

ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13Е013ЕНТ)

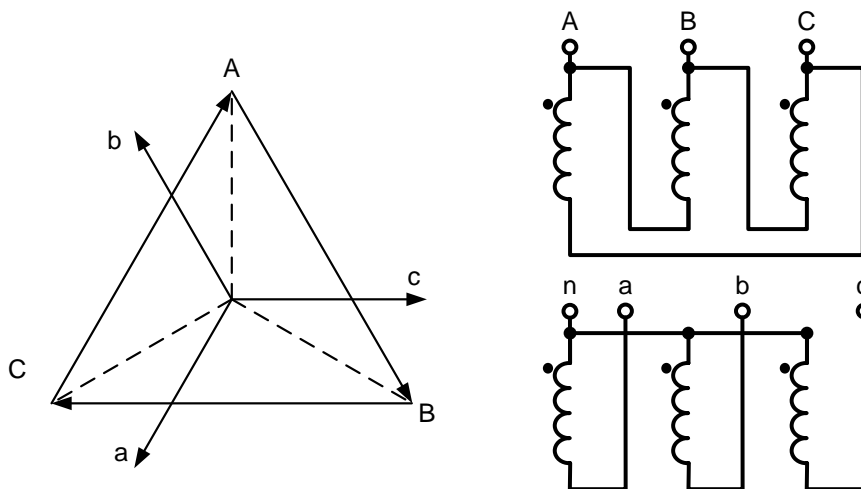
Јул 2019.

Трофазни уљни енергетски трансформатор са номиналним подацима: $S_n = 400 \text{ kVA}$, $U_{1n}/U_{02} = 20/0.4 \text{ kV}$, 50 Hz , спрега Dyn7. Напон кратког споја датог трансформатора је $u_k = 4\%$. Губици у огледу кратког споја при номиналној струји и радној температури од 75°C износе $P_{kn} = 4500 \text{ W}$. У огледу празног хода при номиналном напону измерено је: $P_0 = 930 \text{ W}$, $I_0 = 23 \text{ A}$.

1. Нацртати шему веза и векторски дијаграм напона задатог трансформатора представљајући намотаје као калемове.(7)
2. Израчунати параметре еквивалентног кола на НН страни и скицирати шему са уписаним бројним вредностима свих параметара и електричних величина.(10)
3. Одредити Филдов сачинилац намотаја при учестаности 50 Hz и радној температури од 75°C , ако губици кратког споја при учестаности од 60 Hz , номиналној ефективној вредности струје и температури од 20°C износе $P_{k60} = 3900 \text{ W}$(12)
4. Дати трансформатор ради при номиналном напону и 50% номиналног оптерећења током веома дугог времена. Колико дуго се може дозволити преоптерећење трансформатора од 120% до кога долази које наступа након наведеног устаљеног топлотног режима тако да не дође до прекорачења 90% вредности максимално дозвољеног пораста температуре ($\theta_{gu n}$)? Резултат изразити у функцији познате временске константе загревања трансформатора τ . На загревање уља применити линеарни модел са једном временском константом. Занемарити промену отпорности намотаја са температуром.(11)
5. Написати изразе (систем једначина) чијим се решавањем може доћи до фазног става струје на секундару (ефективна вредност струје износи 70% номиналне), при којој је напон на прикључцима примара сведен на секундар једнак напону на прикључцима секундара. Изразе написати без икаквих занемаривања у заменској шеми трансформатора.(12)
6. Дати график на коме су приказани: расподела потенцијала у области чела пренапонског таласа, расподела потенцијала на крају пренапонског таласа и границе осцилације потенцијала у времену, у зависности од позиције дуж висине намотаја на чији један крај наилази пренапонски талас, док је други крај уземљен. Скице дати за две вредности коефицијента који карактерише однос серијских и паралелних капацитета (α_1 и α_2), при чему је $\alpha_1 \approx 3 \alpha_2$(12)
7. Извести израз за силу која делује управно на пресек проводника и излаже га напрезању на кидање, полазећи од познате вредности укупне силе која делује по обиму навојка пречника D_m : $F_r = \frac{1}{2} \left(\frac{N I_{k, max}}{h} \right)^2 \mu_0 \pi D_m h \left(k_R - \frac{\delta'}{\pi h} \right)$(12)
8. Дати трансформатор се користи за напајање једнофазног резистивног потрошача отпорности 2Ω који је прикључен између фазе a и неутралног проводника n секундара. Примар је напајан симетричним трофазним системом напона номиналне вредности, директног редоследа. Одредити фазне и линијске струје примара и секундара у овом режиму.(12)
9. Паралелно задатом трансформатору прикључује се трансформатор спреге Y_{ub} , исте номиналне снаге и преносног односа, напона кратког споја 5% . Одредити ефективне вредности фазних струја секундара ових трансформатора у режиму празног хода. Усвојити да је за оба трансформатора $x_k = u_k$ (занемарити отпорности намотаја).(12)

Испит траје 180 минута. Дозвољено је поседовање само једне свеске за рад и концепт. Прецртати оно што није за преглед.

1.



2. ПХ (изведен са нисконапонске стране):

$$R_a'' = \frac{U_{2nf}^2}{P_0/3} = \frac{(400/\sqrt{3})^2}{310} = 172 \Omega \Rightarrow I_{af}'' = \frac{U_{2nf}}{R_a''} = 1.342 \text{ A}$$

$$I_{\mu f}'' = \sqrt{I_{0f}''^2 - I_{af}''^2} = \sqrt{23^2 - 1.342^2} = 22.96 \text{ A}$$

$$X_{\mu}'' = \frac{U_{2nf}}{I_{\mu f}''} = \frac{400/\sqrt{3}}{22.96} = 10.06 \Omega$$

КС:

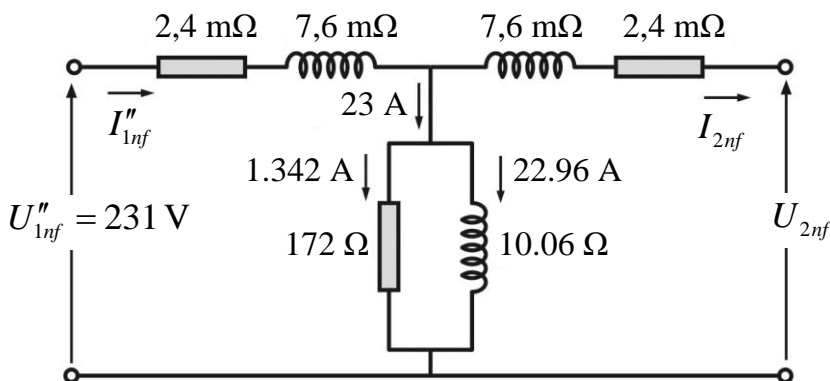
$$R_k'' = \frac{P_{kn}}{3I_{2nf}^2} = \frac{4500}{3 \cdot 577.4^2} = 4.50 \text{ m}\Omega \Rightarrow R_1'' \approx R_2'' \approx \frac{R_k''}{2} = 2.25 \text{ m}\Omega$$

$$U_{kf} = 0.04 \cdot 400 / \sqrt{3} = 9.24 \text{ V (фазна вредност напона кратког споја са ВН стране)}$$

$$Z_k'' = \frac{U_{kf}}{I_{2nf}} = 16 \text{ m}\Omega$$

$$X_k'' = \sqrt{Z_k''^2 - R_k''^2} = 15.4 \text{ m}\Omega \Rightarrow X_{\sigma 1}'' \approx X_{\sigma 2}'' \approx \frac{X_k''}{2} = 7.67 \text{ m}\Omega$$

Заменска шема са параметрима и величинама сведеним на НН страну:



3. Губици кратког споја при датој учестаности и температури намотаја могу се изразити као сума Цулових губитака и додатних губитака:

$$P_k(\vartheta, f) = P_j(\vartheta) + P_d(\vartheta, f) = P_j(\vartheta) \cdot (1 + \Delta k_F(\vartheta, f))$$

при чему се зависност Џулових и додатних губитака од температуре и учестаности (при константној ефективној вредности струје) може изразити на следећи начин:

$$\frac{P_j(\vartheta_2)}{P_j(\vartheta_1)} = \frac{\rho(\vartheta_2)}{\rho(\vartheta_1)} = \frac{235 + \vartheta_2}{235 + \vartheta_1}$$

$$\frac{P_d(\vartheta_2, f_2)}{P_d(\vartheta_1, f_1)} = \frac{\Delta k_F(\vartheta_2, f_2) \cdot P_j(\vartheta_2)}{\Delta k_F(\vartheta_2, f_2) \cdot P_j(\vartheta_2)} = \left(\frac{\rho(\vartheta_1)}{\rho(\vartheta_2)} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \cdot \frac{\rho(\vartheta_2)}{\rho(\vartheta_1)} = \frac{235 + \vartheta_1}{235 + \vartheta_2} \cdot \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2$$

На основу датих израза, може се одредити однос Џулових и додатних губитака при номиналној температури и учестаности и при температури од 20°C и учестаности 60 Hz:

$$\frac{P_j^{60\text{Hz}}}{P_j^{50\text{Hz}}} = \frac{235 + 20}{235 + 75} = 0.8226$$

$$\frac{P_d^{60\text{Hz}}}{P_d^{50\text{Hz}}} = \frac{235 + 75}{235 + 20} \cdot \left(\frac{60}{50} \right)^2 = 1.7506$$

Сада се, на основу познатих вредности укупних губитака кратког споја у ова два случаја, има да је:

$$\left. \begin{aligned} P_j^{50\text{Hz}} + P_d^{50\text{Hz}} &= 4500 \text{ W} \\ P_j^{60\text{Hz}} + P_d^{60\text{Hz}} &= 0.8226 \cdot P_j^{50\text{Hz}} + 1.7506 \cdot P_d^{50\text{Hz}} = 3900 \text{ W} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} P_j^{50\text{Hz}} &= 4286 \text{ W} \\ P_d^{50\text{Hz}} &= 214 \text{ W} \end{aligned}$$

Коначно, на основу познатих вредности Џулових и додатних губитака при учестаности 50 Hz:

$$k_F(50 \text{ Hz}, 75^\circ\text{C}) = \frac{P_{kn}}{P_j^{50\text{Hz}}} = 1.05$$

4. Губици и порасте температуре при оптерећењима од 50% и 120%:

$$\beta = 0.5 \Rightarrow P_{\gamma 50} = P_0 + \beta^2 P_{kn} = 2055 \text{ W} \Rightarrow \theta_{gu,50} = \frac{P_0 + \beta^2 P_{kn}}{P_0 + P_{kn}} \theta_{gun} = 0.3785 \theta_{gun}$$

$$\beta = 1.2 \Rightarrow P_{\gamma 120} = P_0 + \beta^2 P_{kn} = 7410 \text{ W} \Rightarrow \theta_{gu,120} = \frac{P_0 + \beta^2 P_{kn}}{P_0 + P_{kn}} \theta_{gun} = 1.3646 \theta_{gun}$$

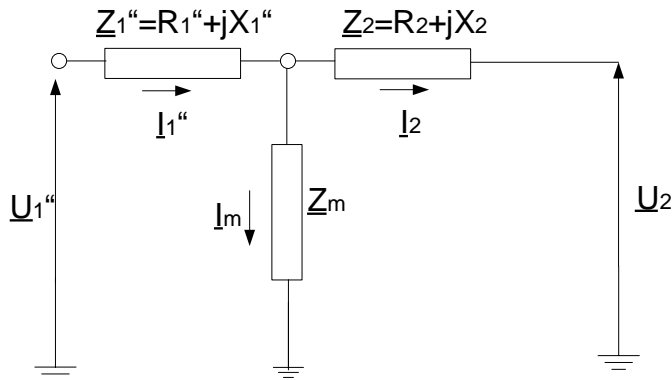
Промена температуре након преоптерећења:

$$\theta_{gu}(t) = \theta_{gu,50} \cdot e^{-t/\tau} + \theta_{gu,120} (1 - e^{-t/\tau})$$

У тренутку $t = t_{\max}$:

$$\theta_{gu}(t_{\max}) = 0.9 \theta_{gun} \Rightarrow t_{\max} = 0.7526 \cdot \tau$$

5.



$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{Z}_m \underline{I}_m$$

$$\underline{Z}_m \underline{I}_m = \underline{Z}_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_2$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_m$$

$$|\underline{U}_1| = |\underline{U}_2|$$

$$\underline{I}_2 = 0.7 \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{02}} e^{j\phi}$$

Непознате: \underline{I}_1 , \underline{I}_m и ϕ

6. Поглавље 6, Слика 6.22 и Слика 6.24.

7. Поглавље 6, страна 16, где се вредност радијалне силе израчунава по изразу из текста задатка.

8. На основу једначина физичке очигледности на крајевима секундара има се да је:

$$\underline{I}_d'' = \underline{I}_0'' = \underline{I}_i'' = \frac{\underline{I}_a}{3}$$

$$\underline{U}_a = \underline{U}_d'' + \underline{U}_i'' + \underline{U}_0'' = R_p \underline{I}_a$$

С обзиром на то да су намотаји примара спрегнути у троугао, омогућено је затварање нулте компоненте и на примарној страни, па је импеданса за нулти редослед једнака импедансама за директни и инверзни редослед: $\underline{Z}_d'' = \underline{Z}_i'' = \underline{Z}_0'' = \underline{Z}_k''$. Узимајући ову чињеницу у обзир, ако се датом сету једначина додају напонске једначине за директни, инверзни и нулти компонентни систем:

$$\underline{U}_{2nf} - \underline{Z}_d'' \underline{I}_d'' = \underline{U}_d''$$

$$0 - \underline{Z}_i'' \underline{I}_i'' = \underline{U}_i''$$

$$0 - \underline{Z}_0'' \underline{I}_0'' = \underline{U}_0''$$

добиају се изрази за симетричне компоненте струје фазе a а на основу њих и фазна струја:

$$\underline{U}_{2nf} - (\underline{Z}_d'' + \underline{Z}_i'' + \underline{Z}_0'') \underline{I}_d'' = \underline{U}_d'' + \underline{U}_i'' + \underline{U}_0'' = R_p \underline{I}_a = 3 R_p \underline{I}_d''$$

$$\underline{I}_d'' = \underline{I}_0'' = \underline{I}_i'' = \frac{\underline{U}_{2nf}}{3 \underline{Z}_k'' + 3 R_p} \Rightarrow \underline{I}_a = \frac{\underline{U}_{2nf}}{\underline{Z}_k'' + R_p} \approx 115.2 \text{ A} \quad (R_p \gg |\underline{Z}_k''|)$$

Струје кроз намотаје примара тада имају вредности (све симетричне компоненте се преносе у фазне намотаје примара):

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{I}_a}{n} \approx 1.33 \text{ A}$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_C = 0$$

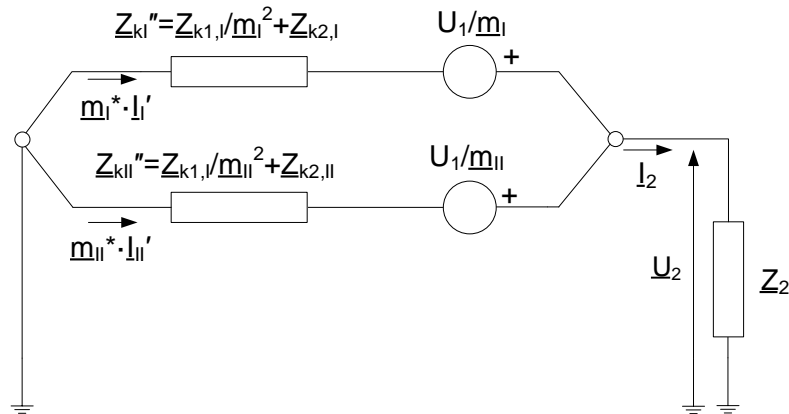
Линијске струје примара (погледати шему веза намотаја, зад. 1):

$$\underline{I}_{Alin} = \underline{I}_A = 1.33 \text{ A}$$

$$\underline{I}_{Blin} = 0$$

$$\underline{I}_{Clin} = -\underline{I}_A = -1.33 \text{ A}$$

9. Дати случај одговара паралелном раду два трансформатора код ког постоји фазни померај између напона одговарајућих фаза. С обзиром на то, потребно је применити еквивалентно коло приказано на слици, где се узима у обзир *комплексни преносни однос*, који укључује и однос ефективних вредности напона примара и секундара, и сатни број. С обзиром на то да трансформатори раде у режиму празног хода, у приказаној шеми треба импедансу Z_2 заменити отвореном везом, тј. усвојити да $Z_2 \rightarrow \infty$.



Сви напони у датој шеми су *еквивалентни фазни напони*, тј. напони изражени у односу на потенцијал неутралне тачке (земље). Све струје представљају *линијске вредности*. Другим речима, сви намотаји сведени су на еквивалентне намотаје спрегнуте у звезду. С обзиром на то да је цело еквивалентно коло сведено на секундар, и да су оба трансформатора спрегнута у звезду са стране секундара, додатне трансформације нису потребне. Величине које фигуришу у датом еквивалентном колу имају следеће вредности:

$$U_1 = U_{1n} / \sqrt{3} = 11.55 \text{ kV}$$

$$m_I = \frac{20}{0.4} e^{j7.30^\circ} = 50 \cdot e^{j210^\circ}$$

$$m_{II} = \frac{20}{0.4} e^{j6.30^\circ} = 50 \cdot e^{j180^\circ}$$

$$Z_{kl}'' = j \frac{u_{kl}}{100} \cdot Z_{BY} = j \frac{u_{kl}}{100} \cdot \frac{U_{2f}}{I_{2lin}} = j \frac{u_{kl}}{100} \cdot \frac{U_{02}/\sqrt{3}}{S_{nl}/(U_{02}\sqrt{3})} = j \frac{u_{kl}}{100} \cdot \frac{U_{02}^2}{S_n} = j0.016 \Omega$$

$$Z_{kll}'' = j \frac{u_{kll}}{100} \cdot Z_{BY} = j \frac{u_{kll}}{100} \cdot \frac{U_{02}^2}{S_n} = j0.02 \Omega$$

Ефективне вредности фазних струја секундара се сада једноставно могу одредити као:

$$I_{2f} \equiv I_{2lin} = |I_I''| = |I_{II}''| = \left| \frac{U_1/m_I - U_1/m_{II}}{Z_{kl}'' + Z_{kll}''} \right| = 3321 \text{ A}$$