

# Uticaj distribuiranih izvora električne energije na naponsku stabilnost radialnih elektrodistributivnih mreža

Boško Mijatović  
Sektor za energetiku  
Institut za građevinarstvo "IG"  
Banja Luka, Bosna i Hercegovina  
[bosko@institutig.com](mailto:bosko@institutig.com), [bosko8@gmail.com](mailto:bosko8@gmail.com)

Čedomir Zeljković  
Elektrotehnički fakultet  
Univerzitet u Banjoj Luci  
Banja Luka, Bosna i Hercegovina  
[cedimir@etfbl.net](mailto:cedimir@etfbl.net)

**Sadržaj**—Naponska stabilnost radialne elektrodistributivne mreže je analizirana korištenjem softverskog alata PSAT. Odabrana je realna snaga i lokacija distribuiranog izvora u postojećoj mreži. Parametri izvora su sistematski varirani. Posmatran je i diskutovan uticaj izvora na mrežu.

**Ključne riječi**—naponska stabilnost; distribuirani izvori; radialna elektrodistributivna mreža

## I. UVOD

Naponska stabilnost predstavlja sposobnost sistema da napon u čvorovima održi stabilnim pri promjenama opterećenja, pri čemu ne dolazi do ispada generatora. Akcenat se uglavnom stavlja na potrošačke čvorove, pri čemu generatori rade sinhrono i elektromotorne sile generatora se smatraju konstantnim [1]. Nasuprot tome, naponski nestabilnim se smatra sistem kod kojeg može doći do naglih padova ili porasta napona u pojedinim čvorovima uslijed promjene opterećenja. Iz toga je vidljivo da je problem naponske stabilnosti lokalnog karaktera. Međutim, uslijed pada ili porasta napona u čvoru može doći do isključenja elemenata sistema (potrošnja, generatori, transformatori, vodovi) zbog prorade podnaponske ili nadnaponske zaštite. To će dovesti do daljeg pogoršanja naponskih prilika, što konačno može rezultovati padom sistema koji bez napajanja ostavlja velik broj potrošača [2].

Generalno, do naponske nestabilnosti dolazi zbog nedostatka reaktivne energije u sistemu. Najčešći povod nastanka naponske nestabilnosti kod prenosnih sistema je nepravilan rad naponskih regulatora, transformatora sa promjenom prenosnog odnosa pod opterećenjem (*on-load tap changer*), uređaja za kompenzaciju reaktivne energije, otočnih i rednih kapacitivnosti i reaktansi.

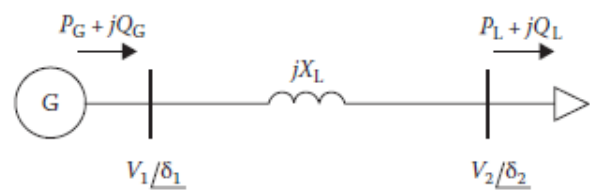
Iz gore navedenog vidljivo je da je potrebno obratiti posebnu pažnju na naponsku stabilnost elektroenergetskog sistema prilikom priključenja električnih izvora ili potrošača veće snage u elektroenergetski sistem.

## II. TEORIJSKE OSNOVE

U normalnom radnom stanju elektroenergetski sistem će na povećane potrebe za električnom energijom odgovoriti

povećanom proizvodnjom. Međutim, uslijed prenosa velikih količina električne energije dolazi do znatnih padova napona na vodovima, što ugrožava naponske prilike u potrošačkim čvorovima. Ovaj proces može ugroziti naponsku stabilnost sistema.

Na Sl. 1 prikazan je sistem sa dva čvora (potrošačkim čvorom i izvorom električne energije fiksnog napona), povezana prenosnim vodom.



Slika 1. Jednostavan elektroenergetski sistem sa dva čvora

Model tokova snaga sistema sa Sl. 1 može se opisati sistemom jednačina (1) [3]:

$$\begin{aligned} 0 &= P_L - \frac{V_1 V_2}{X_L} \sin \delta \\ 0 &= kP_L - \frac{V_2^2}{X_L} - \frac{V_1 V_2}{X_L} \cos \delta \\ 0 &= Q_G - \frac{V_1^2}{X_L} + \frac{V_1 V_2}{X_L} \cos \delta \end{aligned} \quad (1)$$

gdje je:

$$\delta = \delta_1 - \delta_2$$

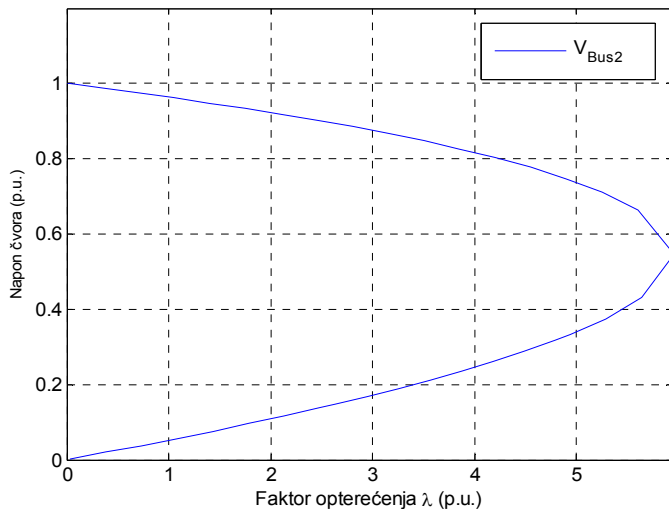
$$P_G = P_L \text{ (nema gubitaka na vodu)}$$

$$Q_L = kP_L \text{ (konstantan faktor snage opterećenja)}$$

Grafički prikazana rješenja navedenog sistema jednačina formiraju P-V dijagram kojim se opisuje odnos snage u potrošačkom čvoru i njegovog napona. P-V dijagram sistema sa Sl. 1 prikazan je na Sl. 2.

Osim P-V krive prikazane na Sl. 2 moguće je nacrtati i Q-V krivu na kojoj se prikazuje zavisnost napona u potrošačkom čvoru od reaktivne snage potrošača, kao i trodimenzionalni P-

Q-V grafik iz kojeg se može posmatrati naponska stabilnost radne tačke sistema sa proizvodnje snage i faktora snage. Ove krive neće biti predmet razmatranja u ovom radu.



Slika 2. P-V dijagram sistema sa Sl. 1. ( $\lambda$  predstavlja faktor opterećenja, skalarnu varijablu kojom se množe bazne snage generatora i potrošača)

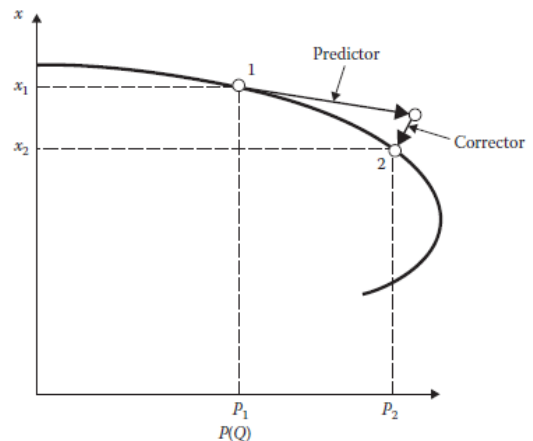
Normalna radna tačka sistema nalazi se na zaravnjenom gornjem dijelu krive. U ovom dijelu krive će povećanje snage potrošačkog čvora izazvati pad napona na istom. Smanjenjem snage potrošača i napon će se vratiti na prvobitnu vrijednost. Međutim, ukoliko snaga potrošača nastavi i dalje rasti doći će do naglog pada napona u potrošačkom čvoru. Ovo radno stanje odgovara tačkama bliskim „nosu“ P-V krive. Maksimalno opterećenje potrošača za koje je sistem stabilan odgovara vrijednosti opterećenja za koju Jakobijan sistema jednačina stanja postaje singularan. Nakon dostizanja nosa krive sistem postaje naponski nestabilan, pa napon može nastaviti da pada čak i nakon smanjenja snage potrošača.

Za povećanje snage iznad vrijednosti kod koje Jakobijan postaje singularan nije moguće izračunati radnu tačku klasičnim metodom bifurkacije (račvanja), pa se pribjegava korištenju *Continuation power flow* tehnike. Ova tehnika zasniva se na principu prediktor-korektor. Prediktor predstavlja tangenti vektor na P-V krivu u poznatoj tački koristeći predefinisane korake povećanja snage potrošača. Korekcionni korak zatim određuje tačno rješenje korištenjem *Newton-Raphson* metode na konvencijalni proračun tokova snaga. Proces se zatim nastavlja određivanjem novog prediktora i korektora do dostizanja kritične tačke (tačka u kojoj je dužina tangentskog vektora jednaka nuli). Ilustracija korištenja *Continuation power flow* tehnike prikazana je na Sl. 3.

#### A. Mjere za povećanje naponske stabilnosti

Direktne mjere za povećanje naponske stabilnosti obuhvataju uglavnom lokalno injektiranje reaktivne snage u najkritičnijim čvorovima sistema. Za proizvodnju reaktivne energije koriste se statički kompenzatori (u starijim sistemima za kompenzaciju korištene su natpobuđene sinhronne mašine u praznom hodu). Pored toga, u prenosnim sistemima koriste se i transformatori sa promjenom prenosnog odnosa pod

opterećenjem radi održavanja napona u elektroenergetskom sistemu što bliže nominalnom naponu.



Slika 3. Ilustracija korištenja *Continuation Power Flow* tehnike [3]

Indirektne mjere odnose se na destimulaciju potrošnje reaktivne energije, što povoljno utiče na ugradnju kompenzatora za lokalnu proizvodnju reaktivne energije kod industrijskih potrošača.

U novije vrijeme razvijene su numeričke metode za određivanje optimalnog položaja i kapaciteta izvora u cilju ekonomske eksploatacije elektroenergetskog sistema među kojima i *Artificial bee colony* metoda. Ova metoda punu primjenu može naći u određivanju optimalne lokacije i kapaciteta uređaja za kompenzaciju reaktivne snage, ali se u nekim radovima koristi i za određivanje optimalnog položaja i snage distribuiranih izvora energije [4]. Opravdanost primjene ovog algoritma biće diskutovana u nastavku rada.

### III. KORIŠTENA METODOLOGIJA

Za simulaciju naponske stabilnosti radijalne distributivne mreže sa i bez distribuiranog izvora električne energije korišten je softverski paket PSAT [5]. Ovaj program između ostalog omogućava:

- *Continuation Power Flow*,
- proračun optimalnih tokova snaga,
- analizu stabilnosti na male poremećaje,
- simulacije u vremenskom domenu.

Program funkcioniše kao *toolbox* u okruženju softverskog paketa *Matlab*. Program je besplatan, a naplaćuje se detaljno uputstvo za korištenje. Iz navedenog seta funkcija u ovom radu je korišten proračun optimalnih tokova snaga i proračun naponske stabilnosti korištenjem *Continuation Power Flow* tehnike. Parametri elektroenergetskog sistema unose se u obliku jednodolne šeme u za to predviđenom okruženju.

Prije početka simulacije potrebno je formirati model elektroenergetskog sistema čiji se rad simulira. U ovom radu razmatran je slučaj radijalne distributivne nadzemne mreže na koju se priključuje distribuirani izvor električne energije. Mreža se obavezno sastoji od čvora beskonačne snage i fiksnog napona, kojim se simulira elektroenergetski sistem. Unutar

modela moguće je koristiti transformatore, vodove, izvor i potrošače potrebne u simulaciji distributivne mreže. Za svaki od navedenih elemenata mreže definišu se radni parametri.

Prije početka simulacije naponske stabilnosti potrebno je izvršiti proračun optimalnih tokova snaga radi određivanja polaznih parametara za primjenu *Continuation Power Flow* tehnike.

Snage potrošača i izvora u opštem slučaju, uz zadržavanje predefinisanih smjerova snage potrošača i generatora, se definišu kao:

$$\begin{aligned} P_G &= (\lambda + \gamma k_G) P_{G_0} \\ P_L &= \lambda P_{L_0} \\ Q_L &= \lambda Q_{L_0} \end{aligned} \quad (2)$$

U jednačini (2)  $P_{G_0}$ ,  $P_{L_0}$  i  $Q_{L_0}$  su bazne snage generatora i opterećenja,  $\lambda$  faktor opterećenja, tj. skalarna varijabla kojom se množe bazne snage generatora i potrošača,  $k_G$  je varijabla distribuiranog balansnog čvora i  $\gamma$  težinski faktor učešća generatora u distributivnim gubicima. U slučaju modela sa jednim balansnim čvorom vrijedi  $\gamma = 0$  za sve generatore osim jednog, za koji je  $\gamma = 1$ .

U toku simulacije početne vrijednosti promjenjive  $\lambda$  imaju vrijednosti bliske nuli, zatim se snaga povećava do dostizanja nosa krive i ponovo smanjuje do vrijednosti bliske nuli u donjem dijelu krive.

Izlazni dijagrami crtaju se za proizvoljne dvije funkcije, od kojih se jedna izabere kao nezavisno promjenjiva. Tako je moguće posmatrati zavisnosti uglova ili napona u proizvoljnom čvoru od opterećenja, napona u jednom čvoru od napona u drugom čvoru i sl.

Reprezentativna slika rezultata proračuna naponske stabilnosti primjenom *Continuation Power Flow* tehnike za sistem sa Sl. 1 prikazana je na Sl. 2, u poglavlju II.

#### IV. OPIS RAZMATRANOG PROBLEMA

##### A. O radijalnim distributivnim mrežama

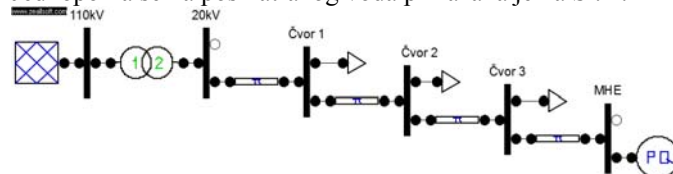
Radijalne distributivne elektroenergetske mreže su veoma zastupljene u slabo naseljenim područjima sa malim opterećenjima elektrodistributivnog sistema, uglavnom prigradskim i ruralnim. Karakteriše ih jednostrano napajanje, uglavnom nadzemni vodovi izvedeni golim Al/Fe provodnicima, velika dužina vodova i presjeci vodova najčešće do 50/8mm<sup>2</sup>. Iako ih odlikuje niska pouzdanost veoma su česte zbog niskih investicionih troškova.

Sa porastom svijesti o potrebi korištenja obnovljivih izvora električne energije i uvođenjem subvencionisanih otkupnih cijena električne energije proizvedene iz ovih izvora pojavilo se i interesovanje za iskorištenje hidroenergetskog potencijala manjih vodotoka. Pošto se hidroenergetski potencijal malih vodotoka uglavnom zasniva na znatnim visinskim razlikama između vodozahvata i mašinske zgrade (bruto pad hidroelektrane), jasno je da su postrojenja mini-hidro elektrana (MHE) uglavnom locirana u brdovitim predjelima. Prirodno

rješenje za plasman energije MHE male snage (najčešće do 1MVA) u elektroenergetski sistem predstavlja priključenje na elektrodistributivnu mrežu koja je u brdskim predjelima uglavnom radijalna.

##### B. Opis sistema

Za potrebe analize uticaja distribuiranog elektroenergetskog izvora na naponsku stabilnost radijalne distributivne mreže razmatran je realan problem priključenja mini hidro elektrane na dug, slabo opterećen radijalni vod malog presjeka. Kao reprezentativan primjer odabrano je priključenje MHE snage 200kW (250kVA) na postojeću elektrodistributivnu mrežu. Naziv MHE i lokacija priključenja neće biti specificirani, pošto za to ne postoji saglasnost vlasnika. Predmetni radijalni vod sastoji se od više dionica različitog presjeka provodnika. Otcjepi voda označeni su kao koncentrisana potrošnja u čvorovima, čija snaga odgovara snazi otcjepnog voda. 110kV mreža na koju je priključen predmetni vod u TS 110/20kV smatra se krutom tačkom elektroenergetskog sistema. Jednopolna šema posmatranog voda prikazana je na Sl. 4.



Slika 4. Jednopolna šema modela za simulaciju

##### C. Ulazni podaci za proračun

Parametri transformatora preuzeti su iz baze podataka softverskog paketa, za realnu snagu transformatora preuzetu iz [6]. Otpor transformatora i njegova reaktansa pri baznoj snazi od 100MVA i naponu 110kV iznose 0.01(p.u.) i 0.2(p.u.), respektivno.

Parametri distributivnog voda računati su za tipove provodnika Al/Fe 50/8mm<sup>2</sup>, 35/6 mm<sup>2</sup> i 25/4 mm<sup>2</sup>. Podužni parametri voda korišteni u proračunima iznose:

$$\begin{aligned} L &= 1.31795 \cdot 10^{-6} \text{ H / m}, C_v \approx 24 \cdot 10^{-12} [F / m] \text{ za sekciju TS } 110/20\text{kV} - \text{čvor 1 (Al/Fe } 50/8\text{mm}^2), \\ L &= 1.35193 \cdot 10^{-6} \text{ H / m}, C_v \approx 23.19 \cdot 10^{-12} [F / m] \text{ za sekciju } \\ &\text{čvor 1 - čvor 2 (Al/Fe } 35/6\text{mm}^2), \\ L &= 1.38692 \cdot 10^{-6} \text{ H / m}, C_v \approx 22.59 \cdot 10^{-12} [F / m] \text{ za sekciju } \\ &\text{čvor 2 - čvor 3 - MHE (Al/Fe } 25/4\text{mm}^2). \end{aligned}$$

Ukupno opterećenje radijalnog SN voda korišteno u simulaciji je uobičajeno radno opterećenje predmetnog voda posmatrano na izlazu TS 110/20kV. Opterećenje u čvorovima posmatranog sistema procijenjeno je na osnovu broja trafo polja i gustine naseljenosti područja. Za sve potrošače je pretpostavljeno da imaju PQ karakteristiku sa fiksnim faktorom snage  $\cos\phi=0.95$ .

Za MHE je pretpostavljeno da radi u PQ režimu sa faktorom snage podesivim unutar definisanih granica, što je najčešći uslov za upravljanje radom MHE. Uobičajeno je da se u MHE proizvodi maksimalan iznos aktivne snage (u skladu sa raspoloživim hidroenergetskim potencijalom), a faktor

snage se podešava tako da prividna snaga generatora ne prelazi fabrički deklarisanu vrijednost. Uslovima za priključenje uglavnom se definiše rad MHE na naponu mreže, tj. ne dozvoljava se da MHE dikтира napon elektrodistributivne mreže. Ovo isključuje mogućnost rada MHE u PV režimu.

#### D. Simulacija uticaja MHE na naponsku stabilnost

Iako je objavljen relativno veliki broj radova u kojima se diskutuje problem naponske stabilnosti elektrodistributivnih mreža, kao i radova u kojima se razmatra problem priključenja distribuiranih izvora električne energije na elektrodistributivnu mrežu, oni uglavnom ne nude odgovor na kompleksan problem analize naponske stabilnosti u radialnoj distributivnoj mreži sa distribuiranim generatorima. Problem povećanja naponske stabilnosti uglavnom se posmatra u svjetlu optimalnog pozicioniranja uređaja za kompenzaciju reaktivne snage [3], ali postoje pokušaji da se po istom principu pronađu i optimalne lokacije i kapaciteti distribuiranih generatora [4]. Pri tome se zanemaruje činjenica da se male elektrane grade na mjestima na kojima je obezbijeden neki od vidova energije pogodnih za konverziju u električnu energiju. Tako je moguće mini-hidro elektranu graditi samo na mjestima koja raspolažu hidroenergetskim potencijalom, vjetroelektranu na vjetrovitim lokacijama, a solarnu elektranu na lokacijama koje imaju veliku insolaciju i omogućavaju postavljanje solarnih panela (krovovi industrijskih objekata i sl). Uzimajući u obzir i potrebu da se izvori što ekonomičnije priključe na elektrodistributivnu mrežu u najbližoj tački, dolazi se do zaključka da je korištenje numeričkih metoda optimalnog pozicioniranja izvora bez uvažavanja tehničkih uslova bespredmetno. Iz navedenih razloga u ovom radu se pristupilo realnom pozicioniranju distribuiranog izvora u elektrodistributivnoj mreži.

Početa simulacija izvršena je za distributivnu mrežu bez distribuiranog izvora. Rezultati ove simulacije korišteni su kao polazna tačka kod vrednovanja uticaja MHE na naponsku stabilnost distributivne mreže.

Simulacije uticaja MHE na naponsku stabilnost radialne elektrodistributivne mreže vršene su za više vrijednosti faktora snage MHE, od  $\cos\varphi=0.8_{\text{ind}}$  do  $\cos\varphi=0.95_{\text{cap}}$ , uz poštivanje uslova  $S \leq S_{\text{max}}$ . Podaci o aktivnoj i reaktivnoj snazi potrošača, kao i posmatrane MHE prikazani su u okviru poglavlja sa rezultatima proračuna, za svaki analizirani slučaj. Analiziran je uticaj MHE na naponsku stabilnost. Na osnovu rezultata simulacija izrađen je dijagram osjetljivosti naponske stabilnosti radialne elektrodistributivne mreže na rad MHE kao distribuiranog izvora energije pri različitim vrijednostima faktora snage, unutar propisanih granica.

U sklopu poglavlja V.D. izvršena je analiza uticaja snage distribuiranog izvora električne energije na naponsku stabilnost radialne elektrodistributivne mreže. Iako određivanje snage distribuiranog izvora na osnovu naponske stabilnosti elektrodistributivne mreže nema praktični značaj, podaci dobijeni ovom analizom značajni su sa aspekta sagledavanja uticaja distribuiranih izvora različite snage na naponsku stabilnost mreže.

Konačan osvrt na rezultate simulacije dat je u poglavlju V.E.

## V. REZULTATI I DISKUSIJA

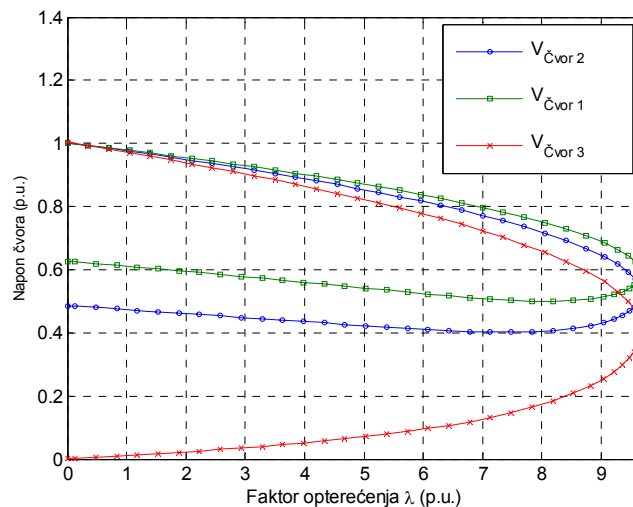
### A. Rezultati simulacija za mrežu prije priključenja distribuiranog izvora

Početa simulacija izvršena je za distributivnu mrežu bez distribuiranog izvora. P-V dijagrami crtani su za čvorove 1, 2 i 3. Snaga u čvorovima za odabran faktor snage prikazana je u tabeli I:

TABELA I. SNAGE U ČVOROVIMA MREŽE BEZ DISTRIBUIRANOG IZVORA

Faktor snage potrošnje: $\cos\varphi=0.95_{\text{ind}}$			
Snaga	Čvor 1	Čvor 2	Čvor 3
P [MW]	0.4	0.1	0.1
Q [MVar]	0.13	0.03	0.03
S [MVA]	0.42	0.11	0.11

P-V krive naponske stabilnosti u odabranim čvorovima distributivne mreže su prikazani na sledećoj slici:



Slika 5. P-V krive za čvorove radialne mreže bez DG

Nos krive na Sl. 5 dostiže se za faktor opterećenja 9.6811. U simulaciji baznog slučaja nije uključena snaga generisanja MHE. Može se primjetiti da P-V kriva ima pravilan oblik za najudaljeniji čvor 3. Za „jače“ čvorove je vidljiv porast napona pri opadanju snage potrošnje i u donjem dijelu krive, pa kod ovih čvorova ne dolazi do klasične naponske nestabilnosti.

### B. Rezultati simulacija za mrežu sa distribuiranim generatorom

Rezultati simulacija uticaja MHE na naponsku stabilnost elektrodistributivne mreže za više vrijednosti faktora snage MHE prikazani su u nastavku. Izrađeni su dijagrami zavisnosti napona u karakterističnim čvorovima od opterećenja (P-V dijagrami).

Simulacija je izvršena za konstantan faktor snage potrošača  $\cos\varphi=0.95_{\text{ind}}$  i za vrijednosti faktora snage MHE od najnižeg ograničenog prividnom snagom generatora  $\cos\varphi=0.8$  (pretpostavlja se da elektrana radi punom aktivnom snagom, jednakom instalisanjoj snazi elektrane) do najnižeg dozvoljenog kapacitivnog faktora snage generatora od  $\cos\varphi=0.95_{\text{cap}}$ , u skladu sa [7] (podrazumijeva se smijer snage



od izvora, pa kapacitivni faktor snage izvora odgovara induktivnom faktoru snage potrošača). Pozitivan znak snage označava potrošnju kod potrošača i generisanje kod izvora. Negativan znak snage kod izvora označava potrošnju (režim potrošača).

Karakteristike potrošnje i generisanja energije za koje su vršene simulacije su prikazane uz odgovarajući grafički prikaz rezultata simulacija. Parametri korišteni za procjenu uticaja MHE na naponsku stabilnost mreže su vrijednost maksimalnog faktora opterećenja, povećanje granice stabilnosti u odnosu na slučaj V.A., povećanje maksimalne snage opterećenja i faktor doprinosa snage izvora. Kao faktor doprinosa snage izvora označen je odnos povećanja kapaciteta distributivne mreže i prividne snage injektiranja.

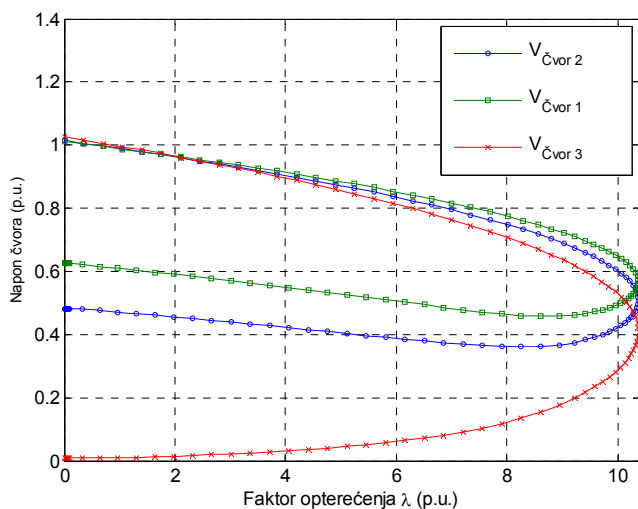
U nastavku su prikazane P-V krive za dva granična faktora snage generatora,  $\cos\varphi=0.8_{ind}$  i  $\cos\varphi=0.95_{cap}$ . Za ostale faktore snage dati su rezultati simulacije u okviru poglavlja V.C.

1) *Grafici za faktor snage potrošnje  $\cos\varphi=0.95_{ind}$  i generisanja  $\cos\varphi=0.8_{ind}$*

Snaga u čvorovima za odabran faktor snage prikazana je u tabeli II:

TABELA II. SNAGE U ČVOROVIMA MREŽE UZ FAKTOR SNAGE IZVORA  $\cos\varphi=0.8_{ind}$

Faktor snage potrošnje: $\cos\varphi=0.95_{ind}$				
Faktor snage izvora: $\cos\varphi=0.8_{ind}$				
Snaga	Čvor 1	Čvor 2	Čvor 3	MHE
P [MW]	0.4	0.1	0.1	0.2
Q [MVA <sub>r</sub> ]	0.13	0.03	0.03	0.15
S [MVA]	0.42	0.11	0.11	0.25



Slika 6. P-V kriva za faktor snage potrošnje  $\cos\varphi=0.95_{ind}$  i generisanja  $\cos\varphi=0.8_{ind}$

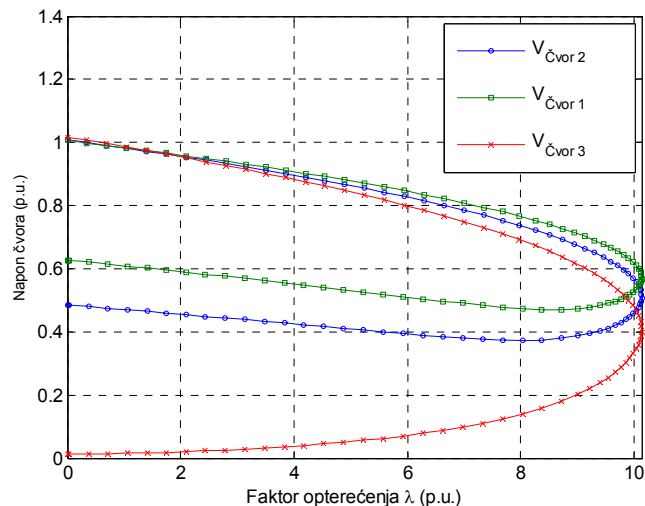
Rezultati simulacije prikazani su u tabeli IV.

2) *Grafici za faktor snage potrošnje  $\cos\varphi=0.95_{ind}$  i generisanja  $\cos\varphi=0.95_{cap}$*

Snaga u čvorovima za odabran faktor snage prikazana je u tabeli III:

TABELA III. SNAGE U ČVOROVIMA MREŽE UZ FAKTOR SNAGE IZVORA  $\cos\varphi=0.95_{cap}$

Potrošači: $\cos\varphi=0.95_{ind}$				
MHE: $\cos\varphi=0.95_{cap}$				
Snaga	Čvor 1	Čvor 2	Čvor 3	MHE
P [MW]	0.4	0.1	0.1	0.2
Q [MVA <sub>r</sub> ]	0.13	0.03	0.03	-0.07
S [MVA]	0.42	0.11	0.11	0.211



Slika 7. PV kriva za faktor snage potrošnje  $\cos\varphi=0.95_{ind}$  i generisanja  $\cos\varphi=0.95_{cap}$

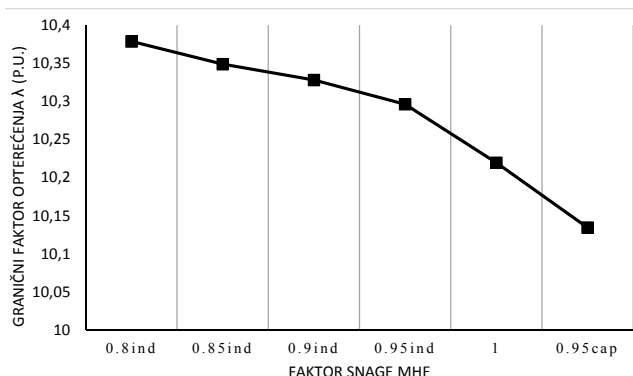
Rezultati simulacije prikazani su u tabeli IV.

### C. Analiza uticaja faktora snage distribuiranog izvora na naponsku stabilnost

U okviru ovog poglavlja analiziran je uticaj faktora snage distribuiranog izvora na naponsku stabilnost radijalne elektrodistributivne mreže. Dat je tabelarni prikaz rezultata simulacija za više vrijednosti faktora snage izvora između  $\cos\varphi=0.8_{ind}$  i  $\cos\varphi=0.95_{cap}$ . Za rezultate navedene u tabeli izrađen je dijagram zavisnosti graničnog faktora opterećenja od faktora snage distribuiranog izvora.

TABELA IV. UTICAJ FAKTORA SNAGE DISTRIBUIRANOG IZVORA NA NAPONSKU STABILNOST RADIJALNE DISTRIBUTIVNE MREŽE

Faktor snage MHE ( $\cos\varphi$ )	Granični faktor opterećenja ( $\lambda$ )	Porast faktora opterećenja	Povećanje kapaciteta voda (MVA)	Faktor doprinosa snage izvora
0.8 <sub>ind</sub>	10,3786	0,6975	0,446	1,786
0.85 <sub>ind</sub>	10,3488	0,6677	0,427	1,816
0.9 <sub>ind</sub>	10,3282	0,6471	0,414	1,864
0.95 <sub>ind</sub>	10,2963	0,6152	0,394	1,870
1	10,2196	0,5385	0,345	1,723
0.95 <sub>cap</sub>	10,1342	0,4531	0,290	1,377



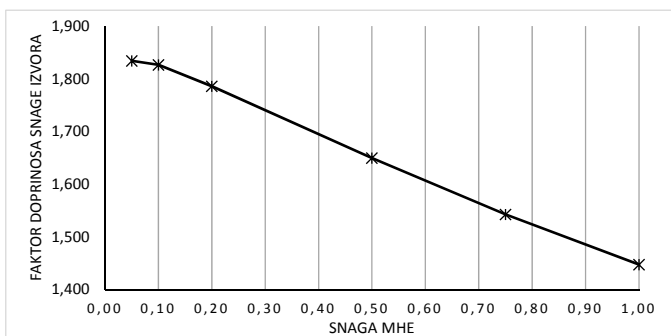
Slika 8. Dijagram zavisnosti graničnog faktora opterećenja od faktora snage distribuiranog izvora

#### D. Analiza uticaja snage distribuiranog izvora na naponsku stabilnost

U okviru ovog poglavlja analiziran je uticaj snage distribuiranog izvora na naponsku stabilnost radijalne elektrodistributivne mreže. Dat je tabelarni prikaz rezultata simulacija za različite aktivne snage injektiranja, pretpostavljajući faktor snage izvora  $\cos\phi=0.8_{ind}$ .

TABELA V. UTICAJ SNAGE DISTRIBUIRANOG IZVORA NA NAPONSKU STABILNOST RADIJALNE DISTRIBUTIVNE MREŽE

Snaga MHE (MW)	Granični faktor opterećenja ( $\lambda$ )	Porast faktora opterećenja	Povećanje kapaciteta voda (MVA)	Faktor doprinosa snage izvora
0,05	9,8602	0,1791	0,115	1,834
0,20	10,3786	0,6975	0,446	1,786
0,50	11,292	1,6109	1,031	1,650
0,75	11,9406	2,2595	1,446	1,542
1,00	12,5076	2,8265	1,809	1,447



Slika 9. Dijagram zavisnosti graničnog faktora opterećenja od snage distribuiranog izvora

#### E. Diskusija rezultata

Rezultati simulacija prikazani u prethodnim poglavljima pokazuju pozitivan uticaj rada MHE na naponsku stabilnost priključnog voda. Uticaj se kvantifikuje kroz povećanje maksimalnog faktora opterećenja do dostizanja nosa P-V krive. Krive su prikazane uporedo za tri karakteristična čvora radijalnog elektrodistributivnog voda, za granične vrijednosti faktora snage distribuiranog izvora. Radi preglednosti i dublje analize u tabeli IV su prikazane vrijednosti nekoliko faktora

kojima se može mjeriti efekat rada distribuiranog izvora u radijalnoj elektrodistributivnoj mreži.

Na osnovu rezultata simulacija izvršena je analiza uticaja distribuiranog izvora električne energije na elektrodistributivnu mrežu. Prikazan je tabelarno i grafički uticaj MHE za različite radne režime, unutar propisanih granica. Sa Sl. 8 može se primjetiti približno linearan porast graničnog faktora opterećenja mreže sa porastom injektiranja reaktivne snage (opadanjem faktora snage izvora).

Rezultati simulacija izvedenih u sklopu poglavlja V.D. pokazuju da faktor doprinosa snage izvora opada približno linearno sa povećanjem snage injektiranja, u opsegu snage izvora koja omogućava povezivanje na radijalnu elektrodistributivnu mrežu, što pokazuje da je sa aspekta povećanja naponske stabilnosti povoljnije priključenje većeg broja malih distribuiranih izvora.

## VI. ZAKLJUČAK

U radu je analiziran uticaj distribuiranog generatora na naponsku stabilnost radijalne elektrodistributivne mreže, na primjeru realnog izvora priključenog na kraju radijalnog slabo opterećenog voda malog presjeka provodnika. Izvršen je proračun parametara realnog voda kako bi dobijeni rezultati što više odgovarali realnim uslovima eksploatacije. Analizom naponske stabilnosti za različite režime rada izvora, variranjem snage izvora i njegovog faktora snage došlo se do zaključka da distribuirani izvor električne energije povoljno utiče na naponsku stabilnost radijalne elektrodistributivne mreže u svim režimima rada.

## LITERATURA

- [1] Milenko Đurić, Modeli za analizu stabilnosti elektroenergetskih sistema, Beopres, 2001;
- [2] M. Zerva, Voltage Stability Assessment of the Swiss Power Transmission System, Master Thesis: EEH – Power Systems Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, 2010.
- [3] L. L. Grigsby, Power system stability and control, 3rd ed.: Taylor and Francis group LLC, 2012;
- [4] G.V.K Murthy, S. Sivanagaraju, S. Satyanarayana, B. Hanumantha Rao, Voltage Stability Analysis of Radial Distribution Networks with Distributed Generation, International Journal on Electrical Engineering and Informatics – Volume 6, Number 1, March 2014
- [5] The Power System Analysis Toolbox (PSAT); besplatan download na <http://faraday1.ucd.ie/psat.html>
- [6] Proizvodni kapaciteti prijavljeni za Indikativni plan proizvodnje 2015-2024, NOS BiH, [http://www.nosbih.ba/docs/PRILOG\\_IPRP\\_2015-2024.pdf](http://www.nosbih.ba/docs/PRILOG_IPRP_2015-2024.pdf)
- [7] Pravilnik o priključenju malih elektrana na mrežu elektrodistribucije Republike Srpske; MH „Elektroprivreda Republike Srpske“, Mart 2009.

## ABSTRACT

Voltage stability of radial distribution network was assessed using a free software toolbox. Realistic capacity and location of generator in existing network was selected. Parameters of generator are systematically varied. Influence of generator was observed and discussed.

## INFLUENCE OF DISTRIBUTED GENERATOR ON VOLTAGE STABILITY OF RADIAL DISTRIBUTION NETWORKS

Boško Mijatović, Čedomir Zeljković

