

Određivanje optimalne lokacije i snage solarne elektrane u cilju poboljšanja naponske stabilnosti

Doroteja Zarev*, Jelena Stojković Terzić**, Jovan Trifunović*

*Katedra za energetske pretvarače i pogone, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd, Republika Srbija

**Katedra za elektroenergetske sisteme, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd, Republika Srbija

Rezime - U radu se razmatra problem određivanja optimalne lokacije i snage solarnih elektrana u distributivnim mrežama, sa ciljem poboljšanja naponske stabilnosti. Na standardnoj IEEE mreži sa 69 čvorova analizirani su ključni pokazatelji u vezi sa naponskom stabilnošću, uključujući indeks predikcije naponskog kolapsa, dok su gubici snage takođe uzeti u obzir prilikom definisanja optimalne snage solarne elektrane. Sve veća primena distribuiranih izvora energije naglašava značaj pravilnog dimenzionisanja i pozicioniranja ovih izvora, jer neadekvatno postavljene solarne elektrane ili solarne elektrane prevelike snage mogu dovesti do porasta napona, povratnih tokova snage i degradacije performansi sistema. Svrha analize je da se utvrdi kako solarne elektrane, koje se potencijalno priključuju na mrežu, utiču na naponsku stabilnost u distributivnim mrežama sa ograničenim kapacitetom za integraciju obnovljivih izvora energije. Ova pitanja su posebno značajna u situacijama kada je instalisana snaga solarnih elektrana, koje čekaju odluku o priključenju, veća od prihvatnog kapaciteta posmatranog dela distributivne mreže, čime se postavlja pitanje prioriteta priključenja.

Ključne reči - naponska stabilnost, optimalna lokacija, solarna elektrana, distributivna mreža, priključenje na mrežu

1 UVOD

Već decenijama svet se suočava sa ubrzanim porastom broja stanovnika, razvojem industrije i napretkom novih tehnologija, što rezultira konstantnim povećanjem potrošnje električne energije [1]. Ovaj trend dovodi do povećanja gubitaka u prenosu energije, smanjenja naponskih nivoa i nestabilnosti napona u elektroenergetskim sistemima. Kako bi se navedeni problemi ublažili i zadovoljila rastuća potražnja za energijom, sve više se koriste distribuirani izvori električne energije. Distribuirani izvori, koji se postavljaju bliže potrošnji, ne samo da smanjuju gubitke u prenosu i distribuciji, već i mogu da pomognu u stabilizaciji napona u elektroenergetskim mrežama [2, 3]. Za razliku od tradicionalnih elektroenergetskih sistema, zasnovanih na centralizovanoj proizvodnji i distribuiranoj potrošnji u okviru pasivnih mreža, savremeni sistemi sve češće uključuju distribuirane izvore napajanja. Među njima, obnovljivi izvori energije (OIE) zauzimaju ključno mesto, prvenstveno zbog negativnog uticaja sagorevanja fosilnih goriva na životnu sredinu i sve izraženijeg globalnog trenda dekarbonizacije i energetske tranzicije [4]. Sagorevanje fosilnih goriva oslobađa velike količine ugljen-dioksida i drugih gasova sa efektom staklene

bašte, što doprinosi klimatskim promenama i ubrzava globalno zagrevanje. Pored toga, fosilna goriva predstavljaju neobnovljive resurse, čije iscrpljivanje nosi ozbiljne rizike za energetske bezbednost. Kako bi se smanjila zavisnost od fosilnih goriva i emisija štetnih gasova, sve veći broj država investira u izgradnju elektrana koje koriste OIE, uključujući energiju vetra, vode, sunca i biomase. Ovi izvori, osim što smanjuju zagađenje životne sredine, doprinose i dugoročnoj održivosti i energetske sigurnosti ukoliko se koriste na ispravan način [5].

Integracija distribuiranih izvora proizvodnje električne energije u elektrodistributivne mreže postavlja niz tehničkih izazova [6], posebno u pogledu stabilnosti napona i gubitaka aktivne snage. Kako bi se osigurala njihova pouzdana i efikasna integracija u elektrodistributivnu mrežu, ključno je analizirati njihov uticaj na različite veličine u sistemu, uz identifikaciju optimalne instalisane snage i optimalne lokacije za njihovo priključenje.

U ovom radu razmatrano je priključenje solarne elektrane kao jednog od najzastupljenijih oblika distribuirane proizvodnje električne energije. Fokus sprovedene i prikazane analize predstavlja određivanje optimalne lokacije i instalisane snage solarne elektrane, pri čemu su ključni parametri na osnovu kojih su doneti zaključci obuhvatali stabilnost napona u čvorovima mreže i gubitke aktivne snage. Numeričke simulacije sprovedene su na standardnom modelu IEEE distributivne mreže sa 69 čvora, omogućavajući preciznu procenu uticaja različitih scenarija priključenja.

II IZBOR I PRIMENA INDEKSA NAPONSKE STABILNOSTI U ANALIZI SISTEMA

Naponska nestabilnost predstavlja jedan od čestih uzroka velikih raspada u elektroenergetskim sistemima širom sveta [7]. Pojam naponskog kolapsa, neretko korišćen kao sinonim za naponsku nestabilnost, označava sled događaja koji prate ovu pojavu, dovodeći do veoma niskog, neprihvatljivog nivoa napona ili čak do potpunog ispada delova sistema.

Jedan od ključnih alata za analizu i prevenciju navedenih pojava su indeksi naponske stabilnosti (*eng. – voltage stability indices (VSI)*). Ti indeksi omogućavaju identifikaciju slabih vodova i čvorova u elektroenergetskim sistemima, tj. vodovi ili čvorovi sa vrednostima indeksa naponske stabilnosti najbližim kritičnim vrednostima, mogu se označiti kao najslabiji elementi sistema. Analiza elektroenergetskih sistema primenom naponskih indeksa igra ključnu ulogu u različitim procesima, kao što su određivanje lokacije i veličine jedinica distribuirane proizvodnje [8, 9],

alokacija skladišta električne energije i planiranje razvoja elektroenergetskih sistema.

Postoji više načina za klasifikaciju indeksa naponske stabilnosti. Za ovaj rad, od interesa je sledeća podela [10]:

- linijski indeksi naponske stabilnosti – analiza stabilnosti napona može se oceniti korišćenjem indeksa stabilnosti napona koji se odnosi na vod između dva čvora. Svi linijski indeksi stabilnosti su izvedeni na osnovu modela mreže sa dva čvora, pri čemu se zanemaruju otočne admitanse; teorijska osnova većine linijskih naponskih indeksa je ista, a razlike se javljaju u veličinama koje figurišu u proračunima, kao i uvedenim zanemarenjima; kako bi se obezbedila stabilnost sistema, u analizi većine linijskih indeksa stabilnosti napona, diskriminanta kvadratne jednačine za napon postavlja se na vrednost veću ili jednaku nuli;
- naponski indeksi stabilnosti u čvorovima – određuju stabilnost napona u čvorovima sistema, ali ne pružaju nikakve informacije o slabim elementima elektroenergetskih sistema (poput vodova, transformatora, itd);
- sveobuhvatni indeksi naponske stabilnosti – ovaj tip naponskih indeksa stabilnosti nije u vezi sa čvorovima i vodovima sistema; stoga, sveobuhvatni naponski indeksi ne mogu odrediti najslabiji čvor ili vod koji povezuje dva čvora, već mogu samo predvideti radni režim, odnosno radnu tačku u kojoj će sistem doživeti kolaps.



Slika 1. Poređenje preciznosti i jednostavnosti različitih tipova indeksa naponske stabilnosti [10]

Različite vrste indeksa pružaju različite informacije o sistemu koji se analizira i odabir koeficijenta na osnovu koga će se ispitivati stabilnost napona zavisi od vrste sistema. Jedan od najbitnijih aspekata pri odabiru koeficijenta naponske stabilnosti jeste vrsta sistema koji se posmatra – distributivni ili prenosni sistem. Načini na koje se određeni indeksi računaju, kao i zanemarenja koja se tom prilikom uvode, nameću ograničenja po pitanju njihove upotrebe prilikom analize sistema. Takođe, ukoliko se planira razvoj elektroenergetskog sistema, brzina proračuna indeksa naponske stabilnosti nije od značaja. Sa druge strane, ako se u sistemu vrši upravljanje u realnom vremenu, brzina proračuna je presudna. Dakle, izbor koeficijenata naponske stabilnosti zavisi od vrste sistema, kao i od svrhe korišćenja dobijenih rezultata. Na Slici 1. za različite vrste indeksa prikazano je poređenje preciznosti i složenosti proračuna naponskih koeficijenata. Može se zaključiti da sveobuhvatni indeksi stabilnosti napona generalno pružaju veću tačnost u analizi stabilnosti sistema u poređenju sa indeksima stabilnosti napona čvorova i vodova. Međutim, njihova primena zahteva

složenije algoritme i značajno veće računarske resurse. Nasuprot tome, indeksi stabilnosti napona za čvorove i linije karakterišu se jednostavnijom implementacijom, ali nižim nivoom tačnosti. Ipak, ovi indeksi omogućavaju identifikaciju kritičnih čvorova i elemenata u sistemu, čime pružaju značajne informacije u procesu analize i unapređenja mreže.

U ovom radu, za analizu IEEE 69 distributivne mreže, korišćeni su indeks predikcije naponskog kolapsa ($VCPI_{bus}$), koji pripada grupi indeksa naponske stabilnosti u čvorovima, i indeks stabilnosti snage (PSI), koji spada u grupu linijskih indeksa stabilnosti napona. Upoređeni su rezultati dobijeni primenom ovih metoda kako bi se analizirala njihova međusobna korelacija i pouzdanost u oceni stabilnosti sistema.

III INDEKS PREDIKCIJE NAPONSKOG KOLAPSA ($VCPI_{bus}$) [11]

Indeks predikcije naponskog kolapsa $VCPI_{bus}$ izveden je iz osnovne jednačine toka snage, a njegova vrednost varira između 0 i 1. Kada vrednost $VCPI$ indeksa za određeni čvor dostigne 1, to ukazuje na kolaps napona u čvoru za koji je izvršen proračun. Ova metoda za određivanje naponske stabilnosti može se koristiti u sistemima sa bilo kojim brojem čvorova. Za njenu upotrebu neophodno je raspolagati informacijama o fazorima napona u relevantnim čvorovima sistema, kao i matricom admitanse mreže. Na osnovu izmerenih fazora napona i matrice admitanse, izračunava se indeks predikcije naponskog kolapsa ($VCPI$) za svaki čvor. Vrednosti ovih indeksa pružaju uvid u verovatnoću naponskog kolapsa u posmatranim čvorovima sistema.

U nastavku je dato detaljno matematičko izvođenje koje prikazuje na koji način se dolazi do krajnjeg izraza za indeks predikcije naponskog kolapsa koji se koristi u proračunima.

U sistemu od N čvorova kompleksna vrednost struje I_k koja se injektira u k -ti čvor data je jednačinom:

$$I_k = V_k \cdot \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N Y_{km} - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m \cdot Y_{km}, \quad (1)$$

gde su:

Y_{km} – admitansa između k -tog i m -tog čvora,

V_k – napon u k -tom čvoru, i

V_m – napon u m -tom čvoru.

Kompleksna snaga S_k koja se injektira u k -ti čvor jednaka je:

$$S_k = V_k \cdot I_k^*. \quad (2)$$

Zamenom (2) u (1) dobija se:

$$S_k^* = |V_k|^2 \cdot \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N Y_{km} - V_k^* \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m \cdot Y_{km}. \quad (3)$$

Ukoliko se uvede zamena: (4), jednačina (3) postaje jednačina (5):

$$Y_{kk} = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N Y_{km}, \quad (4)$$

$$S_k^* = |V_k|^2 \cdot Y_{kk} - V_k^* \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N V_m' \cdot Y_{kk}. \quad (5)$$

gde je V_m' (6) zamena uvedena radi pojednostavljenja izraza.

$$V_m' = \frac{Y_{km}}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N Y_{kj}} \cdot V_m = |V_m| \angle \delta_m'. \quad (6)$$

Veličina δ_m' predstavlja ugao napona V_m' .

Deljenjem jednačine (5) sa Y_{kk} dobija se:

$$\frac{S_k^*}{Y_{kk}} = |V_k|^2 - V_k^* \sum_{m \neq k}^N V_m' \quad (7)$$

Jednačina (7) se može napisati kao:

$$\frac{S_k^*}{Y_{kk}} = |V_k|^2 - (|V_k| \cos \delta_k - j \cdot |V_k| \sin \delta_k) \cdot \left[\sum_{m \neq k}^N (|V_m'| \cos \delta_m' + j |V_m'| \sin \delta_m') \right] \quad (8)$$

gde je δ_k ugao napona V_k .

Razdvajanjem jednačine (8) na realan i imaginaran deo, dobija se (9 – 13):

$$\frac{S_k^*}{Y_{kk}} = |V_k|^2 - \left(\sum_{m \neq k}^N |V_m'| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_m') \right) + j \left(\sum_{m \neq k}^N |V_m'| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_m') \right), \quad (9)$$

$$\frac{S_k^*}{Y_{kk}} = a - jb \quad (10)$$

$$a - jb = |V_k|^2 - \left(\sum_{m \neq k}^N |V_m'| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_m') \right) + j \left(\sum_{m \neq k}^N |V_m'| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_m') \right), \quad (11)$$

$$a = |V_k|^2 - \left(\sum_{m \neq k}^N |V_m'| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_m') \right), \quad (12)$$

$$b = \sum_{m \neq k}^N |V_m'| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_m'). \quad (13)$$

Neka je:

$$\delta_k - \delta_m' = \delta. \quad (14)$$

Jednačine (12) i (13) predstavljaju dve jednačine sa dve nepoznate V_k i δ . Neka je:

$$f_1(|V_k|, \delta) = |V_k|^2 - \left(\sum_{m \neq k}^N |V_m'| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_m') \right), \quad (15)$$

$$f_2(|V_k|, \delta) = \sum_{m \neq k}^N |V_m'| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_m'). \quad (16)$$

Kako bi se jednačine (15) i (16) rešile po nepoznatima V_k i δ , neophodno je formirati matricu parcijalnih izvoda:

$$J = \begin{pmatrix} 2|V_k| - \sum_{m \neq k}^N |V_m'| \cos \delta & |V_k| \sum_{m \neq k}^N |V_m'| \sin \delta \\ \sum_{m \neq k}^N |V_m'| \sin \delta & |V_k| \sum_{m \neq k}^N |V_m'| \cos \delta \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Kolaps napona u k-tom čvoru znači da za matricu (17) ne postoji rešenje. To implicira da je njena determinanta jednaka nuli. Drugim rečima, matrica postaje singularna u trenutku kolapsa napona. Rešavanjem navedene matrice i njenim izjednačavanjem sa nulom dolazi se do sledećeg izraza:

$$\frac{|V_k| \cos \delta}{\sum_{m \neq k}^N |V_m'|} = \frac{1}{2}. \quad (18)$$

Jednačina (18) može se napisati kao:

$$\frac{V_k}{\sum_{m \neq k}^N V_m'} = \frac{1}{2} + jk, \quad (19)$$

gde je k realna konstanta.

Jednačina (19) se, koristeći svojstva kompleksnih brojeva, može zapisati u sledećem obliku:

$$\left| 1 - \frac{\sum_{m \neq k}^N V_m'}{V_k} \right| = 1. \quad (20)$$

Dakle, u ovom slučaju se dogodio kolaps napona u posmatranom čvoru. U opštem slučaju, kada nema kolapsa napona u čvoru od interesa, jednačina (20) ima oblik:

$$\left| 1 - \frac{\sum_{m \neq k}^N V_m'}{V_k} \right| = VCPI_{bus}, \quad (21)$$

gde $VCPI_{bus}$ (21) uzima vrednosti $0 \leq VCPI_{bus} \leq 1$ i što je bliže nuli, to je napon u datom čvoru stabilniji, odnosno manja je verovatnoća da će se dogoditi kolaps.

Predložena metoda za analizu stabilnosti napona, zasnovana na prethodno predstavljenom matematičkom modelu, odlikuje se brojnim specifičnim karakteristikama koje potvrđuju njenu praktičnost u analizi naponske stabilnosti elektroenergetskih sistema. Ove karakteristike omogućavaju preciznu procenu naponske stabilnosti, identifikaciju kritičnih čvorova u mreži, kao i analizu osetljivosti sistema na promene opterećenja. Istovremeno, tehnika je projektovana da smanji računarsku složenost, čineći je primenljivom čak i u velikim elektroenergetskim mrežama.

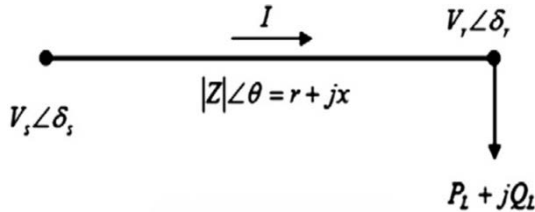
U nastavku su date ključne prednosti predložene metode, koje ilustruju njenu praktičnu vrednost i širok spektar primene u planiranju i analizi elektroenergetskih sistema:

- predložena metoda procenjuje indeks predikcije naponskog kolapsa,
- uzima se u obzir uticaj opterećenja u ostalim čvorovima mreže prilikom procene indeksa naponskog kolapsa za određeni čvor,
- ne zahteva veliki broj proračuna – ne zahteva čak ni inverziju matrica, što može značajno smanjiti vreme obrade na procesoru kod velikih sistema,
- za izračunavanje indeksa dovoljni su podaci o topologiji mreže i fazorima napona u čvorovima,
- nagib krive indeksa predikcije naponskog kolapsa pruža informaciju o osetljivosti u odnosu na opterećenje u čvoru,
- model omogućava identifikaciju čvorova u sistemu koji su naponski nestabilni, i
- metoda se može koristiti u svrhe planiranja sistema.

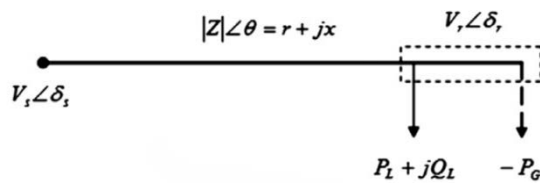
IV INDEKS STABILNOSTI SNAGE – PSI

Indeks stabilnosti snage spada u grupu linijskih indeksa stabilnosti napona. Pogodan je za statičku analizu stabilnosti napona u radialnim distributivnim mrežama [12, 13]. Vrednost indeksa treba da se nalazi između 0 i 1. Ukoliko je vrednost

indeksa veća od 1, to ukazuje da je napon nestabilan. Sa druge strane, što je indeks bliži 0, to je sistem stabilniji. Proračun indeksa stabilnosti snage vrši se za vodove i, ukoliko se ispostavi da vod, koji je priključen između čvorova i i j ima najveću vrednost indeksa stabilnosti snage, tada distribuiranu proizvodnju, odnosno solarnu elektranu, treba priključiti na kraju tog voda, u čvoru j . Formula na osnovu koje se izračunava indeks stabilnosti snage, izvodi se na osnovu modela mreže sa dva čvora koji su povezani vodom, kao što je prikazano na Slikama 2. i 3.



Slika 2. Model mreže sa dva čvora



Slika 3. Model mreže sa dva čvora sa dodatom distribuiranom proizvodnjom

Na Slikama 2. i 3, V_s predstavlja napon kraja sa kog se vrši prenos električne energije (δ_s predstavlja fazni stav napona V_s), V_r predstavlja napon kraja koji preuzima električnu energiju (δ_r predstavlja fazni stav napona V_r), I je struja koja teče kroz vod, Z predstavlja impedansu voda koja se sastoji iz realnog dela – otpornosti r i imaginarnog dela – reaktanse x , dok je θ fazni pomeraj imedanse voda. Potrošnja aktivne, odnosno reaktivne snage na kraju voda obeležena je sa P_L , odnosno Q_L , a P_G predstavlja distribuiranu proizvodnju električne energije priključenu na kraju voda. Na osnovu Slike 2, mogu se napisati formule (22) i (23):

$$S_L = P_L + j \cdot Q_L = V_r \cdot I_r^*, \quad (22)$$

$$V_r = V_s - I_r \cdot Z, \quad (23)$$

gde su (24):

$$I_r = \frac{P_L - j \cdot Q_L}{V_r^*}. \quad (24)$$

Na osnovu Slike 3. može se napisati relacija (25):

$$I_r = \frac{(P_L - P_G) - j \cdot Q_L}{V_r^*} \quad (25)$$

Ukoliko se (25) zameni u (23) i razdvoje se realni i imaginarni deo, dobija se (26) i (27):

$$P_L - P_G = \frac{V_r^* \cdot V_s}{Z} \cdot \cos(\theta - \delta_s + \delta_r) - \frac{V_r^2}{Z} \cdot \cos\theta \quad (26)$$

$$Q_L = \frac{V_r^* \cdot V_s}{Z} \cdot \sin(\theta - \delta_s + \delta_r) - \frac{V_r^2}{Z} \cdot \sin\theta. \quad (27)$$

Sređivanjem (26) dobija se (28):

$$V_r^2 - \frac{V_r^* \cdot V_s}{\cos\theta} \cdot \cos(\theta - \delta) - \frac{Z \cdot (P_L - P_G)}{\cos\theta} = 0. \quad (28)$$

gde je:

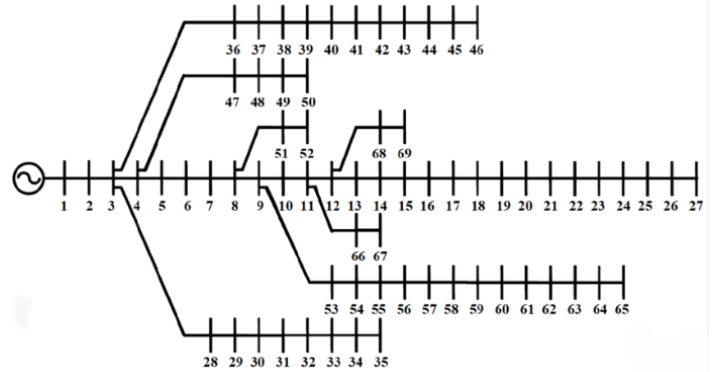
$$\delta = \delta_s - \delta_r \quad (29)$$

Jednačina (28) je kvadratna jednačina. Kako bi napon u čvorovima bio stabilan, jednačina (28) bi trebalo da ima realna rešenja, odnosno da njena diskriminanta bude veća od 0. Na osnovu ove nejednakosti, dobija se izraz za izračunavanje indeksa stabilnosti snage (30):

$$PSI = \frac{4 \cdot r_{ij} \cdot (P_L - P_G)}{[V_i \cos(\theta - \delta)]^2} \leq 1 \quad (30)$$

V SIMULACIJA I ANALIZA REZULTATA

Na primeru standardne IEEE 69 distributivne mreže, sa unapred definisanim parametrima, kao i potrošnjama aktivne i reaktivne snage u čvorovima, izvršene su simulacije u programskom alatu *Matlab* [14]. Korišćen je *Matpower* paket [15], koji sadrži podatke o IEEE test mrežama [16] i omogućava analizu tokova snaga. Topologija standardne pasivne IEEE distributivne mreže sa 69 čvorova prikazana je na Slici 4.



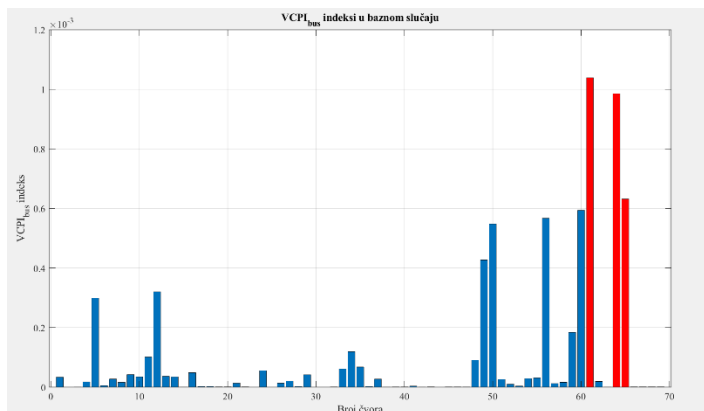
Slika 4. Standardna IEEE 69 distributivna mreža

Razmatrano je na koji način solarna elektrana koju treba priključiti utiče na stabilnost napona u čvorovima i gubitke u distributivnoj mreži i na osnovu analize upravo tih parametara određena je optimalna lokacija i instalisana snaga elektrane. Za analizu stabilnosti napona korišćena su dva indeksa – $VCPI_{bus}$ i PSI .

Analiza na osnovu $VCPI_{bus}$ indeksa naponske stabilnosti

Za svaki čvor u mreži je izračunat indeks $VCPI_{bus}$ za bazno stanje (stanje bez priključene solarne elektrane) i na osnovu dobijenih rezultata ustanovljeno je koji čvor u mreži ima najveću vrednost indeksa $VCPI_{bus}$. Dobijeni rezultati prikazani su na Slici 5. Vrednosti indeksa za tri najkritičnija čvora (61, 64 i 65) prikazana su crvenom bojom. Analizom vrednosti indeksa naponske stabilnosti u pojedinačnim čvorovima, na osnovu

najkritičnije vrednosti (odnosno vrednosti najbliže 1) određeno je optimalno mesto priključenja solarne elektrane – čvor 61. Ovakav rezultat je očekivan, s obzirom na činjenicu da u čvoru 61 postoji daleko veća potrošnja u odnosu na druge čvorove u mreži.

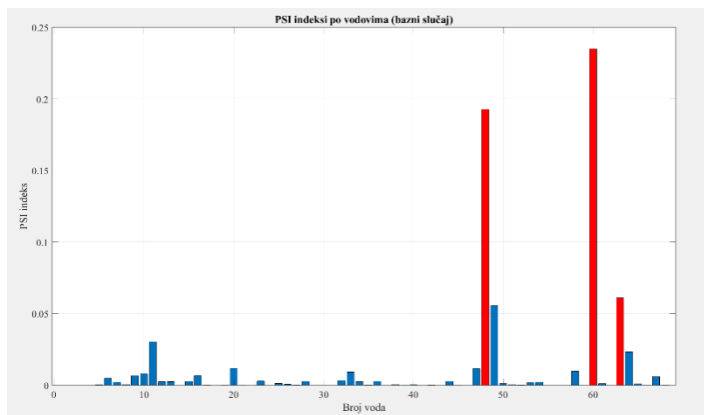


Slika 5. Vrednosti indeksa $VCPI_{bus}$ u čvorovima mreže u baznom slučaju

Analiza na osnovu PSI indeksa naponske stabilnosti

S obzirom na činjenicu da su indeksi naponske stabilnosti aproksimativni metod za statičku analizu stabilnosti napona, rezultati se mogu razlikovati u zavisnosti od toga koji indeks se koristi i koje veličine uvažava. Indeks predikcije naponskog kolapsa $VCPI_{bus}$ predstavlja indeks naponske stabilnosti u čvorovima, dok PSI indeks spada u grupu linijskih indeksa. Ideja je da se korišćenjem još jednog indeksa (PSI) rezultati dobijeni korišćenjem indeksa $VCPI_{bus}$ potvrde.

Na Slici 6. prikazan je grafik na kom se nalaze vrednosti PSI indeksa za svaki vod u IEEE 69 mreži za bazni slučaj, odnosno slučaj bez priključene solarne elektrane.



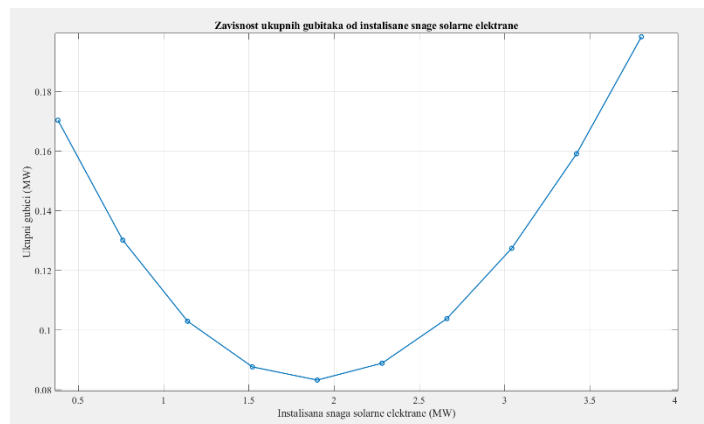
Slika 6. Prikaz vrednosti PSI za sve vodove u IEEE 69 mreži za bazni slučaj

Sa Slike 6. se vidi da su najkritičniji vodovi 60 (između čvorova 60 i 61), 48 (između čvorova 48 i 49) i 63 (između čvorova 63 i 64). Dakle, kritični čvorovi u mreži su 61, 49 i 64. Analiza na osnovu $VCPI_{bus}$ indeksa pokazala je da su najkritičniji čvorovi 61, 64 i 65, pa se može konstatovati da postoji poklapanje u dva od 3 najkritičnija čvora primenom dve različite metode. Uzrok delimičnog nepoklapanja jesu različite veličine koje se koriste prilikom proračuna indeksa, kao i činjenica da pripadaju

različitim grupama koje nemaju istu preciznost (Slika 1.).

Na osnovu analize indeksa $VCPI_{bus}$ i PSI zaključeno je da je optimalna lokacija za priključenje solarne elektrane čvor 61.

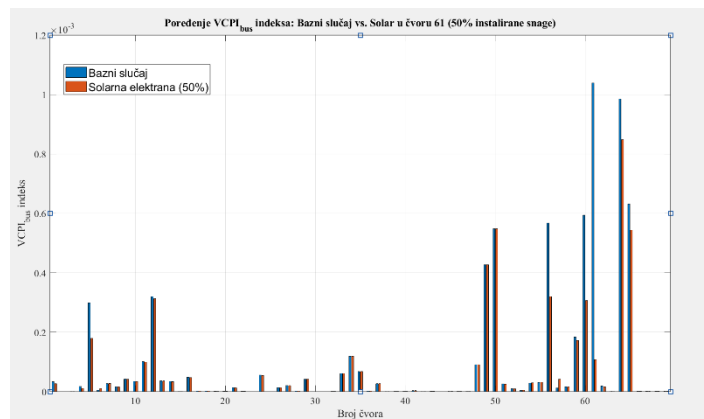
Kada su u pitanju gubici aktivne snage u sistemu, razmatrano je kako na njih utiču solarne elektrane različite instalisane snage priključene u najkritičnijem čvoru – čvoru 61. Na Slici 10. prikazana je zavisnost gubitaka aktivne snage od instalisane snage solarne elektrane (instalisana snaga ide od 10% do 100% ukupne potrošnje aktivne snage u mreži u koracima od 10%).



Slika 7. Zavisnost ukupnih gubitaka aktivne snage u mreži od instalisane snage elektrane

Na osnovu Slike 7. se zaključuje da je optimalna instalisana snaga solarne elektrane jednaka 50% od ukupne potrošnje aktivne snage u mreži. Pre priključenja solarne elektrane, ukupni gubici u sistemu iznosili su 0,224992 MW, dok su ti gubici sa priključenom solarnom elektranom jednaki 0,083249 MW.

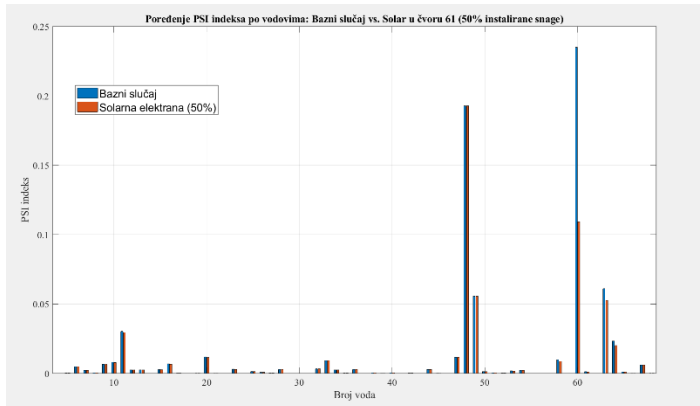
Na Slikama 8. i 9. prikazano je kolike su vrednosti indeksa $VCPI_{bus}$, odnosno PSI pre i nakon priključenja solarne elektrane optimalne snage na optimalnoj lokaciji.



Slika 8. Prikaz vrednosti $VCPI_{bus}$ indeksa pre i nakon priključenja elektrane optimalne snage na optimalnoj lokaciji

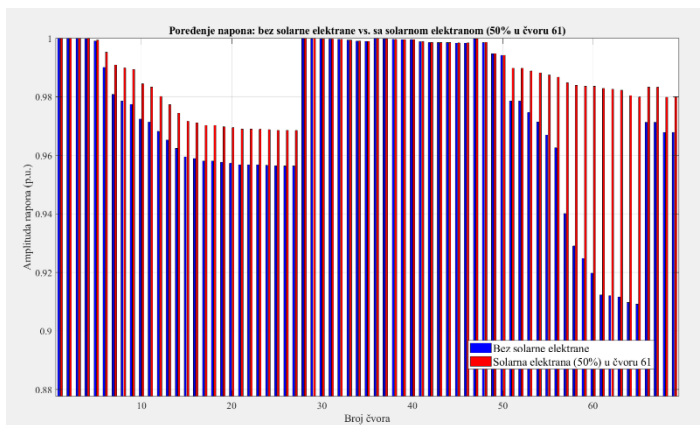
Nakon priključenja elektrane u čvoru 61, čija je instalisana snaga jednaka 50% od ukupnog opterećenja u mreži, indeksi predikcije naponskog kolapsa $VCPI_{bus}$ su se skoro u svim čvorovima smanjili, što ukazuje na povećanje stabilnosti u sistemu. Kao što se može videti na Slici 8, najveće poboljšanje stabilnosti je ostvareno u čvoru 61, gde je elektrana i priključena.

Vrednost PSI indeksa pre priključenja solarne elektrane u čvoru 61 bila je jednaka 0,234875. Nakon priključenja, PSI indeks u čvoru 61 iznosi 0,108817, što govori da se stabilnost napona u tom čvoru poboljšala. Priključenje solarne elektrane optimalne instalisane snage na optimalnoj lokaciji pozitivno je uticalo na stabilnost napona i u ostalim čvorovima, što se može videti na Slici 9, gde su prikazane vrednosti PSI indeksa pre priključenja elektrane, kao i nakon priključenja solarne elektrane u čvoru 61, čija je instalisana snaga jednaka 50% ukupne potrošnje aktivne snage u mreži.



Slika 9. Prikaz vrednosti PSI indeksa pre i nakon priključenja elektrane optimalne snage na optimalnoj lokaciji

Na Slici 10. je za najpovoljniji slučaj priključenja solarne elektrane prikazana vrednost napona u čvorovima. Kako bi se novo stanje uporedilo sa baznim stanjem, na grafiku se nalaze i naponi u čvorovima pre priključenja solarne elektrane.



Slika 10. Poređenje amplitude napona u čvorovima pre priključenja elektrane i nakon priključenja solarne elektrane optimalne instalisane snage na optimalnoj lokaciji

Na osnovu Slike 10. može se primetiti da integracija solarne elektrane optimalne snage na idealnoj lokaciji značajno poboljšava amplitudu napona, približavajući je nominalnoj vrednosti. Pre priključenja, najniže vrednosti napona zabeležene su u čvorovima 65, 64 i 63, iznoseći redom 0,909 r.j., 0,910 r.j. i 0,912 r.j. Nakon priključenja solarne elektrane, ovi naponi se povećavaju na 0,980 r.j., 0,980 r.j. i 0,982 r.j. Dok je pre integracije čvor 65 imao najniži napon (0,910 r.j.), posle priključenja najniža vrednost napona (0,968 r.j.) zabeležena je u

čvoru 27. Kao posledica priključenja solarne elektrane, donji prag napona se podigao.

VI ZAKLJUČAK

U ovom radu analiziran je uticaj solarnih elektrana različite instalirane snage i mesta priključenja na stabilnost napona i gubitke aktivne snage u distributivnoj mreži, pri čemu je standardna IEEE 69 mreža korišćena kao test mreža za analizu. Rezultati su pokazali da pravilno odabrana instalisana snaga i lokacija solarne elektrane mogu doprineti unapređenju stabilnosti napona i smanjenju gubitaka u mreži. Konkretno, solarna elektrana instalirane snage od 50% ukupne aktivne potrošnje, priključena u čvoru broj 61, pokazala se kao optimalno rešenje koje poboljšava stabilnost napona, kako u tom čvoru, tako i na nivou sistema. Smanjuju se i gubici aktivne snage, istovremeno približavajući amplitudu napona nominalnoj vrednosti.

Prikazana analiza je od posebnog značaja kada je instalisana snaga solarnih elektrana, koje čekaju odluku o priključenju, veća od prihvatnog kapaciteta posmatranog dela distributivne mreže. U takvim okolnostima, analiza uticaja na stabilnost napona i gubitke omogućava određivanje prioriteta priključenja solarnih elektrana, favorizujući one koje imaju najbolji uticaj na sistem.

Ova analiza se oslanjala na pretpostavku konstantne potrošnje u mreži. Dalje istraživanje će obuhvatiti dinamične uslove rada mreže, uključujući varijacije u proizvodnji i potrošnji tokom dana, kako bi se preciznije procenio uticaj solarnih elektrana na vrednosti napona. Planirana je primena Monte Karlo simulacija koja je omogućiti uvažavanje više radnih stanja i sveobuhvatniji uvid u performanse mreže, čime se osigurava bolja integracija OIE u elektroenergetski sistem.

LITERATURA

- [1] Electricity 2024, <https://www.iea.org/reports/electricity-2024> [pristupljeno 17.03.2025]
- [2] Uzun, U.E., Pamuk, N., Taskin, S. Effect of Solar Photovoltaic Generation System on Voltage Stability, in Proc. *IEEE Global Energy Conference (Gec) 2022*, Batman, Turkey, pp. 38-41, 26-29, October 2022. <https://doi.org/10.1109/GEC55014.2022.9986740>
- [3] Nguyen, S., Peng, W., Sokolowski, D., Alahakoon, D., Yu, X. Optimizing Rooftop Photovoltaic Distributed Generation with Battery Storage for Peer-to-Peer Energy Trading, *Applied Energy*, Vol. 228, pp. 2567-2580, September 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.042>
- [4] Gallo, A.B., Simões-Moreira, J.R., Costa, H.K.M., Santos, M.M., Moutinho dos Santos, E. Energy storage in the energy transition context: A technology review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 65, pp. 800-822, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.028>
- [5] Stetz, T., Marten, F., Braun, M. Improved Low Voltage Grid-Integration of Photovoltaic Systems in Germany, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol 4, pp. 534-542, April 2013. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2198925>
- [6] Dulău, L.I., Abrudean, M., Bică, D. Effects of Distributed Generation on Electric Power Systems, *Procedia Technology*, Vol. 12, pp. 681-686, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.549>
- [7] Alizadeh Mousavi, O., Bozorg, M., Cherkaoui, R. Preventive Reactive Power Management for Improving Voltage Stability Margin, *Electric Power System Research*, Vol. 96, pp. 36-46, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.10.005>
- [8] Gantayet, A., Mohanty, S. An Analytical Approach for Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Based on a Combined Voltage Stability Index, in Proc. *2015 IEEE Power, Communication and*

- Information Technology Conference (PCITC), Bhubaneswar, India, 15-17, October 2015. <https://doi.org/10.1109/PCITC.2015.7438099>
- [9] Ismail, N. A. M., Zin, A. A. M., Khairuddin, A., Khokhar, S. A Comparison of Voltage Stability Indices, in Proc. 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2014), Langkawi, Malaysia, 24-25, July 2014. <https://doi.org/10.1109/MELCON.2006.1653269>
- [10] Modarresi, J., Gholipour, E., Khodabakhshian, A. A Comprehensive Review of the Voltage Stability Indices, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 63, pp. 1-12, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.010>
- [11] Balamourougan, V., Sidhu T.S., Sachdev M.S. Technique for Online Prediction of Voltage Collapse, in Proc. IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol 151, No. 4, pp. 453-460, 2004. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20040612>
- [12] Rambabu, T., Venkata Prasad, P. Optimal Placement and Sizing of DG Based on Power Stability Index in Radial Distribution System, in Proc. 2014 International Conference on Smart Electric Grid (ISEG), Guntur, India, 19-20, September 2014. <https://doi.org/10.1109/ISEG.2014.7005586>
- [13] Moghavvemi, M., Faruque, M.O. Technique for Assessment of Voltage Stability in Ill-Conditioned Radial Distribution Network, IEEE Power Engineering Review, Vol 21, No. 1, pp. 58-60, 2001. <https://doi.org/10.1109/39.893345>
- [14] MATLAB, version R2023b, <https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/support/updates/r2023b/r2023b-updates-release-notes.pdf> [pristupljeno 22.03.2025]
- [15] Zimmerman, R.D., Murillo-Sánchez, C.E., Thomas, R. J. MATPOWER 7.1 User's Manual, Power Systems Engineering Research Center (PSERC), 2020. <https://matpower.org/docs/MATPOWER-manual-7.1.pdf> [pristupljeno 22.03.2025]
- [16] IEEE 69 Bus System, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/88111-ieee-69-bus-system> [pristupljeno 22.03.2025]

AUTORI

Doroteja Zarev – asistent, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, doroteja.zarev@etf.bg.ac.rs, ORCID [0009-0005-4066-9344](https://orcid.org/0009-0005-4066-9344)

Jelena Stojković Terzić – docent, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, jstojkovic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-6948-3755](https://orcid.org/0000-0002-6948-3755)

Jovan Trifunović – vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, jovan.trifunovic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1128-0349](https://orcid.org/0000-0002-1128-0349)

Optimal Placement and Sizing of Solar Power Plant for Voltage Stability Improvement

Abstract – This paper addresses the problem of determining the optimal location and capacity of solar power plants in distribution networks to improve voltage stability. Key voltage-related indicators, such as voltage stability and power losses, were analysed on standard IEEE 69 network to identify the optimal location for connecting a solar power plant. The growing deployment of distributed energy resources highlights the importance of proper sizing and positioning of these sources, as improperly located or oversized solar power plants can lead to voltage rise, reverse power flows, and system performance degradation. The purpose of this analysis is to assess how solar power plants, which will be potentially connected to the network, affect voltage stability in distribution networks with limited hosting capacity for renewable energy sources. These issues are particularly significant in cases where the installed capacity of solar power plants awaiting connection exceeds the hosting capacity of the observed part of the distribution network, raising the question of connection prioritization.

Index terms – Voltage stability, Optimal location, Solar power plan, Distribution network, Connection to the grid