Broj rada: R4-15
DOI:10.46793/CIRED2026.R4-15_144

PRORAČUN TOKOVA SNAGA MIKROMREŽA U OSTRVSKOM RADU

LOAD FLOW CALCULATION OF MICROGRIDS IN ISLAND MODE

Predrag VIDOVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija*
Marko OBRENIĆ, Schneider Electric LLC Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Priroda distributivnih mreža se drastično promenila tokom poslednjih nekoliko decenija usled velike penetracije energetskih izvora sa elektronskim interfejsom (EIER). Kao posledica toga, složenost upravljanja i vođenja ovih mreža je značajno povećana. EIER mogu primenjivati širok spektar upravljačkih strategija koje se ne mogu predstaviti tradicionalnim jednofaznim tipovima čvorova koji se koriste za klasične naizmenične električne mašine u simetričnim režimima. Pored toga, sve veći broj mikromreža se pojavljuje u distributivnim mrežama. One mogu biti povezane na mrežu ili raditi u ostrvskom režimu. Proračuni u mikromrežama koje rade u ostrvskom režimu predstavljaju poseban izazov. U ovom radu je predstavljen robusan i precizna metod proračuna tokova snaga zasnovan na algoritmu sumiranju struja i korekcija napona (SSKN) za mikromreže u ostrvskom režimu rada. Proračun uzima u obzir proizvodnju zasnovanu na obnovljivim izvorima energije (vetrogeneratori, solarni paneli i drugi), konvencionalne generatore (kogeneracija – CHP, dizel i prirodni gas), kao i potrošnju distributivne mreže. U slučaju trofaznih jedinica distributivnih generatora (DG), poznata je ukupna trofazna snaga, a ne snaga po fazama. Zbog toga klasični tipovi čvorova θV (balansni čvor), PQ i PV nisu pogodni za proračune nesimetričnih tokova snaga.

Ključne reči: Mikromreža, ostrvski rad, nesimetrični tokovi snaga, sumiranje struja i korekcija napona.

ABSTRACT

The nature of distribution networks has drastically changed over the last several decades, due to a high penetration of electronically interfaced energy resources (EIERs). Consequently, the complexity of the operation and the management of these networks have considerably increased. EIERs can employ a wide range of control strategies that cannot be represented with traditional single-phase bus types used for traditional alternating current machines in a symmetrical operation. In addition, an increasing number of microgrids are appearing in distribution networks. They can be connected to a network or in island mode. Calculations in microgrids in island mode represent a special challenge. This paper presents a robust and accurate unbalanced backward-forward sweep (BFS) load flow method based for microgrids in island modes. It takes into account the renewable resource-based generations (wind generators, solar panels and other), conventional generators (CHP, diesel, and natural gas) and distribution network loads. In the case of three-phase distributed generators (DG) units, their three-phase

* Predrag Vidović pvidovic@uns.ac.rs; Marko Obrenić marko.obrenic@uns.ac.rs

power is known, not the power per phase. Therefore, the classic θV (slack bus), PQ and PV node types are not suitable for unbalanced load flows.

Keywords: Microgrid, island mode, unbalanced load flow, backward-forward sweep.

UVOD

Proračuni tokova snaga su neophodan alat za analizu, upravljanje i planiranje distributivnih mreža. Postoji više tipova algoritama za simetrične proračune tokova snaga u distributivnim mrežama: sabiranje struja [1], sabiranje snaga [2], sabiranje admitansi/struja [3] i mnogi drugi. S druge strane, nesimetrični proračuni tokova snaga u distributivnim mrežama predstavljeni su u [4–7]. Međutim, u poslednje vreme sve veći broj obnovljivih i distribuiranih izvora energije se uključuje u distributivne mreže, kao što su vetroelektrane, solarni paneli i mikro/mini/male hidroelektrane [8]. Pored toga, obnovljivi i distribuirani izvori se često organizuju u mikromreže. Mikromreže su u poslednje vreme postale veoma popularne. One mogu pomagati distributivnim mrežama kada je to potrebno, ali mogu i da rade u ostrvskom režimu u slučajevima kada dođe do problema u distributivnoj mreži.

Postoje tri kategorije proračuna tokova snaga mikromreža. Proračuni tokova snaga zasnovani na Njutn-Rafsonovim varijantama, zasnovani na metodu nazavisnih napona kao i proračuni zasnovani na sumiranju struja i korekcija napona [9–14], koji su najefikasniji za proračune tokova snaga u distributivnim sistemima. U radu [9] predložen je modifikovani SSKN algoritam koji uzima u obzir specifične karakteristike mikromreža u ostrvskom režimu rada, kao što su promenljiva frekvencija i odsustvo balansnog čvora. Ovaj pristup takođe integriše praktične režime rada DG i različite karakteristike opterećenja. U radu [10], problem proračuna tokova snaga je razložen na dva međusobno povezana potproblema: naizmjenične i jednosmjerne podmreže. Za svaku podmrežu primenjen je modifikovan SSKN algoritam, uzimajući u obzir specifične osobine svake od njih. Rad [11] predlaže aproksimativni metod proračuna tokova snaga za jednosmjerne mikromreže zasnovan na metodu sabiranja admitansi, prilagođenu radijalnim sistemima, dok je u [12] izvršena integracija distribuiranih i decentralizovanih upravljačkih modela generatora i pretvarača u ostrvskim hibridnim mikromrežama. U radu [13] modifikovan SSKN korišćen je za analizu elektroenergetskih sistema zasnovanu na zavisnošću opterećenja od napona, pri različitim modelima opterećenja električnih vozila. S druge strane, u [14] je predstavljen modifikovan konvencionalni Gaus–Zajdelov metod, u kojem su jednačine tokova snaga izmenjene uzimajući u obzir odsustvo balansnog čvora. Glavni fokus tog rada je niskonaponska mikromreža u ostrvskom režimu rada, malih dimenzija koja modeluje male zajednice.

Pregled postojeće literature pokazuje da su nesimetrični režimi rada mikromreža – kako u ostrvskom, tako i priključenih na mrežu dobili relativno malo pažnje. Trofazni generatori u nesimetričnim režimima rada definišu se ukupnim trofaznim snagama, ali su u mnogim istraživanjima ove snage definisane po fazama. Međutim, raspodela snaga po fazama u velikoj meri zavisi od radnih uslova celokupnog sistema.

U ovom radu tokovi snaga zasnovani na SSKN formulisani su u domenu simetričnih komponenti za proračun nesimetričnih režima, umesto vremenski zahtevnih procedura sa faktorizacijom matrice admitansi ili matrice Jakobijana. Kako bi se uzele u obzir različite strategije EIER izvora, bilo je neophodno koristiti tipove čvorova definisane u [6]. Takođe, radi

implementacije ovih strategija u mikromrežama koje rade u ostrvskom režimu, potrebno je uvesti dodatne tipove čvorova. Takođe, eliminisana je potreba za balansnim čvorom.

Ostatak rada je organizovan na sledeći način: mikromreže u ostrvskom režimu obrađene su u glavi 1. Metodologija rešavanja proračuna tokova snaga prikazana je u glavi 2, dok su rezultati proračuna i diskusija dati u glavi 3. Zaključna razmatranja data su u glavi 4, i na kraju je dat spisak literature.

1 MIKROMREŽE U OSTRVSKOM RADU

Glavni izazov proračuna tokova snaga u ostrvskim mikromrežama leži u odsustvu balansnog čvora. Međutim, SSKN metodi su po svojoj prirodi zasnovani na prisustvu balansnog čvora. Da bi se ovaj problem prevazišao, uvodi se virtuelni balansni čvor. Ovaj virtuelni balansni čvor odgovara jednom od čvorova generatora i služi kao čvor balansiranja u kojem se akumulira razlika između ukupne proizvodnje i zbira potrošnje i gubitaka u sistemu. Ova razlika snage potom se mora preraspodeliti među preostalim čvorovima generatora unutar mikromreže. Raspodela ove razlike može se dobiti kao rezultat optimizacionog problema ili definisati kroz druge unapred određene mehanizme. Međutim, nijedan od tradicionalnih tipova čvorova, ne dopušta da se injektirana snaga menja tokom iterativnog procesa proračuna tokova snaga. Da bi se prevazišla ova ograničenja, u ovom radu je uvedena nova kategorija fleksibilnih tipova čvorova kako bi se razvio precizan model nesimetričnih tokova snaga i procedura proračuna na principu inspekcije tipa čvorova. Ovi generatorski čvorovi imaju ili ne sposobnost da menjaju svoju injektiranu snagu tokom iterativnog procesa. Ako nemaju u subskriptu „flex“ onda nemaju mogućnost menjanja snage tokom iterativnog procesa. Sledeći fleksibilni tipovi čvorova su uvedeni:

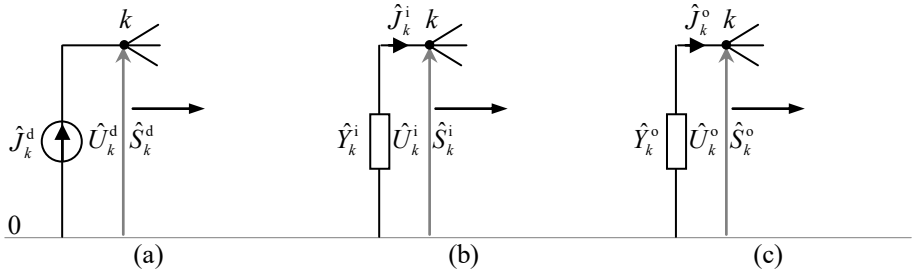
- $P_{\Sigma}Q_{\Sigma flex}$ – specificirane trofazne snage, aktivna i reaktivna, poznate su, ali njihova vrednost se može menjati tokom iterativnog procesa,
- $P_{\Sigma}V_{flex}$ – specificirana trofazna aktivna snaga i modul napona direktnog redoslda su poznati, ali se vrednost snage može menjati tokom iterativnog procesa,
- $P_{\Sigma}Q_{\Sigma}V_{symflex}$ – specificirane trofazne snage, aktivna i reaktivna, kao i simetrija napona poznati su, ali vrednost snaga se može menjati tokom iterativnog procesa,
- $P_{\Sigma}V_{symflex}$ – specificirana trofazna aktivna snaga i modul napona direktne komponente poznati su, dok su inverzna i nulta komponenta napona jednake nuli; vrednost snage se može menjati tokom iterativnog procesa,
- $P_{\Sigma}Q_{\Sigma}I_{flex}$ – specificirane trofazne snage, aktivna i reaktivna, kao i inverzna komponenta struje poznati su, ali se vrednost snaga može menjati tokom iterativnog procesa,
- $P_{\Sigma}VI_{flex}$ – specificirana trofazna aktivna snaga, modul napona direktnog redoslda i inverzna komponenta struje su poznati, ali se vrednost snage može menjati tokom iterativnog procesa.

Osim ovih čvorova potrebno je definisati čvor tipa 3PQ [6] kod koga su aktivne i reaktivne snage definisane po fazama.

Definišući ove fleksibilne tipove čvorova, moguće je eksplicitno definisati koji generatori će učestvovati u balansiranju razlike snage na virtuelnom balansnom čvoru, a koji ne. Pored toga, ovaj pristup omogućava sistematsko definisanje tipova čvorova već na početku proračuna tokova snaga. Ovi tipovi čvorova čine osnovu za razvoj modela tokova snaga korišćenjem SSKN metoda u glavi 2.

2 ALGORITAM PRORAČUNA TOKOVA SNAGA

Pogonsko kolo za *k*-ti distributivni energetski resurs (DER$_k$) može se predstaviti kao na slici 1 [6].



Slika 1 – Nortovon ekvivalent za DER$_k$ direktnog (a), inverznog (b) i nultog redosleda (c)

Ukupna trofazna snaga za DER$_k$ može se izraziti preko simetričnih komponenti struja i napona:

$$\hat{S}_{k\Sigma} = 3(\hat{U}_k^{\mathrm{d}*}\hat{J}_k^{\mathrm{d}} + \hat{U}_k^{\mathrm{i}*}\hat{J}_k^{\mathrm{i}} + \hat{U}_k^{\mathrm{o}*}\hat{J}_k^{\mathrm{o}}), \quad * - \text{označava konjugaciju.} \tag{1}$$

Snage izračunate preko simetričnih komponenti strija i napona definišu se na sledeći način:

$$\hat{S}_k^{\mathrm{s}} = \hat{U}_k^{\mathrm{s}*}\hat{J}_k^{\mathrm{s}}, \quad s = \mathrm{d},\mathrm{i},\mathrm{o}. \tag{2}$$

Ako se relacija (2) uvrsti u relaciju (1) ukupna trofazna snaga glasi:

$$\frac{1}{3}\hat{S}_{k\Sigma} = \hat{S}_k^{\mathrm{d}} + \hat{S}_k^{\mathrm{i}} + \hat{S}_k^{\mathrm{o}}. \tag{3}$$

Promenljive stanja nesimetričnog režima mreže sa N+1 trofaznih čvorova predstavljene su skupom od 3(N+1) kompleksnih faznih napona:

$$\mathbf{X}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{d}} = \left[\hat{U}_k^{\mathrm{d}},\ k \in \{0,\ldots,N\}\right]^{\mathrm{T}},\ \hat{\mathbf{X}}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{i}} = \left[\hat{U}_k^{\mathrm{i}},\ k \in \{0,\ldots,N\}\right]^{\mathrm{T}},\ \hat{\mathbf{X}}_{\mathrm{S}}^{\mathrm{o}} = \left[\hat{U}_k^{\mathrm{o}},\ k \in \{0,\ldots,N\}\right]^{\mathrm{T}}. \tag{4}$$

Proračun stanja (4), vrši se korišćenjem algoritma za proračun tokova snaga zasnovanog na SSKN u domenu simetričnih komponenti. Proračun se sastoji od sledećih koraka:

Korak 1 – Inicijalizacija

Svakom čvoru se dodeljuje početna aproksimacija napona (npr. ravan start). Numeracija grana i čvorova radi se prema principu slojeva. Pored toga, svi čvorovi moraju biti kategorizovani u skladu sa tipovima čvorova opisanim u glavi 2.

Korak 2 – Proračun Tevenenove matrice

Teveninova matrica impedansi se formira za DG povezane na čvorove u kojima se kontroliše napon. Matrica se pravi sabiranjem rednih impedansi od čvora gde je priključen DG do virtuelnog balansnog čvora. Ovaj proces se ponavlja za sva tri redosleda – direktni, inverzni i nulti. Nakon formiranja, matrica se faktoriše korišćenjem LU faktorizacije.

Korak 3 – Proračun kompenzacionih struja

Prvo se određuju razlike napona između zadatih i izračunatih napona čvorova gde su priključeni DG kojima se kontrolišu naponi. Ove razlike napona se potom množe sa faktorizovanom Tevenenovom matricom impedansi (iz Koraka 2) kako bi se dobile kompenzacione struje. Kompenzacione struje inverznog ($\hat{I}_{k\mathrm{comp}}^{\mathrm{i}}$) i nultog redosleda ($\hat{I}_{k\mathrm{comp}}^{\mathrm{o}}$) dodaju se relacijama (6) i

(7), redom. Ove struje su nenulte samo za $k \in \{\alpha_{P_\Sigma Q_\Sigma Vsym} \cup \alpha_{P_\Sigma Q_\Sigma Vsymflex} \cup \alpha_{P_\Sigma Vsym} \cup \alpha_{P_\Sigma Vsymflex}\}$. Za DG kompenzacione struje direktnog redosleda ($\hat{I}^{\mathrm{d}}_{k\mathrm{comp}}$) se koriste za preračunavanje reaktivne snage na osnovu trenutne aproksimacije napona:

$$Q_{k\Sigma}^{(h+1)} = -3\,\mathrm{Im}\{\hat{U}_k^{\mathrm{d}*(h)}\hat{I}_{k\mathrm{comp}}^{\mathrm{d}(h+1)}\}, \quad k \in \alpha_{P_\Sigma V} \cup \alpha_{P_\Sigma VI} \cup \alpha_{P_\Sigma Vflex} \cup \alpha_{P_\Sigma VIflex} \cup \alpha_{P_\Sigma Vsym} \cup \alpha_{P_\Sigma Vsymflex}, \tag{5}$$

indeksi u zagradama su indeksi iteracija. Skupovi α_x u ovom koraku odnose se na indekse čvorova tipa *x*.

Korak 4 – Proračun struja potrošnje i proizvodnje

Struje inverzne i nulte komponente se prvo računaju. Inverzna struja data je formulom:

$$\hat{J}_k^{\mathrm{i}(h+1)} = \begin{cases} -\hat{Y}_k^{\mathrm{i}}\hat{U}_k^{\mathrm{i}(h)} + \hat{I}_{k\mathrm{comp}}^{\mathrm{i}(h+1)}, & k \in \{1,\ldots,N\} \wedge k \notin \alpha_{3\mathrm{PQ}}, \\ \dfrac{1}{3}\left(\dfrac{\hat{S}_{k\mathrm{a}}}{\hat{U}_{k\mathrm{a}}^{*(h)}} + \hat{\mathrm{a}}^2\dfrac{\hat{S}_{k\mathrm{b}}}{\hat{U}_{k\mathrm{b}}^{*(h)}} + \hat{\mathrm{a}}\dfrac{\hat{S}_{k\mathrm{c}}}{\hat{U}_{k\mathrm{c}}^{*(h)}}\right), & k \in \alpha_{3\mathrm{PQ}}, \end{cases} \tag{6}$$

$$\hat{Y}_k^{\mathrm{i}} \begin{cases} \neq 0, & k \in \alpha_{P_\Sigma Q_\Sigma} \cup \alpha_{P_\Sigma V} \cup \alpha_{P_\Sigma Q_\Sigma flex} \cup \alpha_{P_\Sigma Vflex} \cup \alpha_{P_\Sigma Q_\Sigma Vsym} \cup \alpha_{P_\Sigma Q_\Sigma Vsymflex} \cup \alpha_{P_\Sigma Vsym} \cup \alpha_{P_\Sigma Vsymflex}, \\ = 0, & k \in \alpha_{P_\Sigma Q_\Sigma I} \cup \alpha_{P_\Sigma VI} \cup \alpha_{P_\Sigma Q_\Sigma Iflex} \cup \alpha_{P_\Sigma VIflex}. \end{cases}$$

Nulta komponenta struje glasi:

$$\hat{J}_k^{\mathrm{o}(h+1)} = \begin{cases} \hat{Y}_k^{\mathrm{o}}\hat{U}_k^{\mathrm{o}(h)} + \hat{I}_{k\mathrm{comp}}^{\mathrm{o}(h+1)}, & k \in \{1,\ldots,N\} \wedge k \notin \alpha_{3\mathrm{PQ}}, \\ \dfrac{1}{3}\left(\dfrac{\hat{S}_{k\mathrm{a}}}{\hat{U}_{k\mathrm{a}}^{*(h)}} + \dfrac{\hat{S}_{k\mathrm{b}}}{\hat{U}_{k\mathrm{b}}^{*(h)}} + \dfrac{\hat{S}_{k\mathrm{c}}}{\hat{U}_{k\mathrm{c}}^{*(h)}}\right), & k \in \alpha_{3\mathrm{PQ}}. \end{cases} \tag{7}$$

Relacija (1) može se napisati na sledeći način:

$$\hat{U}_k^{\mathrm{d}*}\hat{J}_k^{\mathrm{d}} = \frac{1}{3}\hat{S}_{k\Sigma} - \hat{U}_k^{\mathrm{i}*}\hat{J}_k^{\mathrm{i}} - \hat{U}_k^{\mathrm{o}*}\hat{J}_k^{\mathrm{o}}. \tag{8}$$

Koristeći izračunate struje inverznog i nultog redosleda, kao i trenutnu aproksimaciju napona, struja direktnog redosleda može se izračunati na sledeći način:

$$\hat{J}_k^{\mathrm{d}(h+1)} = \begin{cases} \dfrac{\frac{1}{3}\hat{S}_{k\Sigma}^{(h+1)} - \hat{U}_k^{\mathrm{i}*(h)}\hat{J}_k^{\mathrm{i}(h+1)} - \hat{U}_k^{\mathrm{o}*(h)}\hat{J}_k^{\mathrm{o}(h+1)}}{\hat{U}_k^{\mathrm{d}*(h)}}, & k \in \{1,\ldots,N\} \wedge k \notin \alpha_{3\mathrm{PQ}}, \\ \dfrac{1}{3}\left(\dfrac{\hat{S}_{k\mathrm{a}}}{\hat{U}_{k\mathrm{a}}^{*(h)}} + \hat{\mathrm{a}}\dfrac{\hat{S}_{k\mathrm{b}}}{\hat{U}_{k\mathrm{b}}^{*(h)}} + \hat{\mathrm{a}}^2\dfrac{\hat{S}_{k\mathrm{c}}}{\hat{U}_{k\mathrm{c}}^{*(h)}}\right), & k \in \alpha_{3\mathrm{PQ}}. \end{cases} \tag{9}$$

Važno je napomenuti da je reaktivna snaga unapred poznata za tipove čvorova 3PQ, $P_\Sigma Q_\Sigma$, $P_\Sigma Q_\Sigma I$, $P_\Sigma Q_{\Sigma flex}$ i $P_\Sigma Q_\Sigma I_{flex}$. Za čvorove tipova $P_\Sigma V$, $P_\Sigma VI$, $P_\Sigma V_{sym}$, $P_\Sigma V_{flex}$, $P_\Sigma VI_{flex}$ i $P_\Sigma V_{symflex}$, reaktivna snaga se ažurira u svakoj iteraciji korišćenjem kompenzacionih struja. U slučaju fleksibilnih čvorova, $\hat{S}_{k\Sigma}$ se takođe iterativno ažurira kako bi se kompenzovala snage u virtuelnom balansnom čvoru.

Korak 5 – Proračun struja grana

Struje grana računaju se na sledeći način:

$$\hat{I}_k^{s(h+1)} = \hat{Y}_k^s\hat{U}_k^{s(h)} + \hat{J}_k^{s(h+1)} + \sum_{j\in\alpha_k}\hat{I}_j^{s(h+1)}, \quad k = N, N-1, \ldots, 1, \tag{10}$$

gde je α_k skup indeksa grana koje se napajaju sa čvora *k*.

Korak 6 – Proračun napona čvorova

Naponi čvorova se ažuriraju korišćenjem sledeće jednačine:

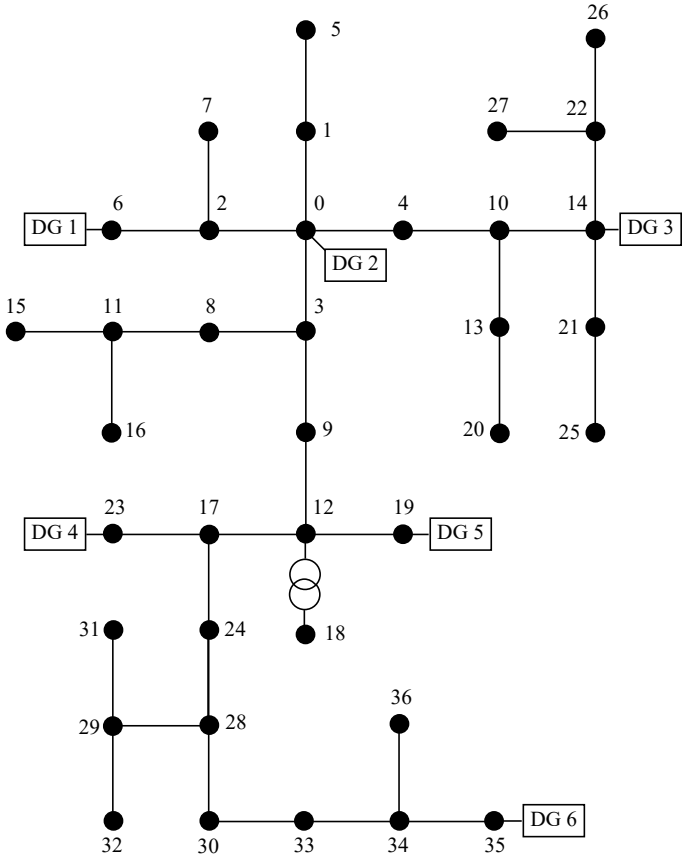
$$\hat{U}_k^{s(h+1)} = \hat{U}_K^{s(h+1)} - \hat{Z}_k^s \hat{I}_k^{s(h+1)}, \quad k = 1,2,...,N. \tag{11}$$

Korak 7 – Provera konvergencije

Iterativni proces se završava kada sve razlike napona čvorova, snaga u balansnom čvoru i proračunatih i specificiranih napona čvorova gde se kontrolišu naponi u dve uzastopne iteracije budu manje od unapred definisanih vrednosti.

3 REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 2 prikazan je modifikovan IEEE 37 izvod [15], koji predstavlja mikromrežu. Modifikacija uključuje integraciju šest DG. Zbog nedostatka prostora, pretpostavlja se da su sve DG identičnih karakteristika: nominalna snaga 600 kVA, nominalni napon 0,48 kV, admitanse negativnog redosleda 10 S (reaktansa 0,1 Ω), dok je admitansa nultog redosleda jednaka nuli. DG su povezani na izvod preko idealnih transformatora (4,8/0,48 kV) kako bi se izbeglo uvođenje dodatnih grana u IEEE 37 izvod.



Slika 2 – Mikromreža u izolovanom radu

Tipovi čvorova gde su priključeni DG navedeni su u Tabeli 1. Svi ostali čvorovi gde su priključeni potrošači su tipa 3PQ.

Table 1 – Tipovi generatorskih čvorova

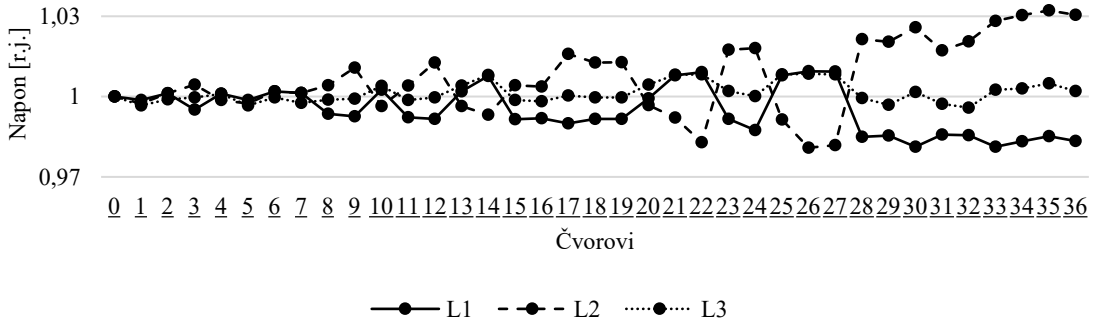
DGs	DG 1	DG 2	DG 3	DG 4	DG 5	DG 6
Tip čvora	$P\Sigma V_{flex}$	$P\Sigma V_{sym}$	$P\Sigma Q\Sigma V_{sym}$	$P\Sigma Q\Sigma I_{flex}$	$P\Sigma VI_{flex}$	$P\Sigma Q\Sigma_{flex}$

Proračun je konvergirao u 4 iteracije. Tabela 2 prikazuje rezultate proračuna – naponi, snage i struje DG. Rezultati prikazuju da su snage DG različite po fazama. U ovom radu definicija kompleksne snage glasi: $\hat{S} = \hat{U}^* \hat{I} = P - \mathrm{j}Q, \quad P = \mathrm{Re}\{\hat{S}\}, \quad Q = -\mathrm{Im}\{\hat{S}\}.$

Table 2 – Rezultati DG

	Naponi [kV]			Snage [kVA]			Struje [A]		
	Ua	Ub	Uc	Sa	Sb	Sc	Ia	Ib	Ic
DG 1	2.78	2.78	2.77	48.32–j39.81	48.36–j39.86	48.21–j39.82	22.55	22.57	22.57
DG 2	2.77	2.77	2.77	198.80–j88.96	38.41–j13.53	297.27–j127.58	78.59	14.70	116.73
DG 3	2.79	2.75	2.79	181.67–j79.97	186.89–j81.66	181.44–j78.37	71.08	74.11	70.74
DG 4	2.75	2.82	2.78	110.54–j65.44	113.27–j67.41	111.08–j67.16	46.74	46.74	46.74
DG 5	2.75	2.81	2.77	4.93–j3.21	5.03–j3.29	4.94–j3.28	2.14	2.14	2.14
DG 6	2.73	2.86	2.78	179.41–j77.59	187.76–j80.62	182.72–j81.80	71.60	71.43	71.89

Profil napona čvorova prikazan je na Slici 4, koja ilustruje napone u mikromreži. Očigledna je nesimetrija napona. U jako nesimetričnim režimima karakteristično je što je napon jedne faze značajno veći od napona preostale dve faze.



Slika 4 – Profil napona

4 ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazan proračun nesimetričnih tokova snaga u mikromrežama koje rade u ostrvskom režimu. Predloženi algoritam je zasnovan na SSKN metodu. Pored toga, primenjen je prošireni skup tipova čvorova, koji prevazilazi klasičnu podelu (θV, PQ i PV). Ovi tipovi

čvorova realno odražavaju prirodu nesimetričnih ražima i omogućavaju izbor generatora koji su zaduženi za apsorpciju viška snage na balansnom čvoru u ostrvskom režimu rada mikromreže. Prikazani rezultati pokazuju da je predloženi pristup veoma pogodan za distributivne mreže sa integrisanim mikromrežama.

Zahvalnica
Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija (Ugovor br. 451-03-137/2025-03/200156) i Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, kroz projekat „Naučno-istraživački i umetnički rad istraživača u nastavnim i saradničkim zvanjima na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu 2025“ (br. 01-50/295).

LITERATURA

[1] D. Shirmohammadi, H.W. Hong, A. Semlyen, G.X. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, no. 2, pp. 753–762, May 1988.
[2] G.X. Luo, A. Semlyen, "Efficient load flow for large weakly meshed networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, no. 4, pp. 1309–1316, Nov. 1990.
[3] D. Rajičić, R. Taleski, "Two novel methods for radial and weakly meshed network analysis", *Electric Power Systems Research*, no. 2, pp. 79–87, Dec. 1998.
[4] V.C. Strezoski, L.D. Trpezanovski, "Three-phase asymmetrical load-flow", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, no. 7, pp. 511–520 Oct. 2000.
[5] V.C. Strezoski, P.M. Vidović, "Power flow for general mixed distribution networks", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, no. 10: pp. 2455–2471, Aug. 2014.
[6] V.C. Strezoski, N.R. Vojnović, P.M. Vidović, "New bus classification and unbalanced power flow of large-scale networks with electronically interfaced energy resources", *International Transactions on Electrical Energy Systems* no. 3, pp. 1–16, Dec. 2017.
[7] P.M. Vidović, N.R. Vojnović, V.C. Strezoski, "A new power flow for multi-phase distribution networks with simultaneous phase interruptions", *Electrical Eng*ineering, no. 104, pp. 473–484, Apr. 2022.
[8] B. Liu, Y. Zhang, "Power flow algorithm and practical contingency analysis for distribution systems with distributed generation", *European Transactions on Electrical Power*, no. 6, pp. 880–889, July 2008.
[9] M.E. Nassar, M.M.A. Salama, "A novel branch-based power flow algorithm for islanded AC microgrids", *Electric Power Systems Research*, pp. 51-62, May 2017.
[10] M.E. Nassar, A.A. Hamad, M.M. A. Salama, E.F. El-Saadany, "A Novel Load Flow Algorithm for Islanded AC/DC Hybrid Microgrids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, no. 2, pp. 1553–1566, Mar. 2019.
[11] E.N.M. Silva, A.B. Rodrigues, M.d.G.d. Silva, "Approximated and Iterative Power Flow Algorithms for Islanded DC Microgrids", *Electric Power Systems Research*, no. 108972, pp. 1–12, Feb. 2023.
[12] E. Aprilia, K. Meng, H.H. Zeineldin, M.A. Hosani, Z.Y. Dong, "Modeling of distributed generators and converters control for power flow analysis of networked islanded hybrid microgrids", *Electric Power Systems Research*, no. 106343, pp. 1–12, July 2020.
[13] Y. Kongjeen, K. Bhumkittipich, N. Mithulananthan, I.S. Amiri, P. Yupapin, "A modified backward and forward sweep method for microgrid load flow analysis under different electric vehicle load mathematical models", *Electric Power Systems Research*, no. 168, pp. 46–54, Mart 2019.

[14] C.S. Michail, M.R. Rashmi, V.K. Ramachandaramurthy, "Power flow analysis in an Islanded microgrid without slack bus", *Electral Engineering*, no. 107, pp.1049–1057, July 2024.

[15] W.M. Kersting, L. Willis, "Radial Distribution Test Systems", IEEE Transaction on Power Systems, no. 3, pp. 975-985, Aug. 1991.