



REPUBLIKA HRVATSKA  
Ministarstvo regionalnoga razvoja  
i fondova Europske unije



# Pregled istraživačkih aktivnosti na području električnog sustava u sklopu hibridnog pogona skidera

Danijel Pavković, Mihael Cipek

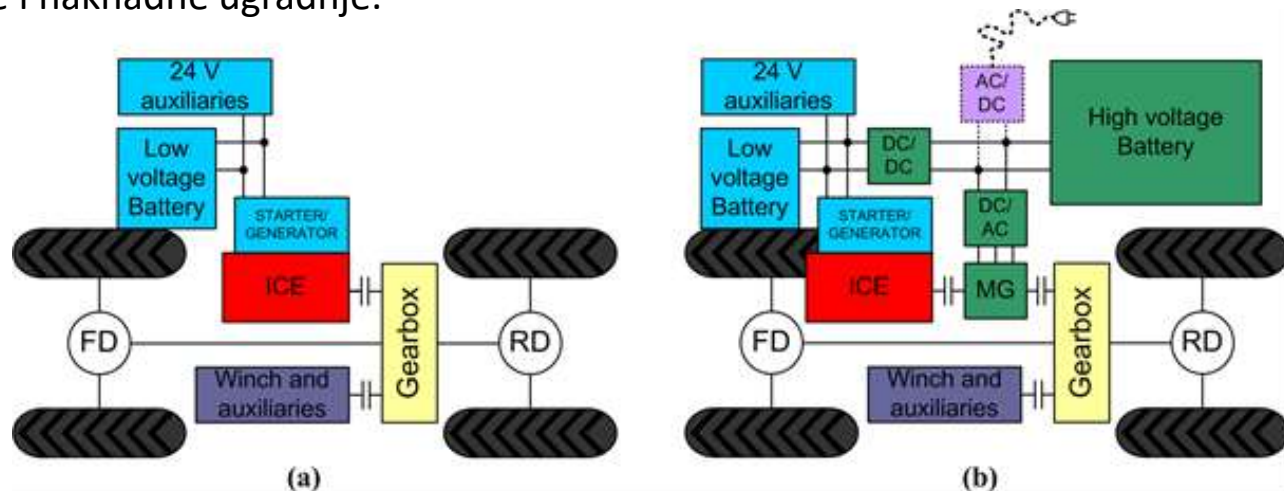
## UVOD

- Terenska vozila se sve više opremaju hibridnim električnim pogonima kako bi se smanjila potrošnja goriva i posljedično smanjile emisije štetnih plinova.
- Pohrana pogonske energije hibridnih električnih vozila je u bateriji visokog napona (obično 450V) o čijem stanju napunjenosti ovisi sposobnost izvršenja vozne misije vozila sa elektrificiranim pogonom.
- Istraživačke aktivnosti povezane sa električnim sustavom hibridnog vozila obuhvatile su sljedeće podsustave:
  - Sustav za procjenu stanja napunjenosti baterije (SoC) u realnom vremenu
  - Sustav adaptivnog punjača baterije
  - Sustav upravljanja tokovima energije DC sabirnice vozila

# Konvencionalni i hibridni skider

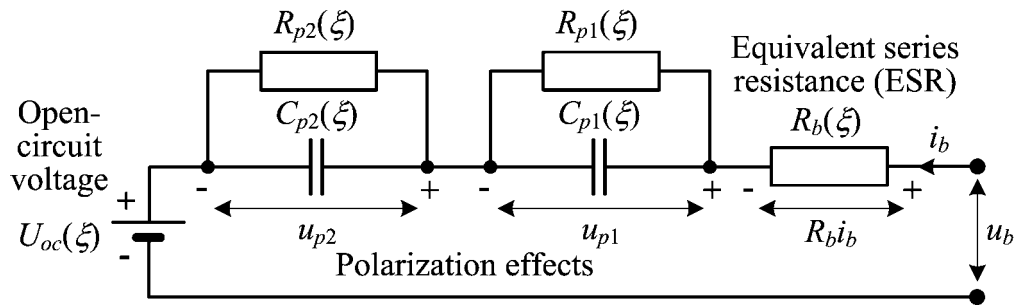
- Skider je teški šumarski traktor čiji se pogon sastoji od četverotaktnog dizelskog motora, tarnih spojki, mjenjača, te prednjeg (FD) i stražnjeg (RD) diferencijala uz ugrađeni električni sustav napona 24 V DC.
- Hibridizacija traktora trebala bi rezultirati performansama hibridnog pogona jednakih performansi kao kod konvencionalnog pogona uz minimalne modifikacije pogonskog sklopa što je poželjno sa stajališta proizvodnje, modernizacije i naknadne ugradnje.

Pojednostavljeni prikaz pogona konvencionalnog skidera (a) i predložene konfiguracije hibridnog pogona (b)

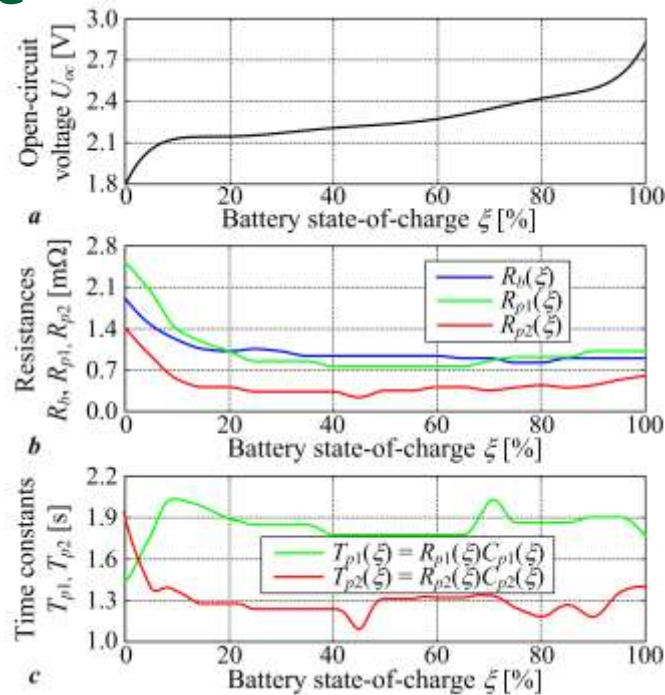


# Estimacija stanja napunjenosti baterije

- **Baterijsku ćeliju opisuje model ekvivalentnog strujnog kruga koji uključuje: napon otvorenog kruga  $U_{oc}$ , polarizacijske efekte modelirane otporima  $R_{p1}$  i  $R_{p2}$  i kapacitetima  $C_{p1}$  i  $C_{p2}$ , te ekvivalentni serijski otpor  $R_b$ .**
- Ovaj model je osnova za procjenu stanja napunjenosti (SoC) u realnom vremenu!



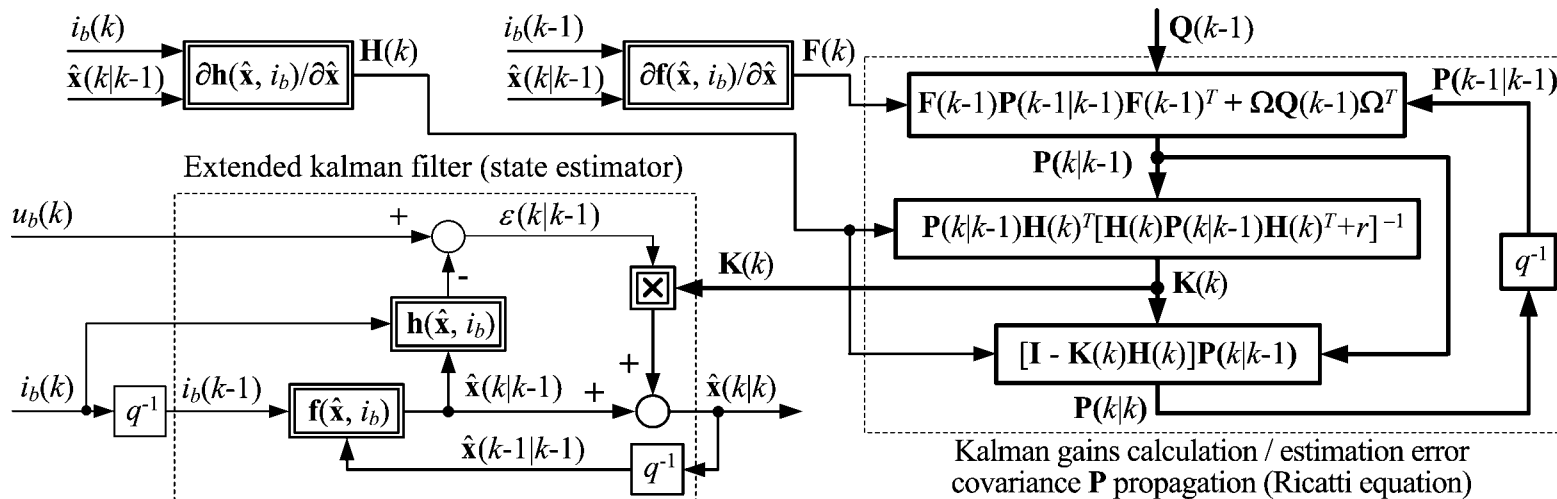
Ekvivalentni strujni krug baterijske ćelije.



Parametri baterijske ćelije.

# Estimacija stanja napunjenosti baterije

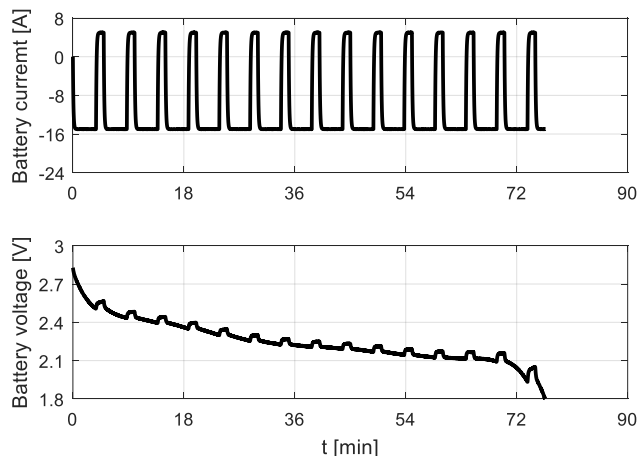
- Procjena stanja napunjenosti baterije temelji se na nelinearnom modelu baterije kojem su parametri modela a-priori poznati (opisani mapama u funkciji SoC), a koji je integriran unutar proširenog oblika estimatora stanja temeljenog na Kalmanovom filtru (tzv. EKF estimatora).



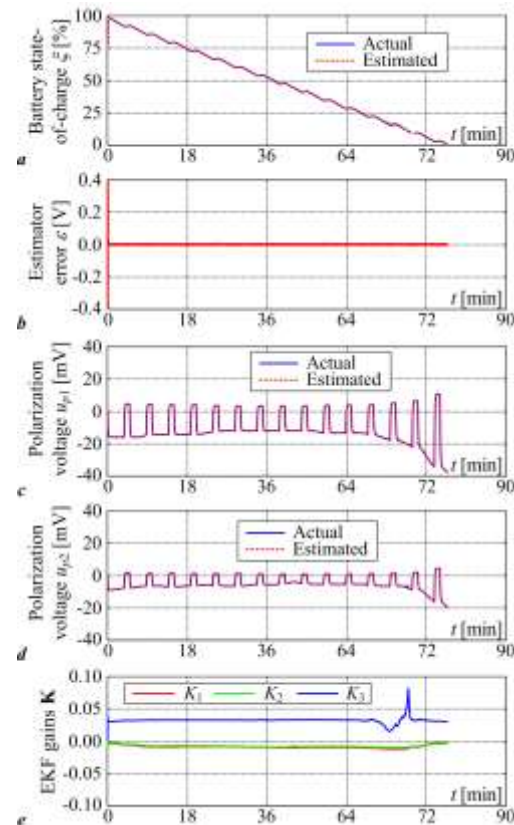
Prikaz EKF estimatora SoC u obliku blokovskog dijagrama.

# Estimacija stanja napunjenosti baterije

- Baterijska je **izložena intermitentnom punjenju i pražnjenju konstantnim strujama**. Na početku simulacijskog testa **baterija je 100% napunjena** te se potom **izmjenjuju intervali pulsnog pražnjenja i punjenja**.
- Ovo **rezultira postupnim padom SoC prema nuli**, odnosno **napon na stezaljkama baterije također postupno opada**.
- Usporedni SoC odzivi pokazuju da **estimator dobri prati stvarni SoC** (pogreška izlaza estimatora konvergira u nulu).
- Estimator SoC-a **može poslužiti za praćenje stanja napunjenosti baterije u realnom vremenu!**

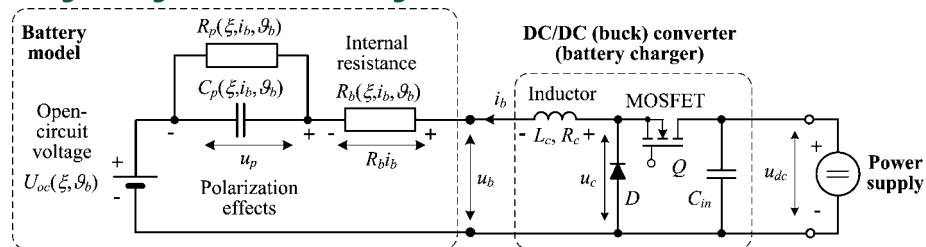


Scenarij pulsnog punjenja i pražnjenja baterije za provjeru EKF estimatora

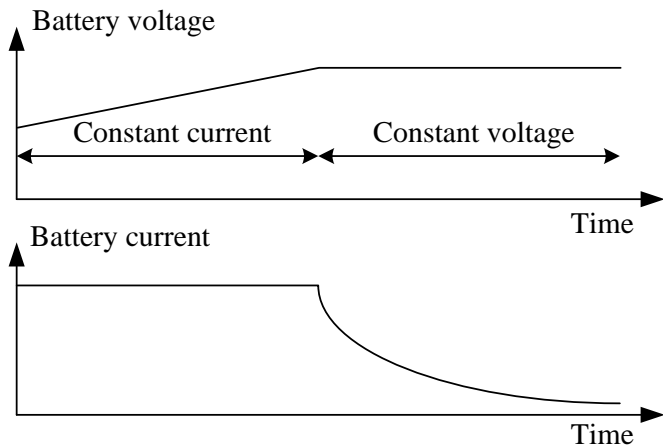


# Adaptivni sustav regulacije punjenja baterije

- Principna shema jednostavnog sustava punjača baterije uključuje silazni (engl. buck) DC/DC pretvarač koji napaja bateriju i popratno upravljačko sklopovlje i senzoriku (mjerenje struje i napona baterije).



Sustav punjenja baterije temeljen na silaznom DC/DC pretvaraču



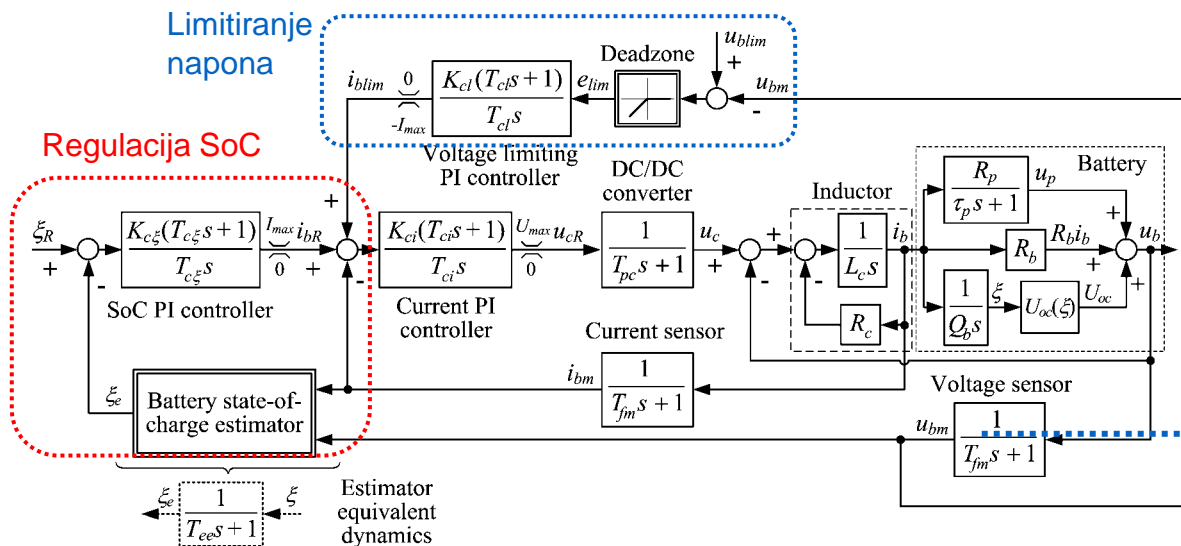
Ilustracija CCCV strategije punjenja baterije

- **Strategija punjenja baterije u režimu konstantne struje i konstantnog napona (CCCV) uključuje:**

1. **Inicijalno punjenje maksimalnom dozvoljenom strujom** sve dok napon na stezaljkama ne dosegne zadanu vrijednost napona (režim konstantne struje).
2. **Nakon toga se punjenje odvija u režimu konstantnog napona** sve dok struja ne padne na minimalan iznos.

# Adaptivni sustav regulacije punjenja baterije

- Adaptivni sustav za punjenje baterije zasniva se na konvencionalnoj strategiji CCCV punjenja baterije sa regulatorom za limitiranje napona proširenoj sa nadređenim regulatorom SoC s EKF estimatorom SoC-a.



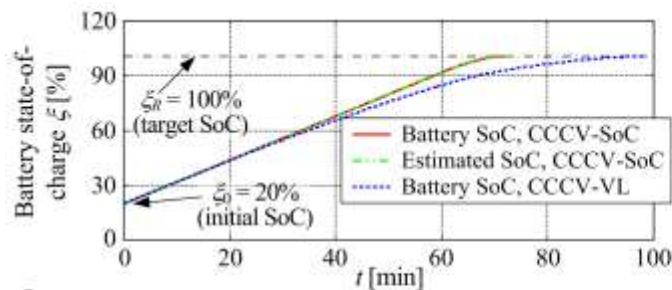
Regulacijski sustav sa dvojnim regulatorom za simultanu regulaciju SoC i limitiranje napona baterije (CCCV-SoC).

- Na ovaj način se jednostavno provodi naknadna modifikacija (retrofitting) konvencionalnog sustava za punjenje baterije.
- Sustav je modularan, što znači da može raditi bez regulatora SoC-a i pripadajućeg estimatora (CCCV-VL strategija) ili uz nadređenu (adaptivnu) regulacijsku petlju SoC-a (CCCV-SoC strategija).

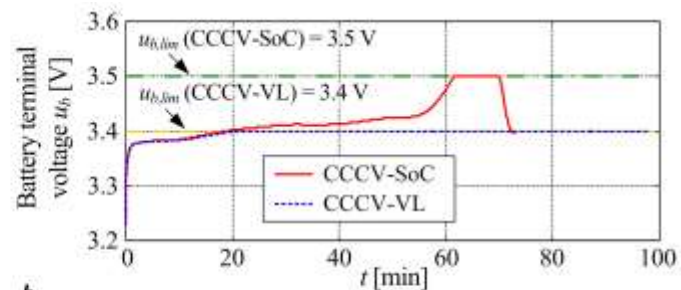


# Adaptivni sustav regulacije punjenja baterije

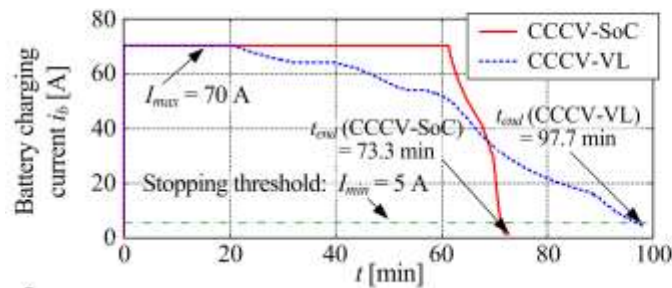
- Konvencionalna strategija punjenja (CCCV-VL) rezultira znatno kraćim intervalom punjenja konstantnom strujom u odnosu na adaptivnu strategiju (CCCV-SoC).
- Adaptivna strategija punjenja baterije rezultira 25% kraćim vremenom punjenja baterije (25% brži proces punjenja).



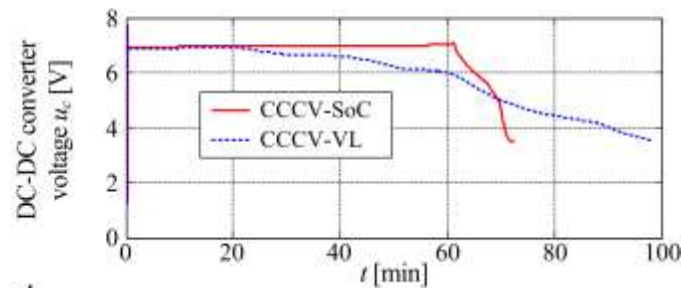
a



b



c

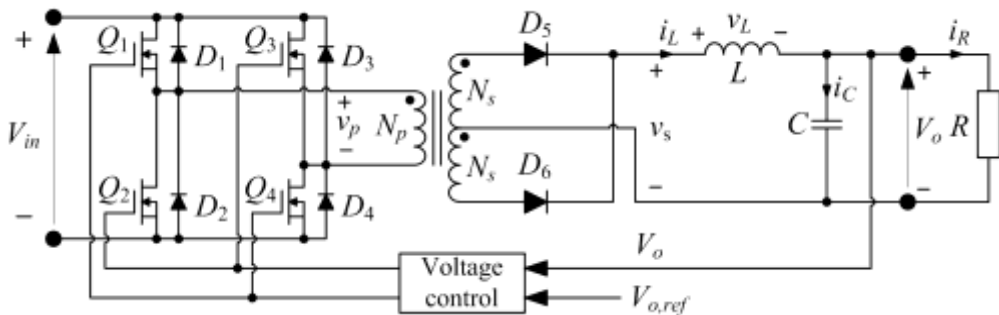


d

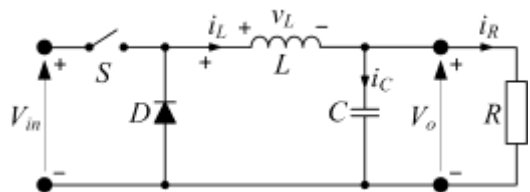
Usporedni rezultati CCCV-VL strategije (limitiranje napona) i CCCV-SoC strategije (SoC regulacija)

# Integracija visokonaponskog i niskonaponskog DC sustava

- Za integraciju visokonaponskog istosmjernog sustava glavne baterije (radnog napona 450 V DC) s niskonaponskom sabirnicom radnog napona 24V DC, potreban je namjenski DC/DC pretvarač!



Isolirani DC/DC pretvarač opće namjene (step-up/step-down).

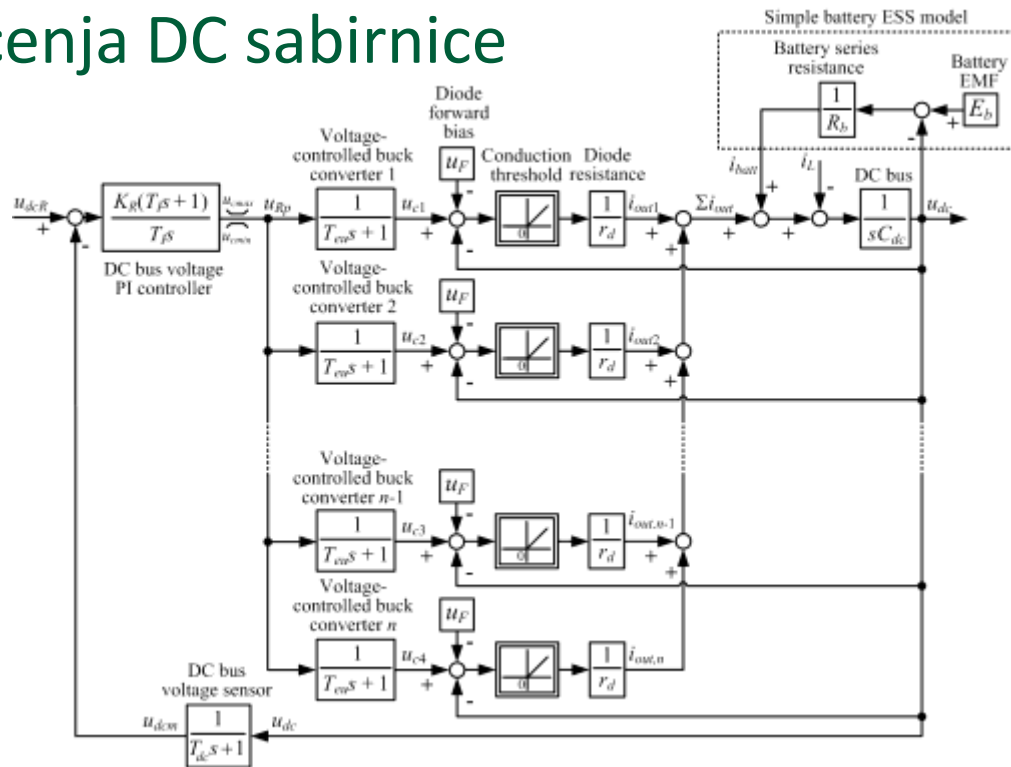


Pojednostavljeni model DC/DC pretvarača

- U slučaju rada DC/DC pretvarača karakteriziranog samo protokom snage s visokonaponske na niskonaponsku stranu, za analizu kruga i dizajn upravljačkog sustava može se koristiti pojednostavljena topologija silaznog DC/DC pretvarača koristeći odgovarajući pojednostavljeni model.
- S druge strane, iz perspektive sigurnosti rada, bilo bi poželjno koristiti izolirani (flyback) DC/DC pretvarač.

# Sustav raspodjele opterećenja DC sabirnice

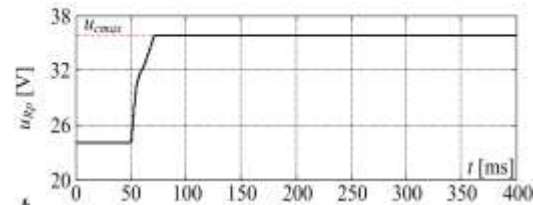
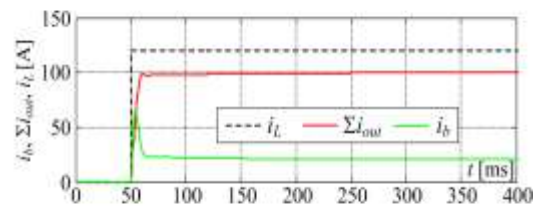
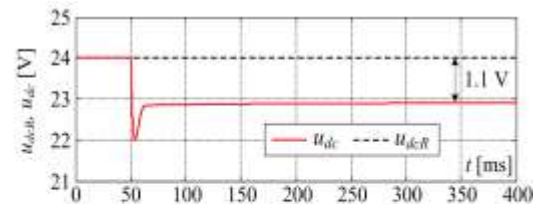
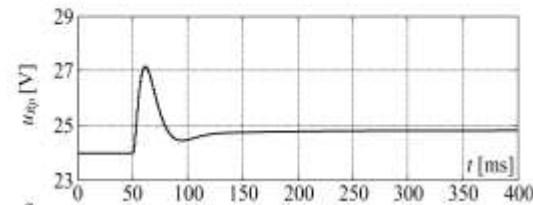
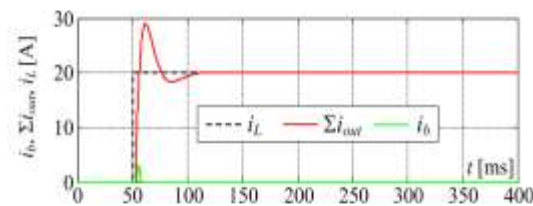
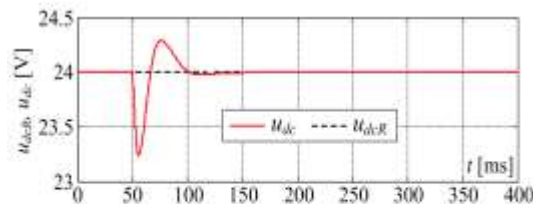
- Paralelno spojeni i naponski regulirani silazni („buck”) pretvarači spojeni su na zajedničku niskonaponsku DC sabirnicu preko blokirajućih dioda koje sprječavaju reverzni tok struje.
- U normalnim radnim uvjetima, naponski regulirani pretvarači mogu opskrbljivati DC sabirnicu do svojih unutarnjih strujnih ograničenja.
- Kada je ukupna maksimalna struja prekoračena, rezultirajući pad napona DC sabirnice dovodi do toga da baterija na sabirnici brzo preuzima prekomjerno opterećenje.



Kaskadna struktura regulacijskog sustava napona DC sabirnice.

# Rezultati simulacija

- Sustav regulacije tokova snage DC/DC pretvarača verificiran je računalnim simulacijama i eksperimentalno.
- Razmatraju se dva scenarija: (i) režim malih signala s relativno malom promjenom opterećenja uz rad DC/DC pretvarača unutar graničnih vrijednosti napona/struje, i (ii) režim velikih signala s velikom promjenom opterećenja uz rad DC/DC rad pretvarača na graničnim vrijednostima napona/struje.
- Cjelokupni regulacijski sustav karakterizira relativno mali pad napona DC sabirnice nakon promjene struje opterećenja DC sabirnice.
  - U režimu „malih signala“** napajanje istosmjerne sabirnice je pretežno iz DC/DC pretvarača
  - U režimu „velikih signala“** DC/DC pretvarači opskrbljuju DC sabirnicu do skupnog limita struje, dok višak opterećenja pokriva baterija!



Rezultati simulacije strategije upravljanja centraliziranom raspodjelom opterećenja: režim malog signala (a) i režim velikog signala (b).

## Zaključci

- Prikazan je dizajn “proširenog” Kalmanovog filtra (EKF-a) koji se koristi za estimaciju stanja napunjenosti (SoC) baterije.
- Potvrđena je sposobnost estimatora SoC-a zasnovanog na EKF-u da prati promjene SoC-a uslijed tijekom izuzetno dinamičnog profila struje baterije, što ga čini pogodnim za rad u realnom vremenu.
- Estimator SoC baterije koristi se u sustavu adaptivnog punjača kao nadogradnje na konvencionalni CCCV punjač koji zadovoljava ograničenja napona i struje baterije. Primjena adaptivnog punjača rezultira 25% bržim procesom punjenja u odnosu na konvencionalni.
- Također je prikazan sustav upravljanja tokovima energije DC sabirnice vozila koji učinkovito kompenzira opterećenje i održava napon sabirnice unutar prihvatljivih granica.

## Publikacije povezane s izlaganjem:

Krznar, Matija; Pavković, Danijel; Cipek, Mihael: Direct-current electrical systems integration on a hybrid skidder using a parallelized step-down power converter array. *Energy Reports*, 8 (2022), 14741-14752

Pavković, Danijel; Premec, Antun; Krznar, Matija; Cipek, Mihael: Current and Voltage Control System Designs with EKF-based State-of-Charge Estimator for the Purpose of LiFePO<sub>4</sub> Battery Cell Charging, *Optimization and engineering*, 23 (2022), 2335-2363. doi:10.1007/s11081-022-09728-1

Kvaternik, Karlo; Pavković, Danijel; Kozhushko, Yuliia; Cipek, Mihael: Extended Kalman Filter Design for State-of-Charge Estimation of a Lithium-Titanate Battery Cell. *Proceedings of International Conference on Smart Systems and Technologies (SST 2022)*, pp. 239-244, Osijek, Hrvatska, 2022.

Pavković, Danijel; Kasać, Josip; Krznar, Matija; Cipek, Mihael: A Parameter Estimator-based Approach to Constant-Current/Constant-Voltage Charging of a Lithium-Iron-Phosphate Battery Cell, *Proceedings of the 17th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES 2022)*, Paphos, Cipar, 2022, Paper No. 0214, 16 pages.

Krznar, Matija; Parčina, Ana; Pavković, Danijel; Kozhushko, Yuliia; Cipek, Mihael: Integration of Electrical Systems on a Hybrid Skidder based on Parallelized Low Cost Direct Current Power Converter Array, *Proceedings of the 16th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES 2021)*, Dubrovnik, Hrvatska, 2021; Paper No. SDEWES2021.0451, 19 pages.

Pavković, Danijel; Kozhushko, Yuliia; Premec, Antun; Krznar, Matija; Cipek, Mihael: Comparison of Two Battery Charging Control System Designs without and with SoC Estimator // *Proceedings of the 16th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES 2021)*, Dubrovnik, Hrvatska, 2021, Paper no. SDEWES2021.0450, 14 pages

Parčina, Ana. "Integracija elektroenergetskih sustava na hibridnim šumskim traktorima temeljena na paralelnom nizu pretvarača istosmjernje struje." *Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2021.* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:962415>

Premec, Antun. „Razvoj adaptivnog sustava regulacije punjača baterije sa estimacijom napona otvorenog kruga”, *Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.* <https://dabar.srce.hr/islandora/object/fsb%3A6061>

# Hvala na pažnji!



[danijel.pavkovic@fsb.hr](mailto:danijel.pavkovic@fsb.hr)