

TROFAZNI TOKOVI SNAGA DISTRIBUTIVNIH MREŽA

V. Strezoski¹, Fakultet tehničkih nauka, Srbija
P. Vidović, Fakultet tehničkih nauka, Srbija

1. UVOD

Stacionarni simetrični režimi trofaznih distributivnih mreža jesu režimi s kojima može da se aproksimira vrlo veliki broj manje ili više nesimetričnih režima. Definitivna rešenja za proračune simetričnih tokova snaga trofaznih radijalnih distributivnih (uravnoteženih) mreža² i mreža s malim brojem kontura (slaboupetljane mreže), utvrđena su pre dvadesetak godina [2, 3, 4]. Ta rešenja su zasnovana na numeraciji čvorova i grana mreže po slojevima (layers) i izuzetno efikasnim procedurama *sumiranja struja* (sweep up – "čišćenja na gore") i *korekcija napona* (sweep down – "čišćenja na dole"), na pogonskoj (pofaznoj) ekvivalentnoj šemi mreže za simetričan režim direktnog redosleda. Prva procedura je zasnovana na činjenici da su tokovi snaga (struja) u granama mreže vrlo dobro određeni rasporedom i veličinom potrošača, topologijom mreže i poznatom, vrlo dobrom aproksimacijom napona čvorova mreže (bliskim nominalnim vrednostima). Ta procedura je direktno zasnovana na primeni prvog – strujnog Kirchhoff-ovog zakona, idući od grana poslednjeg sloja prema izvoru (korenu) mreže – napojnoj transformatorskoj stanici. Druga procedura se sastoji od direktne primene drugog – naponskog Kirchhoff-ovog zakona za proračun napona čvorova mreže, počevši od poznatog napona izvora mreže, idući prema čvorovima poslednjeg sloja. Iterativnom primenom ovih procedura, u zadovoljavajućem broju iteracija, postiže se rešenje problema simetričnih tokova snaga distributivne mreže, sa unapred specificiranom tačnošću. Neposredna matematička podloga opisane procedure nalazi se u klasičnom Gauss/Seidel-ovom iterativnom metodu za rešavanje sistema nelinearnih jednačina, koji je vrlo dobro povezan s prirodom radijalnih distributivnih mreža [2].

Kada su u pitanju proračuni mreža s malim brojem kontura (slaboupetljane distributivne mreže) i distributivnim generatorima, proračuni tih mreža se kompenzacionim postupcima svode na proračune radijalnih mreža [2, 3]. Zbog toga i zbog nedostatka prostora u radu, ovde se obrađuju samo radijalne mreže.

Problem proračuna trofaznih nesimetričnih tokova snaga distributivnih mreža otvoren je odmah posle vrlo uspešnog rešenja problema simetričnih tokova snaga. Nesimetrični režimi jesu realni režimi trofaznih distributivnih mreža, koji mogu da budu posledica neuravnoteženosti potrošača (njihove fazne snage nisu jednake u svim fazama) i neuravnoteženosti trofaznih vazdušnih vodova koji nisu transponovani, kao i elektromagnetskih i kapacitivnih sprega između paralelno vođenih vazdušnih vodova.

Efikasni postupak za proračun simetričnih tokova snaga [2], generalizovan je za proračun nesimetričnih tokova snaga distributivnih mreža u [5]. Efikasnost jeste postignuta, ali, obuhvat generalizacije je sužen na distributivne mreže jedinstvenog naponskog nivoa, dakle, na mreže bez transformatora. Suštinski problem proračuna nesimetričnih tokova snaga distributivnih mreža iskrsava upravo kada se uvažavaju transformatori. Naime, njihovim uvažavanjem kod proračuna nesimetričnih tokova snaga, nailazi se na teškoće pri primeni izuzetno efikasnih

¹ Vladimir Strezoski, tel. 021/455-865, e-mail vstr@uns.ns.ac.yu.

² Pojmovi simetrije i uravnoteženosti trofaznih mreža precizno su definisani u [1].

procedura sumiranja struja i korekcija napona [6]. Zato je u literaturi, težište rešenja problema nesimetričnih tokova snaga distributivnih mreža preneto na modelovanje distributivnih mreža primenom metoda nezavisnih napona [7] u faznom domenu. Dakle, umesto direktne, u pitanju je indirektna primena dva Kirchhoff-ova zakona. Proračuni tih modela se zasnivaju na implicitnoj inverziji matrica admitansi mreža (\hat{Y}_{BUS}) – njenoj LU faktorizaciji [8], koristeći se tehnikom retkih matrica [9] i optimalnoj numeraciji čvorova [10]. Njihov već utvrđeni naziv je *implicitni Z_{BUS} postupci*. Pored (implicitne) inverzije matrica velikih dimenzija, ovi postupci su opterećeni jednim još većim problemom – potrebom da se inverzija ponavlja kad god se topologija mreže promeni.

U ovom radu se predlaže postupak za proračun nesimetričnih tokova snaga (ne)uravnoteženih sredjenaponskih (SN) mreža sa uvažanim standardnim distributivnim transformatorima. Pri tom se pokazuje da nema potrebe, niti da je racionalno da se za taj proračun napuste izuzetno efikasni kompenzacioni postupci s procedurama sumiranja struja i korekcija napona, koji su utvrđeni za proračune simetričnih tokova snaga.

U drugom delu su dati modeli nesimetričnih režima trofaznih (ne)uravnoteženih potrošača, sekcija (vodova) i standardnih distributivnih uravnoteženih transformatora sa spregama Dy_n (n je oznaka za uzemljeno zvezdište), u faznom domenu. U trećem delu je izložen model (ne)uravnotežene trofazne distributivne mreže u (ne)simetričnom režimu, u faznom domenu, a u četvrtom delu je prikazan postupak za proračun modela. Verifikacija razvijenog postupka, napravljena njegovim poređenjem sa implicitnim Z_{BUS} postupkom, data je u petom delu. U šestom delu su dati zaključci. Sedmi deo sadrži prilog, a na kraju je navedena literatura korišćena za pisanje ovog rada.

2. TROFAZNI MODELI ELEMENATA MREŽE

U ovom delu su obrađeni matematički modeli nesimetričnih režima trofaznih (ne)uravnoteženih potrošača, sekcija (vodova) i transformatora sa spregama Dy_n . Kada se sekcije i transformatori nalaze u okviru radijalne distributivne mreže, tada može da se definiše njihov *početak* i *kraj*. Naime, čvor sekcije bliži izvoru napajanja jeste njen početak, a čvor udaljeniji od izvora napajanja – kraj sekcije. Primar i sekundar transformatora jesu početak i kraj transformatora, respektivno.

2.1. Potrošači

Kompleksna snaga potrošnje potrošača (potrošačkog područja) funkcija je napona i učestanosti [11]. U proračunima stacionarnih tokova snaga, vrednost učestanosti je unapred specificirana. Dakle, fazna aktivna (P) i reaktivna snaga potrošnje (Q) potrošača priključenog u čvoru j , funkcije su samo od napona [8, 12]. One se obično iskazuju preko tri komponente [12]: 1) konstantna snaga, 2) snaga srazmerna s modulom napona, odnosno snaga s konstantnim modulom struje (I) i faktorom snage ($\cos\varphi$, $\sin\varphi$) i 3) konstantna impedansa (admitansa – $\hat{Y} = G + jB$):

$$P_{ji}(U_{ji}) = P_{ji}^{sp} + I_{ji}^{sp} \cos \varphi_{ji}^{sp} U_{ji} + G_{ji}^{sp} U_{ji}^2, \quad (2.1.1a)$$

$$Q_{ji}(U_{ji}) = Q_{ji}^{sp} + I_{ji}^{sp} \sin \varphi_{ji}^{sp} U_{ji} + B_{ji}^{sp} U_{ji}^2, \quad (2.1.1b)$$

pri čemu je j indeks trofaznog čvora s kojeg se napaja potrošač, a i se odnosi na fazu, $i \in \{a, b, c\}$; "sp" u superskriptu ukazuje na specificiranu vrednost. Ako su, za jednake module napona, aktivne i reaktivne snage sve tri faze jednake, onda je reč o uravnoteženom potrošaču.

2.2. Sekcije

Šema (ne)uravnotežene sekcije trofaznog voda prikazana je na slici 2.2.1. Trofazni čvorovi k i j jesu početak i kraj sekcije. Matematički model sekcije glasi (otočni parametri na oba kraja sekcije jednaki su):

$$\hat{I}_j = \hat{I}_j'', \quad (2.2.1a)$$

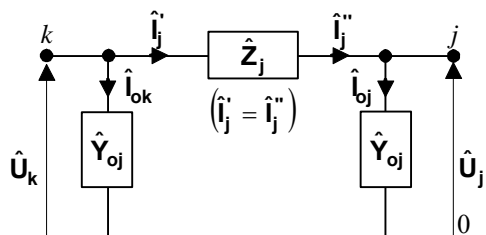
$$\hat{I}_{ok} = \hat{Y}_{oj} \hat{U}_k, \quad \hat{I}_{oj} = \hat{Y}_{oj} \hat{U}_j, \quad (2.2.1b)$$

$$\hat{U}_j = \hat{U}_k - \hat{Z}_j \hat{I}_j', \quad (2.2.1c)$$

pri čemu su korišćene sledeće oznake: \hat{U}_k i \hat{U}_j su vektori faznih napona; \hat{I}_k i \hat{I}_j su vektori međusobno jednakih faznih struja na početku i kraju sekcije, a \hat{I}_{ok} i \hat{I}_{oj} su vektori faznih struja otočnih parametara na početku i kraju sekcije, svi s dimenzijama 3×1 ; \hat{Z}_j i \hat{Y}_{oj} predstavljaju matrične reprezentante rednih i otočnih parametara sekcije,

dimenzija 3×3 . Ako je sekcija uravnotežena, onda su te matrice cirkulame. Ako su još i svi vektori trojki napona i struja sekcije simetrični, onda je sekcija u simetričnom režimu.

2.3. Transformatori

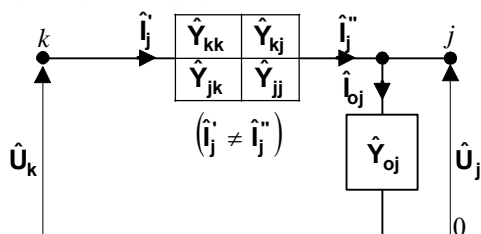


Slika 2.2.1 – Šema trofazne (ne)uravnotežene sekcije.

$$\hat{i}_{oj} = \hat{Y}_{oj} \hat{U}_j, \quad (2.3.1a)$$

$$\hat{i}_j' = \hat{Y}_{kk} \hat{U}_k + \hat{Y}_{kj} \hat{U}_j, \quad (2.3.1b)$$

$$-\hat{i}_j'' = \hat{Y}_{jk} \hat{U}_k + \hat{Y}_{jj} \hat{U}_j, \quad (2.3.1c)$$



Slika 2.3.1 – Šema trofaznog transformatora.

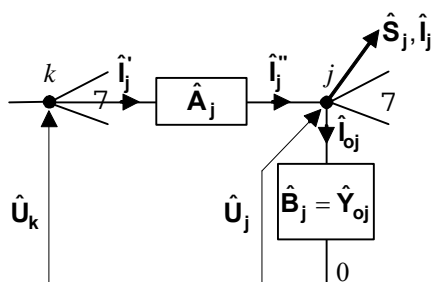
Na slici 2.3.1 prikazana je šema trofaznih transformatora čiji su namotaji na sekundaru povezani u zvezdu koja je uzemljena, s ma kojim sprežnim brojem, nezavisno od povezanosti namotaja na primaru. Matematički model transformatora, napisan saglasno s metodom nezavisnih napona, glasi [6, 13, 14] {idealni transformatori su eliminisani primenom sistema relativnih vrednosti 15]}:

pri čemu se čvorovi k i j odnose na početak i kraj (odnosno na primar i sekundar) transformatora, respektivno. Sa \hat{Y}_{oj} označen je matricni reprezent magnećenja transformatora (otočni parametri) predstavljeni na sekundarnoj strani transformatora, dimenzija 3×3 – Prilog. Matricni reprezentni rednih parametara transformatora, iz relacija (2.3.1b) i (2.3.1c), dimenzija 3×3 , za uobičajenu spregu distributivnih transformatora – Dy_{n5} , izvedeni su takođe u Prilogu.

3. TROFAZNI MODEL MREŽE

Saglasno s modelima (ne)uravnoteženih potrošača, sekcija i transformatora (deo 2), model trofazne radijalne distributivne mreže može da se konstituiše koristeći se isključivo trofaznim Γ segmentima prikazanim na slici 3.1. Svaki segment je asociiran jednoj grani mreže (sekciji voda ili transformatoru). Sa k i j su označeni trofazni čvorovi na početku i kraju segmenta. Sa \hat{U}_k i \hat{U}_j označeni su vektori faznih napona čvorova, dimenzija 3×1 . U čvoru j može da bude priključen potrošač s vektorom faznih kompleksnih snaga $\hat{S}_j = \mathbf{P}_j - j\mathbf{Q}_j$, dimenzije 3×1 . Vektor faznih struja potrošača označen je sa \hat{i}_j . Sa \hat{A}_j je označen matricni reprezent rednih parametara, u faznom domenu – redna grana segmenta Γ_j :

$$\hat{A}_j = \begin{cases} \hat{Z}_j, & \text{dimenzija } 3 \times 3, \text{ za sekciju – slika 2.2.1,} \\ \begin{bmatrix} \hat{Y}_{kk} & \hat{Y}_{kj} \\ \hat{Y}_{jk} & \hat{Y}_{jj} \end{bmatrix}, & \text{dimenzija } 6 \times 6, \text{ za transformator – slika 2.3.1.} \end{cases} \quad (3.1)$$



Slika 3.1 – Segment Γ_j trofazne radijalne distributivne mreže.

Vektori faznih struja s obe njegove strane označeni su sa \hat{i}_j' i \hat{i}_j'' , dimenzija 3×1 . Kada je u pitanju segment koji je asociiran sekciji, ti vektori su međusobno jednaki; kada je u pitanju transformator, čak i kada je normalizovan, to nije slučaj – ti vektori međusobno nisu jednaki. Sa \hat{B}_j (dimenzija 3×3) označen je admitantni matricni reprezent otočnih parametara – otočna grana segmenta Γ_j : $\hat{B}_j = \hat{Y}_{oj}$. Iako je korišćena ista oznaka kao u slučaju otočnih parametara sekcije i transformatora, \hat{Y}_{oj} ovde predstavlja sumu admitantnih matricnih reprezenata otočnih parametara kraja

sekcije ili transformatora kojoj ili kojem je asociiran segment Γ_j , otočnih parametara na počecima sekcija ili transformatora koji se napajaju preko razmatrane sekcije i matičnih reprezentata elemenata direktno priključenih u čvoru j (npr, baterija kondenzatora). Sa \hat{I}_{0j} je označena struja otočne grane segmenta Γ_j . Dakle, matični reprezent otočnih parametara na početku sekcije ili transformatora kojoj ili kojem je asociiran segment Γ_j , pridružen je otopnoj grani segmenta Γ_k – prethodnika razmatranog segmenta Γ_j . Ako je čvor k izvor mreže (dakle razmatrani segment Γ_j nema prethodnika), onda otočni parametri na početku sekcije ili transformatora kojoj ili kojem je razmatrani segment Γ_j asociiran, ne utiču na proračun tokova snaga, pa se i ne razmatraju.

4. PRORAČUN NESIMETRIČNIH TOKOVA SNAGA

Razmatra se radijalna, trofazna, (ne)uravnotežena SN distributivna mreža, sa n trofaznih čvorova i $(n-1)$ granom ($n \geq 2$), u (ne)simetričnom režimu. Mrežu čine SN sekcije i distributivni – SN/NN transformatori (NN – niski napon). Ona može da se prikaže radijalnim rasporedom $(n-1)$ trofaznih Γ segmenata. Čvorovi, pa tako i Γ segmenti, numerisani su po slojevima. Prvi čvor je izvor sa specificiranim (ne)simetričnim trofaznim naponom. Potrošači mogu da budu priključeni na NN stranama distributivnih transformatora, ali i direktno na SN mrežu. Neka su primenom sistema relativnih vrednosti eliminisani idealni transformatori u ekvivalentnim šemama svih transformatora.

Postupak za proračun nesimetričnih tokova snaga dat je blok-dijagramom prikazanim na slici 4.1. Zbog jednakosti struja na početku i kraju sekcije, procedure sumiranja struja i korekcija napona Γ segmenata asociiranih sekcijama su trivijalne. One su očigledne sa blok-dijagrama. Ono što nije trivijalno, to su iste procedure kada su u pitanju Γ segmenti asociirani transformatorima – blokovi I i II na slici 4.1, respektivno. Blok I se odnosi na proračun aproksimacija faznih struja sekundara i njihovo iznošenje na primar transformatora (procedura sumiranja struja). Blok II se odnosi na korekciju faznih napona sekundara na osnovu već korigovanih faznih napona primara i faznih struja transformatora izračunatih u proceduri sumiranja struja (procedura korekcija napona). Od sprega distributivnih transformatora obrađena je samo Dy_{n5} , sa specificiranom potrošnjom na njegovom sekundaru (2.1.1). Suština obrade sprega sa ostalim sprežnim brojevima je ista. Zvezdište transformatora je uzemljeno direktno, pošto drugačije uzemljenje ne utiče na suštinu postupka koji se izlaže.

Ako se raspoloža s kvalitetnom aproksimacijom napona na primaru transformatora \hat{U}_k , a to je u iteracijama posle prve, za to iznošenje struje na primar koristi se relacija (2.3.1b):

$$\hat{I}_j' = \hat{Y}_{kk} \hat{U}_k + \hat{Y}_{kj} \hat{U}_j. \quad (4.1)$$

U prvoj iteraciji, struje se iznose prostom primenom normalizovanog odnosa transformacije razmatranog transformatora za simetričan režim direktnog redosleda, čime je rešen Blok I:

$$\hat{I}_j' = \hat{I}_j'' e^{j5\pi/6}. \quad (4.2)$$

Kada se do ovog transformatora stigne s procedurom korekcija napona, tada se raspoloža s kvalitetnom aproksimacijom napona njegovog primara \hat{U}_k , kao i aproksimacijom struja sekundara \hat{I}_j'' , izračunatom u proceduri sumiranja struja koja je prethodila. Naponi primara mogu da se prenesu na sekundar – procedura korekcija napona, na osnovu relacije (2.3.1c):

$$\hat{U}_j = -\hat{Y}_{jj}^{-1} (\hat{I}_j'' + \hat{Y}_{jk} \hat{U}_k), \quad (4.3)$$

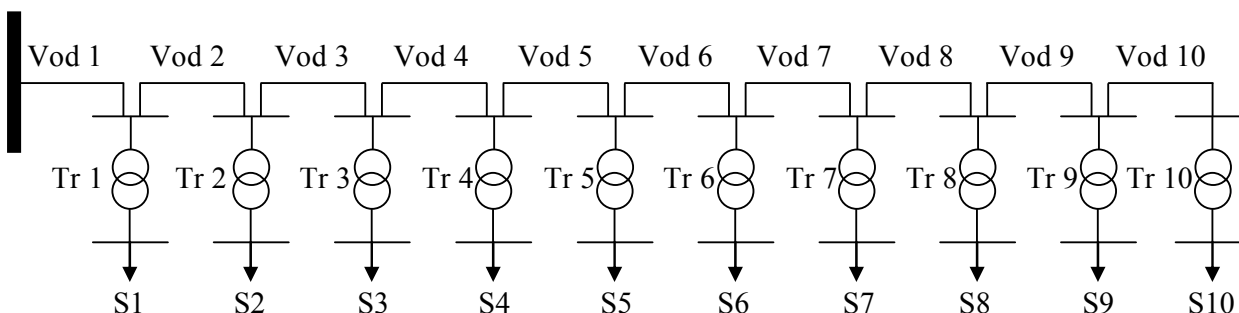
pošto je matrica koja se invertuje regularna – Prilog. Time je rešen i Blok II.

5. VERIFIKACIJA POSTUPKA

Pod verifikacijom razvijenog postupka (*Postupak 1*) podrazumeva se praktičan dokaz da je on moguć i da je efikasniji od postupaka za proračun nesimetričnih tokova snaga distributivnih mreža, koji su utvrđeni u literaturi – implicitni Z_{BUS} postupci (*Postupak 2*). U tu svrhu se razmatra 20 kV test mreža prikazana na slici 5.1. U pitanju je mreža s jednim izvorom, deset 20 kV sekcija i deset distributivnih transformatora 20 kV/0.4 kV, svaki s potrošnjom na sekundaru. Da bi se omogućila potpuna rekonstrukcija rezultata proračuna, daju se kompletni podaci o mreži. Da bi se prostor koji zauzimaju podaci minimizovao, mreža je prilično unificirana. Sekcije, transformatori i potrošači su numerisani rednim brojevima od 1 do 10. Dužina sekcija iznosi 0.5 km. Prvih devet sekcija su uravnotežene, s podužnim pogonskim impedansama direktnog (inverznog) i nultog redosleda koje iznose: $(0.224 + j0.109) \Omega/\text{km}$ i $(0.87 + j1.03) \Omega/\text{km}$, respektivno. Deseta sekcija je neuravnotežena. Njene pogonske šeme direktnog i inverznog redosleda su spregnute međusobnom impedansom u iznosu od deset procenata pogonske impedanse direktnog

redosleda. Uticaj otočnih parametara je zanemaren. Svi transformatori su sprege Dy_n5 . Snage transformatora i naponi kratkog spoja iznose 630 kVA i 4.4 %, respektivno. Gubici kratkog spoja i struja praznog hoda (magnećenja) su zanemareni. Snage potrošača po fazama a, b i c nisu međusobno jednake (potrošači nisu uravnoteženi). One iznose: (100 – j50), (90 – j40) i (100 – j30) kVA, respektivno. Svaka sekcija, transformator na njenom kraju i potrošač na sekundaru transformatora označeni su istim indeksom. Fazni naponi izvora takođe nisu simetrični. Oni, po fazama a, b i c, iznose: $10.6e^{j0}$, $11.3e^{-j117}$ i $11.4e^{-j245}$ kV, respektivno.

Izvor mreže



Slika 5.1 – Test mreža.

Stanje mreže, izračunato s kriterijumom konvergencije 10^{-5} relativnih jedinica po korekcijama napona, iskazano naponima distributivnih transformatora, dato je u tabeli 5.1. Ono je izračunato Postupkom 1, polazeći sa četiri varijante početnih aproksimacija. To su:

- V1. Početne aproksimacije nepoznatih fazora napona čvorova jednake su naponima praznog hoda mreže, sa specificiranim naponima izvora.
- V2. Moduli početnih aproksimacija nepoznatih fazora napona iz prve varijante smanjeni na polovinu.
- V3. Moduli početnih aproksimacija nepoznatih fazora napona iz prve varijante povećani za 50%.
- V4. Vrednosti aproksimacija nepoznatih fazora napona faza b i c svakog čvora međusobno zamenjene (osim specificiranih napona izvora); dakle, u pitanju je još radikalnije "pogoršanje" početnih aproksimacija rešenja, u odnosu na varijante 2 i 3.

TABELA 5.1 – Fazori napona primara i sekundara distributivnih transformatora (Tr).

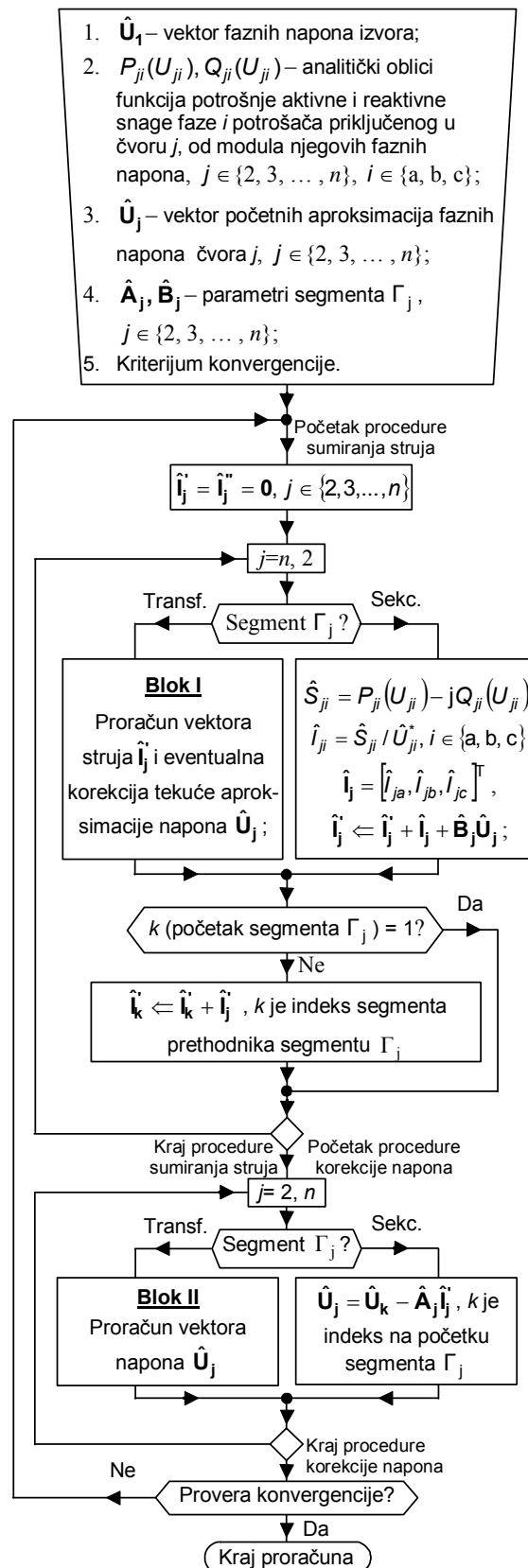
Tr	Fazori faznih napona [kV]		
	a	b	c
1	$10.587 e^{j0.004}$	$11.288 e^{j243.006}$	$11.389 e^{j114.990}$
	$0.213 e^{j211.229}$	$0.233 e^{j88.074}$	$0.212 e^{j35.247}$
2	$10.576 e^{j0.007}$	$11.277 e^{j243.012}$	$11.379 e^{j114.982}$
	$0.212 e^{j211.230}$	$0.233 e^{j88.072}$	$0.212 e^{j35.260}$
3	$10.565 e^{j0.011}$	$11.268 e^{j243.018}$	$11.370 e^{j114.974}$
	$0.212 e^{j211.231}$	$0.233 e^{j88.070}$	$0.212 e^{j35.272}$
4	$10.556 e^{j0.014}$	$11.260 e^{j243.022}$	$11.363 e^{j114.968}$
	$0.212 e^{j211.231}$	$0.233 e^{j88.068}$	$0.212 e^{j35.282}$
5	$10.548 e^{j0.016}$	$11.252 e^{j243.026}$	$11.356 e^{j114.962}$
	$0.212 e^{j211.232}$	$0.233 e^{j88.067}$	$0.212 e^{j35.291}$
6	$10.542 e^{j0.018}$	$11.247 e^{j243.030}$	$11.350 e^{j114.957}$
	$0.212 e^{j211.233}$	$0.233 e^{j88.066}$	$0.212 e^{j35.298}$
7	$10.537 e^{j0.020}$	$11.242 e^{j243.032}$	$11.346 e^{j114.953}$
	$0.212 e^{j211.233}$	$0.232 e^{j88.065}$	$0.211 e^{j35.304}$
8	$10.533 e^{j0.021}$	$11.238 e^{j243.034}$	$11.343 e^{j114.950}$
	$0.212 e^{j211.233}$	$0.232 e^{j88.064}$	$0.211 e^{j35.309}$
9	$10.530 e^{j0.022}$	$11.236 e^{j243.036}$	$11.340 e^{j114.948}$
	$0.212 e^{j211.234}$	$0.225 e^{j88.064}$	$0.211 e^{j35.312}$
10	$10.529 e^{j0.022}$	$11.235 e^{j243.037}$	$11.340 e^{j114.947}$
	$0.212 e^{j211.234}$	$0.232 e^{j88.064}$	$0.211 e^{j35.314}$

U varijanti V1, proračun je Postupkom 1 izvršen u četiri iteracije, u varijanti V3 u pet, a u ostalim varijantama u šest. Na osnovu toga je očigledno da je predloženi postupak praktično neosetljiv na početno rešenje, kao i da brzo konvergira i za početne aproksimacije koje jako odstupaju od rešenja.

Primenom implicitnog Z_{BUS} postupka (Postupak 2), proračun je izvršen u četiri iteracije sa istim kriterijumom konvergencije. Test sa različitim varijantama početnih aproksimacija nije napravljen zato što je Postupku 2 inherentno da je početna aproksimacija napona svih čvorova jednaka naponima mreže u praznom hodu, sa specificiranim naponima izvora (varijanta V1).

Vreme potrebno da se na personalnom računaru uradi 10^6 iteracija algoritma Postupka 1, iznosi 28.09^3 sekundi, a Postupka 2 – 97.85 sekundi. Dakle, odnos ta dva vremena jeste oko 3.5 puta u korist Postupka 1. Prednost Postupka 1 je znatno veća od iskazanog odnosa vremena, pošto u vremenu za sprovođenje Postupka 2 nisu uključena vremena za optimalnu numeraciju čvorova mreže i LU faktorizaciju matrice admitansi.

³ Pentium(R) 4 CPU 1.70 GHz.



Slika 4.1 – Blok-dijagram postupka za proračun nesimetričnih tokova snaga.

6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan postupak za proračun nesimetričnih tokova snaga (ne)uravnoteženih distributivnih mreža, sa uobičajenim distributivnim transformatorima sprega D_{yn} . On je izveden generalizacijom kompenzacionih

postupaka, s procedurama sumiranja struja i korekcija napona, koji se izuzetno efikasno koriste za proračune simetričnih tokova snaga distributivnih mreža. Verifikacijom performansi tog postupka, pokazano je da, u proračunima nesimetričnih tokova snaga (ne)uravnoteženih distributivnih mreža, ne samo da nije nužno, već da nije ni racionalno da se napuste izuzetno efikasni postupci razvijeni za proračune simetričnih tokova snaga. Ono što u radu, zbog nedostataka prostora, nije prikazano, to je sledeće: 1) tretman distributivnih transformatora s neuobičajenim spregama (namotaji na sekundarima povezani u trougao ili zvezdu sa izolovanim zvezdištem) i 2) tretman distributivnih mreža s više SN nivoa, koji su povezani transformatorima ma kojih sprega. I ove situacije jeste moguće da budu tretirane postupkom koji je prikazan u radu.

7. PRILOG – Izvođenje matričnih reizenata parametara transformatora

U ovoj glavi izvedeni su matrični reprezentori otočnih parametara – deo 7.1 i rednih parametara – deo 7.2, ekvivalentne šeme transformatora sa slike 2.3.1.

7.1. Otočni parametri

Kod trofaznog transformatora sprege Dy_n5 , matrica admitansi magnećenja svedena na sekundar, u domenu simetričnih komponenti, dijagonalna je matrica, tj. može da se napiše u sledećem obliku [16]:

$$\hat{Y}_m^{dio} = \begin{bmatrix} \hat{Y}_m^d & 0 & 0 \\ 0 & \hat{Y}_m^d & 0 \\ 0 & 0 & \hat{Y}_m^o \end{bmatrix}. \quad (7.1.1)$$

Sa \hat{Y}_m^d su označene međusobno jednake admitanse magnećenja transformatora za simetrične režime direktnog i inverznog redosleda (recipročne vrednosti impedansi magnećenja). Sa \hat{Y}_m^o je označena admitansa magnećenja za simetričan režim nultog redosleda.

Matrica admitansi magnećenja u faznom domenu, dobija se sledećom transformacijom matrice (7.1.1):

$$\hat{Y}_m^{abc} = \hat{A}^{-1} \hat{Y}_m^{dio} \hat{A}, \quad (7.1.2)$$

pri čemu je sa \hat{A} označena matrica transformacije faznog u domen simetričnih komponenti [16]:

$$\hat{A} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \hat{A}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \hat{a}^2 & \hat{a} & 1 \\ \hat{a} & \hat{a}^2 & 1 \end{bmatrix}, \hat{a} = e^{j120}, \quad (7.1.3)$$

odakle se dobija sledeća cirkularna i simetrična matrica:

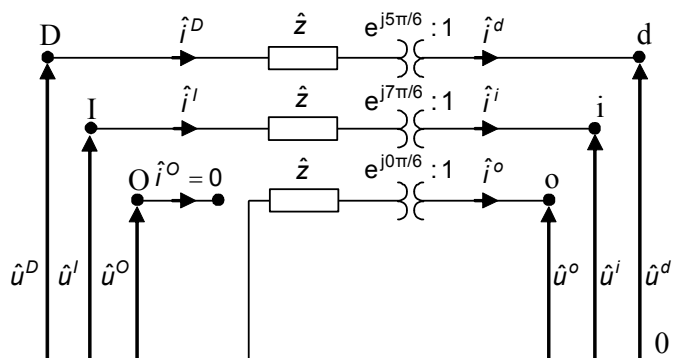
$$\hat{Y}_m^{abc} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2\hat{Y}_m^d + \hat{Y}_m^o & -\hat{Y}_m^d + \hat{Y}_m^o & -\hat{Y}_m^d + \hat{Y}_m^o \\ -\hat{Y}_m^d + \hat{Y}_m^o & 2\hat{Y}_m^d + \hat{Y}_m^o & -\hat{Y}_m^d + \hat{Y}_m^o \\ -\hat{Y}_m^d + \hat{Y}_m^o & -\hat{Y}_m^d + \hat{Y}_m^o & 2\hat{Y}_m^d + \hat{Y}_m^o \end{bmatrix}, \quad (7.1.4)$$

koja je na slici 2.3.1 označena sa \hat{Y}_{oj} .

7.2. Redni parametri

Pogonske šeme trofaznog uravnoteženog transformatora sprege Dy_n5 u domenu relativnih vrednosti prikazane su na slici 7.2.1 [16]. Saglasno s tim, matematički model transformatora u domenu simetričnih komponenti, napisan saglasno s metodom nezavisnih napona, glasi:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}^D \\ \hat{i}^I \\ \hat{i}^O \\ -\hat{i}^d \\ -\hat{i}^i \\ -\hat{i}^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\hat{Z} & 0 & 0 & -e^{j5\pi/6}/\hat{Z} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\hat{Z} & 0 & 0 & -e^{j7\pi/6}/\hat{Z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -e^{-j5\pi/6}/\hat{Z} & 0 & 0 & 1/\hat{Z} & 0 & 0 \\ 0 & -e^{-j7\pi/6}/\hat{Z} & 0 & 0 & 1/\hat{Z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\hat{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}^D \\ \hat{u}^I \\ \hat{u}^O \\ \hat{u}^d \\ \hat{u}^i \\ \hat{u}^o \end{bmatrix}. \quad (7.2.1)$$



Slika 7.2.1 – Pogonske šeme transformatora sprege Dy_n5 u domenu relativnih vrednosti.

Transformacijom modela (7.2.1) iz domena simetričnih komponenti u fazni domen, množenjem s leve strane matricom (dimenzije 6×6) čije su dijagonalne submatrice jednake matrici $\hat{\mathbf{A}}^{-1}$ [definisana relacijama (7.1.3)], a vandijagonalne jednake nuli, dobijaju se matrice koje su na slici 2.3.1 označene sa $\hat{\mathbf{Y}}_{kk}$,

$\hat{\mathbf{Y}}_{kj}$, $\hat{\mathbf{Y}}_{jk}$ i $\hat{\mathbf{Y}}_{jj}$:

$$\hat{\mathbf{Y}}_{kk} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2/\hat{z} & -1/\hat{z} & -1/\hat{z} \\ -1/\hat{z} & 2/\hat{z} & -1/\hat{z} \\ -1/\hat{z} & -1/\hat{z} & 2/\hat{z} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{Y}}_{kj} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1/\hat{z} & 0 & -1/\hat{z} \\ -1/\hat{z} & 1/\hat{z} & 0 \\ 0 & -1/\hat{z} & 1/\hat{z} \end{bmatrix}, \quad (7.2.4)$$

$$\hat{\mathbf{Y}}_{jk} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1/\hat{z} & -1/\hat{z} & 0 \\ 0 & 1/\hat{z} & -1/\hat{z} \\ -1/\hat{z} & 0 & 1/\hat{z} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{Y}}_{jj} = \begin{bmatrix} 1/\hat{z} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\hat{z} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\hat{z} \end{bmatrix}.$$

8. LITERATURA

1. V. Strezoski, Lj. Trpezanovski, 2000, "Three-Phase Asymmetrical Load-Flow", "Electrical Power & Energy Systems", 511-520.
2. D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, G. X. Luo, 1988, "A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks", "IEEE Trans. on PS", 753-762.
3. G. X. Luo, A. Semlyen, 1990, "Efficient Load Flow for Large Weakly Meshed Networks", "IEEE Trans. on PS", 1309-1316.
4. D. Rajčić, R. Taleski, 1998, "Two Novel Methods for Radial and Weakly Meshed Network Analysis", "Electric Power Systems Research", 79-87.
5. C. S. Cheng, D. Shirmohammadi, 1995, "A Three-Phase Power Flow Solutions Method for Real-Time Distribution System Analysis", "IEEE Trans. on PS", 671-679.
6. P. Xiao, D. C. Yu, W. Yan, 2006, "A Unified Three-Phase Transformer Model for Distribution Load Flow Calculations", "IEEE Trans. on PS", 153-159.
7. C. Desoer, E. Kuh, 1969, "Basic Circuit Theory", "McGraw-Hill Inc."
8. T. -H. Chen, M. -S. Chen, K. -J. Hwang, P. Kotas, E. A. Chebli, 1991, "Distribution System Power Flow Analysis – A Rigid Approach", "IEEE Trans. on PD", 1146-1152.
9. P. Тьюарсон, 1977, "Разреженные матрицы", "Мир".
10. W. Tinney, C. Hart, 1967, "Power Flow Solutions by Newton's Method", "IEEE Trans. on PAS", 1449-1460.
11. ***, "Electrical Transmission and Distribution", 1959, Westinghouse Electric Corporation.
12. S. Khushalani, J. M. Solanki, N. N. Schulz, 2007, "Development of Three-Phase Unbalanced Power Flow Using PV and PQ Models for Distributed Generation and Study of the Impact of DG Models", "IEEE Trans. on PS", 1019-1025.
13. J. Arillaga, C. P. Arnold, B. J. Harker, 1983, "Computer Modeling of Electrical Power Systems", "John Wiley & Sons Ltd".
14. T. -H. Chen, M. -S. Chen, T. Inoue, P. Kotas, E. A. Chebli, 1991, "Three-Phase Cogenerator and Transformer Models for Distribution System Analysis", "IEEE Trans. on PD", 1671-1681.
15. C. Gross, S. Meliopolus, 1992, "Per-Unit Scaling in Electric Power Systems", "IEEE Trans. on PWRS", 702-708.
16. V. Strezoski, S. Milaković, 1998, "Ekvivalentne šeme elektroenergetskih transformatora u analizi stacionarnih režima", "STYLOS".