



REPUBLIKA HRVATSKA
Ministarstvo regionalnoga razvoja
i fondova Europske unije



Integracija električnih sustava na hibridnom električnom skideru temeljena na paraleliziranom nizu jeftinih pretvarača istosmjerne struje

Danijel Pavković, Mihael Cipek

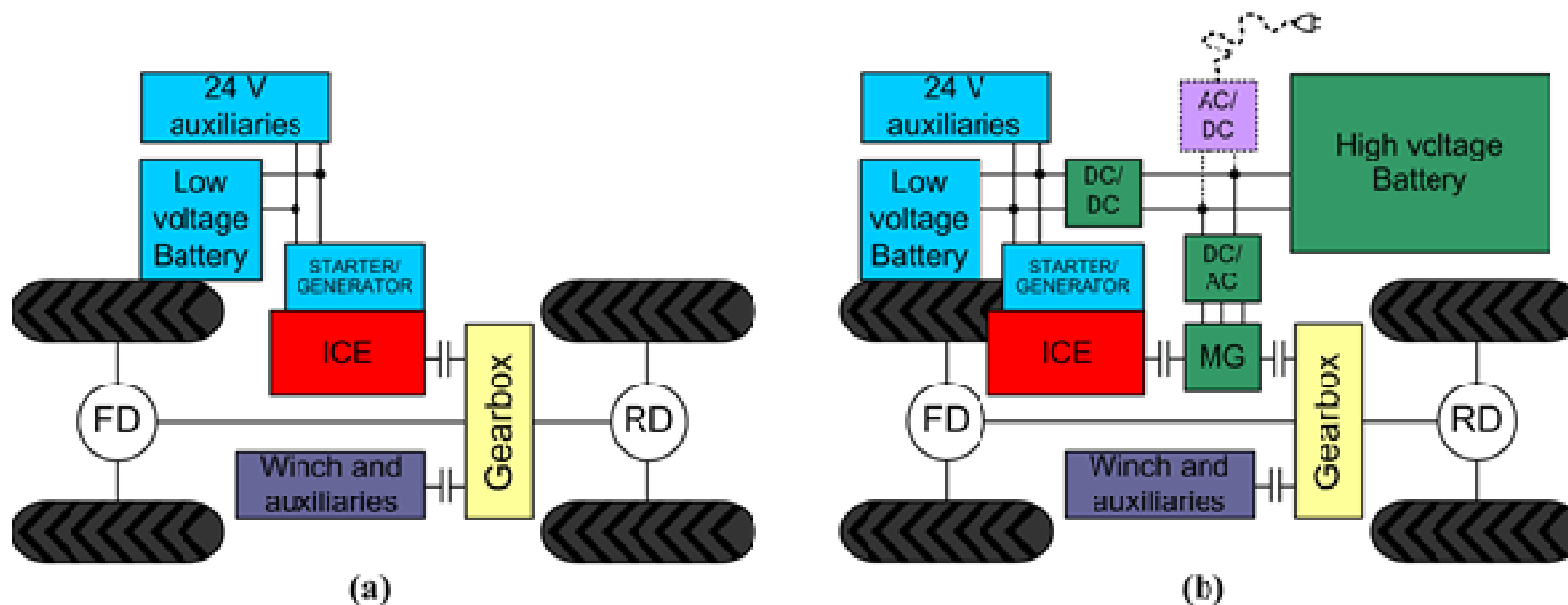
UVOD

- Ubrzano globalno zagrijavanje ohrabruje znanost i industriju u potrazi za novim tehnologijama u korist smanjenja stakleničkih plinova.
- Terenska vozila se sve više opremaju hibridnim električnim pogonima kako bi se smanjila potrošnja goriva i posljedično smanjile emisije stakleničkih plinova.
- Pohrana pogonske energije hibridnih električnih vozila je u bateriji visokog napona (obično 450V), dok mnogi uređaji u vozilu (radio, rasvjeta i slično) rade na niskonaponskoj (24V) sabirnici istosmjerne struje.
- Baterija višeg napona i većeg kapaciteta može se koristiti za napajanje niskonaponskog sustava korištenjem više odgovarajućih pretvarača istosmjerne struje (DC/DC).
- Korištenjem promjenjivog broja aktivnih DC/DC pretvarača može se postići rad blizu točke optimalne učinkovitosti, a uz istodobno izbjegavanje pregrijavanja pojedinačnih pretvarača.
- Predloženi pristup verificiran je simulacijama, a eksperimentalno su dobiveni podaci o učinkovitosti DC/DC pretvarača.

Konvencionalni i hibridni skider

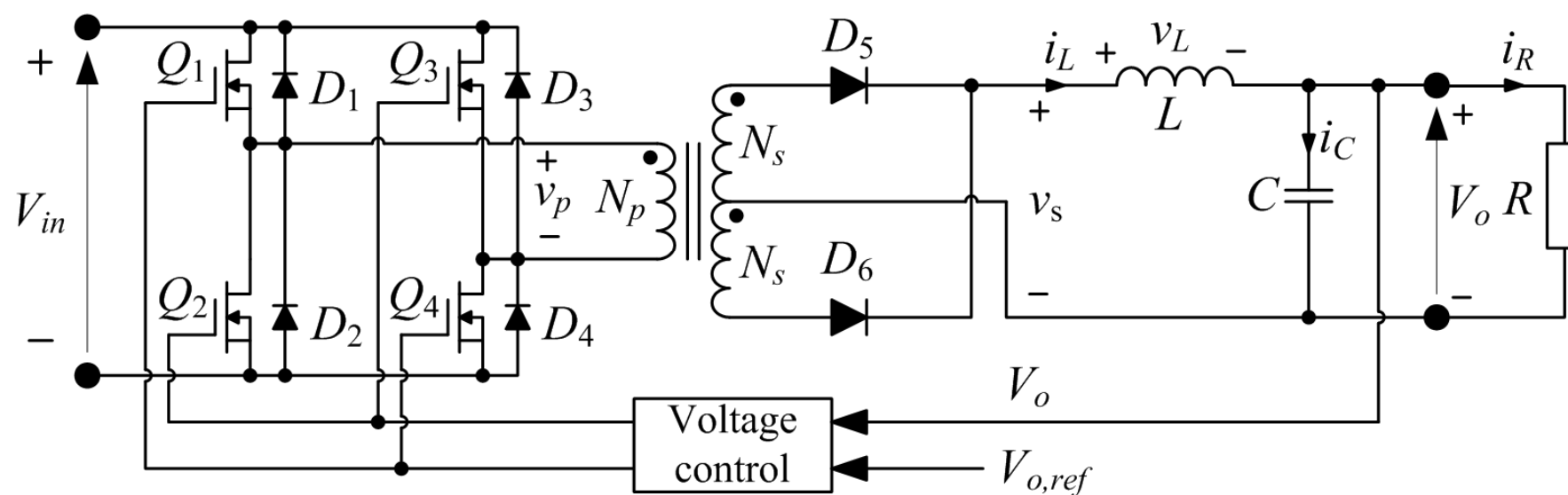
- Skidder je teški šumarski traktor čiji se pogon sastoji od četverotaktnog dizelskog motora, tarnih spojki, mjenjača s deset stupnjeva prijenosa te prednjeg (FD) i stražnjeg (RD) diferencijala uz ugrađeni električni sustav napona 24 V DC.
- Hibridizacija traktora trebala bi rezultirati performansama hibridnog pogona jednakih performansi kao kod konvencionalnog pogona uz minimalne modifikacije pogonskog sklopa što je poželjno s proizvodnog stajališta.
- Stoga je predložena paralelna hibridna konfiguracija P2 koja zadovoljava unaprijed definirane zahtjeve voznih performansi.

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

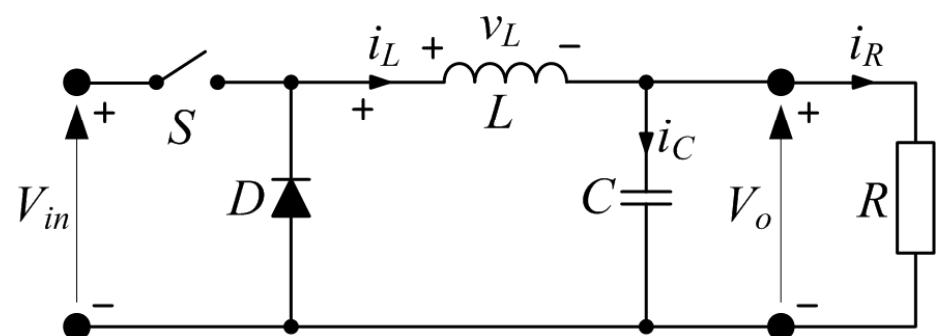


Integracija visokonaponskog i niskonaponskog DC sustava

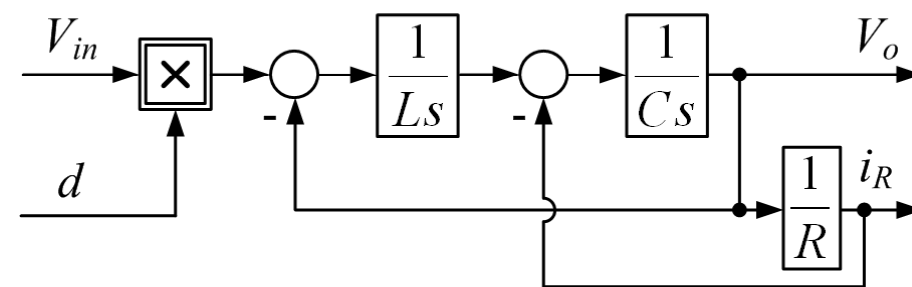
- Za integraciju visokonaponskog istosmjernog sustava glavne baterije (radnog napona 450 V DC) s niskonaponskom sabirnicom radnog napona 24V DC, potreban je namjenski DC/DC pretvarač!



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



Pojednostavljeni model DC/DC pretvarača

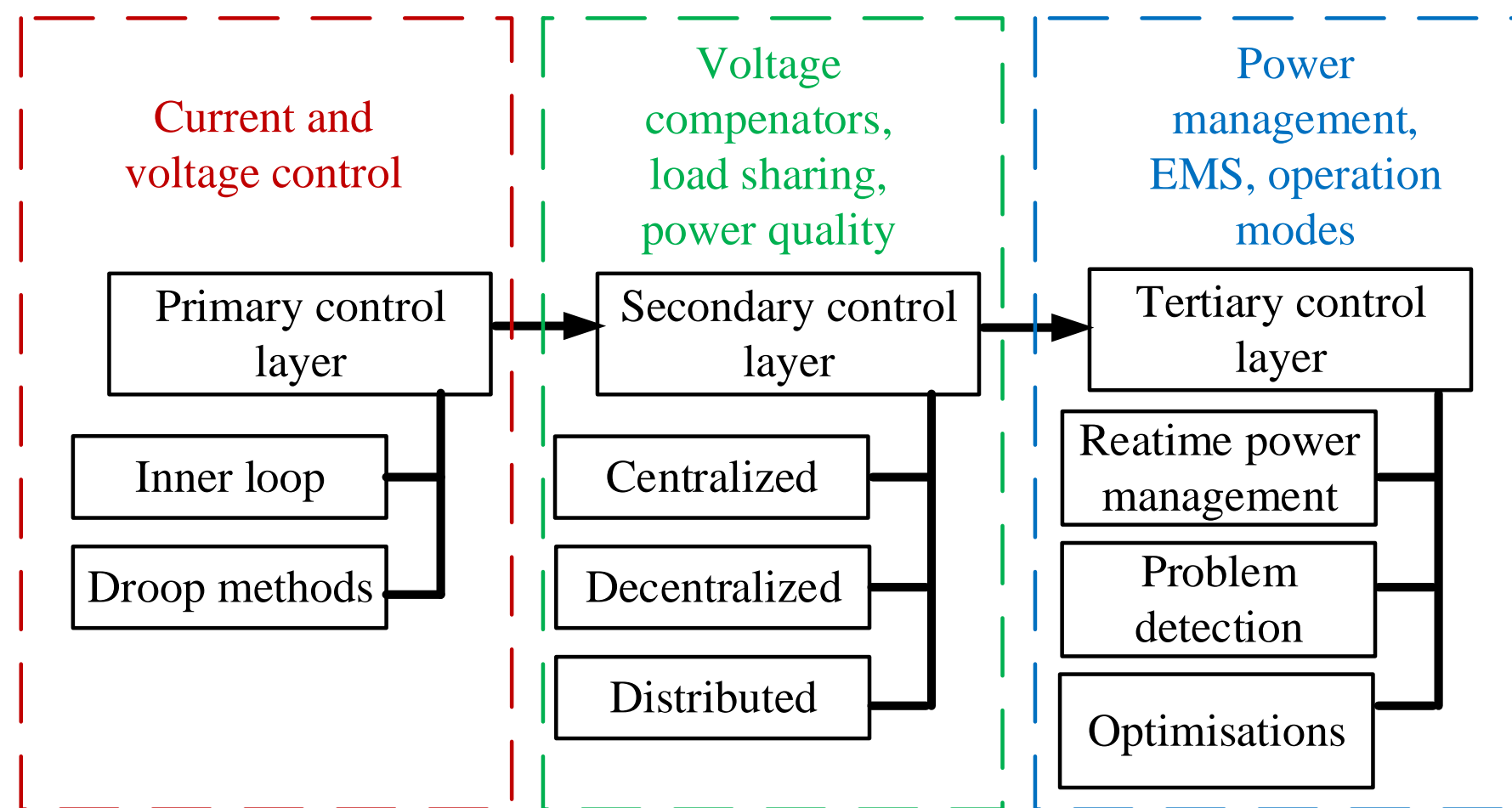


Blok dijagram pojednostavljenog modela "buck" DC/DC pretvarača

- 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.

Hijerarhijska arhitektura regulacijskog sustava

- Hijerarhijska arhitektura regulacije tokova snage koristi se u mnogim sustavima distribucije energije.
- Sastoji se od primarne, sekundarne i tercijarne razine, kao što je prikazano u nastavku:
 - primarna razina regulira struju/napon
 - sekundarna razina vrši kompenzaciju pada napona, podjelu opterećenja
 - tercijarna razina (najviša razina) bavi se raspodjelom snage i energijom te optimizacijom
- Takvo hijerarhijsko uređenje sustava regulacije ostvareno je istovremenom upotrebom koordiniranog upravljanja temeljenog na komunikacijskoj vezi!



Pregled hijerarhijskog regulacijskog sustava iz perspektive DC mikromreže

Dizajn regulacijskog sustava: optimum dvostrukog odnosa

- Predložen je optimum dvostrukog odnosa kako bi se pronašle analitičke veze između koeficijenata karakterističnog polinoma zatvorene regulacijske petlje proizvoljnog reda.
- Cilj je imati sustav zatvorene regulacijske petlje s “optimalnim” prigušenjem koji odgovara sustavu 2. reda s faktorom prigušenja 0,707.
- Razmatra se linearni, vremenski invarijantan sustav zatvorene petlje s jednim ulazom i jednim izlazom bez nula prijenosne funkcije i mrtvog vremena, opisan svojim karakterističnim polinomom:

$$A_c(s) = D_2^{n-1} D_3^{n-2} \cdots D_n T_e^n s^n + \cdots + D_2 T_e^2 s^2 + T_e s + 1$$

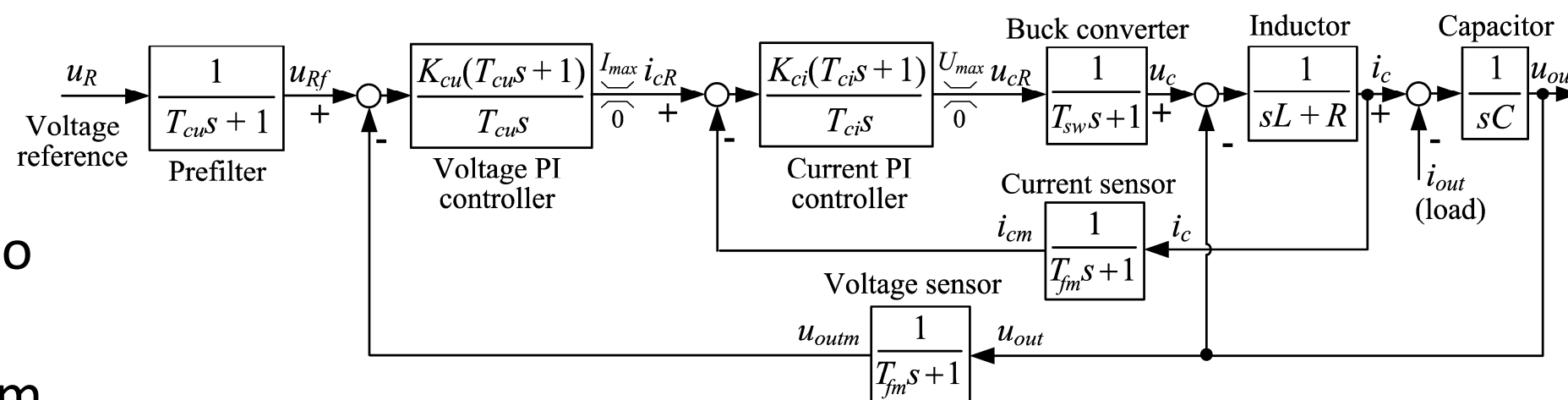
**Karakteristični odnosi (optimalna vrijednost = 0.5
odgovara faktoru prigušenja $\zeta = 0.707$)**

**Ekvivalentna vremenska konstanta (određuje
brzinu odziva)**

Izjednačavanjem ovih koeficijenata s onima stvarnog sustava unutar regulacijske petlje mogu se dobiti analitički izrazi za parametre regulatora sustava s jednim ulazom i jednim izlazom.

Primarna razina: regulacija napona i struje

- Sustav regulacije napona silaznog pretvarača ima PI regulatore s povratnom vezom napona i struje u tzv. kaskadnoj strukturi.
- PI regulator napona zadaje referencu struje za unutarnju petlju regulacije struje i učinkovito ograničava izlaznu struju pretvarača.
- Optimum dvostrukog odnosa rezultira sljedećim parametrima regulatora:



Kaskadna struktura regulacijskog sustava silaznog („buck“) pretvarača s PI regulatorima napona/struje.

$$T_{ei} \geq \frac{T_{\Sigma i}}{D_{2i}} = \frac{T_{sw} + T_{fm}}{D_{2i}}$$

$$T_{ci} = \frac{L}{R}$$

$$K_{ci} = R \frac{T_{ci}}{T_{ei}}$$

$$T_{cu} = T_{eu} = \frac{T_{\Sigma u}}{D_{2u} D_{3u}} = \frac{T_{ei} + T_{fm}}{D_{2u} D_{3u}}$$

$$K_{cu} = \frac{C}{D_{2u} T_{eu}}$$

Pravila parametriranja su jednostavna i povezuju parametre regulatora s parametrima modela procesa i parametrima prigušenja zatvorene petlje (optimalni iznosi prigušenja)!

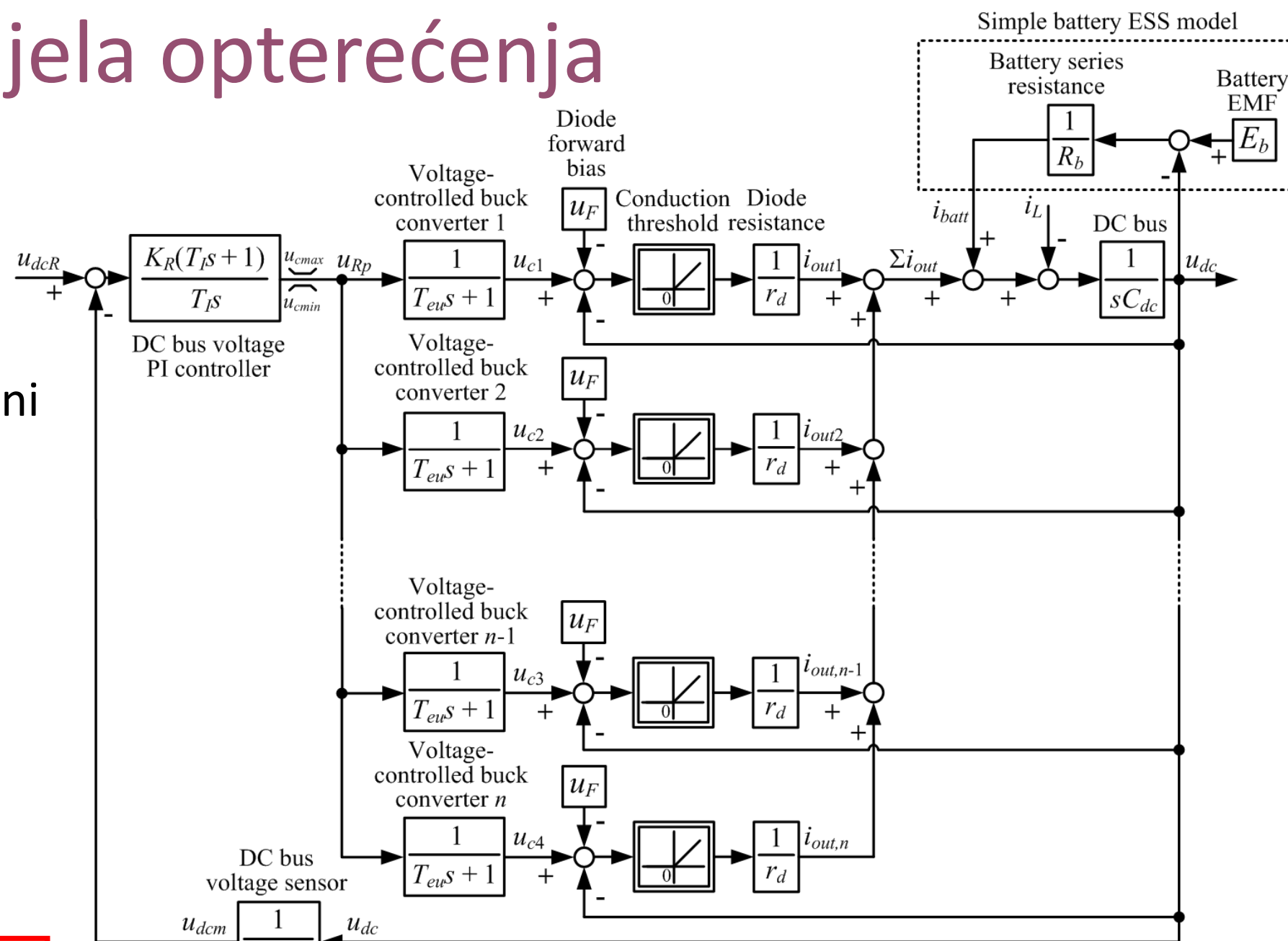
Sekundarna razina: raspodjela opterećenja

- 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.
- Namještanje PI regulatora napona DC sabirnice prema optimumu dvostrukog odnosa:

$$T_{edc} = \frac{1}{D_{2dc} D_{3dc}} \frac{T_{eu} T_{\Sigma dc}}{T_{eu} + T_{\Sigma dc}}$$

$$K_R = \frac{T_{eu} + T_{\Sigma dc}}{D_{2dc} T_{edc}} - 1$$

$$T_I = T_{edc} \left(1 - \frac{D_{2dc} T_{edc}}{T_{eu} + T_{\Sigma dc}} \right)$$



Kaskadna struktura regulacijskog sustava buck pretvarača s PI regulatorima napona/struje.

Tercijarna razina: upravljanje tokovima energije

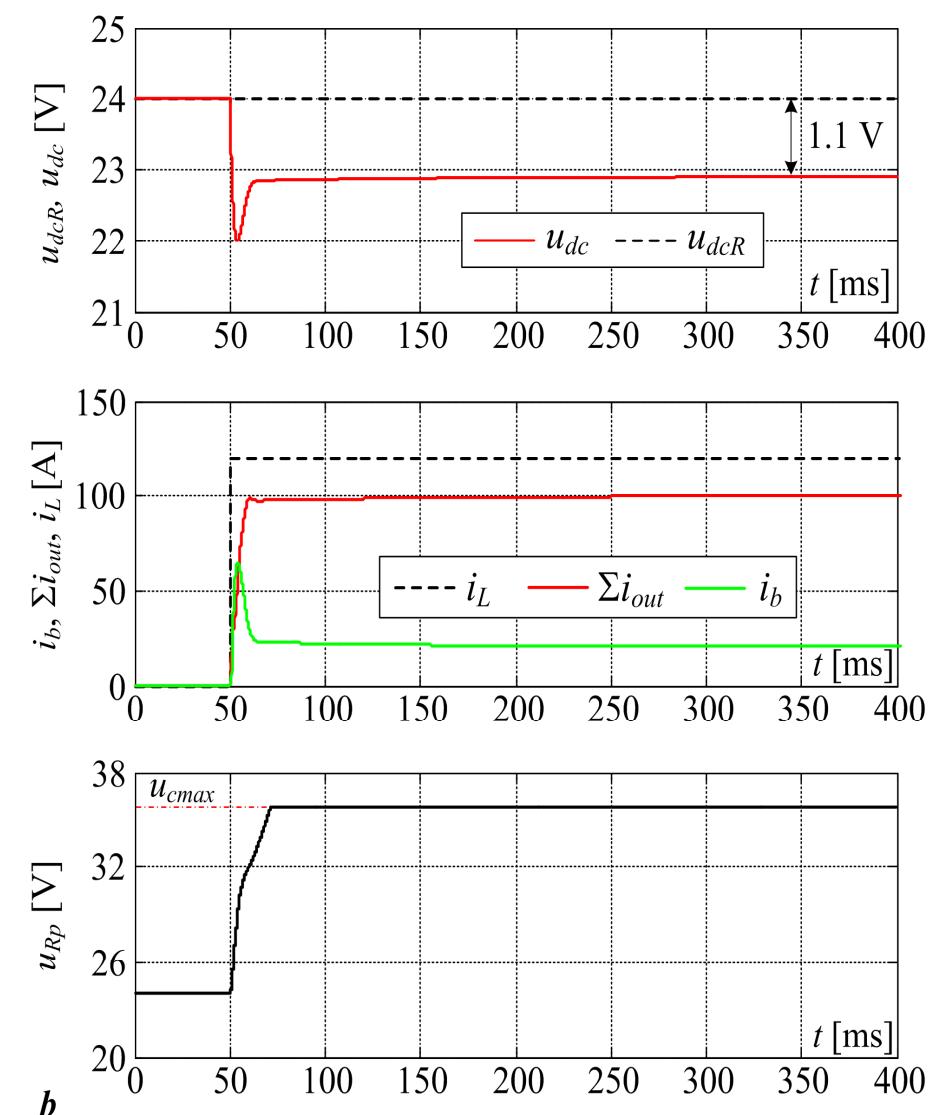
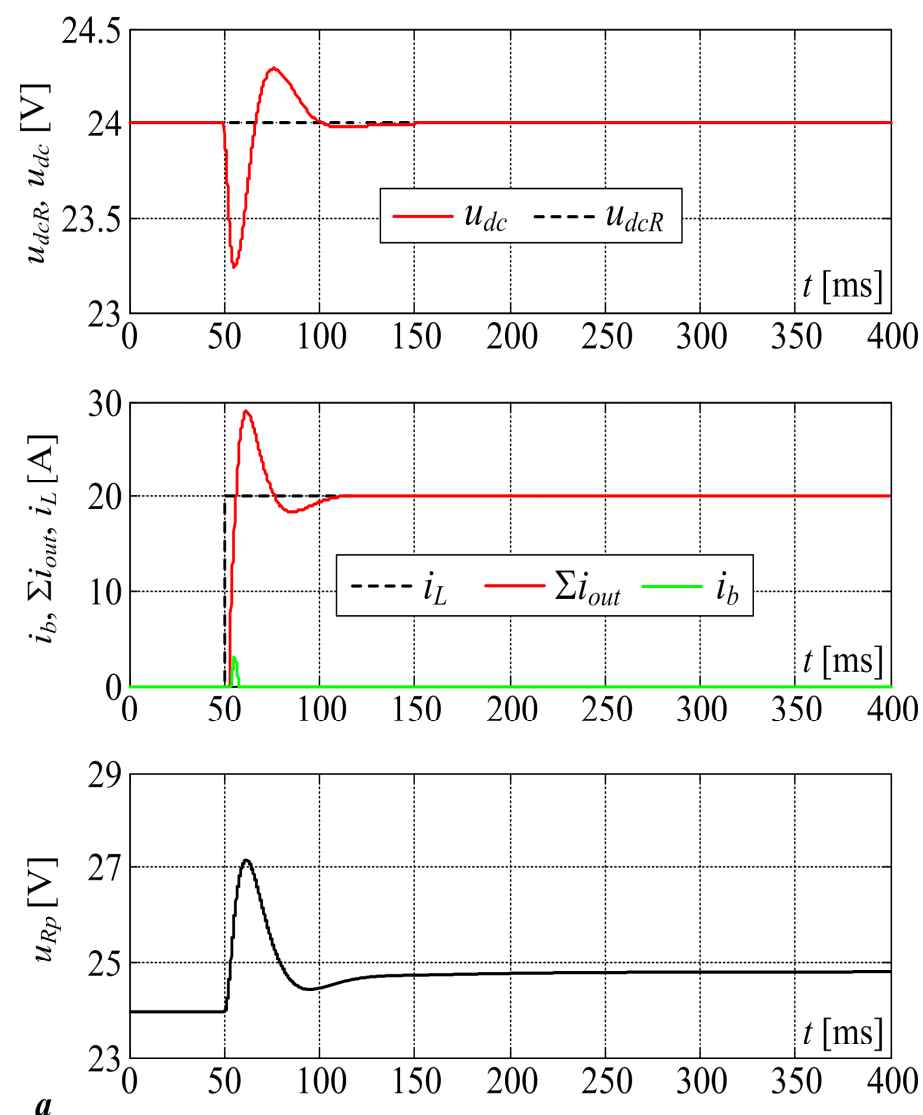
- Jedno moguće rješenje za implementaciju tercijarne razine je UKLJUČIVANJE i ISKLJUČIVANJE paralelno spojenih DC/DC pretvarača ovisno o uvjetima opterećenja.
- Mjerenjem izlazne snage mogu se odrediti radni uvjeti (tj. učinkovitost) za svaki DC/DC pretvarač.
- S druge strane, učinkovitost svakog pojedinačnog pretvarača može se procijeniti korištenjem unaprijed snimljenih karakteristika učinkovitosti pretvorbe energije (statičke mape pretvarača).
- Dakle, ukupna učinkovitost paralelno spojenih energetske pretvarača može se procijeniti na temelju prethodno poznatih mapa učinkovitosti pojedinačnih pretvarača:

$$\eta_{tot} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{o,i}}{\sum_{i=1}^n \frac{P_{o,i}}{\eta_i}}$$

- To može predstavljati osnovu za on-line optimizaciju cjelokupnog paralelnog niza DC/DC pretvarača, ili off-line određivanje zakona upravljanja koji unaprijed određuje potreban broj aktivnih pretvarača snage za određene uvjete opterećenja na DC sabirnici.

Rezultati simulacija

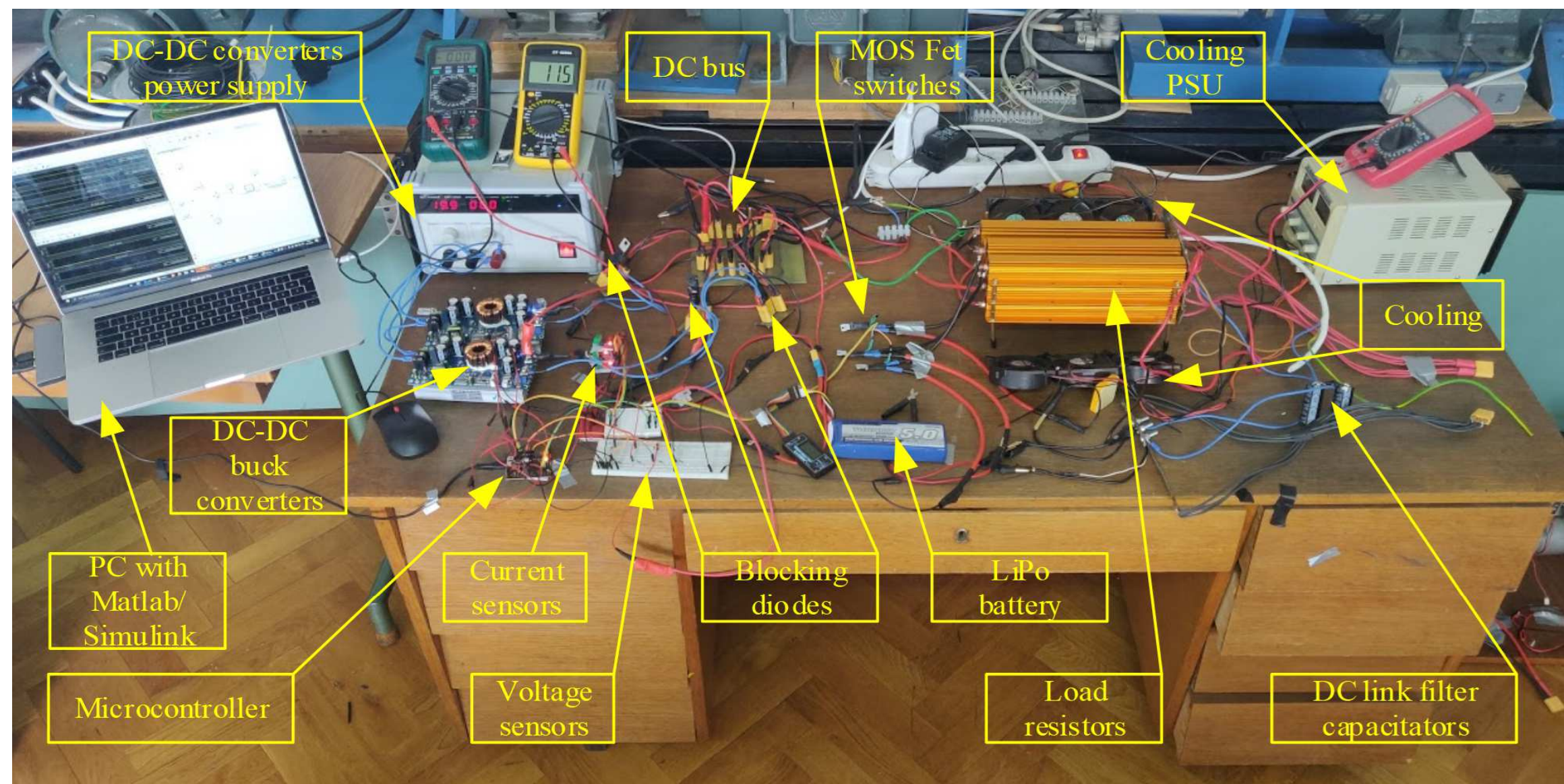
- Predložene regulacije primarne i sekundarne razine DC/DC pretvarača verificirane su računalnim simulacijama u Matlab/Simulink okruženju.
- Razmatraju se dva scenarija: (i) režim malih signala s relativno malom promjenom opterećenja uz rad DC/DC pretvarača unutar graničnih vrijednosti napona/struje, 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 istosmjernе 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).

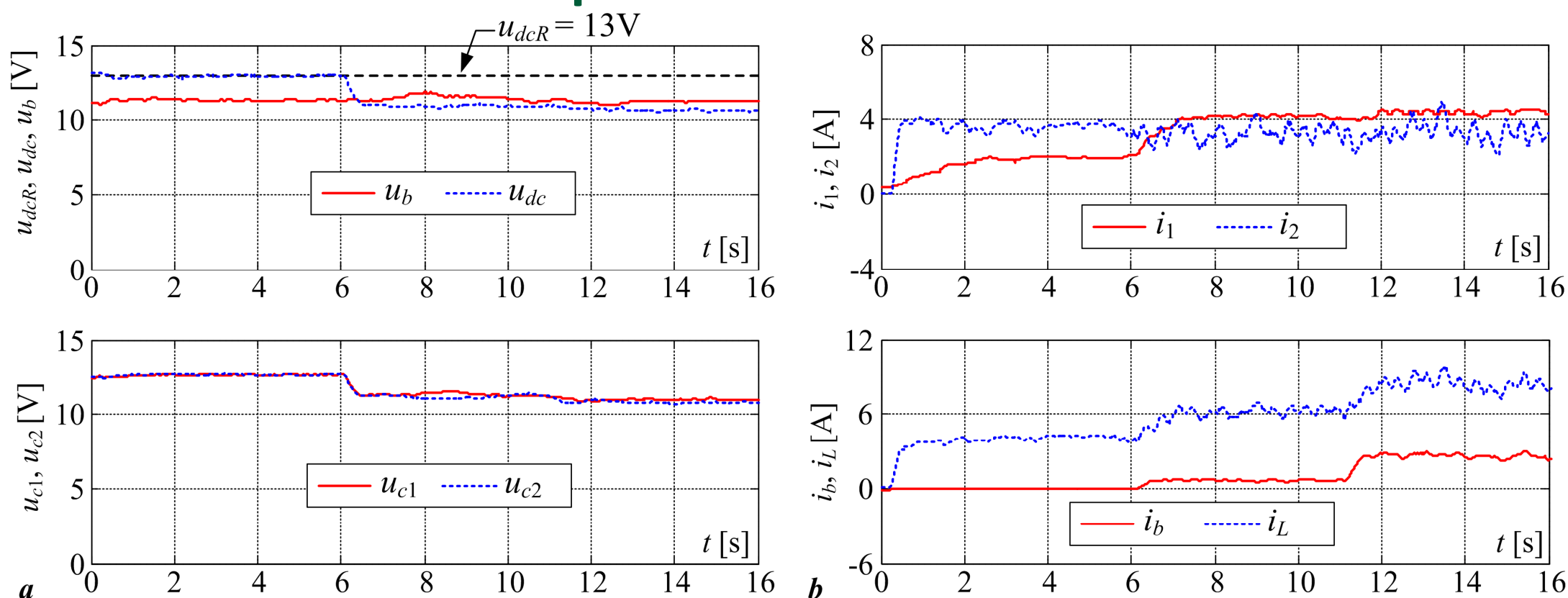
Laboratorijski eksperimentalni postav

- Eksperimentalni postav sastoji se od istosmjernog napajanja, DC-DC pretvarača, litij-polimerske (LiPo) baterije, kondenzatora DC sabirnice, dioda, senzora struje i napona te upravljačke jedinice (mikroračunala Arduino Mega) za prikupljanje podataka i vođenje sustava (regulaciju).



Fotografija eksperimentalnog postava

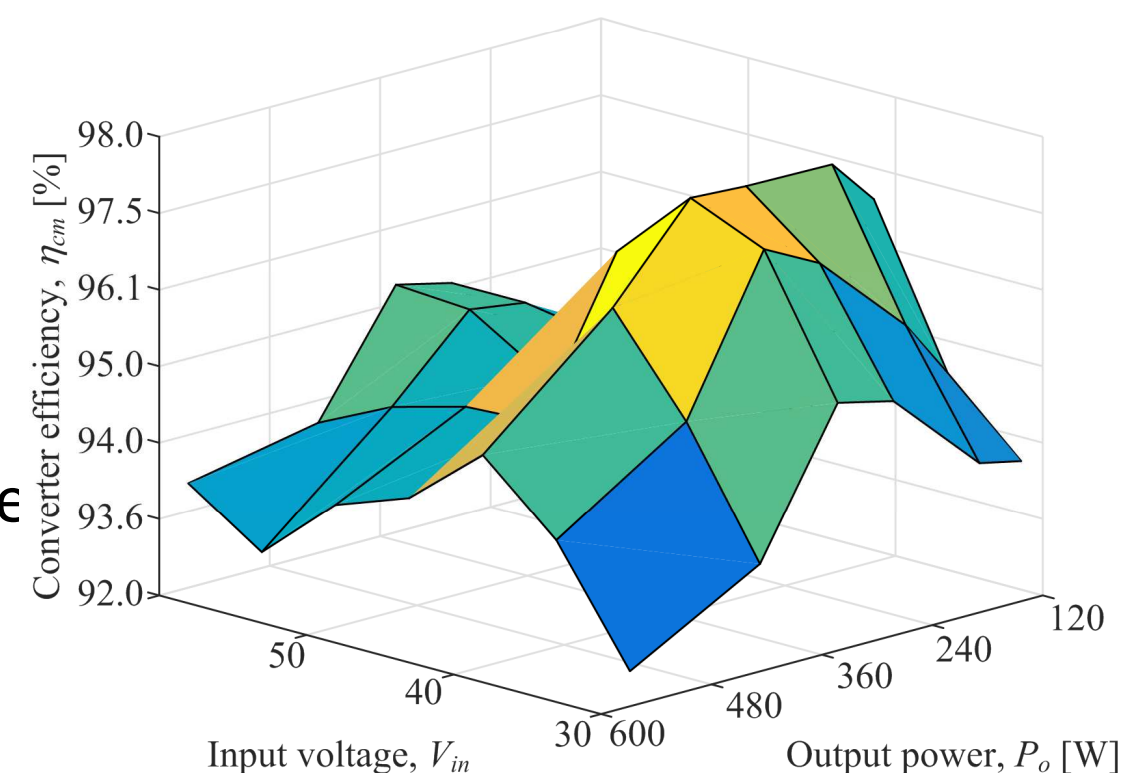
Rezultati eksperimenata



Rezultati eksperimentalne provjere strategije upravljanja centraliziranom raspodjelom opterećenja

- Rezultati mjerenja učinkovitosti pokazuju da učinkovitost u početku raste s opterećenjem, da bi potom postupno opada s daljnjim povećanjem opterećenja, a također je ovisna i o ulaznom naponu!
- Postoji točka maksimalne učinkovitosti koja se može koristiti za optimizaciju paralelnog rada silaznih („buck”) pretvarača.

- Eksperimenti potvrđuju glavne značajke strategije raspodjele opterećenja primarne/sekundarne razine u smislu ograničavanja struje DC/DC pretvarača i pomoćnog napajanja sabirnice iz baterija pri prekomjernim opterećenjima.



Eksperimentalno snimljena karakteristika korisnosti DC/DC pretvarača.

Zaključak

- U ovom radu istražena je primarna i sekundarna razina regulacije paraleliziranog jeftinog DC/DC pretvarača namijenjenog integraciji visokonaponskog i niskonaponskog energetskeg sustava u hibridnom vozilu.
- Primarna i sekundarna razina regulacijskog sustava realizirana je korištenjem proporcionalno-integralnih (PI) regulatora koji su standardno prisutni u upravljačkom sklopovlju sustava energetske elektronike.
- Parametriranje regulacijskog sustava temelji se na metodi optimuma dvostrukog odnosa.
- Učinkovitost predloženog sustava regulacije provjerena je opsežnim simulacijama i eksperimentalno.
- Odziv regulacijskog sustava karakterizira dobro prigušeno prijelazno ponašanje s obzirom na naglu promjenu opterećenja na istosmjernoj sabirnici.
- Eksperimentalno je definirana učinkovitost energetskih pretvarača, što predstavlja sljedeći korak za razvoj strategije upravljanja na tercijarnoj razini.
- Budući rad bit će usmjeren na implementaciju sustava upravljanja distribucijom energije na hibridnom skidderu.

Hvala na pažnji!



mihael.cipek@fsb.hr

Publikacije povezane s izlaganjem:

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.

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