

Tomislav Alinjak, dipl.ing.el.
HEP ODS d.o.o Elektra Slavonski Brod
tomislav.alinjak@hep.hr

Prof. dr.sc. Ivica Pavić, dipl.ing.el.
Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb
ivica.pavic@fer.hr

mr.sc. Kruno Trupinić, dipl.ing.el.
HEP ODS d.o.o Elektra Slavonski Brod
kruno.trupinic@hep.hr

MODEL TROFAZNOG PRORAČUNA TOKOVA SNAGA ZA POTREBE RAČUNANJA TEHNIČKIH GUBITAKA U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

SAŽETAK

Zbog nesimetričnog opterećenja distribucijske mreže za kvalitetnu analizu tehničkih gubitaka potrebno je koristiti trofazni proračun tokova snaga. Cilj ovog članka je prikazati način izrade trofaznih modela pojedinih dijelova distribucijske mreže s posebnim naglaskom na niskonaponsku mrežu koja osim faznih vodiča ima i nul vodič.

Nakon definiranja trofaznih modela osnovnih dijelova distribucijske mreže u članku će se prikazati algoritam za računanje trofaznih tokova snaga iterativnom metodom naprijed – natrag. Navedena metoda se koristi jer konvergira čak i u slučajevima velikih omjera R/X koji su karakteristični za distribucijske mreže.

Na temelju prikazanih modela izrađen je računalni program pomoću kojeg će se provesti proračun tehničkih gubitaka na realnom primjeru distribucijske mreže u određenom trenutku te će se izvršiti usporedba dobivenih rezultata s rezultatima proračuna pomoću komercijalnog programskog paketa.

Ključne riječi: nesimetrično opterećenje, tokovi snaga, trofazni model, tehnički gubici, metoda naprijed-natrag

A THREE PHASE POWER FLOW MODEL FOR COMPUTATION OF TECHNICAL LOSSES IN DISTRIBUTION NETWORK

SUMMARY

Due to unbalanced load in distribution networks it is necessary to use three phase power flow model to get reliable results. The purpose of this paper is to define three phase models of every part of distribution network with emphasis on low voltage network that, except the phase conductors, also has a neutral wire.

An algorithm for iterative Forward- backward sweep power flow method is made by using the aforementioned models. That method also converges in case of great R/X ratios that are characteristic for distribution networks.

Finally, a computation software is made and tested on real example of distribution network by calculating technical power losses. The accuracy of the method is tested by results comparison of proposed program and commercial software.

Key words: unbalanced load, power flow, three phase model, technical losses, Forward-backward sweep method

1. UVOD

Posljednjih godina sve veća pažnja se posvećuje smanjenju tehničkih gubitaka u elektroenergetskoj mreži. U distribucijskoj mreži postoji veliki broj jednofaznih potrošača, dok trofazni potrošači rijetko imaju simetriziranu potrošnju, što u konačnici uzrokuje nesimetrično opterećenje mreže. Stoga je za kvalitetnu analizu tehničkih gubitaka u distribucijskoj mreži nužno koristiti trofazni proračun tokova snaga.

Cilj ovog članka je prikazati način izrade trofaznih modela pojedinih dijelova distribucijske mreže koji uključuju srednjenaponske dalekovode, niskonaponske mreže, distributivne energetske transformatore, trofazne i jednofazne terete. Posebnu pozornost treba posvetiti niskonaponskoj mreži koja, osim faznih vodiča, ima i nul vodič. Inicijalno se model niskonaponske mreže izrađuje kao četverofazni, a nakon toga će se objasniti način provođenja blok transformacije četverofaznog modela u trofazni model kako bi se proračuni srednjenaponskih i niskonaponskih mreža mogli odvijati u istoj iteraciji.

Nakon definiranja trofaznih modela osnovnih dijelova distribucijske mreže u članku će se prikazati algoritam za računanje trofaznih tokova snaga iterativnom metodom naprijed – natrag (eng. Forward-backward sweep). Navedena metoda se pokazala prilično učinkovitom jer konvergira čak i u slučajevima velikih omjera R/X koji su karakteristični za distribucijske mreže. Nakon završetka iterativnog postupka moguće je izračunati ukupne tehničke gubitke u razmatranoj distribucijskoj mreži.

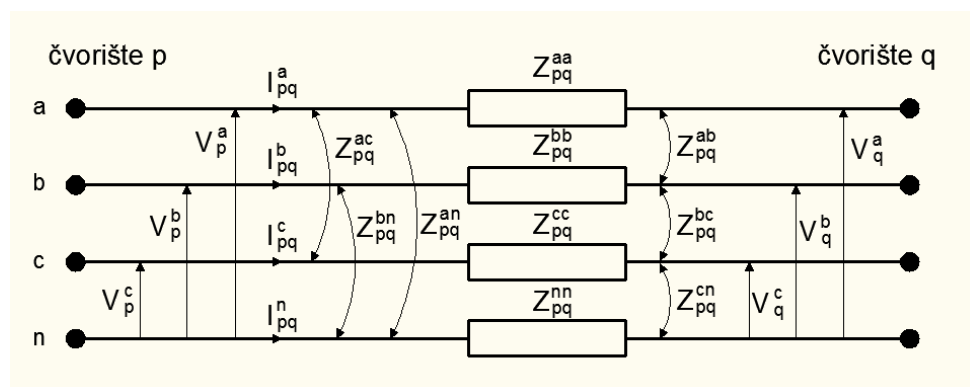
Na temelju izrađenog modela u računalnom programu provest će se trofazni proračun tehničkih gubitaka na realnom primjeru distribucijske mreže u određenom trenutku te će se izvršiti usporedba dobivenih rezultata s rezultatima proračuna dobivenih pomoću komercijalnog programskog paketa kako bi se potvrdila točnost modela.

2. TROFAZNI MODELI ELEMENATA DISTRIBUCIJSKE MREŽE

2.1. Nadomjesni model voda

Distribucijski srednjenaponski dalekovodi imaju samo tri fazna vodiča, dok niskonaponske mreže pored faznih vodiča imaju i nul-vodič. Za trofazni nadomjesni model voda, bez obzira na naponski nivo, potrebno je definirati matricu impedancija i matricu admitancija koje su dimenzija 3x3. Budući da niskonaponska mreža ima četiri vodiča, inicijalna matrica impedancija i admitancija je dimenzije 4x4, a koju je potom potrebno svesti na matricu 3x3 kako bi se proračuni srednjenaponske i niskonaponske mreže mogli izvesti u zajedničkom proračunu. Način određivanja matrica impedancija i admitancija će biti prikazan na trofaznom modelu s nul-vodičem koji je složeniji, a potom će se moći analogno zaključiti način određivanja trofaznog modela voda.

Na slici 1. prikazan je distribucijski vod između dva čvorišta, p i q. Impedancija vodiča između čvorišta p i q se naziva vlastita impedancija, a impedancije između pojedinih vodiča se nazivaju međusobne impedancije [2].



Slika 1. Nadmjesni model trofaznog voda s nul-vodičem

Za frekvenciju mrežnu 50 Hz vlastite impedancije se računaju prema izrazu (1), a međusobne impedancije prema izrazu (2) [1]:

$$Z_{ii}^{pq} = R_1 + 0,05 + j0,0628 \ln \frac{93\sqrt{\rho}}{D_s} \quad \Omega / km \quad (1)$$

$$Z_{ij}^{pq} = 0,05 + j0,0628 \ln \frac{93\sqrt{\rho}}{D_{ij}} \quad \Omega / km \quad (2)$$

gdje su:

R_1 – jedinični radni otpor vodiča [Ω/km],

r – specifični otpor zemlje [Ωm],

D_s – vlastita srednja geometrijska udaljenost vodiča [m],

D_{ij} – međusobna udaljenost vodiča i i j [m].

Nakon izračuna vlastitih i međusobnih impedancija, dobije se matrica impedancija dimenzija 4x4 (3):

$$[Z_{pq}^{abcn}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Da bi se navedena matrica svela na matricu dimenzija 3x3 potrebno je provesti blok transformaciju ili Kronovu redukciju koja se zasniva na Kirchhoffovim zakonima. Prvo je potrebno postaviti naponsku jednadžbu između čvorišta p i q (4):

$$\begin{bmatrix} V_p^a \\ V_p^b \\ V_p^c \\ V_p^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_q^a \\ V_q^b \\ V_q^c \\ V_q^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{pq}^a \\ I_{pq}^b \\ I_{pq}^c \\ I_{pq}^n \end{bmatrix} \quad (4)$$

Matrice su linijama podijeljene u blokove te se ista jednadžba može zapisati i u blokovskom zapisu (5) [4]:

$$\begin{bmatrix} V_p^{abc} \\ V_p^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_q^{abc} \\ V_q^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{abc} & Z_n \\ Z_n^T & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{pq}^{abc} \\ I_{pq}^n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Ukoliko je nul-vodič uzemljen, V_p^n i V_q^n se mogu smatrati jednakima te u tom slučaju vrijedi (6):

$$I_{pq}^n = -Z_{nn}^{-1} \cdot Z_n^T \cdot I_{pq}^{abc} \quad (6)$$

Uvrštavanjem (6) u (5) se dobije (7):

$$V_p^{abc} = V_q^{abc} + Z_{abc} \cdot I_{pq}^{abc} + Z_n \cdot (-Z_{nn}^{-1} \cdot Z_n^T \cdot I_{pq}^{abc}) = V_q^{abc} + Z_{pq}^{abc} \cdot I_{pq}^{abc} \quad (7)$$

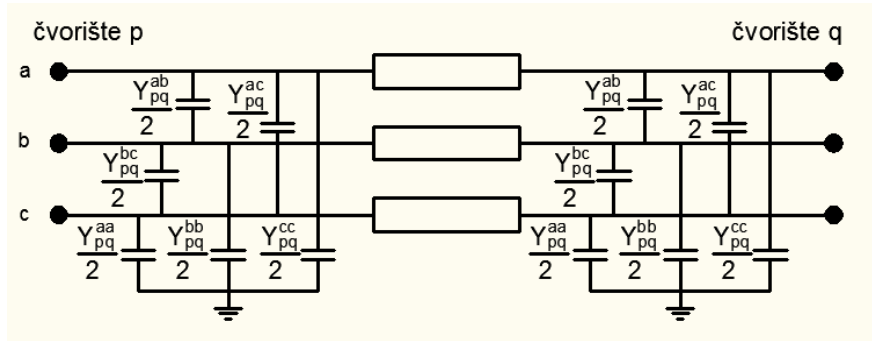
gdje je

$$Z_{pq}^{abc} = Z_{abc} - Z_n \cdot Z_{nn}^{-1} \cdot Z_n^T \quad (8)$$

Konačno se matrica impedancija voda može zapisati u obliku 3x3 (9):

$$[Z_{pq}^{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa}' & Z_{ab}' & Z_{ac}' \\ Z_{ba}' & Z_{bb}' & Z_{bc}' \\ Z_{ca}' & Z_{cb}' & Z_{cc}' \end{bmatrix} \quad (9)$$

Na slici 2. prikazan je nadomjesni model trofaznog voda s poprečnim kapacitetima između pojedinih vodiča te vodiča i zemlje [2].



Slika 2. Nadmjesni model trofaznog voda s poprečnim admitancijama

Potencijalni koeficijenti vlastitih i međusobnih poprečnih kapaciteta čvorišta p se mogu odrediti iz izraza (10) i (11) [1]:

$$P_{ii}^p = 18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{D_{i'i}}{D_{ii}} \quad km / F \quad (10)$$

$$P_{ij}^p = 18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{D_{i'j}}{D_{ij}} \quad km / F \quad (11)$$

gdje su:

- $D_{i'i}$ – udaljenost vodiča i i njegove zrcalne slike i' ispod zemlje [m],
- D_{ii} – udaljenost vodiča i od samog sebe (reducirani radijus) [m],
- $D_{i'j}$ – udaljenost zrcalne slike vodiča i' ispod zemlje i vodiča j [m],
- D_{ij} – međusobna udaljenost vodiča i i j [m].

Na temelju izračunatih vrijednosti potencijalnih koeficijenata može se izračunati matrica admitancija (12):

$$[Y_p^{abc}] = j\omega \cdot \begin{bmatrix} P_{aa}^p & P_{ab}^p & P_{ac}^p \\ P_{ba}^p & P_{bb}^p & P_{bc}^p \\ P_{ca}^p & P_{cb}^p & P_{cc}^p \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} B_{aa} & B_{ab} & B_{ac} \\ B_{ba} & B_{bb} & B_{bc} \\ B_{ca} & B_{cb} & B_{cc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Ukoliko su poznate vrijednosti vlastitih i međusobnih admitancija, matrica admitancija se može izračunati prema izrazu (13):

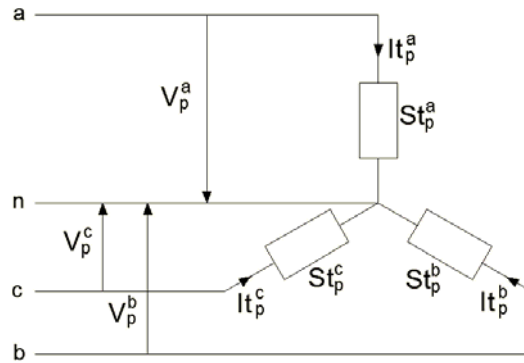
$$[Y_p^{abc}] = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} -\sum_i Y_{pq}^{ai} & Y_{pq}^{ab} & Y_{pq}^{ac} \\ Y_{pq}^{ba} & -\sum_i Y_{pq}^{bi} & Y_{pq}^{bc} \\ Y_{pq}^{ca} & Y_{pq}^{cb} & -\sum_i Y_{pq}^{ci} \end{bmatrix}, i = \{a, b, c\} \quad (13)$$

Struja kroz poprečne admitancije u čvorištu p se računa kao zbroj struja kroz poprečne admitancije svih grana koje su spojene na čvorište p (14):

$$\begin{bmatrix} Ish_p^a \\ Ish_p^b \\ Ish_p^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ish_p^a \\ Ish_p^b \\ Ish_p^c \end{bmatrix} = \sum_i \begin{bmatrix} Y_p^{abc} \end{bmatrix}_i \cdot \begin{bmatrix} V_p^a \\ V_p^b \\ V_p^c \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.2. Nadomjesni model tereta

Trofazni tereti mogu biti spojeni u zvijezdu ili u trokut, dok su monofazni tereti uglavnom spojeni između jedne od faza i nul-vodiča. Ovisno o karakteristikama trošila, teret se može modelirati s konstantnom snagom, s konstantnom strujom ili s konstantnom impedancijom. Na slici 3. je prikazan model trofaznog nesimetričnog tereta spojenog u zvijezdu i priključenog u čvorište p [2].

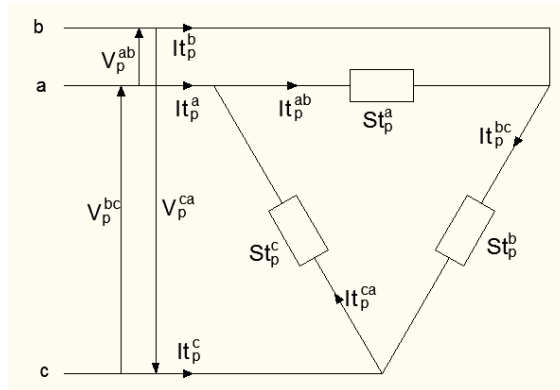


Slika 3. Model trofaznog nesimetričnog tereta u spoju zvijezda

Vektor struja trofaznog tereta u spoju zvijezda se računa prema izrazu (15):

$$\begin{bmatrix} It_p^a \\ It_p^b \\ It_p^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} It_p^a \\ It_p^b \\ It_p^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{St_p^a}{V_p^a} \right)^* \cdot |V_p^a|^n \\ \left(\frac{St_p^b}{V_p^b} \right)^* \cdot |V_p^b|^n \\ \left(\frac{St_p^c}{V_p^c} \right)^* \cdot |V_p^c|^n \end{bmatrix}, \quad \begin{cases} n = 0 & S = const. \\ n = 1 & I = const. \\ n = 2 & Z = const. \end{cases} \quad (15)$$

Na slici 4. prikazan je model trofaznog tereta spojenog u trokut.



Slika 4. Model trofaznog nesimetričnog tereta u spoju trokut

Vektor struja trofaznog tereta u spoju trokut se računa prema izrazu (16):

$$\begin{bmatrix} I_{p}^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_p^a \\ I_p^b \\ I_p^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{St_p^{ab}}{V_p^{ab}} \right)^* \cdot |V_p^{ab}|^n - \left(\frac{St_p^{ca}}{V_p^{ca}} \right)^* \cdot |V_p^{ca}|^n \\ \left(\frac{St_p^{bc}}{V_p^{bc}} \right)^* \cdot |V_p^{bc}|^n - \left(\frac{St_p^{ab}}{V_p^{ab}} \right)^* \cdot |V_p^{ab}|^n \\ \left(\frac{St_p^{ca}}{V_p^{ca}} \right)^* \cdot |V_p^{ca}|^n - \left(\frac{St_p^{bc}}{V_p^{bc}} \right)^* \cdot |V_p^{bc}|^n \end{bmatrix}, \quad \begin{cases} n=0 & S = const. \\ n=1 & I = const. \\ n=2 & Z = const. \end{cases} \quad (16)$$

Jednofazni i dvofazni tereti se računaju prema modelu spoja u zvijezdu za odgovarajuće faze na koje je teret spojen, a preostale faze imaju vrijednost nula.

2.3. Naponska i strujna jednadžba pojedine grane voda

Nakon što su u prethodnim poglavljima prikazani načini modeliranja trofaznih vodova, konačno se mogu definirati naponska i strujna jednadžba pojedine grane voda između čvorišta p i q. Ukupna struja koja protječe kroz granu pq je jednaka zbroju struja kroz poprečne kapacitete ulazne grane pq i svih izlaznih grana iz čvorišta q, struja svih tereta u čvorištu q te struja izlaznih grana iz čvorišta q (17).

$$\begin{bmatrix} I_{pq}^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{pq}^a \\ I_{pq}^b \\ I_{pq}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i I_{qi}^a + \sum_i I_{sh_{qi}}^a + \sum_i I_{iz_{qi}}^a \\ \sum_i I_{qi}^b + \sum_i I_{sh_{qi}}^b + \sum_i I_{iz_{qi}}^b \\ \sum_i I_{qi}^c + \sum_i I_{sh_{qi}}^c + \sum_i I_{iz_{qi}}^c \end{bmatrix} \quad (17)$$

Konačno se može postaviti i naponska jednadžba pada napona između čvorišta p i q razmatranog voda (18):

$$\begin{bmatrix} V_q^a \\ V_q^b \\ V_q^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_p^a \\ V_p^b \\ V_p^c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{aa}' & Z_{ab}' & Z_{ac}' \\ Z_{ba}' & Z_{bb}' & Z_{bc}' \\ Z_{ca}' & Z_{cb}' & Z_{cc}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{pq}^a \\ I_{pq}^b \\ I_{pq}^c \end{bmatrix} \quad (18)$$

2.4. Nadomjesni model transformatora

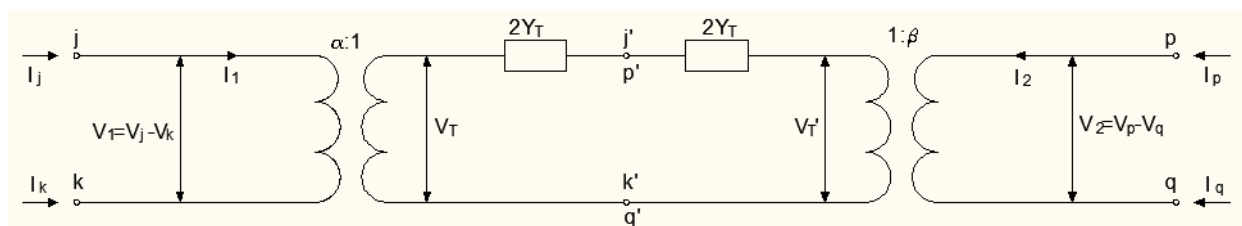
U distribucijskim mrežama se uglavnom koriste dvonamotni transformatori pa će se u ovom poglavlju prikazati samo način njihovog modeliranja. Prvo će se prikazati način modeliranja jednofaznog transformatora iz kojeg će se spajanjem izvesti trofazni model. U modelu transformatora se poprečna grana može zanemariti te se uzima u obzir samo uzdužna impedancija Z_T (19):

$$Z_T = \frac{U_n^2}{S_n} \left[\frac{P_{Cu}}{S_n} + j \sqrt{u_k^2 - \left(\frac{P_{Cu}}{S_n} \right)^2} \right] \quad (19)$$

gdje su:

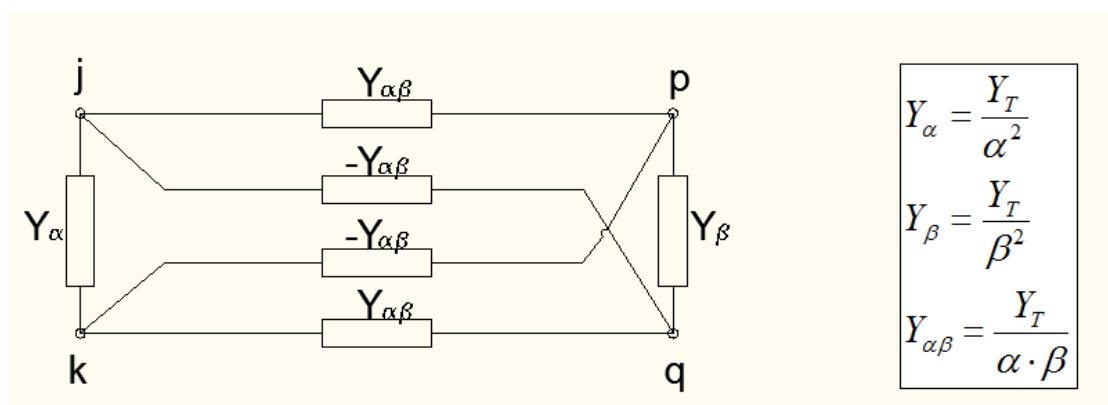
U_n – nazivni napon transformatora [kV],
 S_n – nazivna snaga transformatora [MVA],
 u_k – napon kratkog spoja [%],
 P_{Cu} – gubici u bakru [kW].

Na slici 5. prikazan je općeniti jednofazni model transformatora s nenazivnim prijenosnim omjerom na primarnoj i sekundarnoj strani. Inverzom uzdužne impedancije dobije se vrijednost uzdužne admitancije Y_T , a α i β su prijenosni omjeri određeni odnosom stvarnog i nazivnog prijenosnog omjera napona primara i sekundara [1].



Slika 5. Jednofazni model transformatora s nenazivnim prijenosnim omjerom na primarnoj i sekundarnoj strani.

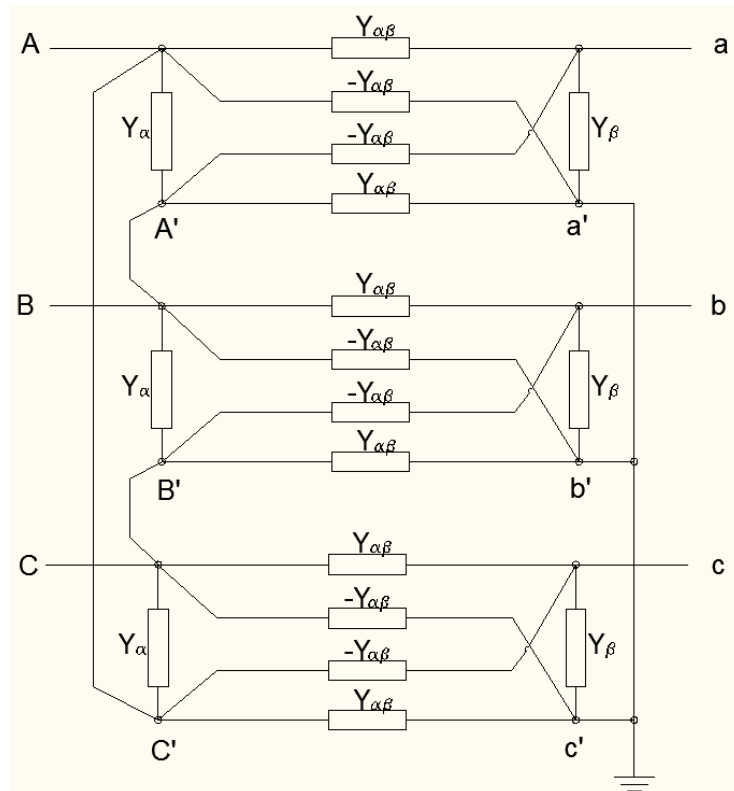
Iz navedenog modela se mogu formirati dva ekvivalentna četveropola između čvorišta j i k te j' i k', odnosno između čvorišta p i q te p i q. Spajanjem dva serijski spojena četveropola dobije se ekvivalentni četveropol jednofaznog modela transformatora (slika 6.) koji služi kao osnova za izradu modela transformatora svih vrsta spoja.



Slika 6. Ekvivalentni četveropol jednofaznog modela transformatora

U ovom članku kao primjer će se prikazati trofazni model transformatora u spoju Dyn5 koji se prilično često susreće u distribucijskim mrežama. Matematički model navedenog transformatora je prikazan na slici 7, a strujno-naponski odnosi primarne i sekundarne strane transformatora su određeni izrazom (20):

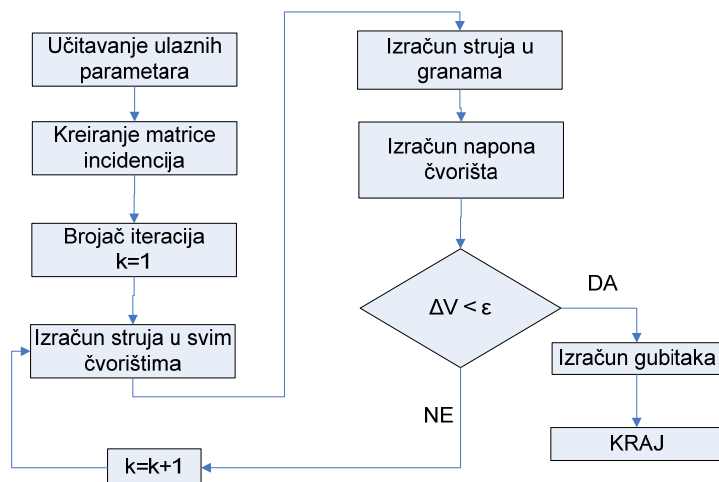
$$\begin{bmatrix} I^A \\ I^B \\ I^C \\ I^a \\ I^b \\ I^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2Y_\alpha & -Y_\alpha & -Y_\alpha & Y_{\alpha\beta} & 0 & -Y_{\alpha\beta} \\ -Y_\alpha & 2Y_\alpha & -Y_\alpha & -Y_{\alpha\beta} & Y_{\alpha\beta} & 0 \\ -Y_\alpha & -Y_\alpha & 2Y_\alpha & 0 & -Y_{\alpha\beta} & Y_{\alpha\beta} \\ Y_{\alpha\beta} & -Y_{\alpha\beta} & 0 & Y_\beta & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\alpha\beta} & -Y_{\alpha\beta} & 0 & Y_\beta & 0 \\ -Y_{\alpha\beta} & 0 & Y_{\alpha\beta} & 0 & 0 & Y_\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V^A \\ V^B \\ V^C \\ V^a \\ V^b \\ V^c \end{bmatrix} \quad (20)$$



Slika 7. Ekvivalentni model trofaznog transformatora tipa Dyn5

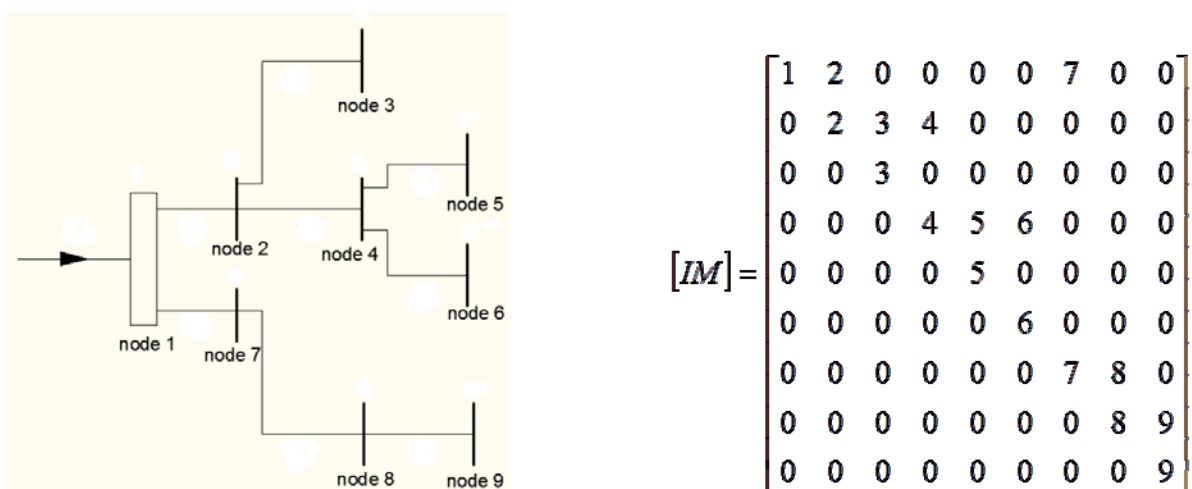
3. METODA NAPRIJED NATRAG

Za proračun tokova snaga na trofaznom modelu mreže odabrana je metoda naprijed natrag (*eng. Forward-backward sweep*). Radi se o iterativnoj metodi proračuna tokova snaga u radijalnim mrežama koja konvergira čak i u slučajevima velikog omjera R/X koji je karakterističan za distribucijske mreže. Na slici 8. prikazan je dijagram toka odabrane metode.



Slika 8. Dijagram toka za proračun tokova snaga metodom naprijed natrag

Prvi korak u navedenoj metodi je kreirati matricu incidencija koja definira povezanost pojedinih čvorišta. U izrazito radijalnoj mreži, matrica incidencija nije nužna. Budući da se realne distribucijske mreže u naravi razgranate radijalne mreže, u tom slučaju je matrica incidencija nužna. Jedan od načina kreiranja matrice incidencija [IM] prikazan je na primjeru mreže na slici 9.



Slika 9. Kreiranje matrice incidencija za zadani primjer radialne mreže

Prema ovom načinu matrica incidencija je gornja trokutasta matrica. Dijagonalni elementi matrice su ulazna čvorišta pojedine grane, a nenul elementi gornje trokutaste matrice označavaju izlazna čvorišta koja su vezana na pojedino ulazno čvorište.

Nakon učitavanja ulaznih parametara i kreiranja matrice incidencija započinje iterativni postupak. U prvom koraku iterativnog postupka računaju se struje u svim čvorištima kao zbroj struja tereta, proizvodnje i kapacitivnih struja (21) [3].

$$[I_p^{abc}]^{(k)} = \begin{bmatrix} I_p^a \\ I_p^b \\ I_p^c \end{bmatrix}^{(k)} = \sum_i \begin{bmatrix} \left(\frac{S_p^a}{V_p^{a(k-1)}} \right)^* \\ \left(\frac{S_p^b}{V_p^{b(k-1)}} \right)^* \\ \left(\frac{S_p^c}{V_p^{c(k-1)}} \right)^* \end{bmatrix} - \sum_i [Y_p^{abc}] \cdot [V_p^{abc}]^{(k-1)} \quad (21)$$

U drugom koraku se računaju struje u svim granama kao zbroj struje u izlaznom čvorištu grane i zbroja struja svih grana vazenih na izlazno čvorište (22). Postupak kreće od posljednjeg čvrišta prema pojnom čvorištu te se ovaj korak naziva i „metoda natrag“

$$[I_{pq}^{abc}]^{(k)} = [I_q^{abc}]^{(k)} + \sum_i [I_{iz}^{abc}]_{qi}^{(k)} \quad (22)$$

U trećem koraku se računaju naponi u svim čvorištima koristeći rezultate iz prva dva koraka. Naponi se računaju prema izrazu (23), i to od pojnog čvorišta prema krajnjim čvorištima te se ovaj korak naziva i „metoda naprijed“.

$$[V_q^{abc}]^{(k)} = [V_p^{abc}]^{(k)} - [Z_{pq}^{abc}] \cdot [I_{pq}^{abc}]^{(k)} \quad (23)$$

Na kraju svake iteracije se provjerava razlika napona svih čvorištima u odnosu na prethodnu iteraciju (24). Ukoliko je razlika u svim čvorištima manja od tražene točnosti, iterativni postupak završava.

$$\Delta[V_i^{abc}]^{(k)} = [V_i^{abc}]^{(k)} - [V_i^{abc}]^{(k-1)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

Nakon izračuna napona čvorišta i struja u granama, konačno se mogu izračunati ukupni gubici u razmatranoj mreži kao zbroj gubitaka u svim granama i gubitaka u poprečnim admitancijama (25):

$$S_{guk} = \sum_{i,j} S_{ggrana\ ij} + \sum_i S_{gshunt\ i} \quad (25)$$

4. PROVJERA TOČNOSTI MODELA

Na temelju algoritma iz prethodnog poglavlja izrađen je program za računanje trofaznih tokova snaga u programskoj paketu Matlab. Za provjeru točnosti kao primjer je odabrana mreža prikazana na slici 9, a rezultati proračuna će se usporediti s rezultatima dobivenim pomoću komercijalnog programskog paketa Neplan 360. U oba programa tražena točnost iznosi $\epsilon=0,0001$. U Neplanu je za proračun odabrana metoda Newton-Raphson. Rezultati proračuna naponskih prilika su iskazani u (p.u.) s pripadajućim faznim pomakom ($^{\circ}$) i nalaze se u tablici I. Vidljivo je da se rezultati gotovo u potpunosti poklapaju.

Tablica I. Usporedba rezultata proračuna tokova snaga dobivenih pomoću vlastitog programa i programskog paketa Neplan

ČVORIŠTE I FAZA	METODA NAPRIJED NATRAG		NEPLAN	
	V (p.u.)	KUT ($^{\circ}$)	V (p.u.)	KUT ($^{\circ}$)
1A	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000
1B	1.0000	240.0000	1.0000	240.0000
1C	1.0000	120.0000	1.0000	120.0000
2A	0.9805	-0.0230	0.9805	-0.0230
2B	0.9802	239.9770	0.9802	239.9771
2C	0.9812	119.8837	0.9812	119.8837
3A	0.9718	-0.1035	0.9718	-0.1036
4A	0.9766	0.0187	0.9766	0.0186
4B	0.9726	240.0021	0.9726	240.0032
4C	0.9767	119.8437	0.9767	119.8437
5A	0.9781	0.0553	0.9781	0.0553
5B	0.9741	240.0400	0.9741	240.0401
5C	0.9781	119.8803	0.9781	119.8803
6A	0.9525	-0.0945	0.9525	-0.0946
6B	0.9357	239.8295	0.9357	239.8296
6C	0.9504	119.4352	0.9504	119.4351
7A	0.9898	0.1445	0.9898	0.1444
7B	0.9892	240.0021	0.9892	240.0019
7C	0.9913	120.0122	0.9913	120.0123
8A	0.9882	0.3504	0.9882	0.3504
8B	0.9716	240.0652	0.9716	240.0651
8C	0.9555	120.1404	0.9555	120.1405
9A	0.9978	0.5870	0.9978	0.5869
9B	0.9814	240.3099	0.9814	240.3097
9C	0.9654	120.3933	0.9654	120.3934

Osim napona, oba programa računaju i gubitke snage u zadanoj mreži. Na promatranom primjeru mreže oba programa su dala identičan rezultat ukupnih gubitaka koji iznosi $S_{guk} = 2,2588 + j 0,9591$ kVA. Na ovaj način dokazana je točnost proračuna vlastitog programa.

5. ZAKLJUČAK

U ovom članku prikazan je način izrade trofaznih modela pojedinih dijelova distribucijske elektroenergetske mreže. Navedeni modeli su iskorišteni za izradu programa za proračune tokova snaga u razgranatim radialnim distribucijskim mrežama koristeći metodu naprijed natrag. Točnost programa je dokazana usporedbom rezultata proračuna s rezultatima dobivenim pomoću komercijalnog programskog paketa Neplan. Korištena metoda je pokazala dobre konvergencijske karakteristike i u slučajevima velikih omjera R/X koji su karakteristični za distribucijske mreže.

Program je iskoristiv za proračune tokova snaga uključujući i ukupne tehničke gubitke u mreži. Pomoću njega se mogu izraditi analize gubitaka na trofaznom modelu što je bitno za distribucijsku mrežu, a posebno za niskonaponsku mrežu koja je najčešće nesimetrično opterećena. Radi preglednosti i približavanja korisnicima program je moguće doraditi da bude izrađen u nekom od objektno orijentiranih programskih jezika. Također, ovaj program se može iskoristiti i kao baza za izradu optimizacijskih modela u distribucijskoj mreži.

6. LITERATURA

- [1] I.Pavić, "Trofazni proračun tokova snaga", Udžbenici sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, Veljača 2011.
- [2] J.B.V.Subrahmanyam, "Load flow solution of unbalanced radial distribution systems", Journal of Theoretical and Applied Information Technology, vol.6, No.1, pp 040-051, 2009.
- [3] G.W.Chang, S.Y.Chu, H.L.Wang, "An improved backward/forward sweep load flow algorithm for radial distribution systems", IEEE Transactions on power systems, vol.22, No. 2, Svibanj 2007.
- [4] W.H.Kersting, "Distribution system modelling and analysis", CRC Press, 2002.