

Proračun trofaznih tokova snaga

Maja Marković

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Koste Glavinića 8a
11000 Beograd, Srbija
mmarkovic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu je prikazan metod za proračun trofaznih tokova snaga i naponskih prilika u radijalnim distributivnim mrežama sa nesimetričnim opterećenjem. Nesimetrija prisutna u distributivnim mrežama posledica je kako neravnomerne raspodele opterećenja po fazama, tako i induktivnih i kapacitivnih sprega između faznih provodnika vodova. Stoga je pri modelovanju opterećenja uzeta u obzir i njihova zavisnosti od napona u mreži, a prilikom modelovanja vodova međusobne induktivnosti i kapacitivnosti. Proračun se zasniva na osnovnim principima teorije kola: I i II Kirchhoff-ovom zakonu. Kako bi primena Kirchhoff-ovih zakona bila moguća, bilo je potrebno na pogodan način definisati topologiju mreže numerisanjem grana mreže. Tačnost algoritma je pokazana na IEEE 13 test mreži.

Glavne reči: tokovi snaga, trofazni proračun, Shirmohammadi metod, IEEE 13

1. Uvod

Poslednjih godina u okviru analiza rada elektroenergetskog sistema distributivne mreže preuzimaju glavnu ulogu usled ubrzanog prodora distribuiranog generisanja i uvođenja "smart metering"-a. Konačan cilj kome se teži u aktuelnom razvoju je kompleksan, automatizovan i optimizovan distributivni sistem tzv. "smart grid". Samim tim i osnovni alati za analize rada distributivnih mreža, proračuni tokova snaga, treba da odgovore sve obimnijim zahtevima.

Distributivne mreže su po svojoj definiciji radijalne ili slabo upetljanje, uzemljene ili izolovane, karakteriše ih vrlo veliki odnos R/X vodova što uzrokuje veliki pad napona od početnog do krajnjeg čvora, kao i prisustvo jednofaznih, dvofaznih i trofaznih vodova. Nesimetrija prisutna u distributivnim mrežama posledica je neravnomerne raspodele opterećenja po fazama i induktivnih i kapacitivnih sprega između vodova pojedinih faza. Iz tog razloga

klasični metodi proračuna tokova snaga, zbog prirode proračuna i mnoštva uopštenja i zanemarenja, kao što je Newton-Raphson-ov metod i klasični raspregnuti postupci, često ne daju tačne rezultate i imaju problema sa konvergencijom proračuna. Stoga su razvijani kompenzacioni algoritmi za proračune nesimetričnih trofaznih tokova snaga koji sagledavaju u potpunosti distributivnu mrežu sa svim njenim specifičnostima i sa minimalnim pojednostavljenjima prilikom matematičkog modelovanja.

U okviru rada biće izložen algoritam razvijen na bazi Shirmohammadi-evog metoda proračuna trofaznih tokova snaga za radijalne distributivne mreže sa nesimetričnim opterećenjem [1]. Verifikacija je izvršena pomoću IEEE test mreža [2].

2. Primenjeni metod proračuna

Korišćeni algoritam Shirmohammadi-evog proračuna je veoma jednostavan budući da se bazira na dva osnovna zakona elektrotehnike, Prvom i Drugom Kirchhoff-ovom zakonu.

Kako bi primena Kirchhoff-ovih zakona bila moguća, potrebno je definisati topologiju mreže. U ovom slučaju je to učinjeno numerisanjem grana mreže kako je izloženo u [3], numerisanje grana se izvodi po slojevima počevši od izvornog čvora, sa prelaskom u sledeći sloj tek pošto su sve grane iz prethodnog sloja numerisane. Izvorni čvor se smatra nultim čvorom. Na ovaj način istovremeno je definisana i numeracija čvorova i njihova organizacija po nivoima. Primenjeni princip se pokazao kao veoma fleksibilan pri umetanju novih čvorova na postojećim vodovima, dodavanju novih vodova i izmeni konfiguracije mreže budući da je potrebno jednoznačno numerisati čvorove, a time i grane mreže, i prepustiti programu da izvrši prenumeraciju u obliku pogodnom za primenu Kirchhoff-ovih zakona.

Kao i ostali metodi proračuna, i ovo je iterativni metod. Sa poznatom vrednosti napona u izvornom čvoru, uz pretpostavku u okviru početne iteracije da su naponi svih čvorova u mreži jednaki naponu izvornog čvora, iterativni proces se sastoji iz tri koraka:

1. Korak unapred: Izračunavanje struja injektiranja za svaki čvor u mreži, u k-toj iteraciji, na osnovu vrednosti struje opterećenja i svih otočnih elemenata u j-tom čvoru, izračunatih u (k-1)-oj iteraciji:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_j^{(k)} = \begin{bmatrix} I_{L a} \\ I_{L b} \\ I_{L c} \end{bmatrix}_j^{(k-1)} - \begin{bmatrix} I_{C a} \\ I_{C b} \\ I_{C c} \end{bmatrix}_j^{(k-1)}, j=1,2, \dots, n \quad (1)$$

ili ukoliko koristimo sledeću notaciju:

$$[I_{abc}]_j^{(k)} = [I_{Labc}]_j^{(k-1)} - [I_{Cabc}]_j^{(k-1)}, \quad i=1,2, \dots, n \quad (2)$$

gde su $[I_{abc}]_j^{(k)}$ vektor faznih struja injektiranja u i -tom čvoru, k -toj iteraciji, koji čine struje opterećenja $[I_{Labc}]_j^{(k-1)}$ i struje otočnih elemenata (kondenzatorskih baterija) $[I_{Cabc}]_j^{(k-1)}$, prethodno dobijene u $(k-1)$ -oj iteraciji.

2. Korak unazad: Izračunavanje struja koje teku po granama mreže, u k -toj iteraciji, počev od grana u poslednjem sloju i krećući se ka izvornom čvoru:

$$\begin{bmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \end{bmatrix}_j^{(k)} = - \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_j^{(k)} + \sum_{\substack{m \in M \\ m \neq j}} \begin{bmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \end{bmatrix}_m^{(k)}, \quad j=b, b-1, \dots, 1 \quad (3)$$

gde su $[J_{abc}]_j^{(k)}$ struje koje teku po odgovarajućim fazama j -te grane, a M je skup grana mreže direktno povezanih sa j -tim čvorom

Ovaj korak proračuna predstavlja direktnu primenu I Kirhhoff-ovog zakona.

3. Korak unapred: Izračunavanje napona čvorova, počevši od grana u prvom sloju, krećući se ka poslednjem sloju, tako da je napon u krajnjem čvoru j , grane j , izračunat pomoću napona početnog čvora grane j , čvora i , i pada napona na impedansi grane j , koji proizvodi struja grane j izračunata u prethodnom koraku:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}_j^{(k)} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}_i^{(k)} - \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}_{ij} \cdot \begin{bmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \end{bmatrix}_j^{(k)}, \quad j=1, 2, \dots, b \quad (4)$$

Ovaj korak proračuna predstavlja direktnu primenu II Kirhhoff-ovog zakona.

U [1] i [3] u cilju određivanja konvergencije proračuna računa se odstupanje računskih vrednosti prividnih snaga injektiranja u čvorovima od zadatih, što bi za k -tu iteraciju bilo:

$$\begin{aligned} \Delta S_{a i}^{(k)} &= V_{a i}^{(k)} \left(I_{a i}^{(k)} \right)^* - Y_{a i}^* \left| V_{a i}^{(k)} \right|^2 - S_{a i} \\ \Delta S_{b i}^{(k)} &= V_{b i}^{(k)} \left(I_{b i}^{(k)} \right)^* - Y_{b i}^* \left| V_{b i}^{(k)} \right|^2 - S_{b i} \\ \Delta S_{c i}^{(k)} &= V_{c i}^{(k)} \left(I_{c i}^{(k)} \right)^* - Y_{c i}^* \left| V_{c i}^{(k)} \right|^2 - S_{c i} \end{aligned} \quad (5)$$

a zatim utvrđuje da li je realni ili imaginarni deo bilo kog od izračunatih odstupanja, jednačine (6), veći od vrednosti zadate željene tačnosti ε . Kada to ne bude slučaj, proračun je konvergirao, jednačina (7).

$$\delta P_{\max}^{(k)} = \max_{i=1,2,\dots,n} \left(\operatorname{Re} \left\{ \left[\Delta S_{abc} \right]_i^{(k)} \right\} \right) \quad (6)$$

$$\delta Q_{\max}^{(k)} = \max_{i=1,2,\dots,n} \left(\operatorname{Im} \left\{ \left[\Delta S_{abc} \right]_i^{(k)} \right\} \right) \quad (7)$$

$$\delta P_{\max}^{(k)} < \varepsilon \wedge \delta Q_{\max}^{(k)} < \varepsilon \quad (7)$$

Međutim, izloženi kriterijum konvergencije koristi se u slučaju kada su sva modelovana opterećenja u mreži potrošači konstantne snage. Kako to u slučaju IEEE test mreža nije slučaj, kao kriterijum konvergencije se koristi odstupanje proračunske vrednosti napona izvornog čvora, jednačina (8), od zadate vrednosti, jednačina (9), u relativnim jedinicama, te je kriterijum konvergencije dat jednačinom (10).

$$\left[V_{abc} \right]^{(k)} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}^{(k)} \quad (8)$$

$$\left[V_{abc} \right] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \angle 0^\circ \\ V \angle -120^\circ \\ V \angle 120^\circ \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\max_{a,b,c} \left(\frac{\left| \left[V_{abc} \right] - \left[V_{abc} \right]^{(k)} \right|}{|V|} \right) < \varepsilon \quad (10)$$

3. Modelovanje elemenata sistema

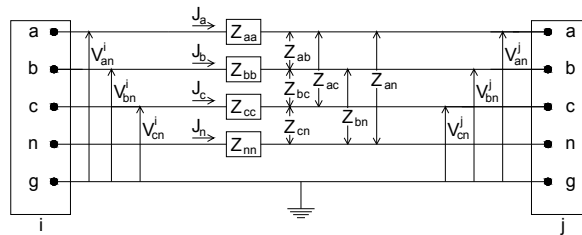
U skladu sa zahtevima IEEE test mreža, distributivni sistem je modelovan kao radijalna mreža čvorova povezanih vodovima, prekidačima, transformatorima i regulatorima napona, sa jednim definisanim izvornim balansnim čvorom. U svakom čvoru može postojati opterećenje ili kondenzatorske baterije. Vodovi, kao i opterećenja, mogu biti jednofazni, dvofazni i trofazni, vezani u zvezdu (uzemljeni ili izolovani) ili trougao (tzv. Δ-vod koji je napajan međufaznim naponom i koji napaja potrošača vezanog u trougao). Za svaki element sistema biće dat najopštiji trofazni prikaz korišćenog matematičkog modela.

3.1. Model voda

Određivanje parametara vodova i kablova je najbitniji korak pre nego što se otpočne analiza distributivnih mreža. Impedansu jednofaznog, dvofaznog ili

trofaznog voda čine otpornosti provodnika i sopstvene i međusobne reaktanse koje su posledica magnetnog polja u kome se provodnici nalaze.

Pomoću modifikovanih Carson-ovih jednačina računati su elementi matrice "primitivnih" impedansi. U opštem slučaju nadzemni vod sa neutralnim provodnikom rezultira matricom 4×4, a kablovski vod koji čine tri kabla matricom 6×6. U okviru ovog algoritma, a i u slučaju mnogih aplikacija, primitivne matrice moraju se redukovati na 3×3 faznu formu. Ovo smanjenje dimenzija problema se standardno čini Kron-ovom redukcijom. Matrica impedansi za trofazni Δ-vod dobija se takođe pomoću Carson-ovih jednačina, ali bez primene Kron-ove redukcije.



Slika 1. Model trofaznog četvorožičnog voda

Tako, na primer, u slučaju četvorožičnog nadzemnog voda (Slika 1) ima se 4×4 matrica impedansi, dok je jednačina II Kirhhoff-ovog zakona primenjen na prikazani vod oblika:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_n \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_n \end{bmatrix}_j + \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_a \\ J_b \\ J_c \\ J_n \end{bmatrix}_j \quad (11)$$

što možemo napisati i u matričnom obliku:

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}] \\ [V_n] \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} [V_{abc}] \\ [V_n] \end{bmatrix}_j + \begin{bmatrix} [Z_{ij}] & [Z_{in}] \\ [Z_{nj}] & [Z_{nn}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [J_{abc}] \\ [J_n] \end{bmatrix}_j \quad (12)$$

Pošto je neutralni provodnik uzemljen naponi V_{ni} i V_{nj} su jednaki nuli, te se prethodna matrična forma svodi na:

$$[V_{abc}]_i = [V_{abc}]_j + [Z_{abc}]_{ij} \cdot [J_{abc}] \quad (13)$$

gde je:

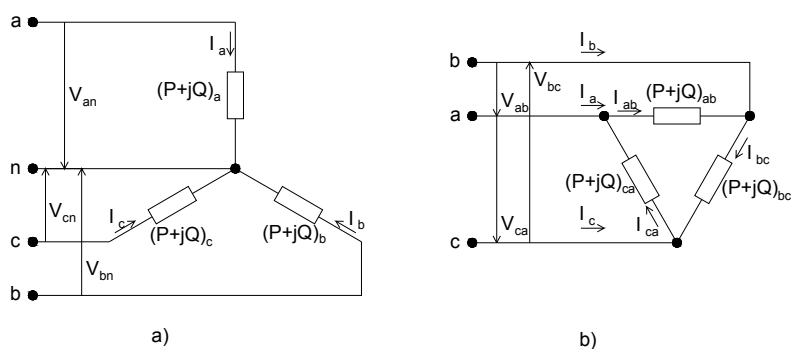
$$[Z_{abc}]_{ij} = [Z_{ij}] - [Z_{in}] \cdot [Z_{nn}]^{-1} \cdot [Z_{nj}] \quad (14)$$

J_{abc} je vektor faznih struja koje teku između čvora i i j , grane j , koje u opštem predstavljaju sumu struja opterećenja koncentrisanih u čvoru j ili

distribuiranih po vodu ij , struja injektiranja kondenzatorskih baterija i struja svih grana mreže koje se susište u čvor j (jednačina (3)). Iz jednačine (11) dobija se jednačina (4) za 3. korak iterativnog postupka.

3.2. Model opterećenja

Potošači, odnosno opterećenja, pored toga što mogu biti jednofazni, dvofazni i trofazni, simetrični i nesimetrični, u analizi distributivnih mreža mogu biti modelovani i kao opterećenja konstantne: snage, struje i impedanse (admitanse) koncentrisana u čvoru ili ravnomerno raspodeljena po vodu, vezana u zvezdu ili trougao (Slika 2). U okviru algoritma raspodeljeno opterećenje je ekvivalentirano sa dva koncentrisana opterećenja: prvo u iznosu od 2/3 ukupnog opterećenja modelovano na 1/4 dužine voda, i drugo u iznosu od 1/3 ukupnog opterećenja modelovano na kraju voda.



Slika 2. Model opterećenja vezanog u a) zvezdu, b) trougao

Opterećenja se zadaju preko iznosa aktivne snage P u [kW] i reaktivne Q u [kVAr].

$$\text{faza a: } |S_a| \angle \delta_a = P_a + jQ_a \text{ i } |V_a| \angle \theta_a \quad (15)$$

$$\text{faza b: } |S_b| \angle \delta_b = P_b + jQ_b \text{ i } |V_b| \angle \theta_b \quad (16)$$

$$\text{faza c: } |S_c| \angle \delta_c = P_c + jQ_c \text{ i } |V_c| \angle \theta_c \quad (17)$$

Struja faze a za model konstantne snage (PQ model) je data jednačinom:

$$I_{L a} = \left(\frac{S_a}{V_{an}} \right)^* = \frac{|S_a|}{|V_{an}|} \angle (\theta_a - \delta_a) = |I_{L a}| \angle \alpha_a \quad (18)$$

$$I_{L_b} = \left(\frac{S_b}{V_{bn}} \right)^* = \frac{|S_b|}{|V_{bn}|} \angle(\theta_b - \delta_b) = |I_{L_b}| \angle \alpha_b \quad (19)$$

$$I_{L_c} = \left(\frac{S_c}{V_{cn}} \right)^* = \frac{|S_c|}{|V_{cn}|} \angle(\theta_c - \delta_c) = |I_{L_c}| \angle \alpha_c \quad (20)$$

Za ovaj model, fazni naponi će se menjati u svakoj iteraciji prilikom proračuna, sve dok se ne zadovolji kriterijum konvergencije.

Konstantna impedansa se određuje pomoću date snage u pretpostavljene početne vrednosti faznog napona.

$$Z_{L_a} = \frac{|V_{an}|^2}{S_a^*} = \frac{|V_{an}|^2}{|S_a|} \angle \delta_a = |Z_{L_a}| \angle \delta_a \quad (21)$$

$$Z_{L_b} = \frac{|V_{bn}|^2}{S_b^*} = \frac{|V_{bn}|^2}{|S_b|} \angle \delta_b = |Z_{L_b}| \angle \delta_b \quad (22)$$

$$Z_{L_c} = \frac{|V_{cn}|^2}{S_c^*} = \frac{|V_{cn}|^2}{|S_c|} \angle \delta_c = |Z_{L_c}| \angle \delta_c \quad (23)$$

Struje kao funkcija konstantne impedanse date su sa:

$$I_{L_a} = \frac{V_{an}}{Z_a} = \frac{|V_{an}|}{|Z_a|} \angle(\theta_a - \delta_a) = |I_{L_a}| \angle \alpha_a \quad (24)$$

$$I_{L_b} = \frac{V_{bn}}{Z_b} = \frac{|V_{bn}|}{|Z_b|} \angle(\theta_b - \delta_b) = |I_{L_b}| \angle \alpha_b \quad (25)$$

$$I_{L_c} = \frac{V_{cn}}{Z_c} = \frac{|V_{cn}|}{|Z_c|} \angle(\theta_c - \delta_c) = |I_{L_c}| \angle \alpha_c \quad (26)$$

U ovom modelu fazni naponi će se menjati iz iteracije u iteraciju, ali impedanse izračunate jednačinama (21), (22) i (23) ostaju konstantne.

Modelom konstantne struje moduli struja se računaju na osnovu jednačina (18), (19) i (20) i ostaju konstantne, dok se fazni stav napona (ugao θ) menja povlačeći sa sobom i promenu faznog stava vektora struje.

$$I_{L_a} = |I_{L_a}| \angle(\theta_a - \delta_a) \quad (27)$$

$$I_{L_b} = |I_{L_b}| \angle(\theta_b - \delta_b) \quad (28)$$

$$I_{L_c} = |I_{L_c}| \angle(\theta_c - \delta_c) \quad (29)$$

U slučaju opterećenja vezanog u trougao u prethodnim jednačinama figurisaće linijski naponi i struje.

3.3. Model kondenzatorskih baterija

Kondenzatorske baterije se modeluju kao konstantne susceptanse vezane u zvezdu ili trougao. Podaci o baterijama koji se daju jesu snaga Q_C [kVAR] i nazivni fazni napon V_{Ln} [kV] za slučaj veze u zvezdu, odnosno nazivni međufazni napon V_{LL} [kV] za slučaj veze u trougao, tako da je susceptansa jednaka:

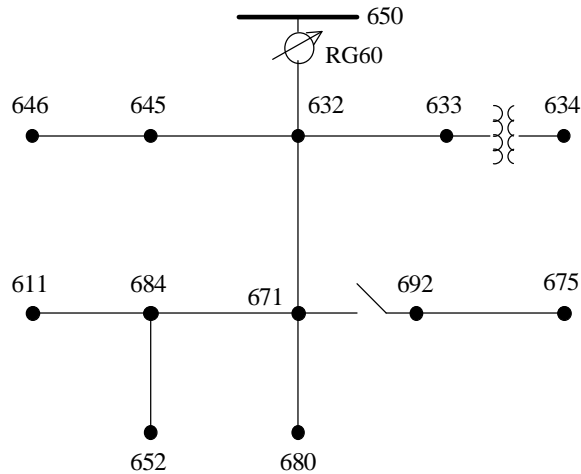
$$B_C = \frac{Q_C}{V_{Ln(LL)}^2 \cdot 1000} \text{ [S]} \quad (30)$$

3.4. Model transformatora i regulatora napona

Matematički model transformatora za potrebe proračuna trofaznih tokova snaga obuhvata prenosni odnos transformatora i tip sprege namotaja transformatora i zbog složenosti modela u mnogome prevazilazi obim ovog rada. Modelovanje je izvršeno na način opisan u [4]. Isto važi i za regulatore napona.

4. Test primer

Za verifikaciju programa korišćena je IEEE 13 test mreža (Slika 3).



Slika 3. IEEE 13 test mreža

U pitanju je mreža sa malim brojem čvorova, relativno "kratka", ali i prilično visoko opterećena sa nominalnim naponom 4.16 kV. U mreži postoji i regulator napona koji se sastoji od tri jednofazne jedinice za regulaciju napona, vezane u zvezdu. Odlikuje je različitost u tipovima vodova i kablova, kao i njihovo različito fazovanje, postojanje kondenzatorskih baterija, još jednog naponskog nivoa u mreži, i neravnomerna opterećenja, kako skoncentrisana na kraju voda, tako i raspodeljena. Dakle, ova mreže zadovoljava sve uslove za testiranje programa. Podaci o test mreži IEEE 13 dostupni su na [2].

Rezultati programa i poređenje sa zvaničnim rezultatima test mreže dati su u Tabeli 1.

5. Zaključak

Ovaj rad predstavlja prikaz jedne metode proračuna trofaznih tokova snaga u distributivnim mrežama sa nesimetričnim opterećenjem. Predloženi algoritam razvijen na osnovu Shirmohammadi-eve kompenzacione metode, podrazumeva radikalnost razmatrane distributivne mreže i dostiže konvergenciju u 3-5 iteracija. Razvojem algoritma u MatLab-u se veoma veliki broj promenljivih smešta u vektorske i matricne strukture sa kojima se jednostavno manipuliše.

Tačnost algoritma je proverena na IEEE test mrežama, a u radu u okviru Tabele 1 dato i poređenje rezultata programa i zvaničnih rezultata, sa zanemarljivim razlikama u domenu greške zaokruživanja.

Algoritam je veoma fleksibilan i moguće ga je u daljem radu proširiti u pravcu integracije distribuiranih izvora i analize slaboupetljanih distributivnih mreža.

Tabela 1. Poređenje rezultata programa i zvaničnih rezultata za IEEE 13 test mrežu

Čvor	Faza	Rezultat programa		IEEE 13		Odstupanje rezultata (%)	
		V (r.j.)	θ (°)	V(r.j.)	θ (°)	V	θ
650	a	1.0000	0.00	1.0000	0.00	0.00	0.00
	b	1.0000	-120.00	1.0000	-120.00	0.00	0.00
	c	1.0000	120.00	1.0000	120.00	0.00	0.00
RG60	a	1.0625	0.00	1.0625	0.00	0.00	0.00
	b	1.0500	-120.00	1.0500	-120.00	0.00	0.00
	c	1.0688	120.00	1.0687	120.00	0.00	0.00
632	a	1.0210	-2.49	1.0210	-2.49	0.00	0.00
	b	1.0420	-121.72	1.0420	-121.72	0.00	0.00
	c	1.0174	117.83	1.0174	117.83	0.00	0.00
633	a	1.0179	-2.56	1.0180	-2.56	0.01	0.00
	b	1.0401	-121.77	1.0401	-121.77	0.00	0.00
	c	1.0148	117.82	1.0148	117.82	0.00	0.00
645	a						
	b	1.0328	-121.90	1.0329	-121.90	0.01	0.00
	c	1.0154	117.85	1.0155	117.86	0.01	0.01
634	a	0.9932	-3.23	0.9940	-3.23	0.08	0.00
	b	1.0210	-122.23	1.0218	-122.22	0.08	-0.01
	c	0.9952	117.34	0.9960	117.34	0.08	0.00
646	a						
	b	1.0311	-121.98	1.0311	-121.98	0.00	0.00
	c	1.0134	117.90	1.0134	117.90	0.00	0.00
671	a	0.9899	-5.30	0.9900	-5.30	0.01	0.00
	b	1.0529	-122.35	1.0529	-122.34	0.00	-0.01
	c	0.9777	116.02	0.9778	116.02	0.01	0.00
680	a	0.9899	-5.30	0.9900	-5.30	0.01	0.00
	b	1.0529	-122.35	1.0529	-122.34	0.00	-0.01
	c	0.9777	116.02	0.9778	116.02	0.01	0.00
684	a	0.9880	-5.33	0.9881	-5.32	0.01	-0.19
	b						
	c	0.9757	115.92	0.9758	115.92	0.01	0.00
692	a	0.9899	-5.30	0.9900	-5.31	0.01	0.19
	b	1.0529	-122.35	1.0529	-122.34	0.00	-0.01
	c	0.9777	116.02	0.9777	116.02	0.00	0.00
611	a						
	b						
	c	0.9737	115.77	0.9738	115.78	0.01	0.01
652	a	0.9824	-5.25	0.9825	-5.25	0.01	0.00
	b						
	c						
675	a	0.9834	-5.55	0.9835	-5.56	0.01	0.18
	b	1.0553	-122.52	1.0553	-122.52	0.00	0.00
	c	0.9758	116.03	0.9758	116.03	0.00	0.00

Literatura

- [1] Cheng C.S., Shirmohammadi D., *A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, No. 2, pp. 671-679, May 1995
- [2] Radial Distribution Test Feeders,
<http://www.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html>
- [3] D. Shirmohammadi, H.W. Hong, A. Semlzen, G.X. Luo, *A Compensation-based power flow method for Weakly Meshed Distribution nad Transmission Networks*, IEEE Trans. Power Syst., pp.753-762, 1988
- [4] William H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, 2nd Edition, CRC Press, 2006.

Abstract. This paper presents a method for calculating three-phase load flow and voltage conditions in radial distribution systems with unbalanced loads. Asymmetries present in the distribution networks are the result of the unbalanced load and inductive and capacitive coupling between the phases. Therefore, the modeling takes into account loads voltage dependency and lines mutual coupling. The calculation is based on fundamental principles of circuit theory: I and II Kirchhoff's law. In order to apply the Kirchhoff's laws, it was necessary to define the network topology in appropriate way by numbering the branches in the network. The accuracy of the algorithm is demonstrated on the IEEE 13 test network.

Keywords: three-phase load flow, Shirmohammadi, IEEE 13

Three-Phase Load Flow

Rad primljen u uredništvo 09.10.2011. godine
Rad prihvaćen 25.10.2011. godine