

MODELOVANJE I ANALIZA KVALITETA NAPONA U REALNOJ I TEST MREŽI
MODELING AND ANALYSIS OF POWER QUALITY IN REAL AND TEST GRID

Dragana Stojišić, Vladimir A. Katić, Aleksandar M. Stanisavljević,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U radu je izvršeno modelovanje i analiza kvaliteta napona u realnoj i test mreži. Kao realna mreža korištena je primorska distributivna mreža. Ova mreža je modifikovana priključivanjem dvije vjetroelektrane. Urađena je simulaciona analiza uticaja vjetroelektrana na propade napona pri različitim vrstama kratkog spoja i na različitim pozicijama. Simulacije su izvršene u programskom paketu MATLAB/SIMULINK.

Ključne reči: Propadi napona, Test mreže, LVRT, Vjetroelektrana.

Abstract – In this master's thesis, modelling and analysis of voltage quality in the real and test grid was carried out. The coastal distribution grid was used as a real grid. This grid was modified by connecting two wind power plants. A simulation analysis of the influence of wind power plants on voltage drops with different types of short circuits and at different positions was performed. The simulations were performed in the MATLAB/SIMULINK software package.

Keywords: Voltage sags, Test grids, LVRT, Wind farm

1. UVOD

U savremenim električnim mrežama sve više pažnje se poklanja racionalnom i efikasnom radu sistema i potrošača, što podrazumeva obezbeđivanje adekvatnog kvaliteta isporuke i isporučene električne energije. Jedan od najozbiljnijih problema u tom smislu jeste pojava propada napona (engl. *voltage dip* ili *voltage sag*). Propad predstavlja kratkotrajno smanjenje efektivne vrijednosti napona do vrijednosti između 10 % i 90 % naznačene, obično u trajanju od polovine periode do 1 min. Uzroci propada napona su kratki spojevi u mreži, uključivanje velikih potrošača (asinhronih motora i elektrolučnih peći) ili opterećenje transformatora i preopterećenje u mreži. Brojni su negativni efekti propada, pa je od interesa njihovo detaljno istraživanje [1].

U savremenim distributivnim mrežama sve češće je prisustvo distribuiranih elektroenergetskih resursa (DER), koji energiju dobijaju iz obnovljivih izvora. Oni su izuzetno važni za rad elektroenergetskih sistema, ali i u sklopu borbe za smanjenje emisije gasova staklene bašte i sprečavanja klimatskih promena [2].

NAPOMENA:

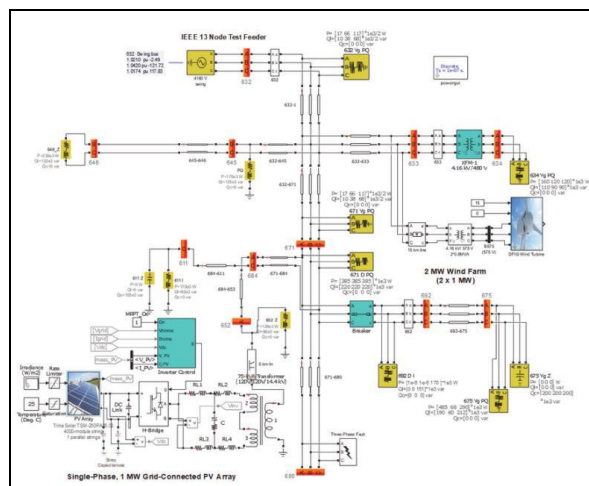
Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Vladimir Katić, red. prof.

Pored generisanja „čiste“ energije, ovakvi DER-ovi mogu da daju podršku mreži tokom pojave kvarova, odnosno propada napona (engl. *Low Voltage Ride Through, LVRT*).

Cilj rada jeste da se ispita uticaj vjetroelektrana (VE), kao vrste DER-a, na kvalitet napona pri pojavi propada napona usled jednopolnog, dvopolnog i trolnog kratkog spoja. Prvo su posmatrani slučajevi kada na mrežu nisu priključene VE, a zatim kada jesu. Za istraživanje su korišćeni modeli referentne test mreže IEEE 13-bus i model realne distributivne mreže, koja se nalazi u primorju - primorska mreža.

2. MODELI TEST I REALNE MREŽE

IEEE 13-bus test mreža je referentna mreža, koja predstavlja deo distributivne mreže u SAD i često se koristi za razna istraživanja pojava u mreži [3]. Ona je modifikovana ubacivanjem vjetrogeneratora i solarne elektrane (slika 1). Detaljan opis, parametri mreže, način modelovanja i karakteristike priključenih DER-ova dati su u [3, 4], a ovde se neće ponavljati zbog ograničenog prostora.

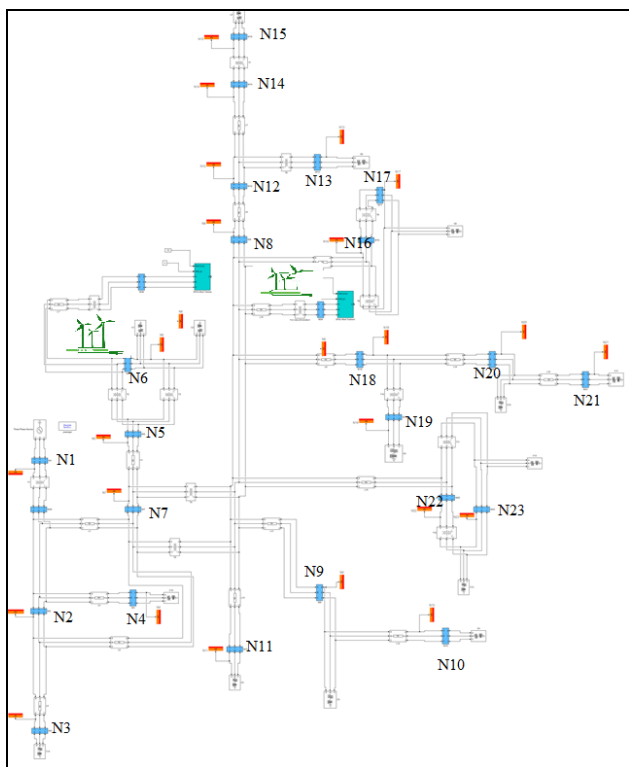


Sl.1. Šema modela IEEE 13-bus test mreže u MATLAB-u sa priključenim DER-ovima [4]

Realna distributivna mreža predstavlja deo primorske mreže, koja se prostire duž obale Crne Gore. Mreža napaja nekoliko velikih potrošača, koji imaju različite karakteristike, kao i nekoliko primorskih gradova srednje populacije. Ukupna instalisana snaga transformatora u mreži je 23.5 MVA, dok je tipično opterećenje ispod 16 MVA, sa faktorom snage $\cos\phi=0,92$ [5].

Na slici 2 prikazana je šema modela primorske mreže urađena u programskom paketu MATLAB. Model realne

primorske mreže je modifikovan je tako što su u čvorovima N6 i N8 priključene vjetroelektrane, nominalnih aktivnih snaga po 1MW i faktora snage 0,9.



Slika 2. Šema modela primorske mreže u MATLAB-u sa priključenim DER (vjetroelektranama)

3. ISPITIVANJE UTICAJA PROPADA NAPONA

U ovom poglavlju dati su rezultati simulacija izvršenih u programskom jeziku MATLAB. Predstavljene su slučajevi testiranja u realnoj, primorskoj mreži, dok su rezultati simulacija na IEEE 13-bus test mreži dati u [4] i ovdje se neće ponavljati.

U realnoj, primorskoj mreži simulirani su jednopolni kratak spoj (1pks), dvopolni kratak spoj (2pks) i trolpolni kratak spoj (3pks) na sabirnicama N2 i N16 (slika 2). Osim na sabirnici N2 na kojoj se desio kvar, posmatrani su talasni oblici napona i na sabirnicama N6, N8, N11 i N23. Kvar je simuliran u trenutku 0,2 s i trajao je do 0,3 s. Vrijeme trajanja simulacije je 0,5 s. Data je i harmonijska analiza napona za fazu *a* korišćenjem FFT (engl. *Fast Fourier Transform*) i predstavljen je tok promjene drugog, trećeg, petog i sedmog harmonika, odnosno prikazan je izgled Harmonijskog otiska (engl. *Harmonic Footprint, HF*) definisanog kao [6]:

$$HF = HDU_{2357} = \sqrt{\sum_{n=2,3,5,7} U_n^2} / U_1 \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

gde je n red višeg harmonika, U_n efektivna vrednost n -tog višeg harmonika, a U_1 efektivna vrednost osnovnog (fundamentalnog).

Međutim, zbog preglednosti rada i ograničenog prostora, u nastavku će biti izloženo samo nekoliko rezultata za slučaj kada su se desili 1pks (kao najčešći slučaj kvara u nekoj mreži), odnosno 3pks (kao najozbiljniji kvar) i to u korišćenoj mreži, na sabirnici N2. Posmatraće se naponi na sabirnicama N2 i N6.

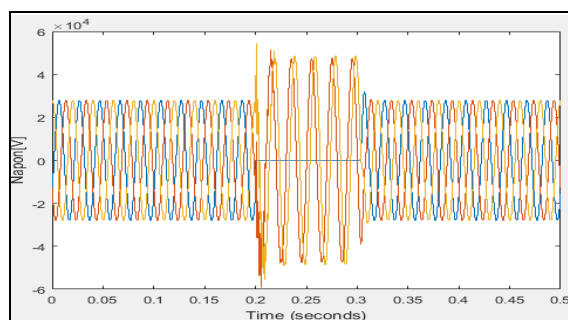
3.1. Propadi napona prije priključenja vjetroelektrana na mrežu

U ovom delu, razmatrana je realna, primorska mreža bez priključenih vjetroelektrana i simulirani su kvarovi na njenim sabirnicama.

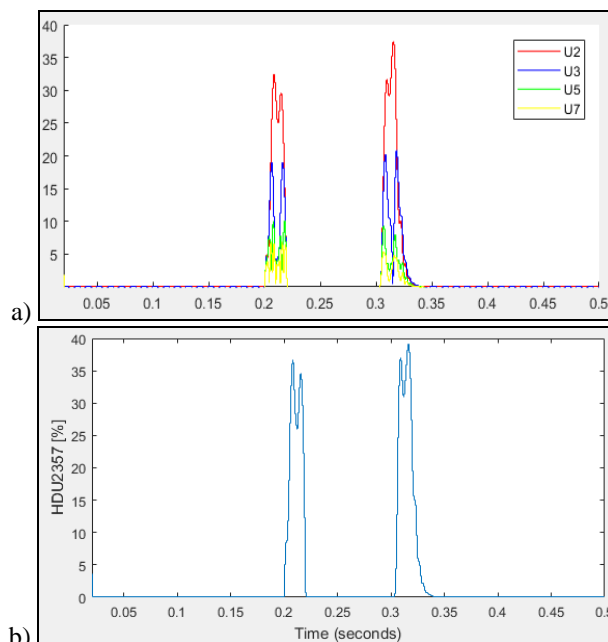
3.1.1. Jednopolni kratak spoj (1pks)

Na slici 3 predstavljeni su talasni oblici napona sve tri faze na sabirnici N2 za slučaj 1pks. Vidi se da je napon faze *a*, koja je u kvaru jednak nuli, dok je kod ostale dvije faze povećan za oko 50%. To je očekivano, mada je povećanje (poskok napona; engl. *voltage swell*) dosta izraženo.

Usled pojave struje kvara, dolazi do deformacija talasnog oblika napona, odnosno pojave 2-gog, 3-ćeg, 5-tog, 7-mog i ostalih viših harmonika. Na slici 4 prikazan je njihov tok, kao i izgled odgovarajućeg harmonijskog otiska.



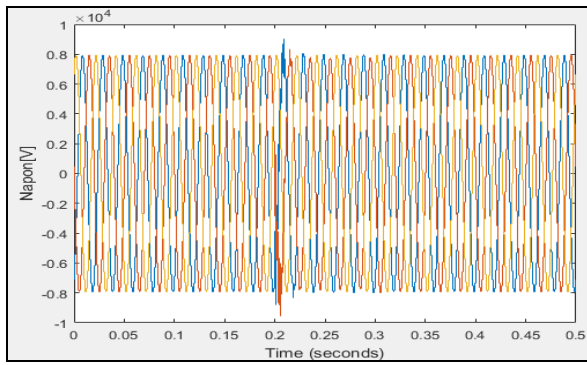
Slika 3. Talasni oblik napona na sabirnici N2 pri 1pks



Slika 4. a) FFT analiza napona na sabirnici N2 pri 1pks, b) harmonijski otisak

Odziv na 1pks na čvoru N2 dobijen na sabirnici N6 prikazan je na slici 5. Vidi se da je napon ostao skoro isti kao prije kvara, odnosno da je kvar imao veoma mali ili nikakav uticaj na vrednost napona.

Ovakvi rezultati su posledica vrste kratkog spoja i udaljenosti sabirnice od mjesta kvara.

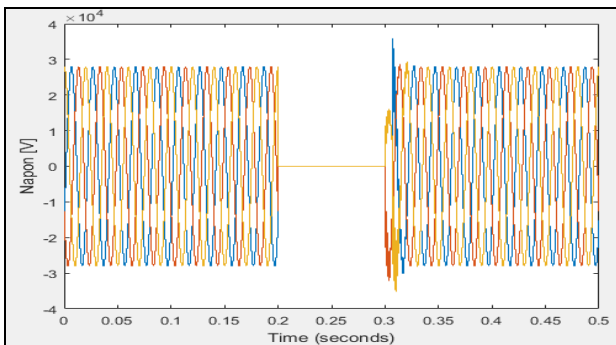


S1.5. Talasni oblik napona na sabirnici N6 pri 1pks

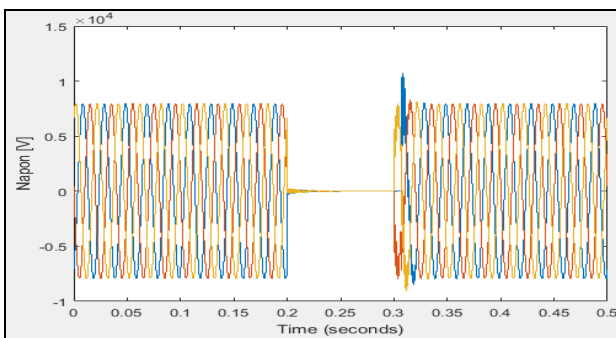
3.1.2. Tropolni kratak spoj (3pks)

U slučaju 3pks, napon na sabirnici N2 u sve tri faze je nula, što se vidi na slici 6. Uočljivo je harmonijsko izobličenje napona na početku i kraju propada, koje se manifestuje pomenutim harmonijskim otiskom, ali zbog ograničenog prostora ovde neće biti prikazano.

Odgovarajuće stanje napona na sabirnici N6 prikazano je na slici 7. Vidi se da je pad napona na početku 3pks bio tek 97,5 % naznačenog, da bi ubrzo pao na nulu. U tom tranzijentnom delu, kao i na kraju propada, ponovo se može uočiti izrazito harmonijsko izobličenje, odnosno pojava harmonijskog otiska.



S1.6. Talasni oblik napona na sabirnici N2 pri 3pks



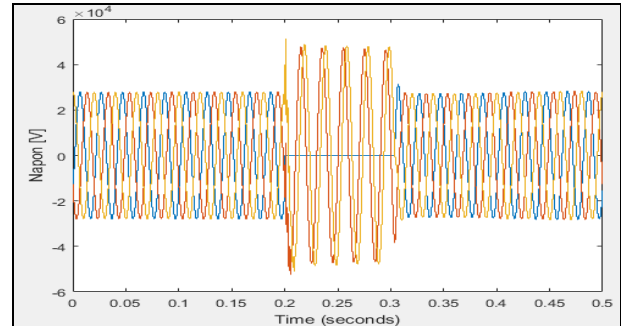
S1.7. Talasni oblik napona na sabirnici N6 pri 3pks

3.2. Propadi napona nakon priključenja vjetroelektrana u mrežu

U ovom delu posmatraju se slučajevi uticaja kvarova kada su na mrežu priključene vjetroelektrane snage 1 MW u čvorovima N6 i N8. Ponovo će biti razmatrane situacije pojave 1pks i 3pks u slučaju da se kvar pojavio na čvoru N2, a posmatrani su naponi na sabirnicama N2 (mestu kvara) i N6 (mestu priključenja vjetroelektrane). Harmonijski otisak neće biti prikazan, zbog ograničenog prostora.

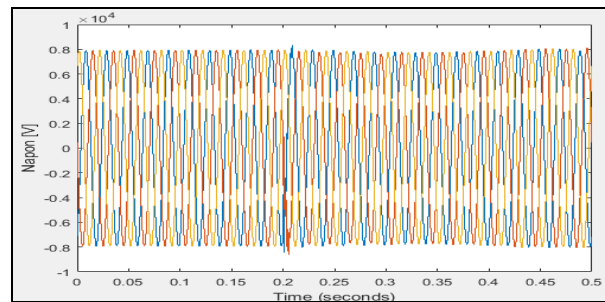
3.2.1. Jednopolni kratak spoj (1pks)

U slučaju 1pks na sabirnici N2, napon faze a , na kojoj se simulira kvar, pada na nulu, dok naponi ostale dvije faze iznenada rastu tj. povećavaju se za oko 50%. Rezultat je sličan, kao i prije priključenja vjetroelektrana, a dijagrami napona dati su na slici 8. Ne zapaža se uticaj rada vjetroelektrana, što je i očekivano.



S1.8. Talasni oblik napona na sabirnici N2 pri 1pks

Odziv na sabirnici N6 u slučaju 1pks sa priključenim vjetroelektranama dat je na slici 9. Vidi se da nema značajnije promjene u talasnim oblicima i veličini propada napona nakon priključenja vjetroelektrana. Isti slučaj je i kod ostalih sabirnica pa se njihovi talasni oblici neće prikazivati.

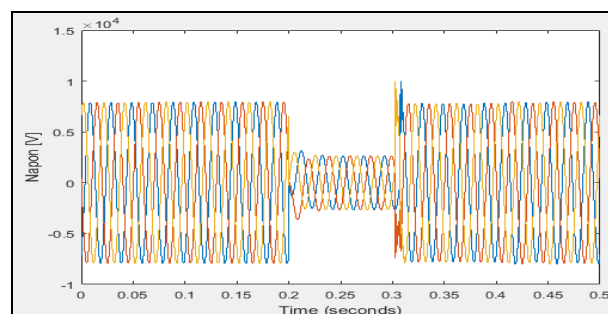


S1.9. Talasni oblik napona na sabirnici N6 pri 1pks

3.2.2. Tropolni kratak spoj (3pks)

Pri 3pks talasni oblik napona na sabirnici N2 je ostao isti kao i prije priključenja vjetroelektrana (slika 6), tako da se on neće ovde ponovo prikazivati.

Međutim, na sabirnici N6 mogu se uočiti promjene u odnosu na slučaj pre priključenja vjetroelektrana. Stanje napona tokom 3pks na čvoru N2 prikazano je na slici 10. Za razliku od prvog slučaja kada u mreži nema vjetroelektrana i kada je napon sve tri faze bio nula (slika 7), sada napon različit od nule i iznosi oko 34,25% nominalnog (slika 10). Vidi se da VE pomaže mreži i smanjuje nivo propada napona.



S1.10. Talasni oblik napona na sabirnici N6 pri 3pks

4. POREĐENJE I ANALIZA REZULTATA

Za poređenje će se uzeti u obzir svi dobijeni rezultati simulacija na modelu realne primorske mreže, dakle i oni koji zbog pomenutih ograničenja nisu mogli biti prikazani.

Ukoliko se uporede rezultati simulacije slučajeva sa i bez priključenih vjetroelektrana, može se uočiti da je u čvorovima u kojima su one priključene došlo do odgovarajućih promjena pri 3pks. Ovaj tip kvara najčešće je praćen izuzetno velikim strujama, koje su znatno veće od struja ostalih kratkih spojeva. Ova poboljšanja napona primećuju se na sabirnici N6 kada se 3pks desio na sabirnici N2. Dodavanjem vjetroelektrana pad napona pri 3pks je smanjen za 10%. Isto tako javlja se i poboljšanje na sabirnici N8 za istu vrstu kvara. Takođe, je došlo do promjena u čvorovima N11 i N23 pri 3pks na N2 nakon priključenja vjetroelektrana.

Kod pojave 1pks uticaj vjetroelektrana nije primećen, odnosno može se smatrati da je zanemarljiv.

Dakle, promjene su vidljive samo kod 3pks. Ove promjene su male, svega nekoliko procenata, što se može objasniti time da su u mrežu priključene vjetroelektrane male snage (od po 1MW). Kod 2pks promjene su slabo uočljive ili ih nije ni bilo, što se opet može pripisati snazi priključenih vjetroelektrana.

Ista analiza je izvršena i za slučaj kada se kvar dešava dublje u mreži, na sabirnici N16. Simulacije su pokazale da je uticaj vjetroelektrana na propade napona najuočljiviji pri 3pks, gdje se javlja poboljšanje napona od oko 5% na sabirnici N8.

Slični rezultati postignuti su i simulacijama na referentnoj IEEE 13-bus test mreži [4]. Poređenjem rezultata, uočeno je da propad napona prilikom kvara ima manje vrednosti kada su priključeni DER-ovi (solarna i vjetroelektrana), ili jedan od njih. Razlika u propadu napona u nekim slučajevima doseže i do stotinjak volti, što je preko 2 posto od nominalne vrijednosti napona. To je značajan procenat za zaštitu, kada se odlučuje da li da odreaguje ili ne.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu izvršeno je modelovanje i analiza kvaliteta napona u realnoj i test mreži. Kao primjer realne mreže korišćena je primorska distributivna mreža, tip distributivne mreže koji se može pronaći duž Mediteranske obale, a u ovom slučaju je to bio deo distributivne mreže u obalnom delu Crne Gore. Na mrežu su priključene dvije male vjetroelektrane snage po 1 MW. Izvršene su simulacije za 1pks, 2pks i 3pks. Kratki spojevi su definisani na sabirnicama N2 i N16.

Rezultati su pokazali da 1pks izaziva najmanje propade i ima uticaj uglavnom samo na čvorove u okoline mesta kvara, dok 2pks i 3pks imaju veći uticaj i izazivaju propade napona i u ostalim čvorovima u mreži.

Priključenje i rad vjetroelektrana imaju određeni doprinos poboljšanju naponskih prilika, ali je on ograničen veličinom samih elektrana.

Slični rezultati dobijeni su i simulacijama na referentnoj IEEE 13-bus test mreži, gde je takođe uočen relativno mali doprinos DER-a poboljšanju naponskih prilika tokom kvara u iznosu od par procenata.

Time je u oba slučaja simulacija na realnoj ili na test mreži potvrđena sposobnost obnovljivih izvora da daju podršku mreži, odnosno da obezbede ispunjenje zahteva LVRT-a.

6. LITERATURA

- [1] V. Katić, A. Tokić, T. Konjić, „Kvalitet električne energije“, TEMPUS-CEFES, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2007.
- [2] V. Katić, I. Kapetanović, V. Fuštić: „Obnovljivi izvori električne energije“, TEMPUS-CEFES, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2007.
- [3] A.M. Stanisavljević, V.A. Katić, B.P. Dumnić, B.P. Popadić, „A Brief Overview of the Distribution Test Grids with a Distributed Generation Inclusion Case Study“, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol.15, No.1, Feb.2018, pp. 115 – 129
- [4] V. Vidačić, V. Katić, „Uticaj obnovljivih izvora energije na propade napona u distributivnim mrežama“, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, God. 36, Br.7, 2021, pp.1287-1290
- [5] V.Lj. Strugar, V.A. Katic, J.V. Milanovic, “Generic Model of Coastal Distribution Network for Power System Harmonics Studies”, *Electrical Review*, Vol. 89, No.1a, Jan. 2013, pp.149-155.
- [6] V.A. Katic and A.M. Stanisavljevic, “Smart Detection of Voltage Dips Using Voltage Harmonics Footprint”, *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol.54, No.5, Sep./Oct. 2018, pp.5331-5342

Kratka biografija:



Dragana Stojišić rođena je u Vlasenici, BiH, 1996. god. Osnovne studije završila je na Fakultetu tehničkih nauka 2019. god., a master studije na istom fakultetu septembra 2022. god. na studijskom programu Energetika, elektronika i telekomunikacije – Distribuirani elektroenergetski resursi.



Vladimir A. Katić rođen je 1954. god. u Novom Sadu. Doktorirao je na Univerzitetu u Beogradu 1991. god. Od 2002. god. je redovni profesor Univerziteta u Novom Sadu. Oblasti interesovanja su mu energetska elektronika, kvalitet električne energije, obnovljivi izvori električne energije i električna vozila.



Aleksandar M. Stanisavljević, rođen je u Beogradu 1988. god. Doktorirao je na Univerzitetu u Novom Sadu 2019. god. gde je trenutno u zvanju docenta. Oblast interesovanja su mu integracija obnovljivih izvora energije na mrežu i kvalitet električne energije