

TEHNIČKO REŠENJE

Softver za proračun režima trofaznih transformatora

M-85: Prototip, nova metoda, softver, standardizovan ili atestiran instrument, nova genetska proba, mikroorganizmi

Autori:

dr Predrag Vidović, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Godina:

2017.

Podtip tehničkog rešenja:

Softver – M85

Korisnik:

Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, za potrebe daljih istraživanja

Projekat u okviru kojeg je realizovano tehničko rešenje:

Broj projekta: III-42004 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije

Program istraživanja u oblasti tehnološkog razvoja za period 2011-2017.

Tehnološka oblast: Elektroenergetika

Naziv projekta: Pametne elektrodistributivne mreže zasnovane na Distributivnom menadžment sistemu i distribuiranoj proizvodnji

Rukovodilac projekta: dr Dragan Popović, redovni profesor

Kako su rezultati verifikovani (od strane kog tela):

Verifikacija tehničkog rešenja je izvršena od strane:

Nastavno-naučnog veća Fakulteta tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

1 Opis problema koji se rešava tehničkim rešenjem

Oblast na koju se tehničko rešenje odnosi

Elektroenergetika, elektroenergetski sistemi, pametne elektrodistributivne mreže.

Problem koji se tehničkim rešenjem rešava

Proračun nesimetričnih režima trofaznih transformatora je dosta kompleksniji problem od proračuna simetričnih režima trofaznih transformatora. Glavni razlog za to predstavlja ažuriranje napona sekundara tih transformatora, odnosno ažuriranje nulte komponente napona.

U ovom tehničkom rešenju dat je softver na osnovu kojeg mogu da se proračunavaju nesimetrični režimi trofaznih transformatora. Ažuriranje nulte komponente napona, kod transformatora čija oba namotaja nisu spregnuta u zvezdi i oba zvezdišta uzemljena ili primar povezan u trougao, a sekundar u uzemljenu zvezdu, predloženo je korišćenje modela potrošnje tipa konstantne impedanse/admitanse. Na taj način se singularne matrice mogu prevesti u regularne i samim tim rešiti problem ažuriranja nulte komponente napona.

2 Stanje rešenosti tog problema u svetu

Načelna šema trofaznog transformatora, s bilo kojom od četiri osnovne sprege – Yy , Dy , Yd i Dd , kao elementa radialne distributivne mreže, prikazana je na slici 2.1 [1, 2]. Kada se slova N ili n nalaze u subskriptu oznake Y ili y (namotaji povezani u zvezdu), to ukazuje na uzemljeno zvezdište. Kada tih subskripta nema, zvezdište je izolovano. Ako je zvezdište uzemljeno, ovde će se smatrati da je to uzemljenje direktno.

Matematički model transformatora s ma kojom od četiri osnovne sprege, napisan saglasno s metodom nezavisnih napona, glasi [3, 4, 5] (idealni transformatori su eliminisani primenom sistema relativnih vrednosti [6] i relativnih uglova [7]):

$$\hat{\mathbf{I}}_{oK} = \hat{\mathbf{Y}}_{oK} \hat{\mathbf{U}}_K, \quad \hat{\mathbf{I}}_{ok} = \hat{\mathbf{Y}}_{ok} \hat{\mathbf{U}}_k, \quad (2.1a)$$

$$\hat{\mathbf{I}}'_k = \hat{\mathbf{Y}}_{KK} \hat{\mathbf{U}}_K + \hat{\mathbf{Y}}_{Kk} \hat{\mathbf{U}}_k, \quad (2.1b)$$

$$-\hat{\mathbf{I}}''_k = \hat{\mathbf{Y}}_{kK} \hat{\mathbf{U}}_K + \hat{\mathbf{Y}}_{kk} \hat{\mathbf{U}}_k, \quad (2.1c)$$

pri čemu se čvorovi K i k odnose na početak i kraj (odnosno na primar i sekundar) transformatora, respektivno. Značenja ostalih oznaka jesu:

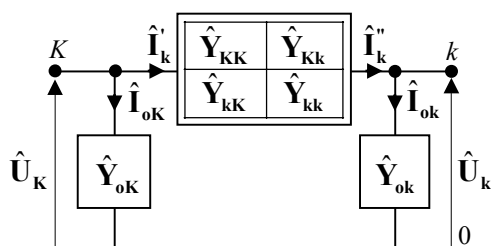
$\hat{\mathbf{U}}_K, \hat{\mathbf{U}}_k$ – vektori faznih napona primara i sekundara, dimenzija 3×1 ;

$\hat{\mathbf{I}}'_k, \hat{\mathbf{I}}''_k$ – međusobno različiti vektori faznih struja primara i sekundara, dimenzija 3×1 ;

$\hat{\mathbf{I}}_{oK}, \hat{\mathbf{I}}_{ok}$ – vektori faznih struja otočnih parametara primara i sekundara transformatora, dimenzija 3×1 ;

$\hat{Y}_{oK}$, $\hat{Y}_{ok}$ – matrični reprezentanti magnećenja transformatora (otočni parametri) predstavljeni alternativno na primaru, odnosno sekundaru transformatora, dimenzija 3×3; samo jedan od njih može da bude nenulti.

Matrični reprezentanti rednih parametara transformatora, iz relacija (2.1b i c), dimenzija 3×3, za sve četiri obrađivane sprege, date su u tabeli 2.1 [4, 8] (T je znak za transpoziciju matrice). Matrice iz tabele 2.1 odnose se na sprege Yy i Dd sa sprežnim brojem 0, a za Yd i Dy sa sprežnim brojem 1. Matrični reprezentanti za sve sprege se dobijaju preko odgovarajućih matrica incidencije [1].



Slika 2.1 – Načelna šema trofaznog transformatora.

Tabela 2.1 – Matrični reprezentanti rednih parametara transformatora.

Sprega	$\hat{Y}_{KK}$	$\hat{Y}_{Kk}$	$\hat{Y}_{kK}$	$\hat{Y}_{kk}$
Y_{NYn}	$\hat{Y}_I$	$-\hat{Y}_I$	$-\hat{Y}_I$	$\hat{Y}_I$
Y_{NY}	$\hat{Y}_{II}$	$-\hat{Y}_{II}$	$-\hat{Y}_{II}$	$\hat{Y}_{II}$
Y_{Yn}	$\hat{Y}_{II}$	$-\hat{Y}_{II}$	$-\hat{Y}_{II}$	$\hat{Y}_{II}$
Y_y	$\hat{Y}_{II}$	$-\hat{Y}_{II}$	$-\hat{Y}_{II}$	$\hat{Y}_{II}$
Y_{Nd}	$\hat{Y}_I$	$\hat{Y}_{III}^T$	$\hat{Y}_{III}$	$\hat{Y}_{II}$
Y_d	$\hat{Y}_{II}$	$\hat{Y}_{III}^T$	$\hat{Y}_{III}$	$\hat{Y}_{II}$
D_{Yn}	$\hat{Y}_{II}$	$\hat{Y}_{III}^T$	$\hat{Y}_{III}$	$\hat{Y}_I$
D_y	$\hat{Y}_{II}$	$\hat{Y}_{III}^T$	$\hat{Y}_{III}$	$\hat{Y}_{II}$
D_d	$\hat{Y}_{II}$	$-\hat{Y}_{II}$	$-\hat{Y}_{II}$	$\hat{Y}_{II}$

U Tabeli 2.1, sa $\hat{Y}_I$, $\hat{Y}_{II}$ i $\hat{Y}_{III}$ označene su matrice:

$$\hat{Y}_I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{Y}, \quad \hat{Y}_{II} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \hat{Y}, \quad \hat{Y}_{III} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \hat{Y}, \quad (2.2)$$

gde je sa $\hat{Y}$ označena admitansa kratkog spoja transformatora.

Matrica $\hat{Y}_I$ je regularna, a matrice $\hat{Y}_{II}$ i $\hat{Y}_{III}$ su singularne matrice. Tako, na osnovu tabele 2.1 je očigledno da, u zavisnosti od sprege transformatora, matrice $\hat{Y}_{KK}$, $\hat{Y}_{Kk}$, $\hat{Y}_{kK}$ i $\hat{Y}_{kk}$ mogu da budu i regularne i singularne.

Na osnovu modela transformatora u nesimetričnim režimima (2.1), očigledno je, zbog pomenute singularnosti matrica modela, da struje i naponi ne mogu da se trivijalno prenose s jednog na drugi njegov kraj, osim u slučaju sprege Y_{NYn} . **Ova činjenica predstavlja suštinsku teškoću za generalisanje procedura sumiranja struja i korekcija napona s proračuna simetričnih tokova snaga za proračune nesimetričnih tokova snaga.**

Napomena: Ovde će se smatrati ako modul odnosa transformacije idealnog transformatora u domenu relativnih vrednosti nije jednak jedinici, onda su redni parametri transformatora ekvivalentirani Π šemom impedansi (admitansi); otočne grane koje se pritom pojavljuju, pridružene su otočnim granama priključnih čvorova primara i sekundara transformatora za mrežu.

Matrični reprezent otočnih parametara transformatora, pridružen je otočnim granama priključnih čvorova primara ili sekundara transformatora za mrežu. Prema tome, transformator kao redna grana mreže, može da se predstavi samo matričnim reprezentom njegovih rednih parametara. Upravo za tako tretiran transformator potrebno je da se napiše matematički model, kojim su opisane vrijednosti faznih napona i struja obje strane transformatora, kao i snaga sekundara.

Matematički model transformatora s bilo kojom od četiri osnovne sprege – Yy , Dy , Yd i Dd (zvezdišta mogu i ne moraju da budu uzemljena), s matričnim reprezentima otočnih parametara pridruženim otočnim granama priključnih čvorova primara ili sekundara transformatora za mrežu, dat je relacijama (2.1b i c):

$$\hat{\mathbf{I}}'_k = \hat{Y}_{KK} \hat{\mathbf{U}}_K + \hat{Y}_{Kk} \hat{\mathbf{U}}_k, \quad (2.3a)$$

$$-\hat{\mathbf{I}}''_k = \hat{Y}_{KK} \hat{\mathbf{U}}_K + \hat{Y}_{kk} \hat{\mathbf{U}}_k. \quad (2.3b)$$

U modelu (2.3), kojeg čini šest skalarnih relacija, pojavljuje se sledećih dvanaest promenljivih:

$$\begin{aligned} &\hat{I}_A, \hat{I}_B, \hat{I}_C, \quad \hat{I}_a, \hat{I}_b, \hat{I}_c, \\ &\hat{U}_A, \hat{U}_B, \hat{U}_C, \quad \hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c, \end{aligned} \quad (2.4)$$

gde su $\hat{I}_A, \hat{I}_B, \hat{I}_C$ elementi vektora $\hat{\mathbf{I}}'_k$, $\hat{I}_a, \hat{I}_b, \hat{I}_c$ elementi vektora $\hat{\mathbf{I}}''_k$, $\hat{U}_A, \hat{U}_B, \hat{U}_C$ elementi vektora $\hat{\mathbf{U}}_K$ i $\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c$ elementi vektora $\hat{\mathbf{U}}_k$.

Tri definicione relacije faznih snaga sekundara transformatora – u čvoru k , glase:

$$\hat{S}_a(U_a) = \hat{U}_a^* \hat{I}_a, \quad \hat{S}_b(U_b) = \hat{U}_b^* \hat{I}_b, \quad \hat{S}_c(U_c) = \hat{U}_c^* \hat{I}_c. \quad (2.5)$$

U njima se pojavljuju još tri promenljive – tri fazne snage – $\hat{S}_a(U_a)$, $\hat{S}_b(U_b)$ i $\hat{S}_c(U_c)$, koje su zavisne od napona [9, 10]. Dakle, kada se uvažavaju relacije (2.5), tada je reč o devet relacija sa petnaest promenljivih. Tako, matematički model transformatora s potrošačima priključenim na

njegovom sekundaru, može da se definitivno sastavi od devet relacija (2.3) i (2.5) na sledeći način:

$$(2.3a) \quad \hat{\mathbf{I}}'_k = \hat{\mathbf{Y}}_{KK} \hat{\mathbf{U}}_K + \hat{\mathbf{Y}}_{Kk} \hat{\mathbf{U}}_k, \quad (2.6a)$$

$$(2.3b) \quad -\hat{\mathbf{I}}''_k = \hat{\mathbf{Y}}_{kK} \hat{\mathbf{U}}_K + \hat{\mathbf{Y}}_{kk} \hat{\mathbf{U}}_k, \quad (2.6b)$$

$$(2.5) \quad \hat{S}_a(U_a) = \hat{U}_a^* \hat{I}_a, \quad \hat{S}_b(U_b) = \hat{U}_b^* \hat{I}_b, \quad \hat{S}_c(U_c) = \hat{U}_c^* \hat{I}_c, \quad (2.6c)$$

s petnaest promenljivih:

$$\hat{U}_A, \hat{U}_B, \hat{U}_C, \hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c, \hat{I}_A, \hat{I}_B, \hat{I}_C, \hat{I}_a, \hat{I}_b, \hat{I}_c, \hat{S}_a(U_a), \hat{S}_b(U_b), \hat{S}_c(U_c). \quad (2.7)$$

Dakle, petnaest promenljivih (2.7) opisano je s devet relacija (2.6). Za određivanje režima transformatora potrebno je da se specificira šest od tih promenljivih, odnosno da se specificira (zada) eksitacija transformatora, pa tek onda da se odredi (izračuna) preostalih devet nepoznatih promenljivih iz isto toliko jednačina (2.6). Mogućnost izbora promenljivih koje će činiti eksitaciju transformatora zavisi od regularnosti matrica modela kojeg čine relacije (2.6a i b).

Parametri transformatora (tablični podaci) [11, 12] su poznati.

3 Detaljan opis tehničkog rešenja (uključujući i prateće ilustracije i tehničke crteže)

Ovde je prvo opisan proračun režima trofaznih transformatora različitih sprega, a zatim softver kojim se proračunava režim tih transformatora.

3.1 Trofazni transformatori

Načelna šema trofaznog transformatora s bilo kojom od četiri osnovne sprega – Yy, Dy, Yd i Dd, prikazana je na slici 2.1. Problem koji treba da se obradi glasi: Izračunati (nesimetrični) režim transformatora za poznate (nesimetrične) napone na primaru $\hat{\mathbf{U}}_K$ ($\hat{U}_A$, $\hat{U}_B$ i $\hat{U}_C$) i specificirane (međusobno različite) snage na sekundaru $\hat{\mathbf{S}}_k$ ($\hat{S}_a^{spec}$, $\hat{S}_b^{spec}$, $\hat{S}_c^{spec}$). Problem rešiti u tri dela – zadatka: 1 – Procedura sumiranja struja, 2 – Procedura korekcija napona i 3 – Postupak za proračun (nesimetričnog) režima transformatora zasnovan na rešenjima prethodna dva zadatka. Prvo će biti obrađeni transformatori kod kojih ne postoji problem ažuriranja nulte komponente napona na sekundaru – transformatori sa spregama $Y_{Ny}k$ i Dy_nk – matrica $\hat{\mathbf{Y}}_{kk}$ u relacijama (2.3b) regularna je. Posle toga obradiće se i transformatori kod kojih postoji problem ažuriranja nulte komponente napona na sekundaru – transformatori sa spregama $Y_{Nd}k$ i Dd_k – matrica $\hat{\mathbf{Y}}_{kk}$ u relacijama (2.3b) singularna je. Potrebno je da se obrati pažnja da se ne razmatraju sve kombinacije povezanosti namotaja primara i sekundara (tabela 2.1) pošto se one, modelski, sa aspekta ažuriranja nulte komponente napona na sekundaru transformatora, svode na neku od četiri osnovne sprega.

3.1.1 Transformatori sa spregama Y_{NYnk} i Dy_{nk}

Ovde se obrađuju procedura sumiranja struja, procedura korekcija napona i postupak za proračun (nesimetričnog) režima transformatora sa spregama Y_{NYnk} i Dy_{nk} .

3.1.1.2 Zadatak – Procedura sumiranja struja

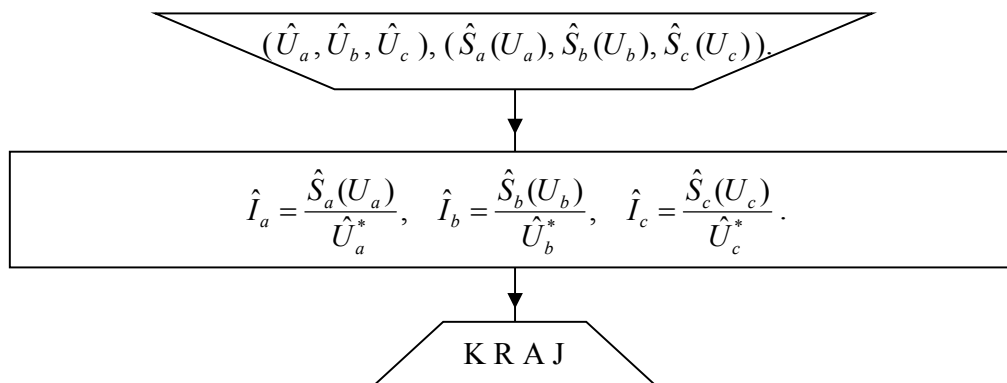
Neka je transformator s ma kojom od sprega Y_{NYnk} i Dy_{nk} eksitovan naponima i snagama na sekundaru transformatora: $(\hat{U}_k$, tj. $\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c$) i $(\hat{S}_a^{spec}, \hat{S}_b^{spec}, \hat{S}_c^{spec})$, respektivno. Izračunati odziv koji čine struje na sekundaru transformatora $(\hat{I}_k''$, tj. $\hat{I}_a, \hat{I}_b, \hat{I}_c$).

Rešenje zadatka

Koristeći se zadatim naponima na sekundaru transformatora mogu da se izračunaju fazne struje na sekundaru, koristeći se relacijama (2.5):

$$\hat{I}_a = \frac{\hat{S}_a(U_a)}{\hat{U}_a^*}, \quad \hat{I}_b = \frac{\hat{S}_b(U_b)}{\hat{U}_b^*}, \quad \hat{I}_c = \frac{\hat{S}_c(U_c)}{\hat{U}_c^*}. \quad (3.1.1.2.1)$$

Time je zadatak 3.1.1.2 rešen. Blok-dijagram rešenja prikazan je na slici 3.1.1.2.1.



Slika 3.1.1.2.1 – Blok-dijagram rešenja zadatka 3.1.1.2 – sumiranje struja

3.1.1.2 Zadatak – Procedura korekcija napona

Neka je transformator s ma kojom od sprega Y_{NYnk} i Dy_{nk} eksitovan naponima na primaru transformatora $(\hat{U}_K$, tj. $\hat{U}_A, \hat{U}_B, \hat{U}_C$) i strujama na sekundaru $(\hat{I}_k''$, tj. $\hat{I}_a, \hat{I}_b, \hat{I}_c$). Ove struje su izračunate u prethodnom zadatku. Izračunati odziv koji čine naponi na sekundaru transformatora $(\hat{U}_k, \hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c)$.

Rešenje zadatka

Na osnovu poznatih napona na primaru transformatora $\hat{U}_K$ i relacije (2.6b), mogu da se odrede fazni naponi na sekundaru na sledeći način:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{bmatrix} = -\hat{\mathbf{Y}}_{\mathbf{kk}}^{-1} \hat{\mathbf{Y}}_{\mathbf{kk}} \begin{bmatrix} \hat{U}_A \\ \hat{U}_B \\ \hat{U}_C \end{bmatrix} - \hat{\mathbf{Y}}_{\mathbf{kk}}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix}, \quad (3.1.1.2.1)$$

odnosno:

$$\hat{\mathbf{U}}_k = \hat{\mathbf{E}} \hat{\mathbf{U}}_K + \hat{\mathbf{F}} \hat{\mathbf{I}}_k, \quad (3.1.1.2.2)$$

gde su:

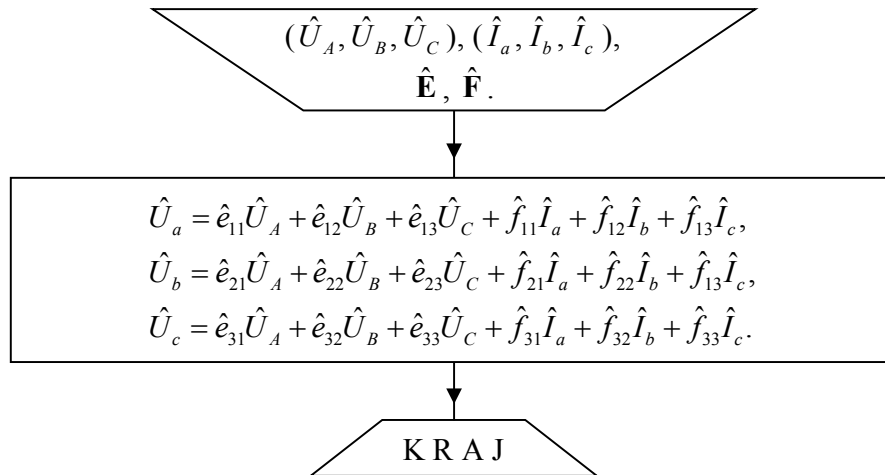
$$\hat{\mathbf{E}} = -\hat{\mathbf{Y}}_{\mathbf{kk}}^{-1} \hat{\mathbf{Y}}_{\mathbf{kk}} = \begin{bmatrix} \hat{e}_{11} & \hat{e}_{12} & \hat{e}_{13} \\ \hat{e}_{21} & \hat{e}_{22} & \hat{e}_{23} \\ \hat{e}_{31} & \hat{e}_{32} & \hat{e}_{33} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{F}} = -\hat{\mathbf{Y}}_{\mathbf{kk}}^{-1} = \begin{bmatrix} \hat{f}_{11} & \hat{f}_{12} & \hat{f}_{13} \\ \hat{f}_{21} & \hat{f}_{22} & \hat{f}_{23} \\ \hat{f}_{31} & \hat{f}_{32} & \hat{f}_{33} \end{bmatrix}. \quad (3.1.1.2.3)$$

Uvažavajući relacije (3.1.1.2.3), relacije (3.1.1.2.1) mogu da se napišu na sledeći način:

$$\begin{aligned} \hat{U}_a &= \hat{e}_{11} \hat{U}_A + \hat{e}_{12} \hat{U}_B + \hat{e}_{13} \hat{U}_C + \hat{f}_{11} \hat{I}_a + \hat{f}_{12} \hat{I}_b + \hat{f}_{13} \hat{I}_c, \\ \hat{U}_b &= \hat{e}_{21} \hat{U}_A + \hat{e}_{22} \hat{U}_B + \hat{e}_{23} \hat{U}_C + \hat{f}_{21} \hat{I}_a + \hat{f}_{22} \hat{I}_b + \hat{f}_{23} \hat{I}_c, \\ \hat{U}_c &= \hat{e}_{31} \hat{U}_A + \hat{e}_{32} \hat{U}_B + \hat{e}_{33} \hat{U}_C + \hat{f}_{31} \hat{I}_a + \hat{f}_{32} \hat{I}_b + \hat{f}_{33} \hat{I}_c, \end{aligned} \quad (3.1.1.2.4)$$

pri čemu parametri ovih relacija predstavljaju elemente matrica korišćenih u relacijama (3.1.1.2.3).

Time je zadatak 3.1.1.2 rešen. Blok-dijagram rešenja prikazan je na slici 3.1.1.2.1.



Slika 3.1.1.2.1 – Blok-dijagram rešenja zadatka 3.1.1.2 – korekcije napona

3.1.1.3 Zadatak – Postupak za proračun (nesimetričnog) režima transformatora

Neka je transformator s ma kojom od sprega Y_{NYnk} i Dy_{nk} eksitovan naponima na primaru transformatora ($\hat{U}_k$, tj. $\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c$) i snagama na sekundaru transformatora ($\hat{S}_a^{spec}, \hat{S}_b^{spec}, \hat{S}_c^{spec}$). Izračunati odziv koji čine naponi na sekundaru transformatora ($\hat{U}_k$, tj. $\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c$ i njihova nulta komponenta $\hat{U}^o$), struje na sekundaru transformatora ($\hat{I}_k''$, tj. $\hat{I}_a, \hat{I}_b, \hat{I}_c$) i snage na sekundaru transformatora [$\hat{S}_a(U_a), \hat{S}_b(U_b), \hat{S}_c(U_c)$]. Nakon toga može da se izračuna celokupan režim transformatora. Zadatak rešiti Gausovim iterativnim metodom za rešavanje nelinearnih jednačina (postupkom zasnovanim na sumiranju struja i korekcijama napona).

Rešenje zadatka

Ako se zadata početna aproksimacija faznih napona na sekundaru transformatora ($\hat{U}_k$, tj. $\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c$), na osnovu specificiranih snaga na sekundaru transformatora ($\hat{S}_a^{spec}, \hat{S}_b^{spec}, \hat{S}_c^{spec}$), onda se raspolaze sa ulaznim veličinama za rešenje zadatka 3.1.1.1. Ako se on reši, dobijaju se struje na sekundaru transformatora ($\hat{I}_k''$, tj. $\hat{I}_a, \hat{I}_b, \hat{I}_c$).

Sada, za poznate napone na primaru transformatora ($\hat{U}_k$, tj. $\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c$) i rezultate zadatka 3.1.1.1 (fazne struje na sekundaru transformatora), može da se reši zadatak 3.1.1.2, po faznim naponima na sekundaru transformatora ($\hat{U}_k$, tj. $\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c$).

Opisani postupak predstavlja osnovu za iterativno rešenje ovog zadatka. Blok-dijagram tog rešenja prikazan je na slici 3.1.1.3.1. Time je zadatak 3.1.1.3 rešen.

Poslije konvergencije iterativnog postupka, sledi proračun ostalih veličina koje se traže u zadatku. Iz faznih napona $\hat{U}_a, \hat{U}_b$ i $\hat{U}_c$, može da se izračuna njihova nulta komponenta $\hat{U}^o$.

3.1.2 Transformatori sa spregama Y_{NdK} i DdK

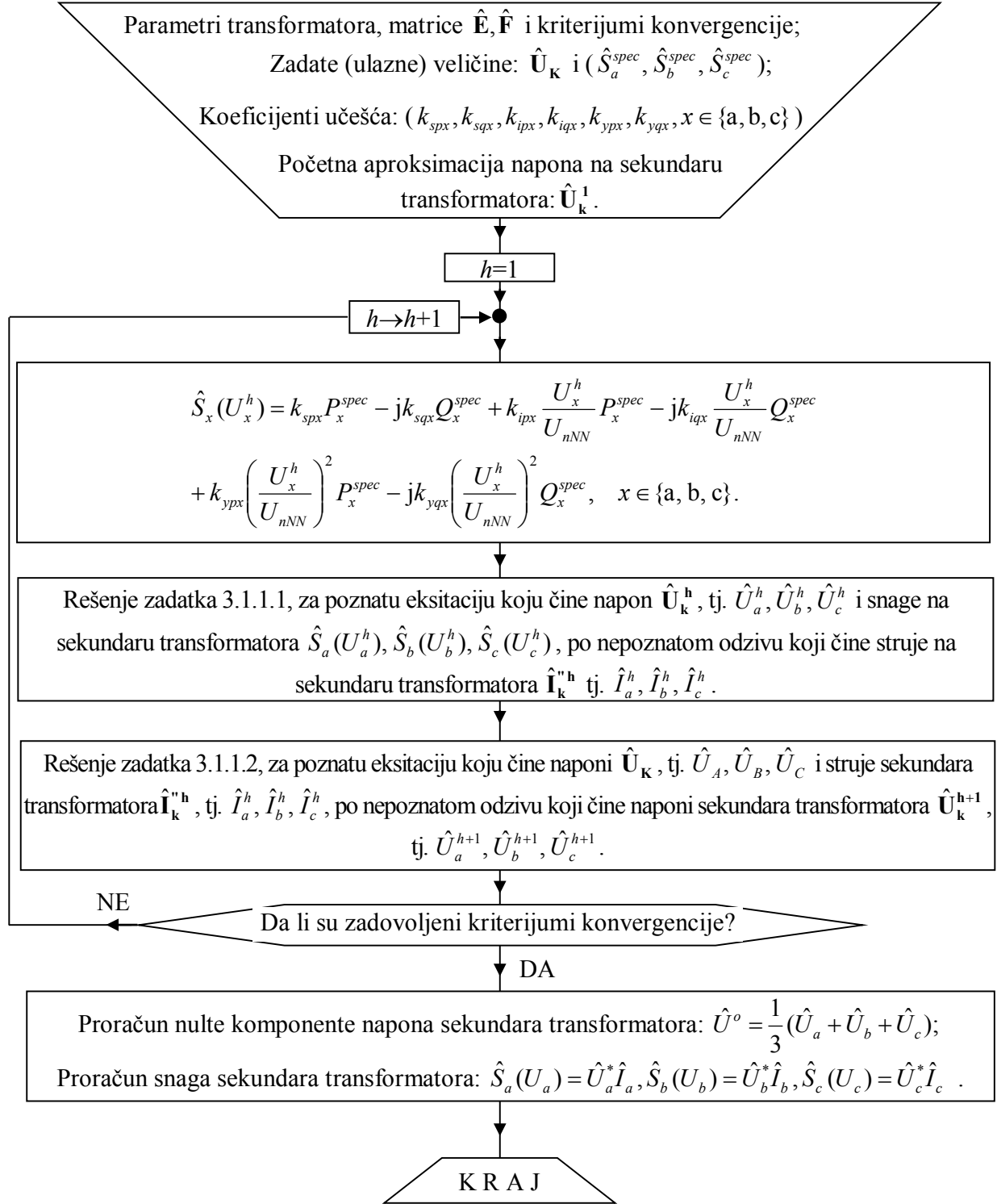
Ovde se obrađuju procedura sumiranja struja, procedura korekcija napona i postupak za proračun (nesimetričnog) režima transformatora sa spregama Y_{NdK} i DdK .

3.1.2.1 Procedura sumiranja struja

Neka je transformator s ma kojom od sprega Y_{NdK} i DdK eksitovan naponima i snagama na sekundaru transformatora: ($\hat{U}_k$, tj. $\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c$) i ($\hat{S}_a^{spec}, \hat{S}_b^{spec}, \hat{S}_c^{spec}$), respektivno. Izračunati odziv koji čine struje na sekundaru transformatora ($\hat{I}_k''$, tj. $\hat{I}_a, \hat{I}_b, \hat{I}_c$, $\hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c = 0$).

Rešenje zadatka

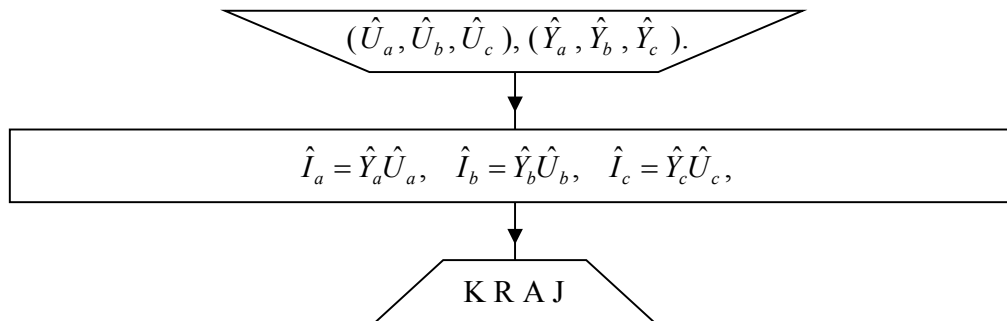
Kod ovih sprega, da bi se obezbedilo ažuriranje nulte komponente napona u iterativnim postupcima za proračun modela transformatora, potrošnja se tretira u vidu konstantne impedanse (admitanse) [1, 9, 10], pa na osnovu toga sledi:



Slika 3.1.1.3.1 – Blok-dijagram rješenja zadatka 3.1.1.3

$$\hat{I}_a = \hat{Y}_a \hat{U}_a, \quad \hat{I}_b = \hat{Y}_b \hat{U}_b, \quad \hat{I}_c = \hat{Y}_c \hat{U}_c. \quad (3.1.2.1.1)$$

Time je zadatak 3.1.2.1 rešen. Blok-dijagram rešenja prikazan je na slici 3.1.2.1.1.



Slika 3.1.2.1.1 – Blok-dijagram rešenja zadatka 3.1.2.1 – sumiranje struja

3.1.2.2 Procedura korekcija napona

Neka je transformator s ma kojom od sprega Y_{Ndk} i Ddk eksitovan naponima na primaru transformatora ($\hat{U}_K$, tj. $\hat{U}_A, \hat{U}_B, \hat{U}_C$) i strujama na sekundaru ($\hat{I}_k''$, tj. $\hat{I}_a, \hat{I}_b, \hat{I}_c$). Ove struje su izračunate u prethodnom zadatku. Izračunati odziv koji čine naponi na sekundaru transformatora ($\hat{U}_k$, tj. $\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c$).

Rešenje zadatka

Pošto su matrice $\hat{Y}_{kk}$ i $\hat{Y}_{kk}$ (2.6b) singularne, a zbir faznih struja vektora $\hat{I}_k''$ jednak nuli, tri relacije (2.6b) linearno su zavisne. Zato, treća od relacija (2.6b) koja o režimu transformatora ne govori ništa više nego prve dve relacije, može i treba da se zameni relacijom kojom se ukazuje na prirodu režima ovog transformatora – nulti zbir struja sekundara:

$$0 = \hat{Y}_a \hat{U}_a + \hat{Y}_b \hat{U}_b + \hat{Y}_c \hat{U}_c. \quad (3.1.2.2.1)$$

Tada se umjesto originalnih relacija (2.6b), dobijaju sledeće:

$$\begin{aligned} -\hat{I}_a &= \hat{y}_{kK11} \hat{U}_A + \hat{y}_{kK12} \hat{U}_B + \hat{y}_{kK13} \hat{U}_C + \hat{y}_{kk11} \hat{U}_a + \hat{y}_{kk12} \hat{U}_b + \hat{y}_{kk13} \hat{U}_c, \\ -\hat{I}_b &= \hat{y}_{kK21} \hat{U}_A + \hat{y}_{kK22} \hat{U}_B + \hat{y}_{kK23} \hat{U}_C + \hat{y}_{kk21} \hat{U}_a + \hat{y}_{kk22} \hat{U}_b + \hat{y}_{kk23} \hat{U}_c, \\ 0 &= \hat{Y}_a \hat{U}_a + \hat{Y}_b \hat{U}_b + \hat{Y}_c \hat{U}_c, \end{aligned} \quad (3.1.2.2.2)$$

pri čemu parametri prve dve relacije (3.1.2.2.2) predstavljaju elemente matrica $\hat{Y}_{kK}$ i $\hat{Y}_{kk}$.

Ako se relacije (3.1.2.2.2) zapišu u matričnoj formi i ako se naponi sekundara, sa koeficijentima uz njih, prebace na levu stranu jednakosti, dobija se:

$$\hat{H} \hat{U}_k = \hat{K} \hat{U}_K + \hat{L} \hat{I}_k'', \quad (3.1.2.2.3)$$

gde su:

$$\hat{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{kk11} & \hat{y}_{kk12} & \hat{y}_{kk13} \\ \hat{y}_{kk21} & \hat{y}_{kk22} & \hat{y}_{kk23} \\ \hat{Y}_a & \hat{Y}_b & \hat{Y}_c \end{bmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{K}} = - \begin{bmatrix} \hat{y}_{kK11} & \hat{y}_{kK12} & \hat{y}_{kK13} \\ \hat{y}_{kK21} & \hat{y}_{kK22} & \hat{y}_{kK23} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{L}} = - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$
(3.1.2.2.4)

odnosno:

$$\hat{\mathbf{U}}_k = \hat{\mathbf{E}}\hat{\mathbf{U}}_K + \hat{\mathbf{F}}\hat{\mathbf{I}}_k,$$
(3.1.2.2.5)

gde su:

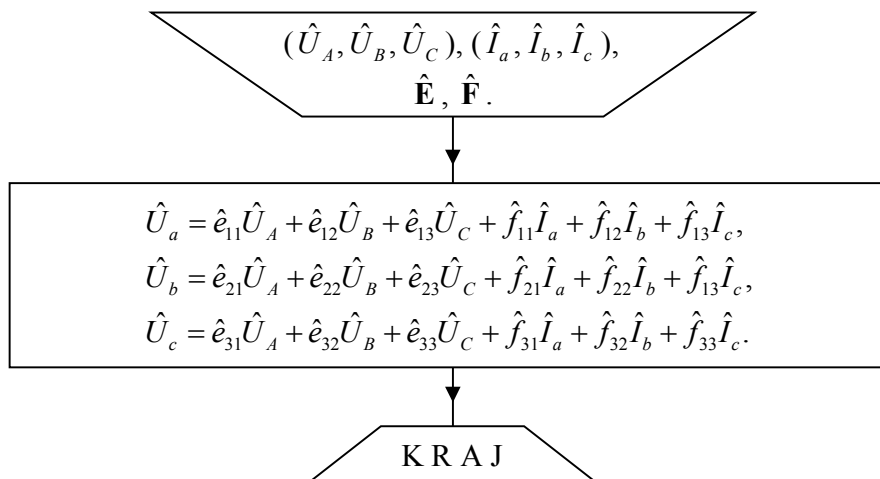
$$\hat{\mathbf{E}} = \hat{\mathbf{H}}^{-1}\hat{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \hat{e}_{11} & \hat{e}_{12} & \hat{e}_{13} \\ \hat{e}_{21} & \hat{e}_{22} & \hat{e}_{23} \\ \hat{e}_{31} & \hat{e}_{32} & \hat{e}_{33} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{F}} = \hat{\mathbf{H}}^{-1}\hat{\mathbf{L}} = \begin{bmatrix} \hat{f}_{11} & \hat{f}_{12} & \hat{f}_{13} \\ \hat{f}_{21} & \hat{f}_{22} & \hat{f}_{23} \\ \hat{f}_{31} & \hat{f}_{32} & \hat{f}_{33} \end{bmatrix}.$$
(3.1.2.2.6)

Uvažavajući relacije (3.1.2.2.6), relacije (3.1.2.2.5) mogu da se napišu skalarno na sledeći način:

$$\begin{aligned} \hat{U}_a &= \hat{e}_{11}\hat{U}_A + \hat{e}_{12}\hat{U}_B + \hat{e}_{13}\hat{U}_C + \hat{f}_{11}\hat{I}_a + \hat{f}_{12}\hat{I}_b + \hat{f}_{13}\hat{I}_c, \\ \hat{U}_b &= \hat{e}_{21}\hat{U}_A + \hat{e}_{22}\hat{U}_B + \hat{e}_{23}\hat{U}_C + \hat{f}_{21}\hat{I}_a + \hat{f}_{22}\hat{I}_b + \hat{f}_{23}\hat{I}_c, \\ \hat{U}_c &= \hat{e}_{31}\hat{U}_A + \hat{e}_{32}\hat{U}_B + \hat{e}_{33}\hat{U}_C + \hat{f}_{31}\hat{I}_a + \hat{f}_{32}\hat{I}_b + \hat{f}_{33}\hat{I}_c, \end{aligned}$$
(3.1.2.2.7)

pri čemu parametri ovih relacija predstavljaju elemente matrica relacija (3.1.2.2.6).

Time je zadatak 3.1.2.2 rešen. Blok-dijagram rešenja prikazan je na slici 3.1.2.2.1.



Slika 3.1.2.2.1 – Blok-dijagram rešenja zadatka 3.1.2.2 – korekcije napona

3.1.2.3 Postupak za proračun (nesimetričnog) režima transformatora

Neka je transformator s ma kojom od sprega Y_{Ndk} i Ddk eksitovan naponima na primaru transformatora ($\hat{U}_K$, tj. $\hat{U}_A, \hat{U}_B, \hat{U}_C$) i snagama na sekundaru transformatora ($\hat{S}_a^{spec}, \hat{S}_b^{spec}, \hat{S}_c^{spec}$). Izračunati odziv koji čine naponi na sekundaru transformatora ($\hat{U}_k$, tj. $\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c$ i njihova nulta komponenta $\hat{U}^o$), struje na sekundaru transformatora ($\hat{I}_k''$, tj. $\hat{I}_a, \hat{I}_b, \hat{I}_c$) i snage na sekundaru transformatora [$\hat{S}_a(U_a), \hat{S}_b(U_b), \hat{S}_c(U_c)$]. Nakon toga može da se izračuna celokupan režim transformatora. Zadatak rešiti Gausovim iterativnim metodom za rešavanje nelinearnih jednačina (postupkom zasnovanim na sumiranju struja i korekcijama napona).

Rešenje zadatka

Ako se zada početna aproksimacija faznih napona na sekundaru transformatora ($\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c$), pri čemu treći napon treba da se preračuna na osnovu druga dva prema relaciji [1]:

$$\hat{U}_c = -\frac{\hat{Y}_a \hat{U}_a + \hat{Y}_b \hat{U}_b}{\hat{Y}_c}, \quad (3.1.2.3.1)$$

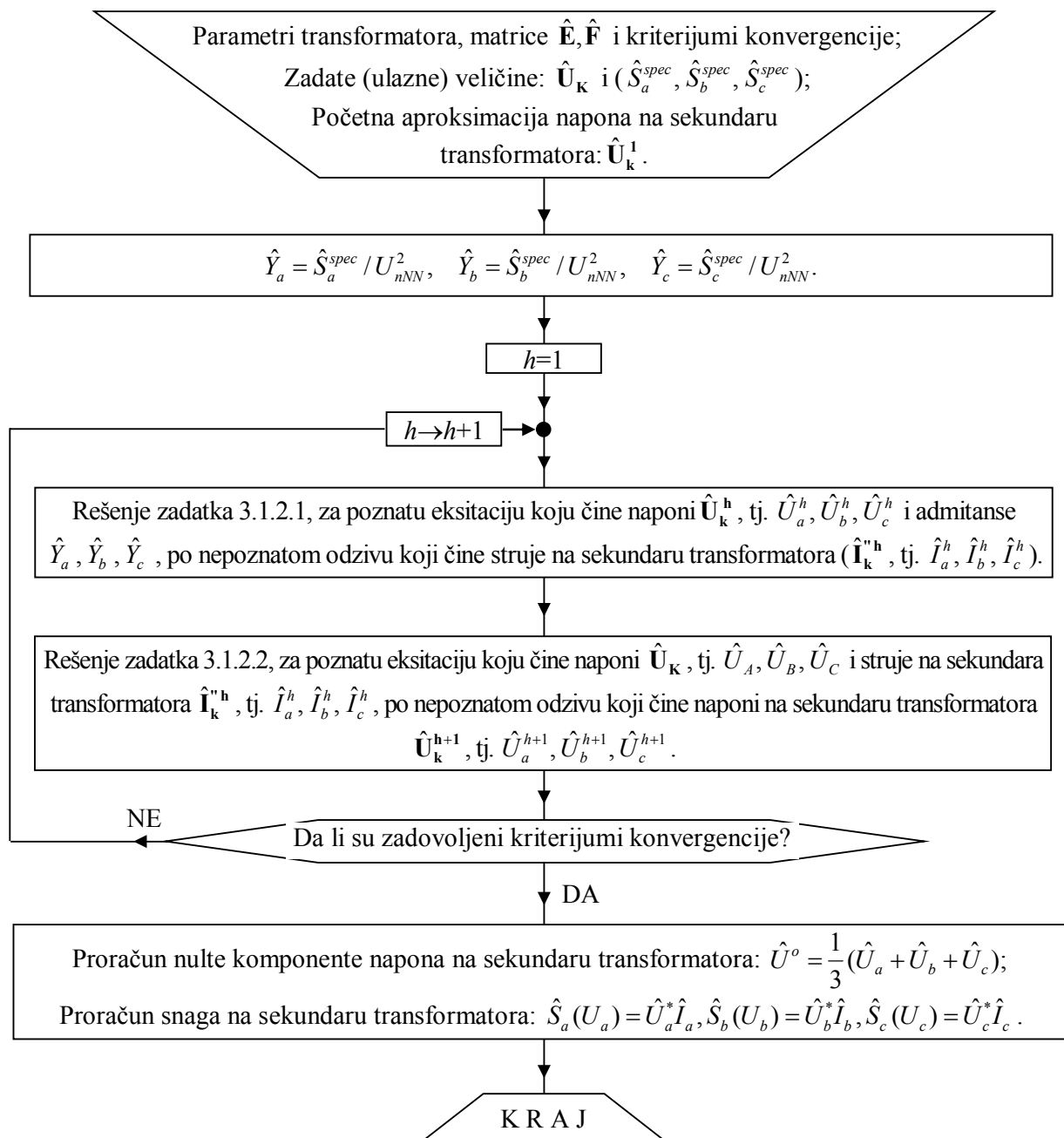
na osnovu specificiranih snaga na sekundaru transformatora ($\hat{S}_a^{spec}, \hat{S}_b^{spec}, \hat{S}_c^{spec}$), koje mogu da se predstave admitansama $\hat{Y}_a, \hat{Y}_b, \hat{Y}_c$ [1, 9, 10], onda se raspolaže sa ulaznim veličinama za rešenje zadatka 3.1.2.1. Ako se on reši, dobijaju se fazne struje na sekundaru transformatora ($\hat{I}_k''$, tj. $\hat{I}_a, \hat{I}_b, \hat{I}_c$).

Sada, za poznate napone na primaru transformatora ($\hat{U}_K$, tj. $\hat{U}_A, \hat{U}_B, \hat{U}_C$) i rezultate zadatka 3.1.2.1 (fazne struje na sekundaru transformatora), može da se reši zadatak 3.1.2.2, po faznim naponima na sekundaru transformatora ($\hat{U}_k$, tj. $\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c$).

Opisani postupak predstavlja osnovu za iterativno rešenje ovog zadatka. Blok-dijagram tog rešenja prikazan je na slici 3.1.2.3.1. Time je zadatak 3.1.2.3 rešen.

Posle konvergencije iterativnog postupka, sledi proračun ostalih veličina koje se traže u zadatku. Iz faznih napona $\hat{U}_a, \hat{U}_b$ i $\hat{U}_c$, može da se izračuna njihova nulta komponenta $\hat{U}^o$.

Na osnovu gornjih izlaganja može da se zaključi da su procedure za proračune nesimetričnih tokova snaga transformatora s različitim spregama potpuno unificirane, u smislu da se koriste iste formula za korekciju napona na sekundaru transformatora [relacije (3.1.1.2.4) i (3.1.2.2.6)], a da se samo razlikuju elementi matrica $\hat{E}$ i $\hat{F}$. Ovo je bitno s praktičnog aspekta pisanja softvera za proračun tokova snaga, jer u okviru samog proračuna ne mora da vodi računa o kojoj sprezi transformatora jeste reč. Sve to dovodi do ubrzanja proračuna jer se ne gubi vreme na ispitivanje sprege transformatora, nego se uvijek koriste iste relacije. Pomenute matrice se formiraju u delu algoritama matematičkog modela transformatora i one ostaju nepromenjene tokom celog proračuna.



Slika 3.1.2.3.1 – Blok-dijagram rešenja zadatka 3.1.2.3

3.2. Opis softvera za proračun režima trofaznih transformatora

Softver se koristi da se izračuna (ne)simetričan režim trofaznih transformatora bilo koje sprega (kao je opisano u tekstu iznad). Kada se pokrene program pojavi se dijalog u kojem korisnik treba da unese spregu trofaznog transformatora za koju hoće da izračuna režim. Nakon toga program iz ulaznih datoteka učitava podatke o transformatoru, podatke o naponu na primaru transformatora, kao i snage na sekundaru transformatora. Nakon toga program formira

matematički model transformatora i radi proračun (ne)simetričnog režima izabranog trofaznog transformatora. Na kraju program u izlaznu datoteku ispiše rezultate proračuna. Korisnik može izlaznu datoteku da otvori sa bilo kojim tekstualnim editorom i da analizira dobijene rezultate.

4. Literatura

1. P. Vidović, *Nesimetrični tokovi snaga distributivnih mreža*, magistarska teza, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 2008.
2. P. Vidović, *Proračuni tokova snaga neuravnoteženih distributivnih mreža*, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 2015.
3. J. Arillaga, C. P. Arnold, B. J. Harker, *Computer Modeling of Electrical Power Systems*. USA: John Wiley & Sons Ltd, 1983.
4. P. Xiao, D. C. Yu, W. Yan, „A Unified Three-Phase Transformer Model for Distribution Load Flow Calculations”, *IEEE Trans. on PS*, Vol. 21, No. 1, pp. 153-159, February, 2006.
5. T. -H. Chen, M. -S. Chen, T. Inoue, P. Kotas, E. A. Chebli, „Three-Phase Cogenerator and Transformer Models for Distribution System Analysis”, *IEEE Trans. on PD*, Vol. 6, No. 4, pp. 1671-1681, October, 1991.
6. V. Strezoski, „New Scaling Concept in Power System Analysis”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 143, No. 5, pp. 399-406, September, 1996.
7. V. Strezoski, „Advanced symmetrical components method”, *IET Gen. Trans. & Dist.*, Vol. 5, No. 8, pp. 833-841, August, 2011.
8. E. Mashhour, S. M. Moghaddas-Tafreshi, „Three-Phase Backward/Forward Power Flow Solution Considering Three-Phase Distribution Transformers”, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 1-5, Feb. 2009.
9. T.-H. Chen, M.-S. Chen, K. J. Hwang, P. Kotas, A. Chebli, „Distribution System Power Flow Analysis – A Rigid Approach”, *IEEE Trans. on PD*, Vol. 6, pp. 1146-1152, Jul. 1991.
10. W. H. Kersting, W. H. Phillips, W. Carr, „A New Approach to Modeling Three-Phase Transformer Connections”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 35, No. 1, pp. 169-175, Jan./Feb. 1999.
11. V. Strezoski, S. Milaković, *Ekvivalentne šeme elektroenergetskih transformatora u analizi stacionarnih režima*. Srbija: Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, EPS-JP “Elektrovojvodina”, MP “STYLOS”, 1998.
12. J. J. Winders, *Power Transformers Principles and Applications*. USA: New York, Marcel Dekker Inc., 2002.



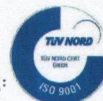
УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централа: 021 485 2000
Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763
Телефакс: 021 458-133; e-mail: ftndean@uns.ac.rs

ИНТЕГРИСАНИ
СИСТЕМ
МЕНАџМЕНТА
СЕРТИФИКОВАН ОД:



Наш број: _____
Ваш број: _____
Датум: 2017-12-14

ИЗВОД ИЗ ЗАПИСНИКА

Наставно-научно веће Факултета техничких наука у Новом Саду, на 47. редовној седници одржаној дана 29.11.2017. године, донело је следећу одлуку:

-непотребно изостављено-

Тачка 12.3.1. Верификација нових техничких решења и именовање рецензента

Тачка 12.3.13.: У циљу верификације новог техничког решења усвајају се рецензенти:

1. Др Владимир Стрезоски, ред. проф, ФТН Нови Сад
2. Др Зоран Стојановић, доцент, ЕТФ Београд

Назив техничког решења:

“СОФТВЕР ЗА ПРОРАЧУН РЕЖИМА ТРОФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРА ”

Аутор: др Предраг Видовић, Факултет техничких наука у Новом Саду

-непотребно изостављено-

Записник водила:

Јасмина Димић, дипл. правник

Тачност података оверава:
Секретар

Иван Нешковић, дипл. правник



Проф. др Раде Дорословачки

RECENZIJA TEHNIČKOG REŠENJA

Podaci o tehničkom rešenju:

Naziv tehničkog rešenja:	Softver za proračun režima trofaznih transformatora
Autori tehničkog rešenja:	Predrag Vidović
Realizatori tehničkog rešenja:	Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
Podtip tehničkog rešenja:	Softver (M85)

Podaci o recezentu:

Ime, prezime i zvanje:	dr Vladimir Strezoski, redovni profesor
Uža naučna oblast za koju je izabran u zvanje, datum izbora u zvanje i naziv fakulteta:	Izabran je u zvanje 25.5.1997. na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, u.n.o. Elektroenergetika
Ustanova gde je zaposlen:	Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Stručno mišljenje recezenta:

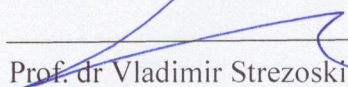
„Softver za proračun režima trofaznih transformatora“ predstavlja novi softver (M85).
Obrazloženje:

- Tehničko rešenje je razvijeno i testirano na Katedri za Elektroenergetiku i primenjeno softversko inženjerstvo.
- Tehničko rešenje je nastalo radom autora na projektu: „Pametne elektrodistributivne mreže zasnovane na Distributivnom menadžment sistemu i distribuiranoj proizvodnji“, pod šifrom III-42004, koji finansira Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.
- Tehničko rešenje je originalno i primenjuje se za nova istraživanja na Katedri za Elektroenergetiku i primenjeno softversko inženjerstvo.

Na osnovu priložene dokumentacije za tehničko rešenje: „**Softver za proračun režima trofaznih transformatora**“ i ovde prethodno navedenih činjenica predlažem Nastavno-naučnom veću Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu da prijavljeno tehničko rešenje prihvati kao:

Tehničko rešenje – Softver (M85)

Novi Sad, 15.12.2017. godine.


Prof. dr Vladimir Strezoski, redovni profesor

RECENZIJAZ TEHNIČKOG REŠENJA

Podaci o tehničkom rešenju:

Naziv tehničkog rešenja:	Softver za proračun režima trofaznih transformatora
Autori tehničkog rešenja:	Predrag Vidović
Realizatori tehničkog rešenja:	Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
Podtip tehničkog rešenja:	Softver (M85)

Podaci o recezentu:

Ime, prezime i zvanje:	dr Zoran Stojanović, docent
Uža naučna oblast za koju je izabran u zvanje, datum izbora u zvanje i naziv fakulteta:	Izabran u zvanje 4.2.2013. na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, u.n.o. Elektroenergetski sistemi
Ustanova gde je zaposlen:	Elektrotehnički fakultet u Beogradu

Stručno mišljenje recezenta:

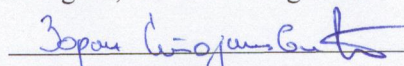
„Softver za proračun režima trofaznih transformatora“ predstavlja novi softver (M85).
Obrazloženje:

- Razmatrano tehničko rešenje predstavlja novi softver za proračun (ne)simetričnih režima trofaznih transformatora.
- Tehničko rešenje je proisteklo na Katedri za Elektroenergetiku i primenjeno softversko inženjerstvo, nastalo radom autora na projektu: „Pametne elektrodistributivne mreže zasnovane na Distributivnom menadžment sistemu i distribuiranoj proizvodnji“, pod šifrom III-42004, koji finansira Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.
- Tehničko rešenje je razvijeno korišćenjem naučnih metoda na opremi Katedre za Elektroenergetiku i primenjeno softversko inženjerstvo. Iz razvojnih aktivnosti napisano je više radova koji su prijavljeni kao rezultat projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Na osnovu priložene dokumentacije za tehničko rešenje: „**Softver za proračun režima trofaznih transformatora**“ i ovde prethodno navedenih činjenica predlažem Nastavno-naučnom veću Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu da prijavljeno tehničko rešenje prihvati kao:

Tehničko rešenje – Softver (M85)

Beograd, 15.12.2017. godine.


dr Zoran Stojanović, docent



УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централа: 021 485 2000
Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763
Телефакс: 021 458-133; e-mail: fndeana@uns.ac.rs

ИНТЕГРИСАНИ
СИСТЕМ
МЕНАџМЕНТА
СЕРТИФИКОВАН О.Д.



Наш број: 01.сл

Ваш број:

Датум: 2018-03-13

ИЗВОД ИЗ ЗАПИСНИКА

Наставно-научно веће Факултета техничких наука у Новом Саду, на 53. редовној седници одржаној дана 28.02.2018. године, донело је следећу одлуку:

-непотребно изостављено-

ТАЧКА 13.2. Верификација нових техничких решења и именовање рецензената

Тачка 13.2.1.: На основу позитивног извештаја рецензената верификује се техничко решење (М85) под називом:

Назив техничког решења:

“СОФТВЕР ЗА ПРОРАЧУН РЕЖИМА ТРОФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРА ”

Аутор: др Предраг Видовић, Факултет техничких наука у Новом Саду

-непотребно изостављено-

Записник водила:

Јасмина Димић, дипл. правник

Тачност података оверава:
Секретар

Иван Нешковић, дипл. правник

Декан

Проф. др Раде Дорословачки

