



PRORAČUNI TOKOVA SNAGA SA SIMULTANIM PREKIDIMA FAZA

POWER FLOW CALCULATIONS WITH SIMULTANEOUS PHASE INTERRUPTIONS

Predrag M. VIDOVIĆ, Nikola R. VOJNOVIĆ, Vladimir C. STREZOSKI, Dejan D. RELJIĆ
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Rad predlaže proračune tokova snaga za višefazne (neuravnotežene) mreže sa simultanim prekidima faza. Za razliku od tradicionalnih linearnih modela za proračune mreža sa simultanim kratkim spojevima i prekidima faza, prekidi faza, u ovom radu, tretiraju se mnogo realističnije – kao ispadi koji su uključeni u nelinearne modele za distributivne proračune tokova snaga u faznom domenu. Koristeći se kompenzacionim metodom, ovaj model je raspregnut po fazama. Proračun energizovanog dela mreže radi se postupkom sumiranja struja i korekcija napona. Proračun deenergizovanog dela mreže, koji se pojavljuje zbog prekida faza, zasnovan je na linearnom metodu konturnih struja. Efikasnost postupka sumiranja struja i korekcija napona zadržana je u predloženom proračunu.

Ključne riječi: Sumiranje struja i korekcija napona, Tokovi snaga, Metod konturnih struja, Prekidi faza.

ABSTRACT

The paper proposes a power flow calculation procedure for multi-phase (unbalanced) distribution networks with simultaneous phase interruptions. Differently from traditional linear models for calculations of networks with simultaneous short-circuits and phase interruptions, phase interruptions are treated in this paper much more realistically – as outages which are incorporated in a nonlinear phase-domain distribution power flow model. Using the compensation method, this model is decoupled per phases. The calculation of the energized part of the network is carried out using a Backward-Forward Sweep based procedure. The calculation of the state of the deenergized part of the network, which appeared due to phase interruptions, is based on the linear loop current method. Thus, the efficiency of Backward-Forward Sweep is retained in the proposed procedure.

Key words: Backward-Forward Sweep, Power Flow, Loop Current Method, Phase Interruptions.

1. UVOD

Prekidi mogu nastati kada se prekine fazni provodnik nadzemnog voda usled oluja, kada se ne zatvore/otvore sve faze prekidača prilikom manipulacija rasklopnom opremom, usled pregorevanja osigurača u jednoj fazi itd. Takođe, ispad jednog ili dva transformatora kod trofaznih transformatora koji su konstituisani od jednofaznih. Ispadi dovode do velike nesimetrije režima. Režimi mreže sa prekidima smatraju se kvarovima i proračunavaju se koristeći se linearnim modelima [1, 2]. Najveća mana ovakvog pristupa je što se model cele mreže (uključujući i energizovane delove) linearizuje.

Nelinearni distributivni proračuni tokova snaga su najvažniji proračuni distributivnih menadžment sistema. Skoro svi drugi proračuni (estimacija stanja, volt-var optimizacija, rekonfiguracija mreže, restauracija napajanja, itd.) zasnovani su na proračunima tokova snaga. Proračuni tokova snaga za slaboupetljane trofazne uravnotežene mreže, sa uključenim PV čvorovima objavljeni su pre trideset godina [3-5]. Ti veoma efikasni proračuni zasnovani su na sumiranju struja i korekciji napona (SSKN), sa numeracijom grana i čvorova po slojevima. U skoro svim ovim proračunima koristi se Tevenenova matrica impedansi za kompenzaciju petlji i čvorova tipa PV [3, 4].

Veoma efikasni proračuni simetričnih tokova snaga sa uključenim distributivnim transformatorima (DG) [3] su generalizovani na proračune nesimetričnih tokova snaga u [6]. Oba proračuna su zasnovana na veoma efikasnim procedurama SSKN. Uvažavanje transformatora u nesimetričnim tokovima snaga komplikuje

procedure SSKN [7]. Stoga, u referencama se predlažu proračuni zasnovani na čvorovima – postupak zasnovanih na injektiranim strujama u faznom domenu [8] i Njtn-Rafsonovi derivati [9]. Reprezentativni primeri postupaka zasnovanih na injektiranim strujama dati su u referencama [10-12]. Efikasnost ovih proračuna je narušena ponovnom (implicitnom) inverzijom matrice admitansi velikih dimenzija, nakon svake promene topologije mreže.

U referenci [13] prikazan je proračun nesimetričnih tokova snaga zasnovan na Njtn-Rafsonovom metodu, koji uzima u obzir distribuirane energetske resurse (DER) sa širokom lepezom kontrolnih strategija. Efikasnost proračuna tokova snaga zasnovanih na Njtn-Rafsonovom metodu, takođe je narušena zbog faktorizacije matrice jakobijana.

Na osnovu komparativne analize date u referenci [14] pokazano je da postupci SSKN imaju prednost u odnosu na druge postupke. Zbog toga je jako bitno zadržati postupke SSKN za proračune tokova snaga.

Prekidima faza u distributivnim mrežama nije poklonjena pažnja u prethodno navedenim referencama, kao ni u literaturi generalno. Ipak, zbog intenzivne integracije DER u distributivnim mrežama, proračuni režima distributivnih mreža sa prekidima faza postaju sve više atraktivni. Takvi režimi prouzrokuju pregrevanje rotora naizmeničnih mašina (inverzna komponenta struje), neželjena delovanja relejne zaštite, itd. Analiza ovih konsekvenci zahtevaju proračune distributivnih mreža sa prekidima faza. Linearni kanonični model [1] uvažava simultane kratke spojeve i prekide faza. On se koristi kao referenca za poređenje rezultata dobijenih postupkom za proračune tokova snaga u ovom radu.

Nedostatak odgovarajućih postupaka za proračune sa prekidima u nastupajućim velikim više-faznim (neuravnoteženim) distributivnim mrežama bila je glavna motivacija za razvoj tokova snaga predloženih u ovom radu. Veoma SSKN koriste se za proračun režima energizovanog dela mreže. Režim neenergizovanog dela mreže, koji je posledica prekida faza, proračunava se koristeći se metodom konturnih struja. Odgovarajuća matrica impedansi kontura je ekstremno retka. Potrebna je samo jedna LU faktorizacija ove matrice [15]. Stoga, velika efikasnost i tačnost postupaka za proračun tokova snaga zasnovanog na postupku SSKN je zadržana u razvijenom postupku. Postupak je razvijen u faznom domenu. Induktivne i kapacitivne sprege faza višefaznih elemenata mreže su uvažene kompenzacionim metodom [10].

Glavni doprinosi ovog rada su sledeći:

- 1) Energizovani deo mreže se tretira sa izuzetno efikasnim i tačnim nelinearnim modelima (energizovani potrošači/generatori tretiraju se preko svojih snaga). Veoma efikasan postupak SSKN se koristi u ovu svrhu.
- 2) Samo neenergizovan deo mreže tretira se linearnim modelom (generatori su isključeni iz mreže, a potrošači se predstavljaju preko admitansi). Metod konturnih struja se koristi u ovu svrhu.
- 3) Rezultati dobijenim predloženim postupkom sa prekidima faza su mnogo realističniji i tačniji od rezultata dobijenih linearnim modelima.

Rad je organizovan u 6 delova. Posle uvoda, u drugom delu prikazani su osnovni koncepti višefazne mreže sa prekidima faza. Proračun energizovanog i neenergizovanog modela mreže dat je u delu 3. U delu 4 dati su rezultati proračuna i diskusija, dok je zaključak dat u delu 5. Spisak referenci dat je u delu 6.

2. OSNOVNI KONCEPTI

Razmatra se višefazna slabo-upetljana distributivna mreža sa specificiranim naponima korena [14]. Mreža se sastoji od tro-, dvo- i jednofaznih rednih elemenata: sekcija vodova, transformatora, kondenzatora i prigušnica, kao i otočnih elemenata: potrošača, distribuiranih generatora (DG), kondenzatora, progušnica i statičkih VAR sistema. Mreža je radijalizovana uvođenjem čvorova prekida petlji [3–5]. Faza višefaznog elementa osnovna je jedinica ne samo za navedene elemente, već i za celu mrežu. Pre simulacije prekida u mreži, faze i čvorovi na drugom kraju rednih elemenata (čvorovi koji su dalji od korena) se numerišu u skladu sa principom slojeva [3].

Višefazne sekcije vodova, sa fazama ph ($ph = 1, 2$ ili 3), modeluju se rednom (serijskom) matricom impedansi – $\hat{\mathbf{Z}}$, i dvema međusobno jednakim otočnim matricama admitansi – $\hat{\mathbf{Y}}_0$. Dimenzije rednih i otočnih matrica jesu $ph \times ph$ [10]. Ove matrice za trofazni element ($ph = 3$), koji ima tri faze numerisane sa k, t i r , glase:

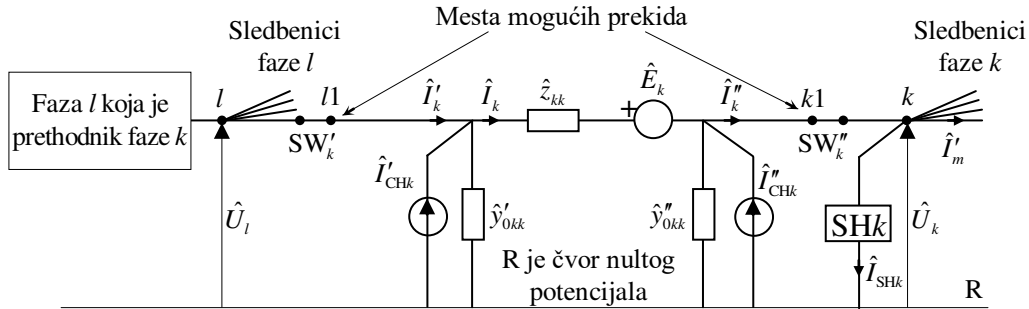
$$\hat{\mathbf{Z}}_{ktr} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{kk} & \hat{z}_{tk} & \hat{z}_{rk} \\ \hat{z}_{kt} & \hat{z}_{tt} & \hat{z}_{rt} \\ \hat{z}_{kr} & \hat{z}_{tr} & \hat{z}_{rr} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{Y}}_{0ktr} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{0kk} & \hat{y}_{0tk} & \hat{y}_{0rk} \\ \hat{y}_{0kt} & \hat{y}_{0tt} & \hat{y}_{0rt} \\ \hat{y}_{0kr} & \hat{y}_{0tr} & \hat{y}_{0rr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Faza k sekcije predstavljena je Π kolom datim na slici 1. Ona je raspregnuta od faza t i r primenom kompenzacionog metoda [10]. U skladu sa relacijom (1), kolo sa slike 1 se sastoji od redne impedanse i dve međusobno jednake otočne admitanse ($\hat{y}'_{0kk} = \hat{y}''_{0kk} = \hat{y}_{0kk}$). Idealni naponski izvor u grani k (kompenzacioni napon \hat{E}_k) i dva idealna strujna izvora priključena u čvorovima redne grane l i k [kompenzacione struje \hat{I}'_{CHk} i \hat{I}''_{CHk}], predstavljaju induktivni i kapacitivni uticaj faza t i r na fazu k , respektivno:

$$\hat{E}_k = \hat{z}_{tk} \hat{I}_t + \hat{z}_{rk} \hat{I}_r, \quad (2a)$$

$$\hat{I}'_{CHk} = -(\hat{y}_{0tk} \hat{U}_t + \hat{y}_{0rk} \hat{U}_r), \quad \hat{I}''_{CHk} = -(\hat{y}_{0tk} \hat{U}_t + \hat{y}_{0rk} \hat{U}_r), \quad (2b)$$

gde su l , u i v čvorovi bliži korenu mreže razmatranih faza k , t i r , respektivno.



Slika 1 – Raspregnuta faza k višefaznog elementa

Sa \hat{I}'_m označena je struja faze m koja je naslednik faze k , $m \in \mathbf{M}_k$, $k \in \mathbf{M}_l$. Sa \mathbf{M}_k i \mathbf{M}_l označeni su skupovi indeksa faza koji su naslednici faza k i l , respektivno. Serijske struje na oba kraja faze k (slika 1) označene su sa \hat{I}'_k i \hat{I}''_k . Značenje struje \hat{I}_k je očigledno sa slike 1.

Ako je ph jednak 2, matrice iz relacije (1) se smanjuju za redove i kolone koji odgovaraju fazi koja nedostaje. Za jednofazne elemente sprege ne postoje.

Modeli rednih kondenzatora/kalemova sastoje se od matrica sa jednom impedansom – relacija (1). Normalizovani transformatori predstavljani su takođe kolom sa slike 1 [6]. Otočne admitanse njihovih faza međusobno su različite ($\hat{y}'_{0kk} \neq \hat{y}''_{0kk}$). U ovim modelima, jedna od ovih otočnih admitansi jednaka je nuli.

Potrošači, DG, otočni kondenzatori i kalemovi takođe su priključeni u čvorovima. Statički VAR uređaji se tretiraju kao potrošači ili DG sa aktivnim snagama nultih vrednosti. Na ovaj način, svaka faza bilo kog elementa, osim potrošača i DG, predstavljena je u faznom domenu raspregnutim Π -kolom (slika 1). Potrošači i DG modeluju se otočnim granama, npr. SH_k na slici 1. Kondenzatori/kalemovi su modelovani admitansama otočnih grana priključenih u čvorovima Π -kola (npr. admitansa \hat{y}''_{0kk} na slici 1).

Potrošač priključen u čvoru k modeluje se na dva načina: 1) aktivnom i reaktivnom snagom i 2) admitansom (impedansom). U prvom slučaju, kompleksna snaga zavisi od napona [relacije (10a) i (10b) u delu 4] [16]:

$$\hat{S}_k(U_k) = \hat{U}_k \hat{I}_k^* = P_k(U_k) + jQ_k(U_k). \quad (3)$$

Specificirane (poznate) snage i naponi („spec“ u superskriptima) koriste se za modelovanje potrošača admitansama/impedansama:

$$\hat{Y}_k = \frac{P_k^{spec} + jQ_k^{spec}}{(U_k^{spec})^2}, \quad \hat{Z}_k = (\hat{Y}_k)^{-1}. \quad (4)$$

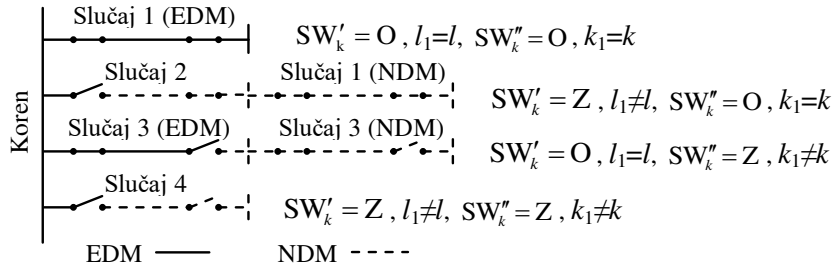
DG tipa PQ modeluju se kao potrošači čije su potrošnje aktivnih i reaktivnih snaga negativne vrednosti. DG tipa PV u svim postupcima SSKN tretiraju se čvorovima prekida i kompenzacionim reaktivnim snagama [3, 4].

Prekidi faze se simuliraju u faznim čvorovima. Dve moguće lokacije prekida su prikazane prekidačima (u prvom čvoru) i (u drugom čvoru) na slici 1. Prekid je predstavljen sa otvorenim prekidačem. U tom slučaju, čvor je podeljen na dva čvora – osnovni čvor i novogenerisani čvor: 1) osnovni čvor l i novogenerisani čvor $l1$ u slučaju otvaranja prekidača SW'_k i 2) osnovni čvor k i novogenerisani čvor $k1$ za otvaranje prekidača SW''_k . Kada faza k pripada višefaznoj sekciji, tada se prekidači ubacuju i u ostale faze sekcije.

Kada se fazni prekid simulira unutar višefazne sekcije, novi čvorovi se ubacuju na mesto simulacije prekida u svim fazama sekcije. Tako je originalna sekcija voda zamenjena sa dve nove sekcije. Time se simulacija prekida unutar faze sekcije voda svodi na simulaciju kod faznog čvora.

Fazni prekidi dele mrežu na dva dela: 1) deo pod naponom mreže (*energizovan deo mreže* – EDM) koji se sastoji od svih faza pod naponom, uključujući i otočne elemente priključene u korespondentnim čvorovima; 2) deo mreže bez napajanja (*neenergizovan deo mreže*–NDM) koji se sastoji od svih faza bez napona, uključujući sve isključene faze nizvodno od prekinutih faza. Ovaj deo mreže obuhvata otočne elemente povezane u korespondentnim čvorovima. Kada jednofazni DG pripada delu mreže bez napona, isključuje se iz mreže. Kada najmanje jedna faza trofaznog DG pripada delu mreže bez napona, ceo DG se isključuje iz mreže.

Moguća su četiri slučaja statusa prekidača SW'_k i SW''_k u fazi k sa slike 1. Primeri ovih slučajeva prikazani su na slici 2 sa odgovarajućim topološkim posledicama.



Slika 2 – Slučajevi mogućih statusa prekidača iz Tabele 1 (O – otvoren, Z – zatvoren)

Topološke informacije o sprezi između faza unutar višefaznog elementa opisane su sa dva para skupova (npr. za fazu k):

- 1) Ω'_k i Ψ''_k sadrže indekse faza pod naponom i bez napona sa kojima je faza k spregnuta, respektivno;
- 2) Ω'_k i Ψ'_k sadrže indekse čvorova faza bližih korenu čiji su indeksi sadržani u skupovima Ω''_k i Ψ''_k , respektivno.

Sada se mogu dati sledeći opšti oblici relacija (2a) i (2b):

$$\hat{E}_k = \sum_{i \in \Omega'_k \cup \Psi'_k} \hat{z}_{ik} \hat{I}_i, \quad (5a)$$

$$\hat{I}'_{CHK} = - \sum_{i \in \Omega'_k \cup \Psi'_k} \hat{y}'_{0ik} \hat{U}_i, \quad \hat{I}''_{CHK} = - \sum_{i \in \Omega''_k \cup \Psi''_k} \hat{y}''_{0ik} \hat{U}_i. \quad (5b)$$

Napon (5a) i struje (5b) jednaki su nuli za jednofazne elemente.

3. POSTUPAK PRORAČUNA MODELA MREŽE

Iterativni postupak za proračun modela mreže sastoji se od šest blokova, gde je h prethodna, a $h+1$ je tekuća aproksimacija promenljivih.

Blok 1 – Prva pretpostavka:

1. Naponi svih čvorova EDM jednaki su naponima odgovarajućih korena;
2. Naponi svih čvorova i struje svih grana NDM jednaki su nuli.

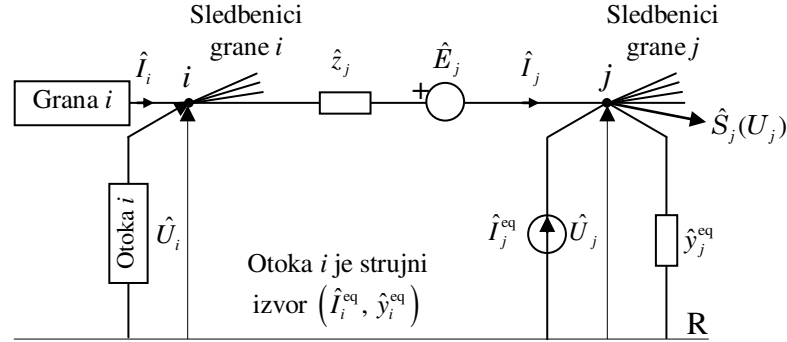
ENERGIZOVAN DEO MREŽE

Ovaj deo mreže predstavljen je Γ -segmentima prikazanim na slici 3 sa potrošačima i generatorima predstavljenih snagom – strelica iz čvora j , $|\hat{S}_j(U_j)| > 0$. Γ -segmenti su izvedeni iz Π -segmenata prikazanih na slici 1, za sve statuse prekidača SW'_k and SW''_k . Samo slučajevi 1 i 3 odgovaraju energizovanom delu mreže [tj. slučaj 1 (EDM) i slučaj 3 (EDM) na slici 2]. Naponski generator (\hat{E}_j, \hat{z}_j) sa slike 3 odgovara naponskom generatoru (\hat{E}_k, \hat{z}_{kk}) sa slike 1. Kada Γ -segment (faza) j nema prethodnika, tada čvor i na slici 3 je koren mreže.

Svaki Γ -segment sastoji se od redne grane i otočne grane (grane i otoke u nastavku). Svaka grana je naponski generator, tj. (\hat{E}_j, \hat{z}_j) na slici 3. Svaka otoka sastoji se od paralelne veze potrošača/DG sa kompleksnom snagom $\hat{S}_j(U_j)$, kondenzatorom/kalemom, i ekvivalentnim strujnim generatorom $(\hat{I}_j^{\text{eq}}, \hat{y}_j^{\text{eq}})$.

Broj Γ -segmenta (grana) energizovanog dela mreže je N_E . Broj čvorova jednak je N_E uvećan za broj korena. Zbog novogenerisanih čvorova, mreža se ponovo numeriše u skladu sa numeracijom po slojevima.

Razmatra se Γ -segmentat j čiji je prvi čvor i . Kada je čvor i koren, njegov napona je specificiran. Koristeći sliku 1 i sliku 3, sumiranje struja može se prikazati sledećim relacijama:



Slika 3 – Γ -segmenti energizovanih i neenergizovanih delova mreže

Blok 2 – Sumiranje struja:

- Otočne struje (potrošnja/proizvodnja):

$$\hat{I}_{\text{SH}j}^{h+1} = \begin{cases} \left[\hat{S}_j(U_j^h) / U_j^h \right]^* & \text{za Slučaj 1,} \\ 0, & \text{za Slučaj 3;} \end{cases} \quad j = N_E, \dots, 2, 1. \quad (6a)$$

- Kompensacione (kapacitivne) struje – relacije (5b):

$$\hat{I}_{\text{CH}j}^{h+1} = - \sum_{i \in \Omega_j^* \cup \Psi_j^*} \hat{y}_{0ij}^* \hat{U}_i^h, \quad \hat{I}_{\text{CH}j}^{h+1} = - \sum_{i \in \Omega_j^* \cup \Psi_j^*} \hat{y}_{0ij}^* \hat{U}_i^h, \quad \text{za oba slučaja, 1 i 3;} \quad j = N_E, \dots, 2, 1. \quad (6b)$$

- Struje ekvivalentnih strujnih generatora Γ -segmenta:

$$\hat{I}_j^{\text{eq}h+1} = \begin{cases} \hat{I}_{\text{CH}j}^{h+1} + \sum_{m \in \mathbf{M}_j} \hat{I}_{\text{CH}m}^{h+1}, & \text{za Slučaj 1,} \\ \hat{I}_{\text{CH}j}^{h+1}, & \text{za Slučaj 3;} \end{cases} \quad j = N_E, \dots, 2, 1. \quad (6c)$$

- Struje grane Γ -segmenta:

$$\hat{I}_j^{h+1} = \begin{cases} \hat{I}_{\text{SH}j}^{h+1} + \hat{I}_j^{\text{eq}h+1} + \hat{y}_j^{\text{eq}} \hat{U}_j^h + \sum_{m \in \mathbf{M}_j} \hat{I}_m^{h+1}, & \text{za Slučaj 1,} \\ \hat{I}_j^{\text{eq}h+1} + \hat{y}_j^{\text{eq}} \hat{U}_j^h, & \text{za Slučaj 3.} \end{cases} \quad j = N_E, \dots, 2, 1. \quad (6d)$$

Blok 3 – Korekcija napona:

- Indukovani (kompensacioni) naponi grana mogu se izračunati koristeći se $(h+1)$ -im aproksimacijama struja grana EDM i (h) -tim aproksimacijama struja grana NDM:

$$\hat{E}_j^{h+1} = \sum_{k \in \Omega_j^* \cup \Psi_j^*} \hat{z}_{kj} \hat{I}_k^s, \quad \text{za oba slučaja, 1 i 3,} \quad j = 1, 2, \dots, N_E. \quad (7a)$$

$$s = h + 1 \text{ kada } k \in \Omega_j^*, \text{ i } s = h \text{ kada } k \in \Psi_j^*;$$

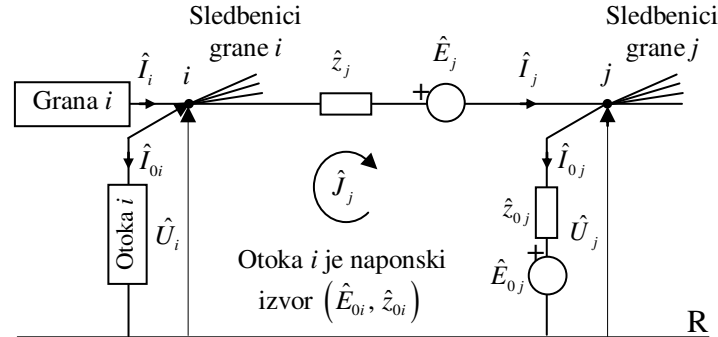
- Naponi čvorova:

$$\hat{U}_j^{h+1} = \hat{U}_i^{h+1} - \hat{E}_j^{h+1} - \hat{z}_j \hat{I}_j^{h+1}, \quad \text{za oba slučaja, 1 i 3;} \quad j = 1, 2, \dots, N_E. \quad (7b)$$

NEENERGIZOVAN DEO MREŽE

U NDM nema distributivnih generatora pa je režim ovog dela mreže posledica induktivnih i kapacitivnih sprega sa EDM. Neenergizovani deo počinje od čvora gde je simuliran prekid. Ovi čvorovi jesu: 1) novogenerisani čvorovi $l1$ za slučajeve 2 i 4, i 2) čvorovi k za slučaj 3, sa slike 1. Ovi čvorovi se nazivaju *topološki koreni* (bez idealnog naponskog generatora) za sve grane koje su direktno ili indirektno povezane s

njima. Topoloških korena ima onoliko koliko je simulirano prekida – N_j , a broj neenergizovanih faza (njihovih drugih čvorova) je N_L . Zbog nepostojanja idealnog generatora u topološkim korenima postupci orijentisani na grane [3-5, 14], kao i postupci orjentisani na čvorove [9-13] nisu pogodni za rešavanje ovog dela mreže. Zbog toga se model ovog dela mreže rešava metodom konturnih struja. Potrošnja u ovom delu mreže modeluje se konstantnim admitansama. Strujni generatori su transformisani u naponske generatore kao na slici 4.



Slika 4 – Γ -segmenti koji konstituišu ekvivalentno kolo neenergizovanog dela mreže

Blok 4 – Proračun struja grana i otoka:

1. Na osnovu relacije (5a) indukovani (kompenzacioni) naponi grana mogu se izračunati koristeći se poslednjim aproksimacijama struja grana EDM i raspoloživim aproksimacijama struja grana NDM:

$$\hat{E}_j^{h+1} = \sum_{k \in \Omega_j' \cup \Psi_j''} \hat{z}_{kj} \hat{I}_k^s, \quad j = N_1 + 1, N_1 + 2, \dots, N_1 + N_L; \quad (8a)$$

$s = h + 1$ kada $k \in \Omega_j'$, i $s = h$ kada $k \in \Psi_j''$,

2. Na osnovu relacija (5b) parovi kompenzacionih (kapacitivnih) struja mogu se izračunati koristeći se poslednjim aproksimacijama napona EDM i raspoloživim naponima NDM:

$$\hat{I}_{CHj}^{h+1} = - \sum_{k \in \Omega_j' \cup \Psi_j''} \hat{y}_{0kj}' \hat{U}_k^s, \quad \hat{I}_{CHj}^{h+1} = - \sum_{k \in \Omega_j' \cup \Psi_j''} \hat{y}_{0kj}'' \hat{U}_k^s, \quad j = N_1 + 1, N_1 + 2, \dots, N_1 + N_L; \quad (8b)$$

$s = h + 1$ kada $k \in \Omega_j' \vee \Omega_j''$, i $s = h$ kada $k \in \Psi_j' \vee \Psi_j''$,

3. Ekvivalentna struja drugog čvora Γ -segmenta – slika 3:

$$\hat{I}_j^{eq \ h+1} = \begin{cases} \hat{I}_{CHj}^{h+1} + \sum_{m \in M_j} \hat{I}_{CHm}^{h+1}, & \text{za Slučajeve 1 i 2,} \\ \hat{I}_{CHj}^{h+1}, & \text{za Slučajeve 3 i 4,} \\ \sum_{m \in M_j} \hat{I}_{CHm}^{h+1}, & j \text{ je topološki koren,} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, N_1 + N_L; \quad (8c)$$

4. Strujni generatori ($\hat{I}_j^{eq}, \hat{y}_j^{eq}$) mogu se transformisati u naponske generatore. ($\hat{E}_{0j}, \hat{z}_{0j}$) – slika 4:

$$\hat{E}_{0j}^{h+1} = \frac{\hat{I}_j^{eq \ h+1}}{\hat{y}_j^{eq}}, \quad j = 1, 2, \dots, N_1 + N_L; \quad (8d)$$

Suma admitansi incidentnih čvoru j , uključujući kondenzatore ili kalemове, admitanse izražene relacijom (4) kojima je definisana potrošnja u čvoru j moraju biti uključene u \hat{y}_j^{eq} .

5. Kanonična matična forma metoda konturnih struja glasi [17]:

$$\hat{\mathbf{J}}_{kontura}^{h+1} = \hat{\mathbf{Z}}_{kontura}^{-1} \hat{\mathbf{E}}_{kontura}^{h+1}; \quad (8e)$$

Elementi vektora $\hat{\mathbf{E}}_{kontura}^{h+1}$ su sume naponskih izvora (sa određenim predznakom) po konturama, a elementi vektora $\hat{\mathbf{J}}_{kontura}^{h+1}$ su konturne struje.

6. Struje grana sa slike 4 glase:

$$\hat{I}_j^{h+1} = \hat{\mathbf{J}}_j^{h+1}, \quad j = N_1 + 1, N_1 + 2, \dots, N_1 + N_L; \quad (8f)$$

7. Otočne struje sa slike 4 glase:

$$\hat{I}_{0j}^{h+1} = \begin{cases} \hat{J}_j^{h+1} - \sum_{m \in M_j} \hat{J}_m^{h+1}, & \text{za Slučajeve 1 i 2,} \\ \hat{J}_j^{h+1}, & \text{za Slučajeve 3 i 4,} \\ - \sum_{m \in M_j} \hat{J}_m^{h+1}, & j \text{ je topološki koren,} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, N_1 + N_L. \quad (8g)$$

Blok 5 – Proračun napona koristeći se otočnim strujama u tekućoj iteraciji i naponima idealnih naposnkih generatora – slika 4:

$$\hat{U}_j^{h+1} = \hat{E}_{0j}^{h+1} + \hat{z}_{0j} \hat{I}_{0j}^{h+1}, \quad j = 1, 2, \dots, N_1 + N_L. \quad (9)$$

Blok 6 – Provera konvergencije:

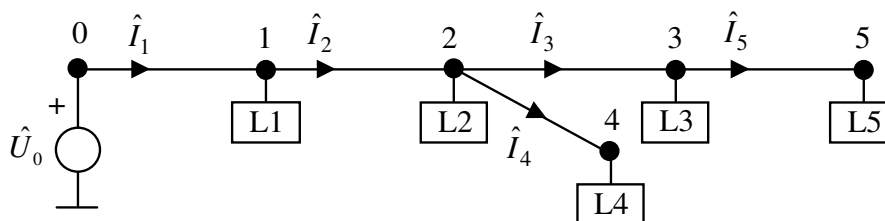
Dostignuta konvergencija: Da – **KRAJ**; Ne – povećati h za jedan i otići na Blok 2.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Razvijeni proračun tokova snaga verifikovan je na maloj test mreži. Slika 5 ilustruje trofaznu 20 kV test mrežu sa 6 sabirnica. Izvor mreže je numerisan sa 0. Ostale sabirnice, 1–5, su potrošački čvorovi (PQ tipa). Oni su označeni sa L_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$). Sve trofazne sekcije su uravnotežene i imaju istu dužinu – 1,5148 milja. Njihova direktna i inverzna redna impedansa i admitansa iznose $(0,306+j0,627) \Omega/\text{milja}$ i $(0,00+j15,24) \mu\text{S}/\text{milja}$. Nulte redne impedanse su tri puta veće od direktne redne impedanse. Nulte otočne admitanse su tri puta manje od direktne otočne admitanse. Trofazna potrošnja svih sabirnica zavisi od modula napona na sledeći način:

$$P_k(u_k) = (0,4 + 0,3u_k + 0,3u_k^2) \times 1200 \text{ kW}, \quad u_k[\text{r.j.}] = \frac{U_k[\text{kV}]}{U_{\text{nominalno}}[\text{kV}]} = \frac{U_k[\text{kV}]}{(20/\sqrt{3})[\text{kV}]} \quad (10a)$$

$$Q_k(u_k) = (0,4 + 0,3u_k + 0,3u_k^2) \times 600 \text{ kVAr}. \quad (10b)$$



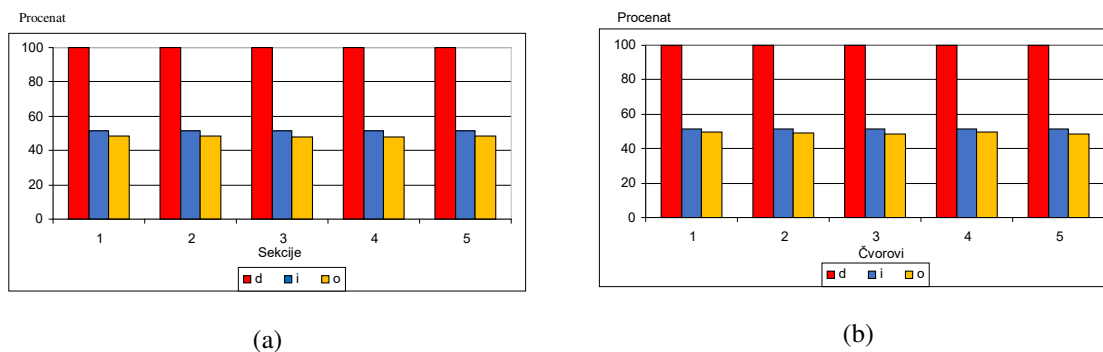
Slika 5 – Mala test mreža

Slučaj 1: Trofazne snage su jednako raspoređene po fazama pa je režim pre prekida bio simetričan. Simuliran je jedan prekid faze a sekcije 1 bliži korenu mreže. U tabeli 1 su upoređeni rezultati dobijeni razvijenim postupkom tokova snaga (TS) i kanoničnim modelom (KM) [1]. Očigledno je da su naponi proračunati razvijenim postupkom kanoničnim modelom različiti. Ova razlika je veoma značajna za prekinutu fazu (sive kolone u tabeli 1). Što je veća mreže ove razlike su veće. Ovo dokazuje tvrdnju u uvodu da su tradicionalni proračuni kvarova sa prekidima faza neuravnoteženih mreža prilično pogrešni. Ovo dalje prouzrokuje velike greške u rezultatima drugih proračuna koji su zasnovani na rezultatima mreže sa prekidima faza.

Tabela 1 Slučaj 1 (6 iteracija)

Indeks sekcije/sabirnice	Metod	Struje [A]			Naponi [V]		
		a	b	c	a	b	c
1	TS	0,000	193,998	193,846	120,800	11261,455	11397,031
	KM	0,000	189,844	194,292	434,939	11267,261	11393,867
2	TS	0,390	155,314	155,134	109,463	11033,717	11280,019
	KM	0,874	151,598	155,537	343,901	11045,011	11273,968
3	TS	0,371	77,714	77,592	41,919	10920,076	11222,343
	KM	0,832	75,676	77,816	301,869	10934,499	11214,686
4	TS	0,054	38,815	38,779	20,407	10976,695	11251,368
	KM	0,121	37,930	38,875	322,229	10989,257	11244,627
5	TS	0,229	38,872	38,802	66,828	10863,268	11193,669
	KM	0,515	37,807	38,920	282,055	10879,352	11185,167

Nesimetrija struja i napona je značajna kada se pogledaju simetrične komponente proračunatih struja i napona. To je očigledno sa slike 6a i slike 6b, nesimetrija struja i napona se odražava na značajne vrednosti inverznih i nultih komponenti struja i napona, koje iznose oko 50% njihove direktne komponente.



Slika 6 – Slučaj 1, simetrične komponente struja (a) i napona (b)

Slučaj 2: Raspodelom faznih aktivnih i reaktivnih snaga svih trofaznih potrošača na sledeći način: 40% trofazne snage u fazi a, 25% u fazi b i 35% u fazi c. Režim pre prekida bio je nesimetričan. Simulirana su dva simultana prekida: 1) faza a sekcije 1 bliže korenu mreže, i 2) faza b sekcije 5 bliže sabirnici 2. Rezultati ove simulacije su dati u tabeli 2.

Tabela 2 Slučaj 2 (6 iteracija)

Indeks sekcije/sabirnice	Struje [A]			Naponi [V]		
	a	b	c	a	b	c
1	0,000	115,968	203,804	103,504	11372,204	11332,611
2	0,430	87,025	163,127	99,244	11241,239	11159,961
3	0,401	58,040	81,610	41,437	11155,848	11083,952
4	0,136	0,000	40,758	34,649	22,761	11102,958
5	0,249	29,028	40,814	64,859	11113,178	11046,105

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu se predlaže novi postupak za proračun tokova snaga višefaznih distributivnih mreža sa simultanim prekidima faza. Razvijeni postupak zasniva se na nelinearnom modelu energizovanog dela mreže i linearnom modelu neenergizovanog dela mreže. Na osnovu numeričkih rezultata očigledno je da novi postupak veoma efikasno obrađuje nekoliko istovremenih prekida. Efikasnost razvijenog postupka za proračune tokova snaga je ista kao i efikasnost tradicionalnih postupaka SSKN. Zbog nedostatka prostora nisu dati primeri proračuna realnih distributivnih mreža, zajedno sa vremenima konvergencije. Ta vremena pokazuje da se razvijeni postupak za proračune tokova snaga može primeniti za velike distributivne mreže u realnom vremenu.

6. LITERATURA

1. Strezoski VC, Bekut D (1991) A Canonical Model for the Study of Faults in Power Systems. IEEE Transaction on Power Systems 4: 1493-1499. <https://www.doi.org/10.1109/59.116995>
2. Strezoski LV, Prica MD, Loparo KA (2017) Generalized Δ -circuit concept for integration of distributed generators in online short-circuit calculations. IEEE Transactions on Power Systems 4: 3237-3245. <https://www.doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2617158>
3. Shirmohammadi D, Hong HW, Semlyen A, Luo GX (1988) A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks. IEEE Transactions on Power Systems 2: 753-762. <https://www.doi.org/10.1109/59.192932>
4. Luo GX, Semlyen A (1990) Efficient Load Flow for Large Weekly Meshed Networks. IEEE Transactions on Power Systems 4: 1309-1316. <https://www.doi.org/10.1109/59.99382>
5. Rajcic D, Taleski R (1998) Two Novel Methods for Radial and Weakly Meshed Network Analysis. Electric Power Systems Research 2: 79-87. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(98\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(98)00067-4)
6. Xiao P, Yu DC, Yan W (2006) A Unified Three-Phase Transformer Model for Distribution Load Flow Calculations. IEEE Transactions on Power Systems. 1: 153-159. <https://www.doi.org/10.1109/TPWRS.2005.857847>

7. Cheng CS, Shirmohammadi D (1995) A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems* 2: 671-679. <https://www.doi.org/10.1109/59.387902>
8. Desoer C, Kuh E. (1969) *Basic Circuit Theory*. McGraw-Hill Inc.
9. Garcia PAN, Pereira JLR, Carneiro S, da Costa JVM, Martins N (2000) Three-Phase Power Flow Calculations Using the Current Injection Method. *IEEE Transaction on Power Systems* 2: 508-514. <https://www.doi.org/10.1109/59.867133>
10. Vieira Jr JCM, Freitas W, Morelato A (2004) Phase-Decoupled Method for Three-Phase Power-Flow Analysis of Unbalanced Distribution Systems. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution* 5: 568-574. <https://www.doi.org/10.1049/ip-gtd:20040831>
11. Chen TH, Chen MS, Hwang KJ, Kotas P, Chebli EA (1991) Distribution System Power Flow Analysis – A Rigid Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery* 3: 1146-1152. <https://www.doi.org/10.1109/61.85860>
12. Benato R, Paolucci A, Turri R (2001) Power flow solution by a complex admittance matrix method. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 3: 181-188. <https://www.doi.org/10.1002/etep.4450110305>
13. Strezoski VC, Vojnović NR, Vidović PM (2018) New bus classification and unbalanced power flow of large-scale networks with electronically interfaced energy resources. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 3: 1-16. <https://www.doi.org/10.1002/etep.2502>
14. Strezoski VC, Vidović PM (2015) Power flow for general mixed distribution networks. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 10: 2455-2471. <https://www.doi.org/10.1002/etep.1974>
15. Tinney WF, Walker JW (1967) Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization. *Proceeding of the IEEE* 55(11): 1801–1809. <https://www.doi.org/10.1109/PROC.1967.6011>
16. Obrenić MZ, Vidović PM, Strezoski LV (2019) A novel intervals-based algorithm for the distribution short-circuit calculation. *Electrical Engineering* 101: 1145–1162. <https://www.doi.org/10.1007/s00202-019-00853-2>
17. Chatzarakis GE, Tortoreli MD, Tziolas AD (2003) Fundamental loop-current method using ‘virtual voltage sources’ technique for special cases. *International Journal of Electrical Engineering Education*; 3: 188-207. <https://www.doi.org/10.7227/IJEEE.40.3.3>