

Maximizarea eficienței de gestionare a bateriilor reîncărcabile în aplicații critice de stocare de energie

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul Calculatoare și Tehnologia Informației
de către

ing. Gabriel Nicolae CÂRSTOIU

Președintele comisiei:	prof.univ.dr.ing.....
Conducător științific:	prof.univ.dr.ing. Mihai V. Micea
Referenți științifici:	prof.univ.dr.
	prof.univ.dr.ing.
	conf.univ.dr.ing.

Ziua susținerii tezei:2021

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|---|
| 1. Automatică | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 2. Chimie | 12. Ingineria Sistemelor |
| 3. Energetică | 13. Inginerie Energetică |
| 4. Inginerie Chimică | 14. Calculatoare și Tehnologia Informației |
| 5. Inginerie Civilă | 15. Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | 16. Inginerie și Management |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 17. Arhitectură |
| 8. Inginerie Industrială | 18. Inginerie Civilă și Instalații |
| 9. Inginerie mecanică | 19. Inginerie Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale |
| 10. Știința Calculatoarelor | |

Universitatea Politehnica Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul Școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2021

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității Politehnica Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300223 Timișoara, Bd. Vasile Pârvan 2B
Tel./fax 0256 404677
e-mail: editura@upt.ro

Cuvânt înainte

Prezenta lucrare este rezultatul firesc al cercetărilor întreprinse în cadrul laboratorului DSPLabs, departamentul de Calculatoare, al Universității Politehnica Timișoara, al cărui membru sunt din anul 2006. În acest cadru mi-am desăvârșit studiile de licență, masterat și după o pauză de câțiva ani, am început studiile doctorale. În primul rând aș dori să-i mulțumesc în mod deosebit domnului prof. dr. habil. ing. Mihai V. Micea, conducătorul cercetării mele doctorale, al laboratorului și al departamentului de Calculatoare. Sprijinul tehnic și moral, îndrumările și coordonarea oferite de domnul profesor au fost cruciale pentru dezvoltarea mea științifică în acești ani de studiu precum și pentru inițierea, elaborarea și finalizarea tezei mele de doctorat.

Pe această cale doresc să îi mulțumesc colegului și prietenului meu Lucian Ungurean, împreună cu care am străbătut acest lung parcurs de cercetare și nu numai, încă dinainte să începem primul proiect în DSPLabs. De asemenea doresc să le mulțumesc și membrilor comisiei de îndrumare, prof. dr. ing. Mircea Stratulat, prof. dr. habil. ing. Marius Marcu și conf. dr. ing. Sebastian Onuț Fuicu, pentru colaborarea fructuoasă din cadrul activității mele de cercetare doctorală. Aș dori să mulțumesc de asemenea tuturor colegilor din DSPLabs, din departament și din universitate cu care am colaborat sau m-am consultat pe parcursul acestei activități de cercetare.

Cel mai important sprijin în acești ani de studii doctorale l-am primit de la soția mea Carmen, căreia îi mulțumesc din suflet pentru dragostea, răbdarea și înțelegerea de care a dat dovadă. De asemenea, o adâncă recunoștință se îndreaptă spre părinții mei, pentru educația oferită și pentru tot ceea ce au făcut pentru mine.

Timișoara, octombrie 2021

Gabriel Nicolae CÂRSTOIU

CĂRSTOIU, Gabriel Nicolae

Maximizarea eficienței de gestionare a bateriilor reîncărcabile în aplicații critice de stocare de energie

Teze de doctorat ale UPT, Seria X, Nr. YY, Editura Politehnica, 2021, 109 pagini, 22 figuri, 11 tabele.

ISSN:

ISBN:

Cuvinte cheie

Battery; State of health (SOH); Wear leveling; Large scale battery pack; Reconfigurable battery management system (BMS)

Rezumat

Progresul tehnologic fără precedent de care se bucură omenirea în prezent nu ar fi fost posibil fără anumite componente esențiale – bateriile reîncărcabile. În prezent, tehnologia cea mai utilizată este cea a bateriilor reîncărcabile de tip Litiu-ion. O clasă relativ nouă de aplicații bazate pe baterii o reprezintă aplicațiile critice de stocare de energie (autovehiculele electrice, sistemele de stocare de energie de rezervă pentru centre de date, etc). Subiectul principal abordat de această teză este reducerea degradării bateriilor reîncărcabile de tip Li-Ion. Deși majoritatea sistemelor de management a bateriilor (BMS) din aplicațiile critice de stocare de energie implementează mecanisme de echilibrare a bateriilor, în practică se constată o degradare prematură a bateriilor componente. Topologia reconfigurabilă de conectare este o alternativă recentă, dar problema maximizării duratei de viață a acestor sisteme, concomitent cu reducerea costului total de utilizare este incomplet rezolvată. În această lucrare s-a pornit de la observația analogiei dintre memoriile flash și grupurile reconfigurabile de acumulatori (GRA) pentru a dezvolta o metodă bazată pe principiile și algoritmi de wear leveling, denumită BWL. Metoda a fost integrată într-un BMS proiectat de autor pentru GRA, iar pentru evaluarea sistemului s-a elaborat o metodologie cuprinzătoare. Prin analiza performanțelor BMS ce integrează metoda BWL comparativ cu implementări BMS convenționale, s-a demonstrat viabilitatea și superioritatea acesteia în toate scenariile considerate. Contribuțiile principale includ identificarea și argumentarea viabilității soluțiilor de reducere a degradării comune la memoriile flash și la grupurile de acumulatori; elaborarea unei metode inovatoare de maximizare a duratei de viață a bateriilor reîncărcabile, pe baza analogiei cu memoriile flash; proiectarea detaliată a unui BMS pentru GRA ce utilizează metoda BWL; dezvoltarea unei metodologii de evaluare obiectivă a eficienței BMS; implementarea și adaptarea BMS pe 3 platforme embedded cu consum redus de energie; demonstrarea fezabilității metodei propuse prin evaluarea acesteia pe un set de date disponibil public.

Cuprins

Listă acronime	4
Listă figuri	5
Listă tabele	6
1. INTRODUCERE	7
1.1. Domeniul și tema cercetării	7
1.2. Motivația cercetării	9
1.3. Obiectivele propuse	10
1.4. Principalele contribuții	11
1.5. Structura tezei	11
2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII	13
2.1. Modele pentru estimarea și predicția SOH.....	13
2.2. Soluții comerciale pentru estimare SOH.....	15
2.3. Modelarea degradării în condiții de utilizare arbitrare	18
2.4. Reducerea degradării în cazul grupurilor reconfigurabile de acumulatori	22
2.5. Sisteme BMS pentru grupuri de acumulatori	28
3. METODĂ PENTRU MINIMIZAREA DEGRADĂRII BATERIILOR	39
3.1. Uniformizarea degradării la memoriile Flash.....	39
3.2. Analogia grup de acumulatori-memorie flash	46
3.3. Principiile sistemului BWL propus.....	48
3.4. Implementarea metodei BWL	54
4. METODOLOGIA DE CERCETARE	60
4.1. Criterii pentru analiza performanțelor.....	60
4.2. Scenarii simulate	61
4.3. Configurația testelor efectuate	62
5. ANALIZA PERFORMANTELOR METODEI BWL	66
5.1. Variația parametrilor fizici.....	66
5.2. Variația parametrilor de calcul.....	76
5.3. Analiza performanțelor pe un set de date extern	79
6. IMPLEMENTARE PRACTICĂ BMS BAZAT PE METODA BWL	83
6.1. Nucleul BMS și programul demonstrativ	83
6.2. Platforme HW și SW pentru implementare	84
6.3. Analiză comparativă a rezultatelor obținute.....	91
7. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE	93
7.1. Concluzii	93
7.2. Sinteza contribuțiilor	94
7.3. Perspective de dezvoltare	95
8. REFERINȚE BIBLIOGRAFICE	97
9. LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE	107

Listă acronime

Li-Ion – baterii reîncărcabile bazate pe tehnologia de fabricație Litiu-ion

NMC – Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide - LiNiMnCoO_2

SOC – State of charge

SOF – State of function

SOH – State of health

RUL – Remaining Useful Life

EIS - Electrochemical Impedance Spectroscopy

OCV – Open Circuit Voltage

BMS – Battery management system

SBM – Sensing and balancing module

CMU – Cell monitoring unit

MMU – Module management unit

PMU – Pack management unit

FTL – Flash Translation Layer

SSD – Solid-State Drive

SWL – Static Wear Leveling

LWL – Lazy Wear Leveling

BWL – Battery Wear Leveling

UART – Universal Asynchronous Receiver Transmitter

Listă figuri

Fig. 2-1 Model electrochimic pentru baterii Li-Ion [26].....	14
Fig. 2-2 Sistem cu indicator de nivel de energie a bateriilor [4]	16
Fig. 2-3 Exemplu de arhitectură ierarhică a unui BMS [69].....	35
Fig. 2-4 Clasificarea arhitecturilor de management a bateriilor [67].....	37
Fig. 3-1 Schema bloc a sistemelor de stocare Flash [70].....	41
Fig. 3-2 Schema de principiu a BMS propus.....	52
Fig. 4-1 Comparația ciclurilor de viață la bateria NCR18650A	63
Fig. 4-2. Exemplu de selecție a bateriilor prin metoda BWL	65
Fig. 5-1 Timpul total util de funcționare cu variația SOHinit	67
Fig. 5-2 Timpul total util de funcționare cu variația SOCstart	68
Fig. 5-3 Timpul total util de funcționare cu variația curentului – sarcină fixă	70
Fig. 5-4 Timpul total util de funcționare cu variația curentului – sarcină variabilă ..	70
Fig. 5-5 Timpul total util de funcționare cu variația duratei descărcării	71
Fig. 5-6 Timpul total util de funcționare cu variația temperaturii	72
Fig. 5-7 Timpul total util de funcționare cu variația topologiei	73
Fig. 5-8 Timpul total util de funcționare cu variația RDS(on)	76
Fig. 5-9 Timpul total util de funcționare cu variația scorului SOH-SOC	77
Fig. 5-10 Timpul total util de funcționare cu variația SOHdelta	79
Fig. 5-11 SoH calculat vs măsurat pentru Kokam SLPB78205130H.....	80
Fig. 6-1 BMS propus rulând pe platforma Raspberry Pi	87
Fig. 6-2 BMS propus rulând pe platforma nRF52840	88
Fig. 6-3 BMS propus rulând pe platforma EFM32GG-STK3700.....	89

Listă tabele

Tabel 3-1 Corespondența conceptelor memorie Flash-grup de acumulatori.....	46
Tabel 4-1 Parametrii fizici pentru scenariile de simulare	61
Tabel 4-2 Parametrii de calcul pentru scenariile de simulare.....	62
Tabel 4-3 Parametrii identificați ai modelului de baterie NCR18650A	62
Tabel 5-1 Analiza degradării SOH în cazul variației curentului	69
Tabel 5-2 Semnificația mărimilor utilizate în modelarea influenței $RDS(on)$	75
Tabel 5-3 Lista valorilor implicite pentru parametrii de calcul.....	76
Tabel 5-4 Procent degradare SoH – BWL vs. BMP.....	81
Tabel 6-1 Parametri de funcționare pentru programul demonstrativ	83
Tabel 6-2 Sinteza platformelor de implementare BMS.....	90
Tabel 6-3 Rezultatele studiului de performanță BMS.....	92

1. INTRODUCERE

1.1. Domeniul și tema cercetării

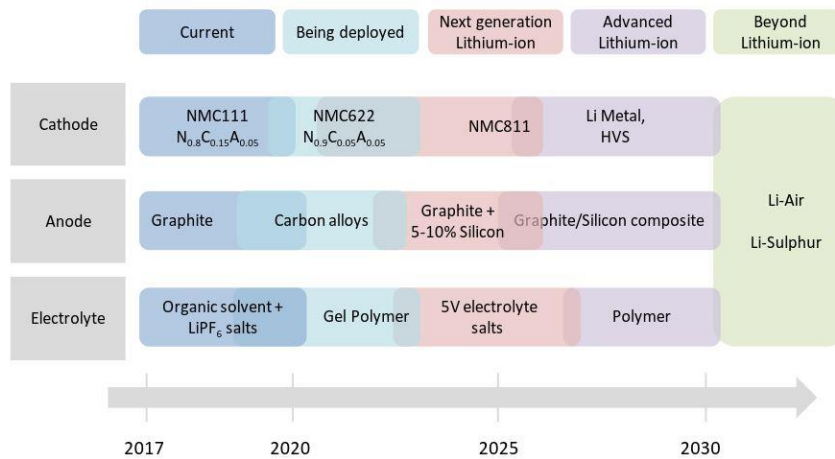
Bateriile reîncărcabile sunt sisteme electrochimice complexe, fiind componente esențiale pentru progresul tehnologic actual din ce în ce mai rapid, iar rolul acestora în viitor va fi și mai pronunțat. Datorită cererii crescânde pentru mobilitate, bateriile sunt folosite în tot mai multe aplicații, pe lângă cele tradiționale (ex.: electronice de larg consum): biciclete electrice și alte mijloace de transport personale, sisteme industriale, comerciale și casnice de stocare de energie electrică, precum și numărul aflat într-o creștere exponențială de autoturisme electrice [1], [2].

Primele cercetări în vederea creării unei baterii bazate pe litiu au fost întreprinse în 1912 de către G.N Lewis, dar primele baterii primare de litiu au devenit disponibile abia în anii 1970. Dezvoltarea primelor versiuni de baterii secundare (reîncărcabile) cu tehnologia litiului metalic a continuat până la mijlocul anilor 1980, când s-a descoperit că această tehnologie este mult prea instabilă și predispusă la distrugere prin creșterea necontrolată a temperaturii și chiar la explozii. Mai departe, cercetările s-au concentrat pe dezvoltarea unor materiale non-metalice pentru stabilizarea anodului bazat pe litiu. Ca urmare, Sony a prezentat prima baterie reîncărcabilă Li-Ion în 1991, iar de atunci piața acestor baterii a cunoscut o dezvoltare extraordinară.

În prezent, bateriile reîncărcabile bazate pe litiu sunt de departe cele mai utilizate, în detrimentul unor tehnologii mai vechi, cum ar fi Ni-MH (nichel-hidruură de metal), Ni-Cd (nichel-cadmium) sau plumb-acid, iar prețul lor este într-o continuă scădere pe măsură ce noi capacități de producție sunt inaugurate și planificate în fiecare an pentru a face față cererii [2]. Creșterea continuă a densității energetice a bateriilor Li-Ion raportată la unitatea de volum, a permis dezvoltarea accelerată a multor tehnologii inovatoare, care acum câteva decenii păreau neverosimile: dispozitivele de calcul mobile, autovehiculele electrice, și multe altele. Studiile recente asupra tehnologiei bateriilor Li-Ion arată că aceasta va rămâne tehnologia dominantă pentru cel puțin următorii 10 ani, perioadă în care se preconizează avansuri tehnologice mari în tehnologia de fabricație [2],[3].

Privind spre viitor, după cum se poate observa în Fig. 1-1, chimia catodului va evolua de la configurațiile actuale de NMC 111 și NMC 532 spre NMC 811 în anul 2025, pentru a permite o densitate energetică mult mai mare dar și o reducere masivă a costurilor (prin reducerea procentului de cobalt de la 33% la 10%).

Figure 5.4 • Expected battery technology commercialisation timeline



Notes: HVS = high voltage spinel. The diagram shows the likely beginning of commercialisation of a given technology.

Sources: IEA analysis based on Howell (2016); Meeus (2018); Nationale Plattform Elektromobilität (2016); NEDO (2018); Pilot (2017).

Fig. 1-1 Graficul estimat al evoluției tehnologiei Li-Ion până în 2030 [2]

Un dezavantaj al bateriilor Li-Ion este că durata rămasă de utilizare (RUL) sau mărimea echivalentă - starea de degradare (State-of-Health - SoH) este direct dependentă de temperatură, de mărimea curentului de încărcare/descărcare, precum și de gradul de încărcare/descărcare (State-of-charge - SoC). Aceste constrângeri fizice conduc la necesitatea controlării stricte a parametrilor de funcționare ale bateriei. Într-adevăr, la momentul actual, orice baterie Li-Ion dintr-un dispozitiv de larg consum conține în interior un circuit de protecție.

Aplicațiile industriale precum autovehiculele electrice, sisteme de stocare de energie de rezervă (UPS) pentru centre de date, sau sistemele de stocare conectate la rețeaua de distribuție de energie electrică sunt doar câteva exemple de aplicații ce utilizează tot mai mult baterii Li-Ion: estimările recente arată o creștere a capacității instalate în sisteme de stocare de energie de ~50 GWh/an până în 2025 [1]. Având puteri instalate în domeniul 5 kW - 100+ MW [19], aceste sisteme sunt formate dintr-un număr mare de acumulatori reîncărcabili aranjați în configurații serie-paralel și sunt caracterizate de costuri mari de achiziție, amortizare și exploatare.

Este evidentă astfel necesitatea gestionării eficiente a grupurilor de acumulatori utilizate în aceste aplicații, prin proiectarea unor sisteme de management a bateriilor (BMS) cu cerințe mari de scalabilitate și fiabilitate. Cercetările recente în domeniu au condus la apariția unui nou mod de organizare a bateriilor: grupul de acumulatori reconfigurabil. Avantajele principale față de configurațiile clasice ale grupurilor de acumulatori constau în adaptarea dinamică la sarcină și creșterea fiabilității, prin posibilitatea decuplării și izolării bateriilor problematice. Gestionarea eficientă a grupurilor reconfigurabile de acumulatori utilizate în aplicațiile sus-menționate rămâne o problemă nerezolvată. Putem astfel concluziona că dezvoltarea

și proiectarea unor metode de eficientizare a funcționării prin controlul și reducerea degradării bateriilor componente, este un domeniu actual și deschis de cercetare.

1.2. Motivația cercetării

Starea de degradare a bateriei (SOH) se definește uzual ca raportul dintre capacitatea curentă a bateriei și capacitatea nominală a bateriei noi, la rata de descărcare de 1C [4]. Datele producătorilor de baterii și studiile existente arată că durata de viață poate scădea de până la 10 ori mai rapid dacă bateria este utilizată necorespunzător [5], [6]. În aplicațiile ce utilizează baterii reîncărcabile, componenta principală a costului de exploatare și principalul motiv al scoaterii din funcțiune este degradarea prematură a bateriilor. Acest rezultat este cu atât mai grav pentru aplicațiile critice de stocare de energie în care cerințele de fiabilitate, timp de răspuns și toleranță la defecte sunt deosebite.

Pornind de la aceste fapte, putem explica de ce problema gestionării cât mai eficiente a bateriilor reîncărcabile este de actualitate și numărul de articole publicate în acest domeniu este în creștere [8]-[18]. În literatură sunt descrise mai multe metode pentru reducerea degradării, dintre care cele mai comune sunt cele bazate pe modele electrochimice ale bateriilor ([8], [9], [14]), urmate de metode de optimizare multi-obiectiv ([9], [18]) sau cele bazate pe modele numerice ([12], [13], [16]). Deși rezultatele obținute prin aplicarea acestor metode sunt bune în anumite situații, unele sunt prea complexe pentru a fi implementate în sisteme embedded cu consum redus de energie iar altele nu iau în considerare toate aspectele legate de cost sau fiabilitate.

Domeniul grupurilor reconfigurabile de acumulatori este relativ recent, prima lucrare ce prezintă un astfel de sistem fiind publicată în 2008 [51]. Până în prezent au apărut multe metode propuse de organizare internă a acestor grupuri, existând un interes științific ridicat pentru acest domeniu, după cum se arată în [7]. Cu toate acestea, există puține articole care prezintă o analiză completă a costurilor și beneficiilor implementării practice a unor astfel de sisteme. Cele care prezintă exemple de sisteme funcționale, sunt limitate la câteva construcții experimentale de mică anvergură (maxim 8 baterii). Un alt neajuns remarcat prin studierea literaturii existente este lipsa unor principii-cadru de proiectare pentru sisteme de management specifice grupurilor reconfigurabile de acumulatori, cu scopul optimizării funcționării acestora.

Obiectivul principal al cercetării ce stă la baza acestei lucrări este de a aduce contribuții la îmbunătățirea eficienței de gestionare a bateriilor reîncărcabile. În acest sens, ideea inițială de la care s-a pornit este studierea posibilității de aplicare a metodelor de uniformizare a memoriilor flash (wear leveling) la domeniul bateriilor, bazat pe observația analogiei între degradarea celulelor de memorie flash și bateriilor Li-ion. Practic, ambele dispozitive se degradează cu cât sunt utilizate mai mult (număr de cicluri baterii vs. număr de rescrieri memorie). Astfel, această lucrare se va axa pe elaborarea, detalierea și analizarea performanțelor unei metode inovatoare pentru maximizarea duratei de viață a bateriilor reîncărcabile în sisteme de stocare de energie reconfigurabile.

1.3. Obiectivele propuse

Obiectivul principal al cercetării este de a aduce contribuții la îmbunătățirea eficienței de gestionare a bateriilor reîncărcabile utilizate în sisteme de stocare de energie.

[O1]. Elaborarea unei metode pentru maximizarea duratei de viață a bateriilor reîncărcabile în sisteme de stocare de energie utilizate în aplicații critice.

Acest obiectiv va fi realizat prin parcurgerea a trei pași principali:

[T1.1]. Evaluarea comparativă în vederea propunerii unei metode sau a unui mix de metode care să atingă obiectivul și care să reducă dezavantajele metodelor existente în literatură. Se vor studia modelarea bateriilor Li-Ion, metodele de estimare a stării de degradare, topologiile grupurilor de acumulatori utilizate în aplicațiile vizate.

[T1.2]. Proiectarea și implementarea metodei într-un mediu computațional de simulare (ex.: MATLAB, PSIM). Se vor prezenta și discuta principiile metodei propuse, precum și detaliile de implementare.

[T1.3]. Validarea metodei și evaluarea fezabilității fizice ale acesteia. Se vor elabora criteriile de evaluare și se vor analiza performanțele metodei în mai multe scenarii de simulare.

Principala justificare pentru acest obiectiv este observația rezultată din analiza preliminară efectuată în cadrul planului de cercetare, conform căreia niciuna din metodele propuse în literatură nu oferă o soluție completă, evaluată din punct de vedere al fezabilității.

Al doilea obiectiv al cercetării doctorale este:

[O2]. Elaborarea unui sistem programabil de management a bateriilor reîncărcabile (BMS) în vederea reducerii costului total de utilizare.

Acest obiectiv va fi realizat prin parcurgerea a trei pași principali:

[T2.1]. Proiectarea software a sistemului prin încorporarea metodei de la [O1]. Se va proiecta și dezvolta un sistem de management care să permită modificarea facilă a topologiei grupului reconfigurabil de acumulatori gestionat, în vederea evaluării efectelor aplicării metodei propuse.

[T2.2]. Implementarea hardware și software a BMS pe o platformă embedded cu consum redus de energie.

Evaluarea comparativă a performanței metodei implementată la [T2.2] în raport cu rezultatele simulării de la [T1.2]. Se va efectua o analiză a performanțelor unui BMS ce încorporează metoda propusă, comparativ cu BMS existente, considerate ca referințe.

1.4. Principalele contribuții

În vederea îndeplinirii obiectivelor descrise în secțiunea anterioară, cercetarea doctorală s-a axat pe mai multe planuri iar în cele ce urmează se vor prezenta pe scurt principalele realizări și contribuții aduse de către autor. Descrierea detaliată a modului de îndeplinire a obiectivelor prin contribuțiile aduse se regăsește în secțiunea 7.2

1. Cercetarea și sintetizarea stadiului actual al științei în mai multe domenii: estimare și predicție SOH, grupuri reconfigurabile de acumulatori, metode pentru uniformizarea degradării la memoriile Flash.
2. Elaborarea și descrierea completă a unei metode inovatoare de maximizare a duratei de viață a bateriilor reîncărcabile.
3. Elaborarea unor criterii obiective de performanță pentru evaluarea eficienței metodei propuse.
4. Analiza domeniului sistemelor BMS cu accent asupra sistemelor de management al grupurilor reconfigurabile de acumulatori.
5. Proiectarea detaliată a unui sistem de management pentru grupuri reconfigurabile de acumulatori ce utilizează metoda BWL.
6. Dezvoltarea unui număr mare de scenarii de funcționare în vederea evaluării BMS propus.
7. Implementarea și adaptarea BMS pe 3 platforme embedded de referință, cu consum redus de energie.
8. Demonstrarea fezabilității metodei propuse prin evaluarea acesteia pe un set de date publicat de universitatea Oxford.
9. Diseminarea cercetării doctorale prin publicarea a 3 articole științifice în jurnale indexate ISI.

1.5. Structura tezei

Lucrarea de față este structurată astfel:

- Capitolul 2 efectuează o trecere în revistă a stadiului actual al cercetării pentru mai multe domenii conexe problematicii abordate în lucrare. Se face astfel o prezentare detaliată și o clasificare a tipurilor de modele pentru estimarea și predicția SOH. Se prezintă apoi și se discută cele mai relevante soluții și circuite comerciale pentru estimarea SOH. Modelarea și cuantificarea gradului de degradare se discută prin introducerea unuia din cele mai citate articole din literatură. Mai departe, se discută principalele caracteristici ale grupurilor reconfigurabile de acumulatori, precum și cele mai interesante soluții. În final, cititorul este introdus în problematica sistemelor BMS, prin discutarea cerințelor principale care trebuie îndeplinite de un astfel de sistem, precum și prin clasificarea arhitecturilor BMS existente după o serie de criterii prezentate în literatură.
- În capitolul 3 se introduce metoda propusă de autor pentru minimizarea degradării bateriilor. Mai întâi se prezintă în detaliu stadiul actual în domeniul uniformizării degradării la memoriile Flash. Se continuă apoi cu o analiză comparativă a diferențelor și asemănarilor între conceptele memoriilor Flash și cele ale grupurilor de acumulatori. Pe baza acestor asemănări se descriu principiile sistemului BWL propus, cu detalierea

algoritmilor pentru fazele de încărcare și descărcare și discutarea principiilor de proiectare ale unui BMS bazat pe metoda propusă.

- În capitolul 4 se prezintă metodologia utilizată în cadrul cercetării întreprinse pentru prezenta lucrare. Se enumerează și se argumentează criteriile alese pentru analiza performanțelor metodei propuse și se detaliază structura, scenariile și configurațiile simulărilor efectuate.
- Capitolul 5 prezintă rezultatele obținute prin rularea scenariilor de simulare descrise în capitolul anterior dar și rezultatele aplicării metodei propuse asupra unui set de date disponibil public. Parametrii a căror variație este analizată și discutată, sunt clasificați în 2 categorii: parametri fizici și parametri de calcul, ce țin de algoritmi implementați. În cadrul fiecărei categorii sunt identificați o serie de parametri individuali, iar pentru fiecare se prezintă și se discută rezultatele obținute, evidențiindu-se concluziile interesante obținute.
- În capitolul 6 se prezintă considerentele implementării practice ale unui BMS minimal, pe o serie de platforme hardware și software, atât de tip desktop PC cât și embedded. Se detaliază particularitățile fiecărei platforme și se prezintă rezultatele studiului de performanță efectuat, precum și concluziile ce pot fi utilizate ca referință pentru o implementare în producție.
- Capitolul 7 concludă lucrarea, descrie o sinteză a contribuțiilor principale prezentate în teză și relevă câteva idei pentru eventuale cercetări ulterioare.

2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII

2.1. Modele pentru estimarea și predicția SOH

Sistemele de stocare de energie de mare capacitate pot fi întâlnite în aplicații industriale, comerciale sau casnice, iar estimările actuale arată că numărul de sisteme instalate va crește într-un ritm accelerat în viitor [1]. Aceste sisteme conțin un număr mare de baterii reîncărcabile, având astfel costuri mari de funcționare și de întreținere, ce pot fi exacerbate de scoaterea din uz prematură. Numărul mare de articole publicate în domeniul maximizării duratei de viață a bateriilor reîncărcabile demonstrează interesul comunității științifice pentru această problemă incomplet rezolvată.

În prima parte a acestui capitol se vor trece în revistă modelele de baterii Li-Ion existente și metodele existente pentru estimarea și predicția SOH. Se va detalia în continuare unul din cele mai citate modele pentru cuantificarea degradării bateriilor Li-Ion în condiții de utilizare arbitrare. În final se vor introduce grupurile reconfigurabile de acumulatori și se vor discuta cele mai notabile soluții prezentate în literatură.

Determinarea precisă a stării de degradare a bateriilor în scopul estimării momentului de timp când bateria sau grupul de baterii vor ajunge la finalul duratei de viață este foarte importantă din punct de vedere tehnic și economic [1]. Convențional, SOH poate lua valori între 100% (în momentul când bateria este nouă) și 0%, care corespunde uzual unui nivel de 70%-80% din sarcina nominală livrabilă de către baterie [20].

În literatură există un interes major pentru găsirea unor modele de baterii și metode de estimare care să reprezinte cât mai fidel comportamentul fizic al bateriilor, interes manifestat în special în domeniul vehiculelor electrice [8], [9], [22]. Modelarea bateriilor are ca obiectiv găsirea unor relații matematice care să reprezinte într-o formă simplificată procesele fizico-chimice complexe care se produc în interiorul bateriilor.

Unul din cele mai utilizate este modelul echivalent electric sau Randles de ordinul n [23]-[25]. Circuitul echivalent este compus din: o sursă ideală de tensiune $U_i(SOC)$, o rezistență serie R_s , și unul sau mai multe grupuri formate dintr-o rezistență conectată în paralel cu un condensator, $R_p || C_p$. Sursa ideală este echivalentă cu tensiunea bateriei în gol, care este dependentă de starea de încărcare, iar rezistența internă a electrolitului este reprezentată de R_s . Elementele $R_p || C_p$ modelează procesul neliniar de difuzie al anionilor și cationilor în electrolit. În literatură există mai multe variații ale acestui model, observându-se un compromis între acuratețe și simplitate.

O variantă derivată din modelul electric este cel electrochimic, care este în general mai complex deoarece urmărește să aproximeze mai bine procesele electrochimice în fazele de relaxare, descărcare și încărcare. Fig. 2-1 prezintă modelul propus în [26].

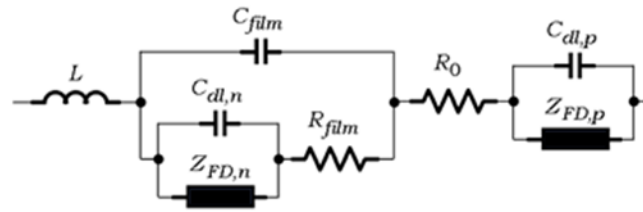


Fig. 2-1 Model electrochimic pentru baterii Li-Ion [26]

Impedanța totală a bateriei este reprezentată de următoarea ecuație, unde $j\omega L$ este impedanța complexă a bobinei serie, $Z_{n,SEI}$ este impedanța anodului, R_0 este rezistența serie, Z_p este impedanța catodului, iar S_n și S_p sunt suprafețele de contact ale anodului și catodului.

$$Z_{batt} = j\omega L + \frac{Z_{n,SEI}}{S_n} + R_0 + \frac{Z_p}{S_p} \quad (2-1)$$

Un model electrochimic avansat este propus în [27], cu ajutorul căruia se poate estima atât SOH cât și SOC. Contribuția principală adusă de autori este simplificarea modelului electrochimic general de tip particulă singulară (single particle model). Prin aceste transformări matematice propuse, ecuațiile diferențiale parțiale din modelul original amintit mai sus, devin ecuații diferențiale de ordinul 1, reducând astfel complexitatea de calcul și făcând fezabilă o eventuală implementare online a modelului, în cadrul unui BMS embedded.

Modelul electrochimic este folosit de regulă ca intrare în metodele de estimare SOH ce se bazează pe tehnica EIS, dar în multe cazuri necesită calcule complexe pentru identificarea parametrilor, care sunt la randul lor mai numeroși decât în cazul modelului electric.

Un alt tip de model întâlnit în literatură este modelul matematic, care descrie comportamentul dinamic al bateriei pe baza unor relații empirice între parametri artificiali, care nu au o legătură directă cu fizica bateriei. Spre exemplu, în [28] se calculează SOH estimat pe baza curbelor de încărcare și se demonstrează că degradarea variază direct proporțional cu unul din cei 3 parametri identificați ai modelului. OCV al bateriei este utilizat în [29] și [30] pentru estimarea SOH prin tehnica analizei capacității incrementale (ICA), OCV fiind modelat cu ajutorul a 5 parametri. Ca dezavantaje ale acestor modele se pot menționa complexitatea identificării parametrilor precum și dificultatea adaptării acestora la alte chimii, inclusiv în clasa bateriilor Li-Ion.

O metodă de tip matematic pentru estimarea SOH și RUL ce poate fi implementată în sisteme încorporate cu resurse limitate este prezentată în [31]. Estimarea SOH se face pe baza unui model de baterie electric, utilizat pentru calcularea SOC. Metoda efectivă de predicție utilizează regresia polinomială de ordinul 2 (pătratică) pentru aproximarea formei curbei determinată de scăderea în timp a capacității utilizabile a bateriilor. Astfel, capacitatea actuală a bateriei în ciclul k este modelată prin următoarea ecuație:

$$C_k = ak^2 + bk + c, a < 0 \quad (2-2)$$

Considerând un sistem de stocare de energie în care avem efectuate n cicluri de încărcare/descărcare până la momentul actual, coeficienții ecuației pătratice amintite pot fi calculați prin rezolvarea următorului sistem de ecuații:

$$\begin{cases} a \sum_k k^2 + b \sum_k k + cn = \sum_k C_k \\ a \sum_k k^3 + b \sum_k k^2 + c \sum_k k = \sum_k k C_k \\ a \sum_k k^4 + b \sum_k k^3 + c \sum_k k^2 = \sum_k k^2 C_k \end{cases} \quad . k = \overline{1, n}, n \geq 3 \quad (2-3)$$

Pentru asigurarea unei precizii cât mai ridicate de estimare, metoda este aplicabilă pentru un curent echivalent per baterie în domeniul [200, 1000] mA, iar rezultatele obținute sunt foarte bune, eroarea medie de estimare a RUL încadrându-se în intervalul de +/- 5 cicluri.

În literatură mai putem întâlni și modele bazate pe ciclul de viață, care presupun monitorizarea parametrilor de funcționare ai bateriilor pe termen lung, efectuând cicluri de încărcare și descărcare offline până la atingerea nivelului de 0% SOH. Modelele de fiabilitate sunt utilizate pentru caracterizarea ciclului de viață și pentru îmbunătățirea estimării SOH, în [32] și [33]. Autorii din [34] propun utilizarea datelor experimentale menționate mai sus, ca intrări pentru algoritmi bazați pe rețele neuronale recurente pentru estimarea SOH și RUL, cu rezultate satisfăcătoare. Totuși antrenarea algoritmilor necesită multe teste și timp îndelungat, iar aplicarea algoritmilor la alte baterii, chiar având aceeași chimie, este problematică. Autorii articolului [35] propun o nouă metodă de estimare a RUL pentru baterii de tip Li-Ion, bazată pe un filtru cu particule de tip Kalman extins (EKPF). Prin simulările efectuate se demonstrează o eroare de estimare de aproximativ 5%, dar complexitatea calculelor necesare pentru rularea algoritmilor propuși îngreșează posibilitățile de aplicare a metodei respective în sisteme de management în timp real a grupurilor de acumulatori.

Pentru atingerea performanțelor dorite, metoda de uniformizare a degradării depinde de o calculare cât mai precisă a procentului de scădere a SOH (Δ_{SOH}) pentru fiecare baterie componentă și pentru fiecare micro-ciclu de funcționare. Unul dintre cele mai citate modele din literatură pentru calcularea Δ_{SOH} este [36].

Autorul pornește de la teoria electrochimică a propagării crăpăturilor la nivelul electrozilor pentru a concepe un model matematic care să cuantifice gradul de degradare L , care crește de la valoarea 0 pentru o baterie nouă la 0.2 pentru SOH = 80%. De asemenea, lucrarea propune și un model echivalent de circuit electric ai cărui parametri sunt dependenți de L și de SOC, pentru a descrie complet variația tensiunii la borne pe parcursul duratei de viață a bateriei.

Experimentele prezentate în articol confirmă că modelul este potrivit pentru estimarea SOH în cicluri arbitrare de utilizare, deoarece încorporează bine variațiile SOC medii, gradului de descărcare și a temperaturii.

2.2. Soluții comerciale pentru estimare SOH

Odată cu creșterea și dezvoltarea pieței dispozitivelor alimentate de la baterii, a crescut de asemenea nevoia măsurării cu precizie și prezentării către utilizator într-un mod cât mai simplu și intuitiv, a nivelului de energie disponibil în bateriile acestor dispozitive. Pe cale de consecință, a apărut o nouă clasă de circuite integrate pentru implementarea cerințelor enunțate mai sus: indicatorul nivelului de combustibil/energie pentru baterii (battery fuel gauge). Aceste circuite și soluții integrate facilitează managementul bateriilor (în special în dispozitivele mobile de larg consum), și sunt de multe ori folosite ca parte integrată dintr-un BMS, deși unele pot fi folosite ca soluții de sine stătătoare, mai ales în cadrul unor dispozitive simple. La ora actuală, există mai mulți producători de astfel de soluții, printre care putem

aminti: Texas Instruments, Maxim Integrated, ST Microelectronics, Analog devices și HDM Systems [4].

Un circuit indicator de nivel de energie oferă, în general, următoarele funcționalități: măsurarea parametrilor primari ai bateriilor (tensiune la borne, curent și temperatură), calcularea și estimarea SOC și SOH. Citirea, stocarea și prezentarea acestor parametri necesită, de regulă, și alte componente auxiliare. O schemă bloc a unui exemplu de sistem alimentat de la baterii care utilizează un circuit indicator de nivel de energie, poate fi consultat în Fig. 2-2.

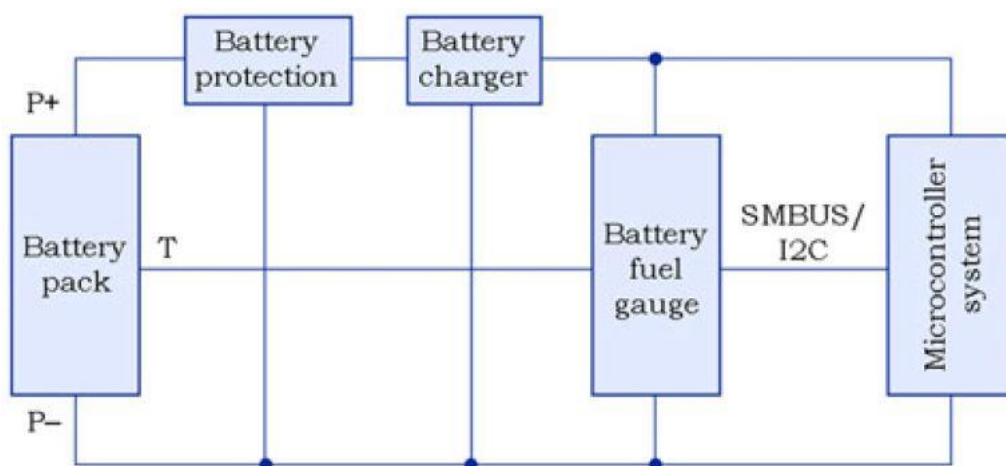


Fig. 2-2 Sistem cu indicator de nivel de energie a bateriilor [4]

În figura menționată, sistemul de stocare de energie este reprezentat generic ca un grup de acumulatori. În practică, grupul poate fi format din una sau mai multe baterii, în diverse configurații serie-paralel, existând circuite indicator de nivel capabile să monitorizeze mai multe baterii individuale simultan. Totuși, cea mai bună performanță, dar și cel mai mare cost, se obține atunci când există un singur circuit indicator per baterie. Bornele pozitive și negative ale bateriei sunt reprezentate prin P+, respectiv P-, iar semnalul de măsurare a temperaturii poate să fie prezent sau nu, în funcție de configurația internă a bateriei.

Circuitul de protecție a bateriei este esențial în orice sistem alimentat de la baterii, cu precădere în sistemele ce utilizează baterii reîncărcabile Li-Ion. În sistemele mobile ce utilizează astfel de baterii, circuitul de protecție este în mod uzual integrat în grupul de acumulatori, pentru a răspunde cerințelor legale privind siguranța în exploatare și în timpul transportului [37]. În această figură a fost reprezentat separat pentru a ilustra cazul general. Funcțiile sale principale cuprind detecția supratensiunii, a subtensiunii, a supracurentului sau a depășirii temperaturii maxime admise. De asemenea, acest circuit trebuie să poată decupla bateriile atunci când una sau multe dintre condițiile de funcționare defectuoasă se materializează. Câteva exemple reprezentative de circuite de protecție pentru baterii reîncărcabile sunt cele din seria BQ297xx produse de Texas Instruments [38] și LC05111CMT, produs de On Semiconductor [39].

O componentă indispensabilă pentru orice grup de acumulatori reîncărcabili este circuitul de management al încărcării. Rolul acestuia este de a monitoriza și controla procesul de încărcare al bateriilor componente, dar și de a regulariza tensiunea de alimentare a sarcinii, în procesul de descărcare. În cazul bateriilor Li-

Ion, variantele moderne ale circuitelor de management a încărcării funcționează cu toate tipurile de chimii cunoscute și integrează cei mai performanți algoritmi de încărcare. Un exemplu notabil în acest sens este LTC4162-L produs de Analog Devices [40]. Circuitul permite încărcarea a 1 până la 8 baterii Li-Ion/polimer conectate în serie și este bazat pe tehnica de funcționare în comutație. Acesta posedă și o interfață de comunicație prin protocolul I2C, pentru programarea parametrilor de funcționare dar și pentru citirea datelor de monitorizare a bateriilor conectate: tensiuni, curenți, temperaturi și rezistențele aparente ale bateriilor în procesul de încărcare. Un alt circuit de control al procesului de încărcare ce este folosit în aplicații de larg consum precum calculatoare portabile, echipamente industriale sau medicale, este bq25700A de la Texas Instruments [41]. Acesta se remarcă prin suportul pentru toate chimiiile de baterii uzuale (Li+, LiFePO₄, NiCd, NiMH, plumb acid), posibilitatea de a încărca până la 4 baterii conectate în serie și prin utilizarea protocolului SMBus pentru comandă și monitorizare.

Componenta centrală a unui BMS implementat cu circuite discrete este indicatorul de nivel de energie. Acesta controlează și monitorizează circuitul de management al încărcării și comunică de asemenea cu microcontrolerul sistemului informații relevante despre starea grupului de baterii. Sistemul poate la rândul lui să controleze modul de funcționare al circuitului indicator prin configurarea regiștrilor interni ai acestuia. Există la ora actuală multe tipuri de circuite indicator, de la diverși producători de circuite integrate, iar complexitatea funcțiilor implementate de acestea variază în funcție de aplicația căreia îi sunt destinate.

Produsele integrate în aplicații având costuri reduse și destinate consumului pe scară largă, cum ar fi dispozitive portabile de redat muzică, jucării, etc., oferă doar un set restrâns de informații despre starea bateriilor. Aceste informații se rezumă de obicei la estimarea SOC în procesele de încărcare și descărcare sau la diverse alerte cauzate de creșterea sau scăderea parametrilor primari ai bateriei peste anumite niveluri prestabilite. În această categorie de circuite indicator putem regăsi produsele STC3115 de la ST Microelectronics [42] sau LTC2941, produs de Analog Devices [43].

Pe piață există și produse mai performante, care sunt capabile să estimeze SOH pentru una sau mai multe baterii, în funcție de configurația de conectare în circuit. Un exemplu reprezentativ în acest sens este circuitul bq27531 produs de Texas Instruments [44], care se adresează sistemelor de stocare de energie bazate pe baterii Li-Ion și care utilizează tehnologia patentată Impedance Track pentru managementul bateriilor [47]. Algoritmii avansați implementați în hardware-ul acestui circuit sunt bazați pe un model de baterie de tip electric, ai cărui parametri principali de intrare sunt tensiunea la borne în circuit deschis (OCV), respectiv impedanța internă a bateriei. Circuitul dispune de asemenea de o plajă largă de regiștri de configurare, prin care utilizatorul (sau controllerul-gazdă din BMS) poate seta parametrii fizici de funcționare, proveniți de exemplu din datele de catalog ale producătorului tipului de baterie utilizată. Cei mai relevanți parametri care pot fi configurați sunt: tensiunea maximă, curentul maxim, capacitatea nominală, intervalele de timp utilizate la terminarea încărcării, tabel de compensare a tensiunii de încărcare cu temperatura, profile de încărcare pentru mai multe valori ale curentului (5 valori disponibile). Circuitul indicator de nivel calculează nivelul SOH și îl prezintă în regiștrul 'StateOfHealth' sub formă procentuală, în intervalul [0%, 100%]. Pentru estimarea acestui parametru se utilizează un algoritm proprietar, astfel că producătorul nu oferă detalii despre acest aspect. Se menționează totuși că valoarea calculată are la bază raportul dintre capacitatea bateriei la încărcare completă (capacitatea actuală maximă), și capacitatea nominală. Capacitatea la încărcare completă este tot o estimare, bazată pe capacitatea maximă actuală a

bateriei în condițiile unei temperaturi ambiante de 25 °C. Producătorul recomandă calibrarea precisă a parametrilor de configurare, prin testarea în condiții de laborator a 20-30 de dispozitive și mai multe mostre de baterii, înainte de începerea producției de masă. În aceste condiții, producătorul raportează o eroare de estimare de aproximativ 1% în condiții de utilizare normale.

Un alt tip de circuit indicator de nivel, din aceeași categorie cu cel descris mai sus, este MAX17050 de la Maxim Integrated [45]. Acesta determină SOH bazat pe valoarea calculată a SOC. SOC este estimat prin utilizarea unui algoritmul proprietar patentat (ModelGauge m3), ce are ca intrări atât capacitatea actuală calculată prin coulomb counting, cât și valoarea OCV. În acest context, OCV este folosit ca o mărime de corecție pentru valoarea calculată prin coulomb counting, fiind cunoscut faptul că această metodă își pierde acuratețea în timp, datorită fenomenului de acumulare a erorilor de măsurare. Valoarea SOH se poate citi din registrul 'Age', care este direct proporțională cu valoarea registrului 'FullCAP'. Acest registru reține valoarea actuală a capacității maxime disponibile în baterie, la momentul terminării procesului de încărcare. Eroarea de estimare menționată de producător este de 2%.

Spre deosebire de soluțiile prezentate anterior, modulul indicator de nivel BFG-24-S produs de HDM Systems este un sistem de sine statător, echipat cu display LCD și interfață de comunicație CAN sau RS-232 [46]. Acesta este destinat aplicațiilor speciale, fiind certificat conform standardelor militare pentru durabilitate și fiabilitate. Utilizează un algoritmul proprietar pentru a estima SOC (prin metoda coulomb counting), SOH și RUL (în număr de cicluri rămăși de funcționare), producătorul menționând o acuratețe de 5% pentru valorile SOC și SOH.

În această secțiune am trecut în revistă principalele soluții comerciale, disponibile la momentul actual, pentru estimarea SOH. O caracteristică generală a soluțiilor studiate este că metodele de estimare utilizate se bazează în general pe modele electrice relativ simple, iar majoritatea producătorilor nu oferă detalii de implementare. În termeni de performanță, putem remarca faptul că aceste soluții indicatoare de nivel au o performanță acceptabilă, fiind însă mai mică în general, decât performanțele obținute de metodele mai avansate ce se pot găsi în literatura de specialitate.

2.3. Modelarea degradării în condiții de utilizare arbitrare

Modelele de baterii care încearcă să surprindă cât mai fidel comportamentul fizico-chimic al bateriilor Li-Ion existente în literatură se împart în mai multe categorii: electric, electrochimic, matematic, bazat pe ciclul de viață, și altele [4]. Acestea sunt esențiale pentru aplicarea metodelor de estimare și predicție SOH. Unul dintre cele mai citate articole din literatură în acest domeniu este [36], în care autorul propune o metodă hibridă matematică-electrochimică pentru calcularea precisă a incrementului de degradare în fiecare micro-ciclu al bateriei (Δ_{SOH}). Autorul propune și un model de baterie electric-matematic, bazat pe coeficientul de degradare determinat cu metoda amintită, demonstrând prin rezultate experimentale și simulări o foarte bună precizie și conformitate cu datele măsurate pe bateriile testate.

Din punct de vedere electrochimic, există două mecanisme ce duc la degradarea capacității bateriilor, ambele fiind de fapt efectele fenomenului de propagare a crăpăturilor în structura electrozilor. Cele două mecanisme sunt depozitarea compușilor insolubili de Li în structura anodului, respectiv separarea mecanică a collectorului de metal de electrozii cu care face contact electric. Deoarece

în cazul bateriilor moderne al doilea mecanism are o probabilitate tot mai mică de manifestare, autorul se concentrează pe modelarea mecanismului de alterare a structurii anodului prin imobilizarea ionilor de Li. Formarea de compuși care leagă atomii de Li permanent în anod înseamnă reducerea concentrației de ioni disponibilă pentru încărcare și descărcare, rezultând o scădere a capacității bateriei și implicit a SOH.

Autorul analizează mai întâi degradarea datorată repaosului bateriei la diferite procente de încărcare și la diferite temperaturi, demonstrând că formula lui Zhurkov privind propagarea crăpăturilor într-o structură solidă se aplică și în cazul bateriilor, fiind un fenomen predominant termic în condițiile analizate. Mai departe, se cuantifică separat efectele SOC mediu (SOC_{avg}) și al deviației normalizate a SOC față de medie, în cadrul unui micro-ciclu (SOC_{dev}). Aceste mărimi sunt necesare pentru a caracteriza un micro-ciclu general, care este definit de un proces de încărcare urmat de o descărcare, sau invers, existând în total 6 cazuri, identificate de [16] și prezentate în Fig. 2-1.

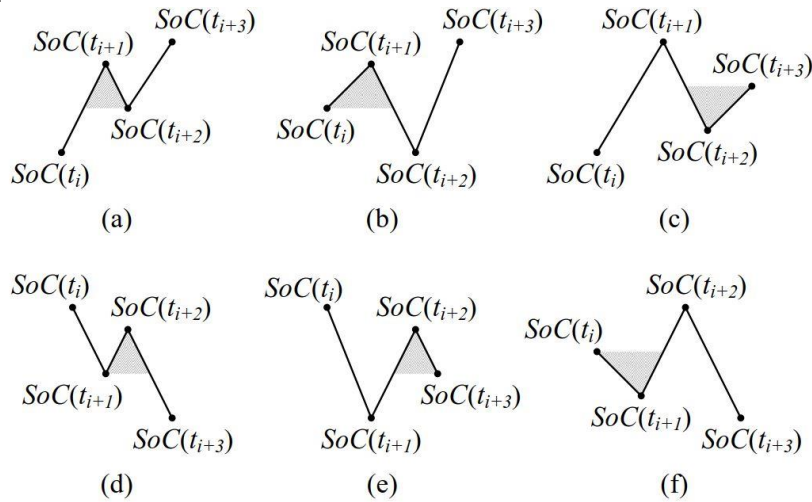


Fig. 2-1 Cazurile posibile pentru ciclurile generale de încărcare-descărcare [16]

În continuare vom utiliza intervalul de timp $[0, \tau]$ pentru a caracteriza durata micro-ciclului m (definit astfel în [36]) și pentru a defini SOC_{avg} și SOC_{dev} . În ecuația (2-4) s-a aplicat factorul de normalizare $2\sqrt{3}$ pentru ca SOC_{dev} să aibă valoarea 1 pentru un ciclu complet cu DOD de 100% iar scopul acestei mărimi este de a descrie ecartul SOC într-un proces de încărcare-descărcare arbitrar.

$$SOC_{avg} = \int_0^{\tau} \frac{SOC(t)dt}{\tau} \quad (2-4)$$

$$SOC_{dev} = 2\sqrt{3} \int_0^{\tau} \frac{(SOC(t) - SOC_{avg})^2 dt}{\tau} \quad (2-5)$$

Autorul definește mai departe numărul efectiv de cicluri complete în intervalul de timp m , pornind de la observația că în intervalul respectiv pot exista mai multe micro-cicluri de încărcare și descărcare, prin ecuația următoare:

$$N = \int_0^{\tau} |I(t)| dt / 2Q_n \quad (2-6)$$

unde $I(t)$ este curentul de încărcare sau descărcare, exprimat în valoare absolută, iar Q_n este capacitatea nominală a bateriei. Factorul cu valoarea 2 apare deoarece un ciclu complet se consideră o descărcare completă plus o încărcare completă.

Prima componentă a modelului de degradare, considerând doar variația SOC_{dev} și cicluri având SOC_{avg} de 50%, se poate exprima astfel:

$$L_1 = K_{co} \cdot N \cdot \exp\left[\frac{SOC_{dev}-1}{K_{ex}} \cdot \frac{T_{nabs}}{T_a}\right] + 0.2 \cdot \frac{\tau}{\tau_{life}} \quad (2-7)$$

unde K_{co} și K_{ex} sunt coeficientul de intensitate a încărcării/descărcării, respectiv exponentul pentru DOD, T_{nabs} este temperatura nominală sau de referință a bateriei în valoare absolută ($T_{nabs} = T_n + 273.15K$), T_a este temperatura actuală medie a bateriei în valoare absolută și τ_{life} este definit ca durata totală de viață a bateriei în stare de repaos, cu degradarea capacității la 0.8 din capacitatea nominală, la 25°C și 50% SOC. Autorul arată că parametrii K_{co} și K_{ex} depind de procesele complexe ale distribuției tensiunii mecanice în anod ca urmare a intercalării ionilor de Li. De aceea, valorile acestor parametri sunt specifici pentru fiecare tip de baterie în parte și determinarea acestora se face empiric, prin potrivirea seriilor de date rezultate din experimentele de încărcare-descărcare.

A doua componentă a formulei de degradare modelează scăderea concentrației ionilor de litiu activi, precum și efectul variației tensiunii la borne pe parcursul micro-ciclului. Această variație este exprimată prin SOC_{avg} , astfel că:

$$L_2 = L_1 \cdot \exp[4 \cdot K_{soc} \cdot SOC_{avg} - 0.5] \cdot (1 - L) \quad (2-8)$$

unde K_{soc} este coeficientul variației SOC și L este valoarea actuală cumulată a degradării; poate fi exprimat ca $L = 1 - SOH$. La fel ca în cazul parametrilor descriși mai sus, valoarea K_{soc} va fi de asemenea determinată experimental pentru fiecare tip de baterie. Autorul remarcă faptul că în practică SOC_{avg} poate avea o valoare scăzută deși SOC_{dev} poate fi mare, astfel că influența acestora asupra degradării este neliniară și poate complica analiza datelor. Autorul arată de asemenea că un model care poate prezice cu precizie starea de degradare atât în cazul descărcării unei cantități mici de energie cât și în cazul descărcării unei cantități mari, este util spre a fi folosit în practică.

În continuare, rata de degradare a bateriei în micro-ciclul m este corectată cu temperatura, astfel:

$$L(m) = L_2 \cdot \exp[K_T \cdot (T_b - T_n) \cdot T_{nabs}/T_a] \quad (2-9)$$

unde K_T este coeficientul de variație a degradării cu temperatura iar T_b și T_{ref} sunt temperatura actuală medie a bateriei, respectiv temperatura nominală, exprimate în °C. Prin analizarea datelor de la mai mulți producători de baterii, autorul observă că acest coeficient se poate aproxima la $\ln(2)/10$, modelând astfel fenomenul de dublare a ratei de degradare la fiecare creștere a temperaturii cu 10 °C.

Degradarea bateriilor se produce atât la descărcare cât și la încărcare. Lipsa datelor existente în literatură nu permite evaluarea gradului de degradare datorat procesului chimic exoterm din timpul încărcării, ca urmare modelul propus consideră temperatura din timpul încărcării ca fiind constantă, utilizând media temperaturii în calcule.

Degradarea totală a bateriei se poate calcula astfel prin însumarea cuantelor de degradare din fiecare micro-ciclu:

$$L = \sum_{m=1}^M L(m) \quad (2-10)$$

Pe parcursul duratei de viață a bateriei, degradarea totală L va fi monoton crescătoare, pornind de la valoarea 0 pentru o baterie nouă și ajungând la 1 când capacitatea disponibilă a bateriei atinge valoarea 0. Deși s-a arătat mai sus că în practică L se poate aproxima ca $1 - SOH$, în cazul general capacitatea disponibilă a

bateriei depinde și de limitele tensiunii la borne în timpul funcționării, în funcție de tipul de baterie ales.

Pe baza parametrului de degradare L , autorul construiește și un model de baterie matematic-electric, prin care tensiunea la bornele bateriei poate fi calculată în orice moment. Modelul este reprezentat de următoarele relații:

$$V_{OC} = V_{nom} + SOC \cdot \frac{V_{max} - V_{nom}}{2} \quad (2-11)$$

$$V_b = V_{OC} + (R_1 + R_2) \cdot I \quad (2-12)$$

$$R_2(L, SOC) = a + b \cdot SOC^c + d \cdot (1 - SOC)^e \quad (2-13)$$

unde V_{OC} , V_{nom} , V_{max} , V_b sunt tensiunea în circuit deschis, tensiunea nominală, tensiunea maximă în ciclul de încărcare, respectiv tensiunea la borne în circuit. R_1 are o valoare fixă, dependentă de chimia bateriei, iar R_2 este modelată ca o rezistență ce depinde de parametrul de degradare și de SOC. Coeficienții a, b, c, d, e sunt prezentați în articol, având formule complexe și depinzând de L , ca urmare nu vor mai fi reproduși aici. Modelul de baterie și modelul de degradare sunt validate experimental prin compararea curbelor de descărcare ale unor baterii reale, cu rezultatele obținute prin aplicarea modelului și sunt prezentate în Fig. 2-2.

Discharge Curves A123 Li Ion Cell

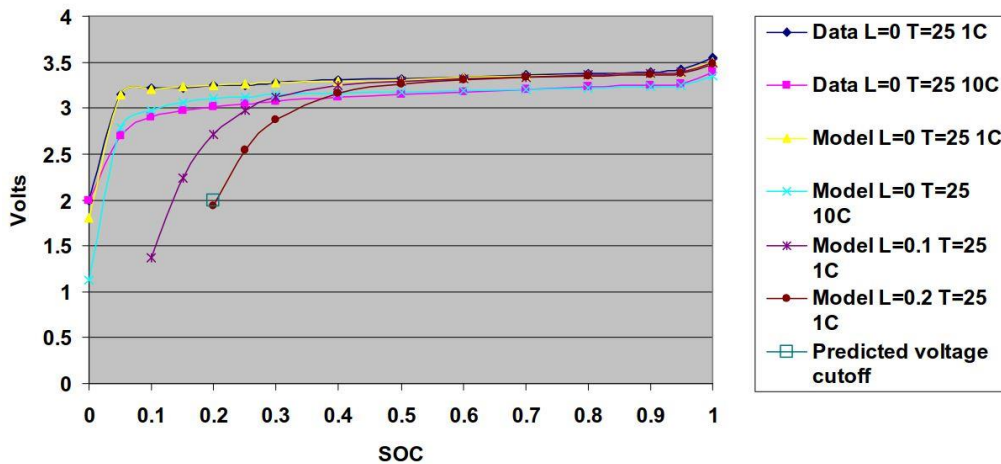


Fig. 2-2 Curbe de descărcare baterii comparate cu modelul propus [36]

Din figura de mai sus precum și din restul datelor experimentale prezentate în articol, se poate concluziona că modelul de degradare propus are o precizie mare și urmărește fidel comportamentul real al bateriilor testate. De asemenea, modelul propus este relativ simplu de adaptat la alte tipuri de baterii Li-Ion, deoarece toate chimii de baterii actuale prezintă același fenomen de propagare a crăpăturilor la nivelul anodului, ca mecanism principal al degradării capacității. Astfel, deși există mai multe tehnologii cu chimie diferită pentru catod, anodul are în principal aceeași compoziție chimică, pe bază de grafit, pentru toate tipurile de baterii actuale.

2.4. Reducerea degradării în cazul grupurilor reconfigurabile de acumulatori

Sistemele actuale de stocare de energie folosesc un număr mare de acumulatori pentru a atinge obiectivele de putere și energie cerute de aplicație, printre care amintim: aplicații de stocare de energie pentru smart grid, vehicule electrice și altele. De aceea, proiectarea și exploatarea optimă a grupurilor de acumulatori de acest tip sunt cruciale pentru a atinge performanța optimă.

În majoritatea cazurilor, acumulatorii sunt conectați în serie și/sau în paralel într-o topologie statică pe durata de viață a sistemului. Cele mai uzuale scheme de conectare a bateriilor sunt prezentate în Fig. 2-3.

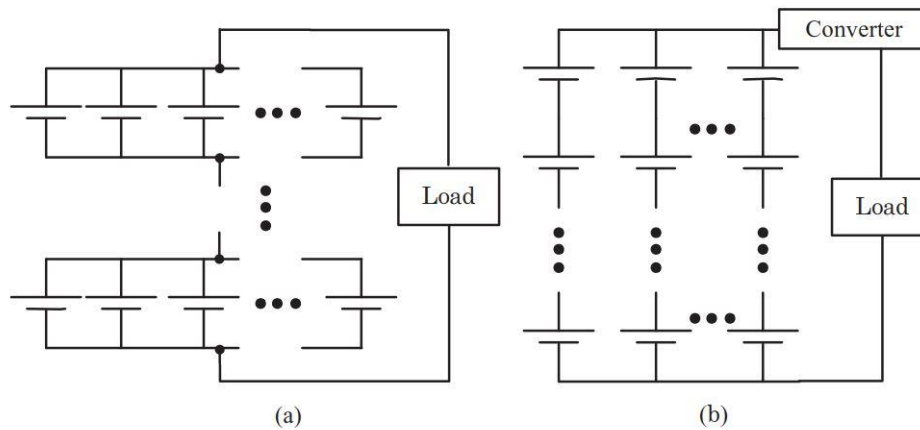


Fig. 2-3 Schema de conectare serie-paralel (a) și paralel-serie (b) [49]

Avantajul principal al conexiunii serie-paralel este că egalizarea variațiilor parametrilor individuali ai bateriilor se face în mod natural și simplu, prin proprietatea bateriilor conectate în paralel de a avea aceeași tensiune la borne. În schimb, această configurație nu se poate adapta la ceșterea cerințelor de sarcină, deoarece nu se pot adăuga baterii noi.

Configurația paralel-serie este formată din grupuri de baterii în serie numite șiruri, conectate la rândul lor în paralel. În această configurație, adăugarea unor șiruri noi pentru a crește capacitatea de furnizare de energie se poate face cu ușurință. Principalul dezavantaj este că variațiile bateriilor individuale vor cauza în timp reducerea capacității și scoaterea din uz prematură a întregului grup de acumulatori.

Schemele de conectare reconfigurabile au generat un interes crescut din partea cercetătorilor în ultimii ani ([7],[50]), datorită avantajelor față de schemele de conectare clasice:

- posibilitatea decuplării bateriilor care prezintă o capacitate scăzută, pentru a evita degradarea suplimentară a SOH;
- creșterea fiabilității sistemului prin decuplarea bateriilor care au atins limita de SOH sau la care tensiunea de descărcare este sub limita admisă
- în timpul încărcării, decuplarea selectivă a bateriilor care se încarcă mai repede, până când restul bateriilor ating starea de încărcare prestabilită

Caracteristica principală a grupurilor de acumulatori reconfigurabili este că topologia în care sunt conectate bateriile poate fi schimbată în mod dinamic în timpul utilizării, bazat pe condițiile în timp real ale sarcinii electrice conectate. Astfel, articolele din literatura de specialitate s-au concentrat pe îmbunătățirea caracteristicilor de performanță: echilibrarea bateriilor, toleranța la defecte și creșterea duratei de viață. Dezechilibrul bateriilor este principala cauză a defectării premature a grupurilor de acumulatori. Acesta se manifestă prin creșterea diferenței dintre capacitățile furnizate, care se accentuează odată cu folosirea acestora, putând ajunge până la un factor de 10 pentru o perioadă de exploatare de 5 ani [59].

2.4.1. Sistemele de acumulatori reconfigurabili existente

În literatură au fost propuse o serie de topologii de reconfigurare [7],[50], iar în cele ce urmează voi prezenta succint principalele caracteristici ale fiecăreia.

Sistemul din [51] este printre primele propuneri de acumulatori reconfigurabili din literatură. Autorii au dezvoltat un sistem bazat pe o matrice de comutatoare pentru aplicații aeronautice, folosind micro-baterii reîncărcabile de tip Li-Ion. Micro-bateriile sunt sisteme de stocare fabricate într-un proces de litografie pe o pastilă de siliciu, similar cu procesul de fabricație al circuitelor integrate. Datorită miniaturizării, micro-bateriile pot avea capacități între 1 nAh și 200 nAh, corespunzătoare unor suprafețe ale substratului de siliciu între $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ și $600 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$. În topologia propusă, fiecare baterie componentă a grupului, cu excepția celor conectate direct la bornele exterioare, este deservită de 5 comutatoare, dar ele sunt împărțite între bateriile adiacente din grup, astfel că numărul total de comutatoare necesar pentru un grup format din N baterii este $4N - 3$. Grupul de baterii oferă astfel o reconfigurabilitate completă, oricare baterie putând fi conectată în serie sau în paralel cu oricare altă baterie.

Autorii mai descriu și un sistem de management al micro-bateriilor, care cuprinde module pentru controlul încărcării folosind mai mulți algoritmi, controlul matricei de comutatoare (reconfigurarea se face static, înaintea cuplării sarcinii), precum și modulul de comunicație și interfațare cu sisteme externe. De asemenea, BMS propus include și funcții de monitorizare a stării bateriilor, încadrându-le în 7 categorii de viabilitate, în funcție de care se ia apoi decizia de a le conecta sau nu în sarcină. Autorii descriu și un prototip al sistemului, format din 2 micro-baterii și BMS, cu care demonstrează capacitatea de reconfigurare a grupului de baterii și funcționarea corectă în mai multe scenarii. Printre limitările soluției propuse putem menționa faptul că nu se au în vedere aspecte legate de pierderile de energie din elementele de comutare (care sunt direct proporționale cu mărimea grupului de baterii), precum și lipsa unei analize a scalabilității sistemului.

În [52] se propune un grup reconfigurabil format din N acumulatori conectați în serie (șir de baterii), reducând numărul de comutatoare la 2 per baterie. Comutatoarele pentru bateria k sunt numerotate ca S_{k1} și S_{k2} și funcționează alternativ: S_{k2} este deschis când S_{k1} este închis, și viceversa. Se obține astfel o topologie reconfigurabilă simplă, în care oricare baterie k se poate găsi în una din două stări posibile: fie conectată în circuit fie deconectată. Topologia propusă permite decuplarea selectivă a oricărei baterii din șir, ducând la scăderea costului total dar și a complexității. Autorii implementează grupul de acumulatori și matricea de comutatoare asociată atât în mediul MATLAB/SIMULINK cât și sub forma unui prototip funcțional, format din 6 baterii Li-Ion cu capacitatea nominală de 860 mAh. Modelul de baterie folosit este validat prin compararea rezultatelor experimentale cu cele obținute prin simulare, prin rularea a 3 scenarii de test în care se variază metoda de

descărcare a bateriilor. Spre deosebire de alte articole din domeniu, în această lucrare se face o analiză a pierderilor de energie (și prin urmare, de eficiență) produse de rezistența de conducție a comutatoarelor formate din tranzistoare MOSFET. Concluzia este că se poate obține o eficiență maximă de 98%, utilizând tehnologia de fabricație a semiconductoarelor disponibilă la momentul publicării articolului.

Un alt avantaj al topologiei reconfigurabile propuse este posibilitatea de a extrage maximul de energie utilă din bateriile componente în procesul de descărcare chiar și în cazul limită în care una din bateriile componente este descărcată complet. În această situație, grupul serie reconfigurabil poate furniza $N - 1/N$ % din capacitatea totală disponibilă, pe când un grup serie cu o topologie statică nu poate funcționa deloc.

Totuși, acest sistem are și anumite dezavantaje care îi limitează posibilitățile de aplicare practică:

- prezintă o reconfigurabilitate scăzută, deoarece nu se pot face conexiuni în paralel între bateriile componente; aceasta reduce eficiența teoretică totală în cazul utilizării grupului ca un modul component al grup de acumulatori mai mare, conectat în paralel cu grupuri identice din punct de vedere al configurației;
- nu se analizează efectele electrice ale cuplării sau decuplării simultane a mai multor baterii componente, ce pot cauza defectarea întregului sistem (prin apariția arcului electric, spre exemplu); discuția este limitată la prezentarea caracteristicilor principale ale sistemului, dar nu se are în vedere integrarea sa într-un BMS, cu problemele aferente.

O soluție mai generală decât cea descrisă în articolul prezentat mai sus și propusă de aceeași autori, este grupul reconfigurabil de acumulatori numit Self-X [53]. În acest articol, grupul de acumulatori este reprezentat schematic printr-o matrice formată din m module conectate în serie sub forma unui șir, iar fiecare modul este format din n baterii individuale, legate în paralel. Topologia propusă este astfel o generalizare a soluției din [52], în care fiecare baterie din șir este înlocuită în cazul de față cu modulul descris anterior. Denumirea de Self-X se explică prin capacitatea demonstrată în articol a grupului de acumulatori de fi echilibrat autonom (self-balance), de a se repara în mod autonom (self-healing), respectiv de a se reconfigura în mod autonom (self-reconfiguration).

Fiecare baterie componentă are asociat un singur comutator legat la borna negativă pentru conectarea, respectiv deconectarea bateriei din circuit. Pe lângă acestea, fiecare modul are asociat un comutator de șuntare (bypass) legat în paralel cu modulul, respectând același principiu de funcționare în contratimp cu comutatoarele de decuplare ale bateriilor individuale, enunțat în [52]: dacă oricare comutator individual S_{ij} din modulul i este închis, comutatorul de șuntare al modulului S_i va fi deschis, iar dacă toate comutatoarele S_{ij} sunt deschise, comutatorul S_i va fi automat închis. Numărul de comutatoare este redus astfel față de lucrările apărute anterior, la 1 per baterie plus cele m comutatoare de șuntare, obținându-se un total de $m \times (n + 1)$ comutatoare, reducând atât complexitatea semnalelor de control cât și costul total de implementare al unui astfel de sistem de stocare de energie.

Autorii descriu și principiile de funcționare ale unui BMS care să controleze grupul reconfigurabil de baterii în mod autonom. Sistemul este compus dintr-un modul de monitorizare și de achiziție a semnalelor de tensiune, curent și temperatură a fiecărei baterii, un modul de generare a semnalelor de control pentru matricea de comutatoare, un modul ce implementează modelarea bateriilor în vederea estimării SOC în timp real, respectiv un modul de control și protecție. Acest modul

implementează un algoritm de selecție a modulelor de baterii și a bateriilor componente din fiecare modul, ce vor fi conectate la sarcină în procesul de încărcare sau descărcare. Prin aplicarea algoritmului se încearcă găsirea numărului minim de module și de baterii din fiecare modul pentru care condițiile de curent și de putere a sarcinii sunt satisfăcute. Criteriul după care sunt ordonate bateriile în vederea selecției este valoarea SOC.

Un grup de test format din 6 module a câte 3 baterii legate în paralel este modelat și simulat în mediul MATLAB/Simulink. Pentru a valida modelul de baterie utilizat se realizează teste de descărcare în 3 scenarii diferite iar diferențele dintre rezultatele obținute prin implementarea experimentală și cele obținute prin simulare se încadrează într-o marjă de 1%. Performanța algoritmului de control implementat în BMS este evaluată prin alte scenarii de test care vizează echilibrarea bateriilor componente. În cadrul acestor teste sunt simulate defecte care pot apărea în timpul funcționării, cum ar fi căderea unor baterii componente (prin reducerea SOC la valoarea 0), iar rezultatele obținute validează caracteristicile de auto echilibrare și de auto reparare proiectate. Similar cu abordarea din [52], și în această lucrare se analizează pierderile de energie survenite din pricina comutatoarelor și se oferă și anumite soluții pentru creșterea eficienței (de exemplu, realizarea comutatoarelor folosind 2 tranzistoare MOSFET legate în paralel, pentru reducerea la jumătate a rezistenței de conducție).

Sistemul propus în prezenta lucrare are o serie de avantaje comparativ cu un grup de acumulatori static și rezolvă și problema scalabilității și a generalității scăzute pe care o are soluția descrisă în [52]. Printre neajunsuri putem menționa faptul că nu se iau în considerare și nu se discută efectele grave pe care le pot avea cuplările sau decuplările simultane ale mai multor baterii și/sau module. Astfel, în descrierea algoritmului de control se arată în mod simplist că reconfigurarea se face periodic sau de fiecare dată când se schimbă caracteristicile de putere a sarcinii, fără a se decupla tot grupul înainte. O altă problemă este că nu se cuantifică efectele pe termen lung ale utilizării algoritmului de control propus, deci nu se analizează dacă durata de funcționare totală a grupului de acumulatori va fi extinsă sau nu. De asemenea, BMS nu măsoară sau utilizează SOH al bateriilor în algoritmul de control.

În [55] se prezintă o nouă topologie de grup de acumulatori organizată ierarhic, denumită DESA (Dependable Efficient Scalable Architecture) și orientată pe aplicații din domeniul automotive. Un grup de acumulatori DESA este format din n sub-grupuri de acumulatori controlate de câte un BMS local și un BMS global. Topologia aleasă presupune 3 comutatoare pentru fiecare baterie din sub-grup plus încă 3 comutatoare de același tip pentru fiecare sub-grup local. Autorii afirmă că numărul de comutatoare rezultat este minimul necesar pentru asigurarea oricărei configurații serie-paralel cerută. Comunicarea între BMS se realizează prin interfața CAN.

Autorii elaborează o metodă complexă de interacțiune cu comutatoarele din sub-grupuri, denumind fiecare stare în care se pot afla sub-grupurile relativ la stările comutatoarelor și atribuind un cod unic de identificare pentru fiecare stare, în vederea transmisiei eficiente pe interfața CAN. O atenție deosebită se acordă și problemei consumului propriu al infrastructurii grupului de acumulatori (BMS, comutatoare, controllere CAN, etc.), deoarece se dorește minimizarea acestui consum în situațiile în care unul sau mai multe sub-grupuri sunt decuplate de la sarcină, de exemplu. În acest sens, se construiește și se rezolvă un model Markov al managementului consumului la nivel de sistem.

Pentru analiza economică a eficienței pe termen lung a grupurilor de acumulatori, articolul detaliază un model de cost total de funcționare, care este

compus din costul de producție plus costul de întreținere. Costul de producție este direct dependent de eficiența testării bateriilor iar costul de întreținere depinde de fiabilitatea în exploatare, pe parcursul duratei normale de utilizare și de garanție. Fiabilitatea bateriilor și a comutatoarelor este modelată analitic și comparată cu fiabilitatea acestor componente în cazul unui grup de acumulatori static. Rezultatele simulărilor arată că un sistem de stocare de energie bazat pe DESA este, în medie, de 3 ori mai fiabil decât un sistem convențional pentru o perioadă de exploatare de 10 ani. Aceasta se traduce într-o eficiență economică de 4.2 ori mai mare comparativ cu un sistem convențional.

În articolul prezentat se discută problema arcului electric care poate apărea la comutări simultane ale mai multor baterii și se propun și câteva soluții (componente hardware suplimentare pentru protecție). Totuși, nu se analizează latența și complexitatea suplimentară introdusă de comunicația dintre BMS global și cele n BMS locale. Un alt neajuns al articolului curent este lipsa cuantificării efectului degradării SOH al bateriilor componente prin aplicarea DESA, singura mențiune despre SOH fiind în legătură cu capabilitățile BMS local.

În lucrările [56]-[58] și [61] se analizează performanța grupurilor reconfigurabile de acumulatori în ceea ce privește eficiența energetică. Topologia grupului de acumulatori considerată este cea cu 3 comutatoare per baterie propusă în [54] și [55] iar combinațiile posibile în care pot fi conectate bateriile și bornele grupului sunt abstractizate sub forma unui graf

orientat aciclic în care:

- nodurile sunt bateriile individuale;
- arcele reprezintă gradele de libertate ale grupului, cuprinzând totalitatea legăturilor electrice prin care pot fi conectate bateriile și bornele; orientarea arcelor este dată de sensul curentului electric în procesul de descărcare.
- ponderile nodurilor codifică tensiunea la bornele fiecărei baterii, la momentul executării procesului de reconfigurare.

Prin reprezentarea sub formă de graf, aflarea configurației optime în funcție de sarcină se transformă în identificarea tuturor drumurilor fezabile din graf, care în cazul general este o problemă ce nu poate fi rezolvată într-un timp polinomial (*NP-hard problem*). Pentru a demonstra fezabilitatea metodei, se impune o primă constrângere derivată din caracteristicile condiția ca fiecare șir de baterii format să conțină baterii distincte. Spațiul de căutare în graf se va limita astfel prin găsirea drumurilor ce conțin doar arce disjuncte.

Deoarece sarcina este considerată variabilă pe durata funcționării sistemului, algoritmul propus încearcă să maximizeze eficiența energetică prin adaptarea tensiunii furnizată de grupul de acumulatori la tensiunea cerută de sarcină. Se încearcă astfel să se minimizeze pierderile de energie de la nivelul reguletoarelor de tensiune aflate între baterii și sarcină. Aceste constrângeri permit o reducere suplimentară a complexității căutării drumurilor fezabile în graf, deși în articole nu se analizează puterea de procesare necesară pentru aceste calcule.

Autorii utilizează baterii de tip Panasonic NCR18650 pentru a simula efectele variației tensiunii și a puterii cerute de sarcină, asupra unui grup reconfigurabil format din 64 de baterii. Rezultatele obținute sunt comparate cu un grup de acumulatori static și demonstrează o creștere semnificativă, de 3 până la 5 ori, a timpului de utilizare total al sistemului.

O problemă a algoritmului de căutare propus este că nu toate drumurile sunt posibile din punct de vedere electric, această verificare suplimentară trebuind

efectuată la fiecare operație de reconfigurare. Un alt dezavantaj este că toate bateriile grupului sunt folosite, neexistând posibilitatea de a dezactiva anumite baterii care nu mai îndeplinesc anumite criterii de performanță sau de siguranță (de exemplu, nivelul SOH a scăzut sub un prag minim de avertizare). De asemenea, considerentele de toleranță la defectarea bateriilor nu sunt discutate.

2.4.2. Soluții notabile

Dezechilibrul șirurilor de baterii legate în serie este cauza principală a deteriorării premature a grupurilor de acumulatori. Autorii lucrărilor [57] și [58] propun minimizarea dezechilibrului între baterii prin reconfigurarea conexiunilor electrice dintre ele ținând cont și de SOH, în faza de descărcare. Ideea de bază din aceste articole este observația empirică a faptului că un grup de acumulatori furnizează o capacitate mai mare atunci când bateriile care compun șirurile grupului au SOH similar. Observația este confirmată experimental, oferind motivația pentru găsirea unor soluții care să minimizeze dezechilibrul între baterii.

Topologia sistemului este de tipul serie-paralel iar reconfigurabilitatea considerată este parțială (doar șirurile de baterii legate în serie pot fi conectate, configurația șirului este fixă) sau totală (oricare baterie poate face parte din oricare șir). O altă caracteristică este aceea că reconfigurarea nu se face online-în circuit, din cauza pericolului de arc electric. Un exemplu de aplicație propusă este reconfigurarea grupului de acumulatori ai unui automobil electric după ce a fost încărcat, înaintea unui nou drum.

Pe baza celor 2 topologii considerate, autorii dezvoltă 2 algoritmi numiți SHARE-partial pentru sistemul reconfigurabil parțial și SHARE-full pentru sistemul reconfigurabil total. SHARE-full presupune ordonarea descrescătoare a bateriilor în funcție de SOH și formarea a m șiruri de n baterii, pe baza unui algoritm simplu de tip greedy, conectând astfel toate bateriile de fiecare dată. SHARE-partial transformă problema găsirii configurației bateriilor cu SOH asemănător în căutarea drumurilor distincte într-un graf orientat. Ambii algoritmi sunt implementați apoi în simulări dar și într-un sistem practic cu 6 baterii Li-Ion, demonstrând că reconfigurarea bazată pe SOH aduce o îmbunătățire de 10%-60% față de grupul cu topologie fixă.

În [59] și [60] autorii descriu un algoritm de reconfigurare (Cell Skipping-assisted Reconfiguration - CSR) care omite selectiv unele baterii, pentru a obține o valoare aproape optimă a capacității furnizate și pentru a reduce dezechilibrul dintre baterii. La fel ca în [57], reconfigurarea se face offline, după terminarea procesului de încărcare. Topologia de reconfigurare folosită este cea de tip JPL, cu 4 comutatoare per baterie [51], care permite o reconfigurabilitate totală a bateriilor componente. De asemenea, autorii se bazează pe aceeași observație din [57] și [58], anume că bateriile cu SOH mai mic domină reduc capacitatea șirului din care fac parte.

Ideea de bază a metodei propuse este de a omite unele baterii care au SOH mult mai mic decât restul din configurația finală a grupului, formând astfel mai puține șiruri paralele. Problema este complicată de efectul curentului rezultat asupra capacității, care este mai mare în acest caz, ducând la o scădere a capacității furnizate.

Algoritmii de selecție a bateriilor se bazează pe programare dinamică, generând astfel m șiruri de baterii conectate în serie pentru a susține tensiunea cerută de sarcină. Un efect al folosirii algoritmilor este că nu sunt omise întotdeauna bateriile având capacitatea cea mai mică, autorii raportând un plus de 3.5% a capacității furnizate folosind algoritmul propus. Rezultatele obținute prin rularea algoritmului pe datele experimentale obținute prin ciclarea cu curent constant a 40 baterii

demonstrează eficacitatea algoritmului propus, care crește proporțional cu dezechilibrul bateriilor. În cadrul evaluării performanțelor, autorii analizează impactul numărului de baterii, demonstrând că performanța crește cu cât grupul de baterii este mai mare, precum și impactul curentului de descărcare: performanțele sunt invers proporționale cu creșterea curentului, dar metoda propusă este mai bună decât sistemul cu topologie statică și în acest caz.

Problema adaptării tensiunii grupului de acumulatori la tensiunea cerută de sarcină este abordată în [61]. Similar cu [59], autorii folosesc topologia de tip JPL [51] pe care o reprezintă sub forma unui graf orientat aciclic. Astfel, problema găsirii configurației optime a bateriilor se transformă în problema identificării tuturor căilor fezabile din graf, bazată pe algoritmul căutării în adâncime. Problema este simplificată mai departe, observând că tensiunile bateriilor se află într-un interval restrâns dat de tensiunea minimă de descărcare și tensiunea maximă de încărcare. Astfel, complexitatea computațională a problemei se reduce.

Soluția propusă este testată atât prin simulări, bazate pe datele colectate din exploatarea unui autovehicul electric, cât și experimental, utilizând un modul comercial format din 72 baterii Li-Ion. Rezultatele obținute arată o îmbunătățire de până la 5 ori a timpului de utilizare a grupului de acumulatori, comparativ cu varianta cu topologie fixă.

În lucrare sunt discutate și câteva aspecte practice ale implementării algoritmului. Una dintre probleme este alegerea regulatorului de tensiune pentru adaptarea la sarcină, discutând-se soluția regulatorului liniar versus convertor DC-DC în comutație. Reconfigurabilitatea limitată este de asemenea discutată, în practică nefiind fezabil să se construiască un grup de baterii cu reconfigurabilitate totală. Astfel, cu cât numărul de baterii legate în serie este mai mare, performanțele scad proporțional deoarece reconfigurabilitatea este mai scăzută.

Soluțiile prezentate în această secțiune prezintă abordări interesante la problema minimizării degradării bateriilor componente ale unui grup reconfigurabil. Totuși ele vin și cu unele dezavantaje, printre care putem aminti performanța scăzută a reducerii degradării din [57] și [58], deoarece se folosesc toate bateriile la fiecare ciclu. De asemenea, algoritmi de programare dinamică și căutare în grafuri propuși în [59] și [61] sunt prea complecși pentru a fi implementați pe un BMS embedded și nu se oferă o analiză a puterii de calcul necesare rulării algoritmilor. Astfel se poate concluziona că problema minimizării degradării în grupurile reconfigurabile de baterii rămâne deschisă.

2.5. Sisteme BMS pentru grupuri de acumulatori

Grupurile de acumulatori necesită sisteme de management al bateriilor (BMS) pentru a le menține în condiție de funcționare un timp cât mai îndelungat. Una din funcțiile de bază a BMS este măsurarea și controlarea parametrilor de funcționare a fiecărei baterii componente a grupului, pentru a menține parametrii primari precum tensiunea, curentul și temperatura în limitele acceptate.

BMS trebuie de asemenea să ofere funcții specializate de măsurare și estimare a SOC și SOH a bateriilor componente, precum și a grupului în ansamblul său, pentru a permite luarea deciziilor de înlocuire la timp și/sau a extinderii duratei de utilizare totală a grupului.

În cele ce urmează, se vor prezenta caracteristicile celor mai relevante sisteme BMS existente în literatură și se vor discuta tipurile de arhitecturi BMS pentru grupuri de acumulatori, aplicabile atât grupurilor statice cât și celor reconfigurabile.

2.5.1. Sisteme BMS existente

În literatură există o preocupare pentru studierea BMS iar cele mai des întâlnite articole au ca temă aplicațiile din domeniul vehiculelor electrice, dar există și lucrări care abordează problema BMS în sisteme de stocare de energie conectate la rețeaua de distribuție de energie electrică (smart grid). Deși performanța bateriilor și îmbunătățirea continuă a performanțelor acestora se află în prim planul cercetării, performanța și eficiența BMS devin subiecte cel puțin la fel de importante, pe măsură ce numărul aplicațiilor ce integrează grupuri de acumulatori devine tot mai mare.

BMS reprezintă o componentă de bază a aplicațiilor din domeniile vehiculelor electrice și smart grid, care permite exploatarea grupurilor de baterii din aceste aplicații de o manieră sigură, eficientă și fiabilă. Cerințele principale pentru integrarea sistemelor de stocare în cadrul smart grid pot fi grupate în mai multe categorii:

- puterea furnizată: depinde de eficiența de încărcare-descărcare, nivelul maxim de încărcare al bateriilor componente, mărimile curenților de încărcare și descărcare;
- durata de funcționare: maximizarea numărului de cicluri de încărcare-descărcare și utilizarea bateriilor cu durată de viață extinsă în stare de repaos;
- impactul asupra mediului: evaluarea factorilor de risc datorăți chimiei bateriilor, temperaturilor de funcționare, considerarea aspectelor legate de reciclarea bateriilor componente, etc.;
- costul: se includ și costurile cu producția, mentenanța și munca, pe lângă costurile operaționale.

În ceea ce privește autovehiculele electrice, siguranța în exploatare este cea mai importantă cerință pentru grupurile de acumulatori integrate. În acest sens, atât grupul de acumulatori cât și persoanele aflate în vehicul trebuie protejate împotriva defecțiunilor ce pot duce la incendii sau șoc electric. Estimarea precisă a energiei disponibile este de asemenea importantă pentru o funcționare normală raportată la autonomia de deplasare a vehiculului. Datorită faptului că majoritatea componentelor electronice auxiliare ale grupului de acumulatori constă în circuite de protecție împotriva fenomenelor de supra descărcare sau supra încărcare, un BMS pentru astfel de aplicații trebuie să calculeze SOC și SOH al grupului, în vederea creșterii eficienței și siguranței în funcționare.

Autorii articolului [62] definesc din punct de vedere structural un BMS ca fiind format din următoarele componente:

- Modul de achiziție de date (DAQ): înregistrează în timp real parametri primari de funcționare ale bateriilor (tensiune, curent și temperatură), cu precizia cerută.
- Modul de estimare a stării: aplică online (în timpul funcționării sistemului) un model specific tipului de baterii folosite, pentru a identifica parametrii de funcționare. Acești parametri sunt utilizați apoi pentru calcularea mărimilor secundare de ieșire, precum SOC, SOH și SOF. Aceste mărimi reprezintă informațiile relevante pentru utilizatorul sistemului de stocare, deoarece pe baza lor se pot lua deciziile care duc la folosirea cât mai eficientă a sistemului.

În cazul autovehiculelor electrice, un exemplu de aplicație integrată descrisă în articol este o parcare având stații de încărcare la care puterea este alocată automat

în funcție de starea de încărcare raportată de BMS al fiecărui vehicul și de preferințele fiecărui utilizator.

Din punct de vedere funcțional, un BMS trebuie să îndeplinească mai multe roluri, iar acestea sunt de obicei interdependente. O prezentare schematizată a principalelor obiective îndeplinite de un BMS se poate studia în Fig. 2-4.

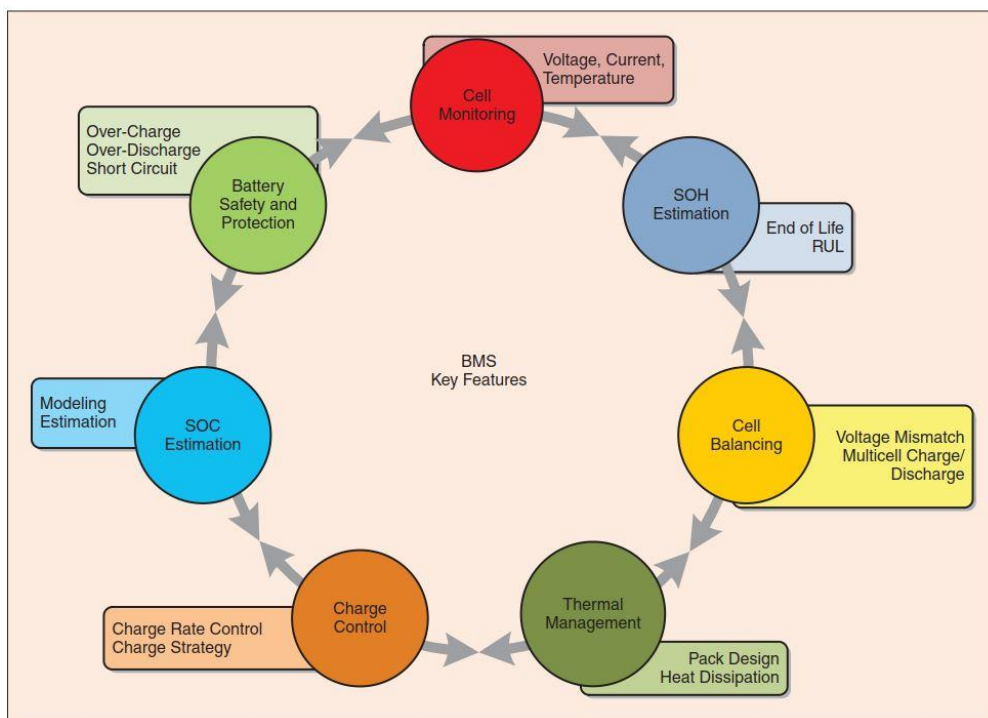


Fig. 2-4 Funcțiile principale ale unui BMS [62]

Măsurarea parametrilor primari ai fiecărei baterii (tensiunea, curentul și temperatura) trebuie realizată cu o precizie cât mai ridicată. Acesta este o problemă în anumite aplicații, unde plaja de variație a curentului este foarte mare (0.01 – 200 A), sau pentru anumite chimii de baterii, unde curba Open Circuit Voltage (OCV)-SOC este foarte plată (Li-FePO₄). Autorii estimează că este necesară o precizie de măsurare a tensiunii la nivelul de 1-2 mV pentru un calcul fiabil al SOC, deși majoritatea circuitelor de măsură comerciale oferă o precizie în domeniul de 5 mV. În ceea ce privește precizia de măsurare a curentului, aceasta este la fel de importantă precum măsurarea cu precizie a tensiunii, deoarece algoritmi de estimare SOC utilizează ambele mărimi. O metodă mai simplă de calculare a capacității curente a bateriilor este integrarea curentului măsurat la borne în timp (Coulomb counting), dar în practică acest proces este dificil de efectuat, deoarece necesită un senzor de curent cu offset apropiat de zero, pe toată plaja de temperatură. În aplicațiile practice se utilizează senzori de curent cu o precizie de măsurare în intervalul 0.5 – 1% pe un domeniu larg ce poate ajunge până la un maxim de 450 A în cazul autovehiculelor electrice.

Bateriile trebuie să fie menținute pe întreaga durată de funcționare în limitele de siguranță specificate, pentru a proteja atât sistemul cât și persoanele care îl

utilizează. Cel mai important factor ce determină o funcționare defectuoasă este compoziția chimică a bateriilor. Integritatea sistemului poate fi pusă în pericol dacă bateriile sunt descărcate sub pragul de siguranță sau încărcate peste limita maximă de timp, sau atunci când curentul de sarcină este mai mare decât maximum specificat de producător. În cazul particular al bateriilor bazate pe tehnologia Li-Ion, temperatura de funcționare este determinată atât de factorii de mediu cât și de chimia bateriilor. Aceasta joacă un rol vital în asigurarea unei funcționări normale, de aceea BMS trebuie să impună și să monitorizeze permanent limitele de operare care pot fi, spre exemplu, între 0 și 60 grade celsius. În unele aplicații cum sunt cele automotive, BMS trebuie să corespundă și să fie certificat conform specificațiilor din standarde, cum ar fi ISO 26262.

SOC este o mărime vitală pentru funcționarea eficientă a sistemului dar și pentru evitarea situațiilor periculoase de supra descărcare sau supra încărcare. SOC este definit pentru scopul acestei lucrări ca fiind mărimea capacității disponibile stocate în baterie raportată la capacitatea totală maximă furnizabilă de către baterie. Deoarece ea nu poate fi măsurată direct, este necesar ca BMS să integreze algoritmi cât mai performanți pentru o estimare precisă a SOC, bazată pe datele măsurate de la fiecare baterie.

SOH este de asemenea o mărime care nu poate fi măsurată direct, dar care este importantă pentru obținerea unei durate de funcționare extinse a sistemului. Scopul utilizării SOH este de a estima numărul de cicluri de încărcare-descărcare rămași pentru baterie și pentru întreg grupul de acumulatori. În literatură, estimarea online precisă a SOH este o problemă deschisă, existând un efort mare de cercetare în acest sens. Un factor suplimentar ce complică analiza este lipsa unei definiții standardizate a SOH, existând în acest sens mai multe variante de lucru.

Un sistem de stocare tipic este compus dintr-un număr de baterii conectate în serie formând șiruri conectate în paralel. Diferențele de încărcare și de tensiune între bateriile individuale pot duce la o deteriorare accelerată a performanței și în final la oprirea prematură a funcționării întregului grup. Orice BMS implementează un algoritm pe parcursul procesului de descărcare prin care descărcarea este oprită după ce prima baterie din grup atinge tensiunea de deconectare, pentru a preveni problemele de siguranță amintite mai sus. Efectul este că majoritatea bateriilor rămân neutilizate. Se poate astfel concluziona că tehnicile pentru controlul echilibrului bateriilor din cadrul grupurilor de acumulatori sunt extrem de importante pentru asigurarea unei funcționări fiabile pe termen lung iar BMS va asigura și funcția de egalizare și de configurare corespunzătoare a bateriilor înaintea fiecărui ciclu nou (în cazul grupurilor reconfigurabile de acumulatori).

Eficiența bateriilor Li-Ion este puternic influențată de temperatura de funcționare, prin creșterea ratei de degradare și a rezistenței interne. Managementul termic este o problemă în orice sistem alimentat cu baterii, cu atât mai mult în cazul grupurilor de acumulatori, care trebuie să respecte constrângeri suplimentare de reducere la minim a volumului ocupat. Pe lângă monitorizare, este necesar ca BMS să aibă capacitatea de a controla temperatura sistemului în timpul funcționării, deoarece degradarea bateriilor este direct proporțională cu temperatura internă. BMS trebuie să asigure disiparea eficientă a căldurii excesive produsă în timpul încărcării sau descărcării, precum și asigurarea unei răcirii eficiente în cazul operării într-o temperatură ambiantă crescută. Aceasta se poate face activ, prin sisteme de răcire activate când este necesar, dar eficiența totală trebuie luată în calcul în faza de proiectare HW și SW a sistemului.

Ceriința principală a utilizatorilor în ceea ce privește procesul de încărcare este rapiditatea. În practică există un compromis între viteza de încărcare și fiabilitatea pe

termen lung, datorită degradării accelerate a bateriilor cauzată de curenți mari. De asemenea, chimia bateriilor și structura lor internă determină limitările impuse asupra ratei curentului de încărcare și a duratei procesului. Ca urmare, BMS va monitoriza și controla permanent curentul de încărcare ținând cont de chimia bateriilor și de modelul de baterii folosit.

Autorii lucrării [63] descriu de asemenea funcțiile principale ale unui BMS, împărțite pe 3 direcții:

- gestionarea bateriilor pentru menținerea acestora în parametrii normali de funcționare;
- egalizarea sarcinii bateriilor în procesul de încărcare;
- estimarea SOC și SOH pentru obținerea unei eficiențe maxime în funcționare.

În cazul bateriilor Li-Ion, gestionarea activă este obligatorie pentru asigurarea funcționării optime, iar principalele mărimi de intrare ce trebuie monitorizate de către BMS sunt variațiile în timp ale tensiunii la borne, curentului și temperaturii. Alte funcții complementare identificate de autori includ controlul termic al grupului de acumulatori precum și funcții specifice unui BMS implementat într-un vehicul electric.

În lucrare se face o comparație a diverselor tehnici de echilibrare a sarcinii bateriilor existente în literatură, realizând o discuție comparativă cu prezentarea avantajelor și dezavantajelor fiecăreia. Deși echilibrarea pasivă utilizând un rezistor de descărcare este cea mai simplă abordare, atât din punct de vedere al costului cât și al complexității de implementare, are cea mai scăzută eficiență deoarece energia disipată este pierdută. Autorii concluzionează că metodele de echilibrare active de tip modul-la-baterie și distribuit-baterie-la-baterie sunt cele mai potrivite pentru a fi aplicate într-un BMS ce controlează un grup de acumulatori. Pentru aplicarea acestora este necesar un singur convertor DC/DC per modul, lucrarea descriind în detaliu o posibilă implementare într-un sistem proiectat de ei, bazat pe un microcontroler Infineon TriCore TC1797, care controlează 2 module formate din 4 baterii fiecare.

Estimarea SOC se poate face prin mai multe metode, care diferă între ele prin gradul de complexitate pe care îl necesită. Cea mai simplă metodă este considerată a fi Coulomb counting dar este și cea mai imprecisă datorită efectului de acumulare a erorilor în timp. O altă metodă de estimare relativ simplă se bazează pe relația dintre OCV și SOC. În practică aceasta este dificil de aplicat, deoarece necesită ca bateriile componente ale grupului să se afle într-o stare de repaos pentru un timp îndelungat (de la câteva minute la câteva ore) pentru a putea citi cu precizie valoarea tensiunii. O altă problemă este cauzată de curba de descărcare foarte plată în cazul anumitor chimii de baterii, cum ar fi LiFePO_4 . Autorii concluzionează că metodele de estimare bazate pe modele precum filtre Kalman oferă cele mai bune rezultate, dar acestea necesită o modelare foarte precisă a proceselor interne ale bateriilor ce trebuie să țină cont de toate condițiile de funcționare, inclusiv de efectele temperaturii.

Un studiu amplu asupra rolului BMS în cadrul sistemelor de stocare de energie folosite în aplicații conectate la rețeaua de distribuție de energie electrică este prezentat în [64]. Autorii consideră 2 tipuri de chimii pentru grupul de acumulatori: Li-Ion și Vanadiu-redox, identificând aproximativ aceleași cerințe care trebuie îndeplinite de BMS precum articolele prezentate anterior: protejarea bateriilor individuale de efectele degradării capacității, asigurarea unui proces optim de încărcare, controlarea gradientului de temperatură în cadrul grupului precum și echilibrarea bateriilor componente.

Autorii analizează stadiul actual al cercetării în domeniul modelelor de baterii ce pot fi implementate într-un BMS. În cazul bateriilor Li-Ion, se arată că majoritatea

BMS actuale utilizează modele electrice (bazate pe circuitul electric echivalent) sau modele empirice, derivate din datele înregistrate prin rularea unui număr semnificativ de încercări în condiții de laborator. Tehnologia bateriilor redox-flux este insuficient de matură pentru producția și comercializarea la scară largă, deși cercetarea în acest domeniu are o istorie de câteva zeci de ani. Ca urmare, până în prezent nu au fost dezvoltate BMS pentru astfel de baterii care să utilizeze modele mai complexe care să țină cont de structura electrochimică a acestor baterii. Modelele empirice raportate în literatură nu reușesc să surprindă mecanismele fizice din interiorul bateriilor, cum ar fi coroziunea electrozilor în timp sau reacțiile secundare ce duc la evoluția inegală a concentrațiilor de oxigen și hidrogen. Pe de altă parte, modelele analitice bazate pe procesele fizico-chimice din interiorul bateriilor, cum ar fi modelul pseudo-2-D ce încorporează mecanismele termice ale degradării bateriilor Li-Ion, se dovedesc a fi prea complexe pentru a putea fi implementate într-un sistem BMS ce funcționează în timp real. Autorii propun câteva soluții întâlnite în literatură pentru reducerea complexității modelelor avansate, bazate pe principiul reformulării modelelor. Necesitatea implementării acestor tehnici este dată de capacitatea modelelor fizico-chimice de a reflecta starea internă a bateriilor mult mai precis decât o pot face modelele empirice.

În articol se trece în revistă o serie de modele avansate pentru ambele tehnologii de baterii, ce pot fi aplicate în BMS. De asemenea, se efectuează un studiu de caz ce cuprinde mai mulți algoritmi de management pentru un sistem de stocare de energie conectat la panouri fotovoltaice. Prin impunerea unei constrângeri asupra ratei de creștere a stratului de electrolit solid în fiecare ciclu de utilizare, se poate cuantifica cu cât s-a redus degradarea pe toată durata de funcționare și implicit cu cât a crescut numărul de cicluri utile și energia totală furnizabilă a sistemului. Autorii analizează diferența de energie totală utilizabilă câștigată prin reducerea nesemnificativă a procentului de încărcare în fiecare ciclu, constatând că, în cazul optim, o reducere a capacității încărcate per ciclu cu 0.42% duce la o creștere a duratei de funcționare a sistemului cu 11.1%.

Aceste rezultate demonstrează că reformularea modelelor fizico-chimice permite simularea eficientă în timp real a funcționării unui sistem de stocare de energie format din baterii Li-Ion sau Vanadiu-redox. Concluzia principală a studiului de caz menționat arată nevoia de modelare precisă a SOC și SOH pentru BMS ce controlează grupuri formate dintr-un număr mare de acumulatori. Deși modelarea precisă a bateriilor de tip redox-flux nu este la fel de avansată ca în cazul bateriilor Li-Ion, tehnica prezentată de reformulare a modelelor promite posibilitatea utilizării acestor tipuri de baterii în sisteme de stocare de energie de mari dimensiuni.

Un alt studiu asupra cercetării și proiectării BMS, dar orientat pe aplicațiile din domeniul autovehiculelor electrice este [65]. Autorii prezintă la început rolul unui BMS și funcțiile principale ale acestuia: prevenirea deteriorării ireversibile a bateriilor individuale și a grupului și menținerea bateriilor în intervalele optime de tensiune și temperatură pentru îndeplinirea cerințelor specifice ale autovehiculului. O altă funcție importantă este stocarea și prelucrarea datelor atât la nivelul bateriilor individuale cât și la nivel de sistem.

Mai departe autorii identifică și clasifică cele mai importante probleme întâlnite în implementările BMS actuale din autovehicule: măsurarea cu precizie a tensiunii bateriilor, estimarea stării bateriilor, egalizarea bateriilor în funcționare și identificarea defectelor. Măsurarea cu precizie a tensiunii bateriilor individuale este îngreunată atât de variația neliniară a OCV față de SOC (cazul bateriilor de tip LFP prezintă probleme mari în acest sens) cât și de numărul mare de baterii și modul de conectare în module. Starea de funcționare a grupului de acumulatori (SOF) este

determinată de SOC, SOH și eventualele defecte apărute. Se prezintă exhaustiv stadiul actual al cercetării în domeniile de estimare SOC, SOH și diagnosticare a defectelor și se efectuează o analiză comparativă a performanțelor metodelor existente. Gradul de uniformizare este influențat în principal de către distribuția valorilor tensiunii (implicit a SOC) și a temperaturii bateriilor componente ale grupului. Pentru a contracara diferențele de capacitate și creșterea lor în timp, trebuie aplicate metode de egalizare care pot fi chimice sau fizice. Dintre acestea, doar metodele fizice de egalizare pot fi aplicate în practică în cadrul BMS și presupun disiparea sau completarea sarcinii disponibile.

Autorii concluzionează că există 3 domenii de cercetare ce trebuie aprofundate pentru construcția BMS viitoare: performanța bateriilor, îmbunătățirea modelelor de baterii și aplicarea algorimilor de control adaptivi.

În [66] autorii propun un nou tip de BMS bazat pe redundanță: în orice moment de funcționare, una din cele n baterii ale grupului este deconectată de la sarcină. Topologia grupului de baterii considerat este slab reconfigurabilă, cu 2 comutatoare per baterie, permițând conectarea sau deconectarea fiecărei baterii de la sarcină, iar bateriile sunt conectate în serie, formând un șir de maxim 10 baterii. De aceea, soluția propusă se pretează doar la aplicații ce necesită o putere maximă de până la 500W, cum ar fi bicicletele sau trotinetele electrice.

Un prototip format din 7 baterii Li-Ion și tranzistoare MOSFET pe post de comutatoare a fost implementat în vederea validării ideilor propuse și analizei performanțelor. Autorii detaliază arhitectura, deciziile de proiectare și caracteristicile principalelor componente ale BMS-ului: blocul de achiziții de date, rețeaua de comutatoare și microcontrolerul.

Algoritmii de funcționare al BMS propus este relativ simplu și are ca scop echilibrarea tensiunii și/sau a SOC a fiecărei baterii. În pasul 1 se calculează media tensiunii și a SOC pe toate celulele precum și diferențele individuale față de medii, pe parcursul unui interval de timp programabil. Mai departe, bateria cu deviația maximă este selectată pentru deconectare iar în locul acesteia este reconectată bateria care a fost deconectată în intervalul precedent, algoritmul continuând apoi să ruleze în buclă de la pasul 1. Valoarea SOC este estimată utilizând o combinație între măsurarea fluxului de sarcină (Coulomb counting) și un model de corecție în buclă închisă a rezultatului, bazat pe relația OCV-SOC și măsurătoarea curentă a tensiunii pe fiecare baterie. Eficiența algoritmului propus este măsurată prin diferența medie a SOC individual raportată la SOC mediu al grupului, denumită factor de calitate. Experimentele efectuate demonstrează că factorul de calitate este dependent atât de numărul de baterii cât și de valoarea perioadei de actualizare a configurației grupului.

Avantajele sistemului propus sunt simplitatea de implementare, costul redus deoarece nu se folosesc convertoare DC/DC sau alte componente avansate și fiabilitatea (o baterie care a ieșit din parametrii normali de funcționare poate fi lăsată permanent deconectată de către BMS). Totuși soluția propusă are și anumite dezavantaje, cele mai importante fiind aplicabilitatea redusă datorită numărului mic de baterii ce se pot înșirui (maxim 10), precum și scalabilitatea limitată de curentul maxim ce este suportat de comutatoarele implementate cu tranzistoare MOSFET.

2.5.2. Arhitecturi BMS

În aplicațiile critice de stocare de energie referite în această lucrare se folosesc grupuri de acumulatori formate din 1k – 100k+ baterii individuale. Cel mai comun mod de conectare a bateriilor în cadrul grupului este topologia statică, formată din m baterii conectate în paralel, pentru a suporta capacitatea necesară sarcinii, iar aceste

n module sunt conectate apoi în serie pentru adaptarea la tensiunea sarcinii. Un exemplu practic în acest sens este oferit de grupul de acumulatori al autovehiculului electric Tesla Model S, care are o configurație 96S74P – 96 module conectate în serie, un modul având 74 baterii legate în paralel [67]. În această secțiune vor fi prezentate câteva modele reprezentative de arhitecturi de organizare a BMS-ului și a bateriilor aferente și se vor analiza avantajele și dezavantajele soluțiilor propuse.

Una din cele mai răspândite arhitecturi de organizare a BMS-ului pentru grupuri mari de baterii este cea ierarhică. Grupul este astfel împărțit logic și fizic în sub-grupuri, module și baterii individuale. Această organizare a matricei de baterii conduce în mod natural la o organizare ierarhică a BMS-ului asociat, pentru a permite o gestionare mai controlabilă a proceselor de încărcare/descărcare dar și în vederea reducerii costurilor asociate, conform [68] și [69]. O reprezentare schematică a acestui concept BMS este prezentată în Fig. 2-3.

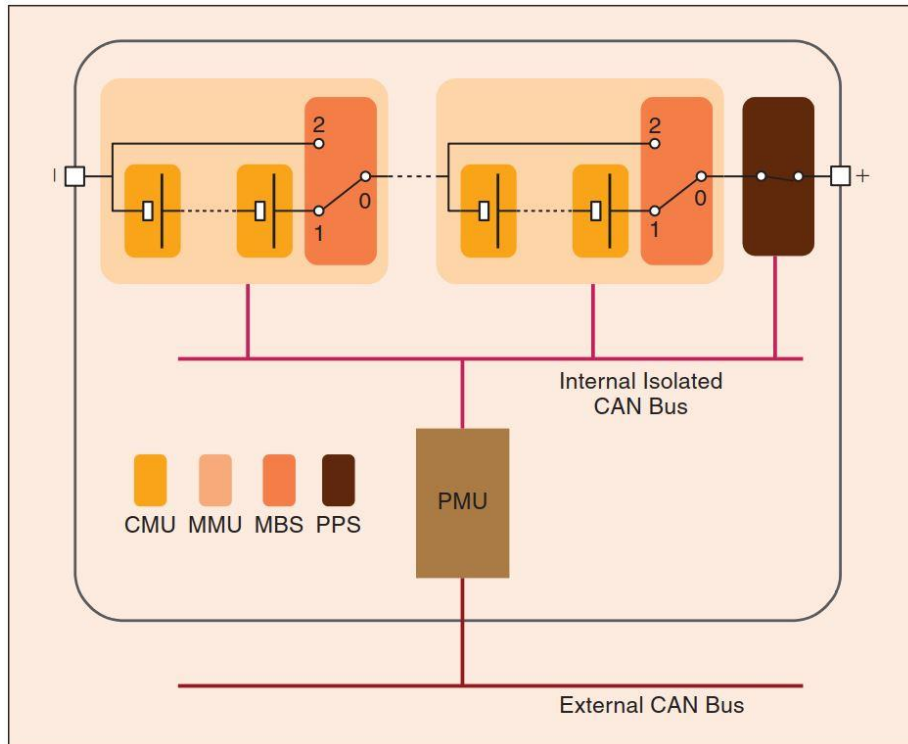


Fig. 2-3 Exemplu de arhitectură ierarhică a unui BMS [69]

Nivelul bază este cel al bateriei individuale, aceasta fiind controlată de Cell Management Unit (CMU). La acest nivel se pot realiza funcțiile primare de monitorizare și control ale BMS-ului, spre exemplu funcția de măsurare a tensiunii, curentului și a temperaturii. Este interesant de remarcat că bateria individuală conectată în serie poate abstractiza și un grup de baterii legate în paralel, acesta comportându-se identic în circuit, din punct de vedere al tensiunii la borne. La nivelul următor se află Module Management Unit (MMU), care gestionează un modul logic (șir) de baterii, iar numărul acestora depinde de caracteristicile aplicației. Funcțiile îndeplinite de MMU depind de datele achiziționate de la fiecare CMU subordonat,

oferind mai departe informații agregate și sintetizate, cum ar SOH general al modulului. Într-un sistem de mari dimensiuni, comunicația între modulele CMU, MMU și Pack Management Unit (PMU) trebuie să fie rapidă și fiabilă. În acest sens, în schema prezentată în figura anterioară se folosește magistrala Controller Area Network (CAN), standardul de facto pentru comunicația între numeroasele module Electronic Control Unit (ECU) în autovehicule.

Scalabilitatea, flexibilitatea și toleranța la defecte sunt avantajele principale ale arhitecturii de tip ierarhic prezentate. Spre exemplu, nivelul de CMU se poate omite complet pentru aplicațiile unde costul și eficiența descărcării bateriilor sunt cerințe prioritare, sau în alte cazuri se poate replica CMU sau MMU, atunci când aplicația necesită fiabilitate extinsă și toleranță la defecte. De asemenea, fiecare MMU integrează și un comutator bidirecțional, oferind posibilitatea de a reconfigura grupul de acumulatori prin șuntarea selectivă a unor module. În concluzie, posibilitățile de adaptare la sarcină sunt limitate, deoarece bateriile individuale cu CMU aferente nu se pot deconecta selectiv.

Autorii studiului [67] efectuează o analiză a arhitecturilor de BMS pentru grupuri reconfigurabile de acumulatori existente în literatură. Aceștia propun o clasificare a sistemelor actuale după 2 axe: topologia de organizare a bateriilor în grup, care poate fi statică sau reconfigurabilă, respectiv organizarea centralizată sau distribuită a structurii BMS. Fig. 2-4 prezintă cele 4 variante posibile de arhitecturi prin aplicarea acestei clasificări, fiecare având o reprezentare schematică a modulelor de monitorizare și control ale BMS în raport cu grupul de baterii.

Una din concluziile studiului amintit este că majoritatea articolelor din domeniul arhitecturilor sistemelor de management al bateriilor consideră un grup de acumulatori cu o topologie de conectare statică și un BMS centralizat, aceasta fiind starea actuală a cercetării în domeniu. În acest caz, BMS este format din mai multe module Sensing and Balancing Module (SBM), unul per celulă în cazul cel mai complex, care sunt controlate și coordonate de modulul PMU central. Modulul SBM monitorizează în mod continuu tensiunea la bornele bateriei și temperatura acesteia, însă procesarea acestui flux de date se realizează într-o manieră sincronizată și centralizată la nivelul PMU.

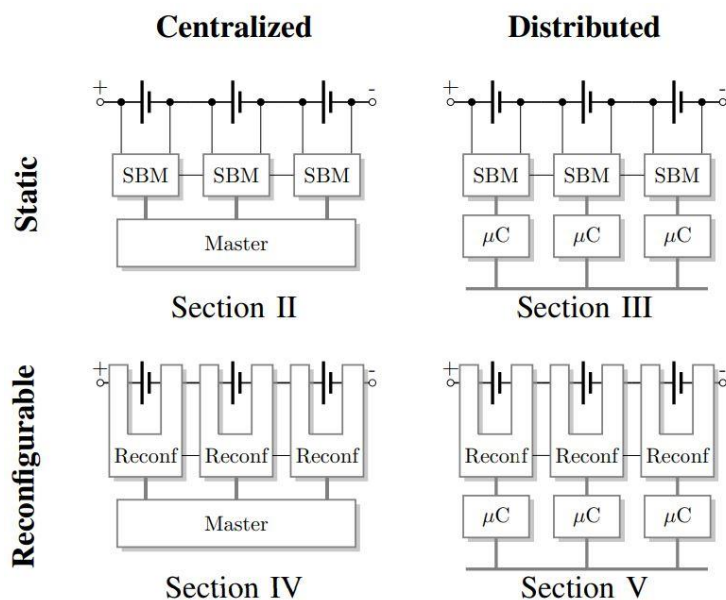


Fig. 2-4 Clasificarea arhitecturilor de management a bateriilor [67]

Principala problemă a arhitecturii centralizate este scalabilitatea, atât din punct de vedere hardware cât și software. Limitarea este dată de capacitatea PMU de a achiziționa și a procesa eficient datele de la toate celulele din grup, pe măsură ce grupul de acumulatori crește în complexitate. Ca urmare, un BMS de tip static-centralizat trebuie dimensionat foarte bine pentru aplicația în care va fi instalat. Funcția de echilibrare a bateriilor se realizează pasiv în majoritatea implementărilor, utilizând un rezistor pentru disiparea sarcinii în exces.

În cazul arhitecturii de tip static-distribuit, fiecare celulă conține un microcontroler pentru comandă și control local, care împreună cu SBM formează un CMU. Funcțiile la nivel de grup (estimare SOC și SOH general) sunt realizate colaborativ, utilizând un canal de comunicație dedicat. Avantajele acestei organizări de "celule inteligente" sunt scalabilitatea și toleranța la defecte. Pentru o funcționare optimă, algoritmi de estimare și de control al stării grupului de baterii trebuie adaptați pentru modul de lucru distribuit. Aceasta pune probleme comunicației între celule: dacă se folosește o magistrală, mesajele locale între baterii adiacente vor ocupa magistrala într-un mod ineficient; pe de altă parte, în cazul alegerii unui sistem daisy chaining, timpul de propagare în rețea a mesajelor de tip broadcast este în general mare, proporțional cu numărul modulelor conectate în rețeaua de tip daisy chain. Deoarece fiecare baterie conține propriul sistem de comandă și control, echilibrarea activă devine fezabilă cu această arhitectură, realizând transferul de sarcină între celule adiacente și obținând astfel o eficiență mai mare decât în cazul echilibrării pasive.

Arhitectura de tip centralizat-reconfigurabil permite aranjarea bateriilor din grup în configurații arbitrare serie-paralel. Topologia de tip DESA [55] cu 3 comutatoare per baterie este folosită în lucrare ca exemplu de grup reconfigurabil. Avantajele și dezavantajele cunoscute ale conectării bateriilor serie-paralel sau paralel-serie sunt discutate în lucrare, împreună cu enunțarea câtorva principii de minimizare a degradării SOH în aplicații bazate pe sisteme de stocare de energie.

Printre dezavantajele identificate se numără complexitatea mare, dată de numărul de comutatoare per celulă, precum și viteza de comutare și pierderile ohmice de putere per comutator. Astfel, deși comutatoarele electronice au un timp de comutare mult mai mic comparativ cu relele electromagnetice, rezistența electrică relativ mare a comutatorului închis rămâne o problemă nerezolvată.

Arhitectura distribuit-reconfigurabilă este văzută ca o soluție optimă ce îmbină avantajele topologiei reconfigurabile combinată cu bateriile inteligente ce implementează CMU și interfețele de comunicație pentru un management distribuit. Principalul avantaj al acestei arhitecturi este simplificarea mecanismului de control al comutatoarelor de reconfigurare, deoarece fiecare baterie își va reconfigura local conexiunile cu bateriile adiacente, spre deosebire de BMS centralizat, în care sute sau mii de semnale de control (în funcție de mărimea grupului de baterii) trebuie generate de un singur controler. De asemenea, fiecare baterie se poate deconecta în mod automat și autonom, la atingerea tensiunii de oprire prestabilite, simplificând astfel procesul de echilibrare.

Printre problemele încă nerezolvate, autorii enumeră: implementarea cu succes a algoritmilor de reconfigurare într-un BMS distribuit, respectiv creșterea consumului de energie la nivelul fiecărei baterii componente, deoarece electronica de control a comutatoarelor este distribuită și replicată pentru fiecare baterie inteligentă.

3. METODĂ PENTRU MINIMIZAREA DEGRADĂRII BATERIILOR

3.1. Uniformizarea degradării la memoriile Flash

În capitolul anterior am trecut în revistă cele mai relevante abordări din domeniul grupurilor reconfigurabile de acumulatori, care tratează în particular problema reducerii degradării duratei de viață a bateriilor și am prezentat avantajele și dezavantajele acestora.

În cele ce urmează voi descrie o nouă metodă pentru minimizarea degradării bateriilor Li-Ion, care se bazează pe următoarele principii:

- analogia dintre grupurile de acumulatori și matricea de blocuri dintr-o memorie flash, care prezintă aceeași problemă fundamentală a duratei de utilizare limitată, necesitând astfel un sistem de management activ pentru a maximiza eficiența utilizării acestora;
- alegerea și utilizarea unei topologii reconfigurabile pentru grupul de acumulatori studiat, care permite adaptarea numărului de baterii și a configurației grupului la cerințele de putere și de energie ale sarcinii;

În prima parte va fi prezentat stadiul actual al cercetării în cazul uniformizării degradării la memoriile flash, principalele caracteristici de funcționare ale controlerelor precum și cei mai importanți algoritmi de wear leveling. A doua parte detaliază analogia grup de acumulatori-memorie flash, descrie principiile noii metode propuse și motivează alegerea topologiei de acumulatori reconfigurabili.

Creșterea semnificativă a pieței electronice de larg consum a determinat o creștere proporțională a pieței memoriilor flash de tip NAND. Cele mai cunoscute produse actuale care încorporează memorii flash sunt discurile solid-state (SSD), cardurile SD și cardurile eMMC [70].

Memoriile flash prezintă o viteză superioară, imunitate la șocuri mecanice și consum redus comparativ cu mediile de stocare magnetice, dar au de asemenea și câteva dezavantaje, datorită structurii și limitărilor fizice specifice acestora. Trebuie observat aici că o matrice de celule de memorie flash nu poate fi folosită direct ca un dispozitiv de stocare, din cauza proprietății de scriere unică a celulelor, ce nu permite rescrierea până când celula respectivă este ștearsă.

Un circuit de memorie flash este compus din mai multe plane, ce pot fi accesate în paralel de către controler. Fiecare plan este compus dintr-un număr prestabilit de blocuri, care sunt unitățile indivizibile pentru operațiile de ștergere. Fiecare bloc este compus dintr-un număr fix de pagini (uzual, între 32 și 256), care sunt unitățile indivizibile pentru operațiile de scriere sau programare. În general, o operațiune de ștergere a unui bloc durează cu un ordin de mărime mai mult decât operațiunea de scriere a unei pagini. La nivel fizic, informația este reținută în și citită din celula de memorie flash prin diferențierea între mai multe niveluri de tensiune. Memoriile cu celule de tip SLC (single level cell) stochează doar 1 bit de informație prin diferențierea între 2 niveluri de tensiune. Celulele de tip MLC (multi level cell) rețin 2 sau mai mulți biți prin diferențierea între 4 sau mai multe nivele de tensiune. Memoriile MLC sunt preferate tot mai mult în defavoarea memoriilor SLC datorită densității de date superioară, care se traduce în costuri mult reduse. Dezavantajul

acestora este că necesită un management mult mai complex pentru a putea îndeplini criteriile de performanță ale aplicației în care sunt integrate.

O particularitate a memoriilor flash față de harddiskuri, în ceea ce privește utilizarea acestora ca medii de stocare, este modulul software numit nivel de translatare flash (FTL). Acesta este un modul software intermediar care face legătura între sistemele de fișiere convenționale și matricea de blocuri Flash, conform Fig. 3-1. Necesitatea FTL este dată de caracteristicile specifice memoriilor Flash:

- ștergerea și scrierea sunt asimetrice din punctul de vedere al duratei, de aceea ștergerile nu se pot executa de regulă în timp real, trebuind planificate de către FTL și controler.
- scrierea este unică într-un ciclu; o celulă care a fost scrisă nu mai poate fi rescrisă până când nu se execută o operațiune de ștergere pe blocul respectiv. FTL trebuie să aloce noi pagini pentru a actualiza un fișier existent, iar paginile scrise deja sunt marcate ca invalide. Pentru recuperarea acestui spațiu FTL implementează funcționalitatea de *garbage collection*;
- numărul maxim de cicluri de ștergere și scriere al unui bloc este limitat (5000-10000 în cazul ultimelor tehnologii flash MLC și 3D, conform [70]), de aceea FTL trebuie să asigure o alocare cât mai uniformă a tuturor blocurilor, pentru a extinde durata de viață; această funcționalitate a FTL se numește *wear leveling*.

Una din funcțiile de bază ale FTL este asigurarea translatării între adrese logice (utilizate de către sistemele de fișiere) și adresele fizice ale blocurilor sau ale paginilor (utilizate de driverul de acces la matricea de memorie). Putem vorbi astfel de FTL cu mapare de pagini (*page-mapped FTL*) sau de FTL cu mapare de blocuri (*block-mapped FTL*). Deoarece în general numărul de pagini este semnificativ mai mare decât numărul de blocuri, FTL cu mapare de pagini necesită mult mai multă memorie pentru funcționare. De aceea, FTL cu mapare de blocuri sunt cele mai răspândite în practică. Adresa logică LBA provenită de la sistemul de fișiere are 2 componente: numărul blocului logic și deplasamentul paginii. Pentru accesul la matricea de memorie, numărul blocului logic este convertit în numărul blocului fizic prin tabela de mapare, iar pagina fizică este accesată prin adăugarea deplasamentului la adresa blocului fizic.

Pentru a putea utiliza memoriile flash cu succes ca dispozitive de stocare de date, este necesar ca FTL să asigure o interfață standard cu sistemele de fișiere și să gestioneze și să emuleze cât mai eficient funcționalitățile principale ale acestora: citirea, scrierea și actualizarea datelor. Obținerea unor performanțe ridicate (la momentul actual, mult superioare harddiskurilor) implică diferențierea mai multor tipuri de blocuri:

- blocuri de date: sunt blocuri care conțin date scrise anterior; dacă datele conținute sunt mapate la adrese logice (deci accesibile de către sistemul de fișiere), se numesc blocuri valide; dacă datele conținute au fost actualizate și stocate în alte blocuri, atunci acestea nu mai sunt mapate la adrese logice și au fost marcate ca blocuri invalide.
- blocuri jurnal: sunt blocuri care conțin date valide, alocate în momentul scrierii de date actualizate ca urmare a imposibilității memoriei flash de a suprascrive blocurile de date menționate mai sus, până la proxima ștergere a acestora.
- blocuri libere: sunt blocuri care au fost șterse anterior, nu conțin date și nu au mapare la adrese logice; reprezintă spațiul disponibil din care FTL alocă blocuri de date sau blocuri jurnal, la nevoie.

Blocurile și datele conținute de acestea se pot clasifica și în funcție de frecvența cu care au fost accesate pentru scriere, în blocuri și date dinamice, respectiv blocuri și date statice. Datorită localității temporale și spațiale a tiparelor de acces la memorie, blocurile jurnal pot fi clasificate în general ca blocuri dinamice, deoarece statistic se constată o probabilitate mai mare de a fi suprascrise în viitorul apropiat. Pe de altă parte, blocurile de date valide au o mai mică probabilitate de suprascriere, ca urmare pot fi considerate blocuri statice.

Procesul de garbage collection constă în mai mulți pași. În primul pas, se vor căuta unul sau mai multe blocuri care conțin pagini invalide (blocuri victimă). Paginile care sunt încă valide din aceste blocuri sunt copiate în alte blocuri, pentru a putea șterge blocurile victimă și a le face disponibile pentru scrieri ulterioare. În final, maparea adreselor logice la adresele fizice trebuie actualizată, ca urmare a mutării paginilor valide din blocurile victimă. Datorită operației de ștergere, garbage collection este un proces consumator de timp și care poate afecta serios performanța memoriilor flash. De aceea, momentul declanșării procesului este critic și este studiat intens în literatură [72]-[81].

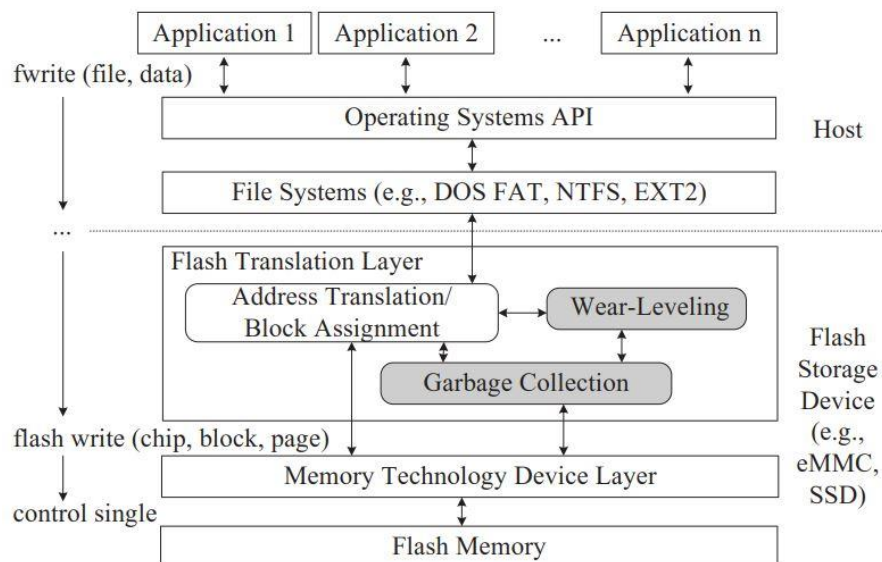


Fig. 3-1 Schema bloc a sistemelor de stocare Flash [70]

Există 2 tipuri de wear leveling:

- **dinamic:** numai datele dinamice (des accesate) sunt folosite pentru uniformizare, lăsând procentul de date rar accesate neatins. Este o metodă simplă dar nu este optimă, iar durata de viață a SSD-ului este invers proporțională cu procentul de date statice.
- **static:** acționează asupra întregului conținut al SSD-ului. Este o metodă mai complexă, care implică mutarea datelor statice, dar are marele avantaj că permite uniformizarea degradării pe toată memoria flash.

Procesul de wear leveling este activat de obicei de către modulul de garbage collection și consta în principal din următorii pași:

- evaluarea îndeplinirii *condiției de declanșare* (de exemplu, blocurile care urmează a fi șterse au depășit pragul permis de ștergeri);
- selecția blocurilor care conțin date statice și/sau prezintă un număr mic de ștergeri (blocurile victimă);
- mutarea datelor statice din blocurile victimă în blocurile șterse; astfel se realizează *efectul de uniformizare a degradării*: blocurile vechi sunt populate cu date cât mai statice, iar blocurile încă noi au probabilitate mare de a fi folosite în viitor, conținând acum date dinamice;
- actualizarea tabelului de mapare între adresele logice și fizice.

Primele strategii de uniformizare a scrierilor la memoriile flash utilizau un algoritm empiric prin care se alocă blocuri libere care au un număr mic de scrieri, pentru stocarea datelor dinamice [71]. Se obține astfel un efect indirect de wear leveling prin evitarea utilizării blocurilor de memorie care au fost rescrise mai frecvent, atunci când trebuie stocate date noi sau când trebuie actualizate date existente. Problema acestui algoritm simplu apare din cauza distribuției statistice a datelor într-un dispozitiv de stocare flash: în medie, doar 25% din capacitatea memoriei este ocupată cu date dinamice. Astfel, blocurile cu date statice (care sunt majoritare) nu vor fi considerate pentru reciclare, aceasta conducând la creșterea frecvenței de ștergere și de rescriere a blocurilor accesate mai des, reducând mult din eficiența teoretică pe care o pot atinge algoritmi de wear leveling dinamic. În literatură au fost propuși mai mulți algoritmi de tipul wear leveling static, iar în cele ce urmează vor fi prezentate câteva exemple notabile.

În [72] este propus un algoritm bazat pe principiul hot-cold swapping, care presupune schimbarea periodică a datelor dinamice din blocuri degradate cu date statice din blocuri noi, dacă numărul de cicluri de scriere/ștergere ale celor 2 blocuri este mai mare de un prag prestabilit. Prima diferență față de algoritmul clasic este că nu se realizează schimbul complet de blocuri, ci doar se mută datele statice în blocuri mai degradate, reducând astfel numărul de scrieri și crescând performanța.

Pentru a reduce memoria necesară păstrării contoarelor de scriere/ștergere pentru fiecare bloc, autorii propun asocierea logică a unui număr prestabilit și fix de blocuri, adiacente din punct de vedere logic, în grupuri, memorând doar un sumar al caracteristicilor blocurilor componente. Utilizarea mediei contoarelor de ștergeri ale blocurilor ca indicator sumar este cea mai simplă abordare, dar autorii arată că există și unele dezavantaje: dacă mai multe blocuri sunt schimbate cu blocuri degradate, media poate crește suficient de mult încât să împiedice selectarea pe viitor a grupului și implicit a blocurilor componente mult mai puțin degradate, reducând eficiența metodei. Pentru a combate acest efect negativ, autorii propun doi indicatori ai numărului de ștergeri: o medie totală și o medie parțială. Media totală este calculată pe toate blocurile, cum s-a descris mai sus, dar media parțială se calculează doar pe blocurile care nu au fost încă schimbate. Condiția de inițiere a schimbului de blocuri se transformă în compararea diferenței dintre media parțială și contorul de ștergeri al noului bloc jurnal cu un prag. Avantajul adus de această metodă este că grupul care are cea mai mică medie parțială este cel mai probabil să conțină blocurile cele mai puțin degradate, deoarece această medie se calculează doar pe blocuri care nu au fost încă schimbate (deci șterse și suprascrise). Mai departe, algoritmul continuă cu găsirea blocului ce va fi șters (blocul victimă), mutarea datelor în blocul mai puțin degradat (selectat deja de FTL) și în sfârșit copierea datelor noi în blocul victimă urmată de recalcularea mediilor parțiale și totale.

Evaluarea performanțelor algoritmului propus a fost realizată de autori prin simularea mai multor scenarii de utilizare, cum ar fi salvarea de poze, filme sau muzică pe dispozitivul de stocare. Se compară performanțele cu mai mulți algoritmi existenți, simulați în aceleași condiții: algoritmul de alocare aleatoare implementat în JFFS2, algoritmul K-Leveling și alocarea liniară (fără wear leveling). Rezultatele obținute arată că algoritmul K-Leveling este cel mai performant, deoarece obține cele mai mici valori ale deviației standard a numărului de ștergeri. Totuși, performanța algoritmului propus este doar puțin mai mică și se datorează granularității cu care blocurile sunt aranjate în grupuri. Analizând spațiul de memorie necesar, algoritmul propus este semnificativ mai performant decât toate celelalte metode, consumând doar 8.75% din spațiul necesitat de K-Leveling.

Un dezavantaj al metodei propuse este că blocul cel mai degradat poate fi selectat succesiv pentru schimbarea datelor, crescând artificial contorul de ștergeri și grăbindu-i degradarea. Alegerea mărimii grupului este o altă problemă deschisă, deoarece în practică aplicațiile pot avea tipare de acces diferite față de cele testate, putând scădea performanța teoretică.

Algoritmul clasic de wear leveling static (SWL) a fost propus în [76] și este adoptat de mai mulți producători de memorii Flash [79]. La început sunt trecute în revistă trei implementări ale FTL întâlnite în practică, ce servesc mai departe ca platforme peste care sunt simulați mai mulți algoritmi de wear leveling, pentru comparație. Cele 3 platforme implementează FTL la nivel de pagină, la nivel de bloc precum și un FTL simplificat la nivel de bloc, utilizat cu precădere în dispozitive mai puțin performante cum ar fi memoriile portabile flash pe USB. Autorii motivează importanța aplicării wear leveling prin calculul duratei de funcționare maxime a unei memorii flash de 256MB în care un fișier de 16MB este scris încontinuu la o viteză de 0,1 MB/s. În cazul neaplicării wear leveling, memoria se va deteriora după 0,09 zile, dacă se aplică DWL va funcționa pentru 177,77 zile (considerând un procent de date dinamice de 18% din capacitatea totală), iar dacă se aplică SWL, memoria va putea funcționa pentru 987,65 zile.

Algoritmul propus încearcă să mute datele statice din blocurile mai puțin degradate, urmând ca modulul garbage collector să selecteze aceste blocuri pentru ștergere în pașii următori. Algoritmul folosește memoria eficient, deoarece are un tabel de ștergere a blocurilor (BET) care mapează 1 bit la 2^k blocuri (k poate lua valorile 0, 1 sau 2), pentru a păstra informația că grupul de blocuri respectiv a fost șters sau nu. Procedura de SWL este declanșată când raportul dintre contorul de ștergeri total și contorul de biți din BET este mai mare de un prag T (nivelul de uniformizare). Dacă este adevărată condiția, se verifică dacă BET este plin iar dacă da, se resetează contoarele menționate. Mai departe se identifică printr-o căutare liniară primul grup de blocuri neșters din BET și se apelează garbage collector pentru a șterge respectivul grup de blocuri, mutând apoi noile date dinamice în vechile blocuri care conțineau (cu o anumită probabilitate) blocuri cu date statice.

Se analizează impactul asupra performanței prin alegerea de valori diferite pentru pragul T precum și pentru numărul de blocuri alocate unui bit din BET. Prin simularea unor scenarii de acces bazate pe o matrice de memorie MLC de 1GB, autorii compară algoritmul propus cu un algoritm patentat de wear leveling static, dar și cu varianta de DWL. Criteriile de evaluare alese sunt fiabilitatea în timp și numărul suplimentar de ștergeri necesar. Rezultatele obținute confirmă viabilitatea metodei propuse, deoarece aceasta este cu aprox. 25% mai performantă decât algoritmul patentat în ceea ce privește fiabilitatea (durata de timp până la primul bloc defect). Cu toate acestea, metoda propusă nu atinge o degradare distribuită uniform, deoarece

este susceptibil la mutarea datelor statice între aceleași blocuri, în lipsa unor verificări suplimentare.

Dezavantajul mapării a k blocuri la un bit din BET este că blocurile conținând date statice nu mai pot fi identificate dacă grupul din care fac parte a fost marcat ca șters în BET, aceasta ducând la scăderea performanței pe măsură ce numărul k crește. Pentru ameliorarea problemei, în [80] a fost propus algoritmul HaWL (Hidden Cold Block-aware Wear Leveling), care calculează media și deviația numărului de pagini invalide din grup, identificând blocurile statice cu o mai mare acuratețe. Aceste mărimi sunt salvate în paginile speciale de rezervă ale fiecărui bloc, deci nu impun cerințe de memorie suplimentare. Rezultatele obținute prin compararea cu algoritmul clasic de SWL arată o reducere cu 81% a deviației standard a numărului de ștergeri (deci o îmbunătățire semnificativă a uniformității), precum și o creștere a duratei de funcționare a memoriei flash cu până la 49%.

Algoritmul descris anterior nu identifică precis blocurile statice în toate cazurile, de exemplu atunci când blocurile statice conțin mai multe pagini invalide decât blocurile dinamice. Pentru a încerca rezolvarea acestei probleme, în [81] a fost propusă o nouă variantă a algoritmului de wear leveling static numită RRWL. Autorii adaugă la tabela BET introdusă în algoritmul de SWL, încă 2 indecși, RR_{index} și G_{addr} , ambii având valori cuprinse între 0 și $2^k - 1$, pentru a identifica în mod unic fiecare bloc din grupul de 2^k . RR_{index} este incrementat la fiecare iterație de garbage collection într-un mod round robin iar G_{addr} este adresa logică a blocului în cadrul grupului. Prin aceste modificări, maparea blocurilor se transformă practic în modul 1-la-1 și elimină problema blocurilor ascunse. Experimentele bazate pe simulări ale autorilor demonstrează că RRWL obține o creștere a duratei de utilizare a memoriei flash de 47% comparativ cu SWL și de 14% comparativ cu HaWL.

Un alt principiu întâlnit la mai multe articole în literatură este "migrarea datelor statice", care constă în mutarea datelor statice în blocuri degradate excesiv, pentru a stopa utilizarea acestora în continuare. În [74] și [75], autorii propun algoritmul dual-pool bazat pe acest principiu. În prima fază, datele statice sunt migrate către blocurile degradate, apoi blocurile care tocmai au fost utilizate pentru migrarea datelor sunt protejate de o nouă ștergere pentru o perioadă de timp. Blocurile sunt organizate logic în 2 cozi: coada statică și cea dinamică, iar ordinea de prioritate în cadrul cozilor este dată de numărul de ștergeri. Procesul este declanșat de îndeplinirea condiției:

$$EC(H^+(Q_{HP}^{EC})) - EC(H^-(Q_{CP}^{EC})) > TH \quad (3-1)$$

unde $H^+(x)$ este maximul, $H^-(x)$ este minimul număr de ștergeri din coada x iar TH este un prag prestabilit. Toate datele valide din $H^+(x)$ sunt mutate într-un bloc liber, după care blocul $H^+(x)$ este șters. Apoi datele valide din $H^-(x)$ sunt copiate în $H^+(x)$ după care blocul $H^-(x)$ este șters. În final, cele 2 blocuri sunt schimbate între ele în cozile din care fac parte. Rezultatul este că blocul $H^+(x)$ va fi pe ultima poziție în coada statică iar blocul $H^-(x)$ va fi de asemenea pe ultima poziție în coada dinamică, astfel că vor fi protejate de procesul de ștergere până vor ajunge din nou în capul cozilor respective și vor fi din nou selectate de algoritm. Pentru a preveni fenomenul în care unele blocuri vor ajunge să nu mai fie selectate niciodată, din cauza schimbării tiparului de acces la date (unele date dinamice putând deveni statice și viceversa), autorii definesc încă 2 procese de ajustare a cozii dinamice, respectiv statice.

Autorii din [77] propun calcularea duratei de viață rămasă pentru toate blocurile precum și a duratei medii de viață rămasă, cu scopul de a menține sub un prag acceptabil, variația acestui indicator față de medie. Algoritmul este declanșat de către garbage collection, după ștergerea unui bloc selectat pentru reciclare. În loc să fie adăugat în lista de blocuri libere, iar procesul poate fi sumarizat în următorii pași:

- se verifică durata de viață rămasă a blocului selectat pentru ștergere; dacă este mai mică decât *pragul de retragere* (de exemplu, 85% din medie), datele statice dintr-un alt bloc sunt migrate în acesta iar blocul sursă al datelor statice este șters și adăugat în lista de blocuri libere. Blocurile sunt adăugate în lista de blocuri sursă în funcție de durata de viață rămasă sau de recența cu care au fost șterse;
- dacă durata de viață este sub pragul de variație acceptat, atunci blocul este protejat de ștergeri ulterioare cu o probabilitate invers proporțională cu durata de viață rămasă.

În [78] și [79] autorii realizează un studiu cuprinzător asupra algoritmilor existenți de wear leveling și propun un nou algoritm care se dovedește mai eficient din punctul de vedere al resurselor de RAM utilizate și al performanței, numit Lazy wear leveling (LWL). De asemenea, se propune o variantă și pentru memoriile flash multi-canal. Articolul motivează necesitatea unui nou algoritm de wear leveling datorită neajunsurilor identificate în soluțiile existente. Astfel, algoritmul bazat pe grupuri [72] nu identifică precis blocurile ce trebuie șterse atunci când tiparul de acces la flash nu este distribuit uniform iar algoritmul SWL [76] nu este optim deoarece istoria ștergerilor recente stocate în tabela BET nu se corelează bine cu frecvența ștergerilor. Autorii observă și eficiența scăzută a utilizării resurselor de memorie a metodelor existente, deoarece acestea au cerințe suplimentare de RAM și nu folosesc informațiile existente despre translatarea blocurilor, stocate deja în Flash.

Algoritmul se integrează bine cu implementarea standard de garbage collection din FTL, fiind declanșat de către selecția unui bloc victimă pentru reciclare. În primul pas se calculează diferența dintre numărul de ștergeri ale blocului victimă și numărul mediu de ștergeri înregistrat. Dacă diferența este mai mare decât un prag, se caută primul bloc care nu a fost șters recent parcurgând lista de mapare a blocurilor jurnal la blocuri logice, până când se găsește un bloc ce nu are mapare. Raționamentul este că un bloc de date ce nu are asociat unul sau mai multe blocuri jurnal, va conține date statice și în consecință va avea un număr mic de ștergeri. Odată găsit blocul înlocuitor, se migrează datele din acesta în blocul victimă selectat de către FTL la început, urmând ca blocul victimă original să fie substituit de blocul înlocuitor și să fie mapat la blocul logic ce aparținuse inițial blocului înlocuitor.

Se poate observa că denumirea metodei propuse reflectă modul pasiv în care se reacționează la problema degradării: wear leveling nu rulează decât declanșat de garbage collection, bazat pe observația ca FTL nu va șterge blocuri decât ca urmare a operațiunilor de garbage collection. Se evită astfel ștergeri și cerințe de procesare suplimentare, deoarece algoritmul va rula doar atunci când este strict necesar.

Autorii analizează și impactul pragului de declanșare al algoritmului asupra performanței, deoarece un prag prea mic va produce un număr crescut de scrieri și ștergeri suplimentare (având un efect contradictoriu celui scontat), iar un prag prea mare va duce la o accelerare a degradării memoriei, prin frecvența scăzută cu care se va face wear leveling. Se propune un model analitic de calcul al pragului în funcție de valoarea anterioară și de numărul de ștergeri suplimentare și se arată că valoarea sa poate fi recalculată în timpul funcționării, pentru a se adapta la schimbarea tiparelor de acces la flash, care poate surveni oricând pe parcursul utilizării.

În lucrare se compară algoritmul propus cu algoritmul SWL și cu algoritmul dual-pool, utilizând 4 scenarii de test rulate pe o perioadă lungă pe PC. Metrica aleasă pentru evaluarea uniformității degradării este deviația standard față de medie a numărului de ștergeri al blocurilor. Rezultatele evaluării arată că algoritmul propus

este mai bun în aproape toate cazurile, cu excepția scenariului multimedia, unde dual-pool este marginal mai bun.

3.2. Analogia grup de acumulatori-memorie flash

Într-un grup de acumulatori de mari dimensiuni, caracteristicile bateriilor individuale sunt greu de măsurat și de cuantificat, iar majoritatea BMS pentru astfel de grupuri de acumulatori nu le măsoară, din considerente de cost și eficiență. Pe de altă parte, există diferențe relativ mari între bateriile individuale, care sunt prezente încă din procesul de fabricație și care în timp vor diverge și mai mult, ducând la degradarea prematură și în final la scoaterea din uz a întregului grup de acumulatori [59],[60].

În cazul memoriilor flash, s-a constatat nevoia de a gestiona accesul la mediul de stocare fizic din prisma frecvenței de acces la date, altfel fișierele actualizate mai des vor duce la degradarea prematură a zonei unde sunt stocate și în final la pierderea datelor. Problema uniformizării degradării devine și mai importantă pe măsură ce tehnologia avansează, deoarece tehnologiile 3D și MLC cu 3 și 4 biți per celulă suportă maxim 5000-10000 de cicluri de programare/ștergere, comparativ cu tehnologia mai veche SLC, ce suportă până la 100000 cicluri.

Tabel 3-1 sintetizează asemănările dintre conceptele aplicabile memoriilor flash și grupurilor de acumulatori în domeniul reducerii degradării, grupându-le în funcție de caracteristica studiată. Se poate observa că unele caracteristici se pot echivala 100%, pe când altele nu se pot traduce decât parțial.

Există și unele deosebiri fundamentale între cele două domenii în ceea ce privește degradarea:

- degradarea unui bloc de memorie este liniară și legată strict de numărul total de ștergeri; ea nu depinde de viteza cu care datele sunt scrise în el. Pe de altă parte, degradarea unui acumulator Li-Ion este un fenomen complex și neliniar, care depinde de mulți factori: curentul de încărcare/descărcare, temperatură, SOC;
- accesul la blocurile aflate pe același canal de comunicație se face secvențial pentru scriere și citire, pe când transferul de sarcină în/din grupul de acumulatori se face simultan în toate bateriile conectate în configurația particulară utilizată.

Tabel 3-1 Corespondența conceptelor memorie Flash-grup de acumulatori

Caracteristică	Memorii flash	Grupuri de acumulatori
Structură	Colecție de blocuri	Colecție de baterii
	Blocuri de date (scrise în sesiunile anterioare)	Baterii utilizate în ciclurile anterioare. (descărcate $k\%$ dar neîncărcate încă)
	Blocuri jurnal (scrise în sesiunea curentă)	Baterii utilizate în ciclul curent
	Blocuri libere (neutilizate și 100% șterse)	Baterii neutilizate (pot avea grade diferite de SOC)
Capacitate	Spațiu liber	SOC – capacitate disponibilă
	Spațiu ocupat	1-SOC – capacitate consumată/descărcată

3.2 – Analogia grup de acumulatori-memorie flash 47

	Spațiu de rezervă (overprovisioning)	Baterii de rezervă
Degradare	Nr. total de ștergeri	Nr. total de cicluri - SOH
Utilizare	Scrierea (parțială sau totală) a n blocuri	Descărcarea (parțială sau totală) a n baterii
	Ștergerea unui bloc Nu se poate efectua parțial.	Descărcarea totală urmată de încărcarea totală a unei baterii. Diferența: încărcarea se poate efectua parțial Pentru metoda propusă: încărcarea parțială cu $k\%$
	Citirea a n blocuri	Nu există corespondență directă!
Algoritmi de management	Garbage collection	Reîncărcarea capacității bateriilor descărcate în ciclurile anterioare. Poate însemna și transferul sau redistribuirea sarcinii între baterii.
	Wear leveling static – migrarea datelor statice	Poate fi asociat cu migrarea sarcinii din baterii degradate mai mult spre baterii degradate mai puțin.

Din punct de vedere al structurii, se poate observa o asemănare bună a conceptelor memoriilor flash cu cele ale grupurilor reconfigurabile de acumulatori. Corespondența dintre blocurile de date și bateriile utilizate dar neîncărcate încă (având grade diferite de descărcare) este valabilă doar pentru grupuri care nu încarcă toate bateriile descărcate în ciclurile anterioare, acest lucru depinzând de algoritmi de management implementați în BMS asociat. Bateriile neutilizate se pot echivala exact cu blocurile libere cu observația că bateriile pot avea procente de încărcare mai mici de 100%. Totuși, în cazul FTL cu mapare la nivel de pagină, analogia este perfectă, deoarece diferite blocuri pot avea procente diferite de pagini libere.

Capacitatea este o mărime cantitativă, ca urmare se poate face o analogie perfectă între memorie și energie (exprimată procentual prin SOC). Trebuie remarcat aici că presupunerea implicită care se face este că grupul va fi folosit pentru descărcare, deci pentru satisfacerea cerințelor sarcinii. O altă observație este că spațiul de rezervă în cazul grupurilor de acumulatori nu este garantat la modul general, acesta depinde de caracteristicile aplicației și de modul în care este proiectat sistemul de stocare.

Utilizarea este cel mai important factor ce produce degradarea atât în cazul memoriilor flash cât și în cazul bateriilor și această observație este principala motivație care a condus la dezvoltarea prezentei teze. O diferență care provine din caracteristicile fizice ale bateriilor Li-Ion este că acestea suferă o degradare chiar și în regim staționar (cu o rată mult mai mică decât în funcționare). Acest fenomen se numește calendar aging [37] și efectul său este încorporat în modelul de baterie utilizat în cadrul metodei propuse în această lucrare [36].

Scrierea, citirea și ștergerea sunt operațiile fundamentale care pot fi realizate cu memoriile flash iar analogia cu operațiunile corespondente tehnologiei bateriilor are diferite grade de potrivire. Astfel, dacă scrierea a n blocuri de memorie este

identică din punct de vedere conceptual cu descărcarea a n baterii, citirea nu are corespondență directă. Citirea memoriei se poate face continuu și nelimitat, fără a afecta în vreun fel performanța, este un proces care oferă informații despre blocurile vizate și are un cost de timp asociat (asemănător cu scrierea). Analizând aceste caracteristici, putem găsi operațiuni care le îndeplinesc și în cazul bateriilor: citirea directă a parametrilor primari, adică a tensiunii, curentului și temperaturii.

Algoritmii de management sunt mai greu de echivalat, deoarece trebuie să țină cont de specificul fiecărei tehnologii. Funcția principală a garbage collection este de a recicla blocurile parțial scrise în blocuri libere și este necesar datorită proprietății memoriei flash de scriere unică. Se poate face o asociere parțială cu reîncărcarea bateriilor descărcate în ciclurile anterioare, luând în considerare că scopul final al ambelor metode este de a recupera capacitatea de stocare sau energia. Nici migrarea datelor statice spre blocuri mai puțin degradate nu are o echivalență directă în tehnologia bateriilor, deși se poate considera că echilibrarea prin migrarea sarcinii între baterii adiacente deservește același scop. Totuși, principiile de bază ale unor algoritmi de wear leveling se pot aplica și grupurilor reconfigurabile de acumulatori, după cum va fi demonstrat în prezenta lucrare.

3.3. Principiile sistemului BWL propus

După cum am arătat în capitolul introductiv, soluția propusă se adresează aplicațiilor critice de stocare de energie, cum ar fi: vehicule electrice și hibride [82]-[87], sisteme de stocare de energie pentru companiile furnizoare de electricitate [88]-[93], precum și centre de date [15], [94]-[99]. Caracteristicile principale ale acestor aplicații sunt:

- putere instalată între 10kW – 100MW+;
- cerințe mari de fiabilitate, timp de răspuns, toleranță la defecte;
- costul total de operare și amortizarea în timp sunt mai importante decât costul de achiziție și de instalare;

Pentru a satisface cerințele detaliate mai sus, este nevoie de un grup de acumulatori care să fie format din 1k – 100k+ celule și care să aibă un BMS performant, capabil de a menține sistemul operabil pe o perioadă de minim 10 ani.

3.3.1. Principiile metodei propuse

Metoda de gestionare a grupurilor reconfigurabile de acumulatori propusă în această lucrare încearcă să îmbunătățească performanțele metodelor existente raportate în literatură, prin aplicarea unor principii inovative în controlul fazelor de încărcare și descărcare a bateriilor componente ale grupului.

Metoda propusă se bazează pe următoarele principii directoare:

1. Datorită cerințelor de fiabilitate, durată extinsă de operare și sarcină variabilă, metoda se va aplica grupurilor reconfigurabile de acumulatori.
2. Numărul de baterii ce vor fi conectate în circuit și configurația de organizare a acestora vor fi stabilite în funcție de sarcina consumatorului. Vor fi rezervate permanent un procent de 5% din celule pentru operații critice de încărcare/descărcare, astfel că procentul efectiv de celule utilizate va fi: $N_MIN \leq n \leq 95$.
3. Reconfigurarea grupului de acumulatori se va face înaintea începerii fazei de descărcare și nu se va modifica până la încheierea acestei faze.

4. Faza de încărcare este o extensie a fazei de descărcare; ca urmare, toate bateriile ce au fost utilizate în faza precedentă de descărcare vor fi alocate și în faza de încărcare curentă.
5. Reconfigurarea se va face pe baza unui algoritm static de uniformizare a uzurii, inspirat din algoritmi folosiți la memoriile flash.
6. Sistemul de stocare funcționează după un program cunoscut apriori, în care se estimează durata și consumul ciclului următor de descărcare. Acest program se poate întâlni spre exemplu când compania furnizoare de energie electrică aplică un sistem tarifar diferențiat zi-noapte, care face mai eficientă utilizarea sistemului de stocare ziua, cu încărcarea acestuia noaptea. Un alt exemplu care se pretează acestui mod de funcționare este automobilul electric, unde ciclurile de încărcare și descărcare pot fi estimate cu o acuratețe bună.

În capitolele anterioare au fost prezentate avantajele adoptării grupurilor reconfigurabile de acumulatori în detrimentul grupurilor statice, printre care putem aminti eficiența energetică crescută (prin adaptarea la tensiunea și puterea cerute de sarcină) și toleranța mai mare la defecte, deoarece bateriile sau modulele componente defecte pot fi izolate automat de restul grupului. Dacă admitem că cerințele de putere ale sarcinii deservite de grupul de acumulatori variază în timp în intervalul $[0, P_{max}]$ (unde P_{max} este puterea maximă instalată a grupului de acumulatori), atunci este evident că orice configurație fixă a bateriilor componente nu va putea atinge o eficiență optimă. În consecință, metoda propusă în prezenta lucrare necesită reconfigurabilitate totală pentru alocarea eficientă a bateriilor în fiecare ciclu de funcționare.

Deși la nivel teoretic eficiența energetică maximă se obține atunci când numărul și configurația bateriilor din grup furnizează o putere cât mai aproape de cerințele sarcinii, în practică trebuie considerate aspecte legate de fiabilitate și de creștere neprevăzută (și posibil temporară, nu pe toată durata ciclului actual de descărcare) a puterii cerute. De aceea, metoda trebuie să asigure un număr de baterii de rezervă în procesul de alocare al noii configurații. Estimarea numărului acestora nu este o problemă simplă și va fi discutată mai pe larg în secțiunea dedicată aspectelor practice ale implementării metodei.

Faza de descărcare se desfășoară în intervalul de timp în care grupul de acumulatori este conectat electric și susține activ cerințele de putere ale sarcinii. Se poate spune astfel că faza de descărcare este faza productivă, pe când faza de încărcare este faza neproductivă, care consumă resurse pentru a readuce sistemul într-o stare productivă. După cum am arătat prin sintetizarea rezultatelor obținute în literatură, procesul de reconfigurare a conexiunilor electrice ale grupului de acumulatori poate însemna modificarea totală a configurației existente, prin utilizarea unui subset complet disjunct de baterii pentru noua configurație. Deși s-ar putea realiza teoretic, reconfigurarea totală în timpul funcționării (în faza de descărcare) necesită o complexitate a modulului de control din cadrul BMS asociat care este dificil de pus în practică. Un posibil dezavantaj dat de limitarea reconfigurării la începutul perioadei de funcționare poate fi performanța redusă, sub optimul teoretic, în cazul în care puterea cerută de sarcină variază considerabil pe parcursul ciclului de funcționare curent. Totuși, eficiența crește cu creșterea frecvenței ciclurilor de descărcare, permițând astfel sistemului de stocare să se adapteze mai repede la schimbările cerințelor de sarcină.

Pentru a maximiza eficiența în exploatare, degradarea în faza de încărcare trebuie menținută la minim, iar încărcarea optimă din acest punct de vedere se atinge

când aceleași baterii utilizate în faza de descărcare sunt reîncărcate cu aceeași cantitate de energie [36]. În practică, la fel cum s-a arătat mai sus în cazul bateriilor de rezervă, trebuie găsit un compromis între degradare și disponibilitate. Dacă bateriile sunt încărcate cu o anumită cantitate suplimentară, sistemul de stocare de energie va putea face față mai ușor eventualelor cerințe suplimentare de energie, mai mari decât cele prognozate înaintea începerii ciclului curent. Pe de altă parte chiar și un procent mic de încărcare suplimentară va conduce în timp la o pierdere semnificativă a capacității bateriilor, datorită efectelor de degradare neliniară ce se amplifică cu creșterea SOC_{avg} . Și această problemă va fi discutată în detaliu în secțiunile următoare.

Pornind de la analogia între grupurile de acumulatori și memoriile flash în ceea ce privește problema comună a reducerii degradării, se propune o nouă metodă de gestionare a bateriilor reîncărcabile care este bazată pe principiile algoritmilor de garbage collection și wear leveling. La fel ca în cazul memoriilor flash, scopul aplicării acestei metode este de a maximiza durata de exploatare a grupului de acumulatori, prin controlarea modului în care sunt folosite astfel încât să asigure o degradare uniformă a tuturor bateriilor componente.

3.3.2. Principiile de proiectare ale unui BMS bazat pe metoda BWL

În secțiunea de față se propune dezvoltarea unor principii de proiectare și descrierea unui BMS care gestionează un grup reconfigurabil de acumulatori, pentru a explora posibilitățile de punere în practică ale conceptelor de management a bateriilor bazate pe metoda BWL. Un alt deziderat al prezentei expunerii este de a servi ca un punct de pornire și ca un exemplu pentru o dezvoltare ulterioară concretă a unor astfel de sisteme.

Sistemul de management al bateriilor pe care îl voi descrie în această secțiune va fi dezvoltat pornind de la următoarele principii:

1. sistemul este o soluție software dedicată ce rulează pe o platformă hardware embedded cu consum redus de energie, pentru maxim de flexibilitate și eficiență;
2. grupul de acumulatori este complet reconfigurabil, permițând conectarea și deconectarea oricărui șir de baterii și selectarea oricărei baterii din cadrul unui șir;
3. sistemul va avea funcționalitatea necesară pentru măsurarea cu precizie satisfăcătoare a V , I , T pentru fiecare baterie componentă;
4. calculul SOC, SOH și a altor parametri necesari se va efectua online, sistemul funcționând autonom și continuu;
5. managementul proceselor de încărcare și descărcare se va efectua conform algoritmilor metodei BWL, pentru minimizarea degradării bateriilor componente.

Decizia utilizării unei soluții software prezintă multe avantaje, printre care putem aminti flexibilitatea și posibilitățile de actualizare continuă și de îmbunătățire a algoritmilor de management implementați. O atenție sporită trebuie însă acordată domeniului securității informatice, datorită vulnerabilității mai mari pe care o astfel de soluție o are comparativ cu o soluție hardware dedicată. Sistemul de management trebuie să aibă un consum propriu cât mai mic pentru a nu degrada eficiența, drept urmare soluția cere se pretează cel mai bine la astfel de condiții este un sistem on chip (SoC) embedded cu consum redus. Datorită cerințelor de reconfigurabilitate, un SoC ce oferă cât mai multe semnale de intrare-ieșire este recomandat. De asemenea,

în vederea rulării în timp real și cu eficiență maximă a algoritmilor avansați de estimare SOC, SOH și de management, specifici metodei BWL, se recomandă alegerea unui SoC având microprocesorul pe 32 biți.

Principalele caracteristici ale organizării reconfigurabile a bateriilor au fost discutate în secțiunea anterioară, dedicată prezentării principiilor metodei propuse. Din punctul de vedere al implementării BMS, conexiunile între bateriile individuale devin mult mai complexe iar această complexitate trebuie gestionată printr-un modul HW/SW dedicat.

După cum s-a demonstrat în secțiunea 2.5, senzorii necesari pentru măsurarea tensiunii, curentului și temperaturii bateriilor componente trebuie să aibă o precizie foarte mare pentru a oferi date de intrare cât mai fiabile pentru algoritmii de estimare SOC/SOH și de control. În ceea ce privește implementarea, gestionarea acestor semnale complexe și numeroase reprezintă o problemă semnificativă pentru un sistem embedded.

Cerințele de funcționare autonomă și continuă, izvorăsc din cerințele similare de fiabilitate și toleranță la factori perturbatori, a aplicațiilor critice de stocare de energie în care astfel de BMS sunt integrate. De aceea este necesar ca sistemul să aibă capabilitatea de a calcula SOC și SOH în timpul funcționării (online). Pentru calculul SOH se va utiliza modelul din [36], descris în capitolul 2.3; pentru SOC se va considera un algoritm capabil să ofere o precizie satisfăcătoare ținând cont de constrângerile de putere de procesare, energie consumată și complexitate specifice unui sistem embedded.

Estimarea precisă a SOC este dificil de realizat online ([31], [65]), de aceea în literatură au fost propuse mai multe metode. În metodele bazate pe OCV, este importantă estimarea precisă a tensiunii în gol, deoarece o măsurare directă a acesteia este dificil de realizat. Motivul este timpul mare de repaos în care bateriile trebuie deconectate din circuit, timp necesar pentru ca tensiunea la borne să ajungă la nivelul tensiunii în gol căutate. Astfel, este nevoie ca modelarea bateriilor din sistem să fie cât mai exactă. În [23] se realizează o sinteză și o comparație a performanțelor pentru 12 modele găsite în literatură, iar una dintre concluziile studiului este că un model electric de tip Randles de ordinul 1 cu histereză se potrivește cel mai bine cerințelor unui BMS embedded. Metoda bazată pe rețele neuronale descrisă în lucrarea [100] poate fi de asemenea utilizată în sisteme embedded bazate pe microcontrolere moderne. Acestea includ module hardware dedicate pentru accelerarea operațiilor de calcul pe matrici, specifice rețelelor neuronale. Printre avantajele principale ale acestei metode putem menționa faptul că nu necesită modelarea complexă a electrochimiei bateriei, respectiv posibilitatea aplicării acesteia la orice tip de baterie, metoda asigurând învățarea caracteristicilor bateriilor pe parcursul funcționării.

Cea mai importantă sarcină a BMS descrisă este asigurarea funcționării optime a sistemului de stocare de energie, prin gestionarea cu eficiență maximă a bateriilor componente. Această cerință va fi realizată prin implementarea algoritmilor metodei BWL, detaliați în secțiunea 3.4. Astfel, numărul de șiruri de baterii ce vor fi conectate în circuit va fi stabilit dinamic în funcție de sarcina consumatorului iar sistemul de stocare funcționează după un program cunoscut apriori. Înaintea fiecărui ciclu de încărcare sau descărcare, BMS va estima durata și consumul respectivului ciclu; în cazul încărcării, estimările vor fi timpul și puterea maximă ce pot fi alocate. Într-un grup de baterii de același tip, inclusiv în cazul în care provin din același lot de fabricație, vor exista întotdeauna diferențe în structura internă care vor duce la o degradare neuniformă pe parcursul ciclurilor de funcționare și în final la atingerea condiției de oprire pentru fiecare baterie la momente de timp diferite. BMS propus va marca fiecare baterie care atinge condiția de oprire ca inactivă și nu o va mai utiliza

în ciclurile ulterioare. De aceea, condiția de oprire a funcționării grupului se va atinge atunci când numărul de baterii rămase încă active, nu mai poate susține consumul cerut pentru perioada de timp cerută, în proximitatea ciclului de descărcare.

Pe baza celor discutate mai sus, a fost realizată o schemă simplificată a BMS propus, care poate fi consultată în Fig. 3-2.

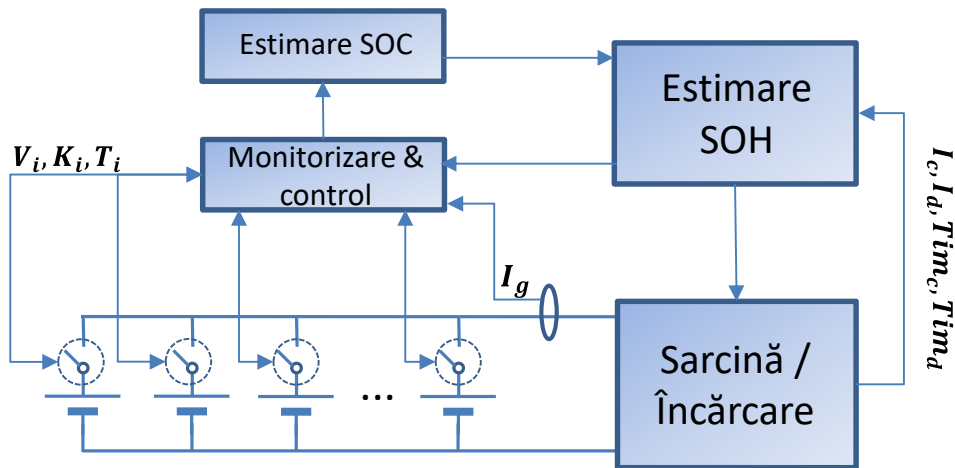


Fig. 3-2 Schema de principiu a BMS propus

Mărimile din figura de mai sus sunt:

- V_i, K_i, T_i - tensiunea, semnalul de control al întrerupătorului de circuit, respectiv temperatura curentă pentru bateria i ;
- I_c, I_d, Tim_c, Tim_d - valorile estimate sau prescrise ale curentului de încărcare, curentului de descărcare, timpului de încărcare, respectiv a timpului de descărcare;
- I_g - curentul măsurat al grupului de acumulatori.

După cum am arătat, BMS descris aici este proiectat pentru un grup de acumulatori reconfigurabil, drept urmare fiecare baterie este prevăzută cu un întrerupător programabil pentru a permite conectarea și deconectarea acesteia din circuit. În schema propusă cu titlu de exemplu, avem un grup format din n baterii legate în paralel, dar conceptual se poate extinde la o configurație generală serie-paralel, păstrând aceleași principii de funcționare.

Blocul "Monitorizare & control" gestionează toate semnalele enumerate mai sus, citind periodic parametrii bateriilor și acționează întrerupătoarele de circuit ale bateriilor în funcție de comenzile primite de la modulul principal de comandă. Blocul "Sarcină / Încărcare" abstractizează atât sarcina pe care trebuie să o susțină sistemul cât și modulul de încărcare a bateriilor componente. Rolul său principal este de a genera, estima și comunica parametrii de curent și de timp pentru fiecare ciclu. Acest bloc este interfața cu sistemele externe și poate fi alimentat de la un sistem fotovoltaic, de la rețeaua de distribuție, etc.

În blocul "Estimare SOC" rulează algoritmul de estimare online a SOC general, dar și pentru fiecare baterie individuală, pe baza datelor despre starea grupului de acumulatori, citite periodic. Rezultatele estimării (de exemplu, SOC_{start} pentru fiecare baterie) sunt folosite în timpul funcționării de către blocul "Estimare SOH". Acesta are mai multe roluri:

- aplicarea online a modelului de degradare [36] în vederea calculării SOH individual dar și a SOH mediu al grupului;
- aplicarea online a metodei BWL de selecție a bateriilor pentru fiecare ciclu;
- comanda stărilor întrerupătoarelor de circuit la momentele potrivite prin blocul "Monitorizare & control", pentru menținerea funcționării optime;
- comunicația cu sisteme externe, în funcție de aplicația finală în care este integrat BMS.

Schema de principiu a unui BMS bazat pe metoda BWL prezentată aici poate constitui un punct de pornire pentru cercetări ulterioare în domeniul grupurilor reconfigurabile de acumulatori. Printre subiectele deschise ce se pot aborda putem enumera descentralizarea și distribuirea funcțiilor de calcul SOC/SOH, optimizarea numărului de comutatoare în vederea reducerii la minim a pierderilor de putere, etc.

3.3.3. Influența comutatoarelor

Într-un grup de acumulatori de mari dimensiuni, elementele de circuit pasive precum comutatoarele și siguranțele, prezintă o influență semnificativă asupra costului, volumului ocupat și a performanțelor sistemului. Un studiu de caz descris în [101] arată că masa elementelor pasive dintr-un sistem de stocare de energie ajunge până la o valoare de 8% din masa totală a sistemului.

În cadrul BMS pentru aplicațiile de stocare de energie sunt utilizate, de regulă, comutatoare de tip releu electromecanic sau semiconductor (solid state switch) [50]. Releele electromecanice sunt utile pentru decuplarea sarcinii, ele prezentând o serie de avantaje precum plaja de putere extinsă și o rezistență electrică în conducție foarte mică (de ordinul $m\Omega$) [102]. Un dezavantaj major al releelor, care împiedică utilizarea acestora la nivelul fiecărei baterii componente, este volumului mare ocupat datorită bobinei de comutație, care crește mult odată cu creșterea curentului nominal suportat. Un alt neajuns este dat de tensiunile de comandă necesare, care în general sunt mult mai mari decât nivelele de tensiune uzuale ale microcontrolerelor (1.8 – 3.3V). Astfel, se impune adăugarea unor componente electronice suplimentare pentru adaptarea nivelelor de tensiune. De asemenea, numărul de comutări până la defectare este limitat iar fiabilitatea releelor în timp este influențată negativ de fenomenul de arc electric ce apare în timpul comutării.

Comutatoarele bazate pe semiconductori ameliorează iar în unele cazuri elimină complet dezavantajele releelor electromecanice, descrise mai sus. Printre caracteristicile acestora putem menționa dimensiunile reduse, fiabilitatea mult mai mare datorită faptului că nu au părți mecanice în mișcare și timpul de comutație extrem de mic (nanosecunde). La momentul actual există două tehnologii de fabricație a comutatoarelor semiconductoare: MOSFET și IGBT. Alegerea între cele 2 opțiuni se face în funcție de specificul aplicației, în ceea ce privește nivelul de tensiune și frecvența de comutație [103]. Astfel, pentru aplicații de putere mică (<500 W) sunt recomandate comutatoarele MOSFET, iar utilizarea acestora este preferată în grupurile de acumulatori de mari dimensiuni, deoarece puterea echivalentă per baterie sau per modul este de asemenea mică.

Pierderea de putere utilă și implicit reducerea eficienței de funcționare, este principala problemă a grupurilor reconfigurabile de acumulatori, iar tipul și numărul comutatoarelor utilizate are o influență directă asupra acestui parametru. Pierderea de putere la nivelul comutatoarelor MOSFET are două componente: pierderea în comutație și pierderea în conducție. Studiile existente au demonstrat că pierderile de putere în regim de comutație sunt minime și pot fi astfel neglijate, în aplicațiile critice

de stocare de energie, unde reconfigurarea se face relativ rar [50], [61]. În consecință, componenta principală a pierderii de putere în astfel de aplicații poate fi exprimată prin relația următoare:

$$P_{pierdere} \cong R_{DS(on)} \times I_d^2 \quad (3-2)$$

unde $R_{DS(on)}$ este rezistența electrică drenă-sursă în conducție, iar I_d este curentul serie sau curentul de drenă ce trece prin tranzistorul respectiv. Deoarece I_d depinde de sarcina aplicației și de condițiile de utilizare, rezultă că minimizarea $R_{DS(on)}$ rămâne singura soluție practică pentru reducerea pierderilor de putere. Acest aspect este cu atât mai important cu cât pierderea de putere se manifestă prin emiterea de căldură, ceea ce poate afecta în mod negativ durata de viață a bateriilor componente. Tehnologia MOSFET a evoluat de-a lungul timpului, în vederea reducerii $R_{DS(on)}$ și a capacității de comutație, astfel că există soluții comerciale cu $R_{DS(on)} < 1 \text{ m}\Omega$, precum [104] și [105]. Cu toate acestea, pierderea de putere rămâne o problemă de actualitate în aplicațiile considerate.

Pe lângă problemele discutate, utilizarea comutatoarelor pentru un grup reconfigurabil de acumulatori impune și alte constrângeri. Dintre acestea putem aminti nevoia de a crește capacitatea sistemului de răcire pentru disiparea căldurii reziduale suplimentare, creșterea dimensiunilor fizice ale sistemului, sau degradarea performanței datorită latenței de comutare crescute. Toate aceste probleme reprezintă provocări pentru proiectarea practică a unor BMS reconfigurabile, fiind în același timp domenii deschise de cercetare.

3.4. Implementarea metodei BWL

Metoda va putea fi implementată într-un BMS prin doi algoritmi principali, unul pentru gestionarea fazei de încărcare și altul pentru faza de descărcare.

Algoritm 3-1: Metoda BWL în faza de descărcare

Intrări:

- curentul de sarcină (estimat) I_d
- timpul de descărcare (estimat) Tim_d
- grupul de baterii G_{total}

Ieșiri: Sub-grupul (mulțimea) de baterii legate în paralel selectate pentru ciclul de descărcare G_d

- 1: $G_d \leftarrow \{\}$
- 2: $G_{act} \leftarrow selectActive(G_{total})$
- 3: **pentru** (fiecare $b \in G_{act}$)
- 4: $L_{scor}(b) = \omega_{SOC} \cdot G_{act}(b).SOC + \omega_{SOH} \cdot G_{act}(b).SOH$
- 5: **stop pentru**
- 6: $L_{scor} \leftarrow sort(L_{scor}, DESCRES)$
- 7: **cât timp** ($I_g^{max} < I_d$)
- 8: $b \leftarrow top(L_{scor})$
- 9: **dacă** ($(SOH_{avg} - b.SOH) > SOH_{delta}$)
- 10: $b' = obtineBatBWL(b)$
- 11: $G_d \leftarrow G_d \cup b'$
- 12: **altfel**
- 13: $G_d \leftarrow G_d \cup b$
- 14: **stop dacă**

15: $I_g^{max} \leftarrow I_g^{max} + I_b^{max}$
 16: **stop cât timp**
 17: *executaDescarcare*(G_d, I_d, Tim_d)

În primul pas, grupul de baterii ce vor fi selectate pentru descărcare G_d se inițializează la mulțimea vidă. Prin acest pas se inițiază astfel reconfigurarea grupului de acumulatori înaintea fiecărui ciclu de susținere a sarcinii, conform principiilor directe enunțate mai sus. Extragerea submulțimii de baterii active din totalul bateriilor din grup este reprezentată schematic în pasul 2, prin apelarea funcției generice *selectActive*(G_{total}). Această funcție va returna în submulțimea G_{act} doar acele baterii care îndeplinesc toate criteriile pentru a fi considerate active. Definierea acestor criterii va trebui făcută ținând cont de cerințele de fiabilitate și disponibilitate specifice aplicației, dar un criteriu obligatoriu este ca nivelul de degradare fiecărei baterii să nu scadă sub un prag minim de funcționare (de obicei, 70% din capacitatea nominală [21]).

Pașii 3-5 reprezintă parcurgerea submulțimii de baterii active determinată în pasul anterior, în vederea calculării unui scor ponderat SOH-SOC pentru fiecare baterie activă. Scorurile calculate astfel se stochează în lista de scoruri ale bateriilor - L_{scor} . Pentru a obține un scor normalizat, se impune constrângerea ca ponderile pentru SOH și SOC să respecte următoarea relație:

$$\omega_{SOC} + \omega_{SOH} = 1 \quad (3-3)$$

Acest scor atribuit astfel fiecărei baterii se utilizează mai jos pentru selectarea bateriilor ce vor face parte din noua configurație a grupului, pregătită pentru următorul ciclu de descărcare. Scorul SOH-SOC a fost creat pentru a servi ca o metrică analitică în procesul de selecție al bateriilor, care urmărește utilizarea acelor baterii care sunt cel mai puțin degradate dar și a celor care pot susține sarcina cât mai mult timp. Valorile pentru $G_{act}(b).SOC$, respectiv pentru $G_{act}(b).SOH$ sunt reprezentate fracționar în intervalul $[0, 1]$, cu valoarea maximă corespunzătoare la un nivel SOC sau SOH de 100%. Se poate considera astfel că cele 2 elemente ale sumei ce formează scorul reprezintă fiecare probabilitatea ca o baterie să fie selectată pe baza nivelului de încărcare, respectiv pe baza nivelului de degradare. Pentru a putea utiliza SOH în aceeași formulă cu SOC, este necesar ca ambele mărimi să se raporteze la aceeași unitate de măsură. Deoarece SOC actual este exprimat într-o unitate de măsură pentru capacitatea sau energia stocată în baterie (de exemplu, mAh), s-a ales să se utilizeze definiția SOH care reprezintă capacitatea sau energia maximă furnizabilă de către baterie, raportată la energia sau capacitatea sa nominală.

Alegerea ponderilor, care înseamnă importanța relativă acordată fiecăreia dintre cele două mărimi, și influența acestora asupra eficienței, este o problemă de optimizare multi-obiectiv. Dacă se alege o valoare $\omega_{SOC} \gg \omega_{SOH}$, la limită având $\omega_{SOC} = 1$, algoritmul va clasifica bateriile doar după valoarea SOC, rezultând o eficiență de utilizare sub valoarea optimă, deoarece la fiecare rulare există posibilitatea de a fi selectate baterii care sunt mult mai degradate decât altele. Dacă în schimb se aleg ponderile astfel încât $\omega_{SOC} \ll \omega_{SOH}$, la limită având $\omega_{SOH} = 1$, algoritmul va considera doar valoarea SOH în procesul de construire a configurației grupului la fiecare rulare, existând riscul să nu se poată construi nicio configurație viabilă pentru unele cerințe de consum. Acest lucru se poate întâmpla dacă bateriile selectate doar pe baza SOH vor avea valorile de SOC mai mici decât minimul necesar pentru a susține sarcina. Chiar dacă se pot construi configurații viabile, grupul va avea un grad de dezechilibru al bateriilor mai mare decât în cazul optim, iar echilibrarea bateriilor va trebui adresată de BMS și va consuma resurse de energie și de timp suplimentare. În implementarea curentă s-a ales ca cele două ponderi să fie egale, pentru a nu influența negativ

eficiența energetică a sistemului. Găsirea optimului acestor valori este o problemă deschisă și depinde de caracteristicile aplicației.

L_{scor} este sortat descrescător după scorul fiecărei baterii în pasul 6, pentru ca lista să poată fi utilizată mai departe în cadrul buclei ce corespunde pașilor 7-16. Condiția de oprire a buclei exprimă condiția fizică impusă asupra grupului de acumulatori: curentul maxim furnizat de grup I_g^{max} să fie mai mare sau egal cu curentul de sarcină estimat pentru ciclul următor (I_d). Implementările practice vor trebui să țină cont de incertitudinea de estimare și de alți factori, pentru a crește în mod corespunzător I_g^{max} cu o marjă de siguranță specifică aplicației.

În primul pas din interiorul buclei, se extrage elementul (bateria) din capul listei L_{scor} , iar numărul de elemente se reduce corespunzător cu 1, această listă comportându-se practic ca o stivă din punct de vedere al accesului (LIFO). Acest pas este modelat după algoritmul cel mai comun de garbage collection utilizat de către controlerele flash [70].

Nucleul metodei propuse se află în pașii 9-14, care sunt modelați după principiul de bază al metodei de wear leveling propusă și detaliată în [78] și [79]: substituirea (dacă este posibil) a blocului/bateriei selectate, cu un nou bloc/baterie, dacă degradarea blocului/bateriei inițiale este mai mare decât media cu mai mult de un prag prestabilit. Aplicarea unei metode avansate de wear leveling static din domeniul tehnologiei de stocare bazate pe memorie flash, la domeniul grupurilor de baterii reîncărcabile Li-Ion, în vederea obținerii unui efect identic la nivel de principiu, demonstrează puterea analogiei conceptelor aferente acestor două domenii de cercetare total independente. Efectul menționat mai sus înseamnă reducerea degradării totale în timp și, prin urmare, îmbunătățirea duratei de funcționare totale, și se obține prin fenomenul de uniformizare cât mai fidelă a nivelului de degradare al bateriilor individuale.

În pasul 9 se verifică dacă SOH al bateriei curente deviază cu mai mult de o valoare prestabilită (SOH_{delta}) față de media SOH calculată pe tot grupul de baterii active (SOH_{avg}). Aceasta este condiția care declanșează execuția funcției $obțineBatBWL()$, ce va substitui bateria curentă cu proxima baterie din L_{scor} care are deviația SOH față de medie mai mică sau egală decât cea calculată pentru bateria curentă. Implementarea funcției menționate la pasul 10 presupune o parcurgere liniară a bateriilor din L_{scor} pentru a căuta noua baterie care nu mai îndeplinește condiția de deviație a SOH față de media grupului. La limită, funcția poate să nu identifice nicio baterie substituit, caz în care bateria returnată b' va fi identică cu bateria originală b , iar pasul 11 devine identic din punct de vedere funcțional cu pasul 13.

Din punct de vedere al complexității de calcul, trebuie observat că bucla din interiorul funcției $obțineBatBWL()$ se află în interiorul buclei exterioare cuprinsă între pașii 7 și 16. Acest fapt poate conduce la $n \cdot (n - 1)$ parcurgeri ale buclei exterioare, deci la o complexitate de calcul de $O(n^2)$, în cazul cel mai nefavorabil în care toate bateriile din grup au o valoare SOH care nu se încadrează în limita de variabilitate impusă prin valoarea SOH_{delta} . Complexitatea de calcul crescută poate deveni o problemă când numărul de baterii din grup este foarte mare, de aceea o implementare practică a algoritmului prezentat va trebui să găsească modalități pentru a reduce complexitatea. În acest sens, o sugestie de optimizare ar putea însemna o parcurgere liniară a întregii liste L_{scor} și marcarea automată a fiecărei baterii, dacă respectă sau nu condiția de variabilitate SOH. În această manieră, grupul de baterii pentru următorul ciclu de descărcare (G_d) ar putea fi construit cu o complexitate de calcul semnificativ îmbunătățită față de algoritmul canonic, de numai $O(n)$.

Independent de modul de selecție al acesteia, bateria curentă este adăugată la G_d iar curentul maxim pe care îl poate furniza grupul I_g^{max} se recalculează în pasul 15. Aici s-a exemplificat pentru implementare formula simplă de actualizare a I_g^{max} , bazată pe configurația conectării bateriilor în paralel, prin însumarea curentului maxim furnizabil al bateriei curente (I_b^{max}) cu totalul parțial de curent al grupului. În practică, această formulă se poate înlocui cu formule mai complexe care să țină cont de pierderile rezistive datorate conectorilor și comutatoarelor, spre exemplu. Acest aspect va fi studiat mai detaliat în secțiunile următoare. În continuare, bucla se va executa cât timp condiția de terminare descrisă mai sus nu este îndeplinită.

După ce configurația G_d este realizată, BMS va intra în procesul efectiv de lucru în care alimentează sarcina, în pasul 17, conform parametrilor de curent și de timp ceruți. În această fază, sarcina este cea care controlează procesul, iar durata efectivă și curentul efectiv cerute de sarcină pot să difere față de mărimile corespunzătoare estimate, Tim_d respectiv I_d . Dacă durata sau curentul depășesc estimarea cu mai mult decât procentul de rezervă prevăzut, BMS va deconecta sarcina în momentul atingerii pragului critic al tensiunii la bornele bateriilor componente, pentru a preveni deteriorarea accelerată a acestora.

Faza de încărcare se execută atunci când sarcina este deconectată. La fel ca în cazul descărcării, aceasta poate fi planificată după un orar cunoscut apriori, pentru optimizarea costurilor și o selecție optimă a bateriilor care vor fi conectate. În algoritmul 3-2 se descrie schematic faza de încărcare.

Algoritm 3-2: Metoda BWL în faza de încărcare

Intrări:

- curentul de sarcină (maxim) I_c
- perioada de timp alocată Tim_c
- grupul de baterii G_{total}

Ieșiri: Sub-grupul (mulțimea) de baterii legate în paralel selectate pentru ciclul de încărcare G_c

- 1: $G_c \leftarrow \{ \}$
 - 2: $G_{act} \leftarrow selectActive(G_{total})$
 - 3: **pentru** (fiecare $b \in G_{act}$)
 - 4: $L_{scor}(b) = \omega_{SOC} \cdot (SOC_{max}(b) - G_{act}(b) \cdot SOC) + \omega_{SOH} \cdot G_{act}(b) \cdot SOH$
 - 5: **stop pentru**
 - 6: $nb_{estim} = calcNumBatEstim(G_{act})$
 - 7: **dacă** ($abs(nb_{estim} - nb_{ant}) < \Delta_{nb}$)
 - 8: $nb_{chg} = nb_{estim}$
 - 9: **altfel**
 - 10: $nb_{chg} = nb_{ant}$
 - 11: **stop dacă**
 - 12: $L_{scor} \leftarrow sort(L_{scor}, DESCRES)$
 - 13: **cât timp** ($(nb_{act} < nb_{chg}) \ \&\& \ (I_g^{max} < I_c)$)
 - 14: $b \leftarrow top(L_{scor})$
 - 15: $G_c \leftarrow G_c \cup b$
 - 16: $I_g^{max} \leftarrow I_g^{max} + I_b^{max}$
 - 17: **stop cât timp**
 - 18: $executaIncarcare(G_c, I_c, Tim_c)$
-

În primul pas, grupul de baterii ce vor fi selectate pentru încărcare se inițializează la mulțimea vidă. Prin acest pas se inițiază astfel reconfigurarea grupului de acumulatori înaintea fiecărui ciclu de reîmprospătare a capacității grupului de acumulatori, conform principiilor directe enunțate mai sus. Pașii 2-5 se execută aproape la fel ca în cazul fazei de descărcare, cu excepția calculului scorului pentru componenta SOC. În faza de încărcare, scorurile mari trebuie acordate bateriilor cu SOC scăzut, de aceea primul termen al relației este inversat față de cazul descărcării. Trebuie remarcat că $SOC_{max}(b)$ nu este o constantă, deci nu poate fi considerat fix având valoarea 1 (100%), deoarece, în practică, SOC raportat la capacitatea nominală nu poate depăși valoarea actuală a SOH pentru bateria respectivă. Relația următoare sintetizează această constrângere.

$$SOC_{max}(b) = b \cdot SOH, \forall b \in G_{act} \quad (3-4)$$

Funcția $selectActive(G_{total})$ are aceeași implementare precum cea folosită în faza de descărcare și în mod normal va returna aceleași baterii pentru popularea G_{act} . Aceasta se întâmplă deoarece evaluarea condițiilor de inactivitate pentru fiecare baterie se face în această fază, după execuția efectivă a încărcării.

În pașii 6-11 se determină numărul de baterii care vor fi selectate pentru încărcare. Deși principiul 4 prevede că eficiența maximă se poate obține atunci când aceleași baterii descărcate în ciclul anterior vor fi folosite în ciclul de încărcare actual, în practică există cazuri în care acest număr trebuie ajustat. Spre exemplu, când diferența dintre numărul de baterii estimat și numărul de baterii efectiv utilizat în ultimele faze de descărcare este semnificativă, se impune o creștere preventivă a numărului de baterii ce vor fi încărcate. Funcția $calcNumBatEstim(G_{ant})$ calculează numărul de baterii estimat, bazat pe datele istorice ale numărului de baterii utilizate pentru descărcare, înregistrate în G_{ant} . În prezenta lucrare se propune utilizarea mediei ultimelor n cicluri pentru estimare, dar funcția se poate adapta la cerințele specifice ale aplicației. Se compară apoi în pasul 7, dacă diferența dintre numărul de baterii estimat și numărul de baterii din ciclul anterior nb_{ant} este mai mică decât un prag prestabilit - Δ_{nb} . În funcție de mărimea acestei deviații, se va alege numărul de baterii pentru ciclul curent nb_{chg} . Se poate observa că numărul de baterii care pot fi selectate pentru încărcare în ciclul curent este variabil, la limită putând ajunge să încarce toate bateriile dacă au fost excesiv descărcate în ciclul anterior. În acest caz, grupul reconfigurabil de acumulatori se reduce la un grup clasic, iar metoda de minimizare a degradării nu mai poate acționa.

Lista bateriilor active este sortată descrescător în funcție de scorul SOH-SOC în pasul 12, la fel ca în cazul fazei de descărcare. Pașii 13-17 cuprind bucla în care se construiește configurația finală a bateriilor, ce formează grupul G_c . Condiția de oprire a buclei este mai complexă decât în cazul fazei de descărcare și are două componente: condiția ca numărul de elemente actual al G_c să ajungă egală cu numărul de baterii calculat mai sus, respectiv condiția ca mărimea curentului total furnizabil grupului să ajungă mai mare sau egală cu mărimea curentului maxim estimat I_c . În fiecare iterație a buclei, se extrage bateria aflată în capul listei L_{scor} , care funcționează la fel ca în cazul descărcării, ca o stivă construită pe principiul LIFO.

Numărul de elemente din listă este decrementat cu 1 iar bateria este adăugată la grupul de baterii configurat pentru încărcare G_c . De asemenea, curentul maxim pe care îl poate accepta grupul I_g^{max} se recalculează în pasul 16. La fel ca în cazul descărcării, exemplul considerat în prezenta lucrare utilizează formula simplă de actualizare a I_g^{max} , bazată pe configurația conectării bateriilor în paralel. Astfel se însumează curentul maxim de încărcare al bateriei curente (I_b^{max}) cu totalul parțial de curent al grupului.

După finalizarea alegerii configurației din G_c la ieșirea din buclă, în pasul 18 procesul de încărcare este pornit și executat conform parametrilor de curent și timp alocați, în cadrul funcției *executaIncarcare*. Și în acest caz, durata de timp alocată pentru încărcare poate varia datorită unor factori externi, iar BMS trebuie să asigure operarea în siguranță a grupului de acumulatori și echilibrarea bateriilor componente.

4. METODOLOGIA DE CERCETARE

4.1. Criterii pentru analiza performanțelor

În acest capitol se vor prezenta principalele rezultate ale cercetărilor efectuate pentru studierea efectelor metodei propuse de gestionare a bateriilor reîncărcabile, în diferite scenarii de test considerate. Mai întâi se vor defini criteriile relevante pentru analizarea comparativă a performanțelor, după care vor fi identificați și clasificați cei mai importanți parametri de funcționare a bateriilor, a metodei propuse, cât și a întregului sistem de stocare energie, în ansamblul său. Mai departe, pe baza variației parametrilor amintiți, se vor detalia rezultatele obținute și se va analiza comparativ performanța, în modurile de funcționare ale grupului de acumulatori considerate.

Pentru a putea compara performanțele noii metode propuse cu cele ale metodelor echivalente din literatură, trebuie evaluate și alese criteriile sau metricile care sunt relevante în acest scop.

Articolele care tratează problema gestionării grupurilor de acumulatori din perspectiva degradării nu utilizează criterii standard de evaluare, pentru că nu toate urmăresc același obiectiv de optimizare. Spre exemplu, în [58] autorii propun o metodă pentru maximizarea capacității furnizate în fiecare ciclu de utilizare. Rezultatele sunt prezentate comparativ în Fig. 4-1 și sunt obținute cu aceleași baterii în topologia fixă (SoH-Oblivious), respectiv în topologia reconfigurabilă (SHARE-Full).

TABLE III: SoH of cells used in Experiment-B.

Cell	#1	#2	#3	#4	#5	#6
SoH (%)	73	93	85	83	92	90

TABLE IV: Capacity Delivery in Experiment-B (mAh).

	1st Run	2nd Run	3rd Run	4th Run
SHARE-Full	3,204	3,128	3,189	3,228
SoH-Oblivious	2,898	2,786	2,803	2,923

Fig. 4-1 Capacitatea furnizată în cazul reconfigurabil vs. static [58]

În [61] se propune modelarea grupului reconfigurabil ca un graf aciclic iar criteriul de performanță ales este timpul de funcționare al sarcinii la parametri nominali. Sistemul de împărțire ierarhică a grupului de baterii propus în [55] urmărește în principal maximizarea timpului de utilizare a grupului și implicit reducerea costului total de funcționare.

Considerând criteriile de performanță întâlnite în literatură precum și tipurile de aplicații cărora metoda propusă se adresează, se propune următoarea listă de criterii de evaluare, ordonată descrescător în funcție de importanță:

1. Durata de timp maximă în care sistemul este operațional; costul total de funcționare este direct proporțional și strâns legat de această durată de timp.
2. Capacitatea totală furnizată de sistem pe parcursul duratei de viață, sau gradul de satisfacere a cerințelor de sarcină a sistemului.

4.2. Scenarii simulate

Metoda propusă de management al bateriilor a fost proiectată și implementată la nivel de simulare în mediul de dezvoltare MATLAB, pentru a permite evaluarea performanțelor acestora prin variația mai multor parametri de funcționare.

Pentru o evaluare cât mai relevantă a performanțelor metodei BWL, a fost aleasă o serie de parametri a căror variație generează scenariile de simulare propuse. Acești parametri pot fi clasificați în două categorii, în funcție de natura acestora:

1. Parametri fizici, a căror variație este legată fie de o anumită mărime fizică fie de configurația fizică a grupului de baterii;
2. Parametri de calcul, sau parametrii algoritmilor, a căror variație va fi discutată în contextul detaliilor de implementare a algoritmilor ce compun metoda BWL.

Lista parametrilor fizici împreună cu descrierea acestora se regăsește în Tabel 4-1.

Tabel 4-1 Parametrii fizici pentru scenariile de simulare

Parametru	Detalii
Chimia bateriilor	Reprezentarea parametrilor fizici ce țin de structura internă a bateriilor prin parametrii numerici ai modelului de degradare <i>SOH</i> ales; pot fi identici pentru toate bateriile sau variabili cu o marjă procentuală aleasă după o lege de distribuție, pentru a simula variațiile procesului de producție a bateriilor.
Capacitatea utilizată a bateriilor <i>SOC_{start}</i> și <i>SOC_{end}</i>	Capacitatea disponibilă pentru procesul de descărcare respectiv capacitatea stocată în procesul de încărcare; Capacitățile pot fi constante prescrise sau recalulate dinamic după fiecare ciclu.
Curentul maxim de încărcare și descărcare <i>I_c</i> și <i>I_d</i>	Curentul maxim absorbit în procesul de încărcare respectiv curentul maxim furnizat în procesul de descărcare; <i>I_c</i> poate fi constant (maxim prescris) sau variabil în funcție de câte baterii/șiruri sunt selectate; <i>I_d</i> poate fi constant (sarcină fixă) sau variabil între limite min-max.
Durata ciclului de descărcare	Durata de timp în care sistemul alimentează sarcina, în fiecare ciclu de descărcare.
Temperatura de lucru	Temperatură constantă pe tot parcursul duratei de funcționare sau variabilă în domeniul [5, 45] °C.
Topologia bateriilor	numărul de baterii conectate în serie; poate fi 1 sau <i>n</i> (șir de baterii), caz în care trebuie studiată problema reconfigurabilității la nivel de șir
Elementele auxiliare de circuit	Caracteristicile fizice ale comutatoarelor și influența acestora asupra eficienței

În Tabel 4-2 se află lista parametrilor de calcul împreună cu descrierea acestora.

Tabel 4-2 Parametrii de calcul pentru scenariile de simulare

Parametru	Detalii
Ponderile SOH-SOC	Ponderile utilizate pentru calculul scorului bateriilor; Se poate considera o singură relație sau relații diferite pentru încărcare și descărcare
SOH delta	Deviația acceptată între SOH al bateriei curente și media SOH a grupului; Poate fi fixă sau variabilă dinamic în timpul funcționării sistemului.
Mecanismul de alegere al bateriilor pentru încărcare	Alegerea acelorași baterii descărcate în ciclul anterior sau utilizarea datelor istorice pentru estimare a numărului de baterii ce vor fi încărcate.

4.3. Configurația testelor efectuate

Pentru cercetarea amănunțită a efectelor metodei propuse, este necesară modelarea cât mai fidelă a bateriilor considerate în cadrul testelor efectuate. În alegerea tipului de baterii Li-Ion, s-a avut în vedere criteriul ușurinței de utilizare și de implementare în practică a unui BMS bazat pe metoda propusă. Am considerat astfel baterii utilizate pe scară largă în dispozitive electronice de larg consum și am ales bateriile de tip Panasonic NCR18650A [5]. Aceste baterii au capacitatea nominală de 3070 mAh, oferă o densitate de energie mare (620 Wh/l) și o durată de viață specificată de producător de cel puțin 500 de cicluri de încărcare-descărcare, în condiții de utilizare normale. Pe baza capacității nominale menționate, toate referirile ulterioare la mărimile curenților de încărcare/descărcare se vor exprima prin formularea prescurtată, în multipli ai ratei curenților de bază (C-rate). Astfel un curent de 1C înseamnă 3.07A, 2C înseamnă 6.14A, ș.a.m.d.

Simularea caracteristicilor bateriilor considerate are la bază modelul hibrid de degradare a capacității detaliat în [36]. În cadrul cercetării, am efectuat măsurători practice ale mărimilor primare ale bateriilor în cadrul ciclurilor de încărcare și descărcare, pe 4 baterii de test. Am identificat astfel parametrii relevanți ai modelului, în vederea obținerii unei dinamici de scădere în timp a capacității utilizabile, cât mai aproape de caracteristicile declarate de producător în fișa tehnică. Setul de parametri care determină cea mai bună potrivire cu datele experimentale se poate regăsi în tabelul Tabel 4-3.

Tabel 4-3 Parametrii identificați ai modelului de baterie NCR18650A

Parametru	Valoare
Capacitate nominală a bateriei Q_{nom}	3.07 [Ah] (medie)
K_{co}	8.86e-04
K_{SOC}	0.916
K_{ex}	1.237
K_{temp}	0.0693
T_{ref}	25 [°C]

Aplicând acești parametri în modelul de degradare amintit, am simulat comportamentul pe termen lung al ciclurilor de viață ale bateriei considerate. Am comparat astfel datele obținute în cadrul simulării cu datele de catalog, iar rezultatele sunt prezentate în Fig. 4-1. Se poate observa cum graficul obținut prin aplicarea modelului până la valoarea de oprire a SOH de 70% (b) urmărește cu precizie graficul oferit de producător [5] (a) – trasat până la 73.8% SOH). Aceste rezultate demonstrează precizia modelului utilizat și validează astfel decizia de utilizare a acestuia în cadrul metodei propuse.

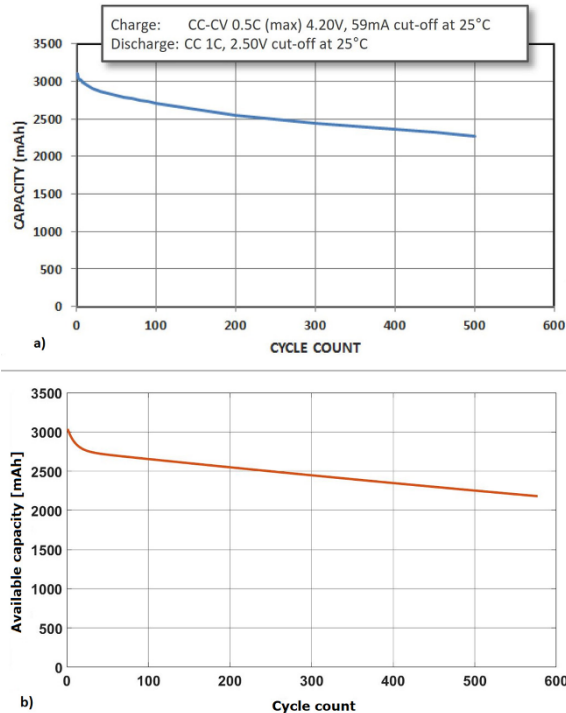


Fig. 4-1 Comparația ciclurilor de viață la bateria NCR18650A

În fiecare dintre scenariile de variație a parametrilor, prezentate în secțiunile următoare, se vor compara și discuta rezultatele obținute în următoarele 3 moduri de funcționare:

1. grup reconfigurabil cu aplicarea metodei BWL
2. grup reconfigurabil fără aplicarea metodei BWL
3. grup static, în care se folosesc toate bateriile în fiecare ciclu.

În cazul 1, metoda BWL este aplicată complet în cadrul fiecărui ciclu de încărcare și descărcare, așa cum este descrisă în secțiunea 3.4. În cazul 2, diferența față de cazul 1 constă în dezactivarea algoritmului substituție a bateriilor din faza de descărcare, scopul fiind de a simula un grup de acumulatori reconfigurabil cu un algoritm avansat de selecție a bateriilor. În final, cazul 3 reprezintă modul de funcționare cel mai comun în practică, în care acumulatorii sunt conectați într-o topologie statică și alimentează sarcina simultan.

Condiția de terminare a funcționării va fi aceeași în toate modurile: sistemul nu mai poate susține sarcina la curentul cerut și pe perioada cerută. Strategia comună de management implementată de BMS simulat presupune dezactivarea și eliminarea din circuit a bateriei care ajunge sub pragul de 70% SOH, efectul fiind o creștere continuă a curentului la bornele bateriilor rămase, proporțional cu numărul de baterii dezactivate. În toate testele, timpul total util de funcționare este considerat suma duratelor tuturor ciclurilor de descărcare pe care le va efectua sistemul.

Topologia de organizare implicită a grupului de acumulatori studiat a fost stabilită la 64 de șiruri conectate în paralel, fiecare șir putând conține de la 1 la n baterii individuale. Din rațiuni de simplificare a procesului de modelare și simulare, dar și pentru ușurința expunerii ideilor, toate testele au fost efectuate având o singură baterie per șir. Fără a pierde din generalitate, în cadrul cercetărilor întreprinse a fost modificat și numărul de șiruri componente ale grupului.

Pentru fiecare baterie componentă a grupului, SOH este evaluat la începutul fiecărui ciclu de încărcare sau descărcare și este de asemenea recalculat la terminarea ciclului respectiv. Pe măsură ce scade numărul de baterii rămase conectate la sarcină, curentul mediu per baterie va crește proporțional. Cu toate acestea, atunci când este aplicată metoda BWL, numai numărul minim de baterii ce este necesar pentru susținerea sarcinii în parametri normali, va fi selectat spre utilizare în ciclul curent. Acest număr se va menține relativ constant pe parcursul utilizării sistemului, deoarece algoritmul asigură în permanență înlocuirea bateriilor a căror sarcină utilizabilă a fost epuizată, cu baterii având caracteristica SOH mai mare. În timp, acest proces conduce la o variabilitate scăzută a curentului și implicit la o reducere a ratei de degradare a bateriilor.

Conform detaliilor prezentate în secțiunile 3.3 și 3.4, procesul de selecție a bateriilor pentru a fi utilizate în faza de descărcare depinde de mai mulți factori și condiții de funcționare. În cele ce urmează va fi exemplificat acest proces, pornind de la premisele unui scenariu de simulare în care curentul de descărcare a fost fixat la 16C și durata de descărcare estimată a fost stabilită la 1h. Mărimile inițiale ale SOC pentru bateriile componente ale grupului au fost distribuite în mod aleator într-un interval de $96 \pm 4\%$, în vederea asigurării unui scenariu cât mai aproape de realitate. De asemenea, a fost calculat și scorul ponderat SOH-SOC descris în secțiunea 3.4, pentru fiecare baterie.

În Fig. 4-2 sunt prezentate toate bateriile componente ale grupului, ordonate descrescător în funcție de mărimea SOH a fiecăreia. Bateriile care au fost selectate prin rularea metodei propuse, sunt marcate cu o culoare închisă, iar cele care nu vor fi conectate la sarcină în ciclul curent sunt evidențiate cu o culoare deschisă. În figura menționată mai sus, se poate observa direct efectul aplicării algoritmului de selecție bazat pe scorul ponderat SOH-SOC, din cadrul metodei BWL: unele baterii care prezintă un SOH mai mic sunt selectate în locul altora care au un SOH mai mare, deși în cazul „greedy” ar fi fost selectate strict în ordinea SOH, adică cele mai puțin degradate primele. După aproximativ 400 de cicluri, ceea ce reprezintă mai puțin de 10% din numărul total de cicluri de funcționare aferent acestui scenariu de simulare, diferența maximă între SOH a bateriilor componente ale grupului va fi scăzut sub

pragul de 1%. Astfel este realizat efectul dorit de wear leveling asupra capacităților disponibile ale bateriilor, care în final va minimiza gradul de degradare a tuturor bateriilor din grup.

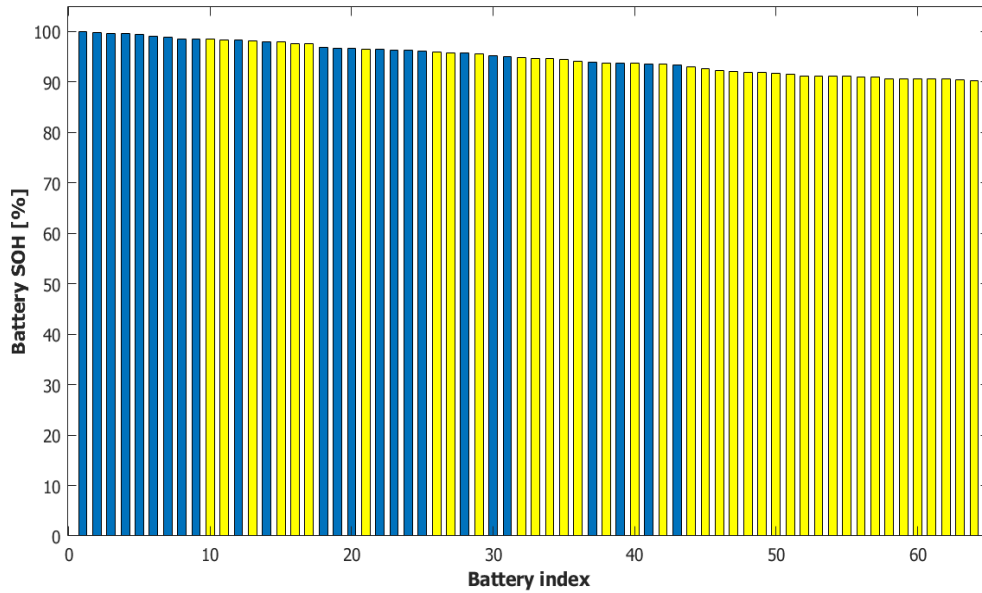


Fig. 4-2. Exemplu de selecție a bateriilor prin metoda BWL

5. ANALIZA PERFORMANTELOR METODEI BWL

5.1. Variația parametrilor fizici

Acest capitol prezintă, analizează și discută principalele rezultate obținute prin aplicarea scenariilor de simulare enunțate în capitolul anterior. Se vor analiza performanțele metodei propuse, atât prin prisma variației parametrilor fizici ai bateriilor componente ale grupului, cât și influența parametrilor de calcul, specifici metodei BWL, asupra eficienței totale a sistemului de stocare de energie.

În această secțiune se vor descrie scenariile de simulare ce au la bază variația parametrilor fizici ai grupului și ai acumulatorilor componenți, considerați în contextul metodei BWL. Se vor prezenta și se vor discuta rezultatele obținute pe baza implementării scenariilor de simulare menționate, cu scopul de a oferi o imagine cuprinzătoare asupra avantajelor și limitărilor metodei propuse de minimizare a degradării bateriilor.

5.1.1. Rezultate obținute prin variația parametrilor interni

Toleranțele tehnologice inerente diverselor faze din procesul de fabricație a bateriilor Li-Ion, dar și structura fizică neomogenă a materiilor prime (grafit, electrolit, etc.), conduc la apariția unor mici diferențe între parametrii interni și, pe cale de consecință, între capacitățile nominale ale bateriilor nou produse. Astfel, acestea vor avea SOH inițial diferit iar durata de timp până când capacitățile acestora vor ajunge în echilibru prin aplicarea algoritmilor BWL este proporțională cu mărimea diferențelor dintre capacitățile inițiale ale bateriilor.

Pentru studierea detaliată a acestui efect, am generat valorile capacității inițiale a bateriilor, bazat pe echivalența între SOH și capacitatea maximă curentă a bateriei. S-a urmărit ca valorile rezultate să fie caracterizate de o distribuție aleatoare și uniformă într-un anumit interval de variație prescris pentru o rulare a simulării. Pentru fiecare rulare a acestui scenariu de simulare, valorile SOH inițial (SOH_{init}) au fost generate după următoarea relație:

$$SOH_{init}(i) = \left(1 - \frac{i}{100}\right) \cdot SOH_{max} + \frac{i}{100} \cdot rand(1, N_{bat}); i \in [1, 10] \quad (5-1)$$

unde

- $i \in [1, 10]$ este valoarea intervalului de variație considerat în rularea curentă a scenariului de simulare, exprimată în procente; pentru $i = 1$, vom avea $SOH_{init} \in [99, 100]\%$, pentru $i = 2$ vom avea $SOH_{init} \in [98, 100]\%$ ș.a.m.d.
- SOH_{max} este valoarea maximă pe care o poate lua SOH al oricărei baterii; pentru cazul nostru am considerat această valoare 1 – corespunzător la 100%.
- $rand(m, n)$ este funcția care generează un vector de n valori aleatoare, cuprinse în intervalul $[0, m]$; în cazul de față, funcția va genera un vector cu valori aleatoare subunitare, unde N_{bat} este numărul de baterii componente ale grupului.

Pentru scenariul de simulare curent, rata curentului de descărcare și încărcare a fost fixată la 16C, SOC_{start} a fost prescris la 75% iar durata ciclului de descărcare a

fost limitată la 60 minute. Rezultatele celor 10 rulări în funcție de intervalul de variație sunt prezentate în Fig. 5-1.

Se observă că timpul total util de funcționare scade în toate cele 3 moduri de funcționare considerate, în principal datorită scăderii valorii medii a SOH, calculată pentru toate bateriile componente ale grupului. Deoarece valorile SOH_{init} au o distribuție aleatoare pentru fiecare rulare, diferențele între rezultatele obținute pentru valori consecutive ale intervalului de variație nu sunt egale. Spre exemplu, în cazul valorilor de 7% și 8%, timpul de funcționare rămâne cvasi-constant.

Efectul aplicării metodei BWL devine evident dacă urmărim raportul dintre rezultatele obținute în modul de funcționare static și cele obținute în modul reconfigurabil cu BWL. Se observă că metoda BWL este cu atât mai eficientă cu cât variația capacității bateriilor crește, deoarece în funcționare metoda tinde ca, în timp, să egalizeze capacitățile acestora. Acest efect a fost descris pe larg în secțiunea 3.4. De asemenea, același efect se manifestă și dacă privim raportul dintre rezultatele în cazul unui BMS pentru un grup reconfigurabil ce nu utilizează metoda BWL, respectiv un BMS bazat pe metoda BWL. În acest caz, efectul este mai puțin pronunțat, deoarece și în cazul unui grup reconfigurabil, bateriile pot fi reconectate în configurații în care se încearcă maximizarea timpului de funcționare. Privind rezultate în ansamblu, este evident că rezultatele optime sunt obținute de configurația BMS cu BWL, în toate rulările de test considerate.

În practică, gradul de variație al capacităților bateriilor componente nu se poate cunoaște apriori, în faza de producție a sistemului de stocare. Ca urmare, alegerea unui algoritm de management eficient al bateriilor în cadrul BMS este foarte importantă pentru prelungirea duratei de viață utile a sistemului, iar metoda BWL oferă o soluție optimă în acest sens.

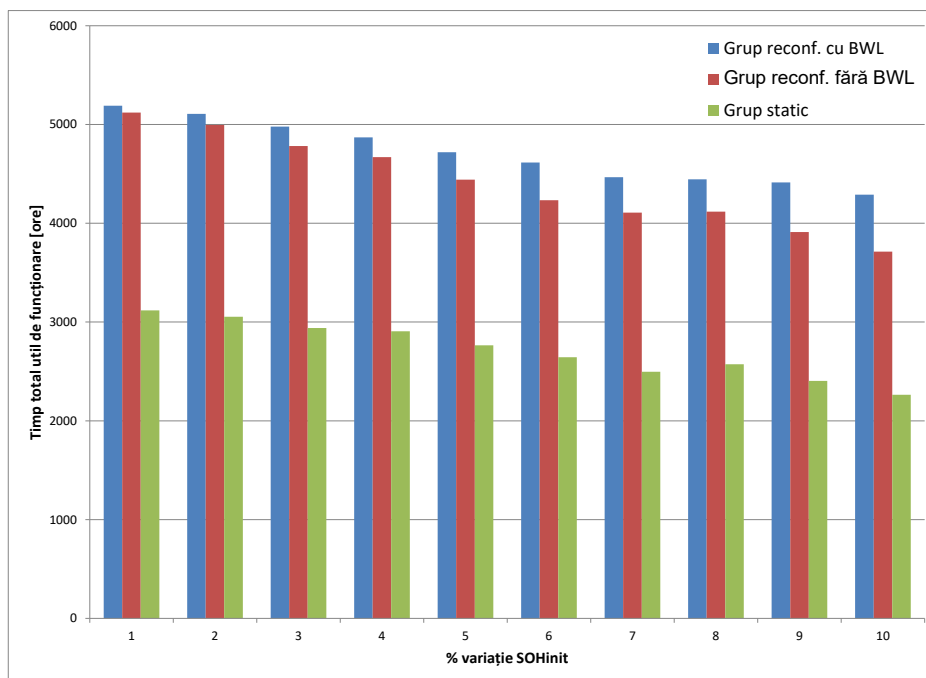


Fig. 5-1 Timpul total util de funcționare cu variația SOH_{init}

5.1.2. Rezultate obținute prin variația capacității utilizate

În acest scenariu, am fixat rata curentului de descărcare și încărcare la 16C și durata unui ciclu la 30 minute, pentru a simula un mod de funcționare întâlnit în majoritatea timpului la sistemele de stocare de acest tip. SOC_{start} a variat de la 50% la 90%, același pentru toate bateriile la începutul testului. Rezultatele pot fi văzute în Fig. 5-2.

După cum este de așteptat datorită aplicării modelului de degradare amintit, durata de funcționare crește substanțial pe măsură ce SOC_{start} și SOC_{mediu} sunt menținute la valori cât mai scăzute. În practică, trebuie găsit un echilibru între prelungirea duratei de viață și disponibilitatea sistemului. Se observă cum diferențele între BMS reconfigurabil cu BWL și BMS clasic sunt mari, ele crescând procentual odată cu creșterea SOC_{start} , explicația fiind gestionarea optimă a bateriilor prin aplicarea metodei BWL. Astfel, BMS cu BWL va recruta un număr mediu de baterii per ciclu tot mai scăzut pentru susținerea sarcinii, odată cu creșterea SOC_{start} .

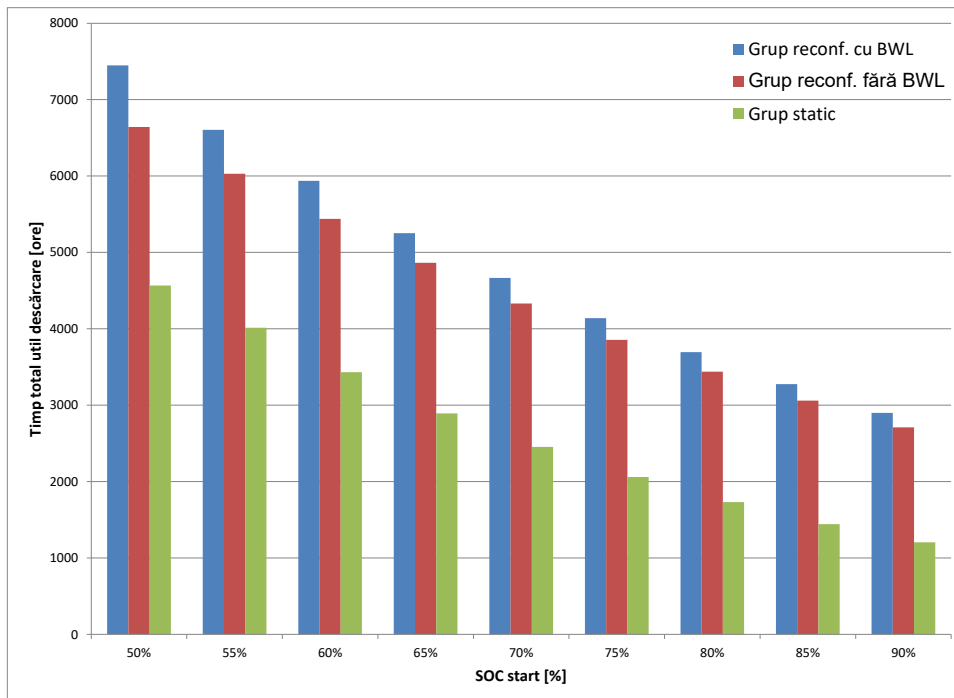


Fig. 5-2 Timpul total util de funcționare cu variația SOC_{start}

5.1.3. Rezultate obținute prin variația curentului

Scopul principal al sistemului propus este adaptarea dinamică a topologiei grupului de baterii în funcție de condițiile de funcționare, prin reconfigurare. Pentru a simula sarcinile diferite ce le va suporta sistemul pe parcursul duratei de funcționare, am considerat 2 cazuri de variație a curentului de încărcare de descărcare:

- valori diferite la fiecare rulare a simulării, pentru curentul constant pe durata unei rulări;

- curent variabil de la ciclu la ciclu. Curentul a fost ales în mod aleator, având valori în intervalul $[0.6, 1.4] * I_{baza}$, unde I_{baza} este curentul de bază, echivalent cu valoarea curentului din cazul simulărilor efectuate cu curent constant.

Rezultatele acestor simulări se regăsesc în Fig. 5-3 și Fig. 5-4. Se observă câștigul substanțial adus de BMS reconfigurabil cu metoda BWL față de sistemul clasic, care crește invers proporțional cu valoarea puterii absorbite de sarcină. Acest mod de funcționare este des documentat și întâlnit în practică, deoarece sistemele de stocare de mari dimensiuni funcționează rar la capacitate maximă [113], [114]. Toate simulările au fost efectuate cu SOC_{start} de 75% și cu o durată fixă a ciclului de o oră. Datorită acestor constrângeri impuse prin scenariul de test, curentul maxim nu a putut atinge valoarea de 64C, oprindu-se la 48C în cazul sarcinii fixe. În cazul sarcinii variabile de la ciclu la ciclu, datorită generării aleatoare a curentului de sarcină, algoritmul de selecție va alocă mai multe baterii decât pentru configurația echivalentă în cazul curentului constant. Ca urmare, sistemul nu poate funcționa în condițiile date la un curent mai mare de $32C \pm 40\%$.

În graficele prezentate se poate remarca o creștere accelerată și neliniară a ratei de degradare a SOH, odată cu creșterea curentului de sarcină. Acest fenomen poate fi explicat prin analizarea algoritmului BWL din faza de descărcare, prin care numărul de baterii selectat pentru ciclul curent va fi minimul necesar pentru susținerea sarcinii. Pe de altă parte, numărul de baterii conectat trebuie să fie și proporțional cu rata curentului de descărcare. Pentru a ilustra mai bine modul în care valoarea SOH se modifică, se va considera Tabel 5-1, construit în jurul primelor 3 valori ale curentului de sarcină, din Fig. 5-3.

Tabel 5-1 Analiza degradării SOH în cazul variației curentului

Curent [A]	Nr. baterii selectate în primul ciclu	Nr. mediu de baterii selectate	ΔSOH după 500 cicluri	Rata degradare SOH (%/100 cicluri)
1*3.07	2	2.378	0.0039	0.0212
4*3.07	6	8.115	0.013	0.0786
8*3.07	12	15.63	0.0244	0.1544

Detaliile de funcționare ale algoritmului BWL enunțate mai sus sunt evidențiate în tabel prin coloana numărului mediu de baterii selectate, unde se observă că acest număr este în toate cazurile mai mare decât numărul de baterii din primul ciclu. Aceasta se datorează creșterii numărului de baterii recrutate spre finalul perioadei de funcționare a sistemului, când bateriile rămase prezintă un SOH tot mai mic și prin urmare SOC maxim (exprimat ca procent din SOC nominal) va fi de asemenea diminuat. Din datele prezentate în tabelul de mai sus se poate observa că rata de degradare SOH (calculată ca procent din total, în ultimele 100 de cicluri), crește odată cu numărul mediu al bateriilor recrutate în faza de descărcare. Ca urmare, timpul total util de funcționare al sistemului de stocare se va reduce corespunzător.

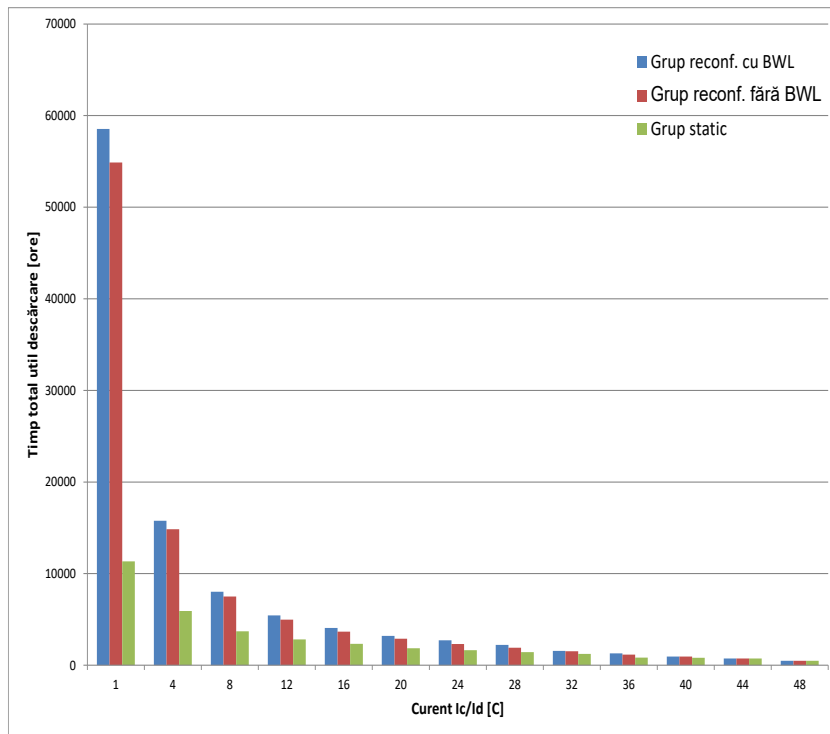


Fig. 5-3 Timpul de funcționare cu variația curentului – sarcină fixă

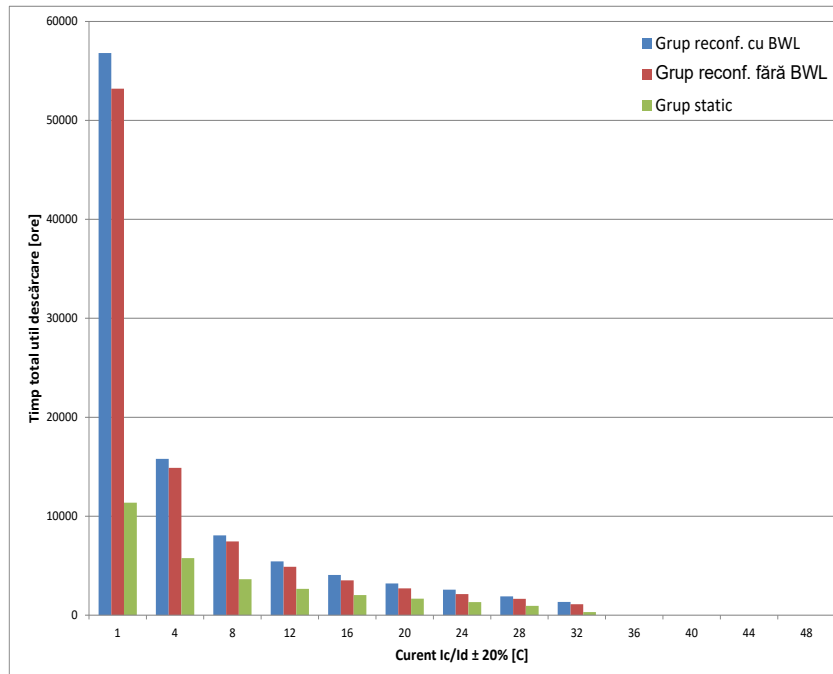


Fig. 5-4 Timpul de funcționare cu variația curentului – sarcină variabilă

5.1.4. Rezultate obținute prin variația duratei ciclului de descărcare

În acest scenariu s-a dorit simularea unui alt mod de funcționare ce poate fi întâlnit în realitate, în care sarcina este variabilă în timp datorită unor factori externi. Un exemplu poate fi un sistem de stocare cu alimentare mixtă, de la rețea și de la panouri fotovoltaice, iar factorul de influență în acest caz este variația zilnică a numărului de ore de radiație solară. Rata curentului de descărcare și încărcare a fost fixată la 16C și SOC_{start} a fost prescris la 75%. Rezultatele pot fi consultate în Fig. 5-5.

Se poate lesne observa că un BMS reconfigurabil care implementează metoda BWL permite menținerea relativ constantă a duratei totale de funcționare în condițiile unei plaje largi de variație a timpului sub sarcină, ilustrând efectele principale ale metodei propuse, de uniformizare a degradării și de extindere a timpului total util de funcționare. Acest rezultat se explică prin capacitatea metodei propuse de a recruta dinamic, în funcție de sarcină, numărul de baterii necesar în fiecare ciclu de funcționare.

Pe de altă parte, în cazul în care BWL nu este utilizat în cadrul unui BMS reconfigurabil, se observă o scădere constantă și continuă a timpului util de funcționare, pe măsură ce durata ciclului crește. Când durata ciclului devine foarte mare (peste 2,25 ore), metoda BWL nu mai poate acționa eficient, ca urmare sistemul se va comporta ca unul clasic în aceste condiții. Din acest scenariu se pot trage concluziile potrivite în vederea dimensionării optime a grupului de baterii în conformitate cu aplicația de stocare de energie în care va fi integrat.

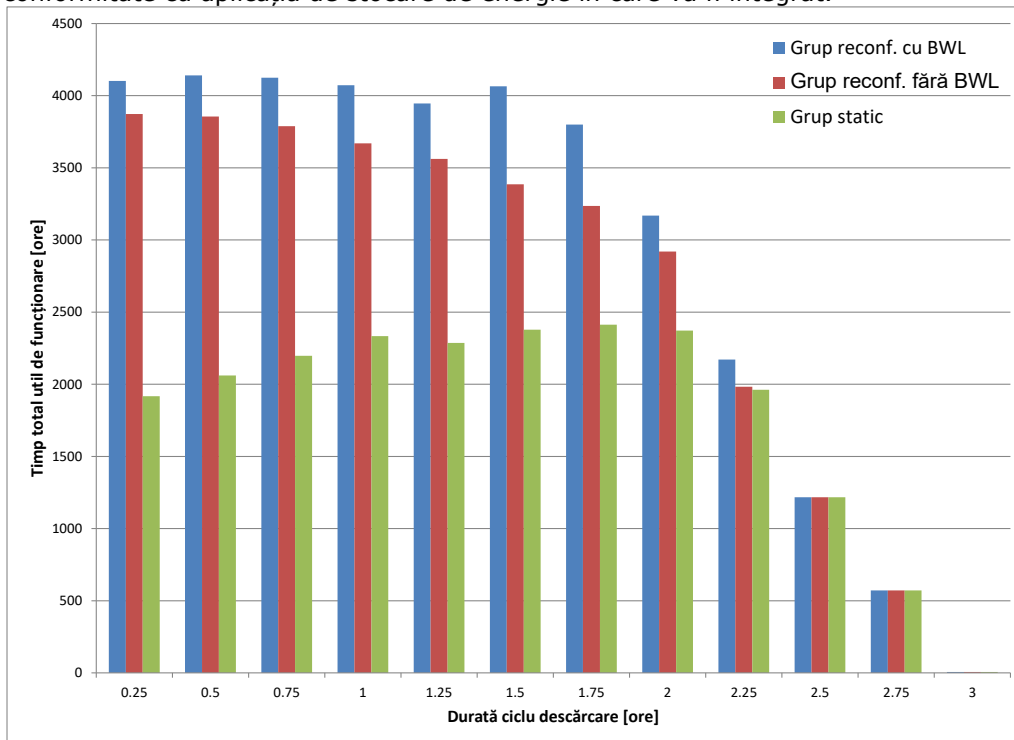


Fig. 5-5 Timpul total util de funcționare cu variația duratei descărcării

5.1.5. Rezultate obținute prin variația temperaturii de lucru

Temperatura de funcționare este un parametru important pentru orice sistem alimentat cu baterii Li-Ion și are o importanță crucială pentru sistemele de stocare de energie de mari dimensiuni, multe dintre acestea fiind echipate cu dispozitive active de răcire [115]. Modelul de degradare a bateriilor folosit în cadrul metodei BWL consideră de asemenea influența temperaturii de funcționare a bateriilor componente ale grupului de acumulatori.

Pornind de la temperatura de lucru recomandată de către producător [5] și de la recomandările de utilizare în siguranță a bateriilor Li-Ion [20], am simulat funcționarea grupului de acumulatori în intervalul de temperatură 5-45 °C, cu scopul de a studia modul în care variațiile sezoniere de temperatură ar putea afecta timpul total de funcționare al sistemului. Scenariul utilizat în toate rulările consta în setarea valorii SOC_{start} la 75% și prescrierea unui curent de încărcare/descărcare de 16C. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 5-6.

Prima concluzie ce se poate trage prin analiza rezultatelor este că rata cu care durata de funcționare se diminuează este apropiată de rata de degradare specificată de producător, și anume aproximativ 50% cu fiecare 10 °C de creștere a temperaturii. Această observație permite corectarea în timp real a estimărilor asupra duratei de funcționare rămase, dacă temperatura bateriilor componente ale grupului este monitorizată în mod continuu. O altă concluzie care se poate deduce este că raporturile dintre duratele de funcționare ale celor 3 moduri de operare considerate, rămân cvasi constante pe întreg intervalul de temperatură studiat. Acest rezultat este normal și așteptat, deoarece nu s-au modificat alți parametri în afară de temperatura de lucru, pe parcursul simulărilor efectuate.

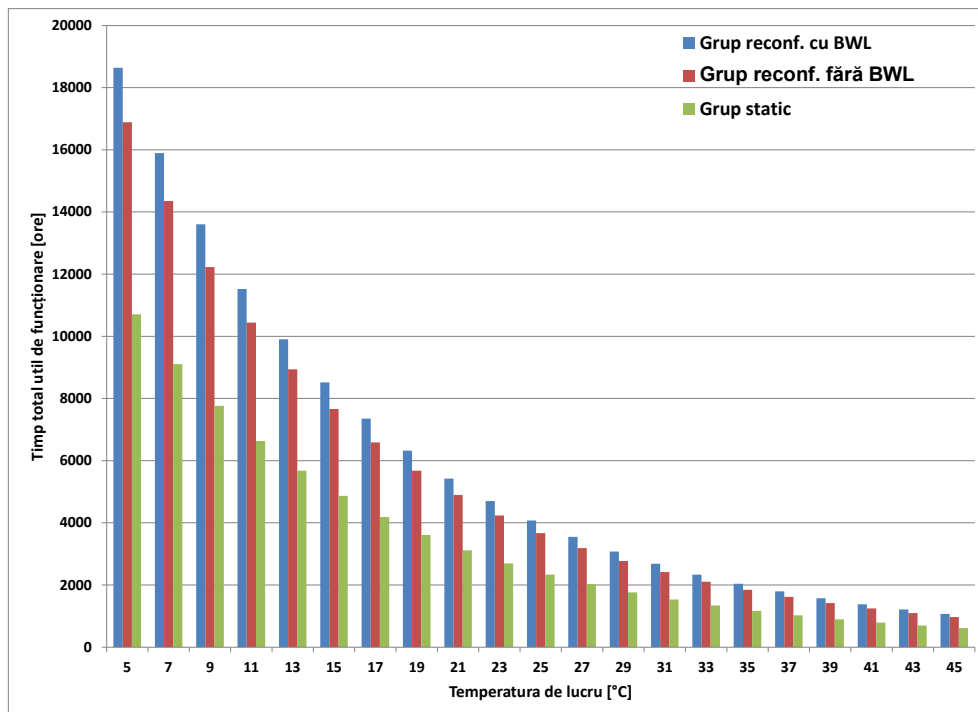


Fig. 5-6 Timpul total util de funcționare cu variația temperaturii

5.1.6. Rezultate obținute prin variația topologiei grupului de acumulatori

În acest scenariu de simulare am studiat modul în care numărul de baterii per modul influențează performanța grupului de acumulatori. După cum am arătat în secțiunea 4.3, numărul de șiruri în care sunt conectate modulele a fost fixat la 1, astfel că variația topologiei grupului se reduce la variația numărului total de baterii componente ale grupului.

Am pornit de la un număr de 40 de baterii pe care l-am crescut cu un pas constant de 20 pentru fiecare rulare, până la un număr maxim de 240 de baterii componente. În toate rulările valoarea SOC_{start} a fost setată la 75% și curentul de încărcare/descărcare maxim a fost fixat la o valoare de 16C. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 5-7.

După cum este de așteptat, în toate cele 3 moduri de funcționare analizate, timpul total de funcționare crește odată cu creșterea numărului de baterii. Dacă se calculează însă raportul dintre durata totală de funcționare și numărul de baterii la fiecare rulare, se poate observa că eficiența metodei BWL rămâne cvasi-constantă pe toată plaja de configurații luată în considerare, pe când în cazul grupului de acumulatori cu topologie statică, această eficiență se diminuează tot mai mult, practic invers proporțional cu creșterea numărului de baterii conectate. Concluzia importantă care se poate determina din acest experiment, este că un grup de acumulatori bazat pe metoda BWL poate fi scalat și dimensionat pentru orice aplicație, pe când un grup cu topologie statică își va pierde mult din eficacitate cu cât crește cerința de putere a aplicației în care se dorește integrat. Acest fapt limitează foarte mult posibilitățile de utilizare a grupurilor de acumulatori cu topologie statică.

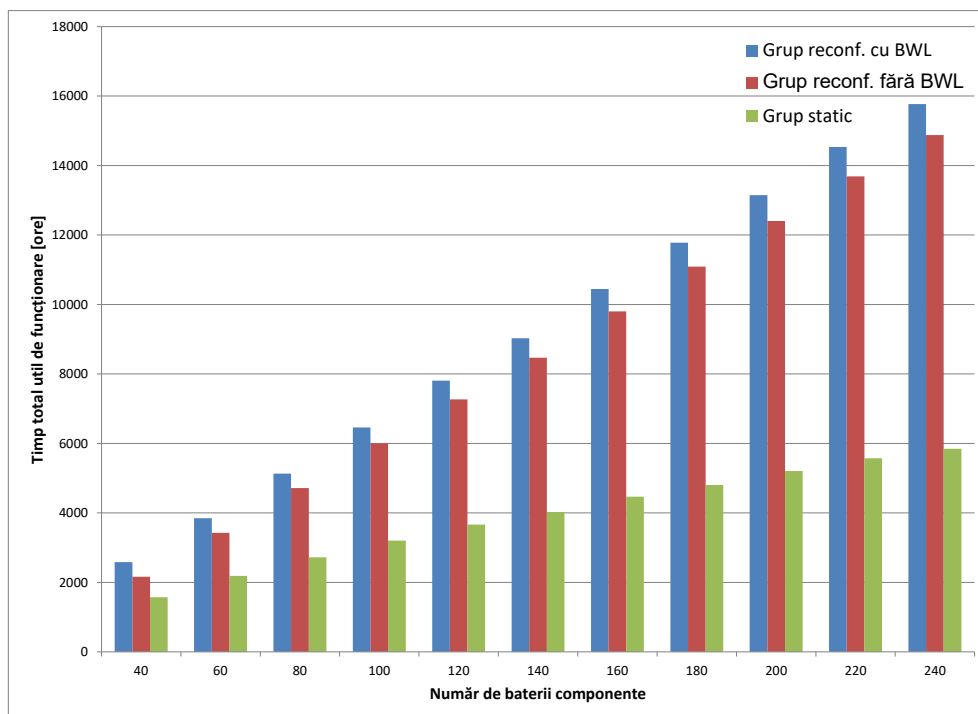


Fig. 5-7 Timpul total util de funcționare cu variația topologiei

5.1.7. Rezultate obținute prin variația elementelor auxiliare de circuit

Un grup de acumulatori reconfigurabil este, prin definiție, mai complex decât un grup echivalent, având același număr de baterii, dar conectate într-o topologie statică. Ca urmare, modelarea acestui tip de sisteme trebuie să includă și influența elementelor auxiliare, care nu au rol direct în stocarea energiei, dintre care cele mai importante sunt comutatoarele. Acestea reprezintă de fapt principala diferență față de BMS cu topologie de conectare statică și impactul acestora asupra timpului total de funcționare al sistemului este scopul acestui scenariu de simulare.

Cele mai relevante caracteristici ale comutatoarelor sunt timpii de tranziție între stările de conducție și rezistența electrică în conducție. Pentru scopul acestei simulări, dar și pentru a ne alinia cât mai mult la cerințele unui sistem exploatabil în practică, am modelat comutatoarele de tip semiconductor bazate pe tehnologia de fabricație MOSFET [104], [105]. Deoarece schimbarea stării sistemului (prin reconfigurare) se face doar la sfârșitul unui ciclu de încărcare sau descărcare, putem ignora timpii de tranziție/comutație. Astfel, singurul parametru de interes pentru scenariul de față rămâne rezistența electrică drenă-sursă a comutatorului în starea „deschisă” (în conducție), notat convențional cu $R_{DS(on)}$.

Existența unei rezistențe diferite de 0 în serie cu fiecare baterie componentă a grupului înseamnă o pierdere de putere efectivă, direct proporțională cu mărimea curentului prin acel element de circuit. Pe de altă parte, puterea utilă cerută de sarcină trebuie să rămână aceeași în ambele cazuri (cu sau fără influența $R_{DS(on)}$). Pentru grupul de acumulatori considerat, în care bateriile individuale sunt conectate în configurații paralel, vom avea următoarele relații:

$$P_{L1} = P_{L2} \rightarrow n \cdot P_{b1} = n \cdot P_{b2} - n \cdot P_R \quad (5-2)$$

Putem rescrie relația (5-2) pentru a evidenția faptul că puterea furnizată de baterii în cazul utilizării comutatoarelor, trebuie să fie mai mare decât în cazul inițial, pentru a compensa pierderea de putere amintită.

$$P_{b2} = P_{b1} + P_R \quad (5-3)$$

Deoarece modelul de estimare a degradării SOH utilizează curentul, nu puterea, ca parametru de intrare, putem rescrie relația (5-3) pentru a exprima curentul prin baterie în cazul comutatoarelor. Vom arăta astfel legătura între noul curent și rezistența de conducție.

$$P_{b2} = P_{b1} + R_{DS(on)} \cdot I_{b1}^2 \cdot \frac{1}{U_{nom}} \quad (5-4)$$

$$\frac{P_{b2}}{U_{nom}} = \frac{P_{b1}}{U_{nom}} + \frac{R_{DS(on)} \cdot I_{b1}^2}{U_{nom}} \quad (5-5)$$

$$I_{b2} = I_{b1} + \frac{R_{DS(on)} \cdot I_{b1}^2}{U_{nom}} \quad (5-6)$$

Semnificațiile mărimilor din relațiile de mai sus se regăsesc în tabelul Tabel 5-2. Cazul 1 reprezintă modul de funcționare în care nu există comutatorul conectat în serie, iar cazul 2 reprezintă funcționarea cu comutatorul conectat și aflat în stare de conducție.

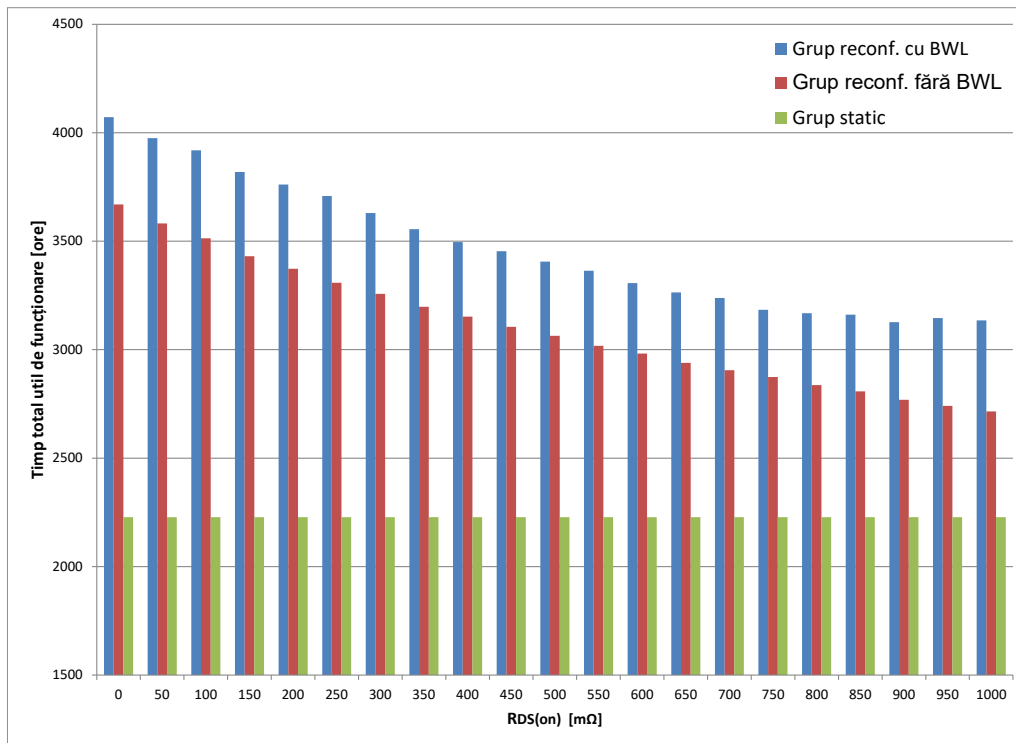
Tabel 5-2 Semnificația mărimilor utilizate în modelarea influenței $R_{DS(on)}$

Mărime	Semnificație
P_{L1}, P_{L2}	Puterea cerută de sarcină în cazul 1, respectiv 2
n	Numărul de baterii componente ale grupului
P_{b1}, P_{b2}	Puterea furnizată/primită de baterie, în cazul 1, respectiv 2
P_R	Puterea rezistivă a comutatorului în conducție
$R_{DS(on)}$	Rezistența în conducție a comutatorului MOSFET
I_{b1}, I_{b2}	Curentul ce trece prin bateria individuală în cazul 1, respectiv 2
U_{nom}	Tensiunea nominală a bateriei Li-Ion

Pentru acest scenariu, rata curentului de descărcare și încărcare a fost fixată la 16C, durata ciclului de descărcare este de 60 minute iar SOC_{start} a fost prescris la 75%. Rezultatele pot fi consultate în Fig. 5-8.

Variația $R_{DS(on)}$ a fost modelată pornind de la valoarea minimă de 50 mΩ, cu un pas de 50 mΩ, mergând până la un maxim de 1000 mΩ. Această plajă de variație a fost aleasă pentru a cuprinde majoritatea valorilor rezistenței drenă-sursă în conducție a comutatoarelor de tip MOSFET existente pe piață. Pe grafic au fost adăugate și rezultatele obținute pentru valoarea teoretică de 0 mΩ, pentru a avea o referință în a compara aceste rezultate cu cele prezentate în restul scenariilor de simulare. În modul de funcționare al BMS pentru un grup de acumulatori static, a fost aleasă o valoare de 100 mΩ pentru a reprezenta suma rezistențelor celorlalte elemente de circuit precum cablurile și nodurile rețelei electrice. Astfel, variația $R_{DS(on)}$ nu se aplică în acest caz iar pe grafic se poate observa că valoarea timpului total util de funcționare rămâne constantă.

Se poate observa scăderea timpului util de funcționare odată cu creșterea valorii $R_{DS(on)}$, ceea ce este de așteptat având în vedere relațiile (5-3) și (5-6). Se poate spune că bateriile suportă un stres (datorat curentului crescut) direct proporțional cu valoarea rezistenței menționate, performanța scăzând corespunzător. Un al doilea factor care duce la scăderea performanței BMS reconfigurabil este creșterea numărului mediu de baterii recrutate per ciclu de funcționare. Este interesant de remarcat că rata acestei creșteri atinge o limită datorită algoritmului de substituție a bateriilor pe baza diferenței SOH față de SOH mediu, în cazul BMS ce implementează metoda BWL. Astfel, ecartul dintre performanța celor 2 implementări de grupuri reconfigurabile se mărește în favoarea BMS cu BWL, începând de la valoarea de 750 mΩ pentru $R_{DS(on)}$. Această observație demonstrează încă o dată performanța optimă ce poate fi obținută prin implementarea metodei propuse, chiar și în condițiile unei valori foarte mari a rezistențelor cumulate ale elementelor auxiliare de circuit.

Fig. 5-8 Timpul total util de funcționare cu variația $R_{DS(on)}$

5.2. Variația parametrilor de calcul

Algoritmii care implementează principiile metodei propuse utilizează o serie de parametri de calcul, ale căror valori implicite au fost determinate experimental pentru a oferi o performanță optimă în cadrul simulărilor efectuate. În tabelul următor sunt enumerați acești parametri împreună cu valorile lor implicite, care au fost utilizate în toate simulările descrise în secțiunea anterioară. Semnificațiile parametrilor prezentați aici sunt detaliate în secțiunea 3.4.

Tabel 5-3 Lista valorilor implicite pentru parametrii de calcul

Parametru de calcul	Valoare implicită
Scor SOH-SOC - Ponderea SOH	0.5
Scor SOH-SOC - Ponderea SOC	0.5
SOH_{delta}	0.04

În cadrul acestei secțiuni, vor fi prezentate și discutate rezultatele unor simulări care au ca obiectiv studierea efectelor pe care le au variațiile parametrilor de calcul menționați mai sus. În toate simulările ce urmează, scenariul de test utilizat este următorul: valoarea SOC_{start} a fost setată la 75% și curentul de încărcare/descărcare maxim a fost fixat la o valoare de 16C.

Prin analiza rezultatelor obținute, se vor putea astfel trage concluzii și se vor putea efectua optimizări ale algoritmilor propuși. Aceste rezultate pot fi utile proiectanților de sisteme critice de stocare de energie bazate pe acumulatori Li-Ion.

5.2.1. Rezultate obținute prin variația scorului SOH-SOC

În acest scenariu am variat valoarea ponderii pentru SOH pe întreg intervalul $[0, 1]$, cu un pas de 0,1. Corespunzător acestei variații, valoarea ponderii pentru SOC are o evoluție descrescătoare, datorită relației dintre cele 2 componente, detaliată în secțiunea 3.4. Rezultatele sunt prezentate în Fig. 5-9.

În cazul aplicării metodei BWL complete, se poate remarca o variație semnificativă a timpului total de funcționare, în funcție de ponderile considerate. De asemenea, se poate identifica un maxim al curbei obținute prin unirea valorilor timpilor de funcționare, atunci când valoarea ponderii SOH este 0,1, respectiv când valoarea ponderii SOC este 0,9. În cazul grupului reconfigurabil care nu utilizează algoritmul de substituție specific metodei propuse, se poate remarca o variație mult mai redusă a performanței, dar și o tendință inversă, de creștere a timpului total util de funcționare odată cu creșterea SOH. Acest fenomen se traduce prin preferința de a selecta cu precădere bateriile având SOH mai mare. Creșterea observabilă a performanței poate fi explicată de condițiile de test, în care durata ciclului este mică în comparație cu sarcina stocată în baterii, astfel că acest mod de funcționare nu depinde efectiv de SOC. Cazul grupului static este prezentat aici drept referință, valoarea timpului total util de funcționare nemodificându-se, deoarece în acest mod de funcționare, scorul ponderat nu se calculează și nu se utilizează.

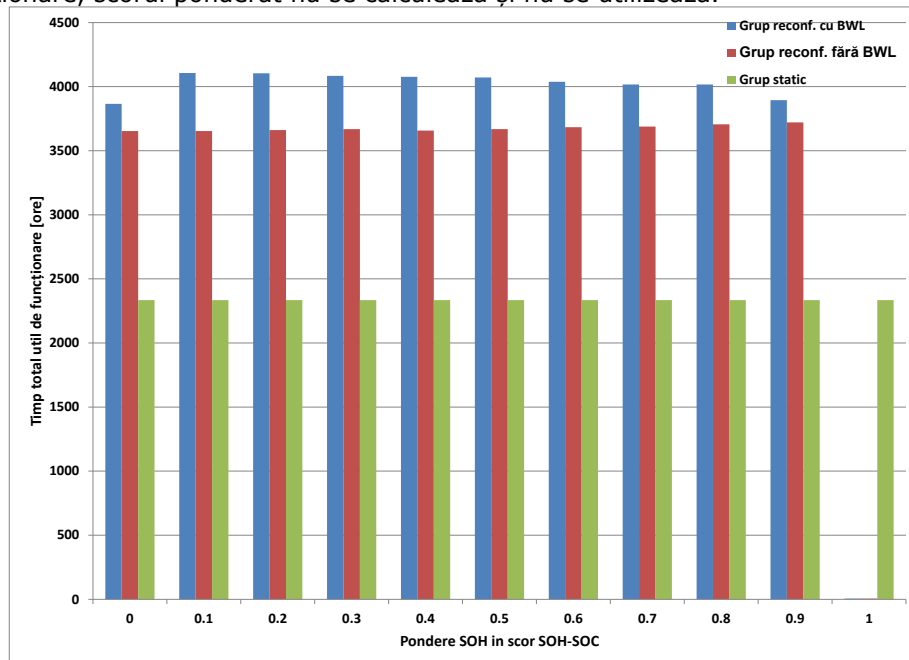


Fig. 5-9 Timpul total util de funcționare cu variația scorului SOH-SOC

5.2.2. Rezultate obținute prin variația parametrului *SOHdelta*

Parametrul *SOHdelta* este utilizat în cadrul algoritmului rulat în faza de descărcare a sistemului. Acest parametru determină pragul admis de deviație SOH al bateriei curente comparat cu SOH mediu al grupului din acel moment: orice depășire declanșează procesul de căutare a unei noi baterii care să o înlocuiască pe cea în cauză, dacă SOH al noii baterii se află sub pragul de deviație descris mai sus.

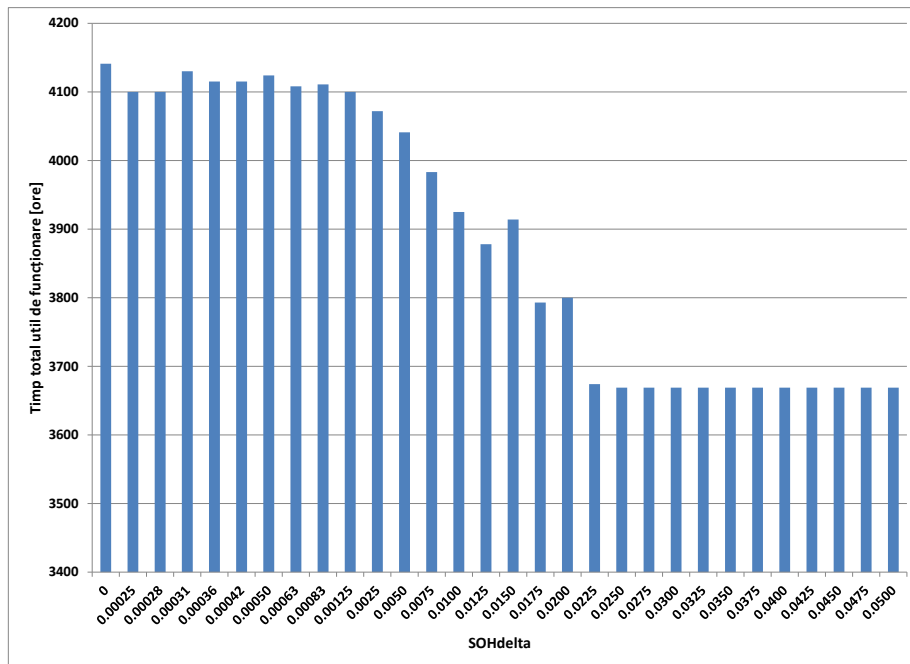
Mecanismul de comparație cu SOH mediu al grupului, căutarea și substituția reprezintă nucleul metodei BWL și transpunerea în domeniul grupurilor de acumulatori a principiului de Lazy Wear Leveling întâlnit în domeniul memoriilor flash și detaliat în [78] și [79]. Astfel, deoarece variația *SOHdelta* nu are niciun impact asupra celorlalte 2 moduri de funcționare, valorile obținute ale timpului total util de funcționare sunt constante, fiind de 3669 ore în cazul grupului reconfigurabil fără BWL, respectiv de 2334 ore în cazul grupului static.

În cadrul acestui scenariu de simulare, am efectuat două teste: în primul am crescut valoarea pragului iar în al doilea am scăzut-o, în vederea determinării unei valori optime, diferite de cea utilizată implicit în toate celelalte simulări. Pasul cu care variază valorile de intrare este de 0,0025 pentru valori mai mari decât valoarea implicită, iar pentru valori mai mici a fost ales un pas mai fin, mergând până la o valoare de 10 ori mai mică, respectiv 0,00025. Am utilizat și valoarea 0 pentru referință: în acest caz algoritmul va căuta bateria cu SOH mai mare decât SOH mediu, la limită pentru fiecare baterie utilizată în fiecare ciclu. Rezultatele se regăsesc agregate în Fig. 5-10.

Există mai multe concluzii interesante ce se pot trage din analiza graficului obținut. În primul rând, creșterea pragului de toleranță pentru variația SOH individual față de media grupului peste o valoare de 2% conduce practic la dezactivarea algoritmului de substituție BWL, deoarece toate bateriile din grup se încadrează în această marjă largă. Se observă astfel că pentru orice valoare a *SOHdelta* mai mare decât 0,02, timpul total util de funcționare devine egal cu cel obținut în modul de funcționare al unui grup reconfigurabil fără BWL. Acest fenomen se datorează utilizării de baterii noi, a căror variație de inițială a SOH este mică și distribuită aleator. Dacă dezechilibrul dintre bateriile componente ale grupului ar fi fost mai mare, BWL ar fi acționat în acest caz în sensul reducerii acestui dezechilibru.

Pe de altă parte, scăderea pragului de variație admisă pentru SOH individual conduce la o situație mai puțin evidentă din punct de vedere al performanței, deoarece se observă variații relativ mici ale timpului total util de funcționare pentru valorile mai mici decât cea implicită. Deși maximul teoretic și practic al performanței este obținut când pragul de variație devine 0, în practică acest lucru înseamnă și utilizarea maximă a puterii de procesare pentru algoritmul propus. Acest fapt se datorează rulării procesului de căutare a unei noi baterii având SOH mai mare decât media, în 5.13% din totalul rulărilor algoritmului de selecție a bateriilor. Spre comparație, în cazul utilizării valorii implicite a pragului, procesul de căutare și substituție a rulat doar în 0.41% din cazuri, pe durata de funcționare a grupului.

Se remarcă astfel o problemă de optimizare pentru proiectanții sistemelor de management a bateriilor bazate pe metoda BWL, și anume alegerea unei valori *SOHdelta* pentru un raport optim între puterea de procesare utilizată și performanță. De asemenea, în practică se poate dezvolta un algoritm prin care valoarea *SOHdelta* să fie actualizată adaptiv și dinamic, în timpul funcționării, pentru a atinge metricile de performanță cerute de aplicație.

Fig. 5-10 Timpul total util de funcționare cu variația *SOHdelta*

5.3. Analiza performanțelor pe un set de date extern

În literatură există mai multe seturi de date public disponibile, ce exemplifică degradarea bateriilor Li-Ion în diverse scenarii de funcționare. Unele dintre cele mai cunoscute și mai citate sunt cele oferite de NASA [116], [117], CALCE [118], [26], TRI [119] sau Universitatea Oxford [120]. În prezenta lucrare am ales unul dintre seturile de date puse la dispoziție de către Universitatea Oxford, pentru a rula pe acesta metoda propusă și a verifica gradul de îmbunătățire adus prin aplicarea acestei metode. Acest set de date a fost ales deoarece conține profile de încărcare și descărcare compatibile cu cele utilizate în prezenta lucrare pentru evaluarea performanței metodei BWL.

Setul de date Oxford energy trading [121] conține măsurători ale datelor de funcționare a 6 baterii Li-Ion care au fost utilizate într-un experiment din anul 2014 ce vizează identificarea unor strategii de tranzacționare a energiei electrice pe piața pentru ziua următoare (day-ahead market) din Belgia. Autorul lucrării amintite a înregistrat acest set de date pornind de la 3 variante optimizate ale unor modele de degradare a bateriilor descrise pe larg în teza sa de doctorat și în lucrare. Aceste variante sunt:

- optimizare pentru maximizarea venitului în cadrul modelului liniar (BMR)
- optimizare pentru maximizarea profitului în cadrul modelului liniar (BMP)
- optimizare pentru maximizarea profitului în cadrul modelului uni-particulă (SPM)

Pentru fiecare variantă de model s-au utilizat câte 2 baterii reîncărcabile cu capacitatea de 16Ah, de tip Kokam SLPB78205130H [122]. Setul de date amintit

conține atât profilele de curent pre-generate corespunzătoare ciclurilor de încărcare și descărcare, conform aplicării variantelor de modele amintite mai sus, cât și măsurătorile practice efectuate la intervale de timp variabile ale următorilor parametri: tensiune, curent, temperatura bateriei și temperatura ambiantă.

În vederea evaluării performanțelor metodei BWL pe setul de date amintit, primul pas a fost procesarea profilelor de curent măsurate pentru a calcula un curent mediu per ciclu. Apoi s-a trecut la modelarea tipului de baterie utilizat prin identificarea parametrilor acesteia (K_{co} , K_{ex} , etc.) pe baza datelor despre capacitatea bateriilor, măsurate lunar în cadrul experimentului. Rezultatele acestui proces se regăsesc în Fig. 5-11, care suprapune profilul de degradare identificat și calculat cu ajutorul modelului de degradare Millner, cu punctele măsurate, rezultând o aproximare satisfăcătoare a caracteristicilor bateriei modelate.

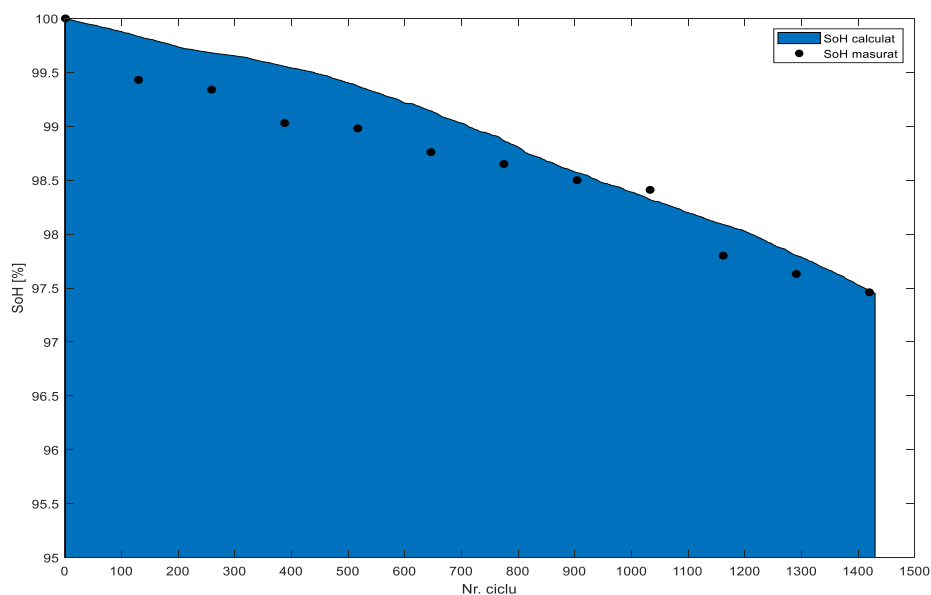


Fig. 5-11 SoH calculat vs măsurat pentru Kokam SLPB78205130H

Metoda propusă a fost implementată pe baza descrierii algoritmilor utilizați în fazele de încărcare și descărcare, din secțiunea 3.4. Totuși, au fost necesare unele modificări datorită caracterului eterogen al succesiunii ciclurilor: un ciclu de descărcare nu este urmat întotdeauna de un ciclu de încărcare.

Așa cum s-a arătat în secțiunea 3, eficiența metodei BWL este direct proporțională cu numărul de baterii din modul. Ca urmare, s-a ales un număr de 64 de baterii pentru acest studiu, fiecare având o valoare a SoH inițial generată aleator în intervalul [0,9; 1]. Valorile parametrilor K_{co} și K_{ex} au fost de asemenea generate într-o manieră asemănătoare.

În scenariul studiat s-a ales varianta de optimizare BMP pentru a fi comparată cu varianta echivalentă utilizând metoda BWL. În acest context, echivalența celor două cazuri presupune ca în fiecare ciclu să se aplice același curent la nivelul grupului de baterii și aceeași cantitate de energie furnizată în ciclurile de descărcare, pentru a obține o comparație corectă din punct de vedere funcțional. Comparația celor două cazuri a fost realizată din perspectiva procentului de degradare SoH în anumite momente de referință. Aceste momente au fost alese prin convenție, reprezentând

câte un ciclu aflat aproximativ la începutul, mijlocul, respectiv sfârșitul programului studiat. Rezultatele rulării celor două metode sunt prezentate mai jos sub formă tabelară.

Tabel 5-4 Procent degradare SoH – BWL vs. BMP

Nr. ciclu	Degradare SoH în cazul BWL [%]	Degradare SoH în cazul optimizării BMP [%]
343	0,42	0,66
819	0,94	1,35
1431	1,64	2,54

Se poate remarca încă de la primele cicluri că aplicarea metodei BWL generează un grad de degradare SoH semnificativ mai mic decât în cazul aplicării metodei utilizate la construirea setului de date Oxford energy trading. Un alt aspect interesant este că raportul dintre procentele de degradare obținute în cele două cazuri se stabilizează și rămâne cvasi-constant până la finalul programului de test.

Rezultatul obținut prin aplicarea metodei propuse poate fi explicat prin faptul că algoritmul de selecție a bateriilor va alege aproape în fiecare ciclu (funcție de cererea de putere) un număr de baterii cel mult egal cu numărul maxim disponibil, pentru a consuma aceeași cantitate de energie, la același curent echivalent la nivel de grup. Se poate astfel concluziona că metoda BWL obține rezultate mai bune decât algoritmul de maximizare a profitului elaborat de autorii setului de date studiat.

6. IMPLEMENTARE PRACTICĂ BMS BAZAT PE METODA BWL

6.1. Nucleul BMS și programul demonstrativ

Acest capitol prezintă detaliile de implementare a nucleului unui BMS bazat pe metoda BWL pe o serie de platforme hardware și software de tip PC și embedded cu consum redus de energie. Se vor descrie caracteristicile fiecărei platforme împreună cu particularitățile de configurare și de implementare. Se va face de asemenea o analiză comparativă în care se vor discuta avantajele și dezavantajele acestor implementări.

În capitolul anterior s-a introdus și s-a descris metoda BWL, atât la nivel de principii directe cât și prin detalierea algoritmilor componenți la nivel de pseudocod. Mai departe apare în mod natural necesitatea verificării și validării principiilor propuse. Ca urmare, metoda propusă a fost implementată practic într-un BMS minimal, menit să faciliteze un studiu de performanță cantitativ și calitativ asupra fezabilității acestui tip de implementare într-o aplicație critică de stocare de energie. Acest BMS, care este o soluție software dedicată, a fost proiectat și implementat cu respectarea principiilor enunțate în secțiunea 3.3.2.

Programul demonstrativ ce a fost rulat în cadrul studiului de performanță efectuat constă în aplicarea metodei BWL asupra unei serii de date ce cuprinde cicluri complete de încărcare și descărcare a bateriilor componente ale unui grup reconfigurabil, până la îndeplinirea condiției de terminare (SoH mediu al bateriilor componente ale grupului scade sub 70%). Datele înregistrate apriori conțin duratele și cerințele de putere pentru fiecare ciclu înregistrat. O sinteză a principalilor parametri utilizați în cadrul acestui studiu se regăsește în Tabel 6-1.

Tabel 6-1 Parametri de funcționare pentru programul demonstrativ

Parametru	Valoare	Observații
Număr de acumulatori per modul	64	Toți acumulatorii sunt conectați în paralel în cadrul unui modul
Capacitate nominală acumulator [Ah]	2.5	Model de acumulator simulat: LG M26
Curent mediu de descărcare	16C	Curentul la nivel de modul
Durăta medie ciclu descărcare [ore]	1.0	
Curent mediu de încărcare	16C	Curentul la nivel de modul
Durăta medie ciclu încărcare [ore]	1.1	

Pentru a obține o comparație cât mai fidelă și obiectivă a platformelor de implementare care vor fi descrise în cele ce urmează, am utilizat aceleași date de intrare și același cod sursă al funcției care implementează nucleul BMS-ului. Acesta a fost implementat și verificat inițial în mediul MATLAB.

Pentru atingerea obiectivului enunțat mai sus, condiția necesară a fost să se porteze codul sursă din mediul și limbajul MATLAB, într-un cod sursă echivalent scris în limbajul C. Suita de programe MATLAB oferă și aplicația MATLAB Coder [106], a cărei obiectiv principal este să genereze cod sursă C/C++ cât mai fidel pornind de la cod sursă MATLAB. În prezenta lucrare s-a ales această modalitate de lucru în

detrimentul portării manuale a codului sursă, datorită avantajelor de timp, corectitudine semantică și maturitate a soluției software MATLAB Coder.

Procesul de portare este format din următorii pași:

1. adaptarea și pregătirea codului sursă din MATLAB pentru portare
2. portarea efectivă prin generare de cod, din MATLAB în C
3. integrarea codului sursă al funcției nucleu în cadrul fiecărei platforme

Pasul 1 este necesar datorită unor limitări tehnice ale motorului de generare de cod din cadrul aplicației MATLAB Coder. Spre exemplu, a fost necesar să se rescrie calculul mediei SoH din vectorul de baterii, deoarece forma prescurtată utilizată în codul sursă MATLAB nu este suportată pentru generare de cod. De asemenea, declararea vectorului de structuri specifică implementării din MATLAB a trebuit să fie modificată pentru a inițializa fiecare element-structură într-o buclă.

În pasul 2 s-a realizat generarea de cod C cu ajutorul MATLAB Coder, după ce toate erorile raportate de aplicație au fost remediate. Aceste erori au fost cauzate cu precădere de refolosirea valorilor unor variabile din rulări anterioare ale buclei, sau care nu au fost inițializate în ambele ramuri ale expresiilor condiționale (*if, else*). Rezultatul generării de cod este o colecție de fișiere sursă și header, grupate ca module după următoarea regulă:

- funcția nucleu: *bwl_sim, bwl_sim_initialize, bwl_sim_terminate*
- funcții ajutătoare: *mean, mod, sort*, modulele de lucru cu numere în virgulă mobilă.

În pasul 3 s-a implementat un cod sursă cadru, un schelet funcțional care să permită rularea în bune condiții a funcției nucleu și a funcțiilor ajutătoare. Scopul acestui pas este să realizeze adaptările necesare astfel încât codul nucleu să poată fi utilizat nemodificat în toate platformele pentru care s-a generat codul sursă în limbajul C. Acest cod sursă cadru este diferit și specific fiecărei platforme în parte.

Un alt obiectiv a fost dezvoltarea și integrarea unui cod sursă de instrumentație; spre exemplu, a fost necesar un mecanism pentru măsurarea timpului de rulare al codului sursă de interes. Acesta este diferit pentru fiecare platformă, datorită facilităților suportate de platformele respective.

Concluzia acestei etape de portare semi-automatizată și adaptare a programului demonstrativ dezvoltat în MATLAB este că acest proces este fezabil și reduce mult timpul de evaluare a noilor algoritmi, comparativ cu metoda manuală de portare. În cele ce urmează vor fi trecute în revistă caracteristicile și detaliile de implementare specifice fiecărei platforme în parte.

6.2. Platforme HW și SW pentru implementare

Pentru evaluarea fezabilității și a performanțelor unui sistem BMS bazat pe metoda BWL, am ales câteva platforme hardware-software de referință. Caracteristicile acestor platforme acoperă o plajă largă de variație a performanțelor în termeni de timp de execuție, de memorie ocupată și de energie proprie consumată, oferind informații practice care se pot dovedi relevante celor care vor dori să implementeze metoda propusă într-un sistem funcțional.

În cele ce urmează se vor descrie principalele caracteristici ale platformelor de implementare alese, precum și motivațiile acestor alegeri.

6.2.1. MATLAB pe platforma Windows x86_64

MATLAB este un mediu de dezvoltare proprietar și comercial, specializat pe calcule numerice și care în prezent poate fi rulat pe cele mai comune sisteme de operare pentru PC: Windows, macOS și GNU/Linux. MATLAB este utilizat în principal de către persoane din mediile științifice, ingineresti și economice, pentru calcule ce implică manipularea matricilor, implementarea și simularea algoritmilor și trasarea de grafice.

MATLAB denumeste de asemenea și limbajul de programare specializat, ce este interpretat de către mediul de execuție bazat pe Java Virtual Machine (JVM). Printre caracteristicile acestui limbaj putem enumera:

- suportă mai multe paradigme de programare: imperativ, procedural, funcțional, orientat pe obiecte;
- variabilele suportă o alocare dinamică a tipurilor, nefiind necesară declararea explicită a acestora la inițializare;
- oferă toate facilitățile unui limbaj de programare complet: operatori aritmetici, relaționali și logici, instrucțiuni de ciclare și execuție condiționată, conversia tipurilor de date, interfațarea cu sistemul de operare, etc.

În această lucrare am utilizat MATLAB R2019b pentru calcule, simulări și grafice necesare în vederea implementării practice a metodei BWL și rularea acestei implementări pe mai multe seturi de date.

6.2.2. GNU/Linux WSL pe platforma x86_64

Sistemul de operare GNU a fost dezvoltat începând din anul 1984 pornind de la o idee de bază: dezvoltarea unui sistem complet funcțional și compatibil la nivel de comenzi cu Unix, dar fără constrângerile de copyright; cu alte cuvinte, s-a dorit dezvoltarea unui sistem de operare complet liber (free software) pentru utilizatori [107]. În anul 1991, Linus Torvalds a publicat prima versiune a nucleului de execuție dezvoltat de acesta, făcând astfel primul pas spre dezvoltarea sistemului complet funcțional GNU/Linux. La momentul actual există foarte multe variante ale acestui sistem de operare (numite distribuții), ce rulează pe o plajă foarte largă de platforme hardware: de la sisteme embedded mergând până la sisteme multiprocesor formate din mii de exemplare, aflate în centrele de date, spre exemplu.

În ultimii ani, sistemul de operare Microsoft Windows a evoluat pentru a permite utilizatorilor profesioniști dezvoltarea și rularea de aplicații GNU/Linux fără interfață grafică direct pe această platformă. Această facilitate se numește Windows Subsystem for Linux (WSL) și la momentul actual se află la versiunea 2 [108]. Principalul avantaj este că permite rularea și încercarea aplicațiilor într-un mediu GNU/Linux nativ, înainte de a instala și de a rula aplicația la scară largă (într-un mediu GNU/Linux server, spre exemplu). Un alt aspect pozitiv este performanța: WSL2 necesită mai puține resurse de procesare decât alternativa instalării unei mașini virtuale pe sistemul Windows.

Implementarea programului demonstrativ de încărcare-descărcare bazat pe metoda BWL a fost facilitată de gestionarea fișierelor sursă cu suita de unelte CMake [109]. CMake este utilizat pentru a controla procesul de compilare prin fișiere de configurare scrise de către utilizator, urmând ca din acestea să se genereze mediul de compilare specific platformei dorite; în cazul prezentei lucrări, acest mediu este gcc, dar CMake oferă suport pentru multe alte platforme și configurații.

Visual Studio Code se integrează cu uneltele CMake și cu suita de compilare, ca urmare programul a putut fi compilat și rulat direct din acest editor. Pentru măsurarea parametrilor de timp, programul a fost rulat într-o buclă construită prin implementarea unui script Bash, iar rezultatele au fost scrise direct în fișierul standard de ieșire, de unde au fost citite și procesate.

6.2.3. GNU/Linux pe platforma Raspberry Pi ARMv8-A 64

Raspberry Pi (RPi) este o gamă de calculatoare miniaturale dezvoltate de către fundația Raspberry Pi în Marea Britanie [110]. Caracteristica principală a acestei platforme este dimensiunea redusă, fapt ce a permis asamblarea unui calculator complet funcțional, format din procesor, memorie RAM, Flash, periferice și interfețe de intrare-ieșire, pe o singură placă electronică. Astfel acest dispozitiv face parte din categoria Single Board Computer (SBC). Datorită prețului redus, a cerințelor modeste de energie dar și a multitudinii de periferice cu care se poate interacționa cu dispozitive externe (SPI, UART, CAN, etc.), poate fi clasificat ca un sistem embedded; pe de altă parte, ultimul model RPi 4 dispune de un microprocesor cu 4 nuclee ARM Cortex-A72 la 1.5GHz, minim 2GB RAM, conectivitate Gigabit Ethernet, 2 porturi USB 3.0 și 2 porturi micro-HDMI pentru ieșire video, ceea ce permite exploatarea acestuia ca un calculator personal de sine stătător.

Primul model a fost lansat în anul 2012 cu scopul de a oferi o platformă cu cost redus pentru predarea fundamentelor de programare și competențe digitale în școli din medii defavorizate. Încă de la început, platforma a cunoscut o popularitate neașteptată și ieșită din comun, fiind folosită în aplicații extrem de diverse, printre care putem aminti: automatizare casnică, robotică, server web, etc.

În ceea ce privește software-ul, sistemul de operare oficial suportat este Raspberry Pi OS, o variantă specializată și adaptată de către producători a Linux Debian pe 32 biți. Există de asemenea o multitudine de alte sisteme de operare ce pot rula pe RPi, atât bazate pe GNU/Linux (Ubuntu, openSUSE, Gentoo Linux, CentOS, OpenWRT, etc.), cât și altele ce nu sunt bazate pe GNU/Linux, cum ar fi Windows 10 IoT Core, FreeBSD sau RISC OS. Limbajele de programare suportate oficial sunt Python și Scratch (pentru scopuri educaționale), dar RPi poate deveni de asemenea un mediu versatil pentru dezvoltare de aplicații C/C++ native, prin instalarea și utilizarea suitei de compilatoare GNU gcc.

Pentru implementarea pe RPi a programului demonstrativ bazat pe metoda BWL au fost necesare câteva acțiuni premergătoare:

- instalarea și actualizarea sistemului de operare Raspberry Pi OS
- configurarea conexiunii internet a RPi pentru a putea fi accesată de la distanță prin protocolul ssh
- instalarea și configurarea extensiei Remote Development pentru Visual Studio Code, ceea ce permite dezvoltarea, compilarea și rularea programului dat, direct pe platforma gazdă – RPi.

În Fig. 6-1 este prezentat exemplarul Raspberry Pi Model 3B rulând programul demonstrativ – BMS bazat pe metoda BWL.



Fig. 6-1 BMS propus rulând pe platforma Raspberry Pi

Datorită utilizării unui sistem de operare de tip GNU/Linux, s-au putut refolosi același proces și aceleași unelte de organizare și compilare a codului sursă ca și în cazul platformei WSL. Rezultatele au fost obținute utilizând același script Bash iar ulterior au fost citite și procesate.

6.2.4. Platforma Nordic nRF ARM Cortex-M4F

Placa de evaluare nRF52840 DK [111] este un modul HW versatil care permite dezvoltarea de aplicații ce folosesc cele mai importante facilități suportate de microcontrollerul principal: Bluetooth, NFC, Zigbee. Este de asemenea compatibilă cu standardul Arduino și suportă conectarea unor plăci de extensie specifice acestei platforme (shields). Modulul poate fi alimentat dintr-o baterie de tip CR2032 sau direct din USB, simplificând astfel procesul de evaluare; include și pini dedicați pentru măsurarea curentului consumat, deoarece aplicațiile țintă ale acestui microcontroler includ sisteme cu consum redus, alimentate de la baterie.

Microcontrolerul nRF52840 face parte din seria nRF52 de la Nordic, ce include 7 modele la momentul elaborării prezentei lucrări, toate fiind bazate pe un microprocesor cu nucleu ARM Cortex-M4 cu unitate dedicată pentru accelerarea calculelor în virgulă mobilă (FPU). Circuitul include și un modul de accelerare a funcțiilor criptografice, ce poate rula independent de microprocesor și care este necesar pentru aplicațiile actuale care trebuie să ofere un grad sporit de siguranță a datelor. Performanțele acestui microcontroler sunt completate de cerințele foarte scăzute de energie electrică, datorate unui sistem avansat de management al puterii.

Din punct de vedere software, producătorul oferă un software development kit (SDK) foarte cuprinzător. Printre facilitățile sale putem aminti: profile Bluetooth Low Energy (BLE), drivere pentru toate perifericele, inclusiv cele externe prezente pe placa de evaluare, actualizarea programului curent, etc. Pentru dezvoltarea aplicației BMS propusă, am ales mediul de dezvoltare PlatformIO, ce se integrează cu editorul

Visual Studio Code. Cel mai mare avantaj al PlatformIO este că acesta integrează și configurează toate dependențele necesare proiectului, simplificând astfel procesul deseori anevoios de configurare inițială a mediului de lucru. În plus, oferă și facilități de rulare în timp real pe platforma hardware aleasă, de rezolvare a erorilor și de analiză statică de cod și de memorie. Pentru configurația Nordic nRF52840, PlatformIO suportă 3 tipuri de platforme software: Arduino, ARM Mbed și Zephyr RTOS. Acestea au fost evaluate din punct de vedere al ușurinței de configurare și al suportului pentru biblioteca de calcule matematice; rezultatul a fost alegerea platformei Arduino pentru implementarea practică.

În Fig. 6-2 este prezentat exemplarul nRF52840 rulând programul demonstrativ – BMS bazat pe metoda BWL.



Fig. 6-2 BMS propus rulând pe platforma nRF52840

Implementarea programului demonstrativ bazat pe metoda BWL a fost realizată fără dificultate, deoarece funcția nucleu *bwl_sim()* a fost apelată și executată repetat direct din funcția *loop()*, specifică platformei Arduino. Atât pentru funcțiile matematice cât și pentru funcționalitatea de comunicație pe interfața UART a fost suficientă includerea fișierului *Arduino.h*, deoarece acesta include și configurează cele mai comune facilități HW și SW ale kitului de evaluare pe care rulează.

6.2.5. Platforma EFM32GG ARM Cortex-M3

Platforma EFM32GG-STK3700 [112] este o placă de evaluare ce prezintă multiple posibilități de familiarizare cu facilitățile oferite de microcontrolerul Silicon Labs EFM32 Giant Gecko, dar și cu senzorii și perifericele externe. Placa integrează un emulator Segger J-Link, ceea ce permite rularea și verificarea programelor fără nevoia unor alte unelte externe. Alte facilități ce merită amintite sunt monitorizarea avansată a curentului consumat, alimentare versatilă din surse multiple (USB, baterie sau din emulator), butoane și LED-uri accesibile utilizatorilor, senzor de lumină ambientală.

EFM32 Giant Gecko a fost unul dintre cele mai eficiente microcontrolere la nivel mondial la data lansării acestuia, din punct de vedere al consumului de energie. Consumul în modul activ este de 180 $\mu\text{A}/\text{MHz}$, dar coboară până la 0.6 μA în total, în

modul de funcționare EM3-Stop. Construit pe baza nucleului ARM Cortex-M3 pe 32 biți la 48MHz, circuitul conține o sumedenie de interfețe de comunicație, un modul criptografic, contoare timer și interfețe analogice precum ADC, DAC, amplificator operațional. Circuitul se pretează astfel pentru aplicații embedded cu cerințe stricte de energie, dar care necesită și o performanță operațională relativ ridicată.

Mediul de dezvoltare creat și suportat de către producător se numește Simplicity Studio. Acesta integrează suportul pentru toate produsele din spectrul IoT și System-on-Chip ale producătorului. Deoarece a fost proiectat pentru a simplifica modul de lucru al dezvoltatorilor de software embedded, pachetul integrează un mediu de dezvoltare bazat pe Eclipse și suita de compilare gcc, oferă diverse unelte de configurare a proiectelor și un SDK cu proiecte exemplu pentru fiecare dispozitiv suportat.

Pentru implementarea programului demonstrativ bazat pe metoda BWL, am pornit de la proiectul exemplu sleeptimer_baremetal. Acest proiect a fost ales deoarece:

- are puține dependențe externe, nefiind bazat pe un sistem de operare
- oferă suportul necesar pentru redirectarea ieșirii funcției printf() direct spre interfața UART

În Fig. 6-3 este prezentat exemplarul EFM32GG-STK3700 rulând programul demonstrativ – BMS bazat pe metoda BWL.

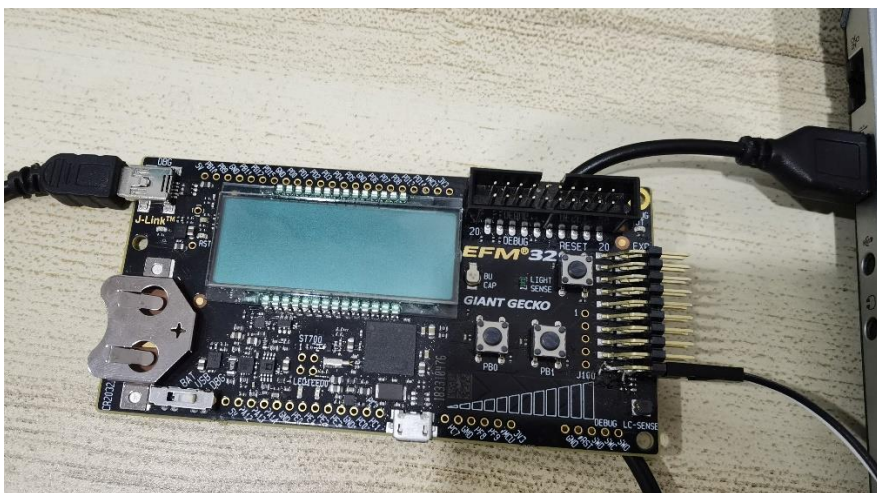


Fig. 6-3 BMS propus rulând pe platforma EFM32GG-STK3700

Pe parcursul implementării și verificării software nu au fost întâmpinate probleme deosebite iar măsurătorile de timp de execuție au fost efectuate prin citirea directă a rezultatelor recepționate pe PC prin adaptorul USB-UART integrat pe placa de dezvoltare.

6.2.6. Analiză comparativă a platformelor de implementare

Tabelul Tabel 6-2 prezintă sintetic cei mai relevanți parametri hardware și software ai platformelor alese în această lucrare pentru implementarea unui BMS

bazat pe BWL. De asemenea, în tabel se regăesc principalele caracteristici de performanță și de resurse necesare exploatării în condiții normale a acestor platforme.

Tabel 6-2 Sinteza platformelor de implementare BMS

Platforma	MATLAB/ Windows	GNU/Linux WSL	Raspberry Pi	Nordic nRF	EFM32GG	
Hardware	Model	Lenovo ThinkPad T460p 20FWS0BM00	Lenovo ThinkPad T460p 20FWS0BM00	Raspberry Pi 3 Model B	Nordic Semiconductor nRF52840 DK	Silicon Labs EFM32GG-STK3700
	Format fizic	PC standard (laptop)	PC standard (laptop)	SBC	Placă de evaluare	Placă de evaluare
	Dimensiuni [mm]	339 x 235 x 24,4	339 x 235 x 24,4	56,5 x 85,6 x 17	136,5 x 63,5 x 12	89 x 65 x 12
	CPU	Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ @2.60 GHz 64-bit	Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ @2.60 GHz 64-bit	Broadcom BCM2837 @1.2GHz ARM Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit	Nordic Semiconductor nRF 52840 @ 48MHz ARM Cortex-M4F 32-bit	Silicon Labs EFM32GG990 F1024 @ 48MHz ARM Cortex-M3 32-bit
	RAM	8.0GB DDR4	8.0GB DDR4	1.0GB LPDDR2	256KB (intern)	128KB (intern)
	Spațiu stocare	SSD 256GB	SSD 256GB	microSD max. 128GB	Flash 1MB (intern) 8MB QSPI (extern)	Flash 1MB (intern) 32MB NAND (extern)
	Interfețe intrare/ieșire	3xUSB3.0 4-in1 card reader HDM mini DP	3xUSB3.0 4-in1 card reader HDM mini DP	4xUSB 2.0 HDMI	4 butoane 4 LED	2 butoane 2 LED LCD 160 segmente
	Interfețe comunicație	WiFi 802.11ac LAN 1Gb Bluetooth	WiFi 802.11ac LAN 1Gb Bluetooth	WiFi 802.11n LAN 10/100Mbit Bluetooth 4.1, BLE Extensie GPIO 40 pini	Bluetooth 5.2, BLE Extensie GPIO 63 pini	Extensie GPIO 20 pini
	Preț [euro]	1600	1600	45	40	90
Software	Windows 10 20H2 64-bit x86_64	Ubuntu 20.04.2 LTS (GNU/Linux 5.4.72-microsoft-standard-wsl2 x86_64)	Raspberry Pi OS GNU/Linux 4.9.59-v7 armv7l	Absent / platforma Arduino personalizată	Absent	

	Mediu de dezvoltare	MATLAB R2019b	Microsoft Visual Studio Code cu extensia Remote Development	Microsoft Visual Studio Code cu extensia Remote Development	Microsoft Visual Studio Code cu extensia PlatformIO	Silicon Labs Simplicity Studio 5
	Suita de compilare	MATLAB v9.7	gcc9.3.0 x86_64	gcc8.3.0 arm-linux-gnueabi	gcc7.2.1 arm-none-eabi	gcc7.2.1 arm-none-eabi

6.3. Analiză comparativă a rezultatelor obținute

În vederea evaluării în practică a performanțelor nucleului unui BMS bazat pe *BWL*, a fost necesară elaborarea și alegerea unor criterii și metrici obiective, care să nu fie specifice unei anumite implementări și care să fie măsurabile și repetabile. Acest scop este îngreunat de faptul că platformele de implementare sunt eterogene și diferite între ele cu ordine de mărime, în ceea ce privește puterea de procesare, dar și privind alte caracteristici care vor fi detaliate în cele ce urmează.

Pornind de la cerințele discutate anterior, s-a decis alegerea următoarelor 3 metrici de performanță pentru evaluarea platformelor considerate:

1. timpul de execuție
2. memoria ocupată
3. energia consumată.

Timpul de execuție este invers proporțional cu viteza de execuție a microprocesorului care rulează programul dat. Pe de altă parte, această relație nu este liniară, deoarece unele microprocesoare mai performante conțin mai multe nuclee de execuție, utilizează memorie cache, etc. Din aceste motive măsurarea timpului de execuție, nu a vitezei microprocesoarelor, este o metrică de performanță mai relevantă.

Spațiul de memorie este o resursă limitată, iar acest lucru devine cu atât mai evident cu cât sistemele embedded sunt mai limitate în resurse. Pentru aceste sisteme este important ca implementarea unui BMS să fie cât mai eficientă din punct de vedere al resurselor ocupate, pentru a permite efectuarea cu succes a restului funcțiilor unui astfel de sistem; spre exemplu, monitorizarea diferitelor tipuri de senzori sau menținerea și actualizarea unui jurnal al evenimentelor apărute pe parcursul funcționării.

Energia proprie necesară funcționării este importantă mai ales în cazul destul de comun în care sistemele de monitorizare a grupurilor de acumulatori sunt alimentate direct din aceștia. O amprentă de energie consumată cât mai mică este vitală pentru asigurarea unei eficiențe ridicate în exploatare și pentru creșterea autonomiei de funcționare a sistemului de stocare de energie în ansamblul său.

Tabelul următor prezintă sintetic cele mai relevante rezultate ale măsurărilor efectuate în cadrul studiului amintit. Rezultatele au fost obținute pe baza aplicării parametrilor descriși în secțiunea 6.1 pentru fiecare implementare și platformă în parte. De asemenea, pentru fiecare platformă distinctă, s-a rulat programul demonstrativ de 20 ori, rezultatele finale fiind calculate ca media aritmetică a datelor din toate rulările.

Tabel 6-3 Rezultatele studiului de performanță BMS

Criteriu de performanță	Platforma				
	MATLAB/ Windows	GNU/Linux WSL	Raspberry Pi	Nordic nRF	EFM32GG
Timpul de execuție [s]	12.5 - 13.5	0.035 - 0.041	0.297 - 0.518	23.17 - 23.19	95.7
Memoria ocupată RAM/ROM [kB]	302.4 / 29.1	5.5 / 25.0	5.3 / 19.1	5.3 / 21.8	5.4 / 16.8
Energia consumată [J]	210-226	0.59 - 0.69	0.42-0.74	9.47 - 9.48	6.8

Un prim aspect ce se poate remarca este faptul că cerințele de memorie și de energie ale platformei MATLAB/Windows sunt cu cel puțin un ordin de mărime mai mari decât ale celorlalte configurații. Pe această platformă a fost dezvoltată metoda BWL și este adăugată în această listă doar ca referință; ea nu constituie o opțiune viabilă pentru o implementare practică a BMS. Scopul comparației cu această platformă este evaluarea gradului de optimizare adus de celelalte implementări în limbajul C.

A doua configurație ce rulează pe un sistem de tip desktop PC, și anume GNU/Linux WSL, este și cea mai performantă din punctul de vedere al timpului de execuție, ceea ce este de așteptat având în vedere că aplicația este compilată nativ și această platformă deține cea mai mare putere de procesare. Se observă că memoria consumată este aproximativ egală cu celelalte platforme în care aplicația a fost compilată nativ din limbajul C. La acest capitol, merită menționate două caracteristici, care derivă din particularitățile de implementare a metodei propuse:

- din totalul memoriei ROM ocupate, 12kB reprezintă cele 3 tablouri de 1024 valori în virgulă mobilă de simplă precizie, utilizate pentru datele de intrare;
- mai mult de 90% din memoria RAM este alocată pe stivă, datorită regulilor implicite de generare de cod C ale MATLAB Coder.

Ultimele 3 coloane din tabelul cu rezultate conțin datele obținute pe cele 3 platforme embedded. Dintre acestea, platforma Raspberry Pi se detașează clar pe primul loc la toate capitolele, urmată de Nordic nRF, respectiv EFM32GG. Datorită lipsei unității hardware de virgulă mobilă, platforma EFM32GG are cel mai mare timp de execuție, la un consum de energie comparabil cu Nordic nRF. Ca urmare, nu reprezintă o opțiune viabilă pentru un BMS în aplicațiile țintite de prezenta lucrare.

Deși prețurile platformelor hardware RPi și Nordic nRF sunt asemănătoare, trebuie remarcat că un BMS optimizat din punct de vedere hardware poate fi construit mai ieftin bazat pe platforma Nordic nRF decât pe RPi, datorită componentelor auxiliare mai puține (Flash și RAM extern, surse de alimentare, etc.). Pe de altă parte, flexibilitatea, extensibilitatea și multiplele opțiuni de comunicație oferite de RPi fac din aceasta alegerea potrivită în cazul unui BMS complex, conectat la alte sisteme externe și controlabil de la distanță.

7. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE

7.1. Concluzii

Lucrarea de față a prezentat principiile unei noi metode pentru minimizarea degradării bateriilor Li-Ion, în aplicații critice de stocare de energie. Mai întâi a fost efectuat un studiu amplu în vederea descrierii și analizării stării actuale a cercetării în domeniile conexe prezentei lucrări: metode de estimare SOH, sisteme reconfigurabile de stocare de energie, sisteme de management a bateriilor.

În literatură sunt prezentate mai multe metode și abordări pentru reducerea degradării bateriilor din grupurile de acumulatori. O cauză importantă a degradării o constituie dezechilibrul între parametrii funcționali ai bateriilor componente. Este necesar astfel ca în faza de proiectare să se prevadă mecanisme de echilibrare pasivă sau activă a grupului. În unele situații, cu toate măsurile de asigurare a funcționării în parametrii normali ai sistemului de stocare, se constată că grupul de acumulatori este de multe ori utilizat la o capacitate mult mai mică decât cea nominală. Acesta este un alt motiv care poate duce la o degradare accelerată, întrucât majoritatea sistemelor de acest tip este bazată pe o topologie de conectare statică. O soluție posibilă este adoptarea unei topologii reconfigurabile, pentru adaptarea la cerințele variabile ale sarcinii. În acest domeniu relativ nou au fost propuse mai multe variante de topologii, cu diferite grade permise de reconfigurare. Unele lucrări au demonstrat rezultate notabile în reducerea degradării bateriilor în grupuri reconfigurabile de acumulatori, dar performanțele pot fi semnificativ îmbunătățite în continuare.

Principala concluzie a studiului efectuat este că problema maximizării duratei de viață a sistemelor critice de stocare de energie concomitent cu reducerea costului total de utilizare în literatură este incomplet rezolvată. Ca urmare, se impun cercetări suplimentare pentru descoperirea de noi metode pentru atingerea acestor obiective.

Pornind de la ideea analogiei dintre memoriile flash și grupurile de acumulatori, s-a realizat o evaluare critică pentru identificarea posibilității de aplicare a metodelor de wear leveling în domeniul grupurilor de acumulatori. Rezultatul este alegerea metodei LWL ca bază pentru dezvoltarea noului metodei propuse, BWL. Metoda a fost integrată într-un BMS iar pentru evaluarea sistemului s-a elaborat o metodologie cuprinzătoare. S-a realizat o clasificare riguroasă a parametrilor de simulare necesari pentru acoperirea celor mai relevante scenarii de funcționare în practică. Analiza performanțelor obținute prin simularea variației fiecărui parametru considerat relevă superioritatea netă a metodei propuse.

În lucrarea de față, metoda BWL a fost caracterizată complet din punct de vedere principial și practic. Teza demonstrează astfel că o idee neconvențională precum adaptarea și aplicarea unor principii utilizate în domeniul memoriilor flash pentru maximizarea duratei de viață a bateriilor din grupurile de acumulatori a condus la rezultate inovatoare.

7.2. Sinteza contribuțiilor

Observarea și studierea analogiei dintre tehnologia memoriilor flash și a grupurilor de acumulatori în ceea ce privește reducerea degradării au condus la elaborarea unei metode noi pentru minimizarea degradării bateriilor Li-Ion, bazată pe reconfigurarea grupului și pe uniformizarea inspirată din algoritmi de garbage collection și wear leveling specifici memoriilor flash.

În cele ce urmează vor fi reluate principalele obiective ale activității de cercetare care stă la baza acestei lucrări, cu prezentarea succintă a contribuțiilor care demonstrează gradul de îndeplinire a obiectivelor propuse.

[O1]. Elaborarea unei metode pentru maximizarea duratei de viață a bateriilor reîncărcabile în sisteme de stocare de energie utilizate în aplicații critice.

Îndeplinirea acestui obiectiv este evidențiată prin următoarele contribuții, care s-au materializat inclusiv prin publicarea articolelor științifice [A1], [A3] și [A4]:

- Analizarea și prezentarea principalelor modele pentru estimare și predicție SOH din literatură.
- Analizarea și prezentarea domeniului grupurilor reconfigurabile de acumulatori.
- Analizarea și prezentarea principalelor metode pentru uniformizarea degradării la memoriile Flash.
- Sintetizarea unui tabel comparativ privind analogia "grup de acumulatori" – "memorie flash" și argumentarea soluțiilor aplicabile la ambele tehnologii.
- Descrierea principiilor noii metode propuse cu detalierea algoritmilor utilizați.
- Elaborarea și argumentarea criteriilor de performanță și a scenariilor de simulare pentru evaluarea noii metode cu cele existente în literatură.
- Demonstrarea detaliată a fezabilității modelului ales de degradare a SOH pentru baterii Li-Ion.

[O2]. Elaborarea unui sistem programabil de management a bateriilor reîncărcabile (BMS) în vederea reducerii costului total de utilizare.

Îndeplinirea acestui obiectiv este evidențiată prin următoarele contribuții, care s-au materializat inclusiv prin publicarea articolelor științifice [A1] și [A3].

- Analiza și sinteza principiilor de funcționare și a arhitecturilor sistemelor BMS existente.
- Prezentarea comparativă a principalelor sisteme BMS descrise în literatură, cu evidențierea avantajelor și problemelor nerezolvate.
- Descrierea detaliată a algoritmilor de încărcare și descărcare pentru un grup reconfigurabil de acumulatori ce utilizează metoda BWL.
- Proiectarea detaliată a unui sistem de management pentru grupuri reconfigurabile de acumulatori ce utilizează metoda BWL.
- Evaluarea performanței sistemului de management ce integrează metoda propusă, în 9 scenarii diferite de funcționare, elaborate în funcție de variația parametrilor metodei propuse.
- Prezentarea și discutarea rezultatelor obținute.
- Compararea rezultatelor între BMS propus și alte două variante BMS de referință, pentru fiecare scenariu de test descris și discutat.

- Evaluarea performanțelor sistemului de management pe un set de date public și confirmarea performanțelor superioare ale metodei propuse, comparativ cu algoritmul dezvoltat de autorii setului de date.
- Implementarea și adaptarea BMS pe 3 platforme embedded cu consum redus de energie (Raspberry Pi, Nordic nRF și Silicon Labs EFM32).
- Comparația performanțelor acestor implementări embedded cu alte 2 implementări pe platforma desktop PC.

Contribuțiile enumerate mai sus au condus la îndeplinirea obiectivelor enunțate în planul programului de cercetare.

În plus față de cele descrise, pe parcursul cercetării doctorale autorul a mai colaborat la elaborarea unei metode inovatoare de estimare SOH bazată pe tehnici avansate de învățare, în domeniul rețelelor neuronale recurente. Această activitate s-a materializat prin publicarea lucrării [A2].

7.3. Perspective de dezvoltare

O direcție posibilă pentru dezvoltare ulterioară este evaluarea impactului topologiei de reconfigurare asupra performanțelor, prin studierea mai multor configurații de conectare serie-paralel. Este important de analizat impactul implementării fizice a unui astfel de sistem, cum ar fi rezistența cumulată a comutatoarelor, posibilitatea apariției arcului electric, etc.

Cercetarea efectuată pentru elaborarea lucrării de față poate fi de asemenea continuată prin elaborarea practică hardware și software a unui sistem programabil de management a bateriilor reîncărcabile, care să se implementeze metoda BWL. Se vor putea astfel studia aspecte ce țin de funcționarea practică a unui astfel de sistem, cum ar fi optimizări HW/SW, analiza costurilor de implementare și exploatare, și altele.

8. REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

- [1] M. Hocking, J. Kan, P. Young, C. Terry, D. Begleiter, "Welcome to the Lithium Age", Deutsche Bank AG, Sydney, Australia, Market Research Report-9, May. 2016
- [2] T. Bunsen, P. Cazzola, M. Gorner, L. Paoli, S. Scheffer, R. Schuitmaker, J. Tattini, J. Teter, "Global EV Outlook 2018: Towards cross-modal electrification.", May. 2018.
- [3] T. Bunsen, P. Cazzola, L. d'Amore, M. Gorner, S. Scheffer, R. Schuitmaker, H. Signollet, J. Tattini and J. Teter, "Global EV Outlook 2019: Scaling-up the transition to electric mobility", Paris, France, EIA, May. 2019
- [4] L. Ungurean, G. Cârstoiu, M. V. Micea, and V. Groza, "Battery state of health estimation: a structured review of models, methods and commercial devices," *Int. J. Energy Res.*, vol. 41, no. 2, pp. 151–181, Feb. 2017.
- [5] Panasonic Lithium Ion NCR18650 battery datasheet, Panasonic Corporation, Japan, 2012
- [6] B. Aksanli, T. Rosing, and E. Pettis, "Distributed battery control for peak power shaving in datacenters," in 2013 International Green Computing Conference Proceedings, 2013, pp. 1–8.
- [7] S. Ci, N. Lin, and D. Wu, "Reconfigurable Battery Techniques and Systems: A Survey," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1175–1189, 2016.
- [8] S. Bashash, S. J. Moura, and H. K. Fathy, "Charge trajectory optimization of plug-in hybrid electric vehicles for energy cost reduction and battery health enhancement," in Proceedings of the 2010 American Control Conference, 2010, pp. 5824–5831.
- [9] S. Bashash, S. J. Moura, J. C. Forman, and H. K. Fathy, "Plug-in hybrid electric vehicle charge pattern optimization for energy cost and battery longevity," *J. Power Sources*, 2011.
- [10] Q. Xie, X. Lin, Y. Wang, and M. Pedram, "State of health aware charge management in hybrid electrical energy storage systems," *Des. Autom. Test Eur. Conf. Exhib. (DATE)*, 2012, no. 2010, pp. 1060–1065, 2012.
- [11] V. Kontorinis et al., "Managing distributed UPS energy for effective power capping in data centers," in Proceedings - International Symposium on Computer Architecture, 2012.
- [12] D. Zhu, Y. Wang, S. Yue, Q. Xie, M. Pedram, and N. Chang, "Maximizing return on investment of a grid-connected hybrid electrical energy storage system," in Proceedings of the Asia and South Pacific Design Automation Conference, ASP-DAC, 2013, pp. 638–643.

- [13] M. Koller, T. Borsche, A. Ulbig, and G. Andersson, "Defining a degradation cost function for optimal control of a battery energy storage system," in 2013 IEEE Grenoble Conference, 2013, pp. 1–6.
- [14] S. J. Moura, J. L. Stein, and H. K. Fathy, "Battery-health conscious power management in plug-in hybrid electric vehicles via electrochemical modeling and stochastic control," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2013.
- [15] B. Aksanli, E. Pettis, and T. Rosing, "Architecting efficient peak power shaving using batteries in data centers," in Proceedings - IEEE Computer Society's Annual International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems, MASCOTS, 2013.
- [16] Y. Wang, X. Lin, Q. Xie, N. Chang, and M. Pedram, "Minimizing state-of-health degradation in hybrid electrical energy storage systems with arbitrary source and load profiles," 2014 Des. Autom. Test Eur. Conf. Exhib., pp. 1–4, 2014.
- [17] T. Cui, S. Chen, Y. Wang, Q. Zhu, S. Nazarian, and M. Pedram, "Optimal co-scheduling of HVAC control and battery management for energy-efficient buildings considering state-of-health degradation," in Proceedings of the Asia and South Pacific Design Automation Conference, ASP-DAC, 2016, vol. 25–28–Janu, pp. 775–780.
- [18] S. J. Moura, J. C. Forman, S. Bashash, J. L. Stein, and H. K. Fathy, "Optimal control of film growth in lithium-ion battery packs via relay switches," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2011."
- [19] Akhil, Abbas A., Georgianne Huff, Aileen B. Currier, Benjamin C. Kaun, Dan M. Rastler, Stella Bingqing Chen, Andrew L. Cotter, Dale T. Bradshaw, and William D. Gauntlett. "DOE/EPRI electricity storage handbook in collaboration with NRECA." Sandia national laboratories (2015).
- [20] T.B.Reddy. 2011.*Linden's Handbook of Batteries*. McGraw-Hill,New York.
- [21] A. Pröbstl, S. Park, S. Narayanaswamy, S. Steinhorst and S. Chakraborty, "SOH-aware active cell balancing strategy for high power battery packs," *2018 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, Dresden, 2018, pp. 431-436, doi: 10.23919/DATE.2018.8342048.
- [22] L. Lam and P. Bauer, "Practical Capacity Fading Model for Li-Ion Battery Cells in Electric Vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 12, pp. 5910–5918, Dec. 2013.
- [23] X. Hu, S. Li, and H. Peng, "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 198, pp. 359–367, 2012.
- [24] J. Remmlinger, M. Buchholz, et al., "State-of-Health Monitoring of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles by On-Board Internal Resistance Estimation", *J. Power Sources*, vol. 196, pp. 5357-5363, 2011.
- [25] Z. Guo, X. Qiu, G. Hou, B.Y. Liaw, C. Zhang, "State of Health Estimation for Lithium Ion Batteries Based on Charging Curves", *J. Power Sources*, vol. 249, pp. 457-462, 2014.

- [26] Y. Xing, E.W.M. Ma, K.L. Tsui, M. Pecht, "An Ensemble Model for Predicting the Remaining Useful Performance of Lithium-Ion Batteries", *Microelectron. Reliab.*, 53 (6), 2013, (811–820).
- [27] Z. Cen, P. Kubiak, "Lithium-ion battery SOC/SOH adaptive estimation via simplified single particle model", *Int. J Energy Res.*, pp. 1-16, 2020, <https://doi.org/10.1002/er.5374>.
- [28] B.P. Divakar, K.W.E. Cheng, et al., "Battery Management System and Control Strategy for Hybrid and Electric Vehicle", in *Proc. PESA*, 2009, (1-6).
- [29] C. Weng, J. Sun, H. Peng, "A Unified Open-Circuit-Voltage Model of Lithium-Ion Batteries for State-of-Charge Estimation and State-of-Health Monitoring", *J. Power Sources*, 258, 2014, (228–237).
- [30] A. Eddahech, O. Briat, E. Woirgard, J.M. Vinassa, "Remaining Useful Life Prediction of Lithium Batteries in Calendar Ageing for Automotive Applications", *Microelectr. Reliab.*, 52, 2012, (2438–2442).
- [31] Mihai V. Micea, Lucian Ungurean, Gabriel N. Cârstoiu, Voicu Groza, "Online State-of-Health Assessment for Battery Management Systems", *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, June 2011, vol. 60, issue 6, pp. (1997–2006), ISSN-0018-9456
- [32] Y. Xing, K.L. Tsui, Q. Miao, M. Pecht, "Prognostics and Health Monitoring for Lithium-Ion Battery", *Proc. IEEE ISI*, pp. 242–247, 2011.
- [33] J.A.M. Penna, C.L. Nascimento Jr., L.R. Rodrigues, "Health Monitoring and Remaining Useful Life Estimation of Lithium-Ion Aeronautical Batteries", *Proc. IEEE AERO*, pp. 1-12, 2012.
- [34] N. Omar, M.A. Monem, et al., "Lithium Iron Phosphate Based Battery - Assessment of the Aging Parameters and Development of Cycle Life Model", *Applied Energ.*, vol. 113, pp. 1575–1585, 2014.
- [35] B. Duan, Q. Zhang, F. Geng, C. Zhang, "Remaining useful life prediction of lithium-ion battery based on extended Kalman particle filter", *Int. J Energy Res.*, vol. 44, no. 3, pp. 1724-1734, 2020, <https://doi.org/10.1002/er.5002>.
- [36] A. Millner, "Modeling Lithium Ion battery degradation in electric vehicles," in *2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply*, 2010, pp. 349–356.
- [37] UN, "Recommendations on the Transport of Dangerous Goods: Model Regulations (Twenty-first Revised Edition - Vol. I & II)", United Nations, New York, 2017, <https://doi.org/10.18356/7c03b465-en>.
- [38] Texas Instruments, BQ297xx: Cost-Effective Voltage and Current Protection Integrated Circuit for Single-Cell Li-Ion and Li-Polymer Batteries, *Datasheet*, 2020. Available from: <https://www.ti.com/lit/gpn/bq2973> [Accessed on 19 September 2020].

- [39] On Semiconductor, LC05111CMT: Battery Protection IC for 1-Cell Lithium-Ion with Integrated Power MOSFET, Datasheet, 2019. Available from: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/LC05111CMT-D.PDF> [Accessed on 19 September 2020].
- [40] Analog Devices, LTC4162-L: 35V/3.2A Multicell Lithium-Ion Step-Down Battery Charger with PowerPath and I2C Telemetry, Datasheet, 2018. Available from: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC4162-L.pdf> [Accessed on 19 September 2020].
- [41] Texas Instruments, bq25700A: SMBus Multi-Chemistry Battery Buck-Boost Charge Controller With System Power Monitor and Processor Hot Monitor, Datasheet, 2018. Available from: <https://www.ti.com/lit/gpn/bq25700a> [Accessed on 19 September 2020].
- [42] ST Microelectronics, STC3115: Gas gauge IC with alarm output for handheld applications, Datasheet, 2018. Available from: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stc3115.pdf> [Accessed on 19 September 2020].
- [43] Analog Devices, LTC2941: battery gas gauge with I2C interface. Datasheet, 2018. Available from: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC2941.pdf> [Accessed on 19 September 2020].
- [44] Texas Instruments, bq27531-G1: Battery Management Unit Impedance Track™ Fuel Gauge With MaxLife™ Technology for Use With the bq2419x Charger Controller, Datasheet, 2016. Available from: <https://www.ti.com/lit/gpn/bq27531-g1> [Accessed on 19 September 2020].
- [45] Maxim Integrated, MAX17047/MAX17050: 1-Cell Fuel Gauge with ModelGauge m3, Datasheet, 2016. Available from: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX17047-MAX17050.pdf> [Accessed on 19 September 2020].
- [46] HDM Systems, BFG-24-S battery fuel gauge product specification, Datasheet, 2013. Available from: https://72967772-0e16-4b34-9ec0-f19dbebd7b30.filesusr.com/ugd/87adf8_f4cd9cf413ef43a79614f96d24572f27.pdf [Accessed on 19 September 2020].
- [47] Yu M, Barsukov Y, Vega M. Theory and implementation of impedance track battery fuel-gauging algorithm in bq2750x family. Texas Instruments Appl. Report, SLUA450, 2008. Available from: <https://www.ti.com/lit/pdf/slua450>. [Accessed on 19 September 2020].
- [48] P. Keil, S.F. Schuster, J. Wilhelm, J. Travi, A. Hauser, R.C. Karl and A. Jossen, 2016. "Calendar aging of lithium-ion batteries I. Impact of the graphite anode on capacity fade", in *Journal of The Electrochemical Society*, 163(9), 2016, pp.A1872-A1880.
- [49] S. Narayanaswamy, S. Park, S. Steinhorst, and S. Chakraborty, "Design automation for battery systems," in *Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design - ICCAD '18*, 2018, vol. 17018, pp. 1-7.

-
- [50] V. Viswanathan, L. N. Palaniswamy, and P. B. Leelavinodhan, "Optimization techniques of battery packs using re-configurability: A review," *J. Energy Storage*, vol. 23, no. March, pp. 404–415, Jun. 2019.
- [51] M. Alahmad, H. Hess, M. Mojarradi, W. West, and J. Whitacre, "Battery switch array system with application for JPL's rechargeable micro-scale batteries," *J. Power Sources*, vol. 177, no. 2, pp. 566–578, Mar. 2008.
- [52] T. Kim, W. Qiao, and L. Qu, "Series-connected self-reconfigurable multicell battery", in *Proc. 26th Annu. Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, Mar. 2011, pp. 1382–1387.
- [53] T. Kim, W. Qiao, and L. Qu, "Power Electronics-Enabled Self-X Multicell Batteries: A Design Toward Smart Batteries," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4723–4733, Nov. 2012.
- [54] H. Kim and K. G. Shin, "On dynamic reconfiguration of a large-scale battery system", in *RTAS'09*, 2009.
- [55] H. Kim and K. G. Shin, "DESA: Dependable, Efficient, Scalable Architecture for Management of Large-Scale Batteries," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 8, no. 2, pp. 406–417, May 2012.
- [56] L. He, L. Gu, L. Kong, Y. Gu, C. Liu, and T. He, "Exploring Adaptive Reconfiguration to Optimize Energy Efficiency in Large-Scale Battery Systems," in *2013 IEEE 34th Real-Time Systems Symposium*, 2013, pp. 118–127.
- [57] L. He, Y. Gu, T. Zhu, C. Liu, and K. G. Shin, "SHARE: SoH-Aware Reconfiguration to Enhance Deliverable Capacity of Large-Scale Battery Packs," in *Proceedings of the ACM/IEEE Sixth International Conference on Cyber-Physical Systems - ICCPS '15*, 2015, pp. 169–178.
- [58] L. He, Z. Yang, Y. Gu, C. Liu, T. He, and K. G. Shin, "SoH-Aware Reconfiguration in Battery Packs," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3727–3735, Jul. 2018.
- [59] L. He, E. Kim, and K. G. Shin, "Resting weak cells to improve battery pack's capacity delivery via reconfiguration," in *Proceedings of the Seventh International Conference on Future Energy Systems - e-Energy '16*, 2016, pp. 1–11.
- [60] L. He, E. Kim, and K. G. Shin, "A Case Study on Improving Capacity Delivery of Battery Packs via Reconfiguration," *ACM Trans. Cyber-Physical Syst.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–23, Feb. 2017.
- [61] L. He, L. Kong, Y. Gu, C. Liu, T. He, and K. G. Shin, "Extending Battery System Operation via Adaptive Reconfiguration," *ACM Trans. Sens. Networks*, vol. 15, no. 1, pp. 1–21, Jan. 2019.
- [62] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti, and M.-Y. Chow, "Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 4–16, Jun. 2013.

- [63] M. Brandl *et al.*, "Batteries and battery management systems for electric vehicles," in *2012 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2012, pp. 971–976.
- [64] M. T. Lawder *et al.*, "Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications," *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 1014–1030, Jun. 2014.
- [65] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, and M. Ouyang, "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles," *J. Power Sources*, vol. 226, pp. 272–288, Mar. 2013.
- [66] A. Manenti, A. Abba, A. Merati, S. M. Savaresi, and A. Geraci, "A New BMS Architecture Based on Cell Redundancy," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 9, pp. 4314–4322, Sep. 2011.
- [67] S. Steinhorst, Z. Shao, S. Chakraborty, M. Kauer, S. Li, M. Lukasiewicz, ... and Q. Wang, "Distributed reconfigurable Battery System Management Architectures," in *2016 21st Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, IEEE, pp. 429–434, 2016.
- [68] M. T. Lawder, B. Suthar, P. W. Northrop, S. De, C. M. Hoff, O. Leitermann, ... and V. R. Subramanian, "Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 1014–1030, Jun. 2014.
- [69] M. Brandl, H. Gall, M. Wenger, V. Lorentz, M. Giegerich, F. Baronti, ... and S. Saponara, "Batteries and battery management systems for electric vehicles," in *2012 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, 2012, pp. 971–976.
- [70] M. Yang, Y. Chang, C. Tsao, P.-C. Huang, Y.-H. Chang, and T.-W. Kuo, "Garbage collection and wear leveling for flash memory: Past and future," in *2014 International Conference on Smart Computing*, 2014, pp. 66–73.
- [71] L.-P. Chang and T.-W. Kuo. "An Adaptive Striping Architecture for Flash Memory Storage Systems of Embedded Systems". In the *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)*, pp. 187–196, 2002.
- [72] D. Jung, Y. Chae, H. Jo, J. Kim, and J. Lee, "A group-based wear-leveling algorithm for large-capacity flash memory storage systems," in *Proceedings of the 2007 international conference on Compilers, architecture, and synthesis for embedded systems - CASES '07*, 2007, p. 160.
- [73] S. Park, "K-leveling: An efficient wear-leveling scheme for flash memory", In *UKC '05: Proceedings of The 2005 US-Korea Conference on Science, Technology, and Entrepreneurship*, 2005
- [74] L.-P. Chang, "On efficient wear leveling for large-scale flash-memory storage systems," in *Proceedings of the 2007 ACM symposium on Applied computing - SAC '07*, 2007, p. 1126.

- [75] L. Chang and C. Du, "Design and implementation of an efficient wear-leveling algorithm for solid-state-disk microcontrollers," *ACM Trans. Des. Autom.*, 2009, p. 1-36.
- [76] Y. H. Chang, J. W. Hsieh, and T. W. Kuo, "Improving flash wear-leveling by proactively moving static data," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 59, no. 1, pp. 53-65, 2010.
- [77] N. Agrawal, V. Prabhakaran, T. Wobber, J. D. Davis, M. Manasse, and R. Panigrahy, "Design Tradeoffs for SSD Performance," in *USENIX '08: 2008 USENIX Annual Technical Conference*, 2008, pp. 57-70.
- [78] L.-P. Chang and L.-C. Huang, "A low-cost wear-leveling algorithm for block-mapping solid-state disks," *ACM SIGPLAN Not.*, vol. 47, no. 5, p. 31, May 2012.
- [79] L.-P. Chang, T.-Y. Chou, and L.-C. Huang, "An adaptive, low-cost wear-leveling algorithm for multichannel solid-state disks," *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 1-26, 2013.
- [80] S. H. Kim, J. H. Choi, and J. W. Kwak, "HaWL: Hidden Cold Block-Aware Wear Leveling Using Bit-Set Threshold for NAND Flash Memory," *IEICE Trans. Inf. Syst.*, vol. E99.D, no. 4, pp. 1242-1245, 2016.
- [81] S. H. Kim, J. H. Choi, and J. W. Kwak, "RRWL: Round Robin-Based Wear Leveling Using Block Erase Table for Flash Memory," *IEICE Trans. Inf. Syst.*, vol. E100.D, no. 5, pp. 1124-1127, 2017.
- [82] J. Becker, C. Schaeper, S. Rothgang, and D.U. Sauer, "Development and validation of an energy management system for an electric vehicle with a split battery storage system", *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 920-929, 2013.
- [83] G. Renn, G. Ma, and N. Cong, "Review of electrical energy storage system for vehicular applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 41, pp. 225-236, 2015.
- [84] M.A. Hannan, M.M. Hoque, A. Mohamed, A. Ayob, "Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 69, pp. 771-789, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.171>.
- [85] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof and P. J. Ker, "State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19362-19378, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2817655.
- [86] J. W. Li, M. Zhang, Q. Q. Yang, Z. Y. Zhang, and W. J. Yuan, "SMES/battery hybrid energy storage system for electric buses", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, pp. 1-5, 2016.
- [87] Z. Song, J. Li, J. Hou, H. Hofmann, M. Ouyang, and J. Du, "The battery-supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicle applications: A case study", *Energy*, no. 154, pp. 433-441, 2018.

- [88] M. Bragard, N. Soltan, S. Thomas, and R.W. DeDoncker, „The balance of renewable sources and user demands in grids: Power electronics for modular battery energy storage systems”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 3049–3056, 2010.
- [89] H. Qian, J. Zhang, J.-S. Lai, and W. Yu, „A high-efficiency grid-tie battery energy storage system”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 886–896, 2011.
- [90] J. D. Dogger, B. Roossien, and F. D. J. Nieuwenhout, „Characterization of Li-ion batteries for intelligent management of distributed grid-connected storage”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 1, pp. 256–263, 2011.
- [91] H. Zhou, T. Bhattacharya, D. Tran, T. S. T. Siew, and A. M. Khambadkone, „Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 923–930, 2011.
- [92] K. M. Tan, V. K. Ramachandaramurthy, J. Y. Yong, „Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 720-732, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.012>.
- [93] T. U. Solanke, V. K. Ramachandaramurthy, J. Y. Yong, J. Pasupuleti, P. Kasinathan, A. Rajagopalan, „A review of strategic charging–discharging control of grid-connected electric vehicles”, *Journal of Energy Storage*, vol. 28, 2020, 101193, <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101193>.
- [94] S. Govindan, D. Wang, A. Sivasubramaniam and B. Uргаonkar, „Aggressive Datacenter Power Provisioning with Batteries”, *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)*, vol. 31, no. 1, pp.1-31, 2013, DOI:<https://doi.org/10.1145/2427631.2427633>
- [95] A. Wierman, Z. Liu, I. Liu and H. Mohsenian-Rad, "Opportunities and challenges for data center demand response," International Green Computing Conference, Dallas, TX, 2014, pp. 1-10, doi: 10.1109/IGCC.2014.7039172.
- [96] M. Dabbagh, B. Hamdaoui, A. Rayes and M. Guizani, "Shaving Data Center Power Demand Peaks Through Energy Storage and Workload Shifting Control," in *IEEE Transactions on Cloud Computing*, vol. 7, no. 4, pp. 1095-1108, 1 Oct.-Dec. 2019, doi: 10.1109/TCC.2017.2744623.
- [97] A. Mamun, I. Narayanan, D. Wang, A. Sivasubramaniam and H. K. Fathy, "Battery health-conscious online power management for stochastic datacenter demand response," *2016 American Control Conference (ACC)*, Boston, MA, 2016, pp. 3206-3211, doi: 10.1109/ACC.2016.7525411.
- [98] N. Nasiriani and G. Kesidis, "Optimal Peak Shaving Using Batteries at Datacenters: Charging Risk and Degradation Model," *2018 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Maui, HI, 2018, pp. 58-62, doi: 10.1109/ICNC.2018.8390416.

- [99] Z. Mengmeng and W. Xiaoying, "A Survey of Research on Datacenters Using Energy Storage Devices to Participate in Smart Grid Demand Response," 2020 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS), Shenyang, China, 2020, pp. 22-26, doi: 10.1109/ICPICS50287.2020.9202343.
- [100] W. He, N. Williard, C. Chen, and M. Pecht, "State of charge estimation for Li-ion batteries using neural network modeling and unscented Kalman filter-based error cancellation.", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 62, pp. 783-791, 2014.
- [101] S. Ci, "Energy information and Internet-based management and its applications in distributed energy storage system," *Proc. Chinese Soc. Elect. Eng.*, vol. 35, no. 14, pp. 3643-3648, Jul. 2015.
- [102] Panasonic Corporation, HE relays PV type, Datasheet, 2019. Available from: <https://na.industrial.panasonic.com/file-download/273> [Accessed on 3 October 2020].
- [103] C. Blake, C. Bull, "IGBT or MOSFET: choose wisely", *International Rectifier*, pp. 1-5, 2001.
- [104] Vishay Siliconix, SiRA20DP: N-Channel 25 V (D-S) MOSFET, Datasheet, 2016. Available from: <https://www.vishay.com/docs/76212/sira20dp.pdf> [Accessed on 3 October 2020].
- [105] On Semiconductor, FDBL9401-F085T6: Power MOSFET, Single N-Channel, 40 V, 0.67 mΩ, 240 A, Datasheet, 2020. Available from: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/FDBL9401-F085T6-D.PDF> [Accessed on 3 October 2020].
- [106] MATLAB Coder documentation, <https://www.mathworks.com/help/coder/> [Accessed on 30 June 2021].
- [107] Linux și sistemul GNU, <https://www.gnu.org/gnu/linux-and-gnu.ro.html> [Accesat în 30 iunie 2021]
- [108] Windows Subsystem for Linux Documentation, <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/wsl/> [Accesat în 30 iunie 2021]
- [109] CMake Overview, <https://cmake.org/overview/> [Accesat în 30 iunie 2021]
- [110] Setting Up your Raspberry Pi, <https://projects.raspberrypi.org/en/projects/raspberry-pi-setting-up> [Accesat în 30 iunie 2021]
- [111] nRF52840 DK, <https://www.nordicsemi.com/Products/Development-hardware/nrf52840-dk> [Accesat în 30 iunie 2021]
- [112] EFM32GG-STK3700 Giant Gecko Starter Kit User's Guide <https://www.silabs.com/documents/public/user-guides/efm32gg-stk3700-ug.pdf> [Accesat în 30 iunie 2021]

- [113] M. Dubarry, A. Devie, K. Stein, M. Tun, M. Matsuura, R. Rocheleau, "Battery Energy Storage System battery durability and reliability under electric utility grid operations: Analysis of 3 years of real usage", *J. Power Sources*, vol. 338, pp. 65–73, 2017.
- [114] Förstl M, Azuatalam D, Chapman A, Verbič G, Jossen A, Hesse H., "Assessment of residential battery storage systems and operation strategies considering battery aging", *Int J Energy Res.* 2019;1–14. <https://doi.org/10.1002/er.4770>
- [115] M. Dubarry, A. Devie, "Battery durability and reliability under electric utility grid operations: Representative usage aging and calendar aging", *J. of Energy Storage*, Vol. 18, 2018, pp. 185-195, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.04.004>.
- [116] B. Saha, K. Goebel, "Battery data set", NASA Ames Progn Res Center, 2007
- [117] B. Bole, C. Kulkarni, M. Daigle, „Randomized battery usage data set”, NASA Ames Progn Res Center, 2009
- [118] W. He, N. Williard, M. Osterman, M. Pecht, „Prognostics of lithium-ion batteries based on Dempster–Shafer theory and the Bayesian Monte Carlo method”, *J Power Sources*, 196 (23), 2011, pp. 10314-10321
- [119] K. Severson, P. Attia, N. Jin, N. Perkins, B. Jiang, Z. Yang, et al., „Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation”, *Nat Energy*, 4, 2019, pp. 1-9, <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0356-8>
- [120] T. Raj, A.A. Wang, C.W. Monroe, D.A. Howey, „Investigation of path-dependent degradation in lithium-ion batteries”, *Batteries Supercaps*, 3 (12), 2020, pp. 1377-1385
- [121] J. M. Reniers, G. Mulder, S. Ober-Blöbaum, D. A. Howey, „Improving optimal control of grid-connected lithium-ion batteries through more accurate battery and degradation modelling”, *Journal of Power Sources* 379, 2018, pp. 91–102, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.01.004>
- [122] Kokam SLPB78205130H 16Ah Battery Technical Data Sheet v1.5, [https://kokam.com/skin/pc_en/img/cell_down/TDS_SLPB78205130H%20\(16Ah\)_EN.pdf](https://kokam.com/skin/pc_en/img/cell_down/TDS_SLPB78205130H%20(16Ah)_EN.pdf) [Accesat în 30 iunie 2021]

9. LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE

- [A1] G. N. Cârstoiu, M. V. Micea, L. Ungurean, M. Marcu, „Novel battery wear leveling method for large-scale reconfigurable battery packs”, *International Journal of Energy Research*, 2021, vol. 45, issue 2, pp. (1932 – 1947), ISSN-0363-907X, <https://doi.org/10.1002/er.5879> (1 citare)
- [A2] L. Ungurean, M.V. Micea, G. N. Cârstoiu, “Online state of health prediction method for lithium-ion batteries, based on gated recurrent unit neural networks”, *International Journal of Energy Research*, 2020, vol. 44, pp. (6767– 6777), ISSN-0363-907X, <https://doi.org/10.1002/er.5413> (17 citări)
- [A3] L. Ungurean, G. N. Cârstoiu, M. V. Micea, V. Groza, “Battery state of health estimation: a structured review of models, methods and commercial devices”, *International Journal of Energy Research*, 2017, vol. 41, issue 2, pp. (151-181), ISSN-0363-907X, <https://doi.org/10.1002/er.3598> (111 citări)
- [A4] M. V. Micea, L. Ungurean, G. N. Cârstoiu, V. Groza, “Online State-of-Health Assessment for Battery Management Systems”, *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, June 2011, vol. 60, issue 6, pp. (1997-2006), ISSN-0018-9456 (97 citări)
- [A5] M. V. Micea, G. N. Cârstoiu, L. Ungurean, D. Chiciudean, V. I. Cretu, V. Groza, “PARSECS: A Predictable Data Communication System for Smart Sensors and Hard Real-Time Applications”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, vol. 59, issue 11, pp. (2968 – 2981), ISSN-0018-9456 (10 citări)
- [A6] M. V. Micea, G. N. Cârstoiu, L. Ungurean, D. Chiciudean, V. I. Cretu, V. Groza, “Predictable Data Communication Interface for Hard Real-Time Systems”, in *Proceedings of the IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments (ROSE 2008)*, Ottawa, Canada, Oct. 2008, pp. (98-101), ISBN 978-1-4244-2594-5 (1 citare)