

**KONCEPT HIBRIDNOG ELEKTRIČNOG SKLADIŠTENJA ENERGIJE SA
SUPERKONDENZATORIMA U ELEKTRIČNIM VOZILIMA****CONCEPT OF HYBRID ELECTRIC STORAGE OF ENERGY WITH
SUPERCAPACITORS IN ELECTRIC VEHICLES**Marko Kozomora, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – *Savremeni hibridni sistem za skladištenje električne energije u električnim vozilima koji se sastoji od litijum-jonskih baterija i superkondenzatora je opisan u ovom radu. Predstavljena je paralelna topologija potpuno aktivnog hibridnog sistema, kao i menadžment energije za datu topologiju i simulacija.*

Ključne reči: *Električna vozila, Hibridni sistem za skladištenje električne energije, Baterija, Superkondenzator*

Abstract – *A modern hybrid electric storage system in electric vehicles with lithium-ion batteries and supercapacitors is described in this work. The parallel topology of a fully active hybrid system is presented, as well as energy management for a given topology and simulation.*

Keywords: *Electric vehicles, Hybrid electric storage system, Battery, Supercapacitor*

1. UVOD

Vozila koja su zasnovana na nafti, zbog svojih mana i negativnog uticaja na životnu sredinu, imaju tendenciju da u bliskoj budućnosti budu zamenjena električnim vozilima (EV).

Glavni nedostatak električnog vozila jeste njegova jedinica za skladištenje zasnovana na baterijama, koja zbog trenutnog stanja razvoja električno vozilo čini nekompetetnim na tržištu ili nudi električno vozilo sa smanjenim performansama što ga čini manje prihvatljivim za potrošače.

Relativno kratak vek trajanja, velika osetljivost na ambijentalne uslove, opasnosti po životnu sredinu i relativno ograničena izlazna snaga samo su neki od nedostataka trenutne tehnologije baterija. Međutim, nedavno se pojavila nova vrsta tehnologije za skladištenje električne energije koja se pokazala kao obećavajući dodatak tehnologiji baterija.

Dug vek trajanja i velika gustina snage čine tehnologiju superkondenzatora održivim i sigurnim dodatkom baterijama, nudeći mogućnost da električna vozila učini konkurentnijim na tržištu [1].

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Bane Popadić, docent.

**2. HIBRIDNI SISTEM ZA SKLADIŠTENJE
ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Iako su prošlih decenija postignuti značajni pomaci radi poboljšanja performansi baterije, glavni problem dolazi od vršne upotrebe. Čak i u malim elektronskim uređajima oštećenje baterije nastaje iznenadnom upotrebom energije iz baterija. Ovakva situacija je stalna u EV, pogotovo što razni faktori, kao što su stil vožnje i put, uzrokuju brze promene potrebne snage koja se uzima/predaje sistemu za skladištenje električne energije.

Superkondenzatori su slični elektrohemijski sistemi za skladištenje električne energije, ali glavna razlika je u tome što imaju visoku sposobnost brzog punjenja tj. pražnjenja. Superkondenzatori se ne mogu samostalno koristiti kao izvor električne energije u EV iz razloga što imaju malu gustinu energije. Ipak superkondenzatori su dobre opcije za isporuke iznenadne snage koje zahteva EV.

Kombinacija baterija i superkondenzatora poznatija je kao hibridni sistem za skladištenje električne energije. Kada se koristi hibridni sistem za skladištenje električne energije štetni efekat struje u baterijama se smanjuje i produžava se životni vek baterije. Ovo je suštinski aspekt za upotrebu hibridnog sistema za skladištenje električne energije. Takođe upotreba hibridnog sistema povećava efikasnost EV skladištenjem rekuperativne energije iz kočnica tokom usporavanja EV [2].

Adekvatno realizovan hibridni sistem za skladištenje električne energije može imati veoma veliki uticaj na ukupne performanse EV i na taj način pomaže njihovom prodiranju na tržište. Prednosti hibridnih sistema su: velika gustina energije, veliki broj životnih ciklusa, znatno manja težina od samih baterija i velika gustina snage.

2.1. Paralelna topologija potpuno aktivnog hibridnog sistema

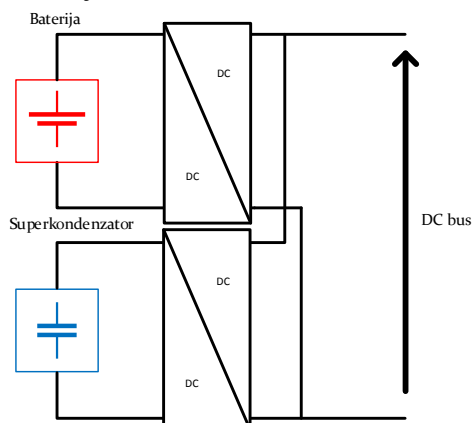
Potpuno aktivna topologija ima najbolji kontrolni algoritam među topologijama hibridnog sistema za skladištenje električne energije, zahvaljujući DC/DC pretvaračima koji su povezani na jednosmerno međukolo radi razdvajanja baterije i superkondenzatora [3-4].

Paralelna topologija potpuno aktivnog hibridnog sistema je sistem koji se sastoji od baterije i superkondenzatora povezanih preko bidirekcionih DC/DC pretvarača na jednosmerno međukolo [5].

Razlog za primenu ovakve topologije je ta da je punjenje tj. pražnjenje baterije u potpunosti kontrolisano. DC/DC pretvarači služe da pretvore radni napon baterije i superkondenzatora u veći napon za potrebe jednosmernog

međukola sa kojeg se napaja trofazni inverter (~560 V, ako je linijski napon pogona 400 V). Bidirekcionni DC/DC pretvarači se koriste jer se pretpostavlja da su oba smera protoka energije dozvoljena, tako da i baterija i superkondenzator mogu da apsorbiraju višak energije iz DC međukola ili da služe kao izvor energije u slučaju potrebe.

Cilj potpuno aktivne paralelne topologije hibridnog sistema za skladištenje električne energije je da udovolji različitim zahtevima opterećenja regulacijom snage deljene između baterije i superkondenzatora. Kontrolom bidirekcionnih DC/DC pretvarača postiže se raspodela snage između njih.



Slika 1. Paralelna topologija potpuno aktivnog hibridnog sistema

3. MENADŽMENT ENERGIJE

Na osnovu zahteva vozača i stila vožnje, potreba za električnom energijom iz hibridnog sistema za skladištenje električne energije je izuzetno promenljiva i nepredvidljiva.

Zbog ovakvih faktora je potreban što bolji i efikasniji menadžment energije. Zahvaljujući bidirekcionnim DC/DC pretvaračima ima se potpuno aktivna topologija, sa njihovom kontrolom baterijski deo i deo sa superkondenzatorom mogu da imaju ulogu izvora energije i mogu apsorbirati energiju na kontrolisan i veoma efikasan način.

Algoritam je prikazan na slici 2. iz više segmenata. Pre objašnjenja kako ovaj algoritam funkcioniše, potrebno je definisati stanja napunjenosti (SOC) baterije i superkondenzatora po nivoima:

Tabela 1. Stanja napunjenosti baterije i superkondenzatora po nivoima

SOC[%]	<30%	>30% i <90%	>90%
Baterija	0	1	2
Superkondenzator	0	1	2

Zbog istih oznaka za novoe stanja napunjenosti, prva cifra se odnosi na stanje napunjenosti baterije, dok se druga cifra odnosi na stanje napunjenosti superkondenzatora.

Na slici 2.a) se nalazi upravljački algoritam ukoliko je stanje napunjenosti sistema za skladištenje električne energije: **1 1**.

Prvo se proverava da li je promena brzine vozila u toku vremena veća od 0.5 m/s^2 , ako je manja sva energija koja je potrebna električnom motoru se uzima iz baterije ili se

sva energija iz električnog motora isporučuje bateriji. Ukoliko je promena brzine vozila u toku vremena veća od 0.5 m/s^2 , energija koju baterija uzima ili isporučuje električnom motoru ostaje ista kao što je bila neposredno pre povećanja promene brzine iznad 0.5 m/s^2 . Razlika između tražene energije i energije koja se uzima ili daje bateriji je energija koja se uzima ili isporučuje superkondenzatoru.

Na slici 2.b) se nalazi upravljački algoritam ukoliko je stanje napunjenosti sistema za skladištenje električne energije: **0 0**. Zbog nedovoljne napunjenosti baterije i superkondenzatora ovakav sistem za skladištenje električne energije nije u mogućnosti da daje energiju električnom motoru.

Opet se prvo proverava da li je promena brzine vozila u toku vremena veća od 0.5 m/s^2 , ako je manja sva energija koja se može dati sistemu za skladištenje električne energije, isporučuje se bateriji. Ukoliko je promena brzine vozila u toku vremena veća od 0.5 m/s^2 , energija koja se isporučuje bateriji ostaje ista kao što je bila neposredno pre povećanja promene brzine iznad 0.5 m/s^2 . Razlika između energije koja se vraća u sistem za skladištenje i energije koja se isporučuje bateriji je energija koja se isporučuje superkondenzatoru.

Na slici 2.c) se nalazi upravljački algoritam ukoliko je stanje napunjenosti sistema za skladištenje električne energije: **1 0** ili **2 0** ili **2 1**

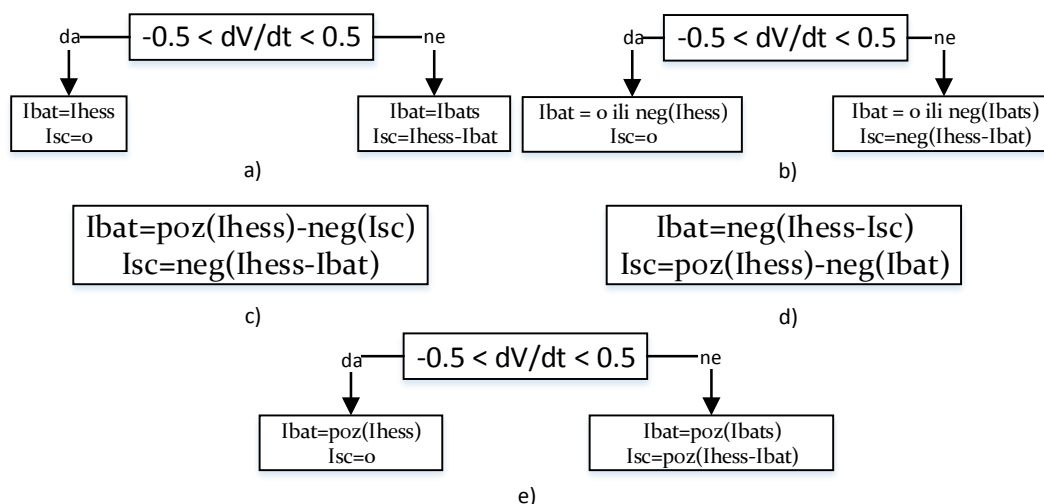
Kao što je navedeno u tabeli 1, jasno je da je u ovom slučaju stanje napunjenosti baterije za minimum jedan nivo veće od stanja napunjenosti superkondenzatora.

1 0 - nivo napunjenosti baterije je u stanju normalnog rada, dok se superkondenzator u ovom slučaju može smatrati praznim. Zbog nemogućnosti superkondenzatora da isporučuje energiju, sva zahtevana energija za električni motor mora biti isporučena od strane baterije. Ukoliko ima viška energije u bateriji onda se ona koristi i za upotrebu punjenja superkondenzatora. Energija kojom se puni superkondenzator se može dobiti iz baterije, iz električnog motora ili iz baterije i iz električnog motora zajedno.

2 0 - nivo napunjenosti baterije se nalazi u prepunjenom stanju, dok se superkondenzator kao i u prethodnom primeru može smatrati praznim. U ovakvom slučaju se sva potrebna energija za rad električnog motora kao i za punjenje superkondenzatora mora u svakom momentu uzimati iz baterije. Ne sme se doći u stanje u kojem će baterija dostići maksimalno dozvoljenu vrednost napunjenosti.

2 1 - nivo napunjenosti baterije se nalazi u prepunjenom stanju, dok se superkondenzator nalazi u stanju normalne napunjenosti.

Slično kao što je bilo u prethodnom slučaju, baterija se mora što pre isprazniti do normalnog stanja napunjenosti i mora da svu potrebnu energiju isporučuje električnom motoru i superkondenzatoru (moguće punjenje superkondenzatora dokle god mu je stanje napunjenosti ispod 90 %). Međutim, ukoliko je potrebna energija u ovom slučaju veća od energije koju može da isporučiti baterija, ostatak energije se može uzeti iz superkondenzatora.



Slika 2. Algoritam upravljanja sistema za skladištenje električne energije

Na slici 2.d) se nalazi upravljački algoritam ukoliko je stanje napunjenosti sistema za skladištenje električne energije: **0 1** ili **0 2** ili **1 2**. U ovom slučaju stanje napunjenosti superkondenzatora je za minimum jedan nivo veće od stanja napunjenosti baterije. Algoritam upravljanja je srazmeran prethodnom slučaju, samo što su baterija i superkondenzator zamenili uloge.

Na slici 2.e) se nalazi upravljački algoritam ukoliko je stanje napunjenosti sistema za skladištenje električne energije: **2 2**.

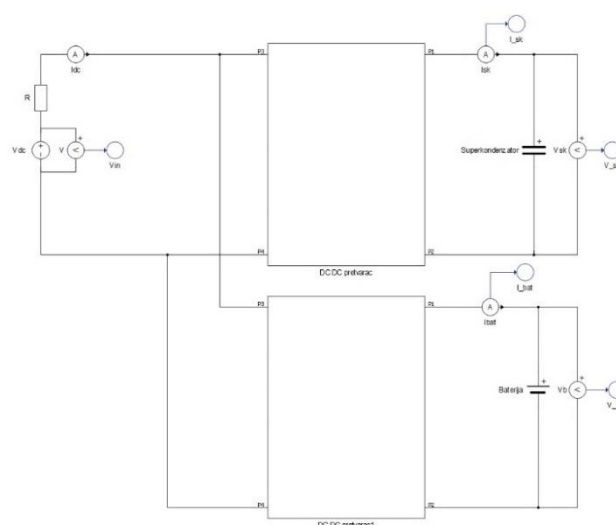
U ovom slučaju stanja napunjenosti baterije i superkondenzatora se nalaze u najvećem nivou, prepunjeni su. Zbog prepunjenosti, baterija i superkondenzator imaju samo mogućnost isporučivanja potrebne energije električnom motoru, bez opcije apsorbovanja energije.

Prvo se proverava da li je promena brzine vozila u toku vremena veća od 0.5 m/s^2 , ako je manja sva energije koja je potrebna električnom motoru se uzima iz baterije. Ukoliko je promena brzine vozila u toku vremena veća od 0.5 m/s^2 , energija koju baterija isporučuje električnom motoru ostaje ista kao što je bila neposredno pre povećanja promene brzine iznad 0.5 m/s^2 . Razlika između tražene energije i energije koja se uzima iz baterije je energija koja se uzima iz superkondenzatora.

4. SIMULACIJA HIBRIDNOG SISTEMA ZA SKLADIŠTENJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

U ovom poglavlju je opisan simulacioni deo rada koji je podeljen na softverski i hardverski deo. Softverski deo koji se odnosi upravljanje datim pretvaračima je realizovan u MATLAB/SIMULINK radnom okruženju, u ovom radu korišćena je MATLAB R2021a verzija. Hardverski deo koji se odnosi na hardver datog hibridnog sistema za skladištenje električne energije je realizovan u Typhoon HIL radnom okruženju, u ovom radu korišćena je Typhoon HIL V2021.2 verzija kao i Typhoon HIL602+ uređaj.

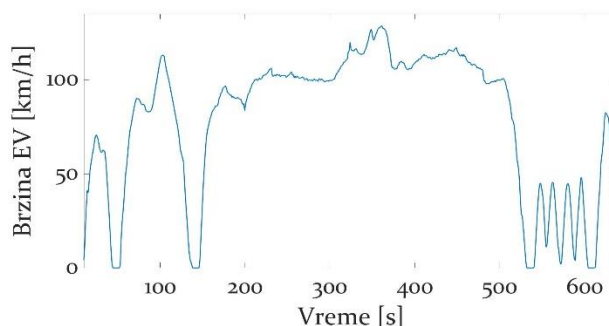
Hardver koji je realizovan u Typhoon HIL radnom okruženju (slika 3.) sastoji se od: Li-Ion baterije, superkondenzatora, dva trofazna bidirekciona DC/DC pretvarača i naponskog izvora jednosmernom međukola na koje je sistem povezan.



Slika 3. Hardverski deo simulacije

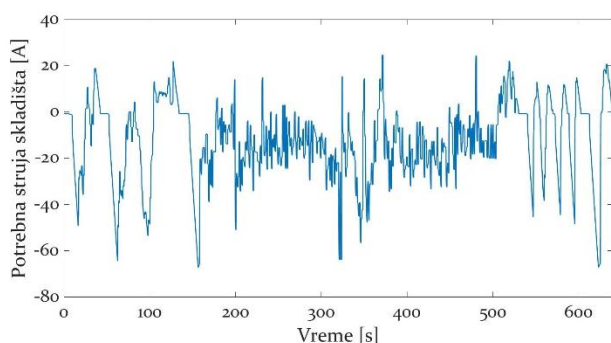
Softverski deo simulacije obuhvata menadžment energije i strujnu regulaciju trofaznih bidirekcionih DC/DC pretvarača.

U simulaciji je prikazano ponašanje hibridnog sistema za skladištenje električne energije za određeni profil vožnje (slika 4.) električnog vozila.



Slika 4. Profil vožnje električnog vozila

Za ovakav profil vožnje iz hibridnog sistema za skladištenje električne energije mora da se obezbedi struja prikazana na slici 5. koja se predaje/uzima jednosmernom međukolu.

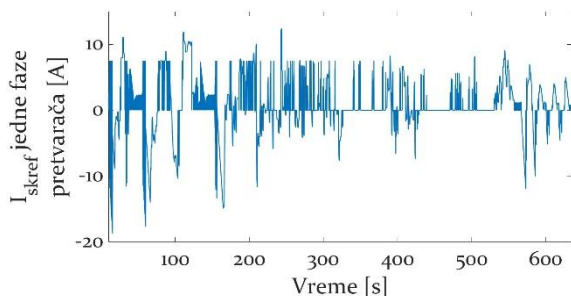


Slika 5. Potrebna struja skladišta

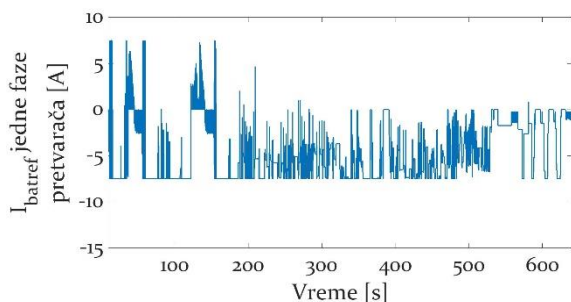
Ukoliko je potrebna struja skladišta negativne vrednosti to znači da se struja uzima iz skladišta, ukoliko je pozitivne vrednosti znači da se predaje skladištu (tj. u pitanju je regenerativno kočenje).

Na slici 5. mogu se primetiti tačni periodi povećane oscilacije potrebne struja skladišta, jer tada vozilo naglo ubrzoava/uspوراва, što se može videti na slici 4.

Zahvaljujući već opisanom menadžmentu energije, na slikama 6. i 7. prikazane su podeljene reference struja bidirekcionog DC/DC pretvarača baterija i superkondenzatora. Svaka faza pretvarača prima trećinu potrebne struje koja je potrebna iz baterije ili superkondenzatora.



Slika 6. Referenca struje pretvarača superkondenzatora

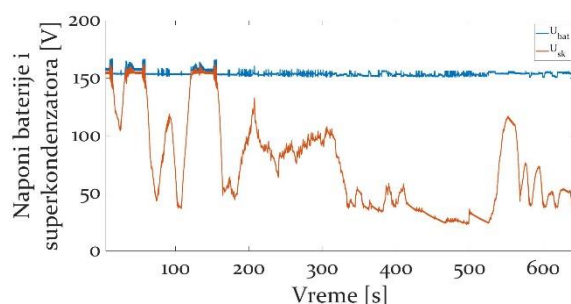


Slika 7. Referenca struje pretvarača baterije

Na svaku veliku promenu brzine, struja se veoma brzo menja i osciluje. Da se bateriji ne bi smanjio životni vek i broj ciklusa, menadžment energije određuje bateriji da ima što ustaljeniju referencu struje. Iz tog razloga, superkondenzator je zadužen za velike promene potrebne struje skladišta.

Zbog brzih usporavanja, jako malo regenerativne energije se vraća bateriji tokom simuliranog profila vožnje, što se može primeti na slikama 4. i 7.

Na slici 8. prikazani su naponi baterije i superkondenzatora. Vozilo je krenulo sa napunjenim hibridnim sistemom za skladištenje električne energije. Iako se baterija skoro ceo put prazni, sa slike 8. se može zaključiti da se baterija sporo prazni. Sa druge strane, tačno se primeti da se superkondenzator višestruko brže puni/prazni od baterije.



Slika 8. Napon baterije i superkondenzatora

5. ZAKLJUČAK

U radu je opisan hibridni sistem za skladištenje električne energije paralelne potpuno aktivne topologije i njegov menadžment energije.

Na kraju je opisana simulacija i dobijeni rezultati koji se podudaraju sa očekivanim rezultatima koji bi se desili u stvarnosti. Takođe, dokazano je da predstavljeni menadžment energije u rezultatima simulacije radi kao što je teorijski opisano.

6. LITERATURA

- [1] Nikola Vukajlović et al, "Comparative analysis of the supercapacitor influence on lithium battery cycle life in electric vehicle energy storage", JOURNAL OF ENERGY STORAGE, Vol. 31, 2020.
- [2] Lia Kouchachvili, "Hybrid battery/supercapacitor energy storage system for the electric vehicles", Journal of Power Sources, Vol. 374, pp. 237-248, 2018.
- [3] Changle Xiang, Yangzi Wang, Sideng Hu, Weida Wang, "A New Topology and Control Strategy for a Hybrid Battery-Ultracapacitor Energy Storage System", Energies, Vol. 7, pp. 2874-2896, 2014.
- [4] Q. Zhang, G. Li, "Experimental Study on A Semi-active Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicle Application", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 35, Issue: 1, Jan. 2020.
- [5] Alon Kuperman, Ilan Aharon, "Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, Issue: 2, 2011.

Kratka biografija:



Marko Kozomora rođen je u Beogradu 1997. godine. Osnovne akademske studije na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu iz oblasti Elektrotehnike i računarstva -Energetska elektronika i električne mašine završio je 2020.godine.
kontakt:
marko.kozomora97@gmail.com