

MODELIRANJE TRANSFORMATORJA V IZRAČUNIH ELEKTRIČNIH OMREŽIJ

Janez RIBIČ, Jože VORŠIČ, Žiga VORŠIČ, Jože PIHLER

POVZETEK

Računalniško podprti izračuni pretokov moč in analize kratkostičnih tokov so znani. Tehnično dovršene programe, ki podajajo veliko rešitev – podatkov – za načrtovanje, obratovanje, je možno tudi kupiti. Toda takšni programi ne dovoljujejo malenkostnih sprememb v modeliranju elementov. Pogosto so transformatorji s tremi navitji podani kar kot transformatorji z dvema navitjema, mnogokrat pa pravilne izračune onemogoča pomanjkanje podatkov.

ABSTRACT

Computer aided power flows and short circuit analysis are well known. Computer aided packages for those calculations in large electric power systems on market could be bought. However, those programs do not let to allow minor changes in mathematical models of electric power system elements. Three-winding transformers are often presented as regular two-winding transformer. Leak of right input data is many times the source of irregular computational results.

1. UVOD

Elektroenergetski sistem je eden od največjih in za dobro delovanje gospodarstva in funkcioniranje družbe najbolj pomembnih sistemov. Zasnovan mora biti tako, da porabnikom za dolga leta zagotavlja ekonomično, zanesljivo in okolju prijazno dobavo električne energije. Čeprav so vse tri lastnosti pomembne, je zanesljivost dobave energije nedvomno na prvem mestu.

Na splošno definiramo kot sistem neko celoto, ki jo tvorijo medsebojno funkcionalno povezani elementi sistema. Ta definicija velja tudi za elektroenergetski sistem. Elementi tega sistema so:

- elektrarne, kot pretvorniki primarne energije v električno energijo (proizvajalci električne energije);
- stikalne postaje, ki služijo za transformacijo in razdeljevanje električne energije;
- prenosni in razdeljevalni vodi, ki služijo za prenos električne energije;
- porabniške naprave, ki so porabniki električne energije.

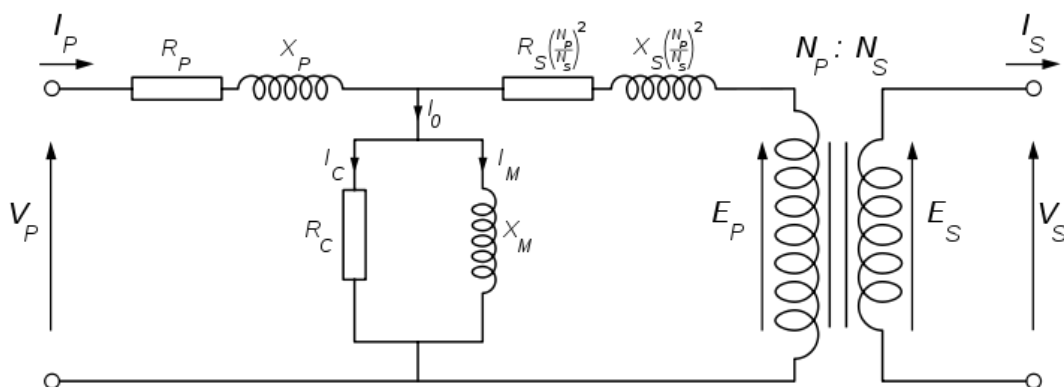
V stikalnih postajah je ena najpomembnejših naprav transformator, ki povezuje omrežja različnih napetostnih nivojev. Pri tem z vzdolžno regulacijo omogoča vodenje pretokov jalove moči, s prečno pa tudi delovne. V slučaju kratkega stika je v prenosnem omrežju transformator edini element, ki omejuje kratkostične toke.

Nadomestna vezava transformatorja (električno vezje, ki omogoča matematični zapis osnovnih elektrotehničnih enačb) je odvisna od namena izračuna, matematičnega algoritma in seveda želene natančnosti.

V izračunih pretokov moči predstavimo transformator z nazivnim prestavnim razmerjem z vzdolžno impedanco, transformator z nenazivnim prestavnim razmerjem pa z ustrežno nadomestno π – vezavo.

Kratkostično impedanco pozitivnega zaporedja transformatorja $\underline{Z}_T = R_T + j \cdot X_T$ z ali brez bremenskega stikala (za spreminjanje prestavnega razmerja pod obremenitvijo) računamo z nazivnimi podatki transformatorja pri izračunih kratkih stikov.

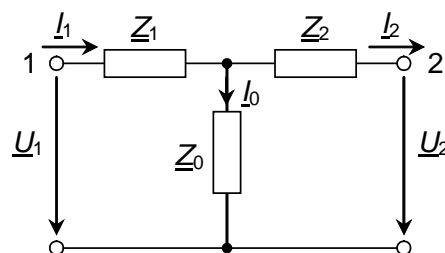
2. FIZIKALNA SLIKA IN NADOMESTNO VEZJE



Slika 2.1: Električno nadomestno vezje transformatorja [9]

Splošno električno nadomestno vezje enofaznega transformatorja je na sliki 2.1. Za razumevanje delovanja napetostnega trifaznega transformatorja je najprimernejša razlaga z ampurnimi ovoji – vsota ampurnih ovojev v vsakem stebru mora biti nič.

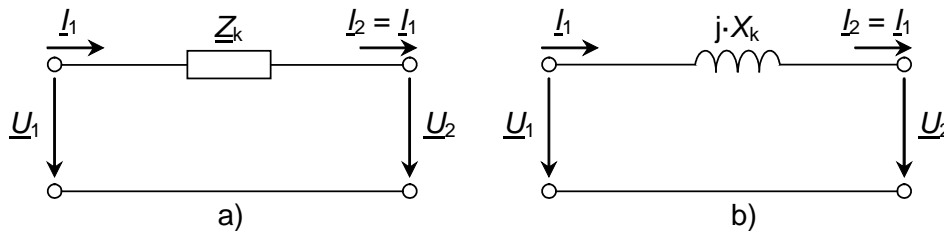
Fizikalna nadomestna vezava transformatorja je podana na sliki 2.2.



Slika 2.2: Nadomestna T-vezava transformatorja

Nadomestna T-vezava transformatorja izhaja iz fizikalne slike delovanja transformatorja. V izračunih obratovalnih stanj v električnih omrežjih ni potrebna tolikšna natančnost, zato raje uporabljamo nadomestno Γ -vezavo, kjer upoštevamo dejstvo, da je magnetilni tok transformatorja I_0 v primerjavi z I_1 ali I_2 majhen in zaradi premaknitve veje \underline{Z}_0 na začetek (leva Γ -vezava) ali kot konec (desna Γ -vezava) ne pride do upoštevanja vredne spremembe vzdolžnega padca napetosti. Tu je sedaj $\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2$ že kar kratkostična impedanca transformatorja. [2, 3]

V večini izračunov obratovalnih stanj magnetilni tok I_0 in izgube v železu zanemarimo [1] in transformator modeliramo kar s kratkostično impedanco \underline{Z}_k .



Slika 2.3: Nadomestna vezava transformatorja pri zanemaritvi magnetilnega toka

Regulacijski transformator

Sekundar transformatorja je razdeljen na več navitij. Običajno obstaja več stopenj v "pozitivni" in "negativni" smeri ter stanje "0". Nastavitev je zaradi relativno velikega števila stopenj lahko zelo fina. Od položaja regulacijskih navitij glede na primarno navitje je odvisna regulacijska sposobnost transformatorja in s tem spreminjanje pretoka moči med dvema točkama omrežja. Praktično vsak transformator je regulacijski – ločimo jih po načinu, možnosti spreminjanja prestave. Nekatere moramo odklopiti od napetosti in ročno previjačiti navitje. Pri nekaterih je možno spremeniti odcepe pod napetostjo (brez obremenitve), pri nekaterih pa lahko odcepe spreminjamo pri nazivni napetosti in nazivnem toku.

Predpostavimo, da je transformator v vozlišču \mathbf{p} . Ob predpostavki, da je napetost vozlišča \mathbf{q} v realni osi (porabnik) in δ kot med napetostima, teče iz vozlišča \mathbf{p} v vozlišče \mathbf{q} tok

$$\underline{I}_{pq} = \frac{\underline{U}_p - \underline{U}_q}{j \cdot X_{pq}} = \frac{U_p \cdot e^{j\delta} - U_q \cdot e^{j0^\circ}}{X_{pq} \cdot e^{j90^\circ}} = \frac{U}{X_{pq}} \cdot e^{j(\delta-90^\circ)} + \frac{U_q}{X_{pq}} \cdot e^{j90^\circ}, \quad (2.1)$$

ki ga matematično prikažemo kot vsoto dveh tokov. Pri tem (zanemarimo ohmske upornosti) je X_{pq} reaktanca med vozliščema \mathbf{p} in \mathbf{q} .

Moč S_{pq} , ki teče iz vozlišča s transformatorjem v vozlišče s porabniško napravo, je

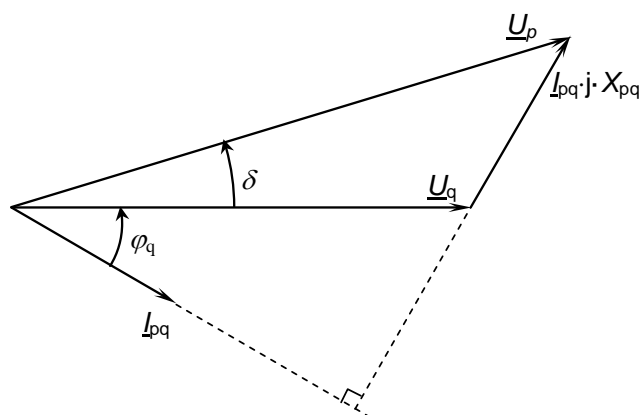
$$S_{pq} = \underline{U}_{pq} \cdot \underline{I}_{pq}^* = P_{pq} + j \cdot Q_{pq}. \quad (2.2)$$

Če vstavimo enačbo za konjugirano kompleksno vrednost

$$\underline{I}_{pq}^* = \frac{U_p}{X_{pq}} \cdot e^{-j(\delta-90^\circ)} + \frac{U_q}{X_{pq}} \cdot e^{-j90^\circ}, \quad (2.3)$$

v enačbo za moč, dobimo za prenešeno električno moč S_{pq}

$$\begin{aligned}
 S_{pq} &= \underline{U}_p \cdot \underline{I}_{pq}^* = U_p \cdot e^{j\delta} \cdot \left(\frac{U_p}{X_{pq}} \cdot e^{-j(\delta-90^\circ)} + \frac{U_q}{X_{pq}} \cdot e^{-j90^\circ} \right) = \\
 &= \frac{U_p^2}{X_{pq}} \cdot e^{j90^\circ} + \frac{U_p \cdot U_q}{X_{pq}} \cdot e^{j(\delta-90^\circ)} .
 \end{aligned} \tag{2.4}$$



Slika 2.4: Kazalčni diagram napetosti vozlišč p in q

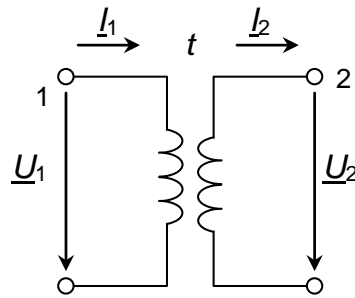
Če upoštevamo, da je $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \cdot \sin \alpha$, znaša S_{pq}

$$\begin{aligned}
 S_{pq} &= \frac{U_p^2}{X_{pq}} (\cos 90 + j \cdot \sin 90) + \frac{U_p \cdot U_q}{X_{pq}} \cdot (\cos(\delta - 90^\circ) + j \cdot \sin(\delta - 90^\circ)) = \\
 &= \frac{U_p \cdot U_q}{X_{pq}} \cdot \sin \delta + j \cdot \left(\frac{U_p^2}{X_{pq}} - \frac{U_p \cdot U_q}{X_{pq}} \cdot \cos \delta \right) = P_{pq} + j \cdot Q_{pq}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Pretok delovne moči je odvisen od kota med napetostima vozlišč **p** in **q**, zato kot δ imenujemo pogosto kot moči, pretok jalove moči pa predvsem od napetosti in (v manjši meri) od kota.

Z regulacijskim transformatorjem lahko spreminjamo velikost napetosti (vzdolžna regulacija) in kot med napetostima (prečna regulacija).

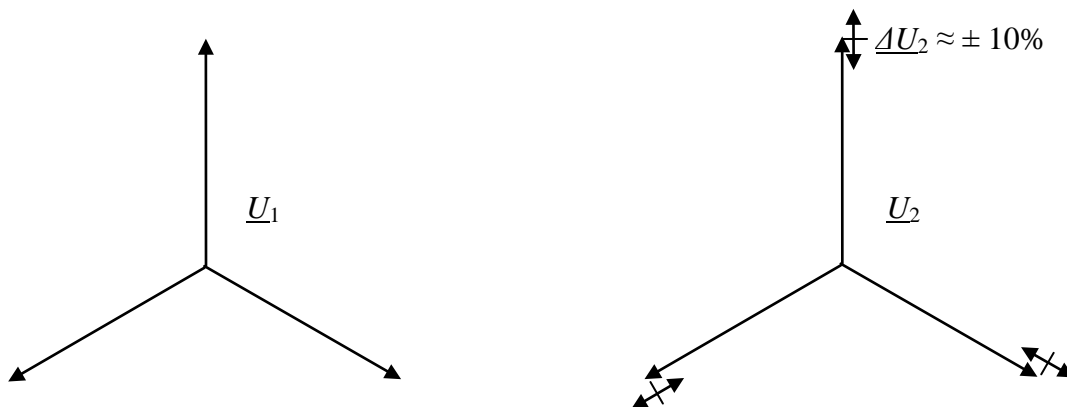
Vloga – naloga regulacijskega transformatorja z vzdolžno regulacijo



Slika 2.5: Transformator z vzdolžno regulacijo

$$t = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.6)$$

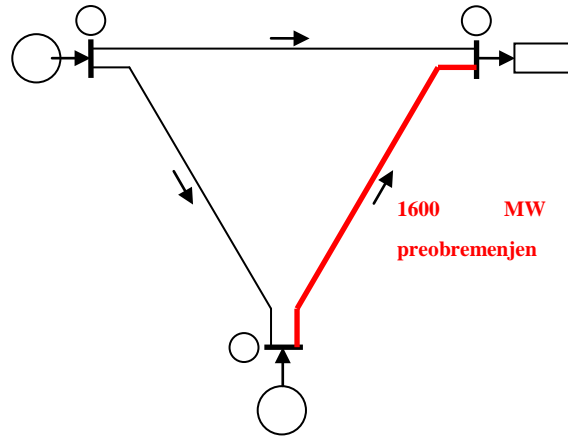
Z regulacijskim transformatorjem z vzdolžno regulacijo spreminjamo prestavno razmerje in s tem vplivamo predvsem na pretoke jalove energije (enačba 2.5).



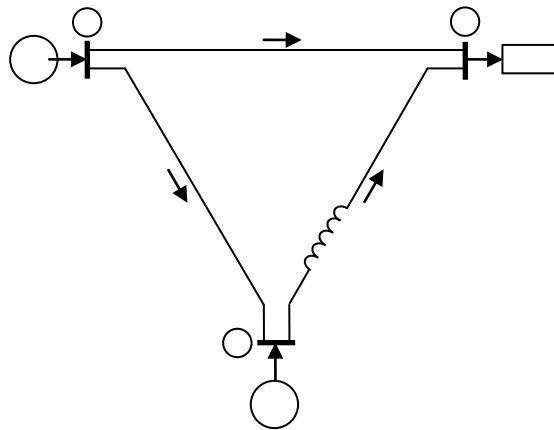
Slika 2.6: Regulacijsko navitje je na istem stebru kot sekundarno navitje

Vloga – naloga regulacijskega transformatorja s prečno regulacijo

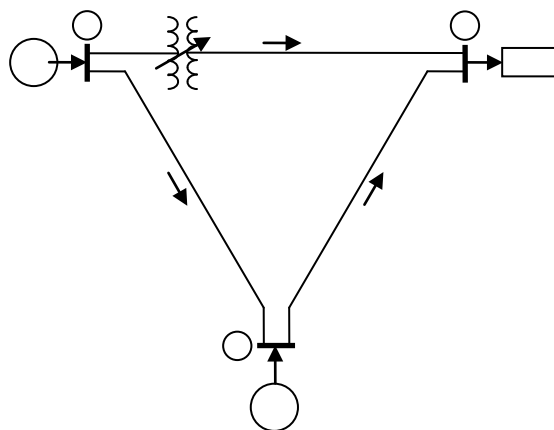
Z regulacijskim transformatorjem s prečno regulacijo lahko spreminjamo kot sekundarne napetosti (kot moči) – enačba 2.5. Na naslednjih slikah je to shematično prikazano. [10]



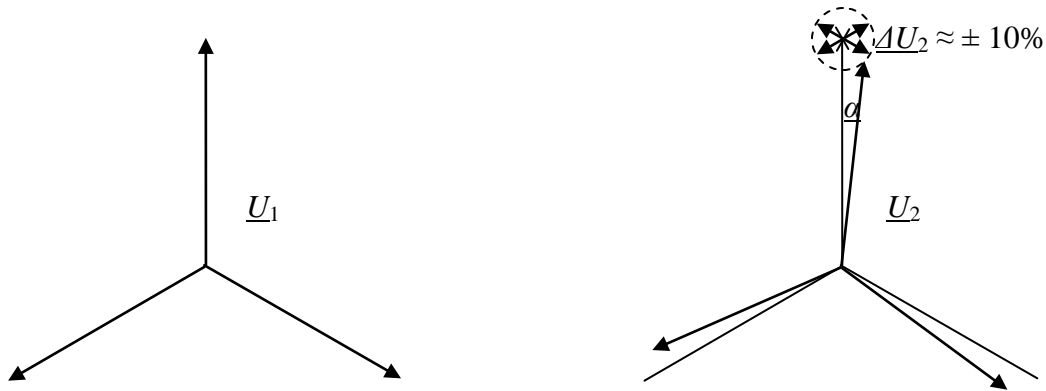
Slika 2.7a: Pretoki se razporedijo po naravni poti – po Ohmovem in Kirchhoffovih zakonih.
Povezava B-C je preobremenjena



Slika 2.7b: Dovoljeno obremenitev 1250 MW lahko dosežemo z vključitvijo impendace, kar pa povzroča dodatne izgube



Slika 2.7c: S transformatorjem s prečno regulacijo spremenimo kot v povezavi A-C in dosežemo želeno zmanjšanje pretoka v povezavi B-C



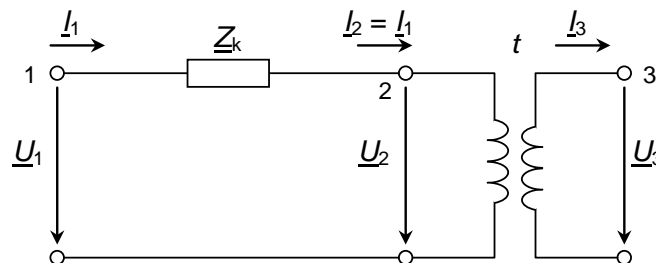
Slika 2.8: Regulacijsko navitje je nameščeno na drugem (-ih) stebru (-ih)

Nadomestna vezava regulacijskega transformatorja z vzdolžno regulacijo [1]

Nenazivno prestavno razmerje zagajemo tako, da zaporedno s transformatorjem z nazivnim prestavnim razmerjem $p_n = U_1 / U_2$ vežemo transformator, ki je idealen in ima tako prestavno razmerje t , da bo

$$p_{\text{nenazivno}} = p_n \cdot t, \quad (2.7)$$

kjer je $p_{\text{nenazivno}}$ nenazivno prestavno razmerje. Transformator z nenazivnim prestavnim razmerjem je potem podan kot kaskadna vezava transformatorja z nazivnim prestavnim razmerjem in idealnega transformatorja s prestavnim razmerjem t .



Slika 2.9: Upoštevanje nenazivnega prestavnega razmerja transformatorja

Iz podane vezave izhajaja

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_k \cdot \underline{I}_1 + \underline{U}_2 = 1 \cdot \underline{U}_2 + \underline{Z}_k \cdot \underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 = 0 \cdot \underline{U}_2 + 1 \cdot \underline{I}_2 \end{aligned} \quad (2.8)$$

in nadomestna "A" predstavitev transformatorja z nazivnim prestavnim razmerjem

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \underline{Z}_k \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Za idealni transformator s prestavnim razmerjem t pa velja

$$\begin{aligned}\underline{U}_2 &= t \cdot \underline{U}_3 = t \cdot \underline{U}_3 + 0 \cdot \underline{I}_3 \\ \underline{I}_2 &= \frac{1}{t} \cdot \underline{I}_3 = 0 \cdot \underline{U}_3 + \frac{1}{t} \cdot \underline{I}_3\end{aligned}\quad (2.10)$$

Dobljena "A" predstavitev idealnega transformatorja v matričnem zapisu je

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_2 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & \frac{1}{t} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_3 \\ \underline{I}_3 \end{bmatrix}\quad (2.11)$$

Za kaskadno vezavo obeh dobimo

$$[\underline{A}] = \begin{bmatrix} 1 & \underline{Z}_k \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & \frac{1}{t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & \frac{\underline{Z}_k}{t} \\ 0 & \frac{1}{t} \end{bmatrix}\quad (2.12)$$

Koeficienti "A" oblike so od tod

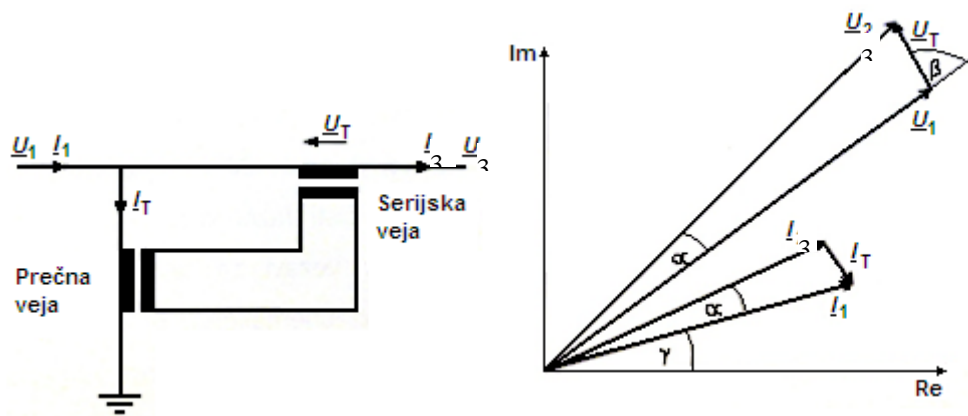
$$\begin{aligned}\underline{A}_{11} &= t & \underline{A}_{13} &= \underline{Z}_k / t \\ \underline{A}_{31} &= 0 & \underline{A}_{33} &= 1/t\end{aligned}\quad (2.13)$$

Elementi ustrezne π – vezave so

$$\begin{aligned}\underline{Y}_{13} &= \frac{1}{\underline{Z}_{13}} = \frac{1}{\underline{A}_{13}} = \underline{Y} \cdot t \\ \underline{Y}_1 &= \frac{\underline{A}_{33} - 1}{\underline{A}_{13}} = \underline{Y} \cdot (1 - t) \\ \underline{Y}_3 &= \frac{\underline{A}_{11} - 1}{\underline{A}_{13}} = \underline{Y} \cdot t \cdot (t - 1)\end{aligned}\quad (2.14)$$

Nadomestna vezava regulacijskega transformatorja s prečno regulacijo [4, 5]

Osnovni princip delovanja prečnih transformatorjev lahko najlažje predstavimo kot injiciranje napetosti zaporedno v vod. Tako dosežemo fazni premik (lahko tudi spremembo amplitude) fazorjev napetosti med vhodnimi in izhodnimi sponkami prečnega transformatorja. Enofazni shematičen prikaz prečnega transformatorja in pripadajoči kazalčni diagram prikazuje slika 2.11.



Slika 2.10: Enofazni shematični prikaz prečnega transformatorja in ustreznega kazalnega diagrama

Glede na sliko 2.10 lahko zapišemo sledeče enačbe:

$$\underline{U}_3 = (v + j \cdot \mu) \cdot \underline{U}_1 = t \cdot e^{j\alpha} \cdot \underline{U}_1 = \underline{t} \cdot \underline{U}_1 \quad (2.15)$$

pri tem velja

$$t = \sqrt{v^2 + \mu^2} \quad ; \quad \alpha = \arctg\left(\frac{\mu}{v}\right) \quad (2.16)$$

Glede na izravnano bilanco moči velja:

$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* = \underline{U}_3 \cdot \underline{I}_3^* \quad (2.17)$$

Glede na sliko 2.10 in enačbo 2.15 lahko enačbo 2.17 zapišemo:

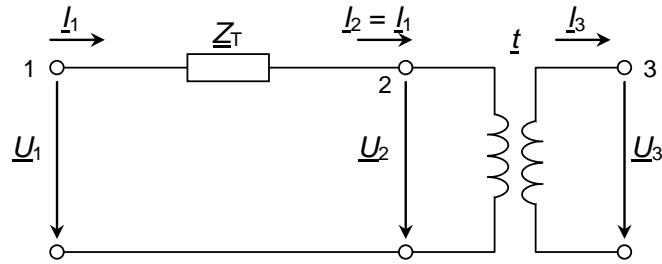
$$\underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1 \cdot e^{-j\gamma} = \underline{U}_1 \cdot t \cdot e^{j\alpha} \cdot \underline{I}_3^* \quad (2.18)$$

in izrazimo tok \underline{I}_3

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{I}_1}{t} \cdot e^{-j(\gamma+\alpha)} \quad (2.19)$$

Tok in napetost se torej premakneta za enak kot α .

Model - električno nadomestno vezje priredimo za vključitev v matematični algoritem za izračun pretokov moči kot π - člen.



Slika 2.11: Upoštevanje nenazivnega prestavnega razmerja transformatorja

Enačbi tokov priključnih sponk se torej glede na enačbi (2.16) in (2.19) glasita:

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_2 \cdot e^{-j(\gamma+\alpha)} = \underline{I}_3 \cdot \underline{t}^* = \frac{1}{\underline{Z}_T} \cdot (\underline{U}_1 - \underline{U}_3 \cdot \underline{t}) \cdot \underline{t}^* \quad (2.20)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_T} \cdot (\underline{U}_1 - \underline{U}_3 \cdot \underline{t}) \quad (2.21)$$

Če iz enačbe 2.20 izrazimo napetost \underline{U}_1 , dobimo:

$$\underline{U}_1 = \frac{\underline{I}_3 \cdot \underline{Z}_T}{\underline{t}^*} + \underline{U}_3 \cdot \underline{t} \quad (2.22)$$

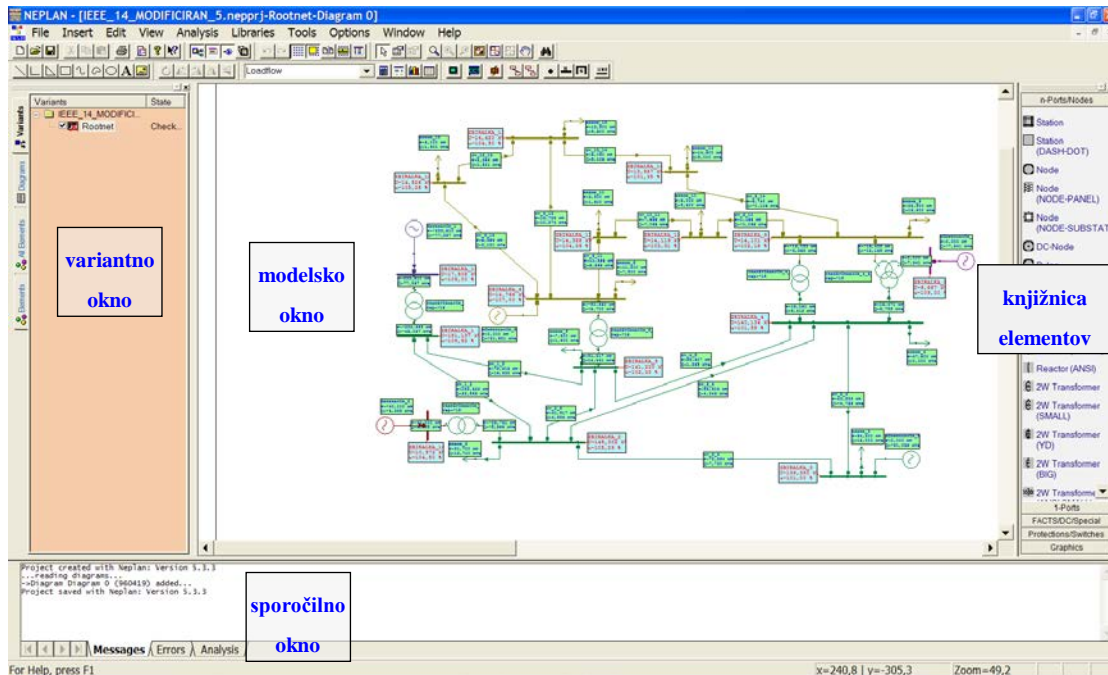
Enačbo 2.22 vstavimo v enačbo 2.21 in dobimo:

$$\underline{I}_1 = \underline{Y} \cdot \left(\frac{\underline{I}_3 \cdot \underline{Z}_T}{\underline{t}^*} + \underline{U}_3 \cdot \underline{t} - \underline{U}_3 \cdot \underline{t} \right) = \frac{\underline{I}_3}{\underline{t}^*} \quad (2.23)$$

Enačbi 2.22 in 2.23 lahko zapišemo tudi v matričnem zapisu:.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{t} & \underline{Z}_T \\ 0 & \frac{1}{\underline{t}^*} \end{bmatrix}_3 \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_3 \\ \underline{I}_3 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Koeficienti »A« predstavitve četveropola so od tod:

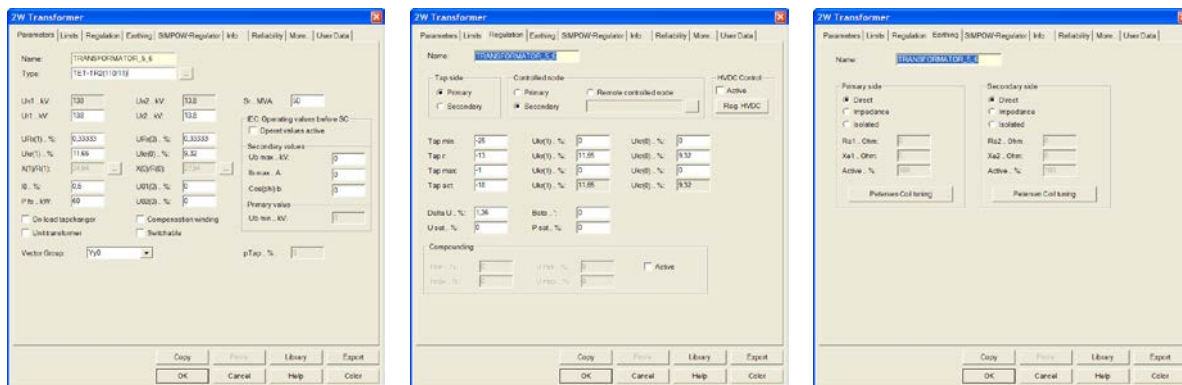


Slika 3.1: Vmesnik za programski paket NEPLAN

Model transformatorja v programskem paketu NEPLAN

Stacionarni model transformatorja je eden izmed osnovnih gradnikov tvorbe modela EES v programskem paketu NEPLAN. Za vzdolžno regulacijo transformatorja je razvit na osnovi fizikalnega modela transformatorja na sliki 2.1. Model prečnega transformatorja je v programskem paketu NEPLAN razvit na osnovi taiste fizikalne sheme na sliki 2.1, s to razliko, da je v tem primeru nenazivno prestavno razmerje kompleksna spremenljivka (slika 2.11).

Slika 3.2 a) prikazuje vmesnik za vnos osnovnih podatkov za model transformatorja. Nazivna napetost transformatorja je že določena z nazivno napetostjo zbiralke, na katero je vezan transformator. Določita pa se lahko obratovalni napetosti primarija in sekundarija, U_{r1} in U_{r2} . vnesejo se lahko kratkostične napetosti in izgube bakra za pozitivno in ničto zaporedje, $U_{k(1)}$, $U_{k(0)}$, $U_{r(1)}$ in $U_{r(0)}$. Za prečno vejo pa lahko vnesemo procentualno vrednost toka magnetenja I_0 in izgube v železu P_{Fe} . Vnesti moramo še nazivno moč transformatorja S_{nT} in vezalno skupino z vezalnim številom transformatorja (Yy0). Slika 3.2 b) prikazuje pogovorno okno za vnos podatkov za regulator transformatorja s posnetkom posnetka odcepov regulatorja (primar, sekundar) z minimalnim položajem regulatorja Tap_{min} , maksimalnim položajem regulatorja Tap_{max} , nazivnim položajem Tap_r in obratovalnim položajem regulatorja Tap_{act} . Važen je tudi vhodni podatek za procentualno spremembo napetosti pri premiku regulatorja za eno stopnjo Δu . Če hočemo imeti model prečnega transformatorja in regulirati velikost delovne moči postavimo kot "Beta" na vrednost različno od nič. Na sliki 3.2 c) pa vidimo, da lahko manipuliramo z ozemljitvijo nevtralnih točk transformatorja (primarnih in sekundarnih).



a)

b)

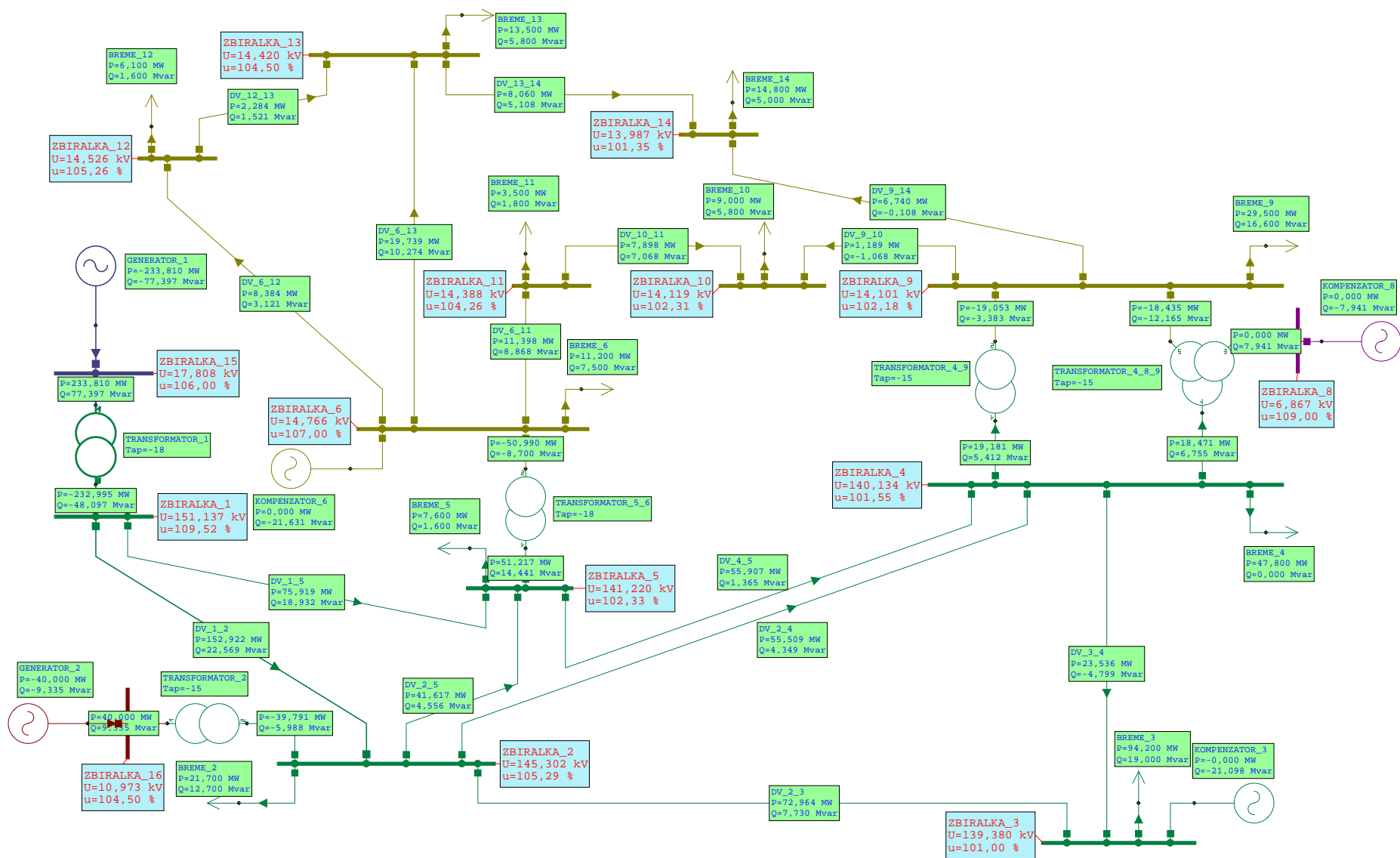
c)

Slika 3.2: Vmesnik za vnos vhodnih podatkov za transformator v programskem paketu NEPLAN

Prikaz rezultatov izračuna pretokov moči na modelu IEEE 14 vozlišč/20 povezav

Kot vidimo iz slike 3.2, vnašamo v modele elementov elektroenergetskega sistema podatke v dejanskih enotah. Ko je model zaključen, potem na osnovi napetostnih nivojev na zbiralkah (nazivnih napetosti zbiralk) in izbrane bazne moči ($S_b = 100$ MW), se v programskem paketu NEPLAN cel model pretvori v "per unit" sistem in potem računa stanja v modelu sistema. Ko je izračun izveden, se zopet preslika vse v osnovne enote.

Na sliki 3.3 je prikazan model omrežja IEEE 14/20 v programskem paketu NEPLAN.



Slika 3.3: Model IEEE 14/20 v programskem paketu NEPLAN

Analizirali bomo delovanje transformatorja med zbiralkama 5 in 6, ki ga poimenujemo "TRANSFORMATOR_5_6". Iz vhodnih podatkov na sliki 3.2 je razvidno, da je regulator na položaju -15, kar pomeni, da bi morali na sekundariju dobiti višjo napetost, vendar je na zbiralko 6 vezan kompenzator, ki fiksira napetost tega vozlišča (na $1,07 \cdot U_n$). Pri drugačnem položaju regulatorja na primariju se sicer napetost na sekundariju ne spremeni, se pa spremeni količina prenesene jalove moči.

4. ZAKLJUČKI

Transformator v EES je en od osnovnih gradnikov EES. Model transformatorja je dokaj zahteven. Večina transformatorjev v EES je regulacijskih z vzdolžno regulacijo. Z regulacijo spreminjamo napetost na sekundariju transformatorja in količino prenesene jalove moči skozi transformator. S prečnim transformatorjem pa lahko reguliramo količino delovne moči čez transformator in s tem usmerjamo količino prenesene električne energije na določenih prenosnih poteh. Neplan kot orodje za načrtovanje preračunavanje in analizo stacionarnih stanj v EES ima razvit model transformatorja, ki simulacijo poljubnega stanja transformatorja v EES.

5. VIRI

- [1] J. Voršič, Tine Zorič, Miran Horvat: *Izračuni obratovalnih stanj električnih omrežij*, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko, Maribor 2012
- [2] Ivan Zagradišnik: *Elektromehanski pretvorniki*, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, 2001
- [3] Peter Jereb: *Preizkušanje električnih strojev*, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana 1965
- [4] UCTE Subgroup »Network models and forecast tools«: *UCTE data exchange format for load flow studies*, 2010
- [5] Jan Šlamberger: *Uporaba prečnega transformatorja v elektroenergetskem omrežju*, diplomsko delo univerzitetnega študijskega programa, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko, Maribor 2010
- [6] Mathew P. Oommen, Jeffrey L. Kohler, *Effect of Three-Winding Transformer Models on the Analysis and Protection of Mine Power Systems*,
- [7] IEEE 14-20
- [8] Reliability Test System Task Force IEEE: *The IEEE Reliability Test System*, Transactions on Power Systems, Vol. 14, NO. 3, August 1999
- [9] wikipedia *Transformer* <http://en.wikipedia.org/wiki/Transformer#mw-head>
- [10] wikipedia *Quadrature booster* http://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature_booster#mw-head
- [11] http://www.neplan.ch/html/e/e_home.htm

NASLOV AVTORJEV

Janez RIBIČ
Jože VORŠIČ
Jože PIHLER

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Šmetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 71 55 Fax: + 386 2 252 54 81 ali + 386 2 220 72 72
Elektronska pošta: janez.ribic@uni-mb.si

Žiga VORŠIČ

SODO d.o.o. – Sistemski operater distribucijskega omrežja