



MODELOVANJE I ANALIZA PROPADA NAPONA U MEDITERANSKOJ MREŽI  
MODELING AND ANALYSIS OF VOLTAGE DIPS IN MEDITERRANEAN NETWORK

Marijana Palalić, 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 mreži. Kao primer test mreže korišćena je mediteranska obalska mreža. Ona je modifikovana dodavanjem dve vetroelektrane. Izvršene su simulacije radi ztvrđivanja uticaja vetroelektrana na kvalitet napona u mreži. Za simulacije korišćen je program DIGSILENT PowerFactory.

**Ključne reči:** Propadi napona, Test mreža, LVRT, Vetroelektrana.

**Abstract** – Modeling and analysis of the voltage quality in the test network was performed in this master's thesis. The Mediterranean coastal network was used as an example of a test network. It was modified by adding two wind farms. Simulations were carried out in order to determine the influence of wind farms on the quality of voltage in the network. The DIGSILENT PowerFactory program is used for simulations.

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

## 1. UVOD

Tehnološki i ekonomski razvoj doneli su povećanu potražnju električne energije, kao i povećane zahteve za kvalitetom električne energije. Sve veći broj potrošača u sebi sadrži uređaje energetske elektronike, koji istovremeno zahtevaju visok kvalitet električne energije, ali i doprinose pojavi viših harmonika. Jedan od najvažnijih parametara kvaliteta električne energije su propadi napona, koji predstavljaju nagli pad napona na vrednosti između 10% i 90% nominalne u trajanju od polovine periode do 1 min. Do pojave propada napona dolazi zbog kvarova u mreži, priključenja velikih potrošača ili distributivnih transformatora [1,2].

U radu je izvršeno razmatranje propada napona pri jednopolnom (1pks), dvopolnom (2pks) i troopolnom (3pks) kratkom spoju u modelu mediteranske (primorske) mreže, pre i posle priključenja distribuiranih generator (DG) u cilju da se utvrdi njihov uticaj na kvalitet napona. Očekuje se da vetroelektrane iskažu sposobnost da pružaju podršku mreži u toku propada napona (tokom kvara) u skladu sa zahtevima LVRT i da time utiču da se poboljšaju naponske prilike [3].

## NAPOMENA:

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

## 2. KVALITET NAPONA

Kvalitet napona predstavlja kvalitet isporučene električne energije, i sa aspekta prenosnog i distributivnog sistema definiše se na sabirnici na kojoj se priključuju potrošači. U idealnom slučaju struja i napon bi trebali biti sinusnog talasnog oblika, nominalne frekvencije i nominalne vrednosti. Međutim, u realnom slučaju ovo nije uvek ostvarivo, pa su potrošači podvrgnuti raznim smetnjama, od kojih su najnezgodniji propadi napona. Oni mogu da izazovu trenutani prekid rada pogona (reagovanje podnaponskih zaštitnih relea) ili resetovanje računara is l., što ima i značajne finansijske posledice [1-3].

Da bi se obezbedio nesmetan rad potrošača i umanjile posledice po elektroenergetski sistem u slučajevima propada napona, preduzimaju se mere u dva pravca. S jedne strane, zahteva se da potrošači imaju određenu "imunost" na smetnje, tj. definišu se krive tolerancije na propade ili poskoke napona (CBEMA/ITIC krive) [4]. S druge strane, u pravilima o radu mreže (engl. *Grid Code*) definišu se zone naponskih nivoa kada zaštita ne treba da reaguje, ali i zahtevi prema DG za podršku mreži tokom kvara (LVRT, engl. *Low Voltage Ride Through*) [3,5].

## 3. DISTRIBUIRANI GENERATORI

Distribuirani generatori ili izvori električne energije predstavljaju izvore, koji se priključuju direktno na distributivnu mrežu. Oni najčešće podrazumevaju proizvodne jedinice malih snaga, bazirane na obnovljivim izvorima električne energije.

Izvori priključeni u mrežu trebali bi da doprinesu stabilnosti i sigurnosti sistema, kao i da doprinesu smanjenju emisije gasova staklene bašte (pre svega CO<sub>2</sub>). Pod distribuiranim izvorima najčešće se podrazumevaju vetroelektrane i solarne elektrane, ali to mogu biti i male hidroelektrane i biogasne elektrane. One se na mrežu priključuju najčešće primenom DC/AC (solarne elektrane) ili AC/DC/AC pretvarača (vetroelektrane).

Kako bi se obezbedila stabilnost mreže za vreme kvarova u slučaju velikog učeća ovakvih izvora potrebno je da oni imaju LVRT sposobnost. Ona podrazumeva da elektrana nastavlja da pruža podršku mreži za vreme propada napona injektiranjem odgovarajuće aktivne i reaktivne snage u zavisnosti od propada napona [3,5].

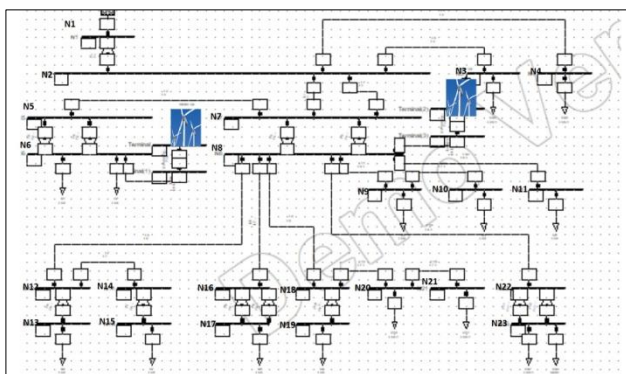
## 4. MODEL REALNE MEDITERANSKE MREŽE

Realna, mediteranska (primorska) distributivna mreža, koja će se ovde koristiti za istraživanje, okarakterisana je radijalnom strukturom sa relativno dugačkim srednjena-ponskim (SN) 10 kV kablovima i kratkim SN kablovima

35 kV, disperzijom potrošnje na niskom naponu i radialnom NN mrežom (0,4 kV). Ova mreža se nalazi u mediteranskoj (primorskoj, obalskoj) oblasti u Crnoj Gori, koja se karakteriše manjom populacijom. Budući da se u primorskim oblastima stanovništvo uglavnom bavi turizmom, najveće opterećenje je sezonski orijentisano i skoncentrisano uglavnom u individualnim zgradama, velikim ili malim hotelima, aerodromima, šoping centrima, marinama, radionicama, lakoj industriji i sl. Ukupna instalisana snaga transformatora u mreži je 23,5 MVA dok je tipično opterećenje ispod 16 MVA, sa faktorom snage  $\cos\phi=0,92$  [6].

Za razliku od [6], u ovom radu je ova mreža delimično modelovana, odnosno obrađen je jedan deo mreže sa transformatorskim stanicama 35/10 kV i 10/0,4 kV, dok je VN deo mreže naponskog nivoa 110 kV ekvivalentiran idealnim naponskim izvorom. Za modelovanje je iskorišćen softverski paket *DIGSILENT PowerFactory* [7]. Na slici 1 prikazana je šema modela urađena u ovom programu.

Da bi se ispitao uticaj rada DER-a, model mreže je modifikovan tako što su u čvorovima N6 i N8 priključene vetroelektrane. U čvoru N6 dodata je vetroelektrana nominalne aktivne snage 1 MW i faktora snage 0,9 preko transformatora (DYN5) i voda dužine 1 km. U čvoru N8 priključena je vetroelektrana nominalne aktivne snage 0,5 MW i faktora snage 0,9 preko transformatora (D11Yn) i voda dužine 1 km.



Slika 1. Šema modela primorske mreže u *DIGSILENT PowerFactory*-u sa priključenim vetroelektarnama

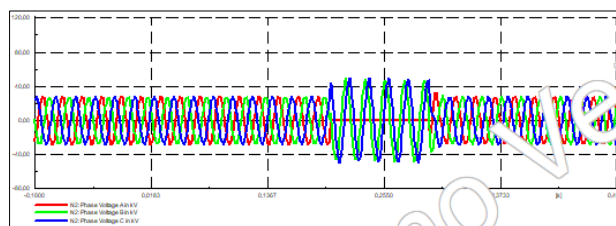
## 5. ISPITIVANJE UTICAJA PROPADA NAPONA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacija izvršenih u *DIGSILENT PowerFactory* programu. Simulacije su izvršene za slučaj kada se desio jednofazni (1pks), dvofazni (2pks) i trofazni (3pks) kratak spoj na sabirnicama N2 i N6. Propadi napona su posmatrani na sabirnicama N6, N8, N11 i N23. Kvar se desio u 0,2 s, a otklonjen je u 0,3 s. Vreme trajanja simulacije je 0,5 s. Pored talasnih oblika napona prikazani su i dijagrami vetroelektrana priključenih u čvorovima N6 i N8. Posmatraće se slučajevi kada se desio kvar na sabirnici N2 pre i posle priključenja vetroelektrana.

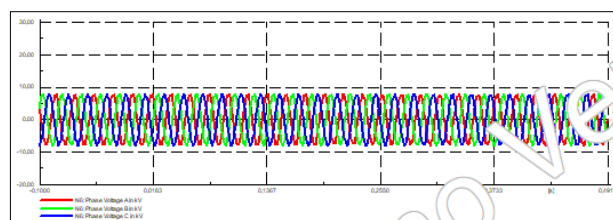
### 5.1. 1pks na N2 pre priključenja vetroelektrana

Simuliran je slučaj 1pks pre priključenja vetroelektrana, a odgovarajući talasni dijagrami su prikazani na slici 2. Sa slike se vidi da je napon faze koja je u kvaru nula, dok se napon ostale dve faze povećao za oko 65,8 %.

Na slici 3 možemo videti da se je kvar imao minimalan uticaj na napon sabirnice N6. Ovakvi rezultati su posledica vrste kratkog spoja, kao i udaljenosti sabirnice od mesta kvara. Talasni oblici napona ostalih posmatranih sabirnica ostali su nepromenjeni za vreme kvara, pa se neće prikazivati.



Slika 2. Talasni oblici napona na sabirnici N2 pri 1pks

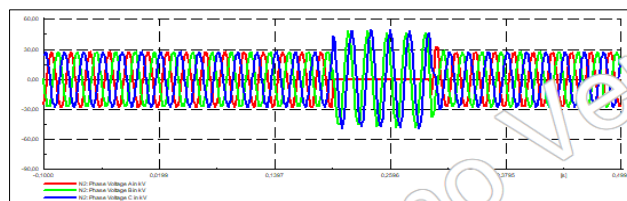


Slika 3. Talasni oblici napona na sabirnici N6 pri 1pks

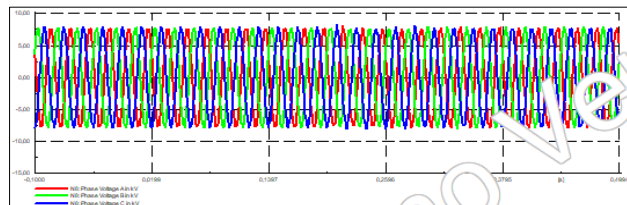
### 5.2. 1pks na N2 nakon priključenja vetroelektrana

Simuliran je kada su u čvorovima N6 i N8 priključene vetroelektrane, a u čvoru N2 se desio 1pks. Rezultati simulacije prikazani su na slikama 4 i 5. Može se videti da priključenje vetroelektrana nije imalo uticaja na talasne oblike napona sabirnicama N2 i N6. Sličan rezultat dobijen je i za napone ostalih posmatranih čvorova.

Na slikama 6.a) i 6.b) prikazane su aktivne (crvenim) i reaktivne (zelenim) snage priključenih vetroelektrana na sabirnicama N6 i N8, respektivno. Može se primetiti blagi pad proizvodnje aktivne snage za vreme kratkog spoja.



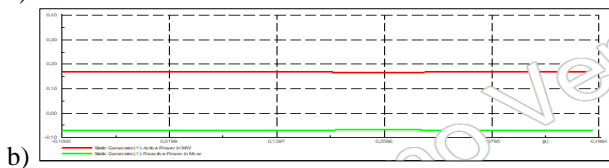
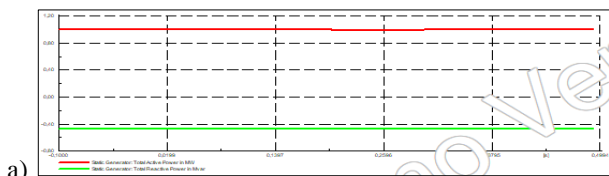
Slika 4. Talasni oblici napona na sabirnici N2 pri 1pks nakon priključenja vetroelektrana



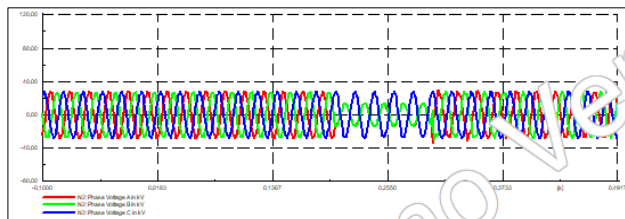
Slika 5. Talasni oblici napona na sabirnici N6 pri 1pks nakon priključenja vetroelektrana

### 5.3. 2pks na N2 pre priključenja vetroelektrana

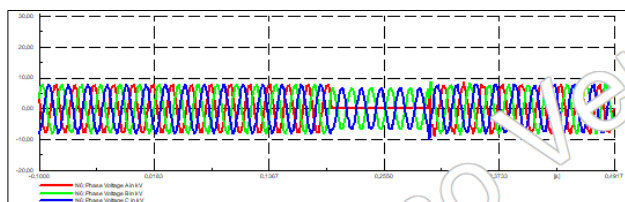
Sada će se simulirati slučaj kada se na sabirnici N2 desio 2pks i to između faza a i b. Rezultati su prikazani na slikama 7 i 8. Sa slike 7 se vidi da je na sabirnici N2 došlo do pada napona faza a i b za oko 50 %, dok je napon faze c ostao nepromenjen. Rezultati sa slike 8 pokazuju da je napon faze b čvora N6 nepromenjen, dok su naponi preostale dve faze opali za oko 50 %.



Sl.16. Aktivna i reaktivna snaga vetroelektrane pri 1pks priključene na sabirnici a) N6, i b) N8



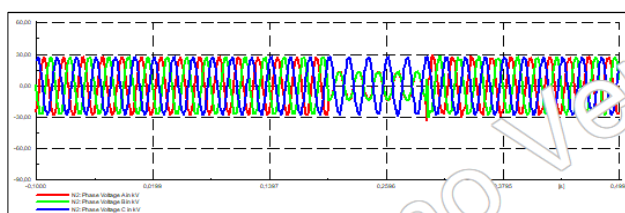
Sl.17. Talasni oblik napona na sabirnici N2 pri 2pks



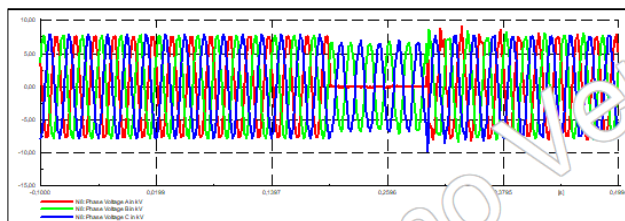
Sl.18. Talasni oblik napona na sabirnici N6 pri 2pks

#### 5.4. 2pks na N2 nakon priključenja vetroelektrana

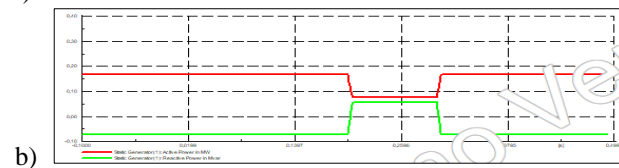
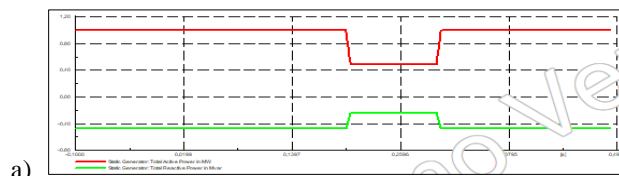
Rezultati simulacije 2pks na čvoru N2 nakon priključenja vetroelektrana dati su na slikama 9 i 10. Vidi se (slika 9) da je na sabirnici N2 došlo do pada napona faza *a* i *b* za oko 50 %, dok je napon faze *c* ostao nepromenjen. Sa slike 10 se vidi da je napon faze *a* sabirnice N6 opao za 98,1 %, dok je napon preostale dve faze opao za 14,2 %. Na slikama 11.a) i 11.b) prikazano je kretanje aktivne (crvenim) i reaktivne (zelenim) snage vetroelektrana tokom kvara. Može se značajno smanjenje aktivne snage i povećanje reaktivne tokom kvara. To odgovara očekivanom ponašanju usled zahteva LVRT.



Sl.19. Talasni oblik napona na sabirnici N2 pri 2pks nakon priključenja vetroelektrana



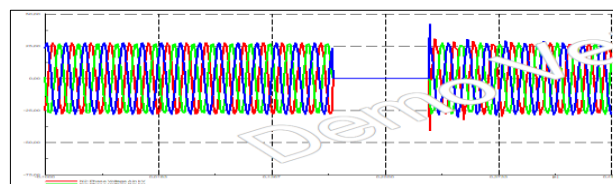
Sl.10. Talasni oblik napona na sabirnici N2 pri 2pks nakon priključenja vetroelektrana



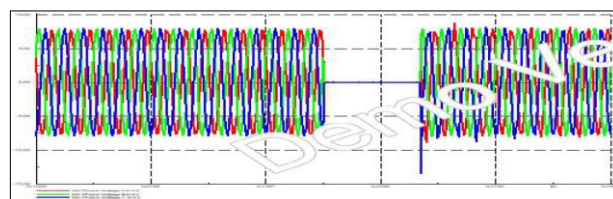
Sl.11. Aktivna i reaktivna snaga vetroelektrane pri 2pks priključene na sabirnici a) N6, i b) N8

#### 5.5. 3pks na N2 pre priključenja vetroelektrana

Pri 3pks napon na sabirnici N2 u sve tri faze je nula (slika 12). Na sabirnici N6 pad napona na početku 3pks je oko 97,5 %, da bi ubrzo pao na nulu (slika 13). Ostali grafici neće biti prikazani zbog sličnosti sa gore prikazanim. Ovakvi rezultati su posledica činjenice da se kvar desio na početku mreže.



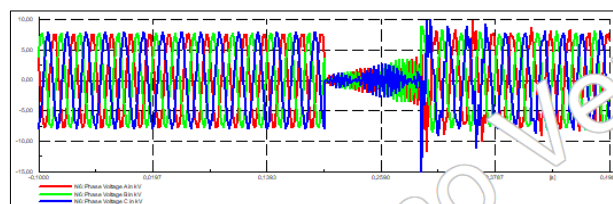
Sl.12. Talasni oblici napona na sabirnici N2 pri 3pks



Sl.13. Talasni oblici napona na sabirnici N6 pri 3pks

#### 5.6. 3pks na N2 nakon priključenja vetroelektrana

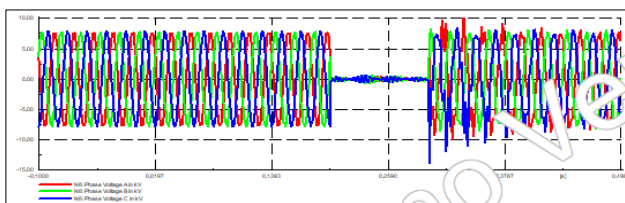
Za slučaj kada su priključene vetroelektrane najprimetnije promene su na čvoru N6 (slika 14). Na početku 3pks napon sve tri faze opao je za 77,4 %, a zatim je postepeno rastao, da bi u na kraju kratkog spoja iznosio 51,2 %.



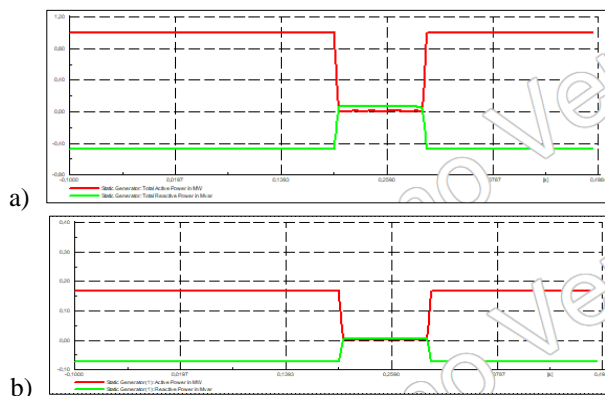
Sl.14. Talasni oblik napona na sabirnici N6 pri 3pks nakon priključenja vetroelektrana

Na sabirnicama N8, N11 i N23 talasni oblici napona imaju slično ponašanje. Na slici 15 dat je izgled napona na sabirnici N8. Ovde se može uočiti da je napon u sve tri faze opao za 94 % kod sabirnica N 8 i N11, dok je kod N23 95%. I ovde se može uočiti promena u odnosu na slučaj kada vetroelektane nisu bile priključene i kada je napon u sve tri faze bio nula, što je posledica rada vetroelektrana prema zahtevima LVRT (generisanja reaktivne snage). Ovo se potvrđuje kretanjem aktivne i reaktivne snage vetroelektrana tokom kvara (slike 16.a i 16.b). Sa slike 16.a može se videti da je vetroelektrana

priključena u sabirnici N6 za vreme kratkog spoja počela da proizvodi reaktivnu snagu, čime se može objasniti povećanje napona tokom kvara na svim sabirnicama.



Sl.15. Talasni oblik napona na sabirnici N8 pri 3pks nakon priključenja vetroelektrana



Sl.16. Aktivna i reaktivna snaga vetroelektrane pri 3pks priključene na sabirnici a) N6, i b) N8

## 6. ANALIZA REZULTATA

Poređenjem dobijenih rezultata simulacija, može se videti da vetroelektrane doprinose smanjenju pada napona na sabirnicama mreže u slučaju kratkog spoja. Efekat koji vetroelektrana ima zavisi od mesta priključenja vetroelektrane, njene snage, vrste kratkog spoja, kao i od mesta na kome se desio kvar.

Najveći efekat uočen je za vetroelektranu priključenu u čvoru N6 pri 3pks na N2. Upoređivanjem dijagrama napona datih na slikama 13 i 14, može se videti da je na početku kratkog spoja nakon priključenja vetroelektrane pad napona bio manji za 30 %, dok je na kraju kratkog spoja iznosio skoro 50 %. Ovo potvrđuju i dijagrama aktivne i reaktivne snage, gde se vidi da je najveći uticaj na rad vetroelektrane imao 3pks.

Može se uočiti i promena u naponskim prilikama i u slučaju 2pks na N2. Ali, promene u ovom slučaju kao i u ostalim su jako male i iznose svega nekoliko procenata. Ovo se može objasniti činjenicom da su mrežu priključene vetroelektrane malih snaga.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu izvršena je analiza uticaja priključenja DG (vetroelektrana) u mediteranskoj distributivnoj mreži na propade napona. U mrežu su priključene dve vetroelektrane, snaga 1 MW i 0,5 MW. Modelovanje mreže, kao i simulacije, izvršene su u programu *DIGSILENT PowerFactory*. Izvršene su simulacije za 1pks, 2pks i 3pks, na čvoru N2 pri čemu su posmatrana dva slučaja, pre i posle priključenja vetroelektrana. Na osnovu izvršenih simulacija vidi se da su najveći propadi napona bili izazvani pri 3pks, gde je propad napona bio vidljiv skoro u svim čvorovima mreže. Najmanji uticaj su imali

1pks, gde je propad napona bio vidljiv samo u čvoru gde se desio kvar.

Izvršenom analizom napona na sabirnicama, kao i dijagrama aktivne i reaktivne snage, utvrđeno je da su priključene vetroelektrane pozitivno uticale na naponske prilike u mreži za vreme kvara. Najveći uticaj imale su pri 3pks, dok je uticaj 1pks minimalan. Ovo je bilo i očekivano, s obzirom na LVRT zahteve *grid code*.

## 8. LITERATURA

- [1] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, H.W. Beaty, "Electric Power System Quality", McGraw Hill, New York, 1996.
- [2] V. Katić, A. Tokić, T. Konjić, „Kvalitet električne energije“, TEMPUS\_CEFES, FTN, Novi Sad, 2007.
- [3] A.M. Stanisavljevic, V.A. Katic, S.Lj. Milićević, "A method for real-time prediction of the probability of voltage sag duration based on harmonic footprint", *IEEE Access*, Vol.10, Feb. 2022, pp.23757-23774
- [4] P. M. Stephens, *Power Quality Standards*, Standard IEC 61000-4-411/34, CBEMA, ITIC, SEMI FE47, 2009, pp. 2-7.
- [5] R. Hiremath and T. Moger, "Comprehensive review on low voltage ride-through capability of wind turbine generators," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, No. 10, Oct. 2020. pp. 1-39
- [6] V.Lj. Strugar, V.A. Katic and 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.
- [7] <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>

### Kratka biografija:



**Marijana Palalić** rođena je u Novom Sadu 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