

UPRAVLJANJE VETROELEKTRANOM U USLOVIMA POREMEĆAJA U MREŽI WIND POWER PLANT CONTROL IN GRID DISTURBANCE CONDITIONS

Miljan Perić, Vladimir A. Katić, Aleksandar Stanisavljević, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U radu je razmatrana energija vetra. Cilj ovog rada je analiza mogućnosti upravljanja vetroelektranom u uslovima poremećaja u mreži. Za analizu su korišćeni modeli iz Matlab/Simulink-a, kao i sopstveno razvijeni. Izvršene su izvršene su simulacije različitih vrsta poremećaja, koji se dešavaju u EES i analiziran je odziv sistema.

Ključne reči: Vetroelektrane, Poremećaji u mreži, Modelovanje, Upravljanje.

Abstract – The paper discusses wind energy. Its aim is to analyze the possibilities of wind power plant management in the conditions of network disturbances. Models from Matlab/Simulink were used for the analysis, as well as self-developed ones. Simulations of different types of disturbances, which occur in the power system, were performed and the response system was analyzed.

Keywords: Wind farms, Network disturbances, Modeling, Control.

1. UVOD

Obnovljivi izvori su našli veliku primenu u proizvodnji električne energije, posebno energija Sunca, energija vetra i energija vode, koja je do sada u većoj meri iskorišćena. Oni predstavljaju rešenje za sve veće energetske potrebe čovečanstva, ali i za umanjeno štetnog uticaja korišćenja fosilnih goriva u vidu emisije gasova staklene bašte (posebno CO₂), koji se ogleda u sve evidentnijim klimatskim promenama.

Energija vetra predstavlja jednu od najbrže rastućih tehnologija iz obnovljivih izvora. U Srbiji, a naročito u Vojvodini izgrađeni su značajni kapaciteti [1]. Tehnika rada vetroelektrane bazira se na konverziji energije vetra putem vetro turbine. Kinetička energija vetra pokreće lopatice turbine i pretvara u rotaciono kretanje, pa se potom preko „spore“ osovine, multiplikatora brzine i „brze“ osovine prenosi na spregnuti električni generator. Najčešće se primenjuju sinhroni ili asinhroni (kliznokolutni ili dvostruko napajani asinhroni generator) generatori, dok je upotreba asinhronog kaveznog generatora ređa. Priključenje na elektroenergetsku mrežu ostvaruje se uz pomoć dvostrukog pretvarača (AC/DC i DC/AC) i po potrebi indukcionog transformatora na bazi odgovarajućih pravila i procedura [2].

NAPOMENA:

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

Povezivanje vetroelektrana na mrežu često odstupa od dosadašnje strukture centralizovanog sistema, jer mesto priključenja može biti i na distributivnom nivou, što zahteva specifično upravljanje samog sistema, kako zbog drugačijih tokova snaga, tako i zbog varijabilnog karaktera energije vetra. S druge strane, poremećaji u mreži mogu imati uticaj na rad vetroelektrane, jer se od nje zahteva aktivan pristup i podrška radu mreži. Uticaj kvarova i atmosferskih pražnjenja ispitivan je u ranijim radovima [3,4]. Cilj ovog rada jeste da se razmotri stanje na priključcima vetroelektrane korišćenjem standardnih softverskih alata i sopstveno razvijenog modela.

2. MODELOVANJE U MATLAB/SIMULINK-U

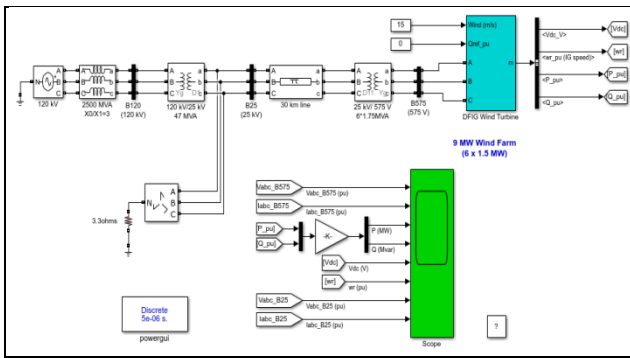
Matlab je programski jezik četvrte generacije namenjen za numeričke proračune. Za složene simulacije, ima dodatne alate, kao što je Simulink, koji se koristi za simulacije i analizu multidomena dinamičkih sistema.

U okviru samog paketa programa, nalazi se više gotovih modela iz oblasti elektroenergetike, odnosno vetroenergetike. U nastavku će biti prikazana dva ovakva modela.

2.1. Model vetroelektrane sa DFIG i njen odziv

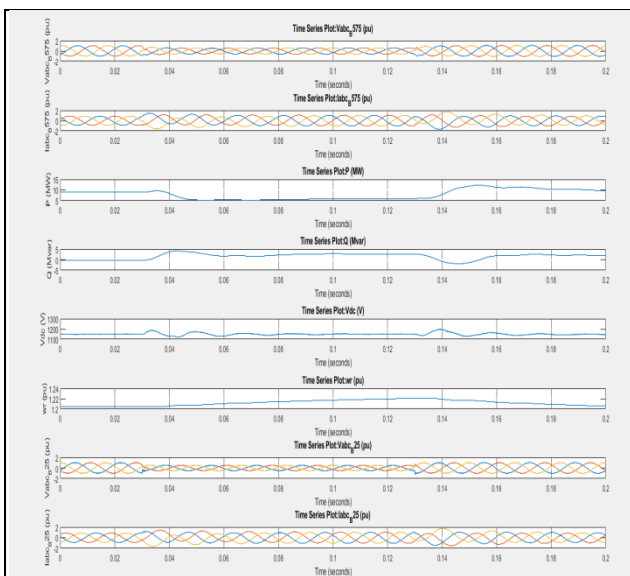
Prvi model, koji je analiziran predstavlja vetroelektranu, koju čine nekoliko jedinica dvostruko napajano asinhronog generatora (na engl. *Doubly-Fed Induction Generator*, DFIG) ukupne snage 9 MW. Vetroelektrana se sastoji od 6 vetro turbine snage od po 1,5 MW i priključena je na 25 kV distributivnu mrežu preko transformatora, a potom dalje na 120 kV prenosni sistem. Stator generatora je priključen direktno na mrežu, dok je rotor povezan preko AC/DC/AC pretvarača. Brzina vetra je postavljena na konstantnu vrednost od 15 m/s, dok je regulacija reaktivne snage vezana za zahteve podrške radu mreže (*Grid Code*) [5].

Na slici 1 predstavljen je detaljan model vetroelektrane sa priključkom na distributivnu, odnosno prenosnu mrežu [5]. Trajanje simulacije podešeno je na 0,2 sekunde, jer pokretanjem modela učitavaju se početni uslovi tako da se sistem već nalazi u stacionarnom stanju. Prva simulacija koja je izvršena na ovom modelu je reakcija sistema na iznenadni pad amplitude napona (propad napona) kao posledica priključenja velikih motora, naglog povećanja opterećenja ili nekog trofaznog kvara (kratkog spoja) u mreži. U okviru simulacija, posmatrani su naponi i struje na sabirnici B575, što je mesto priključenja vetroelektrane i na sabirnici B25, gde je mesto priključenja na distributivnu mrežu, a koje se nalazi na udaljenosti od 30 km, kao i promena brzine generatora, te proizvodnja aktivne i reaktivne snage.



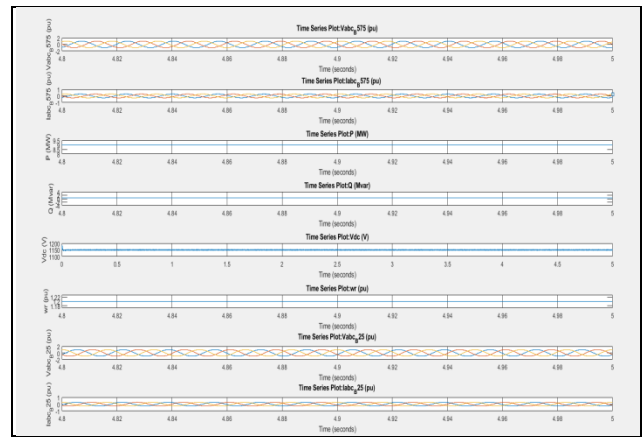
Slika 1. Model mreže sa DFIG [5]

Na slici 2 prikazan je grafički prikaz svih signala koji su praćeni, a razmatran je trofazni kratki spoj. Pre samog poremećaja, sistem je u stacionarnom stanju, proizvodnja aktivne snage 9 MW, reaktivne snage 0 MVar, naponi i struje na nominalnim vrednostima, kao i brzina obrtanja. Prva promena uočljiva je na 0,03 s kada dolazi do propada amplitude napona na 50% nominalne vrednosti. To uslovljava pad napona i na drugoj sabirnici kao i povećanje struje. Takođe, dolazi do pada proizvodnje aktivne snage i povećanje reaktivne, što je sasvim očekivano i u skladu sa zahtevima mreže tokom prolaznog kvara (*Low-Voltage Ride Through - LVRT*) u cilju podrške sistemu. Nakon 0,13 s poremećaj nestaje i sistem se ponovo vraća u prvobitno stanje.

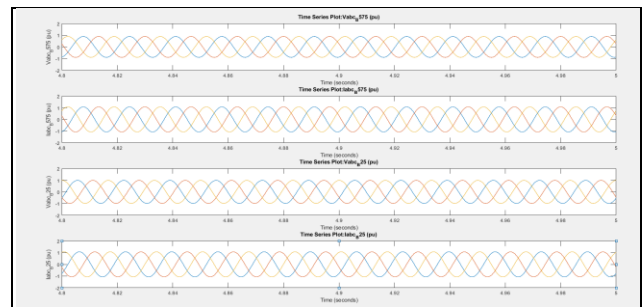


Slika 2. Odziv sistema sa DFIG

Drugi slučaj tiče situacije kada je uz vetroelektranu na sabirnici B25 priključen potrošač ili potrošačko područje snage 12 MW. Posmatra se odziv sistema sa i bez priključene vetroelektrane, odnosno njen uticaj na stabilan rad sistema. Generator je sad ograničene snage, za razliku od prethodnog slučaja. Na slici 3 i slici 4 predstavljene su promene parametara u toku vremena. Na slici 4 ima manje parametara, jer nema priključene vetroelektrane, pa izostaju njeni parametri. Na ovom primeru vidi se da postoji veće strujno naprezanje elemenata, u nekim periodima čak veće i od nominalnih vrednosti. Vidi se da njena podrška mreži, sprečava prekomerne vrednosti struje, odnosno izbegavanje ozbiljnijih posledica, koje se mogu manifestovati u vidu pogrešnog delovanja zaštite, oštećenja elementata, termičkih naprezanja i sl.



Slika 3. Odziv sistema sa vetroelektranom i potrošačem

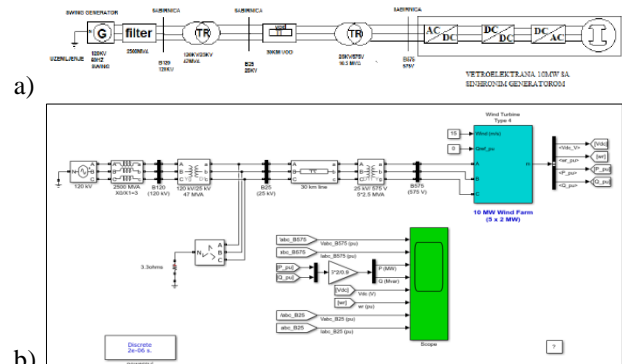


Slika 4. Odziv sistema bez vetroelektrane

2.2. Model vetroelektrane sa PMSG i njen odziv

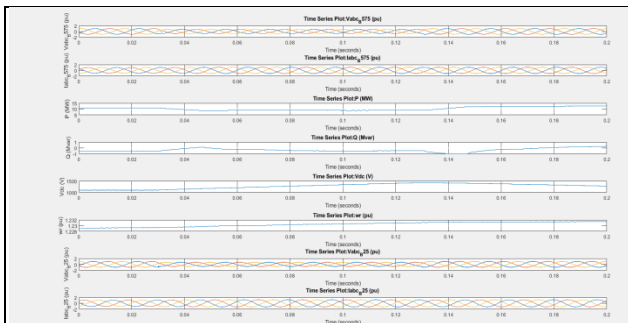
Za razliku od prethodnog modela u kom je u vetroelektrani korišćen DFIG generator, ovaj model predstavlja primer upotrebe sinhronog generatora, koji za pobudu koristi permanentne magnete (na engl. *Permanent Magnet Synchronous Generator - PMSG*). Model se sastoji od 5 vetroturbina snage 2 MW priključenih na distributivnu mrežu, kao i u prethodnom primeru. Upravljanje i priključenje ovog tipa vetrogeneratora izvršeno je primenom diodnog ispravljača, potom čopera i na kraju invertorom koji povezuje vetroelektranu sa mrežom (slika 5.a).

Na slici 5 b) prikazan je Matlab model u kom je korišćen sinhroni generator, dok je ostatak mreže sličan prethodnom [6]. To omogućava lakše poređenje rezultata dobijenih različitim izvedbama upravljanja električnim generatorima uz maksimalno iskorišćenje energije vetra. Simulacija je podešena da traje 0,2 s. Takođe, isti poremećaji će biti i praćeni i na ovom modelu. Prva simulacija tiče se propada amplitude napona u mreži.

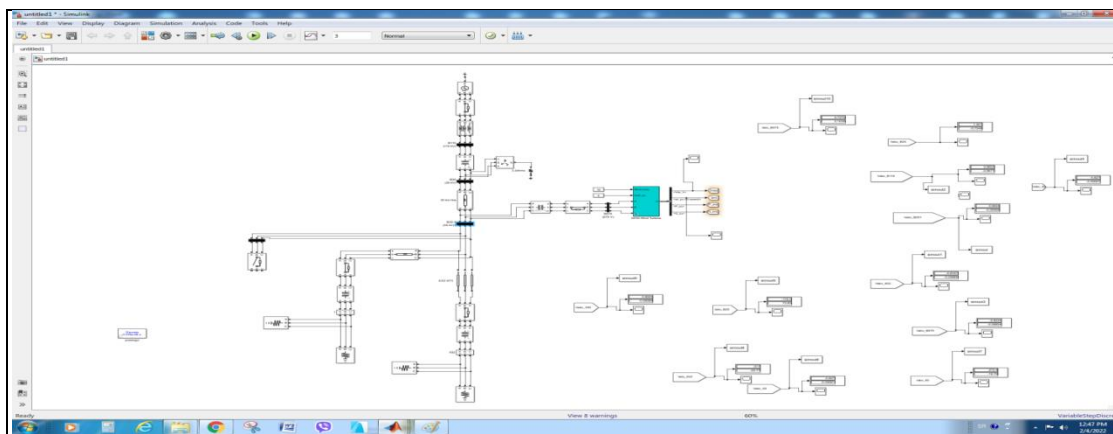


Slika 5. a) Električna šema vetroelektrane sa PMSG i b) Matlab model [6]

Na slici 6 prikazan je odziv sistema u kom je došlo do poremećaja amplitude napona u $t = 0,03$ s, odnosno pada na 0,75 r.j.. Taj poremećaj odrazio se na celokupni sistem. Došlo je do povećanja struje i aktiviran je rad upravljačkog sklopa vetroelektrane u skladu sa LVRT, što je praćeno srazmernim smanjenjem aktivne snage koju elektrana proizvodi i povećanjem reaktivne snage. Nakon prolaska poremećaja, sistem se stabilizuje i sve veličine se vraćaju na unapred predefinisane vrednosti.



Slika 6. Reakcija sistema na propad amplitude (PMSG)



Slika 7. Sopstveni model mreže i DFIG vterogeneratora

Prva simulacija izvršena je kao provera ispravnog rada zamišljenog elektroenergetskog sistema, radi testiranja naponskih nivoa, eventualnog prekida jedne od faza ili uočavanja nekog drugog problema sa blokovima. Sve naredne simulacije prate iste parametre i upoređuju dobijene talasne oblike sa prvom simulacijom koja predstavlja stacionarno stanje. Simulacije traju 3 sekunde uz podešavanje početnih uslova kako bi stacionarno stanje što pre nastalo, dok je na graficima radi bolje čitljivosti uzet jedan deo tog vremena. U parametrima su praćeni naponi na svim naponskim nivoima izraženi u relativnim jedinicama. Izvršeno je 5 simulacija: odziv bez poremećaja, tri trofazna kratka spoja na različitim lokacijama i propad napona.

Na slici 8 prikazani su rezultati prve simulacije za proveru modela. Kako su svi naponi na nominalnim vrednostima, model funkcioniše i može se dalje koristiti u simulacijama za različite scenarije rada..

Na slici 9 prikazan je programiran trofazni pad napona od 50% na 110 kV sabirnici, što je i podešeno na generatoru. Vidi se da je na drugim sabirnicama propad napona manji, jer vetroelektrana pruža podršku naponskim prilikama.

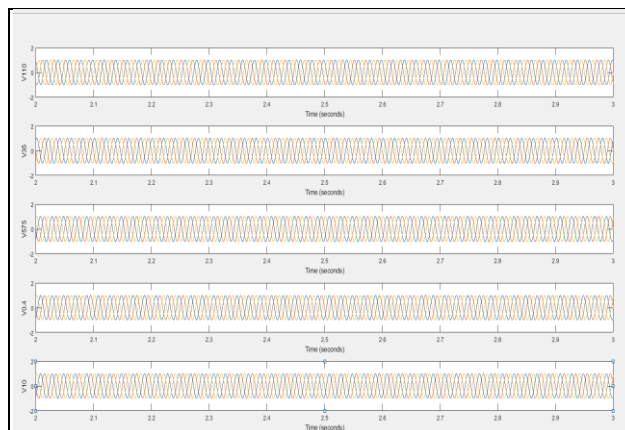
Na slici 10 prikazan je odziv na trofazni kratki spoj na 10 kV vodu, koji je simuliran za ispitivanje sistema i njegove upravljivosti. U trenutku nastanka ovog kratkog

3. SOPSTVENI MODEL I ANALIZA ODZIVA

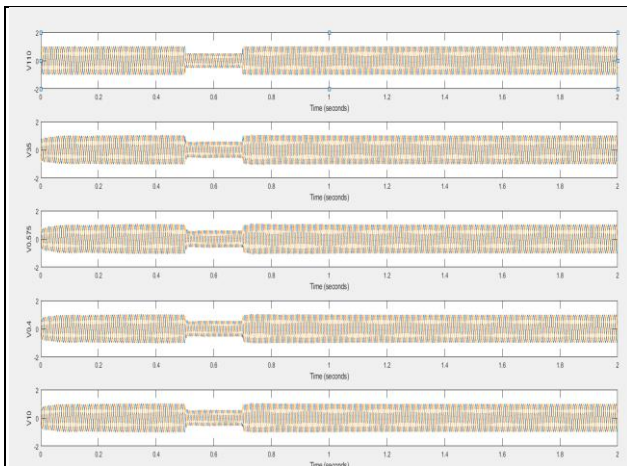
U prethodnom delu analizirani su odzivi dostupnih modela u Matlab/Simulink-u i uticaja nekih poremećaja u mreži. Kako Simulink dozvoljava kreiranje sopstvenog modela, napravljen je jedan model, koji se sastoji od vetroelektrane sa DFIG generatorima, od swing generatora, potrošača i transformatora. Svrha modela je analiza odziva sistema kakav će se sve češće sretati u praksi, tj. sa decentralizovanom proizvodnjom i priključenjem distribuiranih generatora na mrežu.

Na slici 7 predstavljen je razvijen model, koji se sastoji od prenosnog 110 kV dela, vodova i transformatora koji prilagođavaju napon zahtevima distributivne mreže i potrošača. Na 35 kV sabirnici, priključena je i vetroelektrana. Sa te sabirnice potiču tri voda, jedan je za 10 kV, drugi za domaćinstva i treći je ostavljen kao rezervni izvod u slučaju proširenja potrošnje ili iz nekog drugog razloga. Mreža je za razliku od prethodnih modela opremljena sa prekidačima koji imaju zaštitnu ulogu i za sekcionisanje delova mreže kako bi što manje potrošača trpelo zbog nekog od mogućih poremećaja.

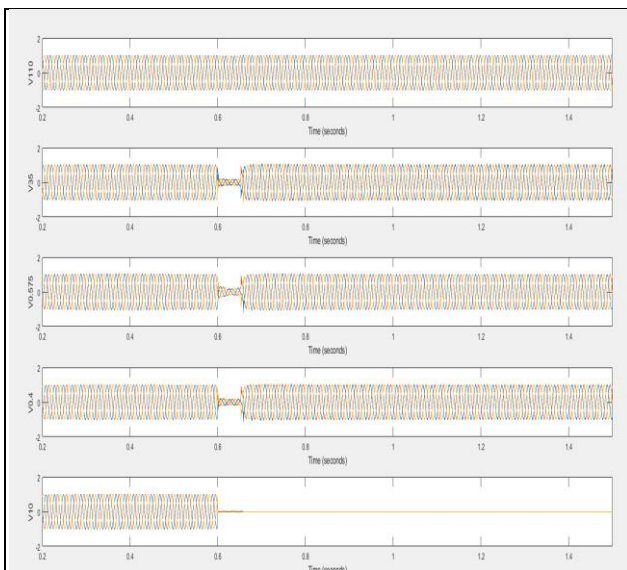
spoja, došlo je do pada napona u mreži, posebno na mestu kratkog spoja. Nakon veoma kratkog perioda, delovala je zaštita i sekcionisala vod pod kvarom tako da je on ostao bez napajanja. Ostatak mreže se nakon delovanja zaštite oporavio tako da je svim ostalim potrošačima isporučena električna energija, što je uočljivo kroz povratak napona na nominalne vrednosti. Potrošačima na sekcionisanom 10 kV vodu se obnavlja napajanje tek nakon otklanjanja kvara.



Slika 8. Sistem u normalnom pogonu



Slika 9. Reakcija sistema na pad amplitude napona



Slika 10. Odziv sistema kad postoji kratak spoj

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu trenutnog stanja u elektroenergetskim sistemima u smislu izvora koji se koriste i ekoloških zahteva, prelazak na nekonvencionalne izvore je jedino rešenje. Pre svega, tu se misli na obnovljive izvore koji imaju nemerljivo manji uticaj na zagađenje životne sredine, ali i dosta složeniju primenu. Njihova implementacija zahteva upotrebu novih tehnologija upravljanja, jer je njihova priroda takva da ne mogu da kontinualno proizvode električnu energiju, odnosno da njihov rad je u zavisnosti od vremenskih prilika. Upotreba novih tehnologija uslovljava izmene u elektroenergetskim sistemima, naročito distributivnom, gde oni postaju aktivni sistemi i time menjaju uobičajenu centralizovanu, vertikalnu strukturu, a to podrazumeva sve veću upotrebu energetske elektronike i pretvarača. Upravljačka struktura pretvarača, podrazumeva sinhronizaciju, regulaciju struje, regulaciju napona jednosmernog međukola (i regulaciju snage) i implementaciju odgovarajuće modulacione tehnike.

U Matlab/Simulink-u analizirano je upravljanje i odziv sistema. Ti sistemi pored generatora, potrošača, vodova, sadrže i vetroelektranu priključenu na mrežu. Prvi i drugi model je gotovo identičan, razlika je samo u implementaciji upravljanja vetroelektranom i tipu električnog generatora koji se koristi. U najjednostavnijem slučaju

kada su simetrične naponske prilike u mreži, na osnovu ispitivanja odziva na poremećaje, oba modela imaju sasvim zadovoljavajuće reakcije. Vetroelektrana u svakom momentu podržava sistem i obezbeđuje sigurnost i stabilnost sistema uz odgovarajući kvalitet električne energije.

Treći model, koji je samostalno razvijen i predstavljen ovde kao primer složenije mreže, daje isto tako dobre rezultate. Njegov odziv na pad amplitude swing generatora pokazuje težnju vetroelektrane da pruži podršku u svakom trenutku i da se naponske prilike vrate na nominalne vrednosti čime se obezbeđuje podrška radu mreže, odnosno da pad napona bliže vetroelektrani bude manji. Takođe, uticaj ozbiljnijih poremećaja (kvarova) na različitim mestima i njihovo sekcionisanje pokazuje da je sistem sposoban da u vrlo kratkom periodu nastavi normalan rad. Ovi primeri su pokazatelj da implementirana struktura daje sasvim zadovoljavajuće rezultate. Kada su tehnologije upravljanja u pitanju, još uvek postoji prostora za poboljšanje, pogotovo u složenijim slučajevima sa izraženom nesimetrijom.

5. LITERATURA

- [1] V. Stevanović, V. Katić, "Verifikacija potencijala vetra u Vojvodini", *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, Edicija: Tehničke nauke – Zbornici, God. 33, Br.4, 2018, pp.594-597
- [2] ***, „Pravila o radu distributivnog sistema“, EPS Distribucija, Beograd, 2017.
- [3] J. Toholj, V. Katić, A. Stanisavljević, „Modelovanje i analiza uticaja propada napona primjenom test mreža sa distribuiranim generatorima“, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, God. 36, Br.1, 2021, pp.123-126,
- [4] M. Komisar, M. Rock, V. Katić, „Model i simulacije vetrogeneratora u ATP/EMTP-u i Matlab/Simulink-u za slučaj atmosferskog pražnjenja“, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, God. 34, Br.11, 2019, pp.2096-2099.
- [5] <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/wind-farm-dfig-detailed-model.html> (pristupljeno u februaru 2022.)
- [6] <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/wind-farm-synchronous-generatorand-full-scale-converter-type-4-detailed-model.html> (pristupljeno u februaru 2022.)

Kratka biografija:



Miljan Perić rođen je u Loznici 1996. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi odbranio je 2022. god.; kontakt: miljanperic7@gmail.com



Vladimir Katić rođen je u Novom Sadu 1954. god. Doktorirao je na Univerzitetu u Beogradu 1991. god., a od 2002 je zvanju redovnog profesora. Oblast interesovanja su energetska elektronika, obnovljivi izvori električne energije i kvalitet električne energije.



Aleksandar Stanisavljević rođen je u Beogradu 1988. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2019. god., a iste godine izabran je zvanje docenta. Oblast interesovanja su obnovljivi izvori električne energije i kvalitet električne energije.