



**Универзитет у Београду
Електротехнички факултет**

Елементи електроенергетских система

– рачунске вежбе –

- **ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ**

Желько Буришић

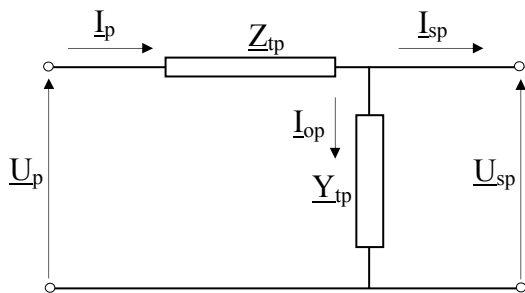
Београд, 2004.

ЗАДАТАК 1: За трофазни тростубни двонамотни енергетски трансформатор познати су следећи подаци: $S_n=31,5$ MVA; $m_t=121/10$ kV/kV; $\Delta P_{cu}=200$ kW (снага трофазних губитака у баку трансформатора при номиналном оптерећењу); $\Delta P_{fe} = 86$ kW (снага трофазних губитака у гвожђу трансформатора при номиналном напону); $u_k=10,5\%$; $i_o=2,7\%$.

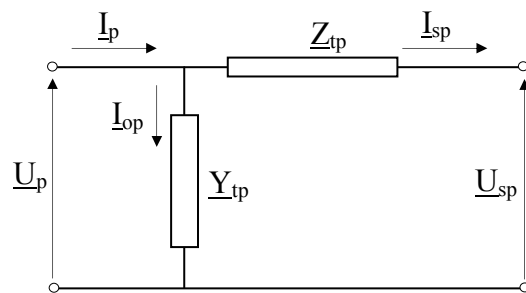
Нацртати еквивалентну заменску “Г”, обрнуту “Г” и “Т” шему овог трансформатора и израчунати све параметре који фигуришу у овим шемама. Параметре израчунати у апсолутним јединицама и свести их на:

- напонски ниво примара;
- напонски ниво секундара.

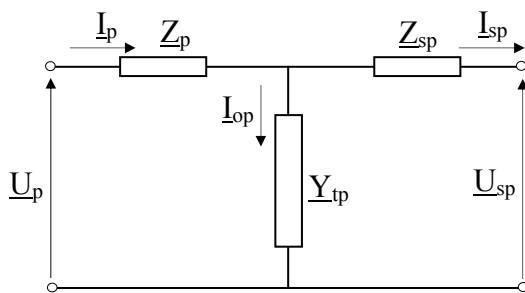
Решење:



*)



**)



***)

- Z_{tp} -Редна импеданса трансформатора сведена на примарну страну,
- Y_{tp} -Оточна адмитанса трансформатора сведена на примарну страну,
- Z_p -Импеданса примара трансформатора,
- Z_{sp} -Импеданса секундара трансформатора сведена на примарну страну.

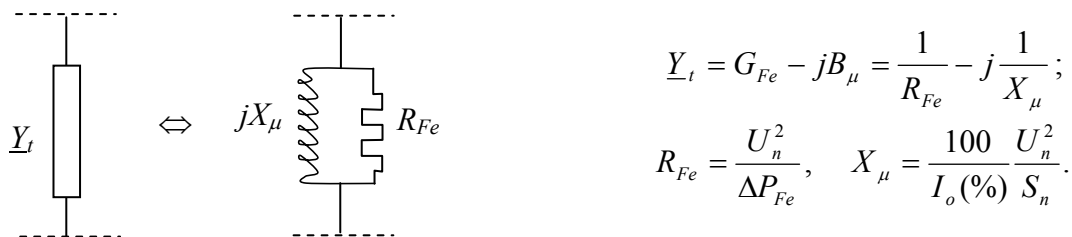
Еквивалентне заменске шеме трансформатора за симетричан трофазан систем напајања:

- *) еквивалентна “обрнута Г” заменска шема,
- **) еквивалентна “Г” заменска шема,
- ***) еквивалентна “Т” заменска шема.

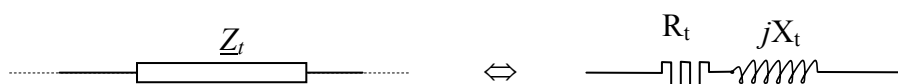
У заменским шемама све величине и параметри су формално (у ознакама) сведени на примарну страну.

Прорачун параметара заменских шема трансформатора:

Оточна адмитанса трансформатора одређује се на основу података из огледа празног хода, односно губитака у гвожђу и струје празног хода при номиналном напону напајања:



Редна импеданса трансформатора \underline{Z}_t одређује се из огледа кратког споја, односно на основу губитака у бакуру (при номиналној струји) и одговарајућег напона кратког споја.



$$\underline{Z}_t = R_t + jX_t; \quad Z_t = \frac{u_k(\%) U_n^2}{100 S_n}; \quad R_t = \Delta P_{cu} \left(\frac{U_n}{S_n} \right)^2, \quad X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2}.$$

Уколико се у претходним изразима за прорачун оточних и редних параметра трансформатора уврсти номинални напон примара ($U_n=U_{np}$) параметри се свде на напонски ниво примара. Уколико се у изразима уврсти номинални напон секундара ($U_n=U_{ns}$) параметри се свде на напонски ниво секундара.

Код еквивалентне “Т” заменске шеме трансформатора редна импеданса је раздвојена на примарну и секундарну сведену на примарну страну (или примарну сведену на секундарну страну и секундарну). Двонамотни енергетски трансформатори се обично пројектују тако да су ове две импедансе међусобно једнаке, а збирно чине импедансу трансформатора, односно:

$$\underline{Z}_p \approx \underline{Z}_{sp} = \frac{\underline{Z}_{tp}}{2}, \quad \text{или} \quad \underline{Z}_s \approx \underline{Z}_{ps} = \frac{\underline{Z}_{ts}}{2}.$$

На основу претходних релација могу се израчунати параметри еквивалентних заменских шема. Резултати су сређени табеларно.

	U_n (kV)	R_{Fe} (Ω)	G_{Fe} (S)	X_μ (Ω)	B_μ (S)	R_t (Ω)	X_t (Ω)
a)	121	170244	$5,874 \cdot 10^{-6}$	17214,6	$5,81 \cdot 10^{-5}$	2,95	48,8
b)	10	1162,8	$8,6 \cdot 10^{-4}$	117,58	$8,5 \cdot 10^{-3}$	0,0201	0,333

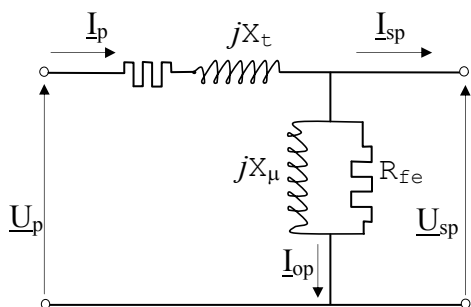
ЗАДАТАК 2: За дистрибутивни трансформатор чији су параметри $S_n=1 \text{ MVA}$; $m_t=10/0,4 \text{ (kV/kV)}$; $i_0=1,4 \%$; $u_k=5,5 \%$ одредити реактивну снагу коју он узима из ЕЕС–а у следећим режимима:

- празан ход;
- номинално оптерећење;
- 50% од номиналног оптерећења.

Решење:

Енергетски трансформатор "троши" реактивну енергију на магнећење језгра и на енергију магнетског поља расипања примарног и секундарног намотаја. Ниво флукса (индукција) у магнетском колу трансформатора зависи од величине напона на који је прикључен трансформатор. Пошто су варијације напона око номиналне вредности у радним условима релативно мале, онда је и реактивна енергија магнећења трансформатора приближно константна и практично независна од оптерећења (строго гледано она је мања при већим оптерећењима због пада напона у трансформатору и напојној мрежи). Реактивна енергија концентрисана у магнетском пољу расипања директно је сразмерна квадрату струје оптерећења. Укупна реактивна енергија коју "троши" трансформатор једнака је збиру реактивне енергије магнећења језгра и реактивне енергије расипања флукса.

За инжењерски приступ за прорачун губитака реактивне енергије у трансформатору, најпогодније је посматрати еквивалентну "Г" или "обрнуту Г" шему трансформатора. Прорачун се може спровести на примарном или секундарном напонском нивоу. Пошто се у овом примеру ради о дистрибутивном трансформатору природније је посматрати магнећење са примарне стране, па је погодније користити "обрнуту Г" заменску шему трансформатора.



X_t - Укупна реактанса расипања трансформатора (реактанса расипања примара + реактанса расипања секундара сведена на примарну страну),

R_{fe} - Омска отпорност примарног и секундарног намота сведена на примарну страну,

X_μ - Реактанса магнећења трансформатора посматрана са примарне стране,

R_{fe} - Отпорност којом се еквивалентирају губици у гвожђу трансформатора (услед хистерезиса и вихорних струја).

У прорачуну губитака реактивне енергије, омске отпорности које егзистирају у заменској шеми, практично не утичу на прорачун.

а) У режиму празног хода ($I_{sp}=0$) реактивна снага коју узима трансформатор (Q_0) се практично троши само на магнећење језгра (снага која се троши на расипање флукса у примару је занемарљива јер је струја мала).

$$Q_0 = \frac{U_n^2}{X_\mu} = \sqrt{3}U_n I_0 = \sqrt{3}U_n I_n \frac{I_0}{I_n} = S_n I_o (r.j) = S_n \frac{I_0(\%)}{100} = 1 \cdot \frac{1,4}{100} = 0,014 \text{ Mvar.}$$

b) При оптерећењу трансформатора, поред реактивне снаге магнећења језгра (Q_0), трансформатор троши и реактивну снагу (Q_p) на расипање флукса у примарном и секундарном намоту, односно на редној реактанси X_t .

За номинално оптерећење реактивна снага која се троши на расипање (Q_{pn}) је:

$$Q_{pn} = 3X_t I_n^2 = 3X_t \frac{I_n^2 U_n^2}{U_n^2} = X_t \frac{S_n^2}{U_n^2} = X_t \frac{S_n}{U_n^2} S_n = \frac{X_t}{Z_{baz}} S_n = X_t (r.j.) S_n = \frac{x_t (\%)}{100} S_n.$$

Процентуална редна реактанса трансформатора ($x_t(\%)$) практично је бројно једнака процентуалном напону кратког споја ($u_k(\%)$) јер је:

$$u_k (\%) = \frac{U_k}{U_n} 100 = \frac{\sqrt{3} Z_k I_n}{U_n} 100 = \frac{Z_k S_n}{U_n^2} 100 = \frac{Z_k}{Z_{baz}} 100 = z_k (\%) = \sqrt{R_t (\%)^2 + X_t (\%)^2} \approx X_t (\%)$$

Сада се може прорачунати реактивна снага (Q_{pn}) на основу датих података и претходних релација.

$$Q_{pn} = \frac{u_k (\%)}{100} S_n = 1 \cdot \frac{5,5}{100} = 0,055 \text{ Mvar}.$$

Укупна реактивна снага коју трансформатор узима при номиналном оптерећењу (Q_m) једнака је збиру снаге магнећења и снаге која се губи на расипање:

$$Q_m = Q_0 + Q_{pn} = 0,014 + 0,055 = 0,069 \text{ Mvar}.$$

c) При произвољном оптерећењу трансформатора, реактивна енергија која се троши на расипање флукса (Q_p) је:

$$Q_p = 3X_t I^2 = 3X_t \left(\frac{I}{I_n}\right)^2 I_n^2 = 3X_t \beta^2 I_n^2 = \beta^2 Q_{pn} = \beta^2 \frac{u_k (\%)}{100} S_n,$$

где је β однос струје оптерећења I према номиналној струји ($\beta = \frac{I}{I_n}$).

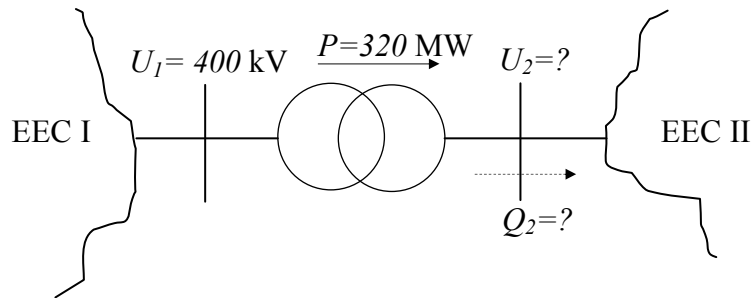
При оптерећењу трансформатора $S = 0,5 S_n$ реактивна енергија која се троши у трансформатору ($Q_{\gamma 50\%}$) је:

$$Q_{\gamma 50\%} = Q_0 + Q_{p 50\%} = S_n \frac{i_0 (\%)}{100} + \beta^2 S_n \frac{u_k (\%)}{100} = 1 \cdot \left(\frac{1,4}{100} + 0,5^2 \cdot \frac{5,5}{100} \right) = 0,02775 \text{ Mvar}.$$

Дакле при оптерећењу трансформатора од 50% реактивна енергија коју он узима од ЕЕС-а је $\approx 40,22\%$ од реактивне енергије коју узима при номиналном оптерећењу.

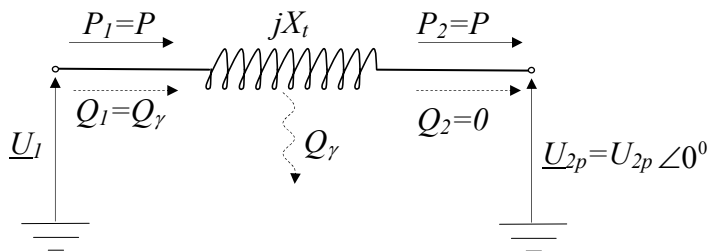
ЗАДАТАК 3: Интерконективни трансформатор чији су подаци: $m_t = \frac{400}{220} (kV/kV)$,

$x_t = 10\%$, $S_n = 400 MVA$, $x_\mu \rightarrow \infty$ повезује два електроенергетска система. Кроз трансформатор се преноси активна снага $P=320 MW$ из ЕЕС-а I у ЕЕС II. Напон на сабирницама I је $U_1 = 400 kV$. Одредити ефективну вредност напона на сабирницама U_2 тако да ЕЕС II не одаје нити прима реактивну енергију из ЕЕС-а I, односно да је $Q_2=0$. Губитке активне снаге у трансформатору занемарити.



Решење:

С обзиром да су у овом примеру губици активне снаге занемарени и да је $x_\mu \rightarrow \infty$, трансформатор се моделује само редном реактансом. Прорачун ће бити спроведен на напонском нивоу примара. Одговарајућа заменска шема дата је на слици.



U_{2p} – Напон на сабирницама II сведен на напонски ниво примара.

Токови реактивних снага кроз неки елемент ЕЕС-а (трансформатор, вод и слично) везани су за модуо напона на крајевима елемента, а токови активних снага за фазне ставове тих напона. Реактивна снага "тече" од вишег ка нижем напону, а активна снага од напона чији фазни став предњачи.

У конкретном примеру напон U_1 мора бити већи од напона U_{2p} јер, према услови задатка, ЕЕС I мора да обезбеди целокупну реактивну енергију која се "троши" на реактанси расипања трансформатора X_t (захтева се да ЕЕС II не одаје реактивну енергију). Такође, фазор напона \underline{U}_1 предњачи фазору напона \underline{U}_{2p} јер се активна енергија преноси од ЕЕС I у ЕЕС II.

На основу заменске шеме може се спровести следећи рачун:

$$\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \sqrt{3}\underline{U}_1 \underline{I}^*; \quad P_1 = P, \quad Q_1 = Q_\gamma = 3X_t I^2.$$

$$\underline{S}_2 = P_2 = P = \sqrt{3} U_{2p} I \Rightarrow \underline{I} = I = \frac{P}{\sqrt{3} U_{2p}}.$$

$$S_1 \equiv |\underline{S}_1| = \sqrt{P^2 + Q_\gamma^2} = \sqrt{3} U_1 I \Rightarrow U_1^2 \frac{P^2}{U_{2p}^2} = P^2 + \left(X_t \frac{P^2}{U_{2p}^2} \right)^2$$

Сређивањем претходне једначине добија се:

$$U_{2p}^4 - U_1^2 U_{2p}^2 + X_t^2 P^2 = 0.$$

Решавање добијене биквадратне једначине биће спроведено у релативним јединицама. За базне вредности биће усвојене: $U_{baz}=U_1=400 \text{ kV}$ и $S_{baz}=S_{nl}=400 \text{ MVA}$. У усвојеном систему базних величина једначина има облик :

$$u_{2p}^4 - 1 \cdot u_{2p}^2 + 0,1^2 \cdot 0,8^2 = 0 \quad \Rightarrow \quad u_{2p}^4 - u_{2p}^2 + 0,0064 = 0.$$

Претходна једначина има једно физички могуће решење: $u_{2p} = 0,99356 \text{ r.j.}$, односно у апсолутним јединицама:

$$U_{2p} = u_{2p} \cdot U_{baz} = 0,99356 \cdot 400 = 397,42 \text{ kV}.$$

Напон на сабирницама II за дати режим је:

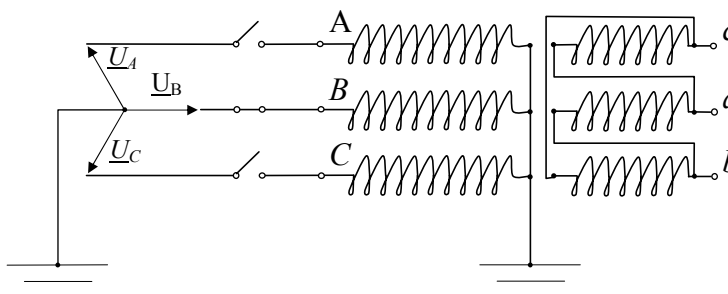
$$U_2 = \frac{U_{2p}}{m_t} = \frac{397,42 \cdot 220}{400} = 218,58 \text{ kV}.$$

Уколико би напон U_2 био $220 \text{ kV} > U_2 > 218,58 \text{ kV}$, онда би један (мањи) део реактивне енергије коју троши трансформатор давао ЕЕС II, а већи део ЕЕС I. Ако би напон U_2 био $U_2=220 \text{ kV}$ онда би реактивну енергију коју троши трансформатор подједнако обезбеђивали ЕЕС I и ЕЕС II.

ЗАДАТАК 4: При искључењу трофазног тростубног енергетског трансформатора, који се налази у празном ходу а напајан је трофазним симетричним системом напона номиналне вредности, дошло је до заглављења пола прекидача у фази В, тако да је трансформатор остао монофазно напајан (као на слици).

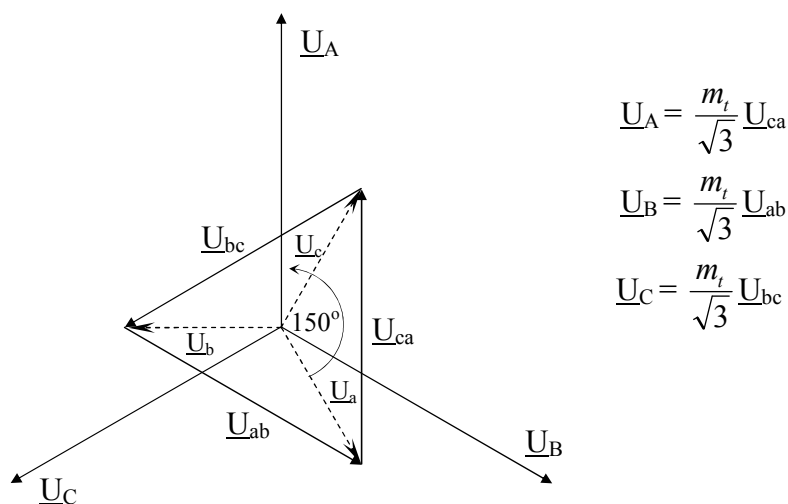
Означити секундарне прикључке трансформатора тако да он буде спреге Yd5, а затим израчунати напоне између секундарних прикључака трансформатора (\underline{U}_{ab} , \underline{U}_{bc} , \underline{U}_{ca}) у стационарном режиму описаног монофазног рада трансформатора.

Параметри трансформатора су:
 $Yd5$; $S_n = 4 \text{ MVA}$;
 $m_t = 35/10,5 \text{ (kV/kV)}$; $I_o(\%) = 1\%$;
 $X_t(\%) = 8\%$. Напојна мрежа и звездиште трансформатора су директно уземљени.



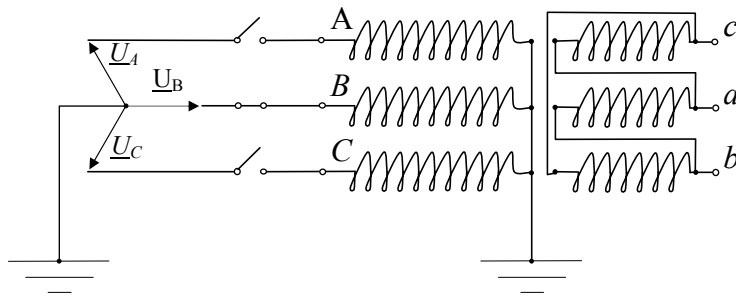
Решење:

Спрежни број трансформатора показује нам колико пута, по 30° , касни фазор секундарног напона у односу на одговарајући фазор примарног напона. У овом задатку спрежни број трансформатора је 5, што значи да фазор секундарног напона касни за одговарајућим фазором примарног напона за угао $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$. Фазорски дијаграм напона, за спрегу Yd5 приказан је на слици. Сличан фазорски дијаграм може се нацртати и за струје кроз намотаје трансформатора.



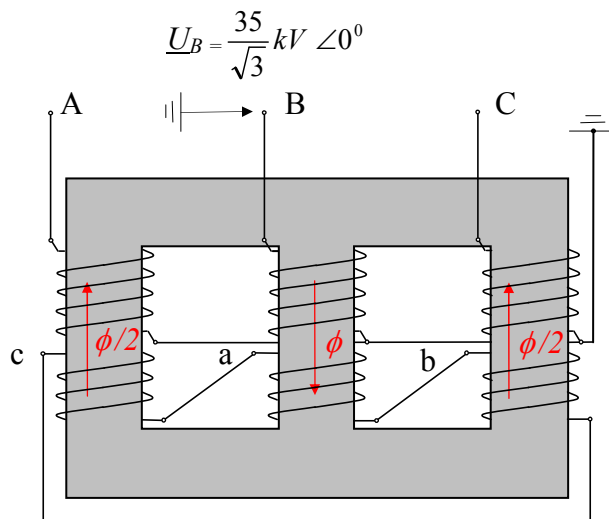
При одређивању распореда прикључака на једном крају трансформатора, за одређену спрегу, треба посматрати векторске дијаграме фазора напона који реално постоје (код спреге "D" то су међуфазни напони, а код спреге "y" то су фазни напони).

На дијаграму напона уоче се фазори који су паралелни. Паралелни фазори (вектори који су у фази или противфази) се налазе на истом стубу трансформатора јер њихови намотаји обухватају исти флуks, тако да се могу на основу овог критеријума одредити ознаке прикључака секундара тако да за анализирани трансформатор буде спреге Yd5. На наредној слици је шематски приказан трансформатор спреге Yd5.



При монофазном напајању трофазног тростубног трансформатора (као на слици) флуks у магнетном колу ствара само примарни намотај фазе В. Пошто је магнетно коло симетрично, флуks (ϕ) се дели на стубове на којима су намотани фазни намотаји А и С (као на слици) .

Према назначеним референтним смеровима флуksа кроз поједине намотаје могу се срачунати тражени напони:



$$\underline{U}_B = \frac{35}{\sqrt{3}} \text{ kV} \angle 0^\circ$$

$$u_B = N_p \frac{d\phi}{dt}; \quad u_A = u_C = -N_p \frac{d(\phi/2)}{dt}$$

$$u_{ab} = N_s \frac{d\phi}{dt}; \quad u_{ca} = u_{bc} = -N_s \frac{d(\phi/2)}{dt}$$

$$\frac{u_B}{u_{ab}} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{m_t}{\sqrt{3}}; \quad u_{bc} = u_{ca} = -\frac{u_{ab}}{2}$$

$$\underline{U}_{ab} = \frac{\sqrt{3}}{m_t} \underline{U}_B = \frac{\sqrt{3} \cdot 10,5}{35} \cdot \frac{35}{\sqrt{3}} = 10,5 \text{ kV}$$

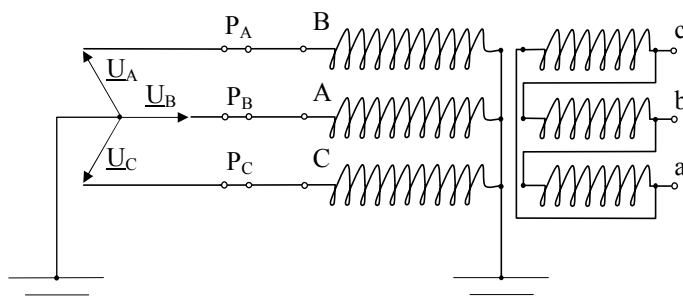
$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_{bc} = -\frac{\underline{U}_{ab}}{2} = -\frac{10,5}{2} = -5,25 \text{ kV}$$

Дакле, у секундарном намоту трансформатора постоји равнотежа индукованих електромоторних сила, па у троуглу секундара не тече струја.

ЗАДАТАК 5: Трофазни тростубни енергетски трансформатор, чији су параметри $S_n=4 \text{ MVA}$; $mt=35/10(\text{kV/kV})$; $I_0(\%)=1\%$; $Xt(\%)=10\%$; Yd9 са директно уземљеним звездиштем примарног намота, прикључен је на симетричан систем напона номиналне вредности. Израчунати струју празног хода у фази (A) ако су:

- укључени сви прекидачи;
- ако су искључени прекидачи (P_B) и (P_C);
- ако је искључен прекидач (P_B).

Активне отпорности редне и оточне гране заменске шеме занемарити.



Решење:

- Када су затворени сви прекидачи трансформатор се налази у режиму симетричног празног хода, па су ефективне вредности струја празног хода у свим фазама исте:

$$I_{0A} = I_{0B} = I_{0C} = I_0 = \frac{I_0(\%)}{100} I_n = \frac{I_0(\%)}{100} \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} = \frac{1}{100} \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 35} = 0,67 \text{ A}.$$

- У овом случају струја протиче само кроз фазни намотај фазе А примара, као на слици. Индуковане електромоторне силе у намоту секундера су међусобно уравнотежене те се струја не успоставља у троуглу секундера.

Флукс ϕ , који ствара струја I_{A0}^b у стубу фазе А, индукује електромоторну силу самоиндукције у фазном намотају фазе А примара, која је уравнотежена напонем \underline{U}_a , па важи следећа релација:

$$\Psi_A = N_p \phi = N_p \frac{N_p I_{A0}^b}{\Lambda_e} = N_p \frac{N_p I_{A0}^b}{\frac{3}{2} \Lambda} = \frac{2}{3} \frac{N_p^2 I_{A0}^b}{\Lambda}$$

Гдје је:

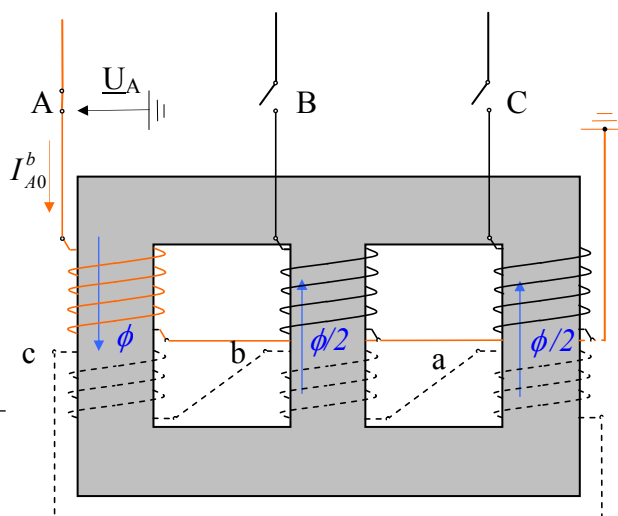
N_p - број навојака фазног намотаја примара,

Λ_e – еквивалентна магнетска отпорност магнетског кола при једнофазном напајању,

Λ - магнетска отпорност једног стуба магнетског кола (занемарене су магнетске асиметрије магнетског кола).

Пошто је индуктивност магнећења при трофазном симетричном напајању

$L_\mu = \frac{N_p^2}{\Lambda}$, може се успоставити веза између струје празног хода при трофазном напајању



(I_0) и струје празног хода при једнофазном напајању датог трансформатора (I_{A0}^b). За трофазан симетричан празан ход важи:

$$U_A = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \omega \Psi_A = \omega \frac{N_p^2 I_0}{\Lambda} = \omega L_\mu I_0.$$

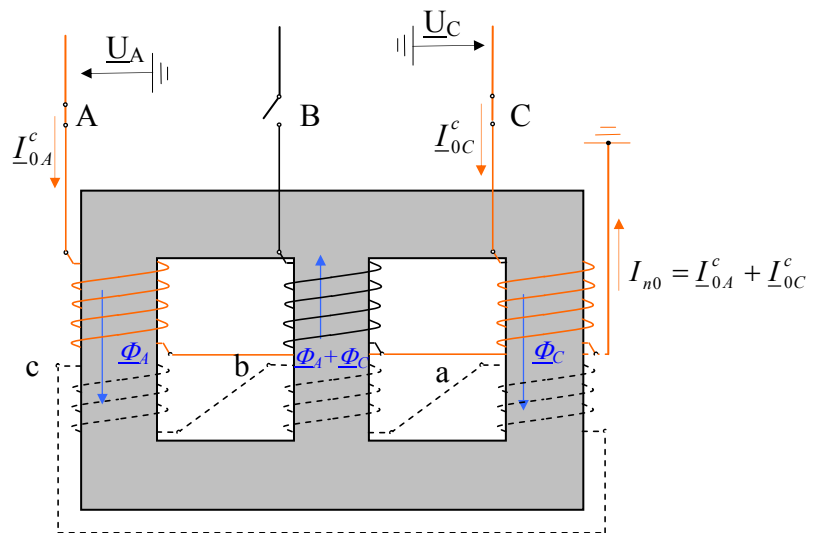
При једнофазном празном ходу струја је одређена следећом релацијом:

$$U_A = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \omega \Psi_A = \frac{2}{3} \omega \frac{N_p^2 I_{A0}^b}{\Lambda} = \frac{2}{3} \omega L_\mu I_{A0}^b.$$

Поредећи претходне релације, може се струја I_{A0}^b изразити преко струје I_0 , тј. важи :

$$I_{A0}^b = \frac{3}{2} I_0 = 1,5 \cdot 0,67 = 1 A.$$

с) Пошто је отворен прекидач у фази В има се двофазно напајање трансформатора, односно постоје струје у фазним намотајима фаза А и С. У овом случају се мора спровести фазорски рачун. На основу симетрије се може закључити да су струје у фазним намотајима А и С по модулу једнаке.



Прорачун струја се може вршити на основу методе суперпозиције (претпоставка је да је магнетско коло линеарно).

$$\underline{\Phi}_A = \underline{\Phi}_{AA} - \underline{\Phi}_{AC} = \frac{N_p I_{0A}^c}{\frac{3}{2} \Lambda} - \frac{1}{2} \frac{N_p I_{0C}^c}{\frac{3}{2} \Lambda} = \frac{2}{3} \frac{N_p}{\Lambda} (I_{0A}^c - \frac{1}{2} I_{0C}^c)$$

$$\underline{U}_A = j \omega N_p \underline{\Phi}_A = j \omega \frac{2}{3} \frac{N_p^2}{\Lambda} (I_{0A}^c - \frac{1}{2} I_{0C}^c) = j \frac{2}{3} \omega L_\mu (I_{0A}^c - \frac{1}{2} I_{0C}^c)$$

$$\underline{\Phi}_C = \underline{\Phi}_{CC} - \underline{\Phi}_{CA} = \frac{N_p I_{0C}^c}{\frac{3}{2} \Lambda} - \frac{1}{2} \frac{N_p I_{0A}^c}{\frac{3}{2} \Lambda} = \frac{2}{3} \frac{N_p}{\Lambda} (I_{0C}^c - \frac{1}{2} I_{0A}^c)$$

$$\underline{U}_C = j \omega N_p \underline{\Phi}_C = j \omega \frac{2}{3} \frac{N_p^2}{\Lambda} (I_{0C}^c - \frac{1}{2} I_{0A}^c) = j \frac{2}{3} \omega L_\mu (I_{0C}^c - \frac{1}{2} I_{0A}^c)$$

Из претходних релација се могу изразити струје преко напона \underline{U}_A и \underline{U}_C :

$$\underline{I}_{0A}^c = -j \frac{2\underline{U}_A + \underline{U}_C}{\omega L_\mu} = -j \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_B}{\omega L_\mu} = -j \frac{\underline{U}_{AB}}{\omega L_\mu} ;$$

$$\underline{I}_{0C}^c = -j \frac{2\underline{U}_C + \underline{U}_A}{\omega L_\mu} = -j \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_B}{\omega L_\mu} = j \frac{\underline{U}_{BC}}{\omega L_\mu} ;$$

Струја кроз неутрални проводник је:

$$\underline{I}_{0n} = \underline{I}_{0A}^c + \underline{I}_{0C}^c = 3 \frac{\underline{U}_A + \underline{U}_C}{j\omega L_\mu} = j3 \frac{\underline{U}_B}{\omega L_\mu} .$$

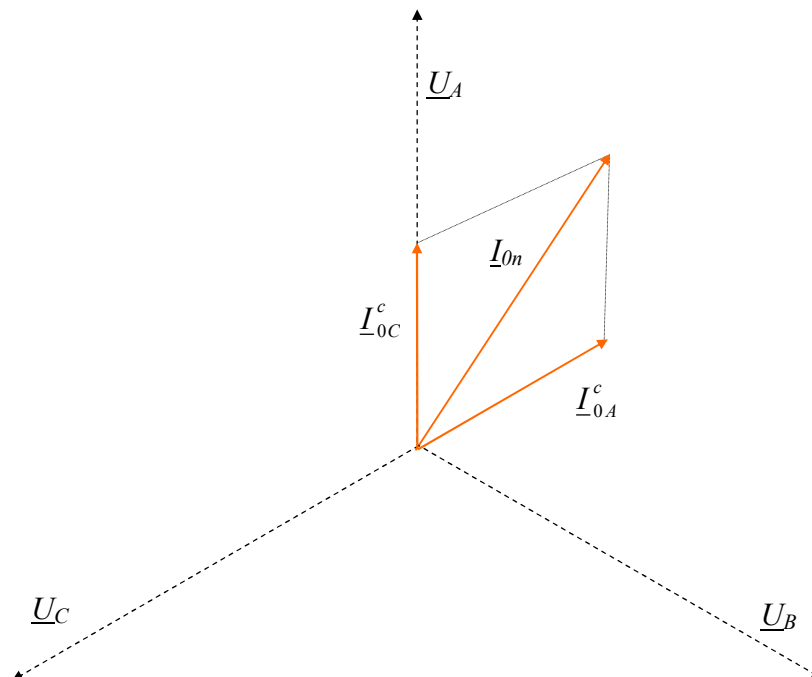
Ефективне вредности струје кроз фазне намотаје В и С су:

$$|\underline{I}_{0A}^c| = |\underline{I}_{0C}^c| = \frac{U_n}{\omega L_\mu} = \sqrt{3} I_0 = \sqrt{3} \cdot 0,67 = 1,16 \text{ A}$$

Ефективна вредност струје кроз неутрални проводник је:

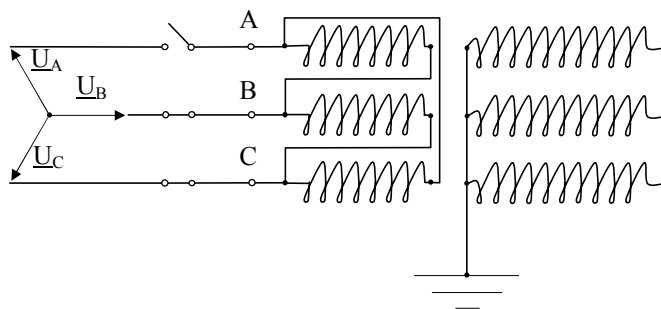
$$|\underline{I}_{0n}| = 3 \frac{U_{nf}}{\omega L_\mu} = 3 \cdot I_0 = 3 \cdot 0,67 = 2,01 \text{ A}$$

Одговарајући фазорски дијаграм струја при двофазном напајању трансформатора у празном ходу је дат на слици.



ЗАДАТАК 6: Трофазни тростубни трансформатор спреге Ду, номиналне снаге $S_n=100 \text{ MVA}$, преносног односа $m_t=110/10 \text{ (kV/kV)}$ има процентуалну струју празног хода $i_o=0,5\%$.

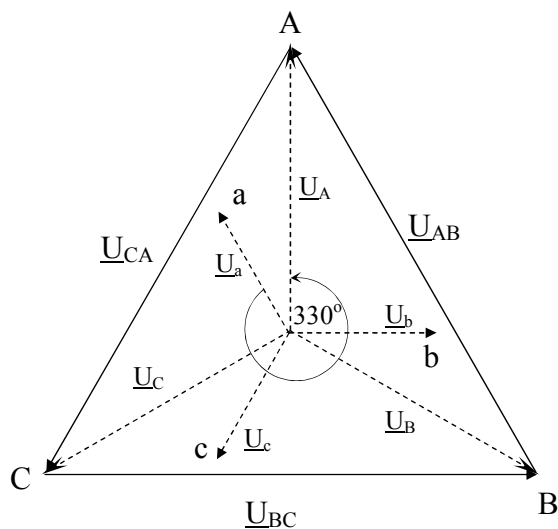
Означити секундарне прикључке трансформатора тако да он буде спреге Ду11, а затим израчунати струју празног хода при двофазном напајању трансформатора номиналним напонем, као што је приказано на слици.



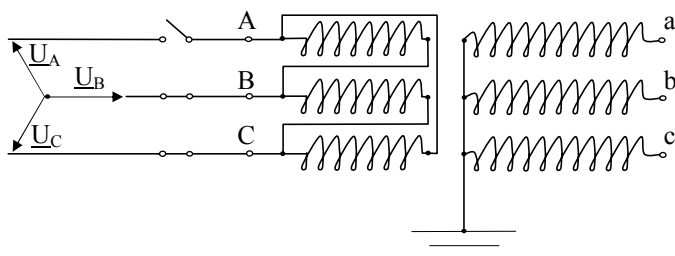
Решење:

На слици 1 је приказан фазорски дијаграм напона на прикључцима трансформатора који одговарају спрези Ду11. Испрекиданом линијом су нацртани фиктивни фазни напони на примару.

Са фазорског дијаграма могу се уочити фазори који су паралелни, што значи да се они налазе на истом стубу трансформатора, што је и критеријум за означавање прикључака трансформатора (у овом случају на секундару). Ознаке које следе из дијаграма приказане су на слици 2.

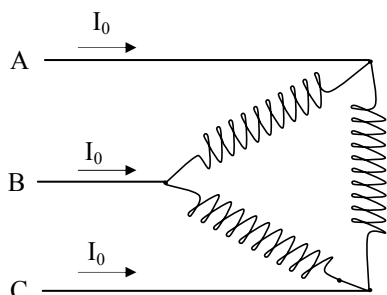


Слика 1



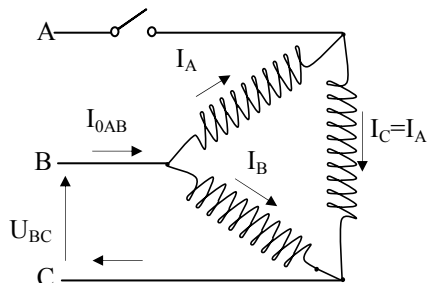
Слика 2

У режиму симетричног празног хода, ефективне вредности струја у напојним фазама су једнаке, слика 3.

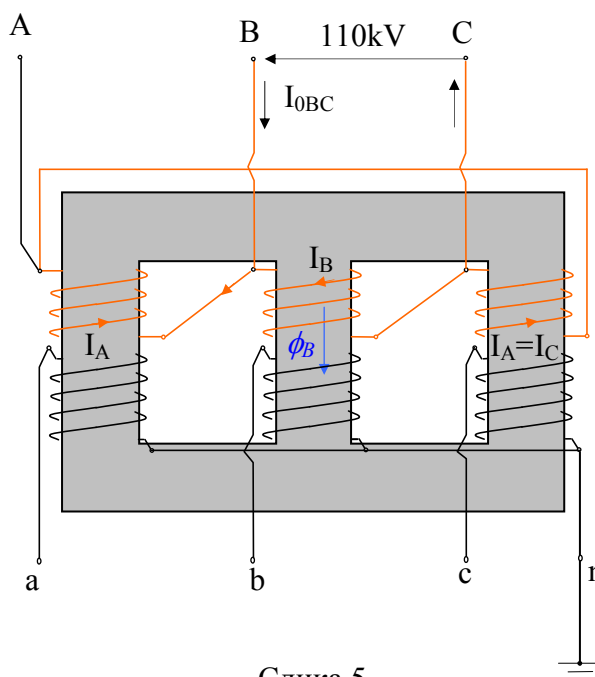


Слика 3

Двофазно напајање је илустровано на сликама 4 и 5:



Слика 4



Слика 5

На основу слике 5 може се методом суперпозиције одредити флуks кроз површину средњег стуба ϕ_B (флуks по навојку фазног намотоја В):

$$\phi_B = \phi_{BB} + \phi_{BA} + \phi_{BC},$$

ϕ_{BB} - флуks у средњем стубу који потиче само од струје I_B , он се може срачунати према следећој релацији:

$$\phi_{BB} = \frac{N_p I_B}{\frac{3}{2} \Lambda}, \text{ где је:}$$

N_p - број навојака фазног намотоја примара,

Λ - магнетска отпорност једног стуба магнетског кола (занемарене су магнетске асиметрије магнетског кола).

Пошто су струје у фазним намотојима А и С једнаке, онда су и флуксеве које оне стварају једнаки. Део флуksа од тих струја, који се затвара кроз средњи стуб (В), једнак је половини укупног флуksа који стварају те струје, односно:

$$\phi_{BA} = \phi_{BC} = \frac{1}{2} \frac{N_p I_A}{\frac{3}{2} \Lambda}.$$

Укупан флуks примарног фазног намотоја на стубу В је:

$$\Psi_B = N_p \phi_B = \frac{N_p^2 I_B}{\frac{3}{2} \Lambda} + 2 \frac{1}{2} \frac{N_p^2 I_A}{\frac{3}{2} \Lambda} = (I_A + I_B) \frac{N_p^2}{\frac{3}{2} \Lambda} = I_{0BC} \frac{N_p^2}{\frac{3}{2} \Lambda}.$$

Примарни фазни намотај на стубу В прикључен је на номинални међуфазни напон U_n , па је:

$$U_n = \omega \Psi_B = \omega \frac{N_p^2}{\frac{3}{2} \Lambda} I_{0BC} \Rightarrow I_{0BC} = \frac{U_n}{\omega \frac{N_p^2}{\frac{3}{2} \Lambda}}$$

Струја трофазног симетричног празног хода (слика 3) је:

$$I_0 = \frac{I_o(\%)}{100} I_n = \frac{I_o(\%)}{100} \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} = \frac{0,5}{100} \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} 110} = 2,624 A,$$

одговарајућа струја кроз намотаје примара (у случају трофазног симетричног напајања) је:

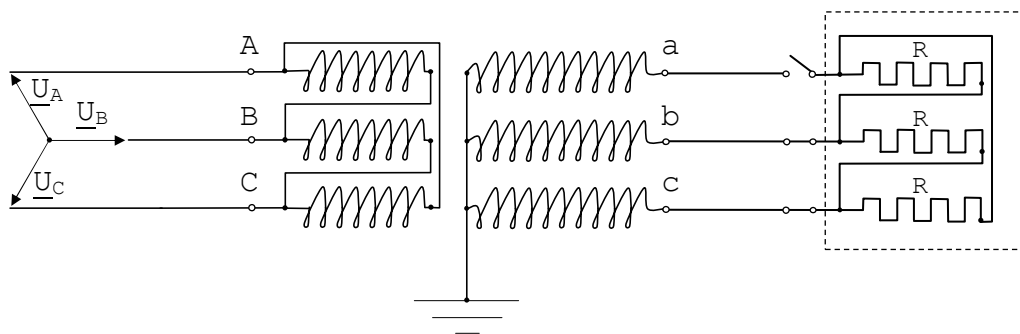
$$\frac{I_0}{\sqrt{3}} = \frac{U_n}{\omega L_\mu} = \frac{U_n}{\omega \frac{N_p^2}{\Lambda}} \Rightarrow L_\mu = \frac{N_p^2}{\Lambda} = \frac{\sqrt{3} U_n}{\omega I_0}.$$

Сада се може успоставити веза између струја празног хода за трофазан симатричан режим и режим двофазног празног хода:

$$I_{0BC} = \frac{U_n}{\omega \frac{N_p^2}{\frac{3}{2} \Lambda}} = \frac{U_n}{\omega \frac{2}{3} \frac{\sqrt{3} U_n}{\omega I_0}} = \frac{3}{2\sqrt{3}} I_0 = 0,866 I_0 = 0,866 \cdot 2,624 = 2,27 A.$$

ЗАДАТАК 7: Трофазни дистрибутивни трансформатор чији су подаци: Dy , 630 kVA, $m_t=10/0,4$ (kV/kV) прикључен је на симетричан систем напона номиналне вредности. На секундарној страни прикључена је симетрична пећ чији су подаци: *спрега* Δ ; $U_n=0,4$ kV; $P_n=160$ kW.

Ако дође до прекида фазе a у дистрибутивном воду 0,4 kV, израчунати, уз занемарење реактанси расипања трансформатора према отпору пећи, ефективне вредности струја у свим фазним проводницима секундарног и примарног вода пре и након квара. Трансформатор сматрати идеалним.



Решење:

На основу номиналних података за пећ, могу се израчунати отпорности грејача пећи које су прикључене на линијске напоне (спрега Δ):

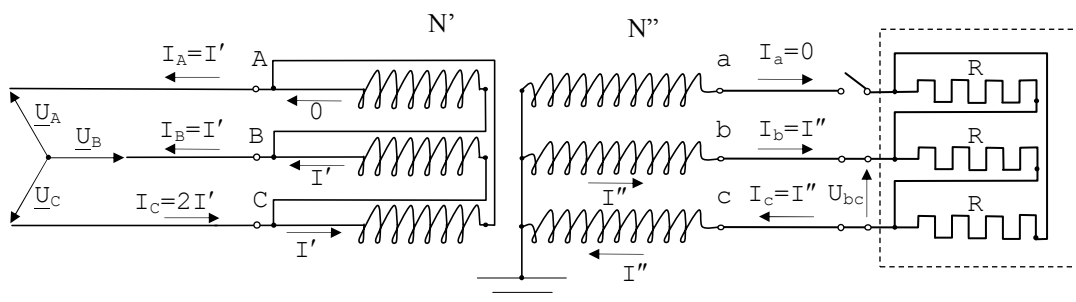
$$P_n = 3 \frac{U_n^2}{R} \Rightarrow R = \frac{3U_n^2}{P_n} = \frac{3 \cdot 0,4^2}{0,16} = 3\Omega.$$

Пре настанка квара ефективне вредности струја у фазним проводницима 10 kV и 0,4 kV напојног воду су:

$$I_a = I_b = I_c = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n} = \frac{160 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 230,94 \text{ A};$$

$$I_A = I_B = I_C = \frac{I_c}{m_t} = \frac{0,4}{10} \cdot 230,94 = 9,238 \text{ A}.$$

Након прекида фазног проводника a у ниженапонском воду, струје у фазним проводницима b и c ће бити исте по модулу (супротних смерова), јер је пећ везана у троугао, па се након прекида фазе a напаја практично монофазно, напоном U_{bc} , као што је приказано на слици:



Струју I'' ограничава паралелна веза отпорности $2R$ и R , односно:

$$R_e = \frac{2R \cdot R}{2R + R} = \frac{6 \cdot 3}{6 + 3} = 2\Omega.$$

Пошто је трансформатор идеализован на њему нема пада напона па је напон на прикључцима b и c остао непромењен и након прекида фазног проводника a , па је струја у фазним проводницима b и c :

$$I'' = \frac{U_{bc}}{R_e} = \frac{400}{2} = 200A, \text{ односно } I_b = I_c = I'' = 200A, \quad I_a = 0A.$$

За намотаје који се налазе на истом стубу, односно језгру трансформатора, важи једнакост магнетопобудних сила које стварају струје које протичу кроз њих тј.: $N' I' = N'' I''$. Наравно, ово важи ако се занемари магнећење. Дакле, струје кроз секундарне намотаје пресликавају се на одговарајуће примарне намотаје тако да је:

$$I' = \frac{N''}{N'} I'' = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot m_t} I'' = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{0,4}{10} 200 = 4,619A.$$

Смер струја у примарном и одговарајућем секундарном намотају је такав да њихова магнетска дејства теже да се пониште.

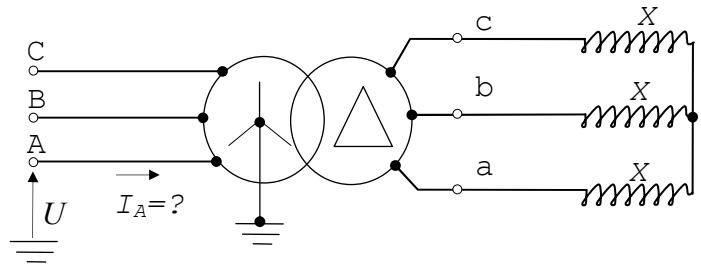
Анализирајући струје које се стичу у чворове А, В и С, могу се одредити струје у фазним проводницима 10 kV напојног вода, за случај прекида фазног проводника у 0,4 kV воду:

$$I_A = I' = 4,619A, \quad I_B = I' = 4,619A \text{ и } I_C = 2I' = 2 \cdot 4,619 = 9,238A.$$

Дакле, струја у фазном проводнику С се није променила након квара, док су се струје у фазним проводницима А и В упола смањиле.

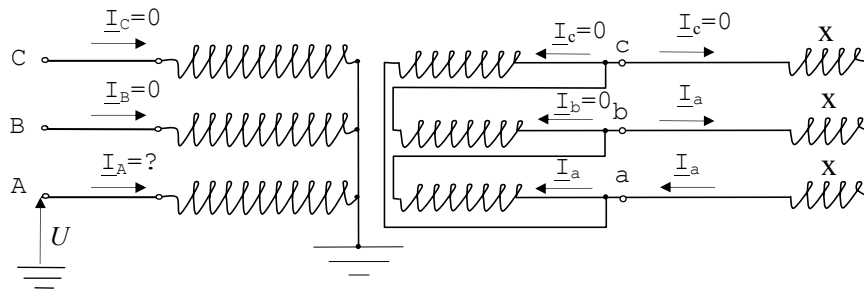
ЗАДАТАК 8: Трофазни тростубни трансформатор везан је као на слици. Одредити струју I_A , ако је $U = \frac{35}{\sqrt{3}} kV$, $X = 1 \Omega$.

Параметри трансформатора су:
 $S_{nt} = 4 MVA$; $m_t = 35/10 (kV/kV)$; $x_t = 10\%$.

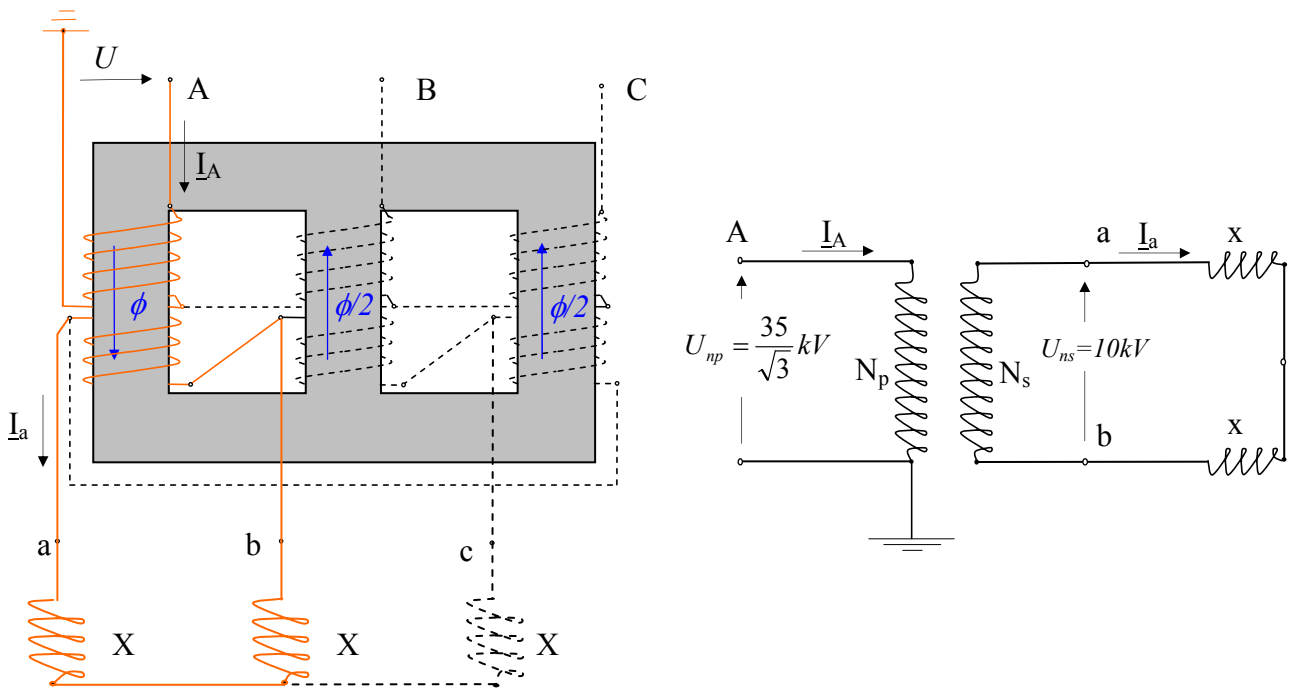


Решење:

На слици је приказана трополна шема трансформатора за анализирани случај напајања. На шеми су назначене струје кроз поједине намотаје на основу једначина физичке очигледности и једнакости магнетопобудних сила које стварају намотаји на истом стубу трансформатора.



У примарном намоту постоји струја само у фазном намотају фазе А. У секундарном намоту постојаће струја у намотају који се налази на истом стубу као и примарни намотај фазе А, то је за дати трансформатор намотај а-б. Дакле трофазни трансформатор овако напајан ради као монофазни трансформатор чији је примарни намотај фазни намотај А и секундарни фазни намотај а-б, као на следећој слици.



Преносни однос једнофазног трансформатора је :

$$m_{1t} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{35/\sqrt{3}}{10} = \frac{35}{10} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{m_t}{\sqrt{3}}.$$

Номинална привидна снага једнофазног трансформатора је:

$$S_{n1t} = \frac{S_{nt}}{3}.$$

Прорачун редне реактансе монофазног трансформатора (сведене на примарну страну):

$$X_{1t} = \frac{x_t(\%) U_{n1t}^2}{100 S_{n1t}} = \frac{10}{100} \frac{(35/\sqrt{3})^2}{4/3} = 0,1 \cdot \frac{35^2}{4} = 30,625\Omega = X_t.$$

Пошто је потребно прорачунати струју кроз примарни намотај, потребно је свести и еквивалентну реактансу пријемника ($2X_p$) на напонски ниво примара формираног монофазног трансформатора:

$$2X^p = 2X \cdot m_{1t}^2 = 2 \cdot \left(\frac{35}{10\sqrt{3}} \right)^2 = 8,167\Omega.$$

Еквивалентна реактанса на примарним прикључцима једнофазног трансформатора је :

$$X_e^p = X_{1t} + 2X^p = 30,625 + 8,167 = 38,79\Omega.$$

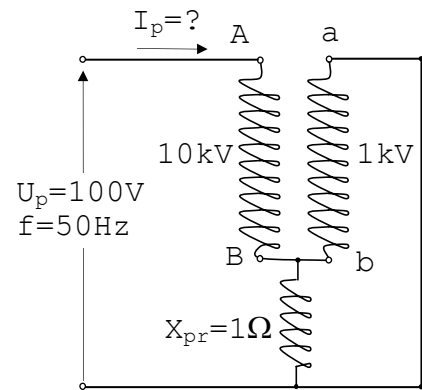
Струја кроз примарни намотај је:

$$I_A = \frac{U_{np}}{X_e^p} = \frac{35/\sqrt{3}}{38,79} = 0,521 \text{ kA}.$$

Струја у пријемнику је:

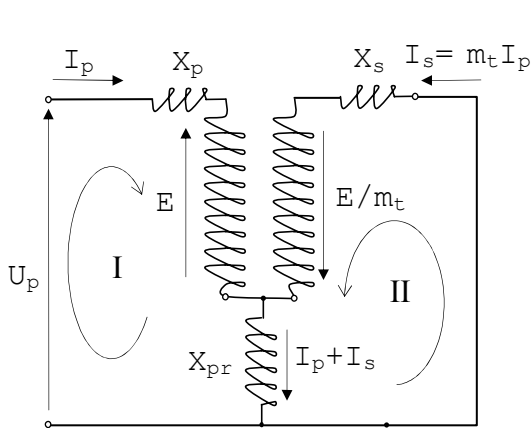
$$I_a = \frac{U_{ns}}{2X + X_{1t}^s} = I_A \cdot m_{1t} = 0,521 \cdot \left(\frac{35}{10\sqrt{3}} \right) = 1,053 \text{ kA}.$$

ЗАДАТАК 9: Монофазни трансформатор спреге "1" везан је као на слици. Параметри трансформатора су: $S_n=200 \text{ kVA}$; $m_t=10/1 \text{ (kV/kV)}$; $x_t=10\%$. Израчунати струју I_p . Сматрати да је реактанса магнећења бесконачна.



Решење:

Задатак се може решити користећи заменску шему са идеалним трансформатором.



I_p - Струја кроз примарни намотај,

I_s - Струја кроз секундарни намотај,

E - Индукована електромоторна сила у примарном намотају која потиче од заједничког флукса,

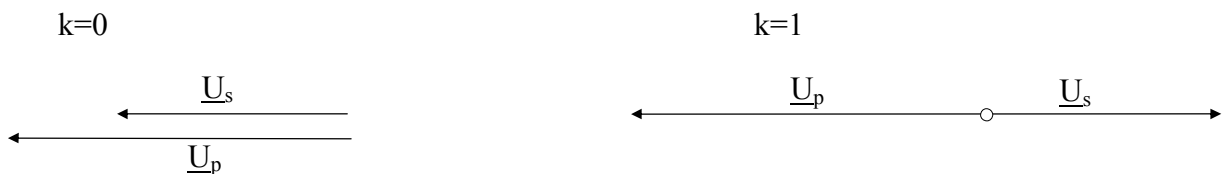
E/m_t - Индукована електромоторна сила у секундарном намотају која потиче од заједничког флукса,

X_p - Реактанса расипања примарног намотаја ,

X_s - Реактанса расипања секундарног намотаја.

Треба обратити пажњу на спрежни број трансформатора. Код монофазних трансформатора примарни и секундарни намотај обухватају исти флукс па фазори напона примара и секундара могу бити у фази или противфази. Дакле, могуће су само две комбинације, па комплексни преносни однос монофазних трансформатора има форму:

$\underline{m}_t = m_t e^{jk \cdot 180^\circ}$. С обзиром на форму комплексног преносног односа, код монофазних трансформатора могуће су две вредности спрежног броја, $k=0$ и $k=1$. Одговарајући фазорски дијаграми су приказани на слици.



На основу заменске шеме могу се написати следеће релације (за контуре I и II):

$$\begin{aligned} U_p &= X_p I_p + E + X_{pr} (1 + m_t) I_p \\ 0 &= X_s m_t I_s - E / m_t + X_{pr} (1 + m_t) I_p \end{aligned} \Rightarrow U_p = (X_p + m_t^2 X_s + (1 + m_t)^2 X_{pr}) I_p.$$

Треба напоменути да су претходне једначине писане као скаларне, јер у заменској шеми фигуришу само реактансе.

Уважавајући да је реактанса трансформатора сведена на примарну страну $X_t = X_p + m_t^2 X_s$, из претходне релације се може срачунати струја I_p :

$$I_p = \frac{U_p}{X_t + (1 + m_t)^2 X_{pr}}$$

Реактанса трансформатора сведена на примарну страну је:

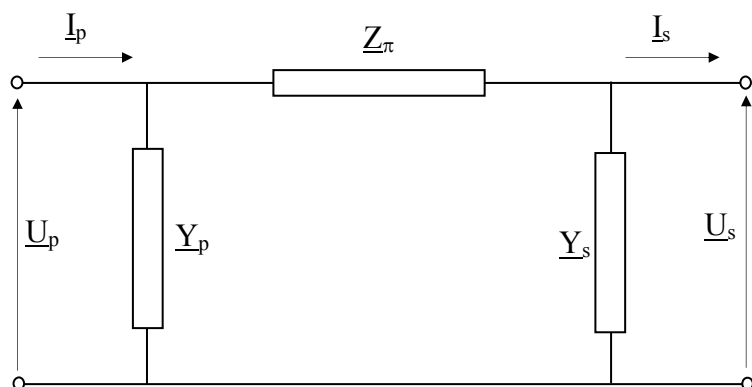
$$X_t = \frac{x_t(\%)}{100} \frac{U_{np}^2}{S_n} = \frac{10}{100} \frac{10^2}{0,2} = 50\Omega, \text{ па је } I_p = \frac{U_p}{X_t + (1 + m_t)^2 X_{pr}} = \frac{100}{50 + 1 \cdot (1 + 10)^2} = 0,585 A.$$

ЗАДАТАК 10: Трофазни енергетски трансформатор има следеће параметре: $S_n=63MVA$; $m_t=110/10$ (kV/kV); $X_t=11\%$; $R_t=1\%$; $Y_{\text{уб}}$; $X_{\mu}=20000\%$. Израчунати параметре еквивалентне "П" заменске шеме у којој се електричне величине не свде са једне на другу страну трансформатора.

Решење:

Трофазни енергетски трансформатор могуће је еквивалентирати пасивним четворокрајником ("П" шемом) само у случају када је $\underline{m}_t = \underline{m}_t^*$, односно када је комплексни преносни однос реалан број (види књигу стр.144 до146).

За спрегу $Y_{\text{уб}}$ комплексни преносни однос је $\underline{m}_t = -m_t$, па је могуће трансформатор представити пасивним четворокрајником, као на слици:



Параметри "П" еквивалентне шеме трансформатора су:

$$\underline{Z}_{\pi} = \frac{\underline{Z}_t}{m_t}; \quad \underline{Y}_p = \frac{1 - m_t}{\underline{Z}_t};$$

$$\underline{Y}_s = \frac{m_t^2 - m_t}{\underline{Z}_t} + m_t^2 \underline{Y}_t.$$

\underline{Z}_t и \underline{Y}_t су параметри еквивалентне "Г" шеме сведени на примарну страну.

Прорачун параметара еквивалентне "Г" шеме:

$$\underline{Z}_{\pi} = (R_p + jX_p); \quad \underline{Y}_p = \frac{1}{R_{fe}} - j \frac{1}{X_{\mu}} \approx -j \frac{1}{X_{\mu}};$$

$$R_p = \frac{r_t(\%) U_{np}^2}{100 S_{nt}} = \frac{1}{100} \frac{110^2}{63} = 1,92 \Omega,$$

$$X_p = \frac{x_t(\%) U_{np}^2}{100 S_{nt}} = \frac{11}{100} \frac{110^2}{63} = 21,12 \Omega,$$

$$X_{\mu} = \frac{x_{\mu}(\%) U_{np}^2}{100 S_{nt}} = \frac{20000}{100} \frac{110^2}{63} = 38412,7 \Omega$$

$$\underline{Z}_t = (1,92 + j21,12) \Omega; \quad \underline{Y}_t = -j2,6 \cdot 10^{-5} S.$$

Прорачун параметара еквивалентне "П" шеме:

У изразима за прорачун параметара еквивалентне "П" шеме скаларни преносни однос m_t је алгебарска величина. Пошто је задата спрега $Y_{\text{уб}}$, $m_t = -11$ (за спрге $Y_{\text{уб}}$ и $Dd0$ - m_t је позитиван број).

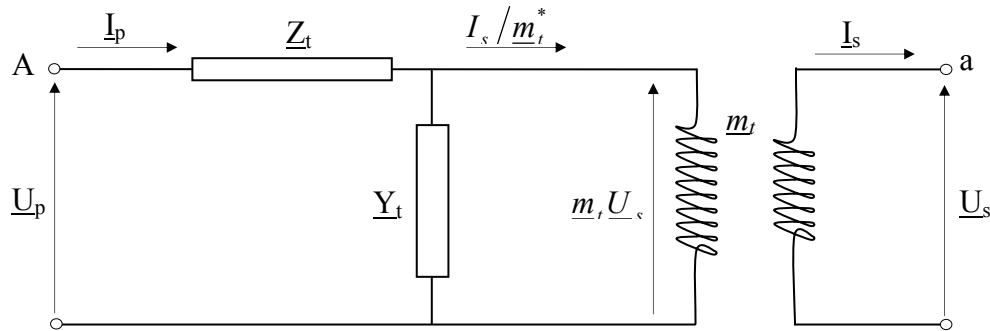
$$\underline{Z}_{\pi} = \frac{1,92 + j21,12}{-11} = (-0,1745 - j1,92) \Omega, \quad \underline{Y}_p = \frac{1 + 11}{1,92 + j21,12} = (0,051 - j0,563) S,$$

$$\underline{Y}_s = \frac{11^2 + 11}{1,92 + j21,12} + 11^2 (-j2,6 \cdot 10^{-5}) = (0,561 - j0,566) S.$$

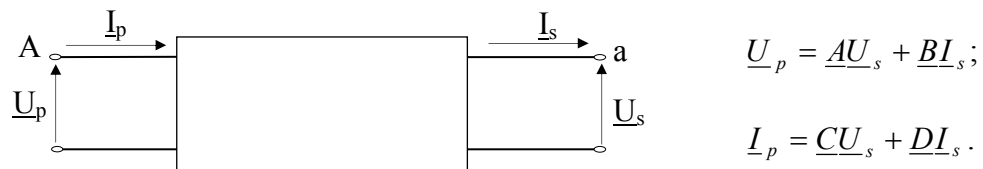
ЗАДАТАК 11: Написати једначине за четворокрајник са комплексним коефицијентима за енергетски трансформатор са следећим параметрима: $Yd5$; $S_n=20MVA$; $m_t=110/20$ (kV/kV); $x_t=10\%$; $x_\mu \rightarrow \infty$. Активне отпорности редне гране и губитке у гвожђу трансформатора занемарити.

Решење:

Да би се дошло до параметара четворокрајника којим се може моделовати трофазни трансформатор може се поћи од класичне обрнуте "Г" шеме трансформатора проширене одговарајућим идеалним трансформатором, као на слици.



Модел са слике се може посматрати као еквивалентни четворокрајник:



Једначине које повезују примарне и секундарне величине (напоне и струје), односно једначине четворокрајника, могу се написати на основу дате заменске шеме трансформатора:

$$\underline{U}_p = \underline{m}_t (1 + \underline{Z}_t \underline{Y}_t) \underline{U}_s + \frac{\underline{Z}_t}{\underline{m}_t^*} \underline{I}_s \qquad \underline{I}_p = \underline{m}_t \underline{Y}_t \underline{U}_s + \frac{1}{\underline{m}_t^*} \underline{I}_s.$$

Комплексни преносни однос трансформатора је: $\underline{m}_t = \frac{\underline{U}_{np}}{\underline{U}_{ns}} = m_t e^{jk30^\circ} = \frac{110}{20} e^{j5.30^\circ} = 5,5 e^{j150^\circ}$.

Параметри обрнуте "Г" шеме трансформатора сведени на примарну страну су:

Редна реактанса трансформатора: $X_p = \frac{x_t(\%) U_{np}^2}{100 S_n} = \frac{10}{100} \frac{110^2}{20} = 60,5\Omega$.

Редна импеданса трансформатора: $\underline{Z}_t = R_t + jX_t \approx jX_t = j60,5\Omega$.

Оточна адмитанса трансформатора: $\underline{Y}_t = G_{Fe} - jB_\mu \approx 0$ ($x_\mu, R_{Fe} \rightarrow \infty$).

Једначине четворокрајника за анализирани трансформатор су:

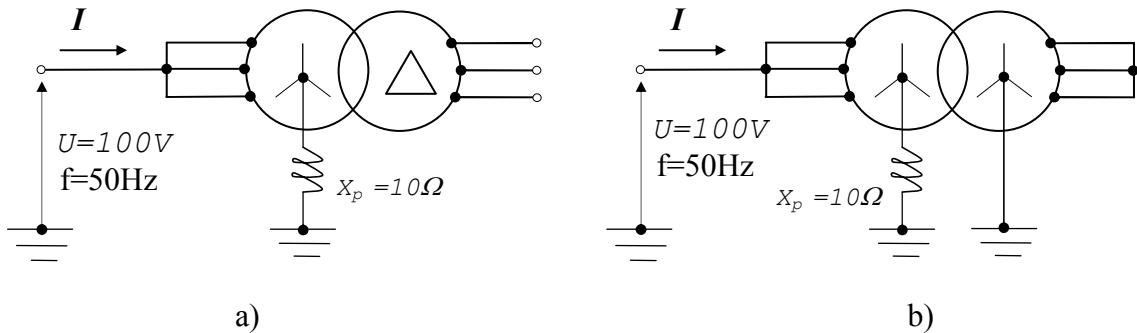
$$\underline{U}_p = \underline{A}\underline{U}_s + \underline{B}\underline{I}_s = \underline{m}_t (1 + \underline{Z}_t \underline{Y}_t) \underline{U}_s + \frac{\underline{Z}_t}{\underline{m}_t^*} \underline{I}_s = 5,5 e^{j150^\circ} \underline{U}_s + 11 e^{-j120^\circ} \underline{I}_s$$

$$\underline{I}_p = \underline{C}\underline{U}_s + \underline{D}\underline{I}_s = \underline{m}_t \underline{Y}_t \underline{U}_s + \frac{1}{\underline{m}_t^*} \underline{I}_s = 0,1818 e^{j150^\circ} \underline{I}_s.$$

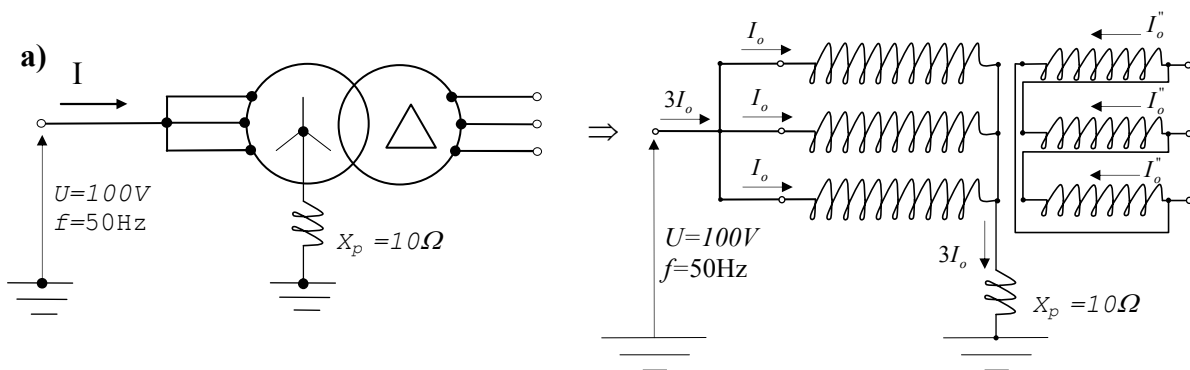
Четворокрајник се не може реализовати пасивним елементима јер није задовољен услов:

$$\underline{A}\underline{D} - \underline{B}\underline{C} = 1 \quad (5,5 e^{j150^\circ} \cdot \frac{1}{5,5} e^{j150^\circ} = e^{j300^\circ} \neq 1).$$

ЗАДАТАК 12: Енергетски трофазни тростубни трансформатори са параметрима: $S_n=31,5 \text{ MVA}$; $m_t=110/35 \text{ (kV/kV)}$; $x_l=10\%$; $x_{\mu 0}=200\%$; *sprega Yd u Yu*; везани су као на сликама а) и б). У оба случаја спољашњи напон везан је са примарне стране. Израчунати струју I занемарујући активне отпорности у колу.

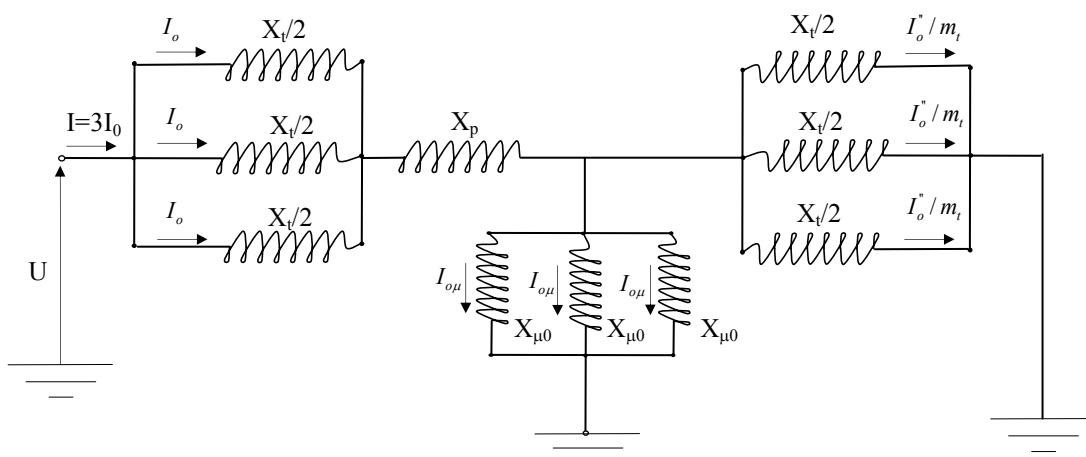


Решење:



Анализом струја у троуглу секундера може се констатовати да троугао чини затворено коло из којег нулте струје не излазе, односно троугао представља "кратак спој" за нулте струје.

Еквивалентна трополна заменска шема датог трансформатора представљена је на следећој слици:



При цртању шеме уважена је претпоставка да су реактансе расипања примара и секундера сведена на примарну страну бројно једнаке.

На основу дате заменске шеме може се израчунати струја I . Прорачун се може вршити са ефективним вредностима струја и напона јер су уважене само реактансе.

Прорачун параметара нулте заменске шеме трансформатора потребно је спровести на напонском нивоу примара јер је потребно израчунати струју у примарним прикључцима трансформатора.

$$\text{Импеданса расипања трансформатора: } X_t = \frac{x_t (\%) U_{np}^2}{100 S_n} = \frac{10 \cdot 110^2}{100 \cdot 31,5} = 38,41 \Omega.$$

$$\text{Нулта импеданса магнећења: } X_{\mu 0} = \frac{x_{\mu 0} (\%) U_{np}^2}{100 S_n} = \frac{200 \cdot 110^2}{100 \cdot 31,5} = 20 \cdot X_t = 768,2 \Omega.$$

Улазна импеданса на прикључцима напона U :

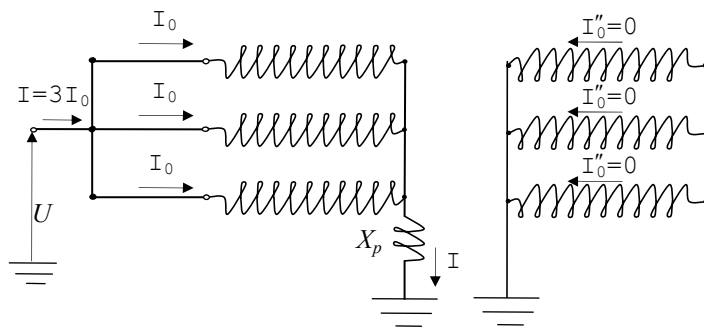
$$X_{ul} = \frac{X_t}{6} + X_p + \frac{(X_t / 6)(X_{\mu 0} / 3)}{X_t / 6 + X_{\mu 0} / 3} = \frac{X_t}{6} \left(1 + \frac{X_{\mu 0}}{X_{\mu 0} + X_t / 2}\right) + X_p$$

$$X_{ul} = \frac{38,41}{6} \left(1 + \frac{768,2}{38,41 / 2 + 768,2}\right) + 10 = 22,65 \Omega$$

Прорачун струје I :

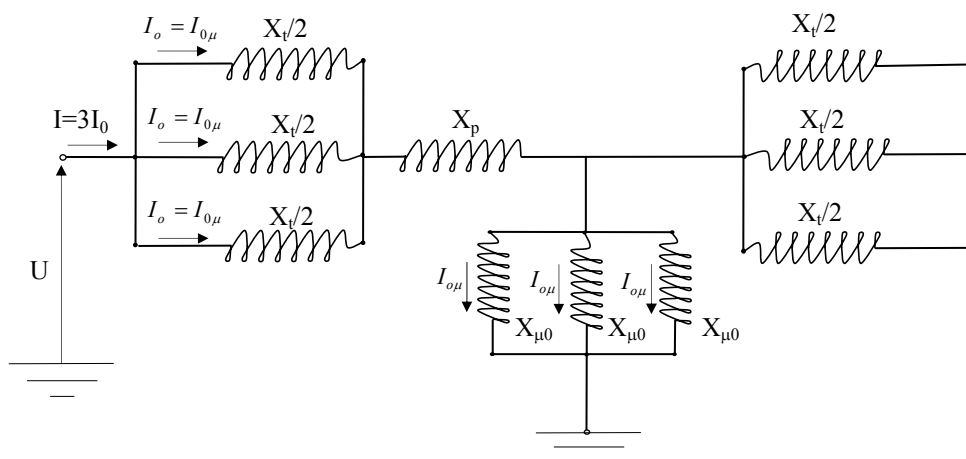
$$I = \frac{U}{X_{ul}} = \frac{100}{22,65} = 4,42 A.$$

b)



У овом случају постоји магнећење трансформатора јер је примарни намот уземљен (преко пригушнице), па постоји физичка могућност да се струја магнећења у примарном намоту успостави.

Пошто постоји магнећење, постоје (индукују се) и нулти напони у секундарним намотајима ($U_o'' = \frac{U}{m_t}$), али они не могу успоставити струје у секундарним намотајима јер је секундарно коло према земљи отворено. Дакле, утицај секундара на струје примара у овом случају не постоји, односно у примарним намотајима постоје само нулте струје магнећења I_0 . Еквивалентна трополна заменска шема дата је на слици.



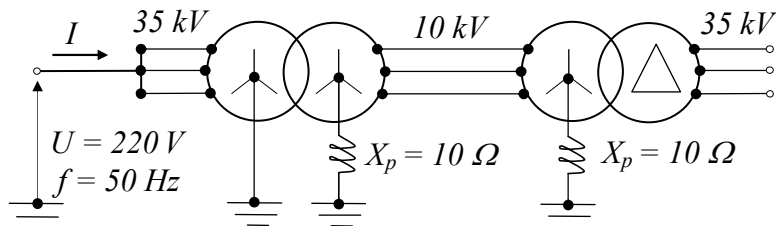
Улазна импеданса у овом случају је:

$$X_{ul} = \frac{X_t}{6} + X_p + \frac{X_{\mu 0}}{6} = \frac{38,41}{6} + 10 + \frac{768,2}{3} = 272,47 \Omega$$

Прорачун струје I :

$$I = 3I_o = \frac{U}{X_{ul}} = \frac{100}{272,47} = 0,367 \text{ A.}$$

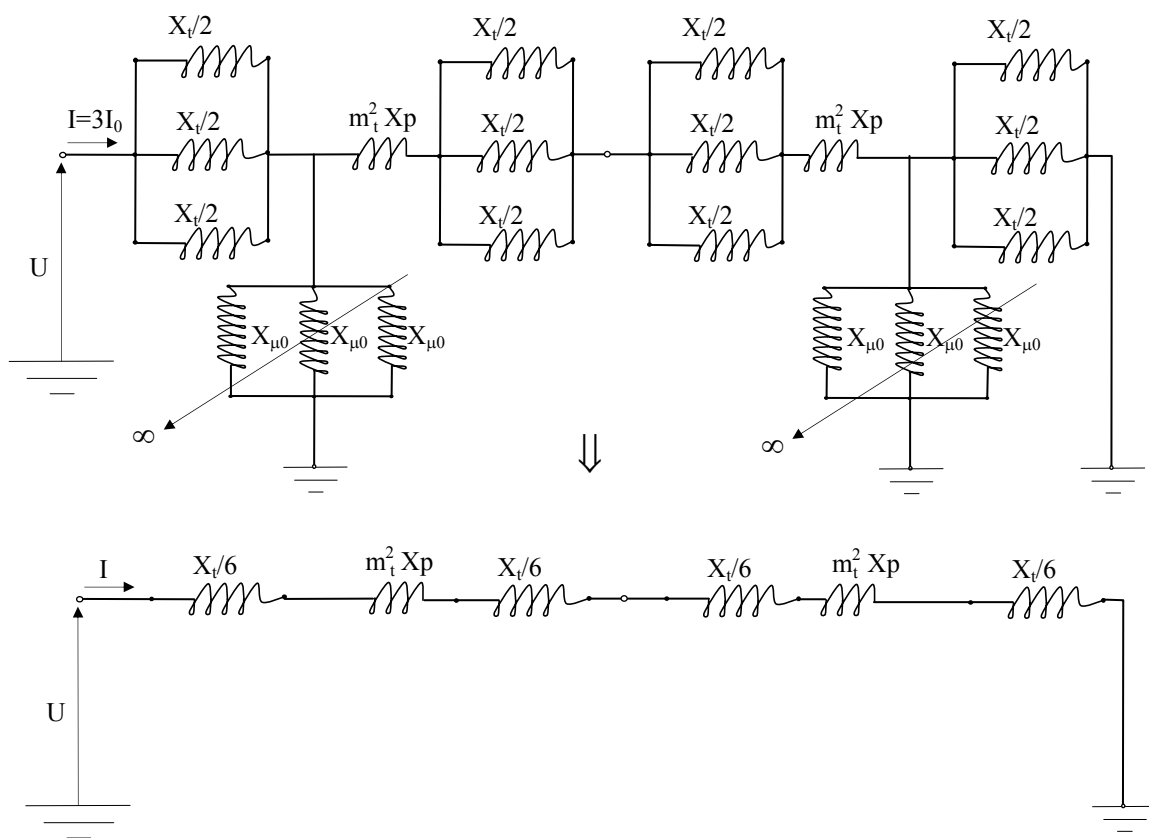
ЗАДАТАК 13: Два трофазна енергетска трансформатора, истих параметара а различитих спрега, везана су као на слици. Параметри трансформатора су: $S_n = 10 \text{ MVA}$, $m_t = 35/10 \text{ (kV/kV)}$, $x_t = 10\%$, $x_{\mu 0} \rightarrow \infty$. Израчунати струју I . Све активне отпорности занемарити.



Решење:

Да би прорачунали струју I потребно је да све реактансе сведемо на напонски ниво 35 kV , односно на место прикључења напона U . Реактансе трансформатора спреге Ду прво се сведе на напонски ниво 10 kV а затим на вишенпонску страну трансформатора Уу. Пошто су у овом примеру преносни односи трансформатора исти, практично се у једном кораку импедансе сведе на вишенпонску страну трансформатора спреге Уу.

Трополна еквивалентна заменска шема:



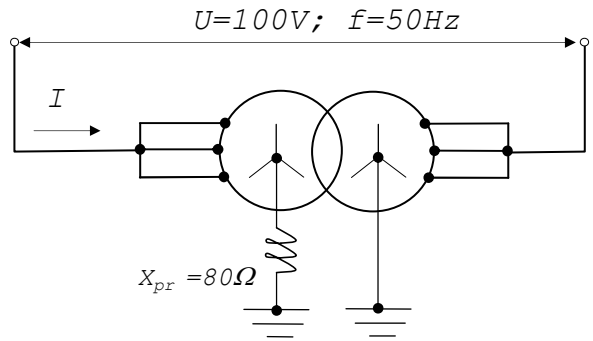
Прорачун улазне импедансе на месту прикључења напона:

$$X_t = \frac{x_t (\%) U_{np}^2}{100 S_n} = \frac{10 \cdot 35^2}{100 \cdot 10} = 12,25 \Omega. \quad X_{ul} = \frac{2}{3} X_t + 2m_t^2 X_p$$

$$X_{ul} = \frac{2}{3} 12,25 + 2 \cdot \left(\frac{35}{10}\right)^2 10 = 253,17 \Omega, \quad I = \frac{U}{X_{ul}} = \frac{220}{253,17} = 0,869 \text{ A}.$$

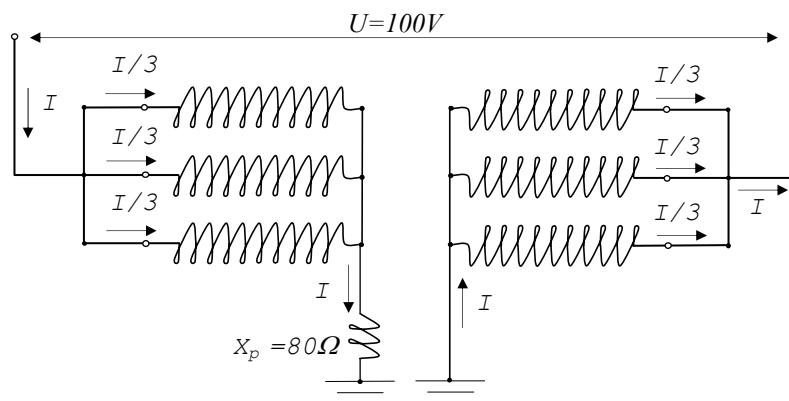
ЗАДАТАК 14: Трофазни тростубни трансформатор везан је као на слици на монофазни напон $U=100\text{ V}$, $f=50\text{ Hz}$.

Израчунати струју I . Параметри трансформатора су: $Yy0$; $S_n=100\text{ MVA}$; $m_t=35/10\text{ (kV/kV)}$; $x_t=10\%$. $x_{\mu 0}=200\%$.

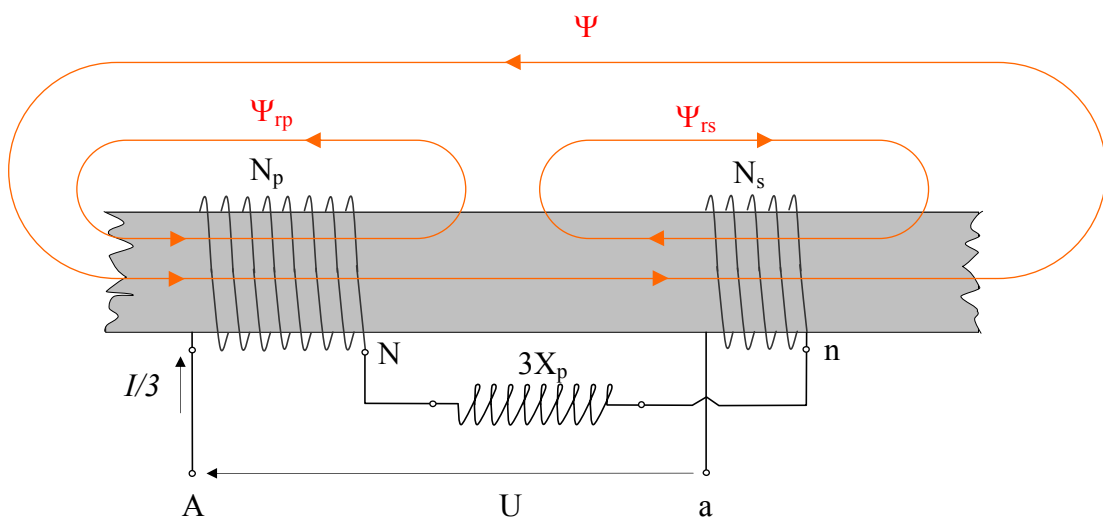


Решење:

У овом случају, уважавајући претпоставку да је трансформатор и у електричном и у магнетском погледу симетричан елемент, кроз све фазне намотаје (и примара и секундара) протичу исте струје ($I/3$).



Дакле, режими у свим стубовима (језгрима) магнетног кола и одговарајућим намотајима на њима су исти па се може анализирати само један стуб и њему припадајући пар намотаја (примарни и секундарни), као на слици.



С обзиром на спрегу $Yy0$, струја $I/3$ ће стварати у примарном и секундарном намотају магнетопобудне силе супротног смера, што се може закључити са слике.

Пошто кроз све намотаје протичу једновремене струје, флуksеви у стубовима трансформатора су такође једновремени, па се укупни флуks (троструки флуks Ψ) затвара кроз немагнетну средину (уље и казан трансформатора), односно као и флуks при напајању трансформатора нултим системом напона. Из тог разлога је у овом прорачуну меродавна нулта магнетска отпорност.

Пошто флуks Ψ ствара редна веза примарног и секундарног намотаја, индуктивност магнећења у датом режиму је:

$$L'_{0\mu} = \frac{(N_p - N_s)^2}{\Lambda_0} = \frac{N_p^2(1 - 1/m_t)^2}{\Lambda_0} = L_{0\mu}(1 - 1/m_t)^2,$$

где су:

L_0 – нулта магнетска отпорност (представља магнетску отпорност средине кроз коју се затвара заједнички флуks којег стварају нулте струје у примарном и одговарајућем секундарном намотају),

$L_{0\mu}$ – индуктивност магнећења када је трансформатор побуђен само са примарне стране нултим системом напона (нулта индуктивност магнећења).

На основу претходне анализе може се закључити да струју $I/3$ ограничава еквивалентна реактанса X_e :

$$X_e = X_{rp} + X_{rs} + X'_{0\mu} + 3X_{pr}.$$

Реактансу расипања секундара X_{rs} не треба сводити на примарну страну јер и кроз секундар и кроз примар протиче иста струја, заправо овако везан трансформатор ради као пригушница са два редно везана сета намотаја на истом језгру. Дакле, све реактансе треба срачунати на сопственом напонском ниво (њихове природне вредности).

Прорачун реактанси:

$$X_{rp} = \frac{x_{rp}(\%) U_{np}^2}{100 S_n} \cong \frac{x_t(\%)/2 U_{np}^2}{100 S_n} = \frac{5 \cdot 35^2}{100 \cdot 10} = 6,125 \Omega;$$

$$X_{rs} = \frac{x_{rs}(\%) U_{ns}^2}{100 S_n} \cong \frac{x_t(\%)/2 U_{ns}^2}{100 S_n} = \frac{5 \cdot 10^2}{100 \cdot 10} = 0,5 \Omega;$$

$$X'_{0\mu} = \frac{x_{0\mu}(\%) U_{np}^2}{100 S_n} (1 - 1/m_t)^2 = \frac{200 \cdot 35^2}{100 \cdot 10} (1 - 10/35)^2 = 125 \Omega;$$

$$X_e = X_{rp} + X_{rs} + X'_{0\mu} + 3X_{pr} = 6,125 + 0,5 + 125 + 3 \cdot 80 = 371,625 \Omega.$$

У прорачуну је претпостављено да су процентуалне реактансе примара и секундара једнаке.

Прорачун струје I :

$$I = 3 \cdot I/3 = 3 \frac{U}{X_e} = 3 \frac{100}{371,625} = 3 \cdot 0,27 = 0,807 \text{ A}.$$

ЗАДАТАК 15: Израчунати параметре тронамотног трансформатора чији су подаци: номинална снага $S_n = 20 \text{ MVA}$; појединачне номиналне снаге намота:

$$S_{np} = S_n, S_{ns} = \frac{2}{3}S_n, S_{nt} = \frac{2}{3}S_n; \text{ преносни однос } m_t = 110/38,5/10,5 \text{ (kV / kV / kV)}$$

процентуалне вредности напона кратких спојева: $u_{kps} = 17\%$, $u_{kpt} = 10,5\%$, $u_{k23} = 6\%$; максимални губици у баку трансформатора (при номиналном опеређењу примарног намота): $\Delta P_{cu\max} = 0,148 \text{ MW}$; номинални губици у гвожђу трансформатора: $\Delta P_{fe} = 0,075 \text{ MW}$; процентуална вредност струје празног хода: $I_0 = 3,5\%$.

Параметре срачунати на напонском нивоу 110 kV и нацртати одговарајућу заменску шему.

Решење:

Код тронамотног трансформатора могући су различити радни режими при којима је он оптерећен номиналном снагом (у зависности како је та снага дистрибуирана по намотима). За конкретан трансформатор дат је податак о максималним губицима у баку, при номиналном оптерећењу примара. Максимални губици у баку су познати за режим када је примар оптерећен одговарајућом номиналном снагом а секундар и терцијер "деле" ту снагу у таквом односу да губици буду максимални.

Да би се извеле једначине за губитке по намотима потребно је израчунати омске отпорности фазних намотаја (R_p , R_s и R_t) у сваком од намота. Енергетски трансформатори се пројектују тако да су густине струја при називним снагама практично једнаке ($J_p \approx J_s \approx J_t$). На основу тог закључка може се спровести следећи рачун:

$$\begin{aligned} R_p &= \rho \frac{l_p}{S_p} = \rho \frac{N_p l'}{S_p}, & \rho & \text{ - специфична отпорност бабра,} \\ & & l_p, l_s, l_t & \text{ - укупне дужине фазних намотаја примара,} \\ R_s &= \rho \frac{l_s}{S_s} = \rho \frac{N_s l'}{S_s}, & & \text{ секундара и терцијера, респективно.} \\ R_t &= \rho \frac{l_t}{S_t} = \rho \frac{N_t l'}{S_t}. & S_p, S_s, S_t & \text{ - површине попречних пресека} \\ & & & \text{ одговарајућих намотаја,} \\ & & l' & \text{ - средња дужина једног навојка (претпоставка је да} \\ & & & \text{ су средње дужине навојка исте за све намоте).} \end{aligned}$$

$$\frac{R_p}{R_s} = \frac{N_p}{N_s} \frac{S_s}{S_p} = m_{ps} \frac{I_{ns}/J_{ns}}{I_{np}/J_{np}} \approx m_{ps} \frac{I_{ns}}{I_{np}} = m_{ps} \frac{\sqrt{3}U_{np}}{\sqrt{3}U_{np}} \frac{I_{ns}}{I_{np}} = m_{ps} \frac{\sqrt{3}m_{ps}U_{ns}}{\sqrt{3}U_{np}} \frac{I_{ns}}{I_{np}} = m_{ps}^2 \frac{S_{ns}}{S_{np}},$$

односно, $\frac{R_p}{R_{sp}} \approx \frac{S_{ns}}{S_{np}}$, где је R_{sp} омска отпорност секундара сведена на примарну страну.

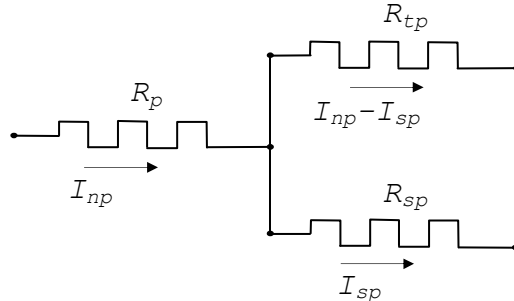
Аналогним рачуном може се извести следећа једнакост: $\frac{R_p}{R_{tp}} \approx \frac{S_{nt}}{S_{np}}$, где је R_{tp} омска отпорност терцијера сведена на примарну страну.

У претходним једначинама ради једноставности је претпостављено да су спреге намота истоимене али се до истог закључка може доћи и за различите спреге, односно претходне релације важе независно од спреге.

За дати трансформатор на основу претходних закључака важи:

$$R_{sp} = R_{tp} = 1,5R_p.$$

С обзиром да су у претходним релацијама све отпорности сведене на исти напонски ниво може се нацртати заменска шема која је меродавна за прорачун губитака у бакру.



Укупни трофазни губици у бакру трансформатора при номиналном оптерећењу примара су:

$$\Delta P_{cu} = 3R_p I_{np}^2 + 3 \cdot 1,5R_p I_{sp}^2 + 3 \cdot 1,5R_p (I_{np} - I_{sp})^2.$$

Максимални губици у бакру имају се при пуном оптерећењу једног од намотаја (нпр. секундера), док други намотај (терцијер) преузима део снаге до номиналног оптерећења, односно:

$$\Delta P_{cu \max} = 3R_p I_{np}^2 + 3 \cdot 1,5R_p \left(\frac{2}{3} I_{np}\right)^2 + 3 \cdot 1,5R_p \left(\frac{1}{3} I_{np}\right)^2 = 3R_p I_{np}^2 \left(1 + 1,5 \frac{4}{9} + 1,5 \frac{1}{9}\right) = 5,5R_p I_{np}^2$$

$$R_p = \frac{\Delta P_{cu \max}}{5,5 I_{np}^2} = \frac{\Delta P_{cu \max}}{5,5 \left(\frac{S_{np}}{\sqrt{3}U_{np}}\right)^2} = \frac{0,148 \cdot 10^6}{5,5 \cdot \left(\frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3}\right)^2} = 2,442 \Omega,$$

$$R_{sp} = R_{tp} = 1,5R_p = 1,5 \cdot 2,442 = 3,663 \Omega.$$

Прорачун реактанси расипања трансформатора:

$$X_{ps} = \frac{x_{ps} (\%) U_{np}^2}{100 S_n} \approx \frac{u_{kps} (\%) U_{np}^2}{100 S_n} = \frac{17}{100} \frac{110}{20} = 102,85 \Omega,$$

$$X_{pt} = \frac{x_{pt} (\%) U_{np}^2}{100 S_n} \approx \frac{u_{kpt} (\%) U_{np}^2}{100 S_n} = \frac{10,5}{100} \frac{110}{20} = 63,525 \Omega,$$

$$X_{st} = \frac{x_{st} (\%) U_{np}^2}{100 S_n} \approx \frac{u_{kst} (\%) U_{np}^2}{100 S_n} = \frac{6}{100} \frac{110}{20} = 36,3 \Omega,$$

При свођењу реактански расипања трансформатора потребно је дефинисати у односу на коју базу снагу и напон су задате процентуалне реактансе (или напони кратких спојева) појединих парова намота. Уколико нису експлицитно задати ови подаци (као што је случај у овом задатку) подразумева се да су процентуалне вредности реактански за

парове намота задате у односу на примарну снагу и напон. Код задавања губитака у бакру мора се експлицитно навести са којом струјом су вршена мерења и на основу тога вршити прорачун активних отпорности у заменским шемама.

Прорачун параметара еквивалентне "Т" шеме тронамотног трансформатора:

$$X_p = \frac{1}{2}(X_{ps} + X_{pt} - X_{st}) = \frac{1}{2}(102,85 + 63,525 - 36,3) = 65,037 \Omega,$$

$$X_s = \frac{1}{2}(X_{ps} + X_{st} - X_{pt}) = \frac{1}{2}(102,85 - 63,525 + 36,3) = 37,81 \Omega,$$

$$X_t = \frac{1}{2}(X_{pt} + X_{st} - X_{ps}) = \frac{1}{2}(63,525 + 36,3 - 102,85) = -1,513 \Omega,$$

Прорачунате реактансе, које фигуришу у заменској "Т" шеми тронамотног трансформатора, су математички а не физички еквивалент, јер се појам расипања флукса може дефинисати само за један пар намотаја. Односно, ако део флукса примарног намотаја не обухвата терцијерни а обухвата секундарни, онда је овај флукс заједнички за примар и секундар а расути у односу на терцијер. Из тог разлога се у заменској шеми могу појавити негативне реактансе расипања.

Прорачун параметара оточне гране у еквивалентној шеми:

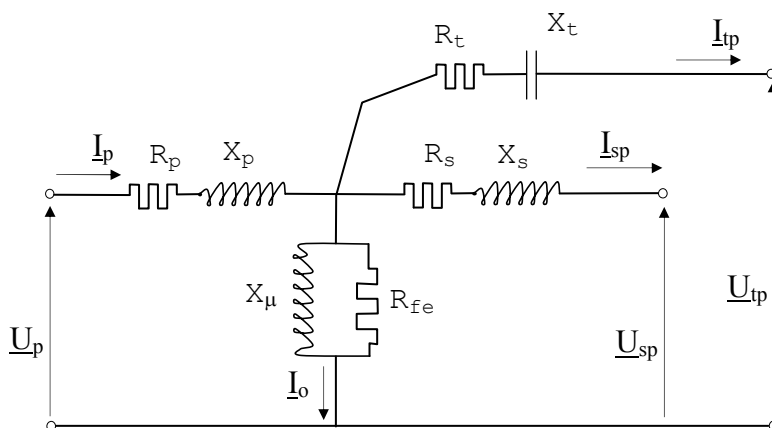
$$R_{fe} = \frac{U_{np}^2}{\Delta P_{fe}} = \frac{110^2}{0,075} = 161333,3 \Omega,$$

$$G_{fe} = \frac{1}{R_{fe}} = \frac{1}{161333,3} = 6,2 \cdot 10^{-6} S$$

$$X_\mu = \frac{100}{I_0(\%)} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{100}{3,5} \frac{110^2}{20} = 17285,7 \Omega,$$

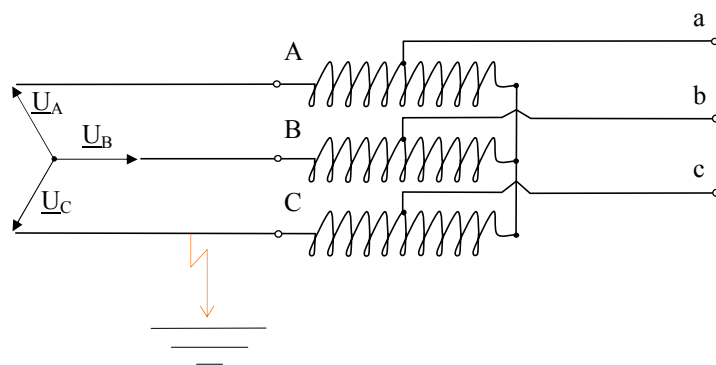
$$B_\mu = \frac{1}{X_\mu} = \frac{1}{17285,7} = 5,785 \cdot 10^{-5} S.$$

Једнополна заменска "Т" шема трансформатора са параметрима сведеним на примарну страну је приказана на слици:



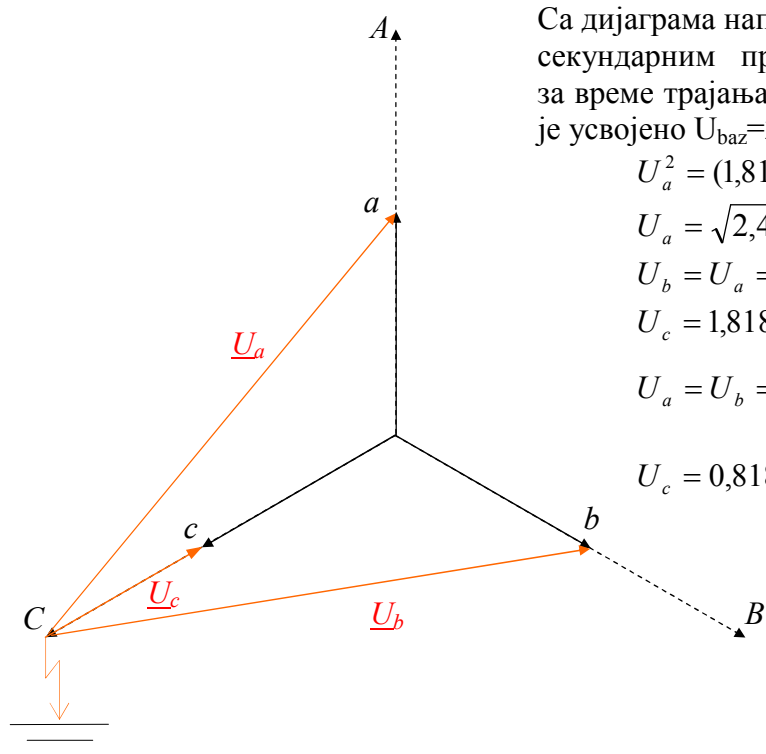
ЗАДАТАК 16: Одредити вредности фазних напона на секундарној страни аутотрансформатора спреге $Yy0$ ако му звездиште није уземљено, при земљоспоју фазе C на примарној страни. Преносни однос аутотрансформатора је $m_t=400/220$ (kV/kV). Пре настанка земљоспоја напони на прикључцима аутотрансформатора имали су номиналну вредност.

Решење:



Пре настанка земљоспоја звездишта аутотрансформатора и напојне мреже су била на нултом потенцијалу (уз претпоставку да је систем напона у мрежи био идеално симетричан). Након настанка земљоспоја у примарној мрежи, потенцијал звездишта "скаче" на фазни напон примарне мреже.

Задатак је најлакше решити на основу фазорског дијаграма напона за случај земљоспоја.



Са дијаграма напона могу се израчунати напони на секундарним прикључцима аутотрансформатора за време трајања земљоспоја фазе C (у прорачуну је усвојено $U_{baz}=220$ kV):

$$U_a^2 = (1,818 \cdot \cos 30^\circ)^2 + (1 + 1,818 \cdot \sin 30^\circ)^2$$

$$U_a = \sqrt{2,479 + 3,645} = 2,475 \text{ r.j.}$$

$$U_b = U_a = 2,475 \text{ r.j.}$$

$$U_c = 1,818 - 1 = 0,818 \text{ r.j.}$$

$$U_a = U_b = 2,475 \cdot \frac{220}{\sqrt{3}} = 314,32 \text{ kV}$$

$$U_c = 0,818 \cdot \frac{220}{\sqrt{3}} = 103,9 \text{ kV}$$

У току трајања земљоспоја, на примарној страни аутотрансформатора, напони према земљи на прикључцима секундара би се вишеструко повећали, па је рад интерконективног аутотрансформатора са изолованим звездиштем недозвољен.