

Analiza uticaja obnovljivih izvora energije koristeći probabilističke tokove snaga

Jelena Stojković, Jovan Mikulović

Katedra za elektroenergetske sisteme
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija
jstojkovic@etf.rs, mikulovic@etf.rs

Sažetak—Sve veća zastupljenost obnovljivih izvora energije ima veliku uticaj na planiranje i eksploataciju elektroenergetskih sistema. U ovom radu se koristi skup tehničkih parametara kojima se kvantifikuje njihov efekat na prenosu mrežu. Ovi indeksi mere uticaj obnovljivih izvora na gubitke aktivne i reaktivne snage, naponske prilike i opterećenje vodova i mogu biti koristan alat operatoru pri planiranju kao i pri eksploataciji elektroenergetskog sistema. Da bi se pravilno sagledao njihov efekat potrebno je uvažiti stohastičnu prirodu obnovljivih izvora energije koja je u analizi obuhvaćena kroz Monte Carlo simulacije. Modelovanje i simulacije različitih scenarija su izvršene u MATLAB-u na primeru standardne IEEE 9 mreže.

Ključne riječi- obnovljivi izvori energije; Monte Carlo simulacije; tehnički parametri performansi;

I. UVOD

Povećanje emisije CO₂ i ograničenost rezervi fosilnih goriva nametnuli su obnovljive izvore energije(OIE) u prvi plan. Evropska unija je postavila jako ambiciozne ciljeve, do 2050. godine, u pogledu smanjenja emisije CO₂ ispod 80% nivoa koji je bio zastupljen 1990.[1] Obnovljivi izvori energije postaju sve više zastupljeni u proizvodnji električne energije i zamenjuju izvore koji su zaslužni za emisiju CO₂. Na taj način oni doprinose dekarbonizaciji budućih elektroenergetskih sistema(EES). Penetracija obnovljivih izvora energije, naročito vetra, u stalnom je porastu. Ukupni proizvodni kapacitet iz obnovljivih izvora energije iznosio je preko 2240 GW u 2016. godini. Stalni pad cena tehnologije za obnovljive izvore može dovesti do njihove još veće zastupljenosti. [2]

Pored ekološkog faktora koji je bio glavna motivacija za investiranje u OIE, integracija OIE je donela mnoge benefite za EES. Jedna od prednosti jeste što se zahtevima potrošnje može odgovoriti na lokalnom nivou, čime se smanjuje potreba prenosa električne energije na velika rastojanja. Direktna posledica decentralizovane proizvodnje iz OIE je smanjenje opterećenja vodova i gubitaka aktivne i reaktivne energije u sistemu[3, 4]. Na ovaj način se smanjuje verovatnoća preopterećenja vodova i povećavaju se sigurnost EES-a. Istovremeno, operator prenosnog sistema je odgovoran za gubitke energije u njegovoj mreži tako da smanjenjem gubitaka ima ekonomski benefit.

Analiza uticaja integracije obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem je predmet istraživanja velikog broja

istraživača. Autori u [4, 5] se bave problemom pronalaska optimalne lokacije i kapaciteta distribuiranih izvora energije. Objektivna funkcija može biti različita, najčešće je to minimizacija gubitaka ili bolje naponske prilike.

II. METODOLOGIJA

A. Probabilistički proračuni tokova snaga

Proračuni tokova snaga predstavljaju jako koristan alat koji daje informacije o stanju elektroenergetskog sistema. Rezultat proračuna su promenljive stanja, amplitude i fazni uglovi napona na sabirnicama. Međutim, deterministički proračuni tokova snaga daju promenljive stanja u specifičnom scenariju, pod određenim opterećenjem i proizvodnjom. Nesigurnosti koje postoje u potrošnji i proizvodnji iz OIE se ne razmatraju pri determinističkim proračunima tokova snaga. Kako rezultati proračuna tokova snaga predstavljaju bitne ulazne promenljive za donošenje odluka u sistemu, efikasno uključivanje neizvesnosti je od vitalnog značaja. Probabilistički proračuni tokova snaga mogu pružiti više informacija o mogućim budućim stanjima u elektroenergetskom sistemu[6, 7]. U probabilističkim proračunima tokova snaga, ulazne i izlazne promenljive sistema se posmatraju kao slučajne promenljive i na taj način je moguće dobiti različita moguća stanja EES-a.

U literaturi su izloženi razni pristupi probabilističkim proračunima tokova snaga. Predložene metoda mogu se svrstati u tri glavne kategorije: metode bazirane na Monte Carlo simulacijama (MCS)[8, 9], analitičke metode[10, 11] i metode bazirane na aproksimacijama[12, 13]. Metode bazirane na MCS ne zahtevaju aproksimaciju problema tokova snaga i predstavljaju iterativni proces. Glavni nedostatak ove metode je potreba za velikim brojem simulacija koje su vremenski zahtevne. Međutim, s razvojem efikasnih alata i savremenim računarima ovaj nedostatak je prevaziđen i MCS se koriste često pri probabilističkim proračunima tokova snaga. Ova metoda predstavlja iterativan proces gde se u svakoj iteraciji biraju slučajne vrednosti za svaku od stohastičkih promenljivi sistema (potrošnja i proizvodnja iz OIE) na osnovu navedene funkcije gustine raspodele. Zatim se vrši proračun optimalnih tokova snaga za svaki set ulaznih slučajnih promenljivih. Rezultat svakog proračuna optimalnih tokova snaga se pamti i proces se ponavlja. Postupak se ponavlja sve dok se ne zadovolji uslov za prekid algoritma. Najčešće se kao izlazni

kriterijum korsiti maksimalni broj iteracija i to je izabrano u ovom radu.

Kod analitičkog pristupa, jednačine tokova snaga su linearizovane sa ciljem da se lakše radi sa funkcijama gustoće verovatnoće. Ova metoda koristi funkciju gustine verovatnoće ulaznih stohastičnih promenljivih pomoću kojih se proračunavaju funkcije gustine verovatnoće izlaznih promenljivih, odnosno tokova snaga i naponskih prilika. Aproksimativna metoda ne zahteva linearizaciju jednačina tokava snaga već smanjuje broj estimacionih tačaka uz pomoć nekoliko tehnika.

Stohastična priroda potrošnje i proizvodnje iz OIE zahteva odgovarajuće probablističke tehnike kojima se može pouzdano proceniti ukupni uticaj integracije obnovljivih izvora energije. Stohastički proračuni tokova snaga predstavljaju efikasan način da se pristupi ovom problemu. Za kvantifikaciju uticaja OIE koriste se posebno definisani indeksi kojima se upoređuje početno stanje sistema (bazni scenario) sa scenarijom koji uključuje obnovljive izvore energije. Posmatraju se tri tehnička aspekta: gubici snage, odstupanje napona i opterećenje vodova.

U ovom radu akcenat je dat na uticaju solarnih elektrana koje su priključene na mrežu u potrošačkim čvorovima. Solarna iradijacija je intermitentna i stohastična. Da bi se pouzdano procenio uticaj solarnih elektrana na sistem neophodno je uspostaviti odgovarajući model za procenu proizvodnje iz fotonaponskih panela. U određenom periodu, solarna iradijacija se može približno aproksimirati Beta raspodelom čija funkcija gustine verovatnoće ima sledeći oblik[14]:

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_m}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_m}\right)^{\beta-1} \quad (1)$$

gde r i r_m predstavljaju trenutnu i maksimalnu solarnu iradijaciju na nekom vremenskom intervalu, α i β su parametri obilka Beta raspodele, a Γ je Gama funkcija. Parametri Beta raspodele solarne iradijacije se mogu dobiti iz srednje vrednosti solarne iradijacije μ i varijanse σ tokom nekog vremenskog perioda:

$$\alpha = \mu \left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \quad (2)$$

$$\beta = (1-\mu) \left[\frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \quad (3)$$

Parametri Beta raspodele se dobijaju na osnovu merenja iradijacije na nekom vremenskom intervalu ali u ovom radu to nije rađeno već su usvojene vrednosti $\alpha=3.034$, $\beta=2.299$ i maksimalna solarna iradijacija $r_m=1.029$ kW/m². [14]

Kada je poznata Beta funkcija za solarnu iradijaciju može se dobiti i izlazna snaga solarne elektrane. Funkcija gustine verovatnoće proizvodnje je isto opisana Beta raspodelom forme:

$$f(P) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P}{R_m}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P}{R_m}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

gde R_m predstavlja maksimalnu izlaznu snagu solarne elektrane tokom nekog vremenskog intervala.

Svako opterećenje je modelovano preko normalne raspodele $N(\mu, \sigma^2)$ sa parametrima $\mu=1$ i $\sigma=0.07$ u relativnim jedinicama [14]. Parametri normalne raspodele kojom je modelovana

potrošnja najbolje je dobiti iz istorijskih podataka o potrošnji na dužem vremenskom intervalu. Ovi parametri bi bili različiti za različite potrošačke čvorove zavisno od njihove strukture i karakteristika.

Ovde treba napomenuti da se smatra da su sva opterećenja i proizvodnja iz solarnih elektrana nekorelisane veličine (t.j. sve promenljive su međusobno nezavisni). Ova pretpostavka nije u potpunosti opravdana zato što potrošnja zavisi od vremenskih prilika, odnosno sunčeve iradijacije. Međutim, kako je cilj rada da se pokaže primena tehnike probablističkih tokova snaga na analizu uticaja integracije OIE, uvedena aproksimacija ne utiče mnogo na tačnost dobijenih rezultata. Korelacija između ovih veličina biće predmet budućih istraživanja.

III. TEHNIČKI POKAZATELJI UTICAJA OBNOVLJIVH IZVORA ENERGIJE NA PRENOSNU MREŽU

A. Indikatori gubitaka aktivne i reaktivne snage

Operatori prenosnog sistema treba uvek da imaju u vidu tehnički i ekonomski uticaj gubitaka kako tokom planiranja, tako i tokom eksploatacije elektroenergetskog sistema. Pokazalo se da strateška integracija OIE predstavlja efikasan način za smanjenje ukupnih gubitaka u sistemu. Ovakav benefit je dodatna motivacija za investiranje u decentralizovanu proizvodnju iz OIE. Instaliranjem proizvodnih kapaciteta koji su bliži potrošačkim područjima smanjuje se potreba za prenosom električne energije na velike udaljenosti.

Tehnički pokazatelji gubitaka aktivne i reaktivne snage (IGp i IGq) upoređuju ukupne gubitke aktivne i reaktivne snage u scenarijima sa OIE i baznim scenarijima bez OIE. Njihova matematička formulacija data je formulama (5) i (6):

$$IGp = 1 - \frac{Re\{S_y\}}{Re\{S_y^0\}} \quad (5)$$

$$IGq = 1 - \frac{Im\{S_y\}}{Im\{S_y^0\}} \quad (6)$$

S_y se odnosi na ukupne gubitke aktivne snage za slučaj kada postoje OIE dok se S_y^0 odnosi na ukupni gubitke snage osnovnog scenarija (scenario bez OIE). Vrednosti ovog indeksa između 1 i 0 ukazuju na pozitivne efekte, pri čemu veća vrednost ovog parametra pokazuje na veći uticaj (smanjenje gubitaka) kada postoji penetracija OIE, dok negativne vrednosti upućuju na povećanje gubitaka snage.

B. Indikatori naponskih prilika u mreži

Vrednosti napona su od ključnog značaja za rad elektroenergetskog sistema. Održavanje napona u prihvatljivom opsegu omogućava pouzdan i siguran prenos snage. Maksimalna dozvoljena odstupanja napona su precizno definisana Grid Code-om. Najčešće se uzima da je odstupanje $\pm 5\%$ ili $\pm 10\%$ od nominalnog napona prihvatljivo. Neki potrošači su naročito osetljivi na vrednosti napona van predviđenih granica. To je slučaj sa asinhronim motorima kod kojih je polazni moment srazmeran kvadratu napona, tako da niski naponi otežavaju startovanje ovakve vrste motora. Visoki naponi ubrzavaju staranje izolacije i mogu da oštete elektronske uređaje. Tehnički pokazatelj IND se odnosi na maksimalno odstupanje napona između sabirnica mreže. Ujednačen profil napon je obično poželjan u radu sistema. Prema tome, pozitivne vrednosti IND ukazuju na ujednačen

profil napona, dok negativne vrednosti znače šire odstupanje napona. U matematičkim terminima indeks je izražen pomoću formule (7):

$$IND = (V_{max}^0 - V_{min}^0) - (V_{max} - V_{min}) \quad (7)$$

V_{max} i V_{min} redom predstavljaju maksimalnu i minimalnu vrednost napona u scenarijima sa OIE, dok su V_{max}^0 i V_{min}^0 maksimalni i minimalni napon u baznom scenariju.

C. Indikatori preopterećenja vodova

Tehnički parametar IPV se odnosi na nivo opterećenja dalekovoda u sistemi. Strateška integracija OIE sa ciljem smanjenja opterećenja vodova predstavlja efikasan način odlaganja investicija kako u prenosnu tako i u distributivnu mrežu[15]. Ona takođe može da utiče na smanjenje troškova ulaganja koja se odnose na postavljanje novih prenosnih vodova koji su neophodni zbog rasta opterećenja u sistemu.

Stoga, pozitivne vrednosti indeksa IPV ukazuju na to da su smanjeni tokovi snaga po vodovima, dok bi negativne vrednosti značile da integracija OIE dovodi do većeg opterećenje vodova u sistemu. U matematičkim terminima indeks se može izraziti kao:

$$IPV = \max \left(\frac{SL_m^0}{SR_m} \right)_{m=1}^{NL} - \max \left(\frac{SL_m}{SR_m} \right)_{m=1}^{NL} \quad (8)$$

gde se SL_m^0 i SL_m redom odnose na opterećenje voda m za bazni scenario i scenario sa OIE. SR_m je granično opterećenje voda m dok je NL broj vodova u sistemu.

Ovaj indeks služi kao sredstvo za utvrđivanje da li integracija OIE podiže ili smanjuje nivo opterećenja najopterećenijih vodova prenosnog sistema. Stoga, u slučajevima kada se nivo opterećenja najopterećenijeg voda smanji tada je postignut pozitivan efekat i vod je relaksiran. Povećanje nivoa opterećenja najopterećenijeg voda ukazuje na potrebu nadogradnje određenog dalekovoda u budućnosti. Dakle, smanjenje/povećanje opterećenja vodova direktno utiče na sposobnost sistema da prihvati povećanje potrošnje u budućnosti. Ovaj indeks indirektno upućuje na potrebne investicije u nove prenosne kapacitete.

D. Implementacija algoritma

U ovom poglavlju je opisan korak po korak predloženog algoritma za izračunavanje tehničkih kvantifikatora baziran na probabilističnim proračunima tokova snaga.

Korak 1: Priprema baze podataka za generatore (gornje i donje granice u pogledu aktivnih i reaktivnih snaga generisanja, koeficijenti troškova proizvodnje), parametre mreže (sa granicama u amplitudama napona čvorova i prividnim snagama koje se prenose kroz vodove) kao i potrošnje aktivne i reaktivne snage u čvorovima. Usvajanje parametara Monte Carlo simulacija - Maksimalni broj iteracija ($max_iter=1000$).

Korak 2: Postavlja se brojač trenutne iteracije na vrednost 1 ($tren_iter=1$)

Korak 3: Generisanje slučajnih promenljivih za potrošnju. Opterećenja su modelovana preko normalne

raspodele $N(\mu, \sigma^2)$ sa parametrima $\mu=1$ i $\sigma=0.07$ u relativnim jedinicama.

Korak 4: Pokretanje proračuna optimalnih tokova snaga i naponskih prilika za bazni slučaj kada ne postoji proizvodnja iz OIE. Zadatak optimalnih tokova snage predstavlja nalaženje raspodele aktivnih snaga generisanja na generatorskim čvorovima pri kojoj se dostiže minimum objektivne funkcije uz zadovoljenje fizičkih i tehničkih ograničenja mreže. Objektivna funkcija koju treba minimizovati je suma troškova proizvodnje svih upravljivih izvora u elektroenergetskom sistemu. Iz ovog koraka se dobija stanje u sistemu.

Korak 5: Generisanje slučajnih promenljivih za proizvodnju iz OIE. Proizvodnja je modelovana preko Beta raspodele sa parametrima $\alpha=3.034$ i $\beta=2.299$.

Korak 6: Pokretanje proračuna optimalnih tokova snaga i naponskih prilika za slučaj kada postoji proizvodnja iz OIE. Rezultat ovog koraka je stanje koje egzistira kada postoji proizvodnja iz solarnih elektrana.

Korak 7: Proračun tehničkih kvantifikatora prema navedenim formulama uzimajući bazni slučaj i slučaj sa OIE.

Korak 8: Provera kriterijuma za izlaz iz algoritma. Ako je broj trenutne iteracije manji od max_iter , povećava se brojač trenutne iteracije za 1 i ponavljaju se koraci od **Korak 3** do **Korak 8**, u suprotnom se nastavlja na **Korak 9**.

Korak 9: Proračun srednje vrednosti tehničkih kvantifikatora na osnovu rezultata pojedinačnih iteracija MCS.

Korak 10: Prikaz rezultata i kraj algoritma.

Na Sl. 1 je prikazan celokupan algoritam. Predloženi algoritam je implementiran u MATLAB-u i primenjen je na standardnu mrežu IEEE 9.

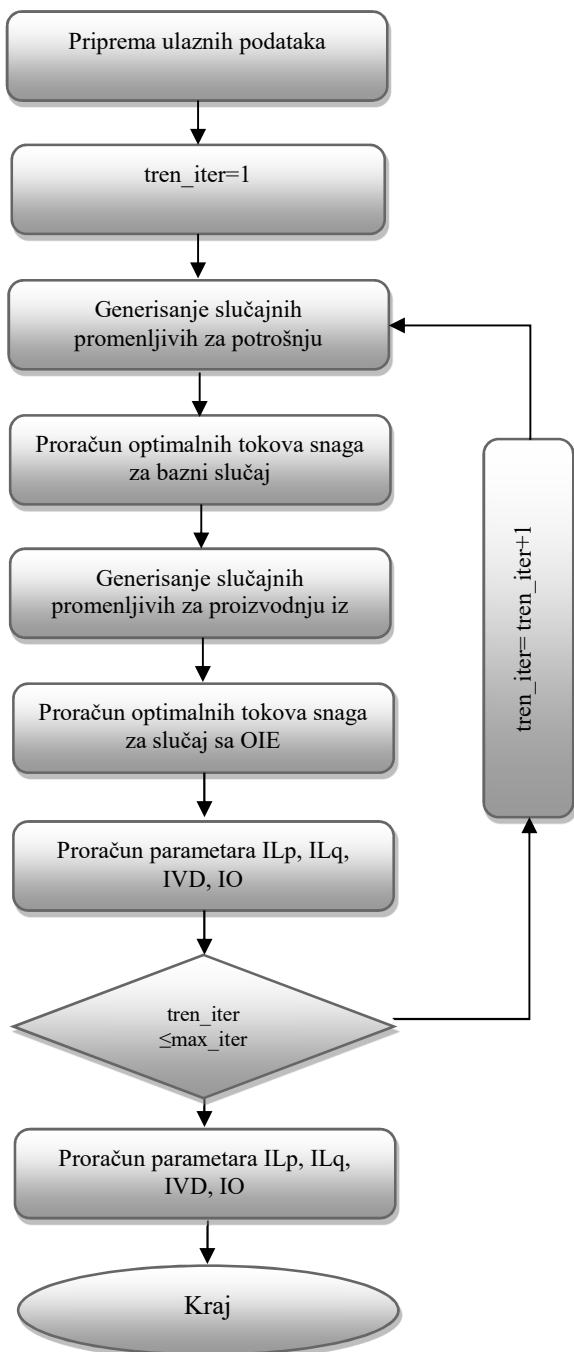
IV. OPIS SCENARIJA

A. Test sistem

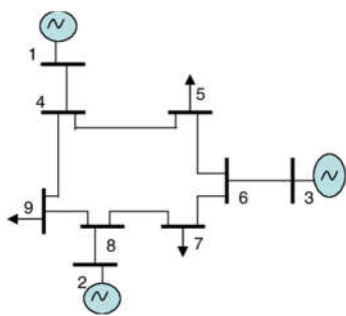
Algoritam predložen u prethodnoj sekciji je testiran na standardnom IEEE 9-sabirničkom sistemu za proračune tokova snage (Sl.2). Konkretno, sistem se sastoji od tri konvencionalna generatora koji snabevaju tri potrošačka područja. Instalirani kapacitet iznosi 820 MW, dok je srednje opterećenje 315 MW. Pored toga, pretpostavlja se da u potrošačkim čvorovima postoje solarne elektrane čiji ukupni instalirani kapacitet iznosi 100 MW. Optimalna raspodela snaga vršena je prema kriterijumu minimalnih ukupnih troškova proizvodnje generatora pri čemu je kriva troškova proizvodnje jednog generatora predstavljena kvadratnom funkcijom.

V. REZULTATI SIMULACIJA

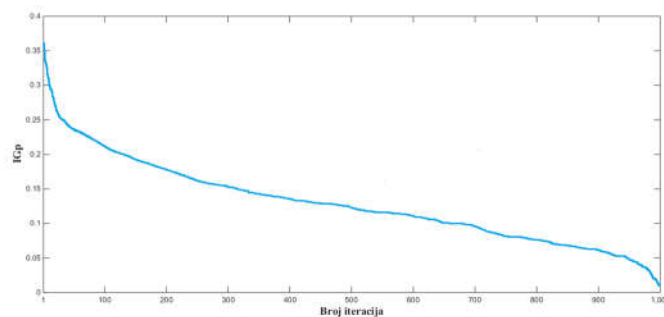
Tehnički pokazatelji IGp i IGq pokazuju da uvođenjem disperzovanih solarnih elektrana koje se nalaze u blizini potrošačkih centara dolazi do smanjenja gubitaka aktivne i reaktivne snage zbog smanjena prenosa snage vodovima. Decentralizovana proizvodnja može, iz tog razloga, doprineti smanjenju troškova gubitaka energije. Uticaj integracije OIE na naponske prilike u EES-u jako zavisi od postojanja izvora reaktivne energije u blizini opterećenja (šant kondenzatora, reaktora). Baš iz tog razloga, vrednosti tehničkog pokazatelja IVD nisu tako glatke kao pokazatelji IGp i IGq zbog specifične topologije test sistema. Naime, činjenica da postoje tri mašine koje mogu pružiti reaktivnu podršku u sistemu direktno utiče na efekte integracije solarnih elektrana na naponske prilike. Osim toga, otprećenje vodova se takođe smanjilo zato što je potrošnja delimično lokalno napajana od strane solarnih elektrana koje se nalaze na potrošačkim sabirnicama. Na Sl. 3.-6. su dati uređeni grafici ovih veličina, dok su u Tabeli I date osnovne karakteristike.



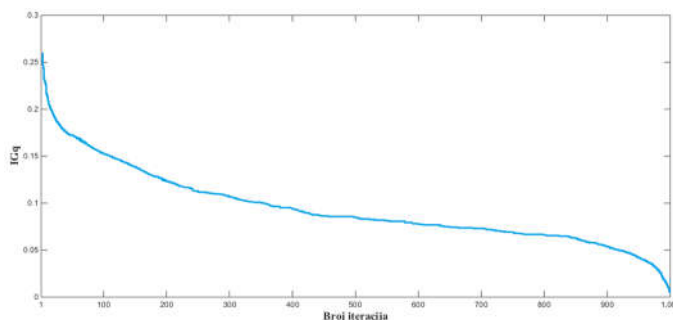
Slika 1. Algoritam proračuna tehničkih parametara performansi



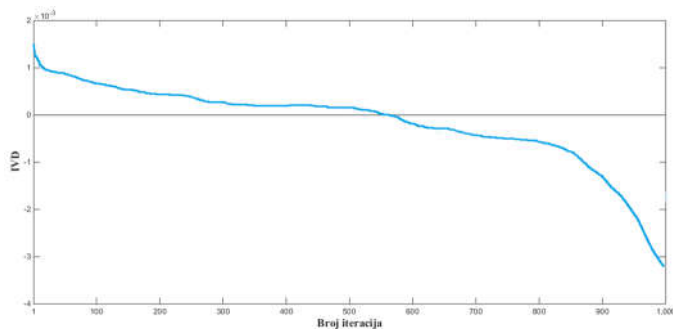
Slika 2. IEEE 9-sabirnički test sistem



Slika 3. Indikator gubitaka aktivne snage

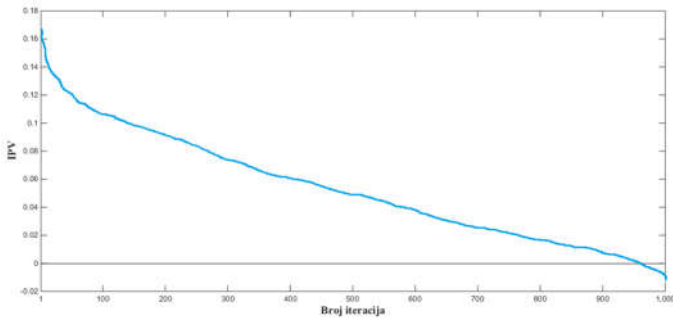


Slika 4. Indikator gubitaka reaktivne snage



Slika 5. Indikator naponskog profila

LITERATURA



Slika 6. Indikator opterećenja vodova

TABELA I. STATISTIČKA ANALIZA DOBIJENIH TEHNIČKIH POKAZATELJA

	Tehnički pokazatelji			
	<i>IGp</i>	<i>IGq</i>	<i>IVD</i>	<i>IPV</i>
Max	0.3656	0.2607	0.0015	0.1667
Min	0.0094	0.0023	-0.0032	-0.0106
Prosek	0.1235	0.0815	-0.0009	0.0523

Ovde treba naglasiti da se Beta raspodelom modeluje proizvodnja iz solarnih elektrana samo kada postoji sunčeva iradijacija. Ovom analizom je, iz tog razloga, obuhvaćen samo period dana kada ima sunca. Tokom noći, kada nema proizvodnje iz solarnih elektrana, stanje u EES-u je apsolutno identično stanju koje bi egzistiralo da nema OIE.

VI. ZAKLJUČAK

Povećana emisija CO₂ i klimatske promene dali su OIE prednost u odnosu na konvencionalne izvore. Međutim, OIE integracija u postojeće sisteme je vrlo kompleksan zadatak najviše zbog njihove stohastične i intermitentne prirode. Cilj ove analize je da se istraži uticaj OIE na prenosnu mrežu čime bi se izbegle nepoželjne situacije koje bi potencijalno mogle naškoditi sistemu. Zaključci ovog rada se u velikoj meri oslanjaju na koncept probabilističkih tokova snaga. Ovom metodom se uključuje stohastičko ponašanje potrošnje i proizvodnje iz OIE u sistemu. Posmatran je uticaj solarnih elektrana na gubitke snage, odstupanje napona i opterećenje vodova. Zaključak rada je da integracijom OIE dolazi do smanjenja gubitaka aktivne i reaktivne snage, kao i do smanjenja opterećenja vodova. Ovaj zaključak je opravdan jer integracijom solarnih elektrana koje lokalno napajaju potrošnju dolazi do rasterećenja vodova i samim tim do smanjenja gubitaka u mreži. Još jedan zaključak ove studije je da OIE mogu imati različit uticaj na naponske prilike u mreži. Ovo je direktna posledica da naponi u mreži dominantno zavise od reaktivne podrške u blizini potrošačkih centara.

ZAHVALNICA

Drugi autor zahvaljuje Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije koje je omogućilo izradu ovog rada u okviru Projekta III 42009 Inteligentne energetske mreže.

- [1] E. Commissie, "A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050," *Europese Commissie, Brussel*, 2011.
- [2] R. S. Committee, "Renewables 2013, Global Status Report," Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, Tech. Rep., 2013.
- [3] F. M. González-Longatt, "Impact of distributed generation over power losses on distribution system," in *9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization*, 2007.
- [4] L. F. Ochoa and G. P. Harrison, "Minimizing energy losses: Optimal accommodation and smart operation of renewable distributed generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 198-205, 2011.
- [5] K. Abookazemi, M. Hassan, and M. Majid, "A review on optimal placement methods of distribution generation sources," in *Power and Energy (PECon), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 712-716.
- [6] B. Borkowska, "Probabilistic load flow," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 752-759, 1974.
- [7] J. M. Sexauer and S. Mohagheghi, "Voltage quality assessment in a distribution system with distributed generation—A probabilistic load flow approach," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, pp. 1652-1662, 2013.
- [8] P. Jorgensen, J. Christensen, and J. Tande, "Probabilistic load flow calculation using Monte Carlo techniques for distribution network with wind turbines," in *Harmonics and Quality of Power Proceedings, 1998. Proceedings. 8th International Conference On*, 1998, pp. 1146-1151.
- [9] M. Hajian, W. D. Rosehart, and H. Zareipour, "Probabilistic power flow by Monte Carlo simulation with Latin supercube sampling," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 1550-1559, 2013.
- [10] R. Allan, A. L. Da Silva, and R. Burchett, "Evaluation methods and accuracy in probabilistic load flow solutions," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 2539-2546, 1981.
- [11] T. Williams and C. Crawford, "Probabilistic load flow modeling comparing maximum entropy and Gram-Charlier probability density function reconstructions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 272-280, 2013.
- [12] C.-L. Su, "Probabilistic load-flow computation using point estimate method," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 1843-1851, 2005.
- [13] N. Soleimanpour and M. Mohammadi, "Probabilistic load flow by using nonparametric density estimators," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 3747-3755, 2013.
- [14] Y. Atwa, E. El-Saadany, M. Salama, and R. Seethapathy, "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 360-370, 2010.
- [15] D. T.-C. Wang, L. F. Ochoa, and G. P. Harrison, "DG impact on investment deferral: Network planning and security of supply," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 1134-1141, 2010.

ABSTRACT

The increasing penetration of renewable energy sources (RES) has a great influence on the planning and operation of power systems. This paper defines a set of technical indexes that quantify impact of RES on the transmission network. These indexes measure the impact of renewable sources on losses of active and reactive power, voltage deviation and lines loadings and can be a useful tool for operator during the planning as well as during the exploitation of the power system. To properly estimate effect of the renewable power sources, it is necessary to take into account their stochastic nature. In this paper, it is included in the analysis through Monte Carlo simulations. Modelling and simulations were implemented in MATLAB and tested on standard 9-bus IEEE network.

**ANALYSIS OF THE IMPACT OF RENEWABLE
ENERGY SOURCES BY USING PROBABILISTIC
POWER FLOW**

Jelena Stojković, Jovan Mikulović