

Sustav adaptivnog punjenja baterije uz primjenu SoC estimatora

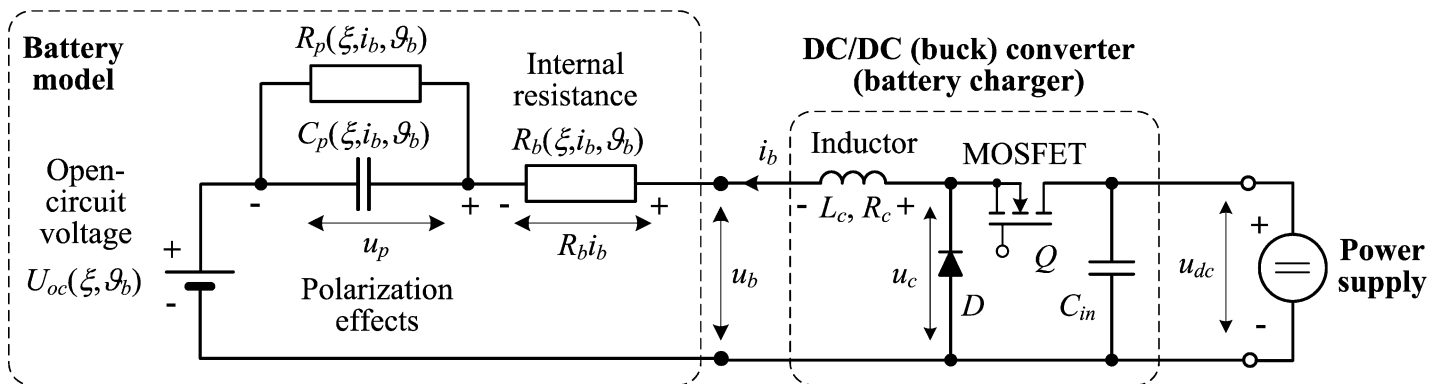
Danijel Pavković
Matija Krznar
Mihael Cipek

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje

Uvod

- Proces punjenja baterije značajno utječe na brzinu punjenja i konačni iznos stanja napunjenosti.
- Tradicionalno, punjenje baterije se zasniva na punjenju konstantnom strujom, nakon čega slijedi punjenje s konstantnim iznosom napona na bateriji (engl. constant-current/constant-voltage ili CCCV).
- Nadzorni dio sustava punjenja koji kontrolira napon na bateriji može se realizirati na razne načine, od kojih se u ovoj prezentaciji opisuju sljedeća dva:
 - (i) Regulator napona radi sprečavanja prenapona i prepunjavanja baterije
 - (ii) Regulator stanja napunjenosti baterije (engl. state-of-charge, SoC) zasnovan na estimatoru SoC-a uz prijspomenuti regulator napona.
- Za potrebe dizajna regulacijskog sustava koriste se modeli baterije i punjača odgovarajuće razine kompleksnosti.
- Učinkovitost predloženih sustava regulacije punjenja baterije su ispitani u simulacijskom okruženju za slučaj otprije poznatog modela litij-željezo-fosfat (LiFePO_4) baterijske ćelije.

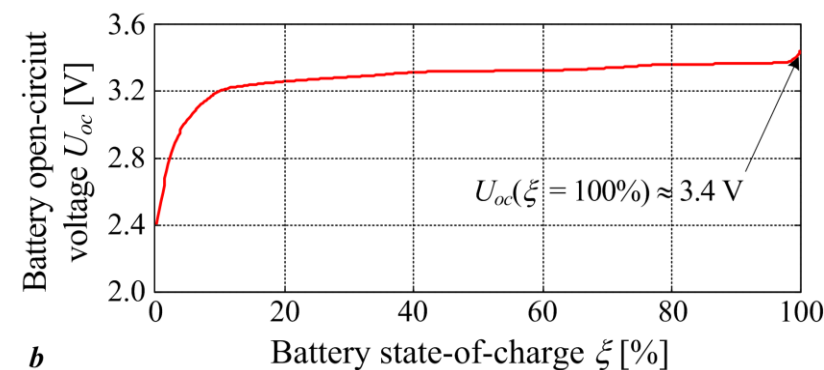
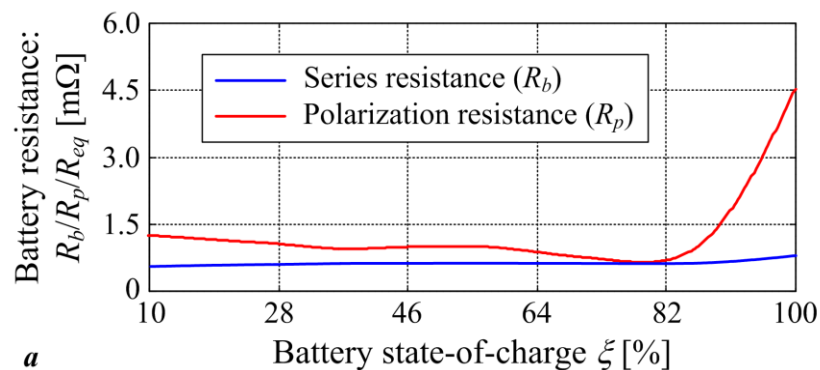
Parametriranje punjača i baterije



- Principna shema jednostavnog sustava punjača baterije uključuje silazni (engl. buck) DC/DC pretvarač koji napaja bateriju.

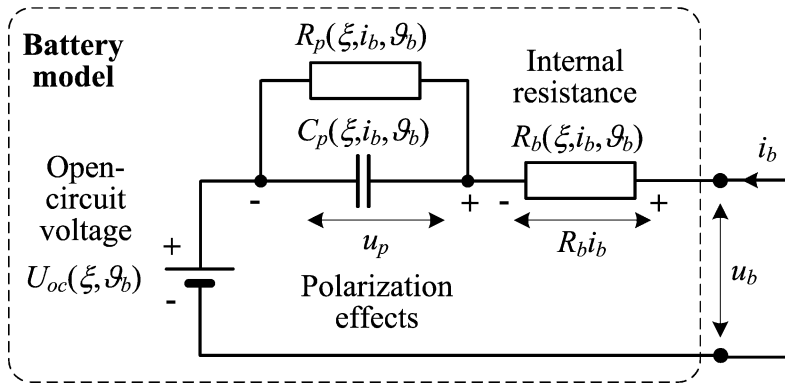
Sustav punjenja baterije temeljen na silaznom DC/DC pretvaraču

- Baterijska ćelija je karakterizirana svojim nadomjesnom strujnim krugom koji uključuje napon otvorenog kruga U_{oc} , polarizacijske efekte (otpor R_p i kapacitet C_p), i ekvivalentni serijski otpor baterije R_b .



Usrednjene mape parametara 100 Ah LiFePO₄ ćelije: otpori (a) i napon otvorenog kruga (b)

Dinamički model baterije



Ekvivalentni model strujnog kruga baterije

- Model baterijske ćelije opisan je sljedećom dinamičkom ovisnošću napona u_b u odnosu na struju i_b u Laplace-ovom s -području:

$$u_b(s) = i_b(s)R_b + \frac{R_p i_b(s)}{\tau_p s + 1} + U_{oc}(s)$$

- $\tau_p = R_p C_p$ vremenska konstanta dinamike polarizacije elektrolita.
- Svi navedeni parametri općenito ovise o stanju napunjenosti (SoC) i radnoj temperaturi.

- Definicija stanja napunjenosti baterije s obzirom na akumulirani naboj:

$$\xi = \frac{1}{Q_b(I_b)} \int i_b dt$$

- U gornjoj definicijskoj jednadžbi stanja napunjenosti, nabojski kapacitet baterije Q_b također može ovisiti o srednjoj struji opterećenja I_b .
- Za potrebe projektiranja sustava regulacije, uzima se da struja punjenja ima pozitivan predznak (u bateriju).

Model DC/DC energetskeg pretvarača

- Srednja vrijednost napona kojim se napaja zavojnica može se izračunati temeljem poznatog faktora popunjenosti d pulsno-širinski moduliranog (engl. PWM) DC napona napajanja u_{dc} :

$$\bar{u}_c = d u_{dc}$$

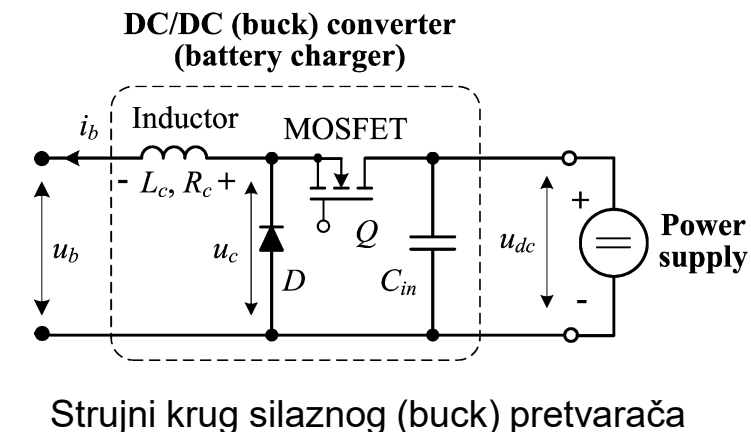
- Primjena Kirchhoffovih zakona za napone daje sljedeću jednadžbu za strujni krug na slici:

$$L_c \frac{di_c}{dt} + R_c i_c = \bar{u}_c - u_b$$

- Vremensko kašnjenje zbog pulsno-širinske modulacije (PWM-a) se tipično aproksimira kako slijedi:

$$G_{pc}(s) = \frac{1}{T_{pc}s + 1}$$

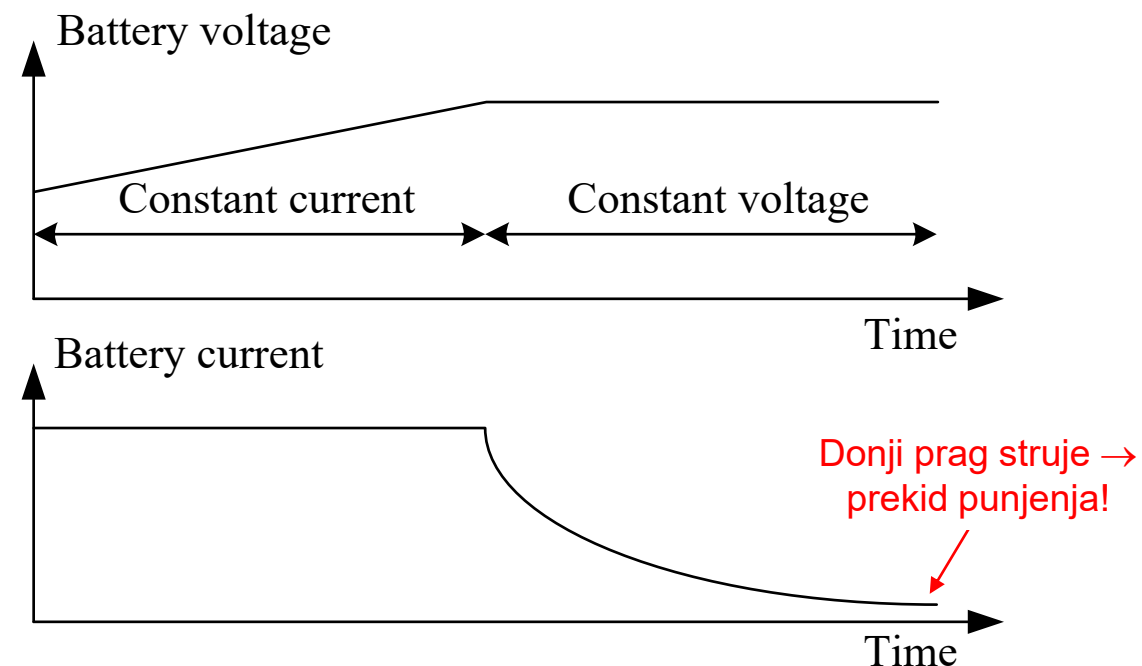
- Ekvivalentno kašnjenje je recipročna vrijednost frekvencije PWM-a $T_{pc} = 1/f_{pwm}$



CCCV strategija punjenja baterije

➤ **Strategija punjenja baterije u režimu konstantne struje i konstantnog napona (CCCV) treba zadovoljiti sljedeće zahtjeve:**

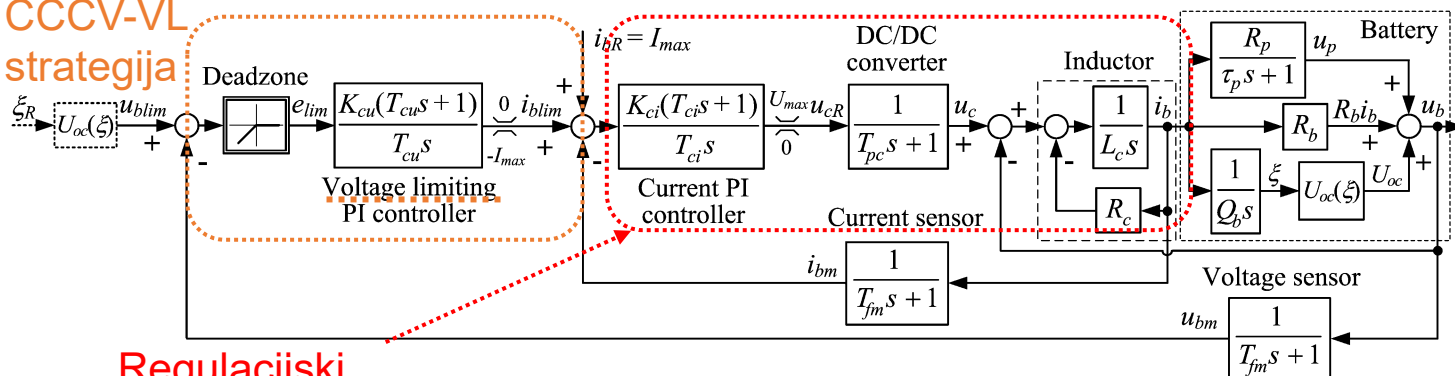
1. **Baterija se inicijalno puni maksimalnom dozvoljenom strujom sve dok napon na stezaljkama ne dosegne zadanu vrijednost napona otvorenog kruga napunjene baterije (režim konstantne struje).**
2. **Kada je dosegnut željeni iznos napona, struja punjenja se postupno smanjuje i punjenje se odvija u režimu konstantnog napona sve dok struja ne padne ispod pred-definirane granične vrijednosti.**



Ilustracija punjenja baterije strategijom konstantne struje / konstantnog napona (CCCV).

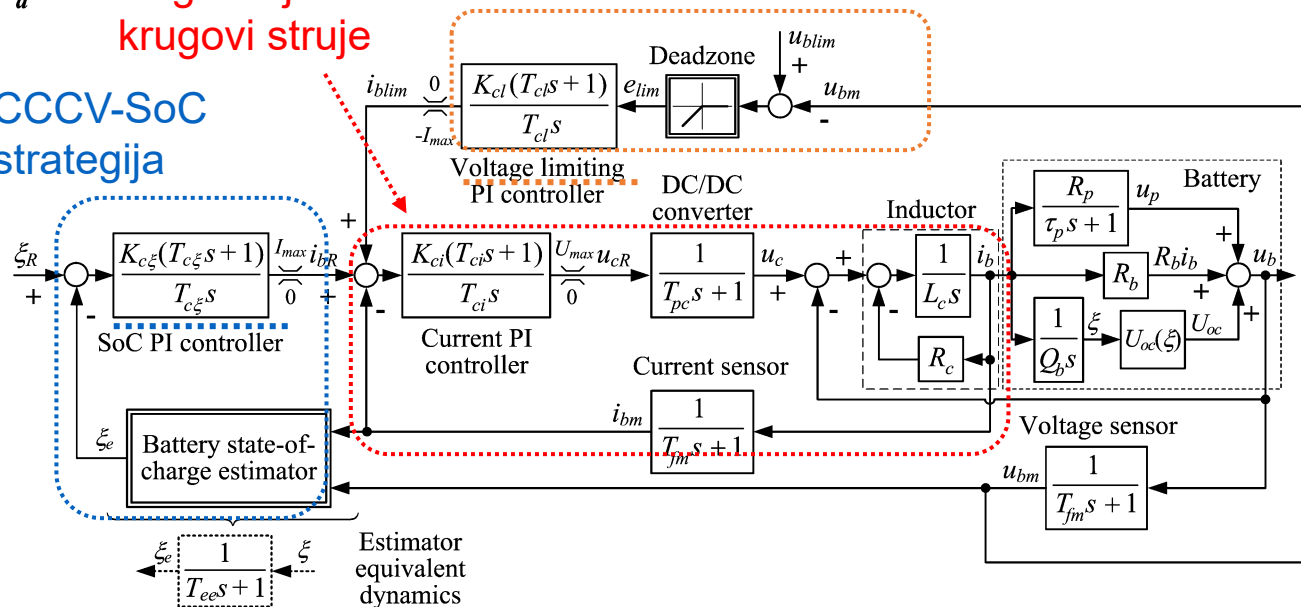
Kaskadne regulacijske strukture

CCCV-VL strategija



Regulacijski krugovi struje

CCCV-SoC strategija



Estimator equivalent dynamics

➤ CCCV-VL strategija: Nadređeni regulator za limitiranje napona zadaje referencu struje DC/DC pretvarača takvu da je:

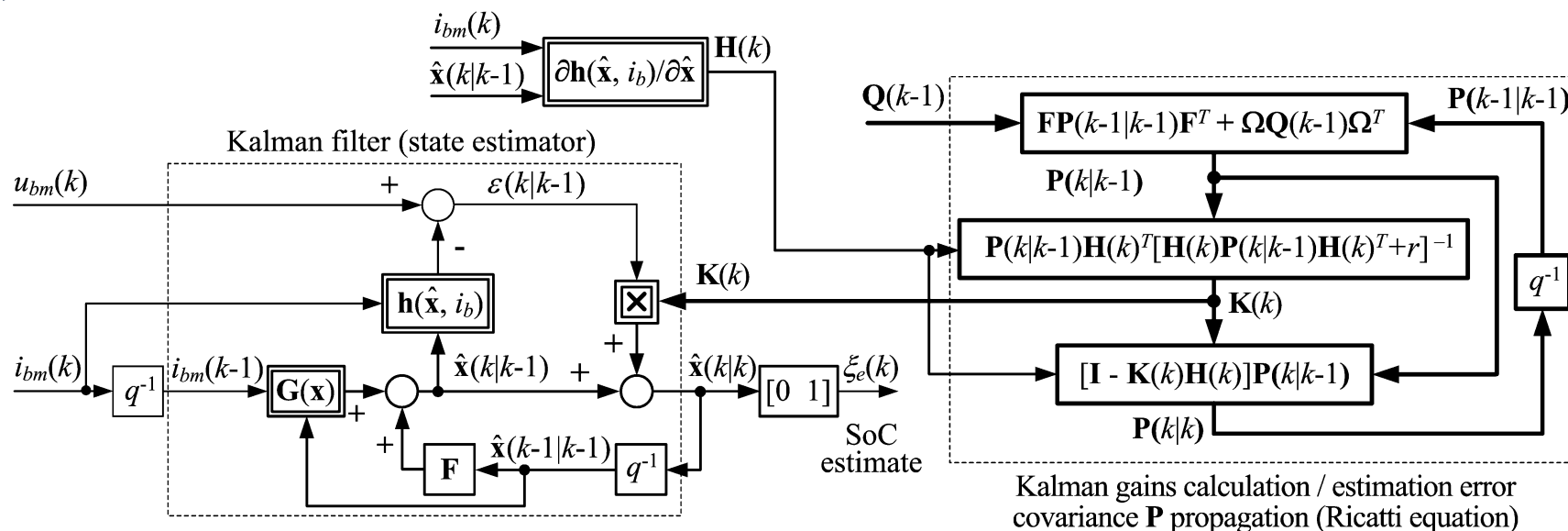
- Struja punjenja u limitu dok se napon baterije mali
- Napon na bateriji manji ili jednak ciljnoj vrijednosti u_{blim} !

➤ CCCV-SoC strategija: Nadređeni regulatori (SoC i napona na bateriji) zadaju referencu struje DC/DC pretvarača takvu da je:

- Struja punjenja u limitu dok se SoC baterije mali i napon manji od limita
- Napon na bateriji manji ili jednak dozvoljenoj vrijednosti u_{blim} (ne mora biti ista kao kod CCCV-VL strategije)!

SoC estimator: „prošireni” Kalmanov filtar

- Estimacija stanja napunjenosti temelji se na nelinearnom modelu baterije integriranom unutar tzv. “proširenog” Kalmanovog filtra (engl. EKF) kao estimatora varijabli stanja.



Blokovski dijagram proširenog (engl. Extended) Kalmanovog filtra za estimaciju SoC baterije.

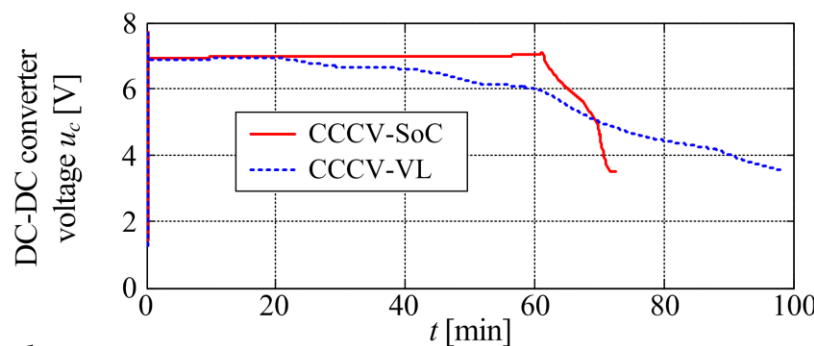
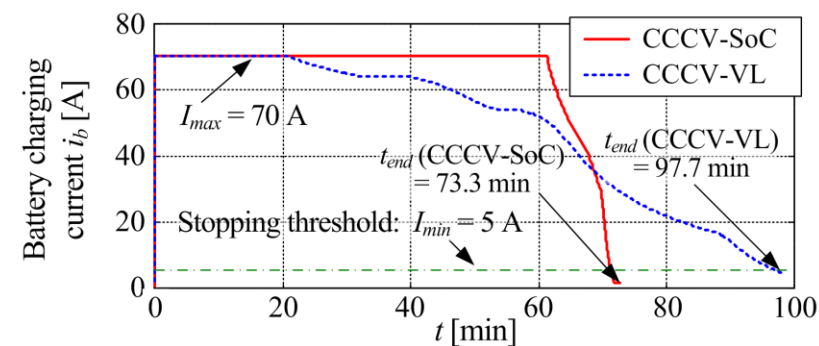
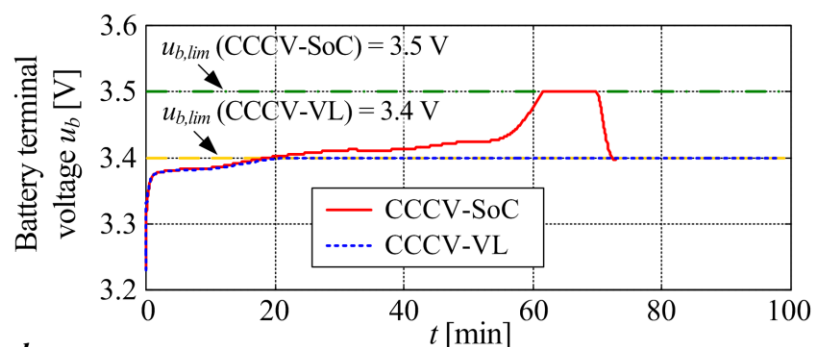
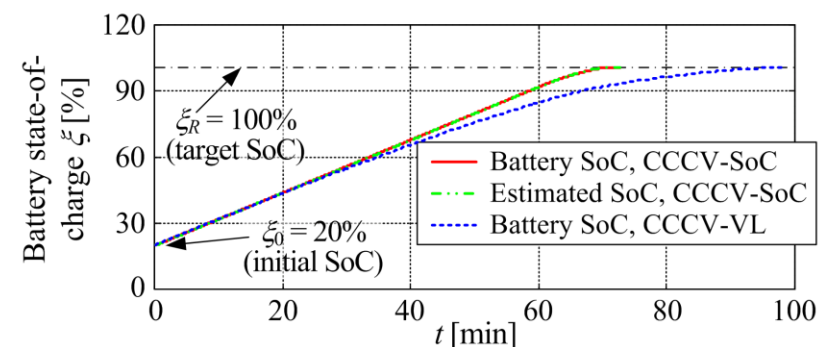
- Estimator SoC sastoji se od dva temeljna segmenta:
 - Estimatora varijabli stanja temeljenog na dostupnim mjerenjima napona i struje baterije i samog dinamičkog modela baterije definiranog ranije.
 - Izračuna optimalnih korekcijskih pojačanja (tzv. Ricattijeva jednadžba), na temelju nelineariziranog (aproksimativnog) modela baterije te pretpostavljenih kovarijanci perturbacija u stanjima (matrica Q) i varijance šuma mjerenja r .

Parametri MATLAB/Simulink simulacije

- Oba prikazana sustava regulacije punjača provjerena su simulacijama u programskom okruženju MATLAB/Simulink.
- Gornji limit struje punjenja I_{max} definira maksimalnu struju punjenja tijekom režima konstantne struje (CC).
- Prag struje za prekidanje punjenja I_{min} određuje kriterij za prekidanje procesa punjenja baterija ($i_b < I_{min}$) u režimu konstantnog napona (CV).
- Limit napona baterije $u_{bmax} = 3.5$ V unutar CCCV-SoC strategije se koristi kao sigurnosna mjera protiv prenapona na bateriji.
- CCCV-VL strategija koristi sniženi limit napona (ciljnu vrijednost u_{blim}) od 3.4 V, koja odgovara 100% SoC-a pri struji jednakoj nuli (potpuno napunjena baterija).

Parametar	Vrijednost
Nabojski kapacitet LiFePO ₄ baterijske ćelije Q_b	100 Ah
Gornji limit struje punjenja I_{max}	70 A
Prag struje za prekidanje punjenja I_{min}	5 A
CCCV-VL strategija: limit napona baterije u_{bmax}	3.4 V
CCCV-SoC strategija: limit napona baterije u_{bmax}	3.5 V
Početno stanje napunjenosti baterije ξ_0	20 %
Ciljno (konačno) stanje napunjenosti baterije ξ_R	100 %

Usporedni simulacijski rezultati



- CCCV-VL strategija puni bateriju konstantnom strujom (CC) sve dok se ne dosegne napon na bateriji 3.4 V, nakon čega slijedi postupno smanjivanje struje punjenja baterije dok se napon održava na 3.4 V (CV režim je dominantan).
- CCCV-SoC strategija puni bateriju konstantnom strujom (CC) sve dok se ne dosegne napon na bateriji od 3.5 V gdje je SoC baterije oko 95%, nakon čega slijedi nagli pad struje tijekom finalne faze punjenja (CC režim je dominantan)
- **CCCV-SoC strategija rezultira 25%-tnim ubrzanjem procesa punjenja!**

Usporedni rezultati CCCV-VL strategije (limitiranje napona) i CCCV-SoC strategije (SoC regulacija)

Zaključak

- Prikazana su dva dizajna sustava regulacije punjača koji omogućuju tzv. CCCV režim punjenja baterije primjenom kaskadnog sustava upravljanja s unutarnjom regulacijskom petljom struje.
- Nadređeni (nadzorni) nivo upravljanja realiziran je kao:
 - (i) regulacijska petlja za limitiranje napona baterije (CCCV-VL strategija),
 - (ii) regulacijska petlja stanja napunjenosti baterije (CCCV-SoC strategija)
- U potonjem slučaju “prošireni” Kalmanov filter (EKF) se koristi za estimaciju stanja napunjenosti (SoC), dok se pomoćni regulčator za limitiranje napona koristi za prečavanje prenapona na bateriji.
- CCCV-SoC strategija ima jasnu prednost pred tradicionalnom CCCV-VL strategijom uslijed posjedovanja dodatnog stupnja slobode (autoriteta upravljanja) kroz simultanu regulaciju SoC baterije i neovisno limitiranje napona na stezaljkama baterije.
- Ovo rezultira 25%-tnim ubrzanjem procesa punjenja baterije iz stanja duboke ispražnjenosti (SoC = 20%) do potpuno napunjenog stanja (SoC = 100%).

Hvala Vam na pozornosti!



danijel.pavkovic@fsb.hr

https://www.researchgate.net/profile/Danijel_Pavkovic