

Life and Health of Lithium Ion Batteries

Αναφορά βιβλιογραφικής εργασίας
Αξιοπιστία συστημάτων 2024

Αθανάσιος Γρηγόριος Τσαρναδέλης
THMMY, ΑΠΘ
AEM 10388
atsarnad@ece.auth.gr

Γεώργιος Πίττης
THMMY, ΑΠΘ
AEM 10586
gkpittis@ece.auth.gr

Περίληψη—Η παρούσα εργασία εξετάζει τη δομή, τη λειτουργία και την αξιοπιστία των μπαταριών ιόντων λιθίου, με έμφαση σε παραμέτρους όπως η κατάσταση της υγείας (SOH), η εναπομένουσα ωφέλιμη ζωή (RUL) και οι μηχανισμοί υποβάθμισης. Συζητούνται επίσης διάφορες μέθοδοι εκτίμησης και εφαρμογές.

Index Terms—Μπαταρία Ιόντων Λιθίου, State of Health, State of Charge, Remaining Useful Life, End of Life, Άνοδος, Κάθοδος, Αξιοπιστία

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν γίνει βασικό κομμάτι της σύγχρονης τεχνολογίας, τροφοδοτώντας συσκευές από smartphones μέχρι ηλεκτρικά οχήματα και συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το παρόν έγγραφο παρέχει μια επισκόπηση της δομής, των λειτουργιών, των παραγόντων γήρανσης και των μεθόδων πρόβλεψης της αξιοπιστίας τους.

II. ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ

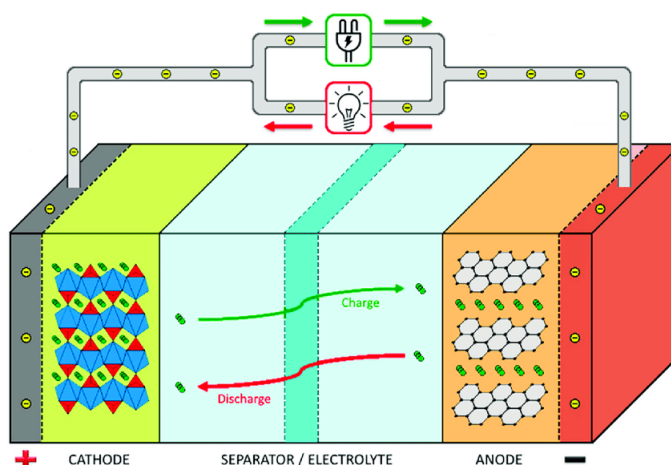
A'. Στοιχεία Μπαταρίας

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούνται από πέντε βασικά μέρη:

- **Άνοδος:** Η άνοδος είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο της μπαταρίας ιόντων λιθίου. Αποτελείται από ενώσεις λιθίου-άνθρακα (γραφίτη).
- **Κάθοδος:** Η κάθοδος είναι το θετικό ηλεκτρόδιο της μπαταρίας. Αποτελείται από οξειδία λιθίου-μετάλλου, όπως LiCoO_2 (οξείδιο λιθίου-κοβαλτίου) ή άλλες ενώσεις όπως LiFePO_4 (φωσφορικός σίδηρος λιθίου).
- **Διαχωριστής:** Είναι το υλικό που παρεμβάλλεται ανάμεσα στην κάθοδο και στην άνοδο και αποτρέπει την άμεση επαφή τους. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται ο κίνδυνος βραχυκυκλώματος των ηλεκτροδίων της μπαταρίας. Κατασκευάζεται από πορώδες υλικό. Ακόμη, επιτρέπει τη ροή των ιόντων λιθίου μέσω των πόρων του, αλλά εμποδίζει τη διέλευση των ηλεκτρονίων.
- **Ηλεκτρολύτης:** Μόλις τοποθετηθούν τα ηλεκτρόδια της μπαταρίας, η εναπομένουσα απόσταση μεταξύ του διαχωριστή και του ηλεκτροδίου γεμίζεται με υγρό ηλεκτρολύτη. Το υγρό αυτό επιτρέπει τη μεταφορά των ιόντων λιθίου από τη κάθοδο στην άνοδο και αντιστρόφως.

- **Συλλέκτες Ρεύματος:** Πρόκειται για αγωγικές πλάκες που συνδέονται με την άνοδο και την κάθοδο. Υπάρχει ένας συλλέκτης ρεύματος δίπλα στην άνοδο και ένας συλλέκτης ρεύματος δίπλα από τη κάθοδο. Συνήθως αποτελούνται από χαλκό και από αλουμίνιο. Ο ρόλος τους είναι να συνδέουν την άνοδο και την κάθοδο με το εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα.

Στο Σχήμα 1 φαίνονται τα κύρια μέρη των μπαταριών ιόντων λιθίου.



Σχήμα 1. Η κάθοδος είναι η αριστερή πράσινη περιοχή, ενώ η άνοδος είναι η δεξιά πορτοκαλί περιοχή. Ο διαχωριστής είναι η σκουροπράσινη λωρίδα στο κέντρο της μπαταρίας. Οι 2 περιοχές εκατέρωθεν του διαχωριστή αναπαριστούν το υγρό ηλεκτρολύτη. Οι γκριζα και κόκκινη πλάκα στα άκρα της μπαταρίας αναπαριστούν τους συλλέκτες ρεύματος. Ο γκριζός πάνα από τη μπαταρία αποτελεί το εξωτερικό κύκλωμα.

B'. Αρχή λειτουργίας

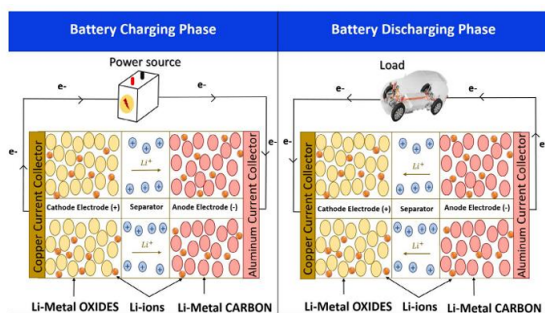
- **Φόρτιση μπαταρίας:** Στη φόρτιση των μπαταριών ιόντων λιθίου, χρησιμοποιείται μια εξωτερική πηγή τάσης (π.χ. ένας φορτιστής κινητών τηλεφώνων, φορτιστής ηλεκτρικών αυτοκινήτων κ.λπ.). Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, τα ιόντα λιθίου (Li^+) μετακινούνται από τη κάθοδο (θετικό ηλεκτρόδιο μπαταρίας) προς την άνοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο μπαταρίας) μέσω του ηλεκτρολύτη. Ταυτόχρονα, τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω του

εξωτερικού κυκλώματος (δηλαδή μέσω του κυκλώματος του φορτιστή) από την κάθοδο προς την άνοδο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η τάση των ακροδεκτών της μπαταρίας να αυξάνεται σταδιακά. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η φόρτιση της μπαταρίας [1], [2].

- **Αποφόρτιση μπαταρίας:** Σε αυτή την περίπτωση, η συσκευή που θέλουμε να τροφοδοτήσουμε με ενέργεια (π.χ. κινητό τηλέφωνο, laptop, ηλεκτρικό αυτοκίνητο) αποτελεί το εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα στο οποίο συνδέεται η μπαταρία. Κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης, τα ιόντα λιθίου (Li^+) μετακινούνται από την άνοδο προς την κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη. Ταυτόχρονα, τα ηλεκτρόνια (e^-) ρέουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος από την άνοδο προς την κάθοδο. Η ροή των ηλεκτρονίων στο εξωτερικό κύκλωμα δημιουργεί το ηλεκτρικό ρεύμα που τροφοδοτεί τη συσκευή με την ηλεκτρική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στη μπαταρία. Παράλληλα, η ενέργεια της μπαταρίας μειώνεται σταδιακά και κάποια στιγμή μηδενίζεται. Τότε, η μπαταρία πρέπει να επαναφορτιστεί [1], [2].

Σημειώνεται ότι ο αριθμός των ηλεκτρονίων και των ιόντων λιθίου που συμμετέχουν στις διαδικασίες φόρτισης και αποφόρτισης της μπαταρίας πρέπει να είναι ίσος, προκειμένου να διασφαλίζεται η ισορροπία του ηλεκτρικού φορτίου μέσα στη μπαταρία.

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται οι διαδικασίες φόρτισης και αποφόρτισης της μπαταρίας ιόντων λιθίου.



Σχήμα 2. Στο αριστερό κύκλωμα, παρουσιάζεται σχηματικά η φόρτιση της μπαταρίας. Στο δεξί κύκλωμα, παρουσιάζεται σχηματικά η αποφόρτιση της μπαταρίας.

III. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ

Λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής και της υψηλής χωρητικότητάς τους, οι LIBs χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, από μικρομπαταρίες πολύ μικρού μεγέθους [3], μέχρι συστήματα αποθήκευσης ενέργειας από μπαταρίες στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, και οτιδήποτε ενδιάμεσο. Οι δημοφιλείς χρήσεις περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τα εξής:

- Εμπορικά ηλεκτρονικά είδη, όπως smartphones και συσκευές IoT.

- Ηλεκτρικά οχήματα, όπως αυτοκίνητα, λεωφορεία και τρένα.
- Ηλεκτρικά εργαλεία και άλλα.

IV. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Η ανάπτυξη των μπαταριών ιόντων λιθίου ξεκίνησε τη δεκαετία του 1960. Η πρώτη σημαντική ανακάλυψη έγινε το 1974 από τους Stanley Whittingham et al. [4], οι οποίοι πρότειναν μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία μετάλλων λιθίου, χρησιμοποιώντας διθειικό τιτάνιο (TiS_2) ως υλικό καθόδου. Αυτή η προτεινόμενη λύση είχε προβλήματα θερμικής φυγής και όταν ερχόταν σε επαφή με το νερό, εξέπεμπε πολύ τοξικό αέριο υδρόθειο H_2S . Μερική λύση στα προβλήματα αυτά προήλθε από τον John B. Goodenough et al. [5] το 1981, ο οποίος πρότεινε τη χρήση οξειδίου λιθίου κοβαλτίου (Lithium Cobalt Oxide ή LiCoO_2), ευρέως γνωστό ως LCO. Τα θερμικά προβλήματα μειώθηκαν, αλλά δεν εξαλείφθηκαν εντελώς. Το 1983, ο Akira Yoshino et al. [6] πρότεινε την πρώτη πρακτική μπαταρία ιόντων λιθίου και με δοκιμές απέδειξε τη βελτιωμένη αξιοπιστία τους σε σχέση με τις μπαταρίες μετάλλων λιθίου. Η πρώτη εμπορική εφαρμογή των μπαταριών ιόντων λιθίου ήταν από τη Sony, ως μέρος μιας βιντεοκάμερας, που φαίνεται στο Σχήμα 3. Περίπου 30 χρόνια αργότερα, το 2019, οι Whittingham, Goodenough και Yoshino τιμήθηκαν με το βραβείο Νόμπελ Χημείας για την ανάπτυξη των μπαταριών ιόντων λιθίου. [7]



Σχήμα 3. Η πρώτη εμπορική μπαταρία ιόντων λιθίου από τη Sony

V. ΔΕΙΚΤΕΣ ΥΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΖΩΗΣ

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε συγκεκριμένους δείκτες για να προβλέψουμε τη διάρκεια ζωής και την τρέχουσα κατάσταση υγείας μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου, όπως περιγράφεται στο [8].

A'. Κατάσταση Φόρτισης (State of Charge - SOC)

Η Κατάσταση Φόρτισης (State of Charge - SOC) αντιπροσωπεύει τη διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας. Το Q_{remain} ορίζει το εναπομένον φορτίο και το Q_{rated} τη θεωρητική χωρητικότητα της μπαταρίας. Εκφράζεται συνήθως

μεταξύ 0 και 1, όπου 0 σημαίνει ότι η μπαταρία είναι πλήρως αποφορτισμένη και 1 ότι είναι πλήρως φορτισμένη.

$$SOC = \frac{Q_{\text{remain}}}{Q_{\text{rated}}} \times 100\% \quad (1)$$

B'. Κατάσταση Υγείας (State of Health - SOH)

Η Κατάσταση Υγείας (State of Health - SOH) προβλέπει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας συγκρίνοντας την τρέχουσα κατάσταση της με την αρχική. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμος δείκτης όταν οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται μακροπρόθεσμα. Συνήθως εκφράζει τη διάρκεια ζωής σε κύκλους φόρτισης ή/και σε ημέρες/μήνες/έτη. Μπορεί να οριστεί με διαφορετικούς τρόπους, όπως φαίνεται στον Πίνακα Ι.

Γ'. Τέλος Ζωής (End of Life - EOL)

Το Τέλος Ζωής (End of Life - EOL) ορίζει τη στιγμή κατά την οποία η μπαταρία θεωρείται ακατάλληλη για χρήση και χρειάζεται αντικατάσταση. Δεν υπάρχει σαφής ορισμός του EOL, αλλά συνήθως θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί όταν η χωρητικότητα φτάσει το 70-80% της ονομαστικής.

Δ'. Υπολειπόμενη Χρήσιμη Ζωή (Remaining Useful Life - RUL)

Η Υπολειπόμενη Χρήσιμη Ζωή (Remaining Useful Life - RUL) είναι ένας δείκτης που προβλέπει το χρόνο μέχρι η μπαταρία να φτάσει στο EOL. Μετράται σε ημέρες/μήνες/έτη ή σε κύκλους φόρτισης. Ωστόσο, η μπαταρία μπορεί να φτάσει στο EOL νωρίτερα από την προβλεπόμενη ημερομηνία. Ειδικότερα, σε μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων, όπου οι κύκλοι της μπαταρίας δεν είναι πλήρεις, είναι αρκετά δύσκολο να προβλέψω το RUL. [9]

VI. ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ SOH ΚΑΙ RUL

Η ακριβής πρόβλεψη των SOH και RUL είναι πολύ σημαντική για να διασφαλιστεί η ασφάλεια, να μεγιστοποιηθεί η χρήση της χωρητικότητας και να παραταθεί η ζωή της μπαταρίας. Η αγνόηση αυτών των δεικτών μπορεί να μειώσει

σημαντικά τη διάρκεια ζωής και να προκαλέσει ακόμα και ατυχήματα, όπως θερμική φυγή.

VII. ΜΕΤΡΙΚΕΣ ΓΙΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΩΝ SOH , SOC ΚΑΙ RUL

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χαρακτηρίζονται από τρεις κύριες παραμέτρους:

- Χωρητικότητα Ισχύος (Power Capacity)
- Σύνθετη Εσωτερική Αντίσταση της Μπαταρίας (Battery Internal Impedance)
- Τάση Ανοικτού Κυκλώματος (Voc = Voltage Open Circuit)

Οι παραπάνω παράμετροι περιγράφουν τη συμπεριφορά των μπαταριών ιόντων λιθίου και χρησιμοποιούνται ως τυπικά κριτήρια για την εκτίμηση της Κατάστασης Φόρτισης (SOC) ,της Κατάστασης Υγείας (SOH) και της υπολειπόμενης χρήσιμης ζωής (RUL) της μπαταρίας.

- **Χωρητικότητα Ισχύος:** Η χωρητικότητα ισχύος καθορίζει τη ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να αποθηκευτεί μέσα στη μπαταρία. Συνεπώς, ισούται με την ολοκλήρωση του ρεύματος κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης. Η μαθηματική της έκφραση είναι:

$$C_{bat} = \int_0^t i \cdot dt$$

Όπου:

- C_{bat} είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας
- i είναι το ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας
- t είναι ο χρόνος που απαιτείται για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας

Ακόμη, κάποιες ενδεικτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της χωρητικότητας της μπαταρίας είναι:

- 1) Εκφόρτιση με Σταθερό Ρεύμα και Σταθερή Τάση (Constant-Current Constant-Voltage).
- 2) Εκφόρτιση με σταθερό παλμό ρεύματος.

Defining the type	Defining the formula	Clarification
Health status based on capacity definition	$SOH_c = \frac{C}{C_0} \times 100\%$	SOH_c : Battery capacity healthiness; C : The rated capacity of the battery at moment; C_0 : Initial rated capacity of the battery
State of health based on internal resistance definition	$SOH_r = \frac{R_{\text{end}} - R(i)}{R_{\text{end}} - R_0} \times 100\%$	SOH_r : The health of the internal resistance of the battery; R_{end} : Internal resistance of the battery at the moment of end of life; $R(i)$: Internal resistance of the battery at moment i ; R_0 : Initial internal resistance of the battery
Health state based on power definition	$SOH_p = \left(1 - \frac{P(i)}{P_0}\right) \times 100\%$	SOH_p : Battery power health degree; P_0 : Battery nameplate power; $P(i)$: Effective power that can be supplied after the i th cycle
Health states based on self-discharge definitions	$SOH_s = \frac{R_{\text{end}} - R(i)}{R_{\text{end}} - R_0} \times 100\%$	SOH_s : The self-discharge health of the battery; R_{end} : Self-discharge resistance at the moment of battery end-of-life; $R(i)$: Battery self-discharge resistance at sampling moment, i ; R_0 : Self-discharge resistance of the battery at the initial moment

Πίνακας Ι
DEFINITIONS AND CLARIFICATIONS OF BATTERY HEALTH STATUS FORMULAS

- 3) Η εφαρμογή σταθερής τάσης μέχρι το ρεύμα να φτάσει σε μια προκαθορισμένη τιμή κατά την εκφόρτιση.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η μείωση της χωρητικότητας μιας μπαταρίας οφείλεται και στη μείωση του αποθέματος λιθίου που περιέχει, λόγω των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν εντός της μπαταρίας με την άρροδο του χρόνου.

- **Σύνθετη Εσωτερική Αντίσταση της Μπαταρίας:** Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας είναι ζωτικής σημασίας για τον προσδιορισμό της ηλικίας της μπαταρίας. Πιο συγκεκριμένα, η υπολειπόμενη χρήσιμη ζωή (Remaining Useful Life - RUL) της μπαταρίας μειώνεται όσο αυξάνεται η εσωτερική αντίστασή της. Η μπαταρία πρέπει να αντικατασταθεί όταν η εσωτερική της αντίσταση διπλασιαστεί.
- **Τάση Ανοιχτού Κυκλώματος(Voc):** Είναι η τάση της μπαταρίας όταν δεν τροφοδοτεί κάποιο φορτίο. Βοηθά στην εκτίμηση της κατάστασης υγείας (SOH) της μπαταρίας. Επιπλέον, η μέτρηση του Voc διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

VIII. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΓΗΡΑΝΣΗΣ

Διάφοροι παράγοντες γήρανσης επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής των μπαταριών ιόντων λιθίου, όπως εσωτερικοί παράγοντες (χημικές αντιδράσεις) και εξωτερικοί παράγοντες (θερμική, ηλεκτρική και μηχανική καταπόνηση). Η παρακολούθηση αυτών των παραγόντων είναι απαραίτητη για την κατανόηση της επίδρασής τους στη συμπεριφορά της μπαταρίας, με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης και την αποτροπή καταπονήσεων.

A'. Εσωτερικοί Παράγοντες

Οι εσωτερικοί παράγοντες γήρανσης περιλαμβάνουν κυρίως χημικές αντιδράσεις στην άνοδο και την κάθοδο, καθώς και άλλες δευτερεύουσες χημικές αντιδράσεις. Αυτές οι αντιδράσεις προκαλούν Απώλεια Λιθίου (Loss of Lithium Inventory - LLI), Απώλεια Ενεργού Υλικού (Loss of Active Material - LAM) και αυξημένη αντίσταση, μειώνοντας έτσι την απόδοση της μπαταρίας.

B'. Εξωτερικοί Παράγοντες

Οι εξωτερικοί παράγοντες γήρανσης εξαρτώνται από τη λειτουργία της μπαταρίας, είτε από τον τελικό χρήστη είτε από το σύστημα στο οποίο ανήκει.

1) **Θερμική Καταπόνηση (Thermal Abuse):** Όταν η μπαταρία λειτουργεί σε πολύ υψηλές ή πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, γηράσκει γρήγορα. Αυτό οφείλεται στις επιπτώσεις των Χαμηλών Θερμοκρασιών και των Υψηλών Θερμοκρασιών, που οδηγούν επίσης σε μειωμένη απόδοση. [9]

2) **Ηλεκτρική Καταπόνηση (Electrical Abuse):** Η ηλεκτρική καταπόνηση συμβαίνει όταν η μπαταρία υπερφορτίζεται, αποφορτίζεται υπερβολικά ή βραχυκυκλώνεται, προκαλώντας χημικές αντιδράσεις που οδηγούν σε προβλήματα απόδοσης και ασφάλειας. Αυτό εξαρτάται από τις επιπτώσεις της Υπερφόρτισης, της Υπεραποφόρτισης και των Υψηλών Ρευμάτων.

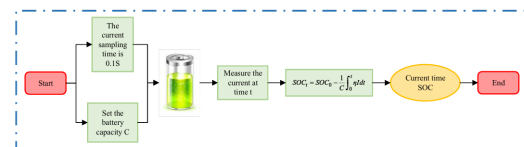
3) **Μηχανική Καταπόνηση (Mechanical Abuse):** Η μηχανική καταπόνηση προκύπτει από μηχανικές πιέσεις ή καταπονήσεις. Η μπαταρία διογκώνεται όταν υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο όριο παραμόρφωσης, γεγονός που αποτελεί σοβαρό κίνδυνο ασφάλειας, οδηγώντας συχνά σε θερμική φυγή και εκρήξεις χωρίς προειδοποίηση. Επιπλέον, μπορεί να προκαλέσει ρωγμές στα ηλεκτρόδια, με αποτέλεσμα την υλική αποτυχία και τη μείωση της απόδοσης.

IX. ΚΑΠΟΙΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ SOH, SOC, RUL THE ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

A'. Μέθοδοι Άμεσης Μέτρησης(Direct measurement methods)

Εκτιμά τα SOC και SOH της μπαταρίας μετρώντας σε πραγματικό χρόνο παραμέτρους της μπαταρίας όπως η τάση, το ρεύμα και η θερμοκρασία. Δεν απαιτεί πολύπλοκο μαθηματικό μοντέλο ή σύνθετη επεξεργασία δεδομένων, αφού μετρά τη τιμή των συγκεκριμένων παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο. Ενδεικτικά, αναφέρουμε έναν αλγόριθμο που ανήκει στη συγκεκριμένη κατηγορία:

- **Ampere integral method:** Εκτιμά την υπολειπόμενη χωρητικότητα της μπαταρίας, μετρώντας τα ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας σε πραγματικό χρόνο και στη συνέχεια τα ολοκληρώνει. Με αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται το συνολικό ποσοστό φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Τα πλεονεκτήματά της είναι ότι περιέχει απλούς υπολογισμούς και γενικά εξάγει αξιόπιστα αποτελέσματα. Τα μειονεκτήματά της είναι ότι οι αλλαγές θερμοκρασίας, η γήρανση της μπαταρίας, το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης της μπαταρίας μπορούν να μειώσουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου.



Σχήμα 4. Ampere integral method

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται τα βασικά στάδια της συγκεκριμένης μεθόδου. Πιο συγκεκριμένα:

- 1) **Set the battery capacity C:** Ορίζεται η αρχική (δηλ. συνολική) χωρητικότητα της μπαταρίας.
- 2) **The current sampling time is 0.1 second:** Ορίζω τον χρόνο δειγματοληψίας του ρεύματος να είναι 0.1 δευτερόλεπτα. Δηλαδή, κάθε 0.1 δευτερόλεπτα θα

κάνω μετρήσεις του ρεύματος φόρτισης ή εκφόρτισης της μπαταρίας.

- 3) **Measure the current at time t:** Τη χρονική στιγμή δειγματοληψίας t , μετρώ σε πραγματικό χρόνο το ρεύμα της μπαταρίας.
- 4) **Integration - Calculate the current time SOC:** Υπολογίζω το SOC χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$SOC_t = SOC_0 - \frac{1}{C} \cdot \int_0^t \eta \cdot I \cdot dt$$

όπου:

- SOC_t : η κατάσταση φόρτισης τη χρονική στιγμή t ,
- SOC_0 : η αρχική κατάσταση φόρτισης,
- C : η χωρητικότητα της μπαταρίας,
- η : η απόδοση της μπαταρίας,
- I : το ρεύμα φόρτισης ή εκφόρτισης.

Εδώ γίνεται η ολοκλήρωση του ρεύματος, δηλαδή η άθροιση όλων των επιμέρους τιμών ρευμάτων φόρτισης/εκφόρτισης που έχω μετρήσει μέχρι στιγμής. Δηλαδή, κάθε φορά που μετρώ το ρεύμα της μπαταρίας, το προσθέτω στο σύνολο των προηγούμενων μετρήσεων για να υπολογίσω την ποσότητα ενέργειας που έχει προστεθεί (φόρτιση) ή έχει αφαιρεθεί (αποφόρτιση) από τη μπαταρία μέχρι τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Έτσι, υπολογίζεται η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SoC), η οποία μπορεί να μας δώσει μια εικόνα της υπολειπόμενης χωρητικότητας της μπαταρίας.

B'. Model-Based Estimation Methods (Μέθοδοι εκτίμησης βασισμένες σε μοντέλα)

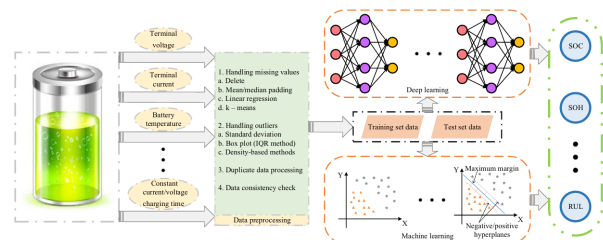
Οι model-based estimation methods προσπαθούν να μοντελοποιήσουν τη συμπεριφορά της μπαταρίας. Για τον λόγο αυτό, ενσωματώνουν διάφορες παραμέτρους της μπαταρίας, μέσα σε πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις προκειμένου να καταφέρουν να εκτιμήσουν με ακρίβεια το SOH, το SOC και το RUL. Δηλαδή, επιδιώκουν να δημιουργήσουν ένα μαθηματικό μοντέλο που να περιγράφει με ακρίβεια τη λειτουργία της μπαταρίας. Για τον λόγο αυτό, βασίζονται στην κατανόηση των φυσικών και χημικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της μπαταρίας, καθώς και στη συλλογή δεδομένων σχετικά με τις παραμέτρους της μπαταρίας σε πραγματικό χρόνο. Τέτοιες παράμετροι είναι η τάση, το ρεύμα, η χωρητικότητα, η εσωτερική αντίσταση και η θερμοκρασία. Βασικές model-based μέθοδοι είναι :

- τα ηλεκτροχημικά μοντέλα(electrochemical models)
- τα μοντέλα ισοδύναμου κυκλώματος(equivalent circuit models)
- τα εμπειρικά μοντέλα(empirical models)
- τα ηλεκτροχημικά μοντέλα αντίστασης(electrochemical impedance models)

Γ'. Data-Driven Estimation Methods (Μέθοδοι εκτίμησης βασισμένες σε δεδομένα)

Οι data-driven estimation methods αντιμετωπίζουν την μπαταρία ως ένα “μαύρο” κουτί. Δεν διαθέτουν προγενέστερη γνώση των φυσικών ή χημικών διεργασιών που συμβαίνουν στο εσωτερικό της μπαταρίας. Αντίθετα, «εκπαιδεύονται» μέσω της ανάλυσης μεγάλων συνόλων δεδομένων που αφορούν τις παραμέτρους της μπαταρίας, χρησιμοποιώντας αλγορίθμους μηχανικής μάθησης(π.χ.SVM) και βαθιάς μάθησης(π.χ.CNN).Με τον τρόπο αυτό, “μαθαίνουν” τη λειτουργία και τη συμπεριφορά της μπαταρίας.

Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν ως εισόδους παραμέτρους της μπαταρίας όπως η τάση, το ρεύμα, η θερμοκρασία, ενώ οι έξοδοι είναι συνήθως η κατάσταση φόρτισης (SOC), η κατάσταση υγείας (SOH) και η υπολειπόμενη χρήσιμη ζωή (RUL). Ουσιαστικά, επιδιώκουν να βρουν μια αντιστοιχία μεταξύ εισόδων και εξόδων, αντιμετωπίζοντας τη μπαταρία ως “μαύρο κουτί”. Συνεπώς, τα data-driven μοντέλα απαιτούν ένα μεγάλο και ποιοτικό σύνολο δεδομένων που να καλύπτει διάφορες φάσεις λειτουργίας και γήρανσης της μπαταρίας. Μόνο έτσι μπορούν να εκπαιδευτούν αποτελεσματικά και να εξασφαλίσουν αξιόπιστες αντιστοιχίσεις μεταξύ εισόδων και εξόδων.



Σχήμα 5. Τα βασικά στάδια των data-driven μεθόδων

Το Σχήμα 5 περιγράφει τη γενική φιλοσοφία των data-driven μεθόδων. Πιο συγκεκριμένα:

- Στο πρώτο στάδιο, εισάγω στο μοντέλο τα δεδομένα που αφορούν παραμέτρους της μπαταρίας. Στο Σχήμα 5 εισάγουμε τις ακόλουθες παραμέτρους:
 - 1) **terminal voltage:** Είναι η τάση που αναπτύσσεται ανάμεσα στους 2 ακροδέκτες της μπαταρίας. Η μπαταρία τροφοδοτεί το εξωτερικό φορτίο με αυτή την τάση.
 - 2) **terminal current:** Είναι το ρεύμα που ρέει από την μπαταρία προς το εξωτερικό κύκλωμα.
 - 3) **Battery temperature:** Η θερμοκρασία της μπαταρίας
- Ακολουθεί το στάδιο της προ-επεξεργασίας των δεδομένων (**Data preprocessing**). Σε αυτό το στάδιο, τα δεδομένα “καθαρίζονται” από διάφορα σφάλματα που τυχόν περιέχουν και επίσης καθαρίζονται και από τον θόρυβο.

- Στη συνέχεια, τα “καθαρισμένα” πλέον δεδομένα χωρίζονται σε σύνολο εκπαίδευσης (**Training set data**) και σύνολο δοκιμών (**Test set data**).
- Το μοντέλο εκπαιδεύεται με το σύνολο εκπαίδευσης και αξιολογείται χρησιμοποιώντας το σύνολο δοκιμών. Μπορεί να πρόκειται είτε για μοντέλο μηχανικής μάθησης (**Machine Learning**) είτε για μοντέλο βαθιάς μάθησης (**Deep Learning**).
- Έτσι, το μοντέλο “μαθαίνει” να λειτουργεί σωστά για τις διάφορες παραμέτρους που αφορούν τη μπαταρία και συνακόλουθα να υπολογίζει στην έξοδο το σωστό SOH, SOC και RUL.

X. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ DATA-DRIVEN ΚΑΙ MODEL-BASED ΜΕΘΟΔΩΝ

Γενικά μιλώντας, οι αλγόριθμοι εκτίμησης που βασίζονται σε μοντέλα (**model-based**) είναι κατάλληλοι για σενάρια όπου υπάρχει καλή γνώση των φυσικών ή χημικών διεργασιών στο εσωτερικό της μπαταρίας. Αντίθετα, οι μέθοδοι που βασίζονται σε δεδομένα (**data-driven**) είναι κατάλληλες για σενάρια με μεγάλο όγκο μετρημένων δεδομένων, αλλά ανεπαρκή γνώση για τις εσωτερικές διεργασίες της μπαταρίας.

Features	Model-based approach	Based on a data-driven approach
Usage scenario	Initial stage, physical characteristics analysis, stable working environment	Large-scale application, dynamic environment, rapid deployment
Advantages	Strong physical interpretation, versatility, high accuracy	Strong adaptive ability, good real-time, high robustness
Disadvantages	High model complexity, poor real-time performance, and strong parameter dependence	High data demand, poor interpretation, and risk of overfitting

Σχήμα 6. Model-Based VS Data-Driven methods

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται το σενάριο χρήσης, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των model-based και data-driven μεθόδων. Ειδικότερα :

• Για τις Model-Based μεθόδους:

1) Usage Scenario (Σενάριο Χρήσης):

- **physical characteristics analysis:** Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η model-based προσέγγιση βασίζεται στη κατανόηση των εσωτερικών διεργασιών της μπαταρίας και δημιουργεί ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει και αναλύει τα φυσικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας.
- **stable working environment:** Είναι αρκετά χρήσιμη μέθοδος σε σταθερά περιβάλλοντα όπου οι συνθήκες λειτουργίας της μπαταρίας, όπως η θερμοκρασία ή το ηλεκτρικό φορτίο, παραμένουν σταθερές ή δεν αλλάζουν πολύ.

2) Advantages (Πλεονεκτήματα):

- **Strong physical interpretation:** Έχουν ισχυρή φυσική ερμηνεία, αφού το μαθηματικό τους μοντέλο βασίζεται σε εξισώσεις φυσικής και χημείας που αναλύουν τη λειτουργία της μπαταρίας. Έτσι, τα αποτελέσματα που παράγουν, μπορούν να ερμηνευτούν με βάση τα

φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα στη μπαταρία.

- **Versatility:** Είναι ευέλικτες μέθοδοι. Δηλαδή, μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφορετικούς τύπους μπαταριών, έχοντας τροποποιήσει κατάλληλα το μαθηματικό τους μοντέλο ώστε να ανταποκρίνεται στις εσωτερικές φυσικές διεργασίες της νέας μπαταρίας.
- **High accuracy:** Έχουν υψηλή ακρίβεια στους υπολογισμούς.

3) Disadvantages (Μειονεκτήματα):

- **High model complexity:** Παρουσιάζουν υψηλή πολυπλοκότητα διότι χρησιμοποιούν σύνθετα μαθηματικά μοντέλα.
- **Poor real-time performance:** Έχουν κακή απόδοση σε πραγματικό χρόνο, διότι απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς για την επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου σε πραγματικό χρόνο.
- **Strong parameter dependence:** Έχουν ισχυρή εξάρτηση από τις παραμέτρους της μπαταρίας. Ουσιαστικά, οι παράμετροι της μπαταρίας είναι οι μεταβλητές των εξισώσεων που χρησιμοποιεί το μοντέλο. Συνεπώς, οποιαδήποτε αλλαγή στην τιμή τους οδηγεί σε αλλαγή των τελικών αποτελεσμάτων.

• Για τις Data-Driven μεθόδους:

1) Usage Scenario (Σενάριο Χρήσης):

- **Large-scale application:** Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Για παράδειγμα, είναι ιδανικές σε συστήματα στα οποία υπάρχουν πολλές μπαταρίες που λειτουργούν ταυτόχρονα και παράγουν τεράστιο όγκο δεδομένων.
- **Dynamic environment:** Αντίθετα με τις model-based μεθόδους, μπορούν να λειτουργούν σε δυναμικά περιβάλλοντα στα οποία οι συνθήκες λειτουργίας της μπαταρίας αλλάζουν συνεχώς.
- **Rapid deployment:** Αναπτύσσονται γρήγορα διότι δεν απαιτούν κατανόηση των εσωτερικών διεργασιών της μπαταρίας. Δηλαδή, δεν χάνεται χρόνος στην δημιουργία κάποιου μαθηματικού μοντέλου που να προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια τη λειτουργία της μπαταρίας. Επομένως, η εκπαίδευση των data-driven μοντέλων δεν παίρνει πολύ χρόνο.

2) Advantages (Πλεονεκτήματα):

- **Strong adaptive ability:** Παρουσιάζουν ισχυρή προσαρμοστικότητα. Μπορούν να προσαρμοστούν σε νέες συνθήκες λειτουργίας, διότι “μαθαίνουν” συνεχώς από νέα δεδομένα.
- **Good real-time:** Σε αντίθεση με τις model-based μεθόδους, έχουν καλή απόδοση σε πραγματικό χρόνο.

- **High robustness:** Παρουσιάζουν υψηλή ανθεκτικότητα στον θόρυβο που μπορεί να φέρον τα δεδομένα.

3) Disadvantages (Μειονεκτήματα):

- **High data demand:** Έχουν υψηλή απαίτηση σε δεδομένα. Όπως αναφέραμε και παραπάνω, απαιτείται ένα μεγάλο και ποιοτικό σύνολο δεδομένων που να καλύπτει διάφορες φάσεις λειτουργίας και γήρανσης της μπαταρίας. Εάν το σύνολο δεδομένων είναι μικρό, τότε δεν θα γίνει σωστή εκπαίδευση του μοντέλου και επομένως τα αποτελέσματα που θα παράγει θα είναι ανακριβή.
- **Poor interpretation:** Έχουν κακή φυσική ερμηνεία. Όπως αναφέραμε παραπάνω, τα μοντέλα μηχανικής και βαθιάς μάθησης λειτουργούν σαν "μαύρα κουτιά". Συνεπώς, δεν παρέχουν πληροφορίες για τα φυσικά φαινόμενα που οδηγούν στα αποτελέσματα, αφού δεν γνωρίζουν τι γίνεται μέσα στη μπαταρία.
- **Overfitting:** Εάν τα δεδομένα εκπαίδευσης δεν είναι αρκετά αντιπροσωπευτικά, τότε το μοντέλο θα παράγει ορθά αποτελέσματα όταν λαμβάνει στην είσοδο του ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων. Ωστόσο, θα παράξει λανθασμένα αποτελέσματα, όταν θα λάβει στην είσοδο του κάποιο διαφορετικό σύνολο δεδομένων. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται υπερπροσαρμογή του μοντέλου και αποτελεί αρκετά συχνό πρόβλημα σε μοντέλα μηχανικής και βαθιάς μάθησης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] G. Lyu, H. Zhang, and Q. Miao, "An interpretable state of health estimation method for lithium-ion batteries based on multi-category and multi-stage features," *Energy*, vol. 283, p. 129067, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223024611>
- [2] D. He, J. Wang, Y. Peng, B. Li, C. Feng, L. Shen, and S. Ma, "Research advances on thermal runaway mechanism of lithium-ion batteries and safety improvement," *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 41, p. e01017, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993724001970>
- [3] H. Ning, J. H. Pikul, R. Zhang, X. Li, S. Xu, J. Wang, J. A. Rogers, W. P. King, and P. V. Braun, "Holographic patterning of high-performance on-chip 3d lithium-ion microbatteries," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, pp. 6573–6578, 05 2015.
- [4] M. S. Whittingham, "Electrointercalation in transition-metal disulphides," *J. Chem. Soc., Chem. Commun.*, pp. 328–329, 1974. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1039/C39740000328>
- [5] K. Mizushima, P. Jones, P. Wiseman, and J. Goodenough, "Lixcoo2 (0<x<-1): A new cathode material for batteries of high energy density," *Materials Research Bulletin*, vol. 15, no. 6, pp. 783–789, 1980. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0025540880900124>
- [6] A. Yoshino, "The birth of the lithium-ion battery," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 51, no. 24, pp. 5798–5800, 2012. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/anie.201105006>
- [7] N. P. Outreach, "The nobel prize in chemistry 2019," NobelPrize.org, 2019. [Online]. Available: <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/press-release/>
- [8] J. Tao, S. Wang, W. Cao, P. Takyi-Aninakwa, C. Fernandez, and J. M. Guerrero, "A comprehensive review of state-of-charge and state-of-health estimation for lithium-ion battery energy storage systems," *Ionics*, vol. 30, pp. 5903–5927, 07 2024.
- [9] M. Elmahallawy, T. Elfouly, A. Alouani, and A. M. Massoud, "A comprehensive review of lithium-ion batteries modeling, and state of health and remaining useful lifetime prediction," *IEEE Access*, vol. 10, p. 119040–119070, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9944663/>