

# ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13E013ЕНТ)

- септембар 2021 -

Београд, 5.9.2021.

Трофазни уљни трансформатор са номиналним подацима:  $S_n = 1600 \text{ kVA}$ ,  $U_{1n} / U_{02} = 35 / 0,4 \text{ kV}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , спрега Yd7, испитан је у огледима празног хода и кратког споја, при чему је добијено:

ПХ:  $P_{0n} = 2,6 \text{ kW}$ ,  $U_{0n} = 0,4 \text{ kV}$ ,  $j_{0n} = 0,9 \%$

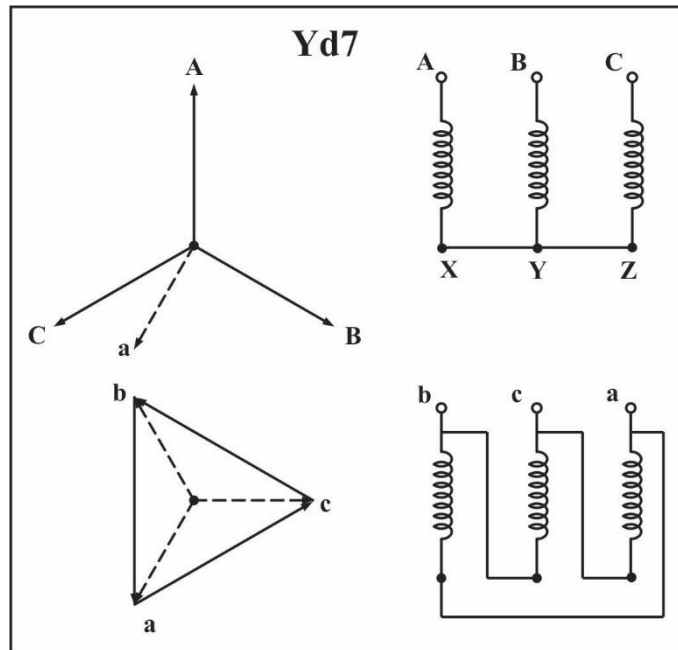
КС:  $P_{kn} = 14,7 \text{ kW}$ ,  $u_{kn} = 5 \%$ ,  $I_k = I_n$

1. Нацртати шему веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове. Означити све крајеве намотаја (почетке и крајеве). (Т8)
2. Навести и образложити (доказати) вредност уштеде у материјалу потребном за израду магнетног кола трофазног трансформатора у случајевима да се оно изводи у једној равни или као потпуно симетрично магнетно коло. (Т10)
3. Израчунати параметре еквивалентне заменске шеме трансформатора са НН стране. Нацртати шему са унетим бројним вредностима параметара и електричним величинама. (310)
4. Асинхрони мотор следећих номиналних података:  $P_n = 1 \text{ MW}$ ,  $U_{nl} = 400 \text{ V}$ ,  $\cos\varphi = 0,82$ ,  $\eta_n = 92 \%$ , спрега  $\Delta$ , прикључен је на секундарне крајеве датог трансформатора и ради у номиналном режиму. Колики је капацитет кондензатора у спреси звезда које треба прикључити паралелно датом мотору тако да напон на секундару трансформатора буде номиналан? Колико износи степен искоришћења снаге трансформатора при оваквом комбинованом оптерећењу? (312)
5. Написати израз за степен искоришћења снаге при оптерећењу трансформатора  $\beta$ . За сваку од три компоненте губитака (у намотајима, магнетном колу и конструкционим деловима) навести од чега она зависи. За губитке у намотајима написати израз промене полазећи од тога да је позната вредност номиналних губитака у намотајима  $P_{k75}$  (при номиналној струји и средњој температури  $75^\circ\text{C}$ ) и однос  $\zeta$  укупних губитака  $k_J$  у намотајима при  $75^\circ\text{C}$ . (Т10)
6. Нацртати дијаграм промене температуре по затвореној контури струјања уља и упрошћени дијаграм промене температуре намотаја. Дијаграм нацртати за хипотетички случај да постоји само један намотај и да целокупно уље струји кроз тај намотај и радијаторе (Т5). За случај да постоје два намотаја на слици приказати праве линије којима се приказује температура уља у сваком од намотаја, при чему се зна да је дно намотаја на истој висинској координати, а да се висина намотаја и пораст температуре уља по висини сваког од њих разликује (Т5).
7. Навести услед којих сила и на који начин су изложени механичким напрезањима: а) проводници (бакар), б) одстојници за формирање аксијалних и радијалних канала за хлађење? (Т5) Скицирати временски ток промене струје, означити величине на њему и назначити вредност струје при којој се јављају максималне вредности механичких напрезања? (Т5)
8. Ако се задатом трансформатору паралелно прикључи трансформатор исте снаге, спреге и напона али са губицима кратког споја  $16,5 \text{ kW}$  и процентуалним напоном кратког споја  $6 \%$ , израчунати заједнички напон на секундарним крајевима ако прикључено симетрично оптерећење троши линијску струју  $(3000+j2000) \text{ A}$ . Користити упрошћену формулу за пад напона. (310)
9. Ако су струје оптерећења са секундарне стране Скотовог трансформатора чији су напони  $U_1/U_2 = 3 \times 400/2 \times 200 \text{ V}$ ,  $\underline{I}_a = (20 + j60)\sqrt{3} \text{ A}$  и  $\underline{I}_b = (40 - j50) \text{ A}$  израчунати струје са примарне стране. Реална оса комплексног координатног система је у правцу напона  $\underline{U}_{2b}$ . (310)
10. Извести изразе за фазне напоне секундара и нацртати векторски дијаграм примарних и секундарних напона при једнофазном (двополном) кратком споју фазе „а“ намотаја секундара трансформатора спреге Yd7. (310)

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

др Зоран Радаковић  
др Зоран Лазаревић

1.



2. Предавања, Поглавље 2, почетак: текст испод слике 2.2, крај слика 2.5

3. ПХ:

$$R_a'' = \frac{U_{02f}^2}{P_{0f}} = \frac{3 \cdot 400^2}{2600} = 184,6 \Omega \Rightarrow I_{a2} = \frac{U_{02f}}{R_a''} = \frac{400}{184,6} = 2,17 \text{ A}$$

$$I_{02} = \frac{j_0}{100} \cdot I_{2nf} = \frac{0,9}{100} \cdot 1333 = 12 \text{ A} \Rightarrow I_{\mu 2} = \sqrt{I_{02}^2 - I_{a2}^2} = \sqrt{12^2 - 2,17^2} = 11,8 \text{ A}$$

$$X_{\mu}'' = \frac{U_{02f}}{I_{\mu 2f}} = \frac{400}{11,8} = 33,9 \Omega$$

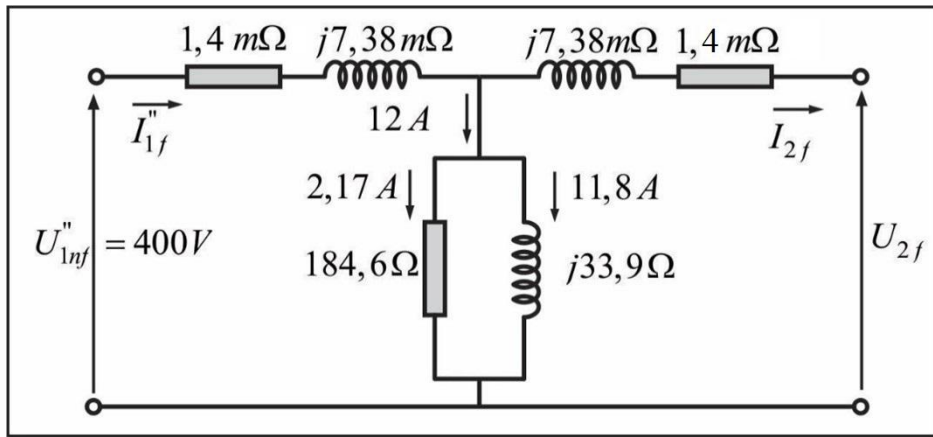
КС:

$$R_k'' = \frac{P_k}{3I_{kf}^2} = \frac{P_k}{3I_{1nf}^2} = \frac{14,7 \cdot 10^3}{3 \cdot 1333^2} = 2,8 \text{ m}\Omega$$

$$R_1'' = R_2'' = \frac{R_k''}{2} = 1,4 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k'' = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{02f}}{I_{2nf}} = \frac{5}{100} \cdot \frac{400}{1333} = 15 \text{ m}\Omega \Rightarrow X_k'' = \sqrt{Z_k''^2 - R_k''^2} = 14,75 \text{ m}\Omega$$

$$X_{\sigma 1}'' \approx X_{\sigma 2}'' = \frac{X_k''}{2} = 7,38 \text{ m}\Omega$$



4.

$$P_m = P_n / \eta_n = 10^6 / 0,92 = 1087 \text{ kW}, \quad \text{tg} \varphi = 0,698 \Rightarrow Q_m = P_m \cdot \text{tg} \varphi = 1087 \cdot 0,698 = 759 \text{ kVAr}$$

$$u_r = \frac{P_{kn}}{S_n} \cdot 100 = \frac{14,7 \cdot 10^3}{1600 \cdot 10^3} \cdot 100 = 0,92 \% \Rightarrow u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = 4,92 \%$$

$$\Delta u = a = \beta (u_m \cos \varphi + u_{xn} \sin \varphi) = 0 \Rightarrow \text{tg} \varphi = -\frac{1}{\text{tg} \varphi_k} = -\frac{u_m}{u_{xn}} = \frac{Q_m + Q_c}{P_m}$$

$$\Rightarrow Q_c = -\frac{u_m}{u_{xn}} P_m - Q_m = -962 \text{ kVAr}$$

$$Q_c = 3 \frac{U_f^2}{X_c} = -\omega C_f U_l^2 \Rightarrow C_f = -\frac{Q_c}{\omega U_l^2} = \frac{962 \cdot 10^3}{314 \cdot 400^2} = 19,15 \text{ mF}$$

$$S_{kom} = \sqrt{P_m^2 + (Q_m + Q_c)^2} = \sqrt{1087^2 + (759 - 962)^2} = 1106 \text{ kVA}$$

$$\beta = \frac{S_{kom}}{S_n} = \frac{1106}{1600} = 0,691, \quad \cos \varphi_{kom} = \frac{P_m}{S_k} = \frac{1087}{1106} = 0,983$$

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi_{kom} \cdot 100}{\beta S_n \cos \varphi_{kom} + P_{Fe} + \beta^2 P_{kn}} = \frac{0,691 \cdot 1600 \cdot 0,983 \cdot 100}{0,691 \cdot 1600 \cdot 0,983 \cdot 100 + 2,6 + 0,983^2 \cdot 14,7} = 99,12 \%$$

5.

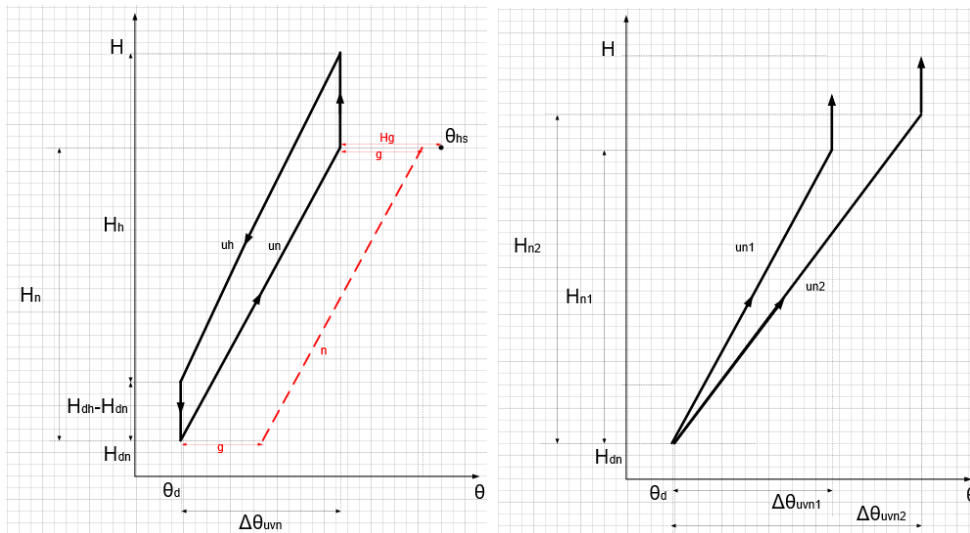
$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi}{\beta S_n \cos \varphi + P_l + P_{Fe}} = \frac{\beta \sqrt{3} U_{2n} I_{2n} \cos \varphi}{\beta \sqrt{3} U_{2n} I_{2n} \cos \varphi + P_{Cu} + P_{konst} + P_o}$$

$$P_{Cu} = \beta^2 \left( \frac{235 + \vartheta(\beta)}{235 + 75} k_J P_{k75} + \frac{235 + 75}{235 + \vartheta(\beta)} (1 - k_J) P_{k75} \right)$$

$P_{konstr}$  зависе од струја које се индукују у конструкционим деловим трансформатора и суду трансформатора. Ове струје зависе од расутог флукса који се затвара кроз ове делове. Расути флукс је сразмеран струји оптерећења трансформатора. Поред тога,  $P_{konstr}$  зависе и од температуре конструкционих делова.

$P_o$  зависе од магнетног флукса који се затвара кроз магнетно коло. Овај флукс зависи од напона на примару трансформатора и пада напона, који зависи од оптерећења и његовог фактора снаге.

6.



7. Опис механичких напрезања: одељак 6.2.3. Временски ток промене струје: слика 6.9 са пратећим текстом. Као струју при којој се имају максимална напрезања, на графику треба означити максималну вредност струје кратког споја.

8. Компоненте напона кратког споја трансформатора су:

$$u_{r2} = \frac{P_{k2}}{S_{n2}} \cdot 100 = \frac{16500}{1600 \cdot 10^3} \cdot 100 = 1,03 \%, u_{x2} = \sqrt{u_{k2}^2 - u_{r2}^2} = 5,91 \%$$

Комплексне вредности импеданси кратког споја у процентима износе:

$$z_{k2,\%} = u_{r2} + ju_{x2} = 1,03 + j5,91$$

$$z_{k1,\%} = u_{r1} + ju_{x1} = 0,92 + j4,92$$

Струја којом је оптерећен први трансформатор добија се из израза за струјни разделник на импедансама два паралелно спрегнута трансформатора:

$$\underline{I}_1 = \frac{z_{k2\%}}{z_{k1\%} + z_{k2\%}} \frac{\underline{I}}{\sqrt{3}} = \frac{1,03 + j5,91}{(0,92 + j4,92) + (1,03 + j5,91)} \frac{(3000 + j2000)}{\sqrt{3}}$$

$$\underline{I}_1 = (940,7 + j634,8)A$$

Па је одатле релативна вредност оптерећења трансформатора:

$$|\underline{I}_1| = 1135 A, \quad \beta_1 = \frac{1135}{1333} = 0,851, \cos \varphi = \frac{634,8}{1135} = 0,56 \text{ кап}, \sin \varphi = \frac{940,7}{1135} = -0,83$$

Сада се може израчунати пад напона на овом трансформатору и заједнички напон на секундару два трансформатора који раде у паралели:

$$\Delta u = \beta_1(u_{r1} \cos \varphi + u_{x1} \sin \varphi) = 0,851 \cdot (0,92 \cdot 0,5 - 5,23 \cdot 0,83) = -3,3 \%$$

$$U_2 = U_{02} \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right) = 413,2 V$$

9. Из једначина које представљају једнакост магнетопобудних сила примарних и секундарних намотаја добијају се струје примара трансформатора у Скотовој спрези:

$$\underline{I}_A \frac{\sqrt{3}}{2} N_1 = \underline{I}_A N_2 \Rightarrow \underline{I}_A = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1} \underline{I}_A = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{200}{400} \cdot (20 + j60)\sqrt{3} = (20 + j60) A$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_B \frac{N_1}{2} - \underline{I}_C \frac{N_1}{2} &= N_2 \underline{I}_B \\ \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \underline{I}_B = \frac{1}{2}(\underline{I}_B - \underline{I}_A), \quad \underline{I}_C = -\frac{1}{2}(\underline{I}_A + \underline{I}_B)$$

$$\underline{I}_B = \frac{1}{2}(40 - j50 - 20 - j60) = (10 - j55) A$$

$$\underline{I}_C = -\frac{1}{2}(20 + j60 + 40 - j50) = (-30 - j5) A$$

**10.** Ако се усвоји да је  $n = 1$  може се извести следећа зависност секундарних напона од примарних при двополном кратком споју на секундарној страни.

$$\underline{U}_a = 0; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B + \frac{\underline{U}_A}{2}; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C + \frac{\underline{U}_A}{2}$$

Што резултује следећим векторским дијаграмом:

