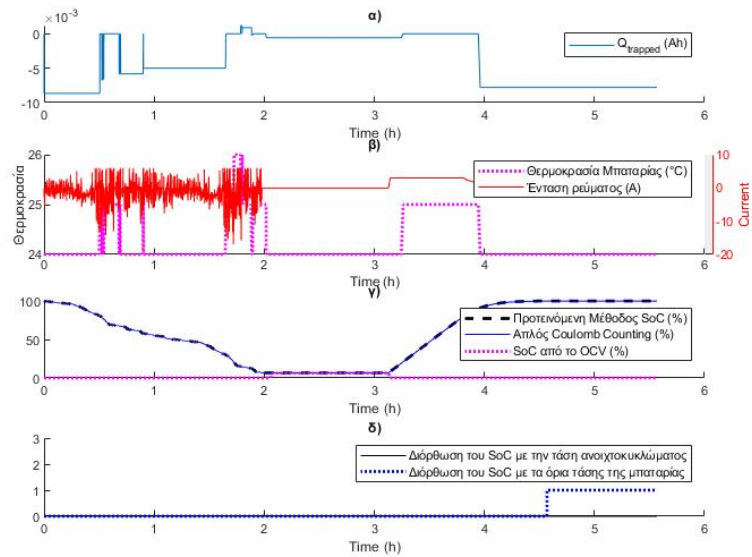
#### 6.1.4 Πειραματικές Μετρήσεις στους 25 °C

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί το σφάλμα του αλγορίθμου που προτείνεται σε σύγκριση με τον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting για μετρήσεις όπου η φόρτιση αλλά και η εκφόρτιση γίνεται στους 25 °C. Η θερμοκρασία των 25 °C θεωρείται ως Συμβατική Θερμοκρασία και είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί η ονομαστική χωρητικότητα του κελιού. Με άλλα λόγια, η ονομαστική χωρητικότητα του κελιού  $C_n$  ισούται με την χωρητικότητα εκφόρτισης της μπαταρίας στους 25 °C. Η ονομαστική χωρητικότητα είναι αυτή που χρησιμοποιεί ο απλός αλγόριθμος Coulomb Counting, όπως και φαίνεται στην Εξίσωση 4.2.

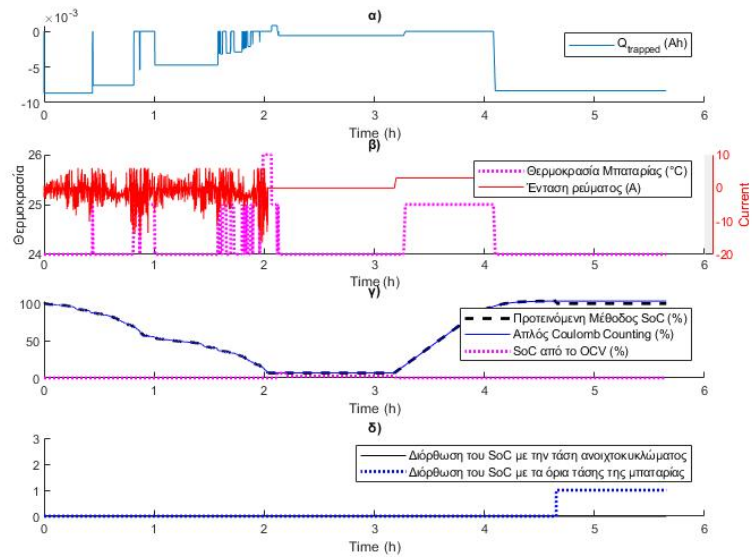
Στις πειραματικές μετρήσεις που θα γίνουν σε αυτό το κεφάλαιο, αναμένεται ο αλγόριθμος που προτείνεται αλλά και ο απλός Coulomb Counting να υπολογίζουν το ίδιο σχεδόν SoC. Η μικρή διαφορά στον υπολογισμό του SoC μεταξύ των δύο αλγορίθμων θα οφείλεται στο γεγονός ότι ο απλός αλγόριθμος Coulomb Counting δεν συμπεριλαμβάνει το φαινόμενο της Κουλομπικής Απόδοσης, ούτε της θέρμανση της μπαταρίας κατά της χρήσης της αλλά και το γεγονός ύπαρξης συσσωρευμένου σφάλματος που αυξάνεται όσο ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται. Για να προσδιοριστούν καλύτερα τα σφάλματα αυτά, οι μετρήσεις θα γίνουν σε 2 σκέλη. Στο πρώτο σκέλος, οι αλγόριθμοι θα συγκριθούν στο τέλος μίας μόνο εκφόρτισης όπως και έγινε στο Κεφάλαιο 6.1.3 για να αναλυθεί το σφάλμα που δημιουργεί η μη συμπερίληψη του φαινομένου της Κουλομπικής Απόδοσης αλλά και το φαινόμενο της θέρμανσης της μπαταρίας κατά την χρήση. Στο δεύτερο κεφάλαιο, οι αλγόριθμοι θα αναλυθούν μετά το πέρας πολλών κύκλων φορτίσεων και εκφορτίσεων ώστε να αναλυθεί το πως το συσσωρευμένο σφάλμα στον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting επηρεάζει το υπολογισμένο SoC.

#### Για έναν κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης

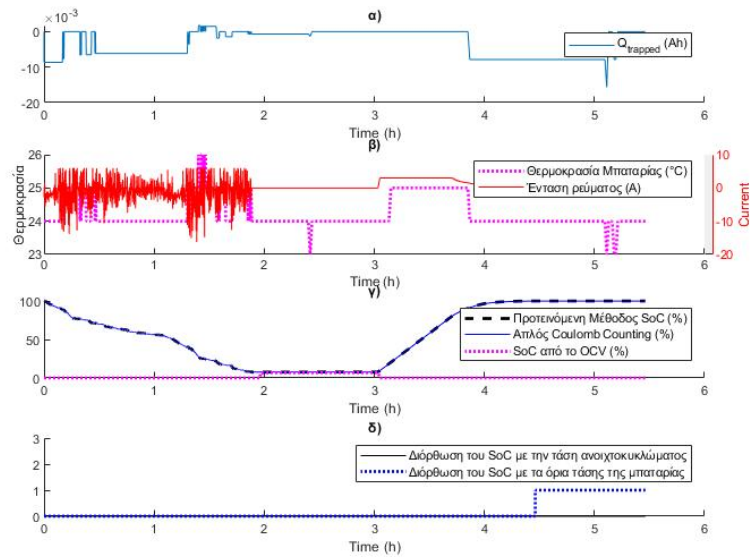
Ομοίως με το Κεφάλαιο 6.1.3, θα παρατεθούν ορισμένες μετρήσεις με διάφορα Προφίλ εκφόρτισης αλλά και εκφόρτιση με σταθερή ένταση ρεύματος 1 C. Σε όλες τις μετρήσεις η μπαταρία θα έχει φορτιστεί στους 25 °C και θα εκφορτιστεί στην ίδια θερμοκρασία χωρίς να υπάρχει μεταβολή θερμοκρασίας. Επειδή δεν υπάρχει μεταβολή θερμοκρασίας, αναμένεται να ισχύει  $Q_{trapped} \approx 0$ .



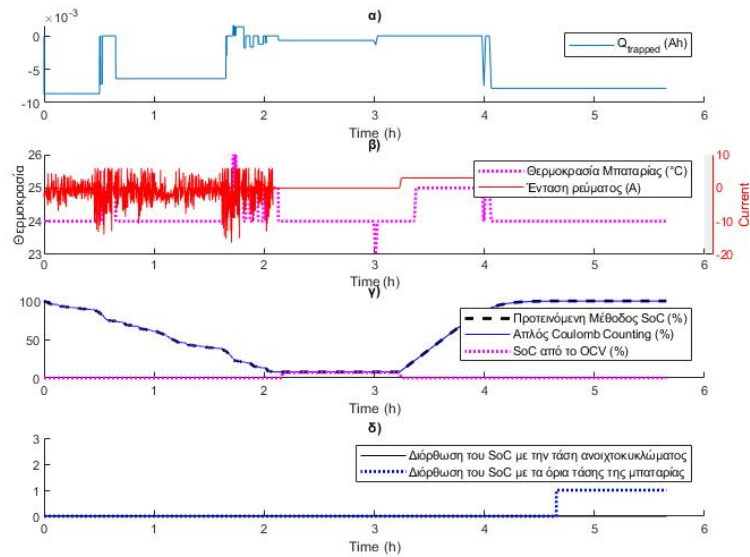
**Σχήμα 6.19:** Μέτρηση Mixed1, α)  $Q_{trapped}$  κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος και της μεθόδου Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας. Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει.



**Σχήμα 6.20:** Μέτρηση Mixed2, α)  $Q_{trapped}$  κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος και της μεθόδου Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας. Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει.



**Σχήμα 6.21:** Μέτρηση Mixed3, α)  $Q_{trapped}$  κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος και της μεθόδου Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας. Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει.



**Σχήμα 6.22:** Μέτρηση Mixed4, α)  $Q_{trapped}$  κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος και της μεθόδου Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης της μπαταρίας. Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει.

Στον Πίνακα 6.6 παραθέτονται συγκεντρωτικά τα σφάλματα του αλγορίθμου που προτείνουμε αλλά και του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting για τις μετρήσεις που έγιναν.

**Πίνακας 6.6:** Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου και του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting

Προφίλ Εκφόρτισης	Εκτίμηση SoC			Σφάλματα		
	Προτεινόμενη Μέθοδος	Απλός CC	Πραγματικό SoC	Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου	Σφάλμα Απλού CC	Διαφορά σφαλμάτων
Mixed1	6.648 %	6.641 %	6.010 %	0.638 %	0.631 %	0.007 %
Mixed2	6.762 %	6.755 %	6.355 %	0.407 %	0.400 %	0.007 %
Mixed3	7.714 %	7.706 %	6.762 %	0.952 %	0.944 %	0.008 %
Mixed4	7.861 %	7.852 %	6.908 %	0.953 %	0.944 %	0.009 %
Mixed5	7.896 %	7.888 %	6.827 %	1.069 %	1.061 %	0.008 %
Mixed6	7.867 %	7.859 %	6.784 %	1.083 %	1.075 %	0.008 %
Mixed7	7.857 %	7.849 %	6.735 %	1.122 %	1.114 %	0.008 %
Mixed8	7.728 %	7.720 %	6.470 %	1.258 %	1.250 %	0.008 %
1 C Εκφόρτιση	2.930 %	3.030 %	2.330 %	0.600 %	0.700 %	-0.100 %

<b>Μέσο Απόλυτο Σφάλμα</b>	0.898 %	0.902 %	0.004 %
----------------------------	---------	---------	---------

<b>Ρίζα Μέσης Τετραγωνικής Απόκλισης</b>	0.933 %	0.934 %	0.001 %
--	---------	---------	---------

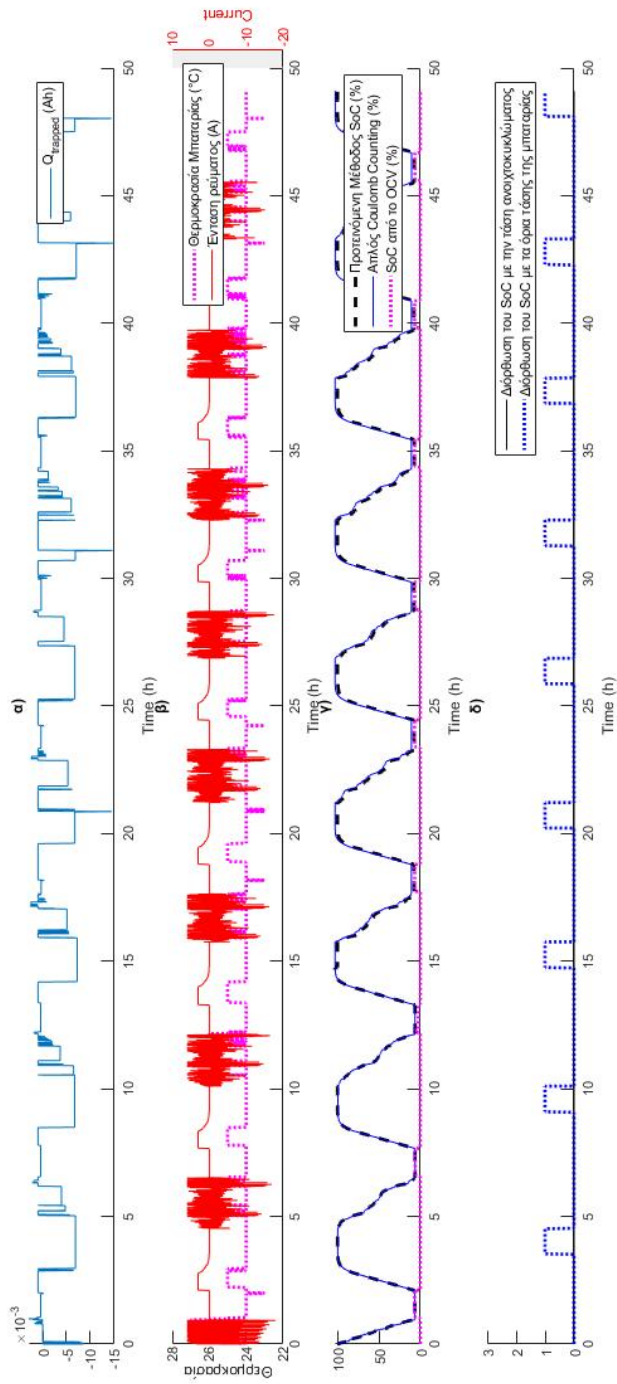
Από τον παραπάνω Πίνακα φαίνεται πως ο αλγόριθμος που προτείνεται υπολογίζει σχεδόν το ίδιο SoC με τον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting αν η φόρτιση και η εκφόρτιση γίνει στους

25 °C, καθώς σε αυτήν την θερμοκρασία η μπαταρία αποδίδει την ονομαστική της χωρητικότητα την οποία και χρησιμοποιεί ο απλός αλγόριθμος Coulomb Counting για να υπολογίσει το SoC. Το σφάλμα του αλγορίθμου που προτείνεται ανέρχεται στο 0.898 % έναντι του 0.902 % του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting, μία διαφορά μόλις 0.004 % που οφείλεται στην Κουλομπική Απόδοση αλλά και στην θέρμανση της μπαταρίας κατά την χρήση της.

Το παραπάνω αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο, καθώς στην Συμβατική Θερμοκρασία (δηλαδή την θερμοκρασία που χρησιμοποιεί ο κατασκευαστής στην διαδικασία μέτρησης της χωρητικότητας εκφόρτισης, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.5.5) οι αλγόριθμοι ταυτίζονται, με μόνη διαφορά το γεγονός ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρησιμοποιεί διαφορετική χωρητικότητα φόρτισης για να λάβει υπόψη του το φαινόμενο της Κουλομπικής Απόδοσης αλλά και το γεγονός ότι συμπεριλαμβάνει και το φαινόμενο της αυτοθέρμανσης της μπαταρίας (μιας και το  $Q_{trapped} \neq 0$  καθώς υπάρχει μικρή αλλαγή στην θερμοκρασία της μπαταρίας).

### **Για πολλούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης**

Στο παρόν Κεφάλαιο θα αναλυθεί το σφάλμα στο τέλος πολλών φορτίσεων-εκφορτίσεων, που παρουσιάζει ο απλός Αλγόριθμος Coulomb Counting σε σύγκριση με το σφάλμα της προτεινόμενης μεθόδου. Στο Σχήμα 6.23 παρατίθενται το υπολογισμένο SoC από τον αλγόριθμο που προτείνουμε αλλά και τον απλό Αλγόριθμο Coulomb Counting για 9 διαδοχικές φορτίσεις και εκφορτίσεις.



**Σχήμα 6.23:** Μέτρηση που περιλαμβάνει πολλές φορτίσεις/εκφορτίσεις, α)  $Q_{trapped}$  κατά την διάρκεια της μέτρησης, β) θερμοκρασία και ένταση ρεύματος της μπαταρίας κατά την διάρκεια της μέτρησης, γ) το SoC που υπολογίζει ο προτεινόμενος αλγόριθμος, ο αλγόριθμος Coulomb Counting και ο αλγόριθμος Προσδιορισμού του SoC από το OCV, δ) ενεργοποίηση της μεθόδου Διόρθωσης του SoC με την τάση ανοιχτοκυκλώματος και της μεθόδου Διόρθωση του SoC με τα όρια τάσης μπαταρίας. Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει ότι η μέθοδος είναι ενεργοποιημένη και διορθώνει το SoC της μεθόδου που προτείνουμε και 0 τις στιγμές που δεν το διορθώνει.



Από το παραπάνω Σχήμα παρατηρούμε πως το σφάλμα του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting αυξάνεται όσο ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται. Το προηγούμενο συμβαίνει καθώς το σφάλμα που παράγεται (από δειγματοληψία, στρογγυλοποιήσεις κ.ά.) συσσωρεύεται συνεχώς και δεν διορθώνεται πότε. Μετά το πέρας 9 φορτίσεων-εκφορτίσεων ο προτεινόμενος Αλγόριθμος υπολογίζει στο τέλος της φόρτισης  $SoC = 100\%$ , ενώ ο απλός αλγόριθμος Coulomb Counting υπολογίζει  $102.4\%$ . Συνεπώς, η ικανότητα του αλγορίθμου να διορθώνει το SoC με την χρήση κάποιας άλλης μεθόδου είναι ιδιαίτερα σημαντική για τους αλγορίθμους που ολοκληρώνουν ως προς το ρεύμα, καθώς σε αντίθετη περίπτωση συσσωρεύεται αρκετά μεγάλο σφάλμα. Ο αλγόριθμος που προτείνεται δεν αντιμετωπίζει τέτοια προβλήματα καθώς διορθώνει το υπολογισμένο SoC χρησιμοποιώντας την τάση ανοιχτοκυκλώματος (αν η μπαταρία βρίσκεται σε ηρεμία) αλλά και όταν η μπαταρία φορτιστεί ή εκφορτιστεί πλήρως.

### 6.1.5 Συμπεράσματα

Η μέθοδος υπολογισμού του SoC που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία αποδίδει εξαιρετικά όταν η θερμοκρασία λειτουργίας της μπαταρίας είναι διαφορετική από την ονομαστική αλλά και όταν η μπαταρία φορτιστεί και εκφορτιστεί σε διαφορετική θερμοκρασία. Για παράδειγμα, στην εκφόρτιση στους  $-20^\circ\text{C}$  όπου και η φόρτιση έλαβε χώρα στους  $25^\circ\text{C}$ , ο αλγόριθμος που προτάθηκε έχει 4 φορές μικρότερο σφάλμα από όσο είχε ο απλός αλγόριθμος Coulomb Counting στο τέλος της εκφόρτισης. Η μεγαλύτερη ακρίβεια του αλγορίθμου που προτείνεται οφείλεται στο γεγονός ότι ορισμένη χωρητικότητα παραμένει παγιδευμένη μέσα στη μπαταρία αν η θερμοκρασία φόρτισης και εκφόρτισης είναι διαφορετική. Ο αλγόριθμος που προτείνεται, λαμβάνει υπόψη του το προηγούμενο φαινόμενο και συνεπώς είναι σε θέση να υπολογίζει το SoC με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Από την άλλη μεριά, όταν η θερμοκρασία του κελιού είναι η Συμβατική (στην περίπτωσή μας  $25^\circ\text{C}$ ), τότε ο αλγόριθμος που προτείνεται έχει το ίδιο σφάλμα με τον απλό Coulomb Counting στο τέλος της εκφόρτισης, καθώς είναι (σχεδόν) ταυτόσημοι. Ωστόσο, αν οι αλγόριθμοι συγκριθούν για περισσότερες από μία φορτίσεις-εκφορτίσεις, τότε το συσσωρευμένο σφάλμα του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting αυξάνεται σημαντικά, ενώ, ο αλγόριθμος που προτείνεται διορθώνει το συσσωρευμένο σφάλμα του χρησιμοποιώντας άλλους τρόπους υπολογισμού του SoC.

Συνολικά, ο αλγόριθμος αποδείχτηκε σημαντικά ανώτερος από τον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting χωρίς να υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω υπολογιστική ισχύς ή αισθητήρες. Παράλληλα, η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου που προτείνεται είναι εφάμιλλη με αυτήν του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting με μόνη διαφορά την απαίτηση για περισσότερα δεδομένα, όπως για παράδειγμα την σχέση μεταξύ της τάσης ανοιχτοκυκλώματος και του SoC αλλά και το  $LFD_{T_1 \rightarrow T_2}$ .

## 6.2 Κατάσταση Υγείας

Στο Κεφάλαιο αυτό θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα για να επαληθευτεί η προτεινόμενη μεθοδολογία υπολογισμού του SoH. Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5.3.1, η μέθοδος που προτάθηκε χρησιμοποιεί δύο αλγορίθμους για τον υπολογισμό του SoH. Ο πρώτος είναι η *Ολοκλήρωση ως προς το ρεύμα* που χρησιμοποιείται αν υπάρξει πλήρη αποφόρτιση της μπαταρίας και στη συνέχεια πλήρη φόρτισή της. Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού του SoH είναι η με την χρήση της *Εσωτερικής Αντίστασης* όπου και χρησιμοποιείται αν δεν υπάρξει, για μεγάλο χρονικό διάστημα, πλήρης αποφόρτιση-φόρτιση της μπαταρίας.

Η επαλήθευση και η εύρεση του σφάλματος στον αλγόριθμο που χρησιμοποιεί την *Εσωτερική Αντίσταση* για να προσδιορίσει το SoH της μπαταρίας είναι απαραίτητη και σε αυτήν θα επικεντρωθεί το παρόν κεφάλαιο. Η επαλήθευση της μεθόδου υπολογισμού του SoH με την χρήση του αλγορίθμου της *Ολοκλήρωσης ως προς το ρεύμα* δεν θα εξεταστεί καθώς πρόκειται για τον αλγόριθμο ο οποίος χρησιμοποιείται και από τους κατασκευαστές μπαταριών για

να μετρήσουν την χωρητικότητα των κελιών που παράγουν αλλά και επειδή το σφάλμα του (καθώς βασίζεται στον προτεινόμενο αλγόριθμο υπολογισμού του SoC) υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 6.1.4, και συνεπώς, δεν υπάρχει λόγος να αναλυθεί ξανά σε αυτό το κεφάλαιο.

## Σύνολο Δεδομένων

Για την επιβεβαίωση του αλγορίθμου υπολογισμού του SoH χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο δεδομένων το οποίο είναι ελεύθερα προσβάσιμο στο διαδίκτυο. Τα δεδομένα αυτά δημιουργήθηκαν από το Πανερωπαϊκό project EVERLASTING (Electric Vehicle Enhanced Range, Lifetime And Safety Through INGenious battery management) το οποίο ασχολείται με τεχνολογίες μπαταριών ιόντου λιθίου.

**Στοιχεία μπαταρίας** Η μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε είναι η INR18650 MJ1 της εταιρίας LGChem ίδιας χημείας και τεχνολογίας με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις επιβεβαίωσης του αλγορίθμου υπολογισμού του SoC. Τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας από το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή παραθέτονται στον Πίνακα 6.7.

**Πίνακας 6.7:** Χαρακτηριστικά της μπαταρίας ιόντων λιθίου LG HG2. Δεδομένα από το φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή [32]

Άνω όριο τάσης	4.2 V
Κάτω όριο τάσης	2.5 V
Ονομαστική τάση	3.635 V
0.2 C Χωρητικότητα	3.5 Ah

**Η μεθοδολογία των μετρήσεων** Η μπαταρία τοποθετήθηκε σε έναν θερμικό θάλαμο ο οποίος έχει την ικανότητα να ρυθμίζει την θερμοκρασία περιβάλλοντος και κατά συνέπεια την θερμοκρασία της μπαταρίας. Η προηγούμενη, συνδέθηκε με συσκευή που έχει την δυνατότητα να φορτίζει και να εκφορτίζει την μπαταρία με ρυθμιζόμενη ένταση ρεύματος ενώ ταυτόχρονα να δειγματοληπτει την τάση στα άκρα της αλλά και την θερμοκρασία της.

Οι μετρήσεις που έλαβαν χώρα είχαν στόχο να ερευνηθούν το πώς το SoH της μπαταρίας ελαττώνεται για διαφορετικά προφίλ φόρτισης/εκφόρτισης. Κάθε προφίλ εφαρμόζόταν σε διαφορετική μπαταρία μέχρις ότου η ίδια να φτάσει στο τέλος ζωής της. Για την επιβεβαίωση του αλγορίθμου που προτείνεται, χρησιμοποιήθηκε ένα προφίλ φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας υπό σταθερό ρεύμα 0.5 C στους 25 °C.

Πιο αναλυτικά, δύο μπαταρίες LGChem INR18650-MJ1 από τον ίδιο αριθμό παρτίδας υποβλήθηκαν σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις και εκφορτίσεις με ένταση ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης ίσο με 0.5 C = 1.75 A μέχρις ότου το SoH να φτάσει περίπου στο 80 %. Η θερμοκρασία των μπαταριών κρατήθηκε σταθερή στους 25 °C με τις μετρήσεις να διαρκούν περίπου 350 ημέρες.

**Επιβεβαίωση αλγορίθμου** Για την επιβεβαίωση του αλγορίθμου, η μία μπαταρία από τις δύο θα χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθεί η σχέση Εσωτερικής Αντίστασης - SoH (μπαταρία αναφοράς) ενώ η δεύτερη μπαταρία θα χρησιμοποιηθεί για να ελεγχθεί το σφάλμα του αλγορίθμου (μπαταρία επαλήθευσης). Το δείγμα είναι πολύ μικρό, με μόλις 2 μπαταρίες και ίσως όχι ικανοποιητικό για να επιβεβαιωθεί ο αλγόριθμος που προτείνεται χωρίς καμία αμφιβολία. Ωστόσο, αν το σφάλμα της μεθόδου είναι ικανοποιητικό τότε περαιτέρω έρευνα με πολύ μεγαλύτερο δείγμα μπαταριών θα μπορούσε να λάβει χώρα και να επιβεβαιωθεί ο αλγόριθμος που προτείνεται. Δυστυχώς, η έλλειψη δυνατότητας εκτέλεσης πειραματικών μετρήσεων από τον συντάκτη, υποχρεώνει την χρήση ελεύθερων συνόλων δεδομένων που είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο, με το παρόν σύνολο δεδομένο να είναι ίσως ένα από τα πιο πλήρη.

**Μετρήσεις** Όπως και αναλύθηκε στην παραπάνω παράγραφο, για την επιβεβαίωση του αλγορίθμου υπολογισμού του SoH με την εσωτερική αντίσταση, θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα από δύο μπαταρίες που υπέστησαν φόρτιση και εκφόρτιση με σταθερή ένταση ρεύματος 0.5 C, επανειλημμένα μέχρι το τέλος ζωής τους. Οι μετρήσεις αυτές διακόπτονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα για να πραγματοποιηθούν μερικές δοκιμές αναφοράς ώστε να μετρηθεί το πως οι φορτίσεις και εκφορτίσεις έχουν επηρεάσει την μπαταρία. Οι δημιουργοί του συνόλου δεδομένων πραγματοποιούν δύο ειδών δοκιμές αναφοράς, το Extended Check-up Test (ECU) και το Short Check-up Test (SCU). Η πρώτη δοκιμή αναφοράς, η ECU, λαμβάνει χώρα στην αρχή, στην μέση και στο τέλος του τεστ γήρανσης της μπαταρίας (δηλαδή 3 μόνο φορές), ενώ το SCU λαμβάνει χώρα μία φορά κάθε μήνα.

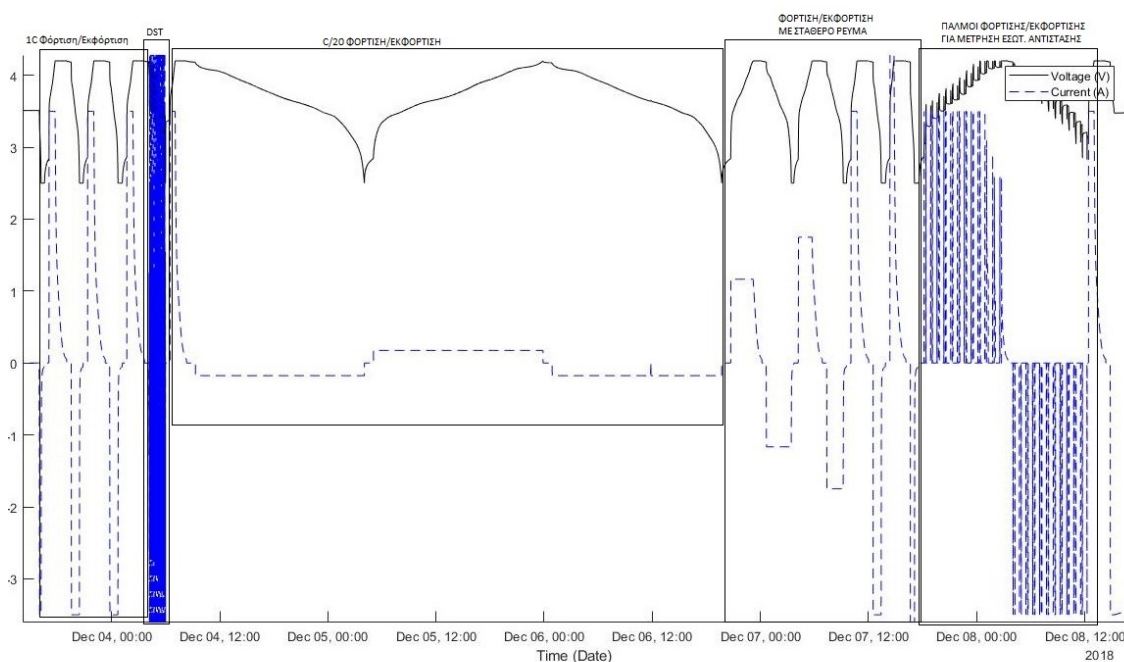
Οι δοκιμές ECU και SCU περιλαμβάνουν τα εξής:

1. Φόρτιση - εκφόρτιση με σταθερή ένταση ρεύματος 1 C (μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί η χωρητικότητα της μπαταρίας)
2. Φόρτιση και εκφόρτιση με παλμούς έντασης ρεύματος σε διαφορετικά SoC (μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρηθεί η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας)

Το ECU εκτός από τα παραπάνω, περιλαμβάνει και τις εξής δοκιμές αναφοράς:

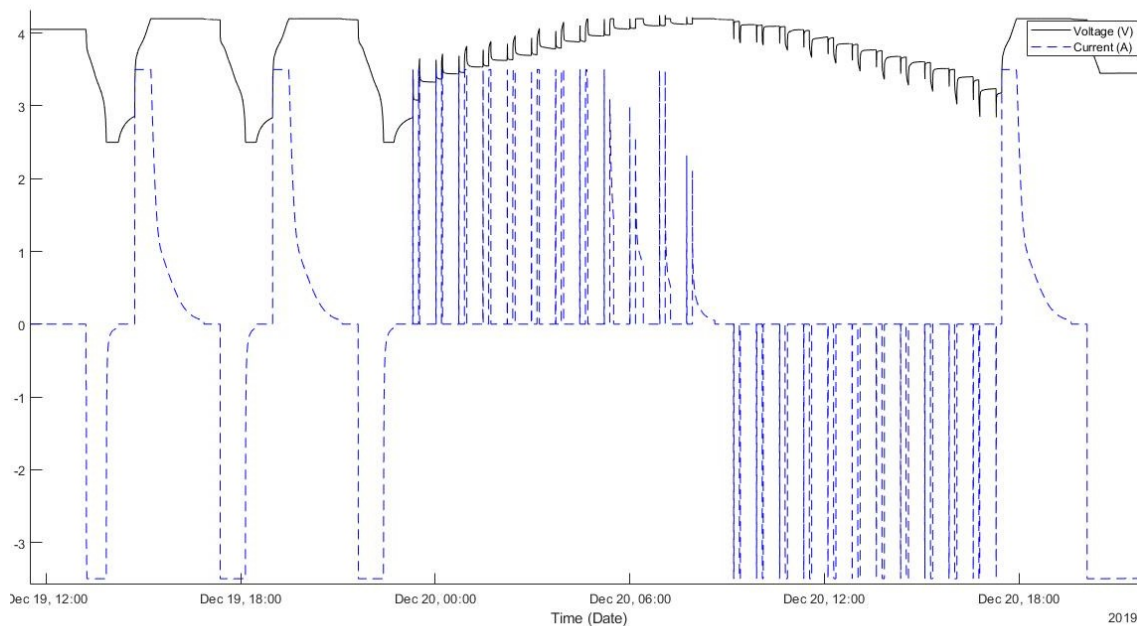
1. Dynamic Stress Test (DST), ένα προφίλ με πολλούς παλμούς φόρτισης και εκφόρτισης.
2. Φόρτιση και εκφόρτιση με σταθερό ρεύμα έντασης  $C/20$ ,  $C/3$ ,  $C/2$  και  $2C$ .

Στο Σχήμα 6.24 παρατίθεται η μέτρηση ECU που γίνεται στην αρχή, στην μέση και στο τέλος του κάθε τεστ γήρανσης.



**Σχήμα 6.24:** Μέτρηση ECU από το σύνολο δεδομένων. Από αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται οι 1 C Εκφορτίσεις, η DST μέτρηση, οι φορτίσεις και εκφορτίσεις με σταθερό ρεύμα και οι παλμοί φόρτισης/εκφόρτισης.

Στο Σχήμα 6.25 παρατίθεται το Short Check-up Test που λαμβάνει χώρα μία φορά το μήνα κατά την διάρκεια του τεστ γήρανσης.



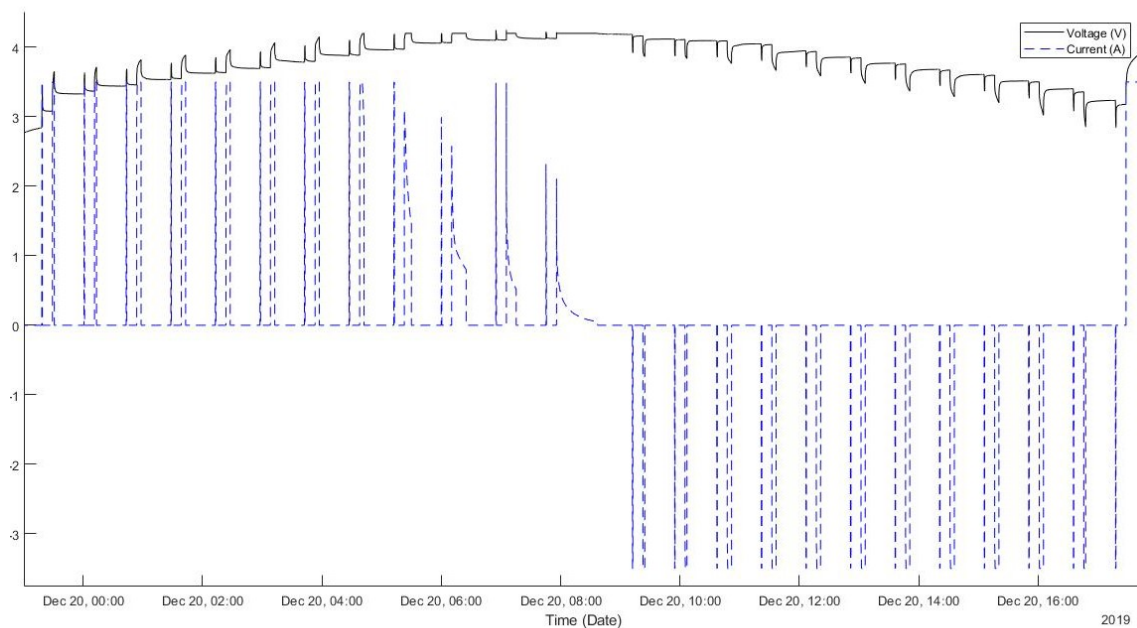
**Σχήμα 6.25:** Μέτρηση SCU από το σύνολο δεδομένων. Από αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται οι 1 C Εκφορτίσεις και οι παλμοί φόρτισης/εκφόρτισης.

### 6.2.1 Εξαγωγή Δεδομένων

Όπως αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 4.2.3, η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας εξαρτάται από την θερμοκρασία λειτουργίας, το SoC αλλά και το SoH. Τα δύο τεστ γήρανσης που θα χρησιμοποιηθούν έλαβαν χώρα στην ίδια θερμοκρασία (25 °C) και συνεπώς δεν θα εξεταστεί το πως η θερμοκρασία επηρεάζει την Εσωτερική Αντίσταση. Ωστόσο, η επιρροή του SoC στην Εσωτερική Αντίσταση θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και συνεπώς θα πρέπει να προσδιοριστεί το πως η Εσωτερική Αντίσταση της μπαταρίας εξαρτάται και από το SoC αλλά και από το SoH.

Για να βρεθεί η εξάρτηση της Εσωτερικής Αντίστασης από το SoC και το SoH θα χρησιμοποιηθεί το ένα από τα δύο τεστ γήρανσης. Για κάθε ένα SCU (η δοκιμή αναφοράς που γίνεται μία φορά το μήνα) θα υπολογιστεί το SoH που έχει η μπαταρία και στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν οι παλμοί φόρτισης/εκφόρτισης για να προσδιοριστεί η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας. Πιο αναλυτικά, θα μετρηθεί η διαφορά τάσης που παρουσιάζει η μπαταρία πριν και μετά την εφαρμογή του παλμού φόρτισης ενώ ταυτόχρονα θα δειγματοληφθεί και η ένταση του ρεύματος. Χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm, θα προσδιοριστεί η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας.

Στο Σχήμα 6.26 παραθέτονται οι παλμοί φόρτισης και εκφόρτισης που περιλαμβάνει η δοκιμή αναφοράς. Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω θα εφαρμοστεί μόνο στους παλμούς φόρτισης καθώς ο αλγόριθμος προσδιορισμού του SoH από την εσωτερική αντίσταση εφαρμόζεται μόνο κατά την φόρτιση της μπαταρίας και συνεπώς δεν υπάρχει η ανάγκη να βρεθεί το πως η εσωτερική αντίσταση εξαρτάται από το SoC και το SoH στην την εκφόρτιση.

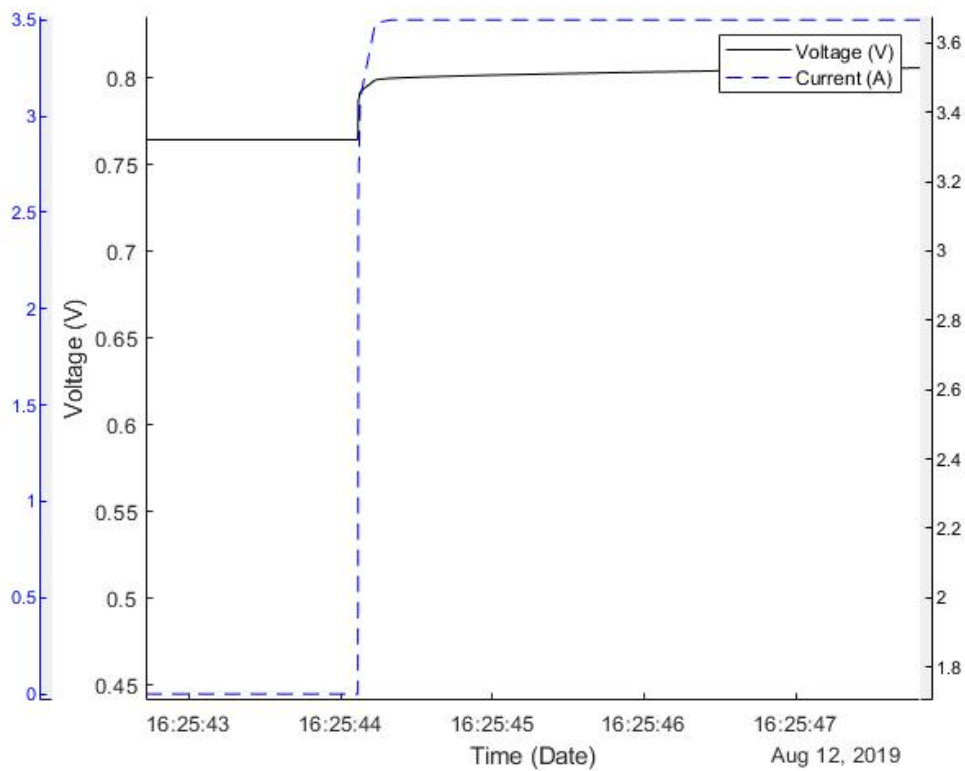


**Σχήμα 6.26:** Παλμοί φόρτισης/εκφόρτισης στην δοκιμή αναφοράς SCU για την μέτρηση της Εσωτερικής Αντίστασης

Στο Σχήμα 6.27 φαίνεται το πως η τάση της μπαταρίας εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος. Ιδανικά, για να μετρηθεί η εσωτερική αντίσταση, η τάση θα πρέπει να δειγματοληφθεί αμέσως μετά την εφαρμογή του παλμού φόρτισης, καθώς αν η δειγματοληψία γίνει αρκετό χρόνο αργότερα τότε η διαφορά τάσης που θα μετρηθεί δεν θα οφείλεται μόνο στην ύπαρξη της εσωτερικής αντίστασης αλλά και στην σύνθετη αντίσταση της μπαταρίας και στην φόρτισή της.

Ωστόσο, η παραπάνω απαίτηση είναι δύσκολο να εφαρμοστεί σε ένα Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών που αποτελείται από μικρή υπολογιστική ισχύς αλλά και που οι αισθητήρες τάσης βρίσκονται στα κυκλώματα Υψηλής Τάσης, όπως και φαίνεται στο Σχήμα 3.4, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει καθυστέρηση στην επικοινωνία. Παράλληλα, στις περισσότερες εφαρμογές που χρησιμοποιούν μπαταρίες, όπως για παράδειγμα στα ηλεκτρικά οχήματα αλλά και στα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, η ενέργεια φόρτισης είναι αρκετά μεγάλη (μπορεί να κυμαίνεται πάνω από 11 kW) όπου και η οποία δεν μπορεί να εφαρμοστεί στιγμιαία στην μπαταρία (όπως γίνεται στο σχήμα 6.27, όπου ο παλμός έντασης ρεύματος μεταβαίνει από 0 A σε 3.5 A μέσα σε λίγα ms), αλλά αντίθετως χρειάζονται αρκετά ms ώστε το ρεύμα να μεταβεί από τα 0 A στα Ampere της φόρτισης [27]. Επειδή η ένταση του ρεύματος χρειάζεται αρκετά ms για να φτάσει στην ένταση ρεύματος φόρτισης, η τάση στα άκρα της μπαταρίας θα αυξάνεται και αυτή σταδιακά, συνεπώς, η δειγματοληψία θα πρέπει να γίνει αρκετά ms αργότερα. Η σταδιακή αύξηση της τάσης που περιγράφηκε, θα περιλαμβάνει την αύξηση της τάσης λόγω της εσωτερικής αντίστασης, την τάση που οφείλεται στην σύνθετη αντίσταση της μπαταρίας αλλά και στην φόρτισή της.

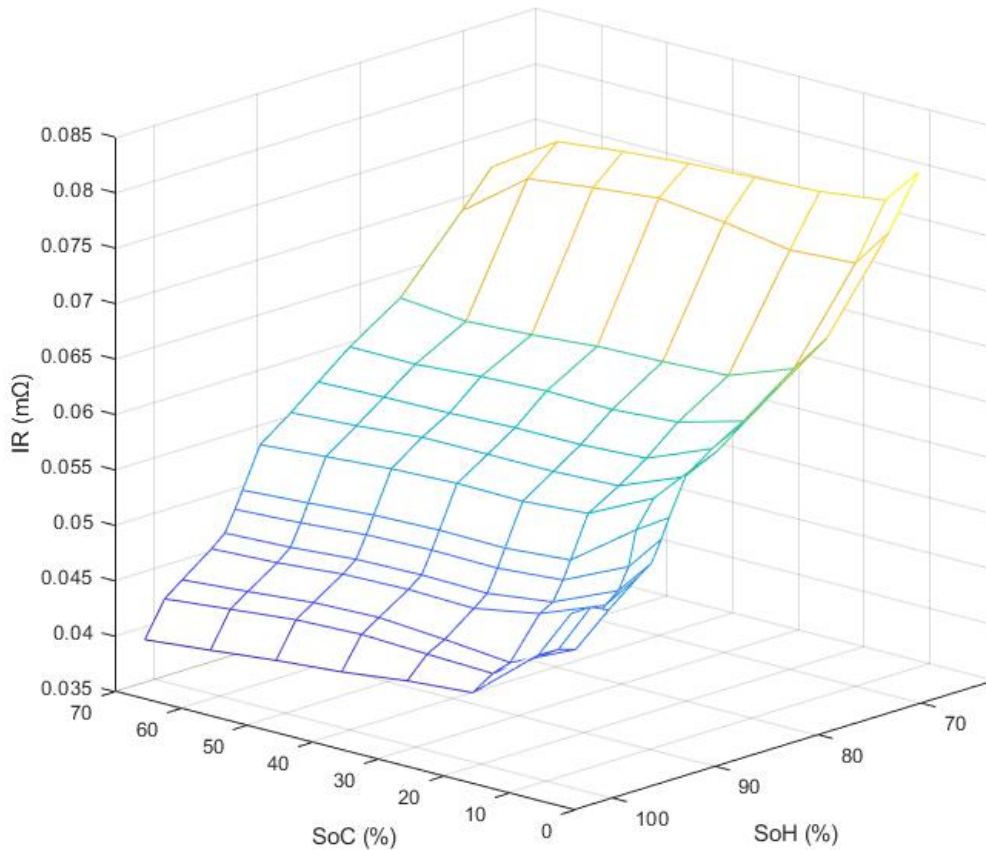
Για τον παραπάνω λόγο, στους παλμούς του Σχήματος 6.26, επιλέχθηκε να γίνει η δειγματοληψία της τάσης και της έντασης ρεύματος 400 ms μετά από την χρονική στιγμή από την οποία η ένταση ρεύματος έγινε 3.5 A. Το προηγούμενο, θα έχει ως αποτέλεσμα να μετρηθεί η τάση που οφείλεται στην εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας αλλά και η τάση που οφείλεται στην φόρτιση και στην σύνθετη αντίστασή της, όπως και ακριβώς θα συνέβαινε αν η μέθοδος που προτείνουμε εφαρμοζόταν σε ένα ηλεκτρικό όχημα.



Σχήμα 6.27: Τάση της μπαταρίας και ένταση του ρεύματος σε έναν παλμό φόρτισης.

### Δεδομένα Εσωτερικής Αντίστασης

Στον Πίνακα παρατίθενται η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας σε συνάρτηση του SoC και του SoH. Είναι φανερό ότι η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας αυξάνεται όσο μειώνεται το SoH, ενώ παράλληλα μειώνεται αισθητά όσο αυξάνεται το SoC.



**Σχήμα 6.28:** Εσωτερική αντίσταση σε συνάρτηση του SoC και SoH στους 25 °C.

Τα δεδομένα του Σχήματος 6.28 θα χρησιμοποιηθούν για να προσδιοριστεί το SoH της δεύτερης μπαταρίας που υπέστη το ίδιο τεστ γήρανσης με την μπαταρία αναφοράς. Στην δεύτερη μπαταρία, το αληθινό της SoC είναι γνωστό καθώς μπορεί να υπολογιστεί από το SCU, όπως και με την μπαταρία αναφοράς.

### 6.2.2 Πειραματικές μετρήσεις χωρίς σφάλμα δειγματοληψίας

Σε αυτό το Κεφάλαιο θα επαληθευτεί ο αλγόριθμος που προτείνεται χωρίς να υπάρχει καθόλου σφάλμα δειγματοληψίας. Πιο αναλυτικά, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 6.2.1, η δειγματοληψία τάσης και έντασης ρεύματος έγινε 400 ms από την αρχή του παλμού φόρτισης. Σε αυτό το Κεφάλαιο, θα βρεθεί το σφάλμα του αλγορίθμου που προτείνεται, αν η δειγματοληψία της μπαταρίας επαλήθευσης γίνει και αυτή στα 400 ms από την αρχή του παλμού φόρτισης, δηλαδή, θα θεωρηθεί, πως το Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών έχει ικανή συχνότητα δειγματοληψίας και είναι ικανό να μετρήσει την τάση και την ένταση ρεύματος της μπαταρίας την χρονική στιγμή που θα ζητηθεί, στην περίπτωσή μας, τα 400 ms από την αρχή του παλμού.

Στον Πίνακα 6.8 παρατίθεται η εκτίμηση SoH του αλγορίθμου που προτείνεται αλλά και το σφάλμα του για  $SoC = 60\%$ , όπου και επιλέχθηκε καθώς σε αυτό το SoC το σφάλμα του αλγορίθμου είναι το ελάχιστο.

**Πίνακας 6.8:** Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου Υπολογισμού του SoH, χωρίς σφάλμα δειγματοληψίας και  $SoC = 60\%$

Πραγματικό SoH	Εκτιμώμενο SoH	Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου
98.30 %	98.19 %	-0.10 %
96.43 %	96.28 %	-0.14 %
94.53 %	95.70 %	1.16 %
91.89 %	93.32 %	1.42 %
90.57 %	93.13 %	2.56 %
89.62 %	93.85 %	4.22 %
88.76 %	92.05 %	3.29 %
87.56 %	91.20 %	3.63 %
86.01 %	89.22 %	3.20 %
84.63 %	89.56 %	4.92 %
83.20 %	89.97 %	6.76 %
81.39 %	86.95 %	5.56 %
<b>Μέγιστο Σφάλμα</b>		<b>6.76 %</b>
<b>Μέγιστο Σφάλμα για SoH &gt; 92 %</b>		<b>1.42 %</b>

Ο αλγόριθμος που προτείνεται έχει ικανοποιητικό σφάλμα για όλο το εύρος του SoH και ειδικά για  $SoH > 84\%$ . Το σφάλμα της μεθόδου είναι για πολλές εφαρμογές ικανοποιητικό, ενώ για  $SoH > 92\%$ , το σφάλμα του αλγορίθμου είναι μικρό και η μέγιστη τιμή του είναι μόλις 1.42 %.

### 6.2.3 Πειραματικές μετρήσεις με σφάλμα δειγματοληψίας

Σε αυτό το Κεφάλαιο θα αναλυθεί το σφάλμα του αλγορίθμου αν η συχνότητα δειγματοληψίας του Συστήματος Διαχείρισης Μπαταριών είναι χαμηλή. Η τάση και η ένταση της μπαταρίας αναφοράς μετρήθηκε 400 ms από όταν ξεκίνησε η φόρτιση και συνεπώς στη μπαταρία επαλήθευσης, οι αντίστοιχες μετρήσεις θα γίνουν και αυτές 400 ms μετά την έναρξη της φόρτισης. Ωστόσο, το Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών μπορεί να μην είναι ικανό να μετρήσει την τάση και την ένταση ακριβώς στα 400 ms και μπορεί να την μετρήσει λίγο αργότερα ή λίγο νωρίτερα. Συνεπώς σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το σφάλμα του αλγορίθμου αν η δειγματοληψία της μπαταρίας επαλήθευσης γίνει  $\pm 100$  ms από την επιθυμητή χρονική στιγμή.  $\pm 100$  ms είναι ένα εύλογο χρονικό διάστημα όπου ακόμα και τα πιο απλά Συστήματα Διαχείρισης Μπαταριών θα είναι ικανά πετύχουν.

Στον Πίνακα 6.9 και 6.10 παρουσιάζονται τα σφάλματα του αλγορίθμου αν η δειγματοληψία της μπαταρίας γίνει στα 300 ms και 500 ms, ενώ η δειγματοληψία της μπαταρίας αναφοράς έλαβε χώρα στα 400 ms από την έναρξη του του παλμού φόρτισης και για  $SoC = 60\%$ .



**Πίνακας 6.9:** Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου Υπολογισμού του SoH. Δειγματοληψία στα 300ms από τον παλμό φόρτισης με  $SoC = 60\%$

Πραγματικό SoH	Εκτιμώμενο SoH	Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου
98.30 %	98.96 %	0.65 %
96.43 %	97.36 %	0.93 %
94.54 %	96.20 %	1.66 %
91.90 %	94.13 %	2.23 %
90.57 %	93.78 %	3.21 %
89.63 %	94.33 %	4.71 %
88.76 %	92.90 %	4.14 %
87.57 %	91.88 %	4.32 %
86.02 %	90.05 %	4.03 %
84.63 %	90.18 %	5.55 %
83.20 %	90.71 %	7.51 %
81.39 %	87.57 %	6.18 %
<b>Μέγιστο Σφάλμα</b>		6.18 %
<b>Μέγιστο Σφάλμα για <math>SoH &gt; 92\%</math></b>		1.66 %

**Πίνακας 6.10:** Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου Υπολογισμού του SoH. Δειγματοληψία στα 500ms από τον παλμό φόρτισης με  $SoC = 60\%$

Πραγματικό SoH	Εκτιμώμενο SoH	Σφάλμα Προτεινόμενης Μεθόδου
98.30 %	97.47 %	-0.83 %
96.43 %	95.25 %	-1.19 %
94.54 %	95.22 %	0.68 %
91.90 %	92.55 %	0.65 %
90.57 %	92.52 %	1.94 %
89.63 %	93.43 %	3.80 %
88.76 %	91.30 %	2.54 %
87.57 %	90.48 %	2.91 %
86.02 %	88.41 %	2.40 %
84.63 %	88.98 %	4.34 %
83.20 %	89.30 %	6.10 %
81.39 %	86.35 %	4.96 %
<b>Μέγιστο Σφάλμα</b>		6.10 %
<b>Μέγιστο Σφάλμα για <math>SoH &gt; 92\%</math></b>		1.19 %

Από τους παραπάνω Πίνακες είναι φανερό πως το σφάλμα του αλγορίθμου που προτείνεται είναι μικρό αν το εκτιμώμενο  $SoH > 92\%$  και σε καμία περίπτωση δεν θα ξεπεράσει το 1.66%. Ωστόσο, όταν το εκτιμώμενο  $SoH < 92\%$  το σφάλμα του αλγορίθμου μεγαλώνει αρκετά και μπορεί να φτάσει μέχρι και 7.51% για  $SoH \approx 83.20\%$ .

#### 6.2.4 Συμπεράσματα

Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5.3.1, ο αλγόριθμος Ολοκλήρωσης ως προς το ρεύμα είναι η πρωταρχική μέθοδος υπολογισμού του SoH η οποία εφαρμόζεται αν υπάρχει πλήρης εκφόρτιση και πλήρης φόρτιση της μπαταρίας. Ωστόσο, αν για μεγάλο χρονικό διάστημα δεν μπορεί να εφαρμοστεί η προηγούμενη μέθοδος (καθώς δεν υπάρχει πλήρη αποφόρτιση και πλήρη φόρτιση), τότε, κατά την φόρτιση θα χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος προσδιορισμού του SoH με την χρήση της εσωτερικής αντίστασης. Με τα παραπάνω πειραματικά δεδομένα αποδείχτηκε ότι η μέθοδος που προτείνεται αν εφαρμοστεί σε ένα Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών με ικανοποιητική συχνότητα δειγματοληψίας, τότε έχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια, με αρκετά μικρό σφάλμα ότα το SoH είναι μεγαλύτερο του 92%. Ωστόσο, όταν το εκτιμώμενο SoH πέσει κάτω από 92%, το σφάλμα του αλγορίθμου αυξάνεται αρκετά ενώ για  $SoH \approx 80\%$  ο αλγόριθμος έχει πολύ μεγάλο σφάλμα όπου κάτι το οποίο δεν είναι ικανοποιητικό για απαιτητικές εφαρμογές.

Από την άλλη μεριά, σε πολλές Συστοιχίες Μπαταριών η δειγματοληψία του Συστήματος Διαχείρισης Μπαταριών δεν είναι ικανοποιητική και έχει ως αποτέλεσμα η δειγματοληψία της τάσης και της έντασης ρεύματος να μην γίνει την ζητούμενη χρονική στιγμή αλλά να λάβει χώρα πιο μετά ή και πιο πριν. Στις παραπάνω μετρήσεις αναλύθηκε και το σφάλμα του αλγορίθμου αν η δειγματοληψία γίνει  $\pm 100$  ms από την ζητούμενη στιγμή και βρέθηκε πως για εκτιμώμενο  $SoH > 92\%$  το σφάλμα της μεθόδου ισούται με το πολύ 1.66% στην χειρότερη περίπτωση. Για εκτιμώμενο  $SoH < 92\%$ , το σφάλμα αυξάνεται και για  $SoH \approx 83.20\%$  η μέγιστη τιμή ανέρχεται σε 7.51%.

Γενικά, για όλα τα σενάρια δειγματοληψίας και για εκτιμώμενο  $SoH > 92\%$ , το σφάλμα του αλγορίθμου που προτείνεται είναι ικανοποιητικό, ενώ για χαμηλότερο SoH το σφάλμα αυξάνεται αρκετά και για μερικές εφαρμογές ίσως ο αλγόριθμος αυτός να είναι ακατάλληλος. Ωστόσο, η μέθοδος που προτάθηκε δεν είναι η κύρια μέθοδος υπολογισμού του SoH αλλά χρησιμοποιείται μόνο στην εξαιρετική περίπτωση που δεν υπάρχει πλήρης εκφόρτιση-φόρτιση της μπαταρίας. Δεδομένου του ότι μία μπαταρία μπορεί να αντέξει παραπάνω από 400 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης στην διάρκεια ζωής της ( $SoH > 80\%$ ) [31], η πιθανότητα του να μην υπάρξει πλήρη εκφόρτιση-φόρτιση πολλές φορές σε αυτούς του 400 κύκλους είναι χαμηλή.

Τέλος, η μικρή πολυπλοκότητα του αλγορίθμου, η ικανότητά του να προσδιορίσει το SoH γρήγορα, το μικρό σφάλμα που έχει για εκτιμώμενο  $SoH > 92\%$  αλλά και η μη απαίτηση για περαιτέρω αισθητήρες ή μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς στο Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών, κάνουν τον αλγόριθμο που προτείνεται, κατάλληλο υποψήφιο για δευτερεύον τρόπο υπολογισμού του SoH.

## Κεφάλαιο 7

# Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

## 7.1 Συμπεράσματα

### 7.1.1 Αλγόριθμος Υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύθηκαν τα δομικά στοιχεία ενός Συστήματος Διαχείρισης Μπαταριών και παρουσιάστηκαν οι πιο δημοφιλείς τρόποι υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης και της Κατάστασης Υγείας ενώ παρουσιάστηκαν οι απαιτήσεις των Μεθόδων Υπολογισμού (μικρή πολυπλοκότητα, λίγες υπολογιστικές απαιτήσεις κ.ά.). Για τον τρόπο υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης παρουσιάστηκε μία νέα μέθοδος που χρησιμοποιεί ως βάση της τον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting, ενώ περιλαμβάνει και μεθόδους, όπως ο προσδιορισμός του SoC από την τάση ανοιχτοκυκλώματος ή την μέθοδο  $LFD/Q_{trapped}$ , οι οποίες διορθώνουν τις πηγές σφαλμάτων του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting. Το σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου που προτάθηκε, είναι η ικανότητά της να προσδιορίσει το SoC σε οποιαδήποτε θερμοκρασία και αν βρίσκεται η μπαταρία αλλά και σε περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία φόρτισης είναι διαφορετική από την θερμοκρασία εκφόρτισης.

Χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα που είναι ελεύθερα προσβάσιμα στο διαδίκτυο, η μέθοδος που προτείνεται συγκρίθηκε με τον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting και παρουσίασε εξαιρετικά αποτελέσματα. Πιο αναλυτικά, σε περιπτώσεις όπου η θερμοκρασία φόρτισης είναι διαφορετική από την θερμοκρασία εκφόρτισης, ο αλγόριθμος που προτείνεται παρουσιάζει 4 φορές μικρότερο σφάλμα από τον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting στο τέλος της εκφόρτισης. Παράλληλα, για φόρτιση και εκφόρτιση της μπαταρίας στην Συμβατική Θερμοκρασία, οι δύο αυτοί αλγόριθμοι ταυτίζονται και υπολογίζουν την ίδια (σχεδόν) Κατάσταση Φόρτισης. Ωστόσο, αν οι δύο αυτοί αλγόριθμοι συγκριθούν για πολλές διαδοχικές φορτίσεις και εκφορτίσεις (όπως και γίνεται στον φυσικό κόσμο), ο απλός αλγόριθμος Coulomb Counting παρουσιάζει συσσωρευμένο σφάλμα ενώ η μέθοδος που προτείνεται έχει την ικανότητα να διορθώνει το υπολογισμένο SoC χρησιμοποιώντας άλλες μεθόδους, όπως για παράδειγμα την τάση ανοιχτοκυκλώματος της μπαταρίας.

Γενικά, η μέθοδος που παρουσιάστηκε έχει σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερο σφάλμα από τον απλό αλγόριθμο Coulomb Counting, χωρίς να απαιτεί περαιτέρω αισθητήρες από το Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών, ενώ η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου και η υπολογιστική ισχύς που απαιτεί είναι εφάμιλλη με αυτήν του απλού αλγορίθμου Coulomb Counting. Από την άλλη μεριά, ο αλγόριθμος που προτείνεται απαιτεί περισσότερες εργαστηριακές μετρήσεις που μπορεί να είναι χρονοβόρες (προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ του OCV-SoC) ενώ μπορεί να απαιτούν και εξειδικευμένα εργαλεία, όπως ο κλιματικός θάλαμος. Ωστόσο, κατά την κρίση του συντάκτη, η μεγάλη μείωση του σφάλματος που παρέχει ο αλγόριθμος που προτείνεται, υπερτερεί της ανάγκης για χρονοβόρες μετρήσεις.

### 7.1.2 Αλγόριθμος Υπολογισμού της Κατάστασης Υγείας

Ο αλγόριθμος υπολογισμού της Κατάστασης Υγείας που προτάθηκε αποτελείται από δύο μεθόδους, την *Ολοκλήρωση ως προς το ρεύμα* αλλά και την *Εσωτερική Αντίσταση*. Η μέθο-

δος προσδιορισμού της Κατάστασης Υγείας χρησιμοποιώντας την *Ολοκλήρωση ως προς το ρεύμα* χρησιμοποιείται αν η μπαταρία εκφορτιστεί και φορτιστεί όπου και μετράει τα Ah που απορροφά η μπαταρία κατά την φόρτιση. Η μέθοδος αυτή είναι και αυτή που χρησιμοποιούν οι κατασκευαστές μπαταριών για να μετρήσουν την χωρητικότητα των κελιών (με την μόνη διαφορά πως γίνεται κατά την εκφόρτιση) ενώ είναι η πιο ασφαλής μέθοδος και αυτή που χρησιμοποιείται που προτείνεται στην διεθνή βιβλιογραφία.

Ωστόσο, αν δεν λάβει χώρα πλήρης εκφόρτιση και πλήρης φόρτιση της μπαταρίας για μεγάλο χρονικό διάστημα, η Κατάσταση Υγείας της μπαταρίας δεν θα μπορέσει να προσδιοριστεί. Για αυτόν τον λόγο, προτάθηκε και ο τρόπος προσδιορισμού της Κατάστασης Υγείας της μπαταρίας χρησιμοποιώντας την μέθοδο της Εσωτερικής Αντίστασης όπου και μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε φόρτιση. Η μέθοδος αυτή μετράει την μεταβολή της εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας από τότε που η ίδια ήταν καινούρια και την συγκρίνει με μία (ή πολλές) μπαταρίες αναφοράς όπου η Κατάσταση Υγείας τους είναι γνωστή. Η μέθοδος παρουσιάζει πολύ μικρό σφάλμα (μικρότερο από 1.67%) όταν το SoH της μπαταρίας είναι μεγαλύτερο από 92%, ενώ για μικρότερο SoH το σφάλμα αυξάνεται. Η μέθοδος αυτή έχει μικρή πολυπλοκότητα, μικρή απαίτηση για υπολογιστική ισχύς αλλά και μπορεί να εφαρμοστεί σε Συστήματα Διαχείρισης Μπαταριών που έχουν πολύ μικρή δειγματοληψία τάσης και έντασης ρεύματος.

Γενικά, ο συνδυασμός της μεθόδου Ολοκλήρωσης ως προς το ρεύμα και της μεθόδου *Εσωτερικής αντίστασης*, επιτρέπουν τον υπολογισμό της Κατάστασης Υγείας με πολύ μεγάλη ακρίβεια αν υπάρχει πλήρη εκφόρτιση που ακολουθείται από πλήρη εκφόρτιση. Ωστόσο, με την μέθοδο της Εσωτερικής Αντίστασης, δύναται να προσδιοριστεί η Κατάσταση Υγείας ακόμα και αν δεν υπάρχει πλήρη εκφόρτιση-φόρτιση, με μικρό σφάλμα και οποιαδήποτε στιγμή κατά την διάρκεια της φόρτισης.

## 7.2 Μελλοντική Εργασία

### 7.2.1 Κατάσταση Φόρτισης

Μελλοντικά, για την περαιτέρω επιβεβαίωση της προτεινόμενης μεθόδου υπολογισμού της Κατάστασης Φόρτισης, οι επόμενες εργασίες μπορούν:

- Να εξετάσουν πώς το LFD επηρεάζεται από την Κατάσταση Υγείας της μπαταρίας.
- Να επιβεβαιώσουν τον αλγόριθμο που προτάθηκε σε θερμοκρασία που είναι γνωστό το  $Q_{Cha_T \rightarrow Dis_T}$ .
- Να επιβεβαιωθεί η μέθοδος που προτάθηκε για διαφορετικές χημείες μπαταριών.
- Να εξετάσουν το πως ο προσδιορισμός της Κατάστασης Φόρτισης από την τάση ανοιχτοκυκλώματος μπορεί να λάβει χώρα σε μπαταρίες  $LiFePO_4$ , δεδομένου της ύπαρξης πλατό στο γράφημα SoC-OCV.
- Να εξετάσουν την αντικατάσταση των των πινάκων αναζήτησης (lookup tables) με μεθόδους που απαιτούν λιγότερη μνήμη, όπως για παράδειγμα με μεθόδους Προσαρμογής Καμπύλης.

### 7.2.2 Κατάσταση Υγείας

Για την Κατάσταση Υγείας της μπαταρίας, μελλοντικές εργασίες μπορούν να ερευνηθούν τα παρακάτω θέματα:

- Ποιο είναι το σφάλμα της μεθόδου χρησιμοποιώντας περισσότερες μπαταρίες αναφοράς.
- Πώς διαφορετικά προφίλ εκφόρτισης επηρεάζουν το σφάλμα της μεθόδου.
- Πώς το σφάλμα θα επηρεαστεί αν, ανάλογα με το SoH της μπαταρίας επιλέγεται διαφορετικό SoC και όχι κάθε φορά ίδιο SoC, όπως και παρουσιάστηκε

- Την αντικατάσταση των πινάκων αναζήτησης με μεθόδους που απαιτούν λιγότερη μνήμη.



## Βιβλιογραφία

- [1] P. A., S. S., and K. G.-I. Addressing the impact of temperature extremes on large format li-ion batteries for vehicle applications. In *Ft. Lauderdale, FL, USA*, 03 2013.
- [2] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner, C. Wimmer, T. Soczka-Guth, and D. Sauer. Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. i. experimental investigation. *Journal of Power Sources*, 196(12):5334--5341, June 2011.
- [3] S. Arya and S. Verma. Nickel-metal hydride (ni-MH) batteries, Apr. 2020.
- [4] T. D. Atmaja and Amin. Energy storage system using battery and ultracapacitor on mobile charging station for electric vehicle. *Energy Procedia*, 68:433, Apr. 2015.
- [5] I. Baccouche, S. Jemmali, B. Manai, N. Omar, and N. Amara. Improved OCV model of a li-ion NMC battery for online SOC estimation using the extended kalman filter. *Energies*, 10(6):764, May 2017.
- [6] S. Badillo, B. Banfai, F. Birzele, I. Davydov, L. Hutchinson, T. Kam-Thong, J. Siebourg-Polster, B. Steiert, and J. D. Zhang. An introduction to machine learning. *Clinical Pharmacology Therapeutics*, 107, 03 2020.
- [7] m. BEN MARZOUK, A. CHAUMOND, E. REDONDO-IGLESIAS, M. Montaru, and S. Pelissier. Experimental protocols and first results of calendar and/or cycling aging study of lithium-ion batteries - the MOBICUS project. In *EVS29 - 2016 Electric Vehicle Symposium and Exhibition*, page 10 p, Montréal, Canada, June 2016. EVS29 - 2016 Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Montréal, CANADA, 19-/06/2016 - 22/06/2016.
- [8] M. Bruder Müller, B. Sobotka, and W. Dominic. Thedasda enigmatic 'battery of baghdad', 01 2019.
- [9] W. Cao, J. Li, and Z. Wu. Cycle-life and degradation mechanism of LiFePO<sub>4</sub>-based lithium-ion batteries at room and elevated temperatures. *Ionics*, 22(10):1791--1799, Apr. 2016.
- [10] H. A. Catherino. A perspective on nickel zinc battery technology. 2015.
- [11] W.-Y. Chang. The state of charge estimating methods for battery: A review. *ISRN Applied Mathematics*, 2013:1--7, July 2013.
- [12] Y. Chen, Y. Kang, Y. Zhao, L. Wang, J. Liu, Y. Li, Z. Liang, X. He, X. Li, N. Tavajohi, and B. Li. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*, 59:83--99, Aug. 2021.
- [13] D. Deng. Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering*, 3(5):385--418, Sept. 2015.
- [14] D. Deng. Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering*, 3(5):385--418, Sept. 2015.

- [15] W. Diao, J. Jiang, C. Zhang, H. Liang, and M. Pecht. Energy state of health estimation for battery packs based on the degradation and inconsistency. *Energy Procedia*, 142:3578--3583, Dec. 2017.
- [16] G. Eggert. The enigmatic 'battery of baghdad'. pages 31--34, 05 1996.
- [17] A. Elbe. *Akku4Future-Measurement methods for lithium-ion battery systems: Li-Ion characterization techniques to optimize state indication*. AV Akademikerverlag, paperback edition, 12 2014.
- [18] Enix Energies. *Battery specification, 26650 LIFEP04 BATTERY*, 10 2014.
- [19] G. Fathoni, S. A. Widayat, P. A. Topan, A. Jalil, A. I. Cahyadi, and O. Wahyunggoro. Comparison of state-of-charge (SOC) estimation performance based on three popular methods: Coulomb counting, open circuit voltage, and kalman filter. In *2017 2nd International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT)*. IEEE, Oct. 2017.
- [20] F. Feng, R. Lu, and C. Zhu. A combined state of charge estimation method for lithium-ion batteries used in a wide ambient temperature range. *Energies*, 7(5):3004--3032, May 2014.
- [21] H. He, R. Xiong, and J. Fan. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *Energies*, 4(4):582--598, Mar. 2011.
- [22] H. Heimes, A. Kampker, C. Lienemann, M. Locke, and C. Offermanns. *Lithium-ion Battery Cell Production Process*. 02 2019.
- [23] M. Hu, Y. Wang, and D. Ye. A timely review of lithium-ion batteries in electric vehicles: Progress, future opportunities, and challenges. *E3S Web of Conferences*, 308:01015, 2021.
- [24] L. Hyang-Mok, L. Seung-Jin, P. Youngsun, K. Cha-Hun, K. Je Young, L. Jae-Hyun, K. Seok Koo, and J. Y. Cho. The impact of cell geometries and battery designs on safety and performance of lithium ion polymer batteries.
- [25] C. Jeyaseelan, A. Jain, P. Khurana, D. Kumar, and S. Thatai. Ni-cd batteries, Apr. 2020.
- [26] H. Ji, W. Zhang, X.-H. Pan, M. Hua, Y.-H. Chung, C.-M. Shu, and L.-J. Zhang. State of health prediction model based on internal resistance. *International Journal of Energy Research*, 44(8):6502--6510, Apr. 2020.
- [27] E. D. Kostopoulos, G. C. Spyropoulos, and J. K. Kaldellis. Real-world study for the optimal charging of electric vehicles. *Energy Reports*, 6:418--426, Nov. 2020.
- [28] E. M. Krieger, J. Cannarella, and C. B. Arnold. A comparison of lead-acid and lithium-based battery behavior and capacity fade in off-grid renewable charging applications. *Energy*, 60:492--500, Oct. 2013.
- [29] A. Lajunen, P. Sainio, L. Laurila, J. Pippuri-Mäkeläinen, and K. Tammi. Overview of powertrain electrification and future scenarios for non-road mobile machinery. *Energies*, 11:1184, 05 2018.
- [30] S. Lemon and A. Miller. Electric vehicles in new zealand: Technologically challenged? 06 2013.
- [31] LG Chem, 20 YOIDO-DONG YOUNGDUNGPO-GU, SEOUL 150-721, KOREA. *PRODUCT SPECIFICATION: INR18650 MJ1*, 08 2014.



- [32] LG Chem, 20 YOIDO-DONG YOUNGDUNGPO-GU, SEOUL 150-721, KOREA. *Technical Information of LG 18650HG2 (3.0Ah)*, 12 2014.
- [33] C. A. Lundgren, K. Xu, T. R. Jow, J. L. Allen, and S. Zhang. 15. lithium-ion batteries and materials. 2018.
- [34] N. Meddings, M. Heinrich, F. Overney, J.-S. Lee, V. Ruiz, E. Napolitano, S. Seitz, G. Hinds, R. Raccichini, M. Gaberšček, and J. Park. Application of electrochemical impedance spectroscopy to commercial li-ion cells: A review. *Journal of Power Sources*, 480:228742, Dec. 2020.
- [35] M. Messing, T. Shoa, and S. Habibi. Estimating battery state of health using electrochemical impedance spectroscopy and the relaxation effect. *Journal of Energy Storage*, 43:103210, Nov. 2021.
- [36] D. Michie, D. Spiegelhalter, and C. Taylor. Machine learning, neural and statistical classification. *Technometrics*, 37, 01 1999.
- [37] K. Movassagh, A. Raihan, B. Balasingam, and K. Pattipati. A critical look at coulomb counting approach for state of charge estimation in batteries. *Energies*, 14(14):4074, July 2021.
- [38] M. Naguib. Lg 18650hg2 li-ion battery data and example deep neural network xev soc estimator script, 2020.
- [39] K. S. Ng, C.-S. Moo, Y.-P. Chen, and Y.-C. Hsieh. Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 86(9):1506--1511, Sept. 2009.
- [40] A. Nikolian, Y. Firouz, R. Gopalakrishnan, J.-M. Timmermans, N. Omar, P. van den Bossche, and J. van Mierlo. Lithium ion batteries—development of advanced electrical equivalent circuit models for nickel manganese cobalt lithium-ion. *Energies*, 9(5):360, May 2016.
- [41] A. Rahmoun and H. Biechl. Modelling of li-ion batteries using equivalent circuit diagrams. *Przegląd Elektrotechniczny*, 88:152--156, 01 2012.
- [42] A. Sharma, P. Zanotti, and L. MUSUNUR. Enabling the electric future of mobility: Robotic automation for electric vehicle battery assembly. *IEEE Access*, PP:1--1, 11 2019.
- [43] M. Swierczynski, D.-I. Stroe, A.-I. Stan, R. Teodorescu, and S. K. Kaer. Investigation on the self-discharge of the  $\text{LiFePO}_4/\text{c}$  nanophosphate battery chemistry at different conditions. In *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. IEEE, Aug. 2014.
- [44] V. R. Tannahill, D. Sutanto, K. M. Muttaqi, and M. A. Masrur. Future vision for reduction of range anxiety by using an improved state of charge estimation algorithm for electric vehicle batteries implemented with low-cost microcontrollers. *IET Electrical Systems in Transportation*, 5(1):24--32, Mar. 2015.
- [45] A. Tessier, M. Dubois, and J. Trovão. Real-time estimator li-ion cells internal resistance for electric vehicle application. *World Electric Vehicle Journal*, 8(2):410--421, June 2016.
- [46] P. Venugopal and V. T. State-of-health estimation of li-ion batteries in electric vehicle using IndRNN under variable load condition. *Energies*, 12(22):4338, Nov. 2019.
- [47] D. Wang, Y. Bao, and J. Shi. Online lithium-ion battery internal resistance measurement application in state-of-charge estimation using the extended kalman filter. *Energies*, 10(9):1284, Aug. 2017.

- [48] F. Yang, D. Wang, Y. Zhao, K.-L. Tsui, and S. J. Bae. A study of the relationship between coulombic efficiency and capacity degradation of commercial lithium-ion batteries. *Energy*, 145:486--495, Feb. 2018.
- [49] A. Yoshino, K. Sanekika, and T. Nakajima, May 1987.
- [50] Q.-Q. Yu, R. Xiong, L.-Y. Wang, and C. Lin. A comparative study on open circuit voltage models for lithium-ion batteries. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 31(1), Aug. 2018.
- [51] Y. Zhi, H. Wang, and L. Wang. A state of health estimation method for electric vehicle li-ion batteries using GA-PSO-SVR. *Complex & Intelligent Systems*, 8(3):2167--2182, Jan. 2022.
- [52] W. Zhou, Y. Zheng, Z. Pan, and Q. Lu. Review on the battery model and SOC estimation method. *Processes*, 9(9):1685, Sept. 2021.
- [53] M. S. Ziegler and J. E. Trancik. Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline. *Energy & Environmental Science*, 14(4):1635--1651, 2021.