

NAPREDNE METODE KONTROLE AC/DC PRETVARAČA ZA POBOLJŠANJE RADA DC MIKRO MREŽA**ADVANCED CONTROL TECHNIQUES OF THE AC/DC CONVERTERS FOR DC MICRO GRIDS OPERATION IMPROVEMENT**

Sonja Sarajlić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija*
Miguel Jimenez Carrizosa, *Politehnički univerzitet, Madrid, Španija*
Vladimir Katić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – Rad se bavi upoređivanjem linearnog i nelinearnog načina kontrole konvertora u DC mikromreži prema kriterijumima brzine dostizanja referentnog signala i magnitude oscilacija oko njega.

Gljučne reči: elektroenergetski pretvarači, mikro mreže, linearna kontrola, nelinearna kontrola

Abstract – In this paper, performance of linear and nonlinear mode control of VSC converter in a DC microgrid was evaluated and compared based on the speed of reaching the reference signal and the magnitudes of oscillations around it.

Keywords: power converters, micro grids, linear control, nonlinear control

1. UVOD

Mikro mreže su relativno mali, kontrolisani delovi distributivnog elektro-energetskog sistema (EES), koje se sastoje od jednog ili više izvora električne energije (distribuirani generatori) povezanih sa krajnjim korisnicima (lokalnim potrošačima), kao i prekidača za direktnu vezu sa javnom EES. Pametne mikro mreže koriste digitalne informacije, kontrolu i sisteme pametnog merenja za optimizaciju. Mogu funkcionisati nezavisno (obične ograničeno vreme) ili u sklopu javne distributivne mreže [1].

U poslednje vreme javljaju se predlozi za formiranje jednosmernih (DC) mikro mreža, koje nude prednosti kao što su manji broj pretvarača energije, veća efikasnost sistema i lakša integracija obnovljivih izvora energije i baterijskih elektro-energetskih skladišta (BESS) [2-4]. Ovi sistemi bi mogli da rade zajedno (paralelno) sa AC mikro mrežama u formi hibridnih AC-DC mreža ili samostalno, najčešće kao u vidu nano-mreža (kućne DC instalacije) sa mogućnošću povezivanja na AC mreže.

Međutim, da bi se ostvario rad DC mikro mreže, njeno povezivanje sa glavnom AC mrežom i omogućila dvosmerna razmena energije, potrebno je obezbediti odgovarajuće pretvaračke sklopove, upravljačke algoritme, a i module za sinhronizaciju [3-5]. Pokazalo se da upotreba energetskih pretvarača, koja prati dinamiku

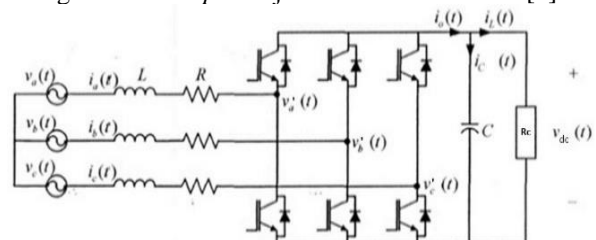
između izvora, distributivnog sistema i opterećenja smanjuje veličinu, težinu i troškove energetskih sistema, istovremeno povećavajući efikasnost, sigurnost i pouzdanost [4,5].

Naponski AC/DC pretvarač (eng. *Voltage Source Converter*, VSC) je vrsta energetskih elektronskih pretvarača, koji se može koristiti u DC mikro mrežama za njihovo povezivanje na glavnu mrežu. VSC se upravlja (kontrolira) korišćenjem linearnih i nelinearnih metoda. U ovom radu su testirane obe metode, a zatim je njihov učinak procenjen i upoređen.

2. NAPONSKI AC/DC PRETVARAČ

Za povezivanje AC i DC delova hibridne mikro mreže obično se koristi naponski AC/DC pretvarač (VSC) sa poluprovodničkim tranzistorskim prekidačima (najčešće IGBT), koji daju dva stepena slobode, tj. kod kojih se mogu kontrolisati i uključivanje i isključivanje. Ovakvi pretvarači imaju konstantan izlazni (DC) napon, što se obezbeđuje DC filterskim kondenzatorom. Šematski prikaz pretvarača sa AC mrežom na ulazu (predstavljenom idealnim AC izvorom i impedansom) i DC mrežom na izlazu (u vidu potrošačke impedanse) prikazan je na slici 1.

Za upravljanje se koristi metod sinusne impulsno-širinske modulacije (eng. *Sinusoidal Pulse Width Modulation*, SPWM), a pretvarač je modelovan primenom Parkove ili dq (*direct quadrature*) transformacije, koja se koristi za transformisanje koordinata iz trofaznog statičnog koordinatnog sistema u dq rotirajući koordinatni sistem [6].



Sl.4. Blok dijagram celog sistema u sistemu relativnih jedinica

3. LINEARNA KONTROLA

Zbog različite dinamike struje usled impedanse mreže i DC napona na kondenzatoru, upravljanje je podeljeno na dve petlje: unutrašnju (kontrola struje) i spoljašnju (kontrola napona). Unutrašnja strujna petlja kontrolira

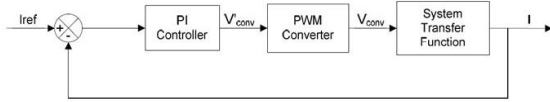
NAPOMENA:

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

struju između DC veze i AC mreže. Njenu referencu obezbeđuje spoljašnja naponska petlja. Mogu se koristiti dve vrste upravljanja – PQ i VQ. Da bi se kontrolisala aktivna i reaktivna snaga (PQ upravljanje), potrebna je samo unutrašnja strujna petlja, dok je za kontrolu napona i reaktivne snage (VQ upravljanje) potrebna i spoljašnja naponska petlja.

3.1. Unutrašnja strujna petlja

Unutrašnja strujna petlja (kontrola), sastoji se od PI kontrolera, PWM konvertora i prenosne funkcije sistema. Na slici 2 prikazana je opšta blok šema ove petlje.



Sl.2. Opšta blok šema unutrašnje strujne kontrole

Prilikom dizajniranja pretpostavlja se konstantan U_{dc} napon, zbog znatno sporije dinamike DC napona od d i q komponenti struje (i_d i i_q). Funkcija prenosa otvorene petlje (G_{ol}) sistema data je sa:

$$G_{ol}(s) = K_{p,pu} \left(\frac{1 + T_i s}{T_i s} \right) \frac{1}{1 + T_a s} \frac{-1}{R_{pu} (1 + s \tau_{pu})} \quad (1)$$

gde su $K_{p,pu}$, T_i , L_{pu} i R_{pu} proporcionalno pojačanje, integralna vremenska konstanta, induktivnost i otpornost energetskog sistema u sistemu r.j. (p.u.), dok je $\tau_{pu} = L_{pu}/R_{pu}$.

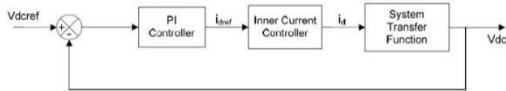
Podešavanje kontrolera se vrši korišćenjem *modulus optimum* kriterijuma podešavanja [6]. Ovaj kriterijum je pogodan zbog svoje jednostavnosti i brzog odgovora, što je zahtev za unutrašnju strujnu petlju kod kaskadne kontrole. Podešavanja strujnog kontrolera pomoću *modulus optimum* kriterijuma data su sa:

$$K_p = \frac{\tau_{pu} R_{pu}}{2 T_a} \quad (2)$$

$$T_i = \tau_{pu} \quad (3)$$

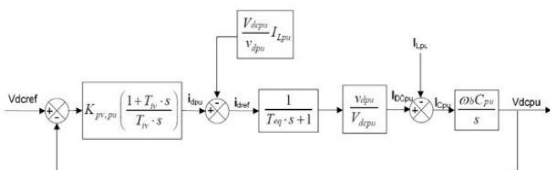
3.2. Spoljašnja naponska petlja

Da bi se odredili parametri DC veze naponskog kontrolera, potrebno je odrediti prenosnu funkciju između referentne vrednosti struje i DC napona. Opšta blok šema spoljašnje naponske petlje (kontrole) data je na slici 3.



Sl.3. Opšta blok šema spoljašnje naponske kontrole

Referencu spoljašnje petlje obezbeđuje strujni kontroler koji je pojednostavljen tako da ima ekvivalentnu funkciju prvog reda. Blok dijagram pojednostavljenog kompletnog sistema naponske kontrole u sistemu r.j. je prikazan na slici 4.



Sl.4. Blok šema sistema u sistemu relativnih jedinica

Glavni ciljevi dizajna spoljašnje petlje su optimalna regulacija i stabilnost, te je najbolje da ona bude podešena prema kriterijumu simetričnog optimuma [6]. Prema datom kriterijumu, parametri podešavanja spoljašnjeg kontrolera su:

$$T_{iv} = a^2 T_{eq} \quad (4)$$

$$K_{pv,pu} = \frac{T_c}{K \sqrt{T_{iv} T_{eq}}} = \frac{T_c}{a K T_{eq}} \quad (5)$$

gde je T_{iv} vremenska konstanta kontrolera a $K_{pv,pu}$ njegovo pojačanje. Koristeći ove parametre prenosna funkcija otvorene petlje postaje:

$$G_{v,OL}(s) = \frac{1}{a^3 T_{eq}^2 s^2} \left(\frac{1 + a^2 T_{eq} s}{1 + T_{eq} s} \right) \quad (6)$$

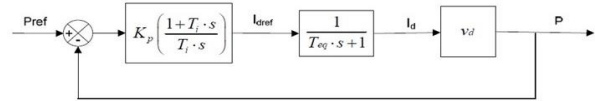
Sledi da je prenosna funkcija zatvorene petlje:

$$G_{v,CL}(s) = \frac{1 + a^2 T_{eq} s}{1 + a^2 T_{eq} s + a^3 T_{eq}^2 s^2 + a^3 T_{eq}^3 s^3} \quad (7)$$

Vrednost koeficijenta a bira se na osnovu željenog odziva. Manje vrednosti a daju manju faznu marginu i veće oscilacije, dok povećanje vrednosti a dovodi do boljeg prigušenja, ali sporijeg odgovora.

3.3. Kontroleri aktivne i reaktivne snage

Kontrolna petlja aktivne snage je prikazana na slici 5. Blok dijagram je izveden uzimajući u obzir aproksimaciju prvog reda unutrašnjeg strujnog regulatora. PI kontroleri u ovom slučaju mogu biti podešeni prema kriterijumu simetričnog optimuma, kao što je prethodno urađeno za DC naponski kontroler.



Sl.5. Blok šema kontrolne petlje aktivne snage u sistemu relativnih jedinica

4. NELINEARNA KONTROLA

AC/DC pretvarači imaju nelinearnu i vremenski promenljivu prirodu, a linearni modeli su aproksimativni i zavise od radne tačke. Stoga, klasični linearni kontroleri ne mogu da održe željenu stabilnost i performanse u širokom spektru radnih uslova. Pogodnije je koristiti nelinearni tip kontrole. U ovom radu testirana je nelinearna kontrola u kliznom režimu, a da bi se odredilo da li je sistem stabilan korišćena je Ljapunova teorema.

4.1. Kontrola u kliznom režimu

Kontrola u kliznom režimu (eng. *Sliding Mode Control*, *SMC*) je tip nelinearne kontrole, koji se koristi da bi se poboljšale dinamičke i statičke performanse sistema [7]. Poznata po odličnom dinamičkom odgovoru i robusnosti na poremećaje i nesigurnosti. U ovoj metodi kontrolni se signal koristi se za vođenje radnih tačaka sistema putanjom na površinu, poznatoj kao klizna površina ili hiper ravan. Sve tačke trajektorije se forsiraju u blizinu ove površine u konačnom vremenu i nakon toga ka tački ravnoteže sistema. Zakon upravljanja je dizajniran da održava kontrolne promenljive na kliznoj površini. Kontrolne varijable nelinearne kontrole su sledeće:

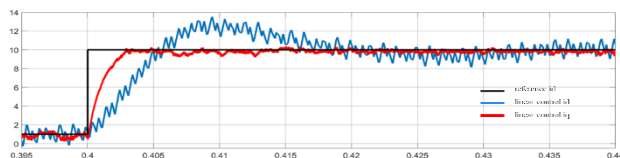
$$M_d' = \frac{\alpha L e_d + \beta L \text{sign}(e_d) - R i_d + U_d}{U_{dc}} \quad (8)$$

$$M_q' = \frac{\alpha L e_q + \beta L \text{sign}(e_q) - R i_q + U_q}{U_{dc}} \quad (9)$$

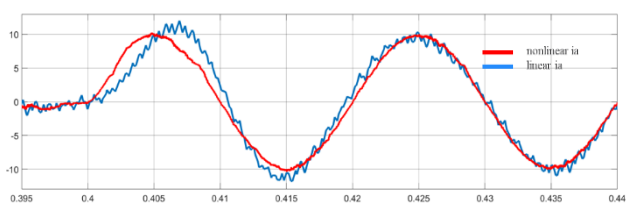
gde su e_d i e_q greške struja i_d i i_q , a α i β parametri podešavanja gde je $i_d' = -\alpha e_d - \beta \text{sign}(e_d)$.

5. POREĐENJE RADA LINEARNE I NELINEARNE KONTROLE

U sledećem koraku je upoređen performans linearne i nelinearne kontrole. Odgovori oba tipa kontrole na step poremećaj predstavljeni su na slikama 6 i 7.



Sl.6. Poređenje oba tipa kontrole za $i_{dref} = 10 \text{ A}$



Sl.7. Poređenje oba tipa kontrole - i_a

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti sledeće:

- Linearna kontrola ima veće šanse da dostigne referencu nametnutu sistemu
- Potrebno je kraće vreme da se dostigne referenca ako se koristi nelinearna kontrola
- Nelinearna kontrola proizvodi manje oscilacije oko referentnog signala

6. RAD LINEARNE I NELINEARNE KONTROLE U DC MIKRO MREŽI

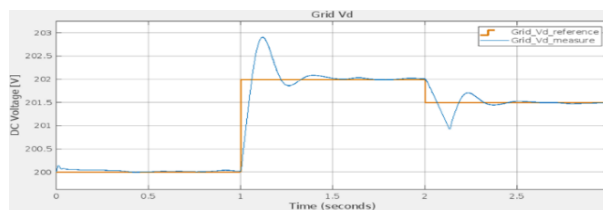
Kako bi se uporedile performanse oba tipa kontrole u DC mikro mreži, kreiran je model jedne takve mreže koji se sastoji od izvora napona (veze sa mrežom), izvora obnovljive energije, baterije i opterećenja. Za svaki čvor je definisan referentni signal koji odgovara tipičnom ponašanju datog elementa u mreži.

Prvo su posmatrani rezultati linearne kontrole. Ponašanje V_d i i_q u naponskom čvoru je prikazano na slikama 8. i 9. Sistem uspeva da dostigne referencu i_d napona, i to čini tako što prvo pređe datu vrednost, te se zatim stabilizuje i ustaljuje na referentnoj vrednosti. Slično ponašanje se primećuje i kod struje i_q , gde sistem takođe prvo prelazi referentnu vrednost, te nastavlja da osciluje oko nje nakon što je dostigne.

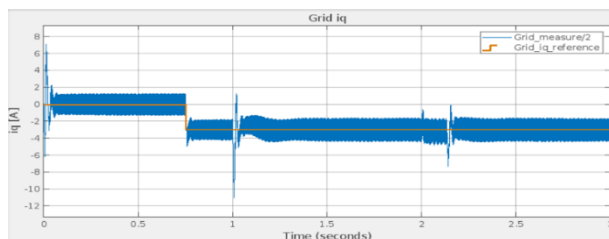
Ponašanje i_d i i_q u čvoru solarne elektrane je prikazano na slikama 10 i 11, gde se može primetiti slično ponašanje kao u slučaju praćenja struje i_q naponskog čvora. Na sličan način se ponašaju i_d i i_q struje opterećenja i baterije (slike 12-15).

Zatim je posmatran rad nelinearne kontrole u istoj mreži, za iste referentne vrednosti. Sistem je pratio referencu solarne elektrane kao na slici 16. Kod obe struje (i_d i i_q) se može se primetiti da sistem sa nelinearnom kontrolom ima kraće vreme dostizanja reference, kao i da u tom procesu ne dostiže tako visoke vrednosti kao kada se

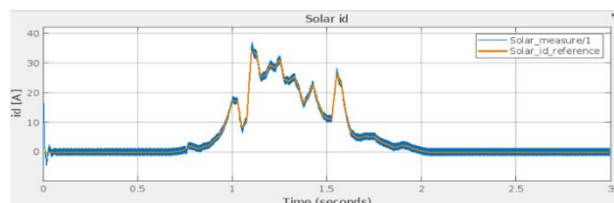
koristi linearna kontrola. Takođe se da primetiti da su oscilacije oko referentne vrednosti manje.



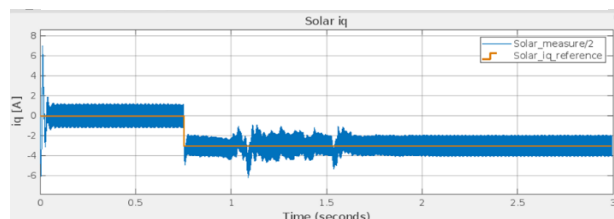
Sl.8. Napon mreže V_d



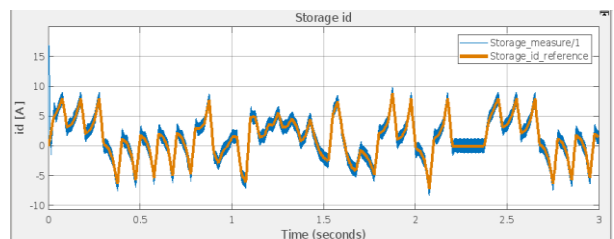
Sl.9. Struja mreže i_q



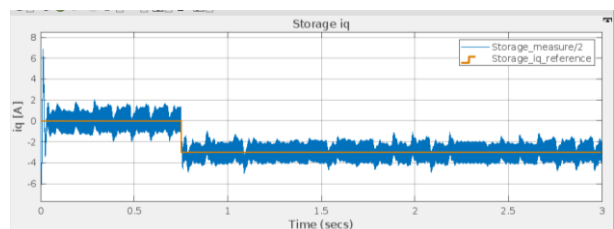
Sl.10. Struja solarne elektrane i_d



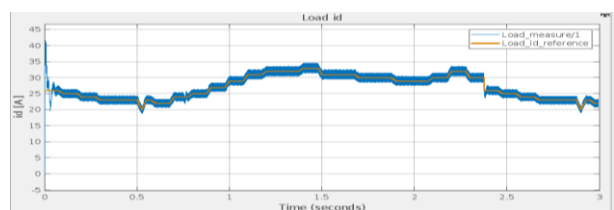
Sl.11. Struja solarne elektrane i_q



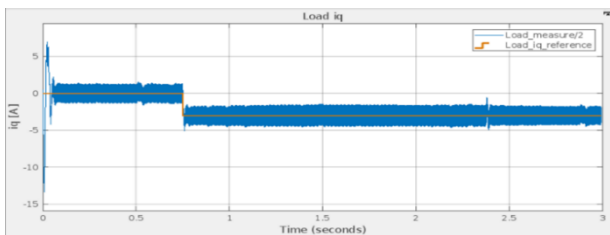
Sl.12. Struja skladišta električne energije i_d



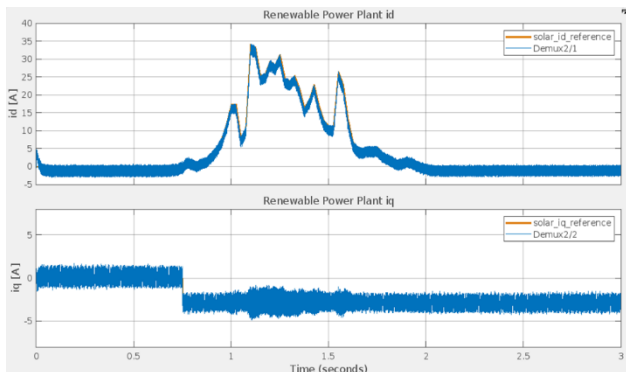
Sl.13. Struja skladišta električne energije i_q



Sl.14. Struja opterećenja i_d

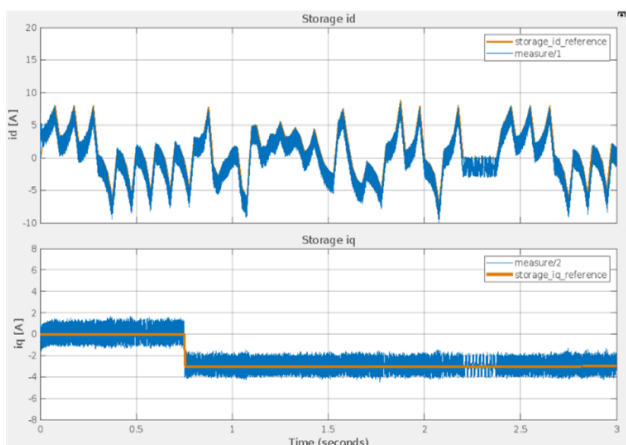


Sl.15. Struja opterećenja i_q

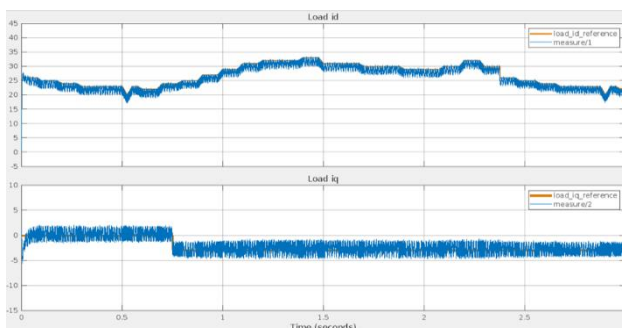


Sl.16. Struje solarne elektrane i_d i i_q

Rezultati u čvoru sa baterijomi čvoru sa opterećenjem su prikazani na slikama 17 i 18, gde se takođe mogu primetiti prethodno navedene poželjnije karakteristike nelinearne kontrole.



Sl.17. Struje skladišta električne energije i_d i i_q



Sl.18. Struje opterećenja i_d i i_q

7. ZAKLJUČAK

Za kontrolu snage i stabilnosti u DC mikro mrežama, mogu se koristiti i linearne i nelinearne metode. Korišćenje linearnih vremenski nepromenljivih modela je manje složeno dizajnirati, što ih inicijalno čini

atraktivnijim za upotrebu. Međutim, AC/DC pretvarači imaju nelinearnu i vremenski promenljivu prirodu, a linearni modeli su približni i zavise od radne tačke. Iz tog razloga je uvedena nelinearna kontrola.

U radu su testirana oba načina upravljanja, a zatim su procenjene i upoređene njihove performanse kako u izolovanim sistemima, tako i u modelu DC mikro mreže. Upoređivanjem njihovih rezultata može se zaključiti da nelinearna kontrola nadmašuje linearnu, jer ima brži odziv, ima manji prebačaj (*overshoot*) i zato što proizvodi manje oscilacije oko referentnog signala kada ga dostigne.

8. LITERATURA

- [1] <https://www.c2es.org/content/microgrids/>
- [2] ***, „DC & Hybrid Microgrids“, Edited by S.Saponara, L Mihet-Popa, R. Saletti, Applied Sciences, MDPI, Basel, 2020.
- [3] M. Popadić, V. Katić, „Mogućnost korišćenja jednosmernog sistema u savremenim električnim mrežama“, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, God. 31, Br.11, 2016, pp.2063-2066.
- [4] E. Unamuno, J.A. Barrena, „Hybrid ac/dc microgrids - Part I: Review and classification of topologies“, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.52, Dec. 2015, pp.1251-1259.
- [5] S. Mihajlović, V. Katić, O. Cornea, “Modelovanje energetskih pretvarača u mikromrežama”, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, God. 34, Br.11, 2019, pp.1985-1988.
- [6] C. Bajracharya, M. Molina, J.A. Suul, T.M. Undeland, “Understanding of tuning techniques of converter controllers for VSC-HVDC”, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, June 2008
- [7] T. He, D. D. C. Lu, L. Li, J. Zhang, L. Zheng, J. Zhu, "Model Predictive Sliding Mode Control for Three-Phase AC/DC Converters," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.33, No.10, Dec. 2017, pp.8982-8993

Kratka biografija:



Sonja Sarajlić rođena je u Kraljevu 1994. god. Fakultet tehničkih nauka, studijski program Energetika, elektronika i telekomunikacije završila je 2017. god. Master studije je nastavila na smeru Distribuirani elektroenergetski resursi, gde je odbranila master rad 2022. god.

kontakt: sonjasarajlic94@gmail.com



Miguel Jimenez Carrizosa doktorirao je na Univerzitetu Paris-Sud XI (Francuska) 2015. god. Trenutno je predavač na Višoj tehničkoj školi rudarskih i energetskih inženjera i istraživač u Centru za industrijsku elektroniku Politehničkog univerziteta u Madridu. Oblasti istraživanja uključuju HVDC sisteme, kontrolu pretvarača napajanja i pametne mreže.



Vladimir Katić je rođen 1954. godine u Novom Sadu, gde je diplomirao na FTN 1978. god. Magistrirao je i doktorirao na Univerzitetu u Beogradu 1981. god. i 1991. god., respektivno Od 2002. god. je redovni profesor Univerziteta u Novom Sadu. Oblasti interesovanja su energetska elektronika, obnovljivi izvori električne energije, električna vozila i kvalitet električne energije