

STANJE NAPOLNJENOSTI BATERIJSKE CELICE NA OSNOVI ESC MODELA NADGRAJENEGA S POVRATNO ZANKO IN GENETSKIM ALGORITMOM

Kristijan Korez, Miran Globevnik*, Marko Antončič, Riko Šafarič

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor
*(em.tronic, Počehova 12, 2000 Maribor)

E-pošta: kristijan.korez@um.si, miran.globevnik@gmail.com, marko.antoncic@student.um.si, riko.safarič@um.si

State of charge estimation of battery cell based on ESC model with feedback and genetic algorithm

Abstract. The paper presents the development and testing of an algorithm for state of charge (SOC) estimation for Lithium-titanate oxide battery cell. Functionality of the algorithm for SOC based on ESC model, genetic algorithm and feedback compensation of SOC was compared with the well-known Coulomb counting method. The advantage of our algorithm is the on-line estimation of ESC model parameters which results much better estimation of SOC, especially during long term exploration of the battery cell.

1 Uvod

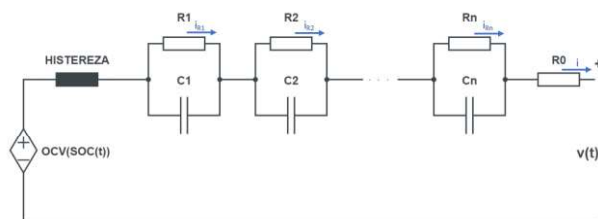
V zadnjem času je trend prehajanje na vse več baterijskih aplikacij in naprav. Baterije se iz leta v leto razvijajo in izboljšujejo. Obstaja že vrsto najrazličnejših tipov baterij glede na njihovo kemijsko sestavo. Vsak baterijski tip ima svoje lastnosti, kot tudi prednosti in slabosti. Razvoj baterij teži k temu, da bi imele baterije čim večjo kapaciteto glede na njihov volumen in maso, zraven tega pa bi bile sposobne zagotoviti ustrezen tok in napetostni nivo. Pri tem je zelo pomembna življenjska doba baterije. Življenjska doba običajno zavisi od tipa baterije in seveda od načina uporabe in vzdrževanja. Proizvajalci baterijskih celic zmeraj podajo napetostne in tokovne omejitve baterije, znotraj katerih se naj celice uporabljajo. Pri tem govorimo predvsem o preveliki tokovni obremenitvi, napolnitvi ali spraznitvi celice. Da do tega ne pride, običajno skrbijo namenska elektronska vezja, ki so v angleščini imenovana Battery Management System ali BMS. Sam BMS meri napetosti in tokove celic in je v primeru preobremenitve celice sposoben reagirati s prekinitvijo tokokroga.

BMS je eden izmed osrednjih sestavnih delov baterijskega paketa, katerega glavna naloga je zaščita baterij. Več o BMS sistemih lahko preberemo v [1], [2] [3] in [4]. Uporabnika baterijske naprave običajno zanima le koliko energije je še preostalo v bateriji. Napolnjenost baterije v tuji literaturi imenujemo »state of charge«, v nadaljevanju SOC. Znotraj baterije potekajo zapleteni kemijski procesi, ki pa niso direktno merljivi. Če želimo ugotoviti polnost baterijske celice, se moramo posluževati veličin, ki jih na bateriji znamo izmeriti. Izmerimo lahko tok, temperaturo in napetost baterijske celice. Načinov kako lahko iz merjenja električnih veličin

in temperature sklepamo o SOC je več. Najtočnejša bo tista, ki zajame čim več lastnosti baterijske celice. S tem razlogom se razvijajo in razvitih je bilo že vrsto baterijskih modelov. Eden takšnih je ESC model (angl. enhanced self-correcting – napreden samo-korekcijski model), s katerim smo se ukvarjali tudi sami. Natančen opis ESC modela najdemo v [1].

2 Napredni samo-korekcijski model baterijske celice (ESC)

ESC model temelji na modeliranju baterije na osnovi električnega vezja. V osnovi se model sestoji iz napetostnega vira, histereze, RC členov in serijske upornosti R_0 . Model predstavlja slika 1.



Slika 1: ESC model baterije.

Matematično zapišemo model s spodnjimi enačbami:

$$i_{R_j}[k+1] = \begin{bmatrix} F_1 & 0 & \dots \\ 0 & F_2 & \\ \vdots & & \ddots \end{bmatrix} i_{R_j}[k] + \begin{bmatrix} 1-F_1 \\ 1-F_2 \\ \vdots \end{bmatrix} i[k], \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

$$F_j = \exp\left(\frac{-\Delta t}{R_j C_j}\right), \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

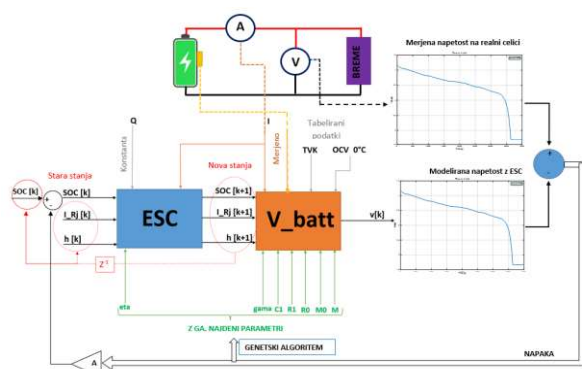
$$\begin{bmatrix} SOC[k+1] \\ i_{R_j}[k+1] \\ h[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & A_{RC} & 0 \\ 0 & 0 & \exp\left(-\frac{\eta[k]i[k]\gamma\Delta t}{Q}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC[k] \\ i_{R_j}[k] \\ h[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\eta[k]\Delta t}{Q} \\ B_{RC} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i[k] \\ sgn(i[k]) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$v[k] = OCV(SOC[k], T[k]) + M_0 sgn(i[k]) + Mh[k] - \sum_j R_j i_{R_j}[k] - R_0 i[k], \quad (4)$$

V enačbi so: i_{R_j} -tokovi skozi RC člene, R_0 – notranja upornost baterije, i -tok skozi R_0 , R_j -upornosti RC členov, C_j -kapacitivnosti RC členov, Δt -časovni koraki, SOC -stanje napolnjenosti, h -histereza, M -dinamična histerezna konstanta, M_0 -statična histerezna konstanta, η -

Coulombov izkoristek, γ -konstanta razpada, Q -kapaciteta, OCV-ang. open circuit voltage - napetost odprtih sponk

Model celice bo dober takrat, kadar se modelirana in merjena napetost na baterijski celici tekom obremenjevanja zelo dobro ujemata. Da bi znali zelo dobro modelirati napetost izbrane celice, je potrebno pravilno nastaviti parametre, ki jih zahteva ESC model. Nekatere izmed teh parametrov je moč izmeriti, medtem ko so drugi nemerljivi. Za iskanje najprimernejših parametrov trenutni avtorji uporabljajo optimizacijske metode kot je na primer Kalmanov filter [3]. Mi smo se odločili za uporabo genetskega algoritma-GA. Prednost izbrane metode je, da ne zaide v lokalni optimum. Več o genetskem algoritmu lahko najdemo v [5], [6]. To pomeni, da nam ni potrebno poznati približnih vrednosti iskanih parametrov. S tem pa se izognemo dodatnim specifičnim testom baterijskih celic, s katerimi predhodno določimo okvirne vrednosti posameznih parametrov ESC. Slabost ESC modela je ta, da potrebuje začetni SOC. Morebitna napaka v začetnem SOC kasneje vpliva na napačen SOC skozi celotno opazovano obdobje in na napačno napoved iskanih parametrov. ESC model v primeru pravilno podanega začetnega SOC zelo dobro modelira napetost baterijske celice ob predpostavki, da poznamo vse parametre ESC modela za določen tip baterijske celice. Zahteva, da moramo natančno poznati začetni SOC, nakazuje na praktično neuporabnost modela. Kot je že bilo omenjeno, končnega uporabnika zanima predvsem trenutni SOC in ne natančno modelirana napetost baterijske celice. Vprašanje, ki smo si ga zastavili je bilo: kako lahko iz modelirane in izmerjene napetosti sklepamo o SOC? S tem razlogom smo se lotili nadgradnje ESC modela prikazanega na sliki 2.



Slika 2: Nadgrajen ESC model.

V našem primeru smo ESC model nadgradili z dodatno povratno vezavo, ki korigira začetni SOC in genetskim algoritmom za iskanje parametrov ESC. Nadgradnja ESC modela deluje tako, da v vsakem časovnem koraku izmerimo napetost na realni bateriji in jo primerjamo z napetostjo, ki jo modelira ESC model. Razliko v napetostih nato ojačamo in jo prištejemo trenutnemu SOC. Na tak način odpravljamo morebitno napako v začetnem SOC. V principu povratna zanka toliko časa

korigira SOC, da je razlika med modelirano in merjeno napetostjo minimalna. Na sliki 2 lahko vidimo, da ESC model sedaj vsebuje dve povratni zanki. Povratna zanka **rdeče** barve (med vhodom in izhodom ESC bloka) posodablja: SOC, tokove skozi RC člene in histerezo na osnovi začetnega SOC, merjenje toka skozi celico, kapaciteto in izkoristek. Povratna vezava **črne** barve pa korigira SOC glede na razliko v merjeni in modelirani napetosti. V tej isti zanki se izračunavajo tudi parametri ESC modela s pomočjo genetskega algoritma. Če z isto povratno zanko vplivamo na korigiranje modela na dveh mestih hkrati, lahko to privede do neželenega medsebojnega delovanja, saj si lahko korekciji nasprotujeta. Medsebojnemu nasprotovanju se lahko izognemo tako, da je frekvenca korigiranja parametrov s pomočjo GA manjša od frekvenca posodabljanja SOC. Optimalna pogostost posodabljanja parametrov ESC pa je odvisna tudi od hitrosti spreminjanja teh parametrov skozi čas opazovanja baterije. Nekateri izmed parametrov baterije se spreminjajo v odvisnosti od SOC, medtem ko so drugi konstantni skozi celoten SOC. Nekateri izmed parametrov se spreminjajo s starostjo baterije. Na podlagi spremljanja zgodovine teh parametrov (predvsem parametra η -Coulombov izkoristek) bi lahko ugotavljali tudi dotrajanost baterije.

3 Opis merilne metode in iskanje parametrov ESC

Po dodelavi obstoječega ESC modela smo pričeli z iskanjem parametrov ESC modela s pomočjo genetskega algoritma. Prva faza je bilo preverjanje pravilnosti delovanja zasnovanega algoritma za napovedovanje parametrov baterije. Pravilnost smo ugotavljali tako, da smo si za začetek izmislili vse parametre ESC modela. ESC model z izmišljenimi parametri smo nato obremenjevali po izbranem tokovnem profilu. Na tak način smo posneli modelirano napetost ESC modela. Nato smo predpostavili, da posneta modelirana napetost predstavlja navidezno izmerjeno napetost in da parametrov ESC modela ne poznamo. Nadalje smo s pomočjo genetskega algoritma [5], [6] poizkušali najti takšne parametre ESC modela, da bo razlika med navidezno izmerjeno in modelirano napetostjo minimalna. Simulacija je potrdila delovanje algoritma, saj smo v nekaj generacijah GA dosegli popolno prekrivanje navidezno izmerjene in modelirane napetosti. Parametri, ki so bili pri tem najdeni, so popolnoma sovpadali s parametri, ki smo si jih predhodno izmislili za izris navidezno izmerjene napetosti.

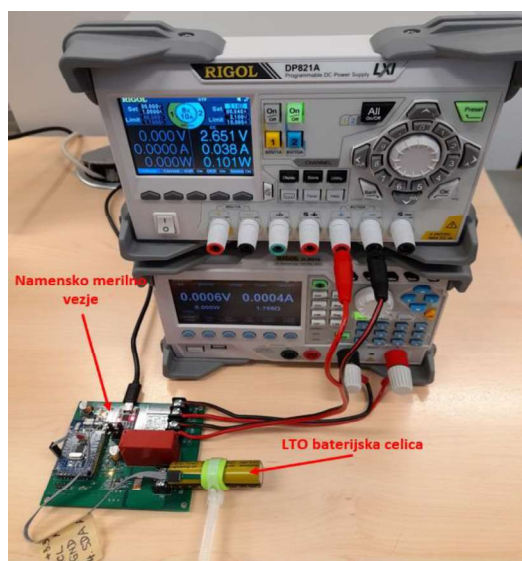
Po potrditvi delovanja ESC+GA modela je sledilo obremenjevanje realne baterije in iskanje najprimernejših parametrov ESC modela s pomočjo GA. Vse teste smo izvajali na litij-titanat-oksidi (LTO) baterijski celici. V ta namen smo implementirali posebno proceduro priprave in obremenjevanja baterije. Procedura je bila naslednja:

- pred polnilni proces baterije: baterijo s tokom C/30 polnimo do maksimalne napetosti baterijske celice (tako dosežemo 100 % SOC);
- obremenjevanje baterije po izbranem tokovnem profilu: pri tem profil ponavljamo toliko časa, da dosežemo minimalno napetost baterijske celice;
- izpraznitev do 0 % SOC: s tokom C/30 praznimo celico toliko časa, da dosežemo minimalno napetost celice;
- sledi polnjenje celice z 1C do maksimalne napetosti;
- nadaljujemo s polnjenjem s C/30 do maksimalne napetosti celice;
- nazadnje sledi dve uri trajajoče počivanje celice.

C-razmerje (C-rate) predstavlja razmerje med kapaciteto baterije in tokom praznjenja ali polnjenja. Proizvajalci baterij nam običajno podajajo maksimalen polnilni in praznilni tok v obliki C razmerja (1C, 2C, ...). Več o C razmerju lahko preberemo v [7].

Za namen snemanja obremenitvenega profila je bila razvita namenska strojna oprema. Razlog za to je bila tudi sorazmerno majhna merilna natančnost elektronskega bremena in vira Rigol. Bila je zasnovana tako, da je bila sposobna zelo natančno meriti tok ($\pm 625 \mu\text{A}$), napetost ($\pm 1.25 \text{ mV}$) in temperaturo ($\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$) baterijske celice. Na merilnem vezju je bil implementiran tudi močnostni rele, ki je omogočal preklon med virom in bremenom. Merilno vezje je omogočalo direktno komunikacijo z Matlab-om preko serijske komunikacije.

Za obremenjevanje po tokovnem profilu (polnjenje in praznjenje) smo uporabili laboratorijski tokovno/napetostni vir Rigol DP8921A in elektronsko breme Rigol DL3021A. Oba inštrumenta sta bila opremljena z vhodoma za serijsko komunikacijo. Preko serijske komunikacije sta inštrumenta prav tako komunicirala z Matlabom. Celotna programska procedura obremenjevanja je bila realizirana s pomočjo Matlaba.

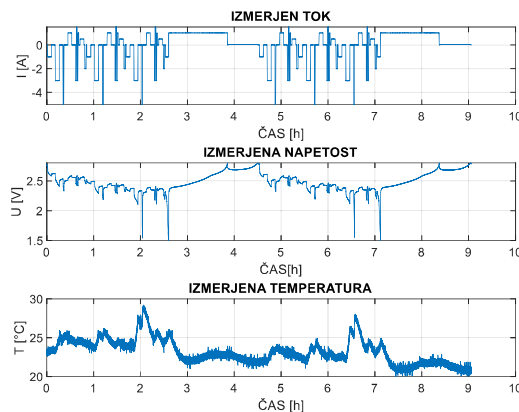


Slika 3: Strojna oprema za merjenje in obremenjevanje baterije.

S pomočjo strojne opreme prikazane na sliki 3 so bili izvedeni in posneti številni obremenitveni testi. Vsak

obremenitveni test predstavlja tabelo meritev. Tabela vsebuje meritev toka, napetosti in temperature za vsak časovni korak. V našem primeru smo zajemali meritve na vsako 0.1 s.

V nadaljevanju je bil cilj najti takšne parametre ESC modela, da bo modelirana napetost čim bolj sovpadala z meritvami napetosti pri obremenitvenem tokovnem profilu. ESC model opisuje tako statično kot dinamično obnašanje baterijske celice. Zato moramo baterijo obremenjevati na čim bolj raznolik tokovni profil, če želimo najti parametre ESC modela, ki čim boljše opiše realno celico.



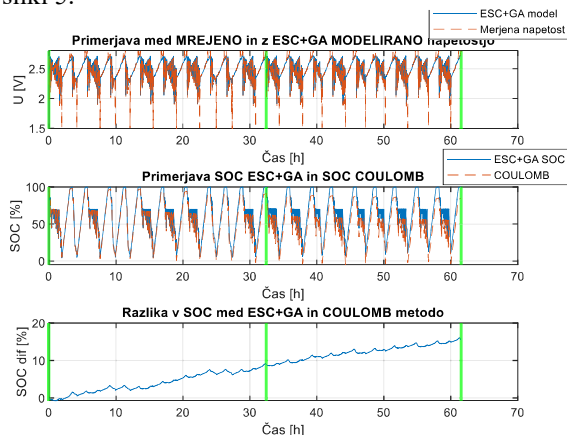
Slika 4: Meritev obremenjevanja baterijske celice.

S slike 4 je razvidno, da se obremenitveni profil ponovi dvakrat. Baterijska celica pa je bila tekom obremenjevanja dvakrat popolnoma izpraznjena in dvakrat popolnoma napolnjena. Obremenjevanje je v tem testu v celoti trajalo približno 9 ur. Obremenitveni profil prikazan na sliki 4 smo v nadaljevanju uporabili za iskanje parametrov ESC modela s pomočjo GA. Parametre smo z GA poizkušali napovedovati na različnih širinah in odsekih. Najboljši rezultati so bili dobljeni pri iskanju parametrov na širini štirih ur od začetka obremenjevanja. Najdene parametre smo v nadaljevanju uporabili za napovedovanje SOC pri 62 urnem obremenjevanju baterije. Na sliki 4 vidimo, da se po štirih urah ponovi enak profil obremenjevanja. Pri iskanju parametrov na ožjem intervalu so bili dobljeni rezultati veliko slabši, saj v tem primeru nismo zajeli celotne dinamike obremenitvenega profila.

4 Prikaz merilnih rezultatov napovedovanja SOC z ESC+GA

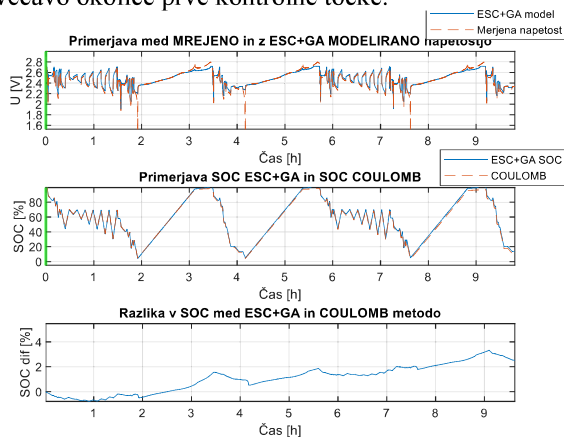
V nadaljevanju smo z obremenitvenim profilom prikazanim na sliki 4 obremenjevali baterijo dokler ni dosegla minimalne napetosti. Nato je sledilo polnjenje s tokom 1 A do maksimalne napetosti in nato še z tokom C/30 do maksimalne napetosti. Na ta način smo napolnili baterijo na 100 % SOC. Točke, kjer s polnilnim tokom C/30 dosežemo maksimalno napetost, nam bodo služile kot osnova za primerjavo napovedovanja SOC po tokovni (Coulomb) metodi in ESC+GA metodi. Zgoraj opisano proceduro obremenjevanja in polnjenja smo ponovili 20-krat. Tako je obremenjevanje v celoti trajalo

približno 62 ur. Meritve 62 urnega testa so predstavljene na sliki 5.



Slika 5: 62 urno obremenjevanje baterije.

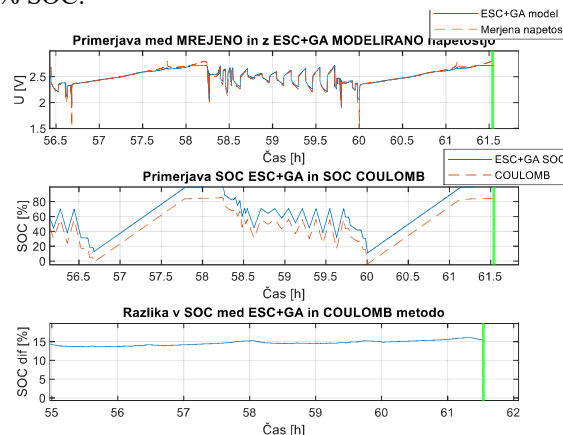
Na sliki 5 imamo na prvem grafu prikazano primerjavo med merjeno in s ESC+GA modelirano napetostjo. Na drugem grafu je prikazana primerjava med napovedanim SOC po Coulomb metodi in ESC+GA metodi. Na tretjem grafu je prikazana razlika v SOC med eno in drugo metodo. Za ESC model smo uporabili najdene parametre na intervalu štirih ur od začetka obremenjevanja baterije (slika 4). Za napovedovanje SOC po tokovni metodi je bila uporabljena izboljšana Coulombova metoda [2], ki upošteva izkoristek η . Z vertikalnimi (zelenimi) črtami so na grafih označene tri kontrolne točke. V teh točkah baterija doseže 100% SOC. Na sliki 6 lahko vidimo povečavo okolice prve kontrolne točke.



Slika 6: Povečava slike 5 v okolici prve vertikalne linije.

Na sliki 6 lahko vidimo, da se SOC napovedan po ESC+GA in Coulomb metodi sorazmerno dobro ujemata. S tretjega grafa na sliki 6 je razvidno tudi, da se razlika med njima s časom povečuje. Skozi celoten čas obremenjevanja zato težko rečemo, katera metoda daje pravilnejšo napoved SOC. S tem namenom je bilo posnetih več trenutkov, kjer baterija doseže maksimalno napetost pri polnjenju s tokom $C/30$. V trenutku, ko baterija doseže maksimalno napetost, ima 100% SOC. Tak trenutek po približno 62 urah prikazuje slika 7. Ugotovimo lahko, da ESC metoda prav tako napove

100% SOC, medtem ko Coulombova metoda napove 84% SOC.



Slika 7: Povečava slike 5 v okolici tretje vertikalne linije.

5 Zaključek

Na osnovi izvedenih testov lahko rečemo naslednje: pri kratkotrajnih (do 120 min trajajočih) obremenitvenih testih je Coulombova metoda za odtenek natančnejša v napovedovanju SOC kot ESC+GA metoda. ESC+GA metoda se namreč v odvisnosti od trenutne tokovne obremenitve moti za približno 2 %. Pri daljših trajajočih obremenitvah pa se kaže velika prednost pri napovedovanju SOC z ESC+GA metodo. Nadgrajen ESC+GA model namreč nima tendence k integraciji pogreška skozi čas zaradi napačnega izkoristka, začetnega SOC ali pogreška tokovnega sensorja. Prednost ESC+GA metode je tudi v tem, da ne potrebujemo nikakršne zgodovine meritev. Napaka v napovedi SOC na osnovi ESC+GA modela je posledica predvsem tega, da ima realna baterija določene lastnosti, ki jih ESC model še ne zna opisati, vendar je model možno izboljšati.

Literatura

- [1] G. L. Plett, Battery Management Systems vol1, Battery Modeling, Norwood: Artech House, 2015.
- [2] Tolga O, Emre B. Sinan K. Battery management system, "Measurement and Control, 2019.
- [3] G. L. Plett, Battery Management Systems vol2, Equivalent-Circuit Methods, Norwood: Artech House, 2016.
- [4] D. Andrea, Battery Management Systems, Norwood: Artech house, 2010.
- [5] R. Šafarič, A. Rojko Inteligentne regulacijske tehnike v mehatroniki V2, Maribor: Univerzitetna knjižnica Maribor, 2007.
- [6] D. Beasley, An overview of genetic algorithms: Part 1 – Fundamentals, Bristol: University of Cardi, 1993.
- [7] WIKIPEDIA, https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_battery, [Pridobljeno 24.6.2021].