

MODELOVANJE ENERGETSKIH PRETVARAČA U MIKROMREŽAMA**MODELING ENERGY CONVERTERS IN MICROGRIDS**Stevan Mihajlović, Vladimir Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija*Octavian Cornea, *Politehnički univerzitet, Temišvar, Rumunija***Oblast – ENERGETIKA, ELEKTRONIKA I TELEKOMUNIKACIJE**

Kratak sadržaj – U ovom radu predstavljena su dva hibridna DC/DC pretvarača koji su našli primenu u mikromreži smeštenoj na Politehničkom univerzitetu u Temišvaru, naglašavajući njihov veliki prenosni odnos kao glavnu karakteristiku. Prikazani su analitički opisi, razmatranja dizajna, simulacija rada i eksperimentalni rezultati oba konvertora.

Ključne reči: Mikromreže, DC/DC pretvarači, Obnovljivi izvori električne energije

Abstract – This paper presents two hybrid DC/DC converters used in microgrid application at the UPT, highlighting large conversion ratio as its main feature. Analytical descriptions, design aspects, digital simulations and experimental results are presented.

Keywords: Microgrids, DC/DC converters, Renewable energy sources

1. UVOD

Mikromreže su delovi distributivnih mreža ili samostalne električne mreže manjih dimenzija koje karakteriše mogućnost samostalnog rada u određenim vremenskim intervalima na bazi primene distribuiranih generatora, uglavnom zasnovanih na obnovljivim izvorima energije [1]. Mikromreže nalaze svoju primenu u raznim aplikacijama kao što su napajanje udaljenih sela, ostrva, manjih naselja, bolnica, univerziteta, vojnih podsistema, poslovnih i stambenih zgrada, brodskih mreža, itd.

Po konvencionalnom shvatanju mikromreže su prosto proširenje tradicionalne AC distributivne mreže. Ipak, u poslednje vreme sve se više razmatra mogućnost primene DC napajanja, odnosno realizacija hibridnih distributivnih mreža sastavljenih od AC i DC podsistema [2]. DC sabirnice (i vodovi) na niskom i srednjem naponu, omogućuju direktno povezivanje obnovljivih izvora električne energije, što čini sistem jednostavnijim i efikasnijim. Umesto da su oni integrisani u AC mrežu preko dodatnog mrežnog invertora (DC/AC pretvarača), ovi resursi se u DC mrežu mogu povezati preko postojećih DC/DC pretvarača.

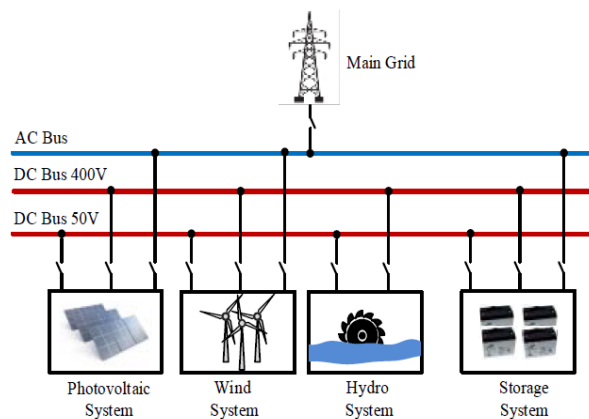
Međutim, zbog različitih snaga i priroda obnovljivih izvora, DC sabirnice (delovi DC mikromreže) mogu imati različite nominalne DC napone. Za povezivanje, upravljanje, normalan rad i protok energije u ovim

delovima mikromreže neophodni su odgovarajući unidirekcionni i bidirekcionni DC/DC pretvarači, koji mogu propuštati energiju u jednom ili oba smera.

U ovom radu su predstavljena i testirana dva tipa DC/DC pretvarača, koji su našli primenu u mikromreži „LAB D003“ smeštenoj na Politehničkom univerzitetu u Temišvaru [3].

2. MIKROMREŽA „LAB D003“

Topologija mikromreže „LAB D003“ prikazana je na slici 1 [3]. Sastoji se od četiri glavna sistema: fotonaponskog (FN), vetro, hidro i sistema za skladištenje energije. Energija se plasira do potrošača, superkondenzatora ili baterija preko dve DC sabirnice, nominalnih napona 50V i 400V sa mogućnošću povezivanja na standardni mrežni AC napon (400V, 50Hz). AC konekcija se koristi samo kada mikromreža radi sa distributivnom (glavnom) mrežom. Ceo sistem je potpuno konfigurabilan u smislu hardverske i softverske implementacije, te omogućava različite strukture mikromreže, koje mogu uključivati jedan, dva ili sve izvore. Ovo je moguće jer svaka komponenta sistema ima sopstvenu upravljačku strukturu, MPPT strategiju i elemente za skladištenje energije. Pozicije pretvarača i ostalih elemenata mreže mogu se videti na slici 2 [4].



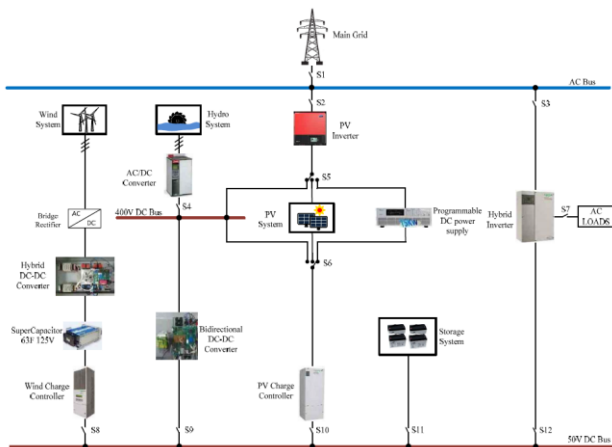
Slika 1. Topologija mikromreže [3]

2.1. Fotonaponski sistem

FN sistem je dizajniran za proučavanje ponašanja nizova panela povezanih sa mikromrežom za različite uslove i režime rada. FN sistem sastavljen je od nekoliko modula koji se mogu međusobno povezati na različite načine kako bi simulirali različite načine rada. Izvor se sastoji od 12 FN panela i programabilnog DC napajanja, koje može simulirati razne $I - V$ karakteristike.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Vladimir Katić, red. prof.



Slika 2. Jedna od mogućih struktura mikromreže [3]

2.3. Vetro sistem

Vetro sistem koristi simulator vetroturbine (HIL emulator), napravljen pomoću AC DTC pogona (ABB ACS 800 sa asinhronim motorom) kojim upravlja kontroler (dSPACE interfejs ili Compact RIO iz NI) gde je turbinski model implementiran. Emulator pokreće sinhroni generator sa permanentnim magnetima.

Sistem može raditi povezano s glavnom mrežom, bez skladištenja energije, kada je prekidač povezan sa stranom na kojoj se nalaze trofazni ispravljač sa prekonaponskom zaštitom. Ukoliko su priključeni skladišni elementi, generator daje energiju superkondenzatoru (Maxwell) preko hibridnog DC/DC konvertora u koji je uključen i mostni ispravljač. Energija koja se tako skladišti može puniti iste baterije preko kontrolera punjenja kao i FN paneli

2.4. Hidro sistem

Struktura hidrosistema mikromreže sastoji se od tri simulatora hidroturbine (HTS1, HTS2 i HTS3) sa tri tipa generatora (asinhroni, sinhroni sa DC eksitacijom i multifazni reluktantni sinhroni) sa istim AC DTC pogonom kao kod emulatora vetroturbina. Ovaj sistem ima tri AC/DC konvertora (Danfoss FC-302 invertori) sa modifikovanom kontrolnom tablom i vezom sa DC sabirnicama nominalnog napona 400V.

2.5 Bidirekcioni DC/DC pretvarač

Bidirekcioni DC/DC pretvarač povezuje DC sabirnice nominalnih napona 400V i 50V, tako stvara mogućnost transfera energije u oba smera. On omogućuje režim rada sličan spuštaču/podizaču napona, tj. ima mogućnost rada povezivanja višeg napona sa nižim izlaznim (*Step-Down* režim), odnosno podizanja napona (*Step-Up* režim). Za to postoje različita rešenja prikazana u literaturi, a rešenje primenjeno u mikromreži „LAB-D003“, je originalno i ima određene prednosti [4]. U daljem radu će biti prikazana dva DC/DC pretvarača iz pomenute mikromreže: 1. Hibridni unidirekcioni SIDC (eng. Switched-Inductor Step-Down Converter), i 2. Hibridni bidirekcioni pretvarač.

3. HIBRIDNI UNIDIREKCIONI SIDC PRETVARAČ

Na slici 3 prikazano je električno kolo hibridnog unidirekcionog SIDC pretvarača. On se primenjuje u sklopu

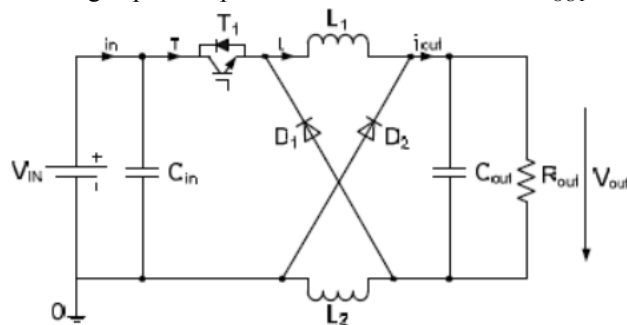
vetrogeneratora iza AC/DC pretvarača (slika 2). Moguća su dva stanja kola konvertora, kojima korespondiraju dva moguća uklopna stanja prekidačke komponente T_1 . Kada je T_1 zatvoren, dve prigušnice L_1 i L_2 su povezane na red i skladišti se energija u njima.

Tokom vremenskog intervala kada je T_1 otvoren, prigušnice L_1 i L_2 su povezane u paralelu. Tada se jedan deo ili celokupna energija skoncentrisana u magnetnom polju prigušnica predaje potrošaču. U zavisnosti da li je deo ili sva energija transferovana iz magnetnog polja prigušnica, konvertor će raditi u kontinualnom ili diskontinualnom strujnom režimu. Prenosni odnos konvertora dat je jednačinom:

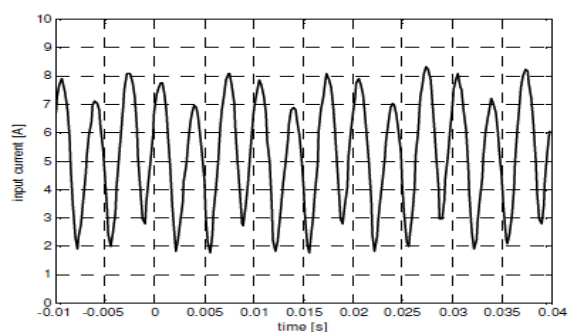
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{2-D}, \quad D = \frac{t_{on}}{T} \quad (1)$$

Vidi se da ako se faktor ispune D kreće u opsegu 0-1, odnos izlaznog i ulaznog napona je od 0-0,5, što pokazuje da se radi o spuštaču napona.

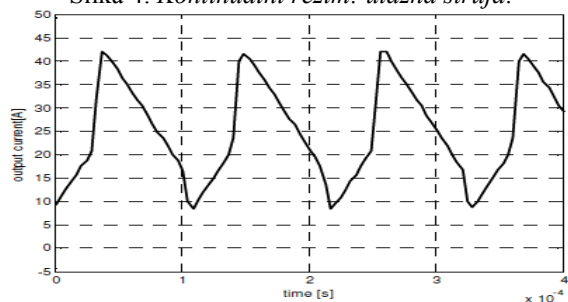
Kao primer rada ovog pretvarača uzet je slučaj da je ulazni DC napon setovan na $V_{IN}=180V$, a opterećenje iznosi $R_{OUT}=1,4\Omega$. Referentna srednja vrednost ulazne struje postavljena na $I_{IN}=5,5A$ daje izmeren izlazni napon od $V_{OUT}=36,6V$, koji se dobija za factor ispune $D=34,8\%$. Na slikama 4 i 5 dati su eksperimentalni rezultati merenja talasnih oblika struja na ulazu i izlazu pretvarača u kontinualnom režimu rada. Željena niska valovitost izlaznog napona se postiže filter kondenzatorom C_{OUT} .



Slika 3. Električno kolo konvertora



Slika 4. Kontinualni režim: ulazna struja.



Slika 5. Kontinualni režim: izlazna struja

4. HIBRIDNI BIDIREKSIONI PRETVARAČ

Električna šema hibridnog bidirekcionog pretvarača prikazana je na slici 6. Njegova topologija sastoji se iz tri glavna dela: 1. Podizača napona („boost“) bez izlaznog kondenzatora; 2. Komutacione kondenzatorske ćelije i 3. Izlaznog LC filtera.

Ulazni napon (V_1) obično je izvor nižeg napona, najčešće sastavljen od nekoliko baterija vezanih na red, pa je uloga prvog dela da ga poveća na vrednost izlaznog. V_2 je izvor višeg napona i u aplikaciji razmatranoj u ovom radu predstavlja sabirnicu napona 400V - 600V.

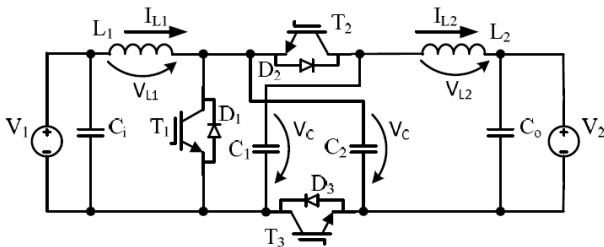
Kondenzatorska ćelija omogućava prenosni odnos napona konvertora. Oba naponska izvora imaju bidirekciono ponašanje tj. protok struje u oba smera.

Prekidačke komponente su takođe bidirekzione. U pitanju su IGBT ili MOSFET u paralelnoj vezi sa diodama koje omogućavanju protok struje u suprotnom smeru u bilo kom momentu, u zavisnosti od potreba sistema mikromreže. Prenosni odnos pretvarača, dat je relacijom:

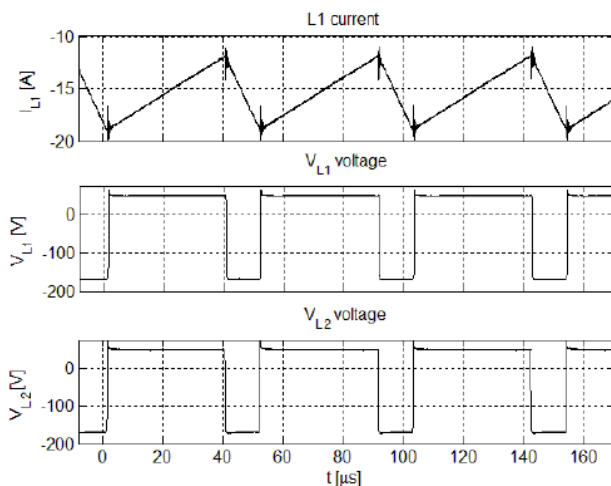
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{1-D}{1+D} = \frac{D'}{2-D'} \quad (2)$$

gde je D faktor ispunje T_1 , a D' faktor ispunje T_2 i T_3 . Kontrola rada prekidačkih komponenti je sledeća: jedan signal pokreće T_1 , a invertovan identični T_2 i T_3 .

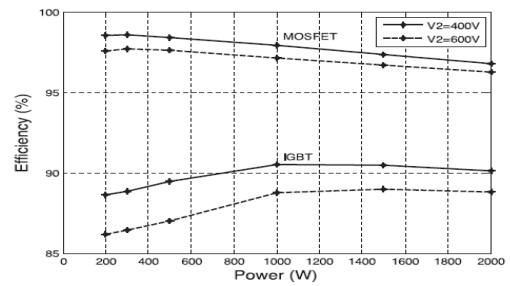
U zavisnosti od toga koja prekidačka komponenta je pokrenuta, drugačiji je smer struje koja protiče kroz prigušnice i konvertor je u „Step-Down“ ili „Step-Up“ režimu rada. Kao primer, na slici 7 prikazan je rad bidirekcionog pretvarača u „Step-Down“ režimu.



Slika 6. Električna šema bidirekcionog pretvarača.



Slika 7. Bidirekcionalni pretvarač kao spuštač napona



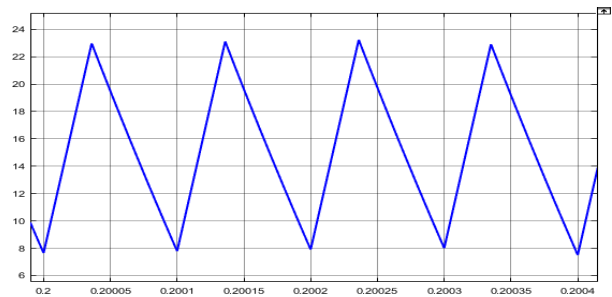
Slika 8. Procenjena efikasnost bidirekcionog konvertora za V_2 400V i 600V [4]

5. SIMULACIJA

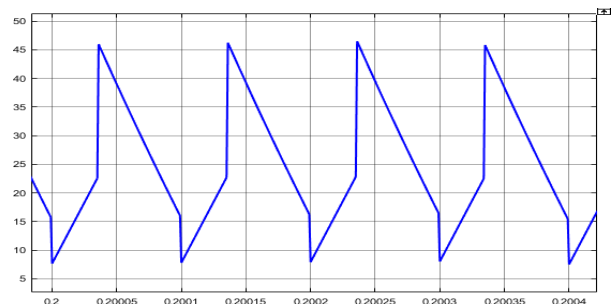
Modeli oba konvertora napravljeni su u programskom okruženju Matlab/Simulink. Energetski model konvertora i strujni kontroleri realizovani su kao posebni podsistemi. U nastavku su izdvojeni karakteristični talasni oblici rada oba konvertora za različite režime.

5.1. Hibridni pretvarač sa kalemima

Izvršene su simulacije za kontinualni strujni režim. Za simulaciju ovog režima ulazni DC napon iznosi 180V, a opterećenje na izlazu je $1,4\Omega$. Referentna vrednost struje na kontroleru je 5,5A. Za ovakvu postavku izlazni napon iznosi 36,6V približno. Faktor ispunje je približno 34,8%. Rezultati simulacija prikazani na slikama 9 i 10, u dobroj saglasnosti su sa stvarnim merenjima.



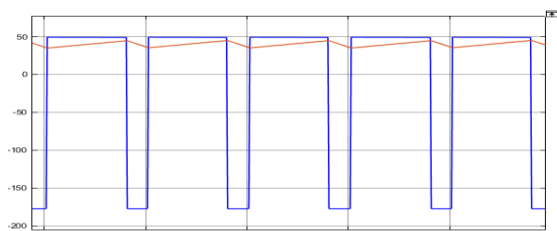
Slika 9. Simulacija: struja kroz prigušnicu L_2



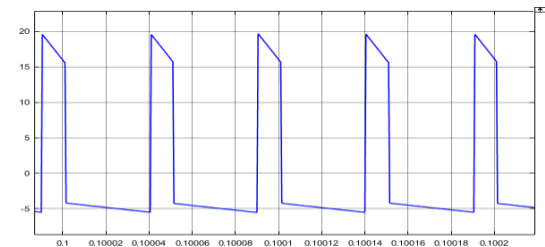
Slika 10. Simulacija: izlazna struja

5.2. Hibridni bidirekcionni pretvarač

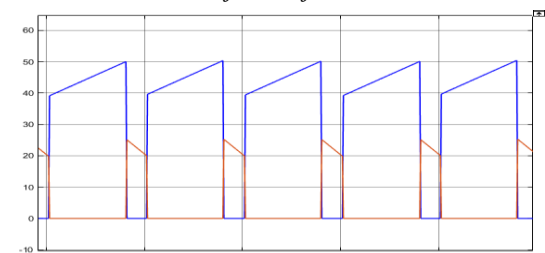
Za modelovanje bidirekcionog pretvarača naponi sabirnicama su stavljeni na 50V i 400V respektivno. Za odabran oblik referentne struje kontrolera, koja se kretala između 10A i 40A, na slikama 11-13 prikazani su uvećani talasni oblici. Na slici 11, prikazan je i talasni oblik napona na prigušnici L_1 . Poređenjem sa rezultatima merenja (slika 7) može se videti da postoji velika podudarnost. Ipak, da bi se to i kvantitativno pokazalo u narednom poglavlju je urađena verifikacija rezultata.



Slika 11. Simulacija: napon i struja prigušnice L_1



Slika 12. Simulacija: struja kroz kondenzatore



Slika 13. Simulacija: struja kroz T_1 i diode D_1 i D_2

6. VERIFIKACIJA REZULTATA

Upoređeni su rezultati simulacija sa stvarnim merenjima, a u tabelama 1 i 2 prikazana su odstupanja jednih u odnosu na druge. Kao parametri uzeti su relativna i srednja kvadratna greška. Najveća odstupanja zapažaju se kod talasnosti struja, koje su nešto veće nego kod stvarnih merenja. Na odstupanja u simulacijama oba modela uticalo je idealizovanje pasivnih elemenata (otpornosti, prigušnice i kondenzatori) kao i prekidačkih komponenti (IGBT, MOSFET i diode).

Kod modelovanja prvog konvertora na odstupanja je u velikoj meri uticala činjenica da je vetroturbina modelovana jednostavnim trofaznim naponskim generatorom, te za dalja unapređenja svakako bi trebalo staviti akcenat na verodostojnije modelovanje vetrogeneratora.

Modelovanje sabirnica u velikoj meri je takođe uticalo na odstupanja. Sabirnice su modelovane idealnim naponskim generatorima konstantnih napona što u velikoj meri utiče nepovoljno na verodostojnost simulacije. Kod modelovanja drugog konvertora uprošćenje modela strujnog kontrolera je sigurno u nekoj meri uticalo na verodostojnost rezultata simulacije.

Tabela 1. Odstupanja prvog konvertora

	$I_{t \max}$	$I_{L2 \min}$	$I_{L2 \text{sr}}$	$I_{L2 \max}$	I_{outmin}	I_{outmax}
I	20.59	8.97	16.22	22.58	8.58	41.32
II	20.32	8.69	16.03	22.21	8.82	42.09
III	20.29	8.64	15.41	22.33	8.65	41.68
Sim	22.5	7.87	15.8	23.1	7.94	45.3
ε	10.29	10.22	10.22	1.78	8.56	8.64
m	2.58	1.11	0.37	0.91	0.92	4.43

Tabela 2. Odstupanja drugog konvertora

	$I_{L1 \min}$	$I_{L1 \text{sr}}$	$I_{L1 \max}$	$I_{L2 \min}$	$I_{L2 \text{sr}}$	$I_{L2 \max}$
I	4.69	7.82	10.81	1.03	1.51	2.08
II	4.81	7.95	10.97	0.96	1.49	1.99
III	5.05	7.91	10.79	1.02	1.57	2.04
Sim	4.48	8.35	12.4	1.14	1.8	2.36
ε	7.63	5.79	14.22	13.62	18.16	15.88
m	0.49	0.56	1.89	0.17	0.34	0.40

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu su opisana dva hibridna energetska DC/DC pretvarača. Digitalne simulacije rada modela stabilan rad konvertora u aplikacijama za koje su predviđeni. Talasni oblici dobijeni tokom laboratorijskih testova pokazuju dobro slaganje sa simulacionim.

Dalje modelovanje, osim poboljšanja prikazanih modela, u budućnosti bi išlo u pravcu integracije istih sa novoizgrađenim modelima ostalih delova mikromreže „LAB D003“ i stvaranjem kompletnog modela mikromreže koja bi služila za testiranje stabilnosti postojeće i novih konfiguracija.

8. LITERATURA

- [1] V. Mijailović, „Distribuirani izvori energije“, Akademska misao, Beograd, 2011.
- [2] T. Dragičević, X. Lu, J.C. Vasquez, J.M. Guerrero, „DC Microgrids - Part II: A Review of Power Architectures, Applications, and Standardization Issues“, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.31, No.5, May 2016.
- [3] C. Patrascu, N. Muntean, O. Cornea, A. Hedes: „Microgrid Laboratory for Educational and Research Purposes“, Int. Conf. on Environ. and Electrical Eng. (EEEIC), Florence (Italy), June 2016.
- [4] O. Cornea, E. Guran, N. Muntean, D. Hulea: „Bi-Directional Hybrid DC-DC Converter With Large Conversion Ratio for Microgrid DC Buses Interface“, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 64, No.4, Apr.2017.

Kratka biografija:



Stevan Mihajlović rođen je u Rumi 1994. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranio je 2019. god. kontakt: stevan.db9@hotmail.rs



Vladimir A. Katić rođen je 1954. godine u Novom Sadu. Doktorirao je na Univerzitetu u Beogradu 1991. godine. Oblasti interesovanja su mu energetska elektronika, obnovljivi izvor električne energije, kvalitet električne energije električna vozila.



Octavian Cornea je diplomirao, magistrirao doktorirao na Politehničkom univerzitetu u Temišvaru 1996, 1997 i 2007. god. Oblasti interesovanja su mu modelovanje, simulacija upravljanje pretvarača energetske elektronike u raznim aplikacijama.