

ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13E013ЕНТ)

- јул 2020 -

Београд, 26.06.2020.

Трофазни уљни трансформатор са номиналним подацима: $S_n = 8000 \text{ kVA}$, $U_{1n} / U_{02} = 35 / 10,5 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$, спрега Dyn11, испитан је у огледима празног хода и кратког споја, при чему је добијено:

ПХ: $P_0 = 6,7 \text{ kW}$, $U_0 = 10,5 \text{ kV}$, $j_0 = 0,6 \%$

КС: $P_k = 47,7 \text{ kW}$, $U_k = 2415 \text{ V}$, $I_k = 132 \text{ A}$

Попречни пресек магнетског кола износи $S'_{Fe} = 997 \text{ cm}^2$, а коефицијент испуне гвожђем 0,97.

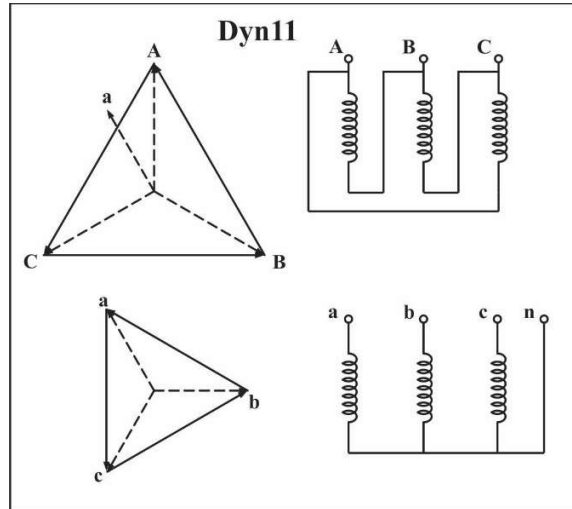
1. Нацртати шеме веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове. Означити све крајеве намотаја (почетке и крајеве). (Т-7)
2. Израчунати вредност максималне индукције у језгру и број навојака примара датог трансформатора ако индикована електромоторна сила по навојку секундарна износи 35,85 V. (З-6)
3. Израчунати параметре еквивалентне заменске шеме трансформатора са НН стране. Нацртати шему са унетим бројним вредностима параметара и електричним величинама. (З-12)
4. а) Израчунати пад напона на секундару задатог трансформатора ако он напаја трофазно симетрично оптерећење које троши линијску струју комплексне вредности $(300+j100) \text{ A}$ уз одговарајуће симетричне помераје по фазама. (З-6)
б) Колико износи степен искоришћења снаге трансформатора у овом случају? (З-6)
5. Одредити примарни напон и струју, снагу и губитке трансформатора сличне конструкције као задати са истом максималном густином флукса и струје али са 50 % мањим линеарним димензијама. (З-10)
6. Нацртати упрошћен распоред промене температуре намотаја по његовој висини и промену температуре уља у затвореној циркулационој контури. Сматрати да је расподела температура унутар сваког од намотаја иста. Познате су следеће вредности у сваком од намотаја: губици $P_g \text{ (W)}$, запремински проток уља $Q \text{ (m}^3/\text{s)}$, дебљина чврсте изолације $\delta \text{ (mm)}$ и укупна површина спољашње површи изолације, која је једнака контактної површи између намотаја и уља $S \text{ (m}^2)$ и коефицијент преласка топлоте струјањем са намотаја на уље $\alpha \text{ (W/(m}^2 \text{ K))}$. Познати су сви физички параметри чврсте изолације и уља. Написати изразе из којих се могу израчунати вертикални градијент температуре и разлика средње температуре намотаја и средње температуре уља. (Т-13)
7. Навести пет елемената конструкције енергетских уљних трансформатора који утичу на њихова изолациона својства, односно чијим се правилним избором обезбеђује издржљивост на напонска напрезања за напоне мрежне учестаности. (Т-10)
8. Од датог трансформатора превезивањем намотаја формирати аутотрансформатор тако да се добије максимална могућа пролазна снага и израчунати ту снагу. Нацртати шему веза овог трансформатора са ознакама, израчунати његов напон кратког споја као и максимални могући степен искоришћења снаге. (З-10)
9. Израчунати критичну вредност струје трополног кратког споја трансформатора са секундарне стране и коефицијент критичности. (З-10)
10. Како ће се расподелити укупно оптерећење од 13 MVA ако се паралелно задатом прикључи трансформатор исте спреге, снаге $S_n = 5 \text{ MVA}$ и напона кратког споја $u_k = 5 \%$? (З-10)

Испит траје 3 сата. Дозвољено је поседовање само једне вежбанке за рад. Прецртати што није за преглед.

Проф. др Зоран Лазаревић
Проф. др Зоран Радаковић

РЕШЕЊА:

1.



2.

$$E_{21} = \frac{U_2}{N_2} = 4,44 f B_m S_{Fe} = 4,44 f B_m k_{Fe} S'_{Fe} \Rightarrow B_m = \frac{E_{21}}{4,44 f k_{Fe} S'_{Fe}} = \frac{35,85}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,97 \cdot 997 \cdot 10^{-4}} \approx 1,67 T$$

$$E_{11} = E_{21} \Rightarrow N_1 = \frac{U_1}{E_{21}} = \frac{35 \cdot 10^3}{35,85} \approx 976 \text{ nav.}$$

3. ПХ:

$$R_a'' = \frac{U_{02l}^2}{P_{0f}} = \frac{10,5^2 \cdot 10^6}{6,7 \cdot 10^3} = 16,4 k\Omega \Rightarrow I_{a2} = \frac{U_{02f}}{R_a''} = \frac{10,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 16,4 \cdot 10^3} = 0,37 A$$

$$I_{02} = \frac{j_0}{100} \cdot I_{2nf} = \frac{0,6}{100} \cdot 440 = 2,64 A \Rightarrow I_{\mu 2} = \sqrt{I_{02}^2 - I_{a2}^2} = \sqrt{2,64^2 - 0,37^2} = 2,61 A$$

$$X_{\mu}'' = \frac{U_{02f}}{I_{\mu 2f}} = \frac{10,5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2,61} = 2,32 k\Omega$$

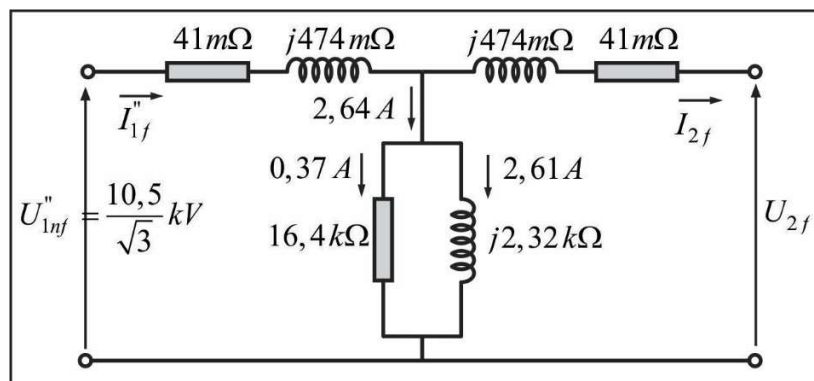
КС:

$$R_k'' = \frac{P_k}{3 I_{2nf}^2} = \frac{47,7 \cdot 10^3}{3 \cdot 440^2} = 82,1 m\Omega \Rightarrow R_1'' \approx R_2'' = \frac{R_k''}{2} = 41 m\Omega$$

$$Z_k'' = \frac{U_{knf}}{I_{2nf}} \cdot \frac{U_{02f}}{U_{1nf}} = \frac{2415}{440} \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 35} = 952 \text{ m}\Omega \Rightarrow X_k'' = \sqrt{Z_k''^2 - R_k''^2} = 948 \text{ m}\Omega$$

$$X_{\sigma 1}'' \approx X_{\sigma 2}'' = \frac{X_k''}{2} = 474 \text{ m}\Omega$$

$$u_k = \frac{U_k}{U_{1nf}} \cdot 100 = \frac{U_k}{U_{1n}} \cdot 100 = \frac{2415}{35000} \cdot 100 = 6,9 \%$$



4. a)

$$I_l = (300 + j100) \text{ A} \Rightarrow |I_l| = \sqrt{300^2 + 100^2} = 316,2 \text{ A} \Rightarrow \beta = \frac{|I_l|}{I_{2n}} = \frac{316,2}{440} = 0,72$$

$$\cos \varphi = \frac{300}{316,2} = 0,94 \text{ kap.} \Rightarrow \sin \varphi = 0,32$$

$$u_r = \frac{P_{kn}}{S_n} \cdot 100 = \frac{47,7 \cdot 10^3}{8000 \cdot 10^3} \cdot 100 = 0,596 \% \Rightarrow u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = 6,87 \%$$

$$a = \beta(u_{rn} \cos \varphi - u_{xn} \sin \varphi) = 0,72(0,596 \cdot 0,94 - 6,87 \cdot 0,32) = -1,18 \%$$

$$b = \beta(u_{xn} \cos \varphi + u_{rn} \sin \varphi) = 0,72(6,87 \cdot 0,94 + 0,596 \cdot 0,32) = 4,787 \%$$

$$\Delta u = a + \frac{b^2}{200} = -1,179 + \frac{4,787^2}{200} = -1,064 \% \Rightarrow \Delta U_2 = U_{02} \frac{\Delta u}{100} = -10,5 \cdot 10^3 \cdot \frac{1,064}{100} = -111,8 \text{ V}$$

б)

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi \cdot 100}{\beta S_n \cos \varphi + P_{Fe} + \beta^2 P_{kn}} = \frac{0,72 \cdot 8000 \cdot 10^3 \cdot 0,94 \cdot 100}{0,72 \cdot 8000 \cdot 10^3 \cdot 0,94 + 6,7 + 0,72^2 \cdot 47,7} = 99,42 \%$$

5.

$$k = l_2 / l_1 = 0,5$$

$$U = 4,44 f N B_m S_{Fe} \sim k^2 \Rightarrow U'_1 = 0,5^2 \cdot 35 = 8,75 \text{ kV}$$

$$I = JS_{Cu} \sim k^2 \Rightarrow I'_1 = 0,5^2 \cdot 76,2 = 19,05 \text{ A}$$

$$S = UI \sim k^4 \Rightarrow S'_1 = 0,5^4 \cdot 8 \cdot 10^6 = 500 \text{ kVA}$$

$$P_k \sim RI^2 = \rho \frac{l_{Cu}}{S_{Cu}} (JS_{Cu})^2 \sim k^3 \Rightarrow P_{k2} = 0,5^3 \cdot 47,7 \cdot 10^3 = 5,96 \text{ kW}$$

$$P_{Fe} = p_{Fe} m_{Fe} \sim k^3 \Rightarrow P'_{Fe} = 0,5^3 \cdot 6,7 \cdot 10^3 = 837,5 \text{ W}$$

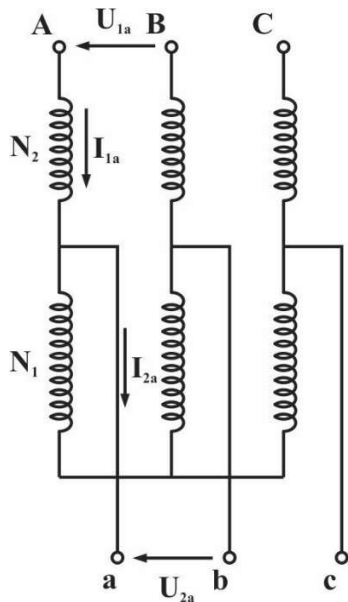
6. Предавања, поглавље 5.2.3., слика 5.6.

$$P_g = \rho c_p Q \Delta\theta_{uvn}$$

$$\Delta\theta_{Nam-ulje} = \frac{P_g}{S} \left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right)$$

7. Предавања, поглавље 6.3., пасус пре слике 6.16.

8.



$$U_{1a} = \sqrt{3} (U_{1nf} + U_{02f}) = \sqrt{3} \left(35 + \frac{10,5}{\sqrt{3}} \right) = 71,1 \text{ kV}$$

$$U_{2a} = \sqrt{3} \cdot U_{1nf} = 60,6 \text{ kV}$$

$$n_a = \frac{U_{1a}}{U_{2a}} = \frac{71,1}{60,6} = 1,17$$

$$S_a = \frac{n_a}{n_a - 1} \cdot S_T = \frac{1,17}{1,17 - 1} \cdot 8 \cdot 10^6 \approx 55 \text{ MVA}$$

$$u_{ka} = u_k \frac{S_T}{S_a} = 6,9 \cdot \frac{8}{55} = 1\%$$

$$\beta_{\max} = \sqrt{\frac{P_{0n}}{P_{kn}}} = \sqrt{\frac{6,7}{47,7}} = 0,375$$

$$\eta_{\max} = \frac{\beta_{\max} S_a}{\beta_{\max} S_a + 2 \cdot P_{0n}} = \frac{0,375 \cdot 55 \cdot 10^3}{0,375 \cdot 55 \cdot 10^3 + 2 \cdot 6,7} = 99,94\%$$

9. Критична струја при кратком споју:

$$I_{KR2} = \sqrt{2} \frac{I_{2nf} \cdot 100}{u_{k\%}} \left(1 + e^{-\frac{u_r \cdot \pi}{u_s}} \right) = \sqrt{2} \cdot \frac{440 \cdot 100}{6,9} \left(1 + e^{-\frac{0,596}{6,87} \cdot \pi} \right) \approx 15,9 \text{ kA}$$

$$k_{KR} = \frac{I_{KR}}{\sqrt{2} \cdot I_{2nf}} = \frac{15,9 \cdot 10^3}{\sqrt{2} \cdot 440} = 25,5$$

10. Укупно оптерећење се расподељује на следећи начин:

$$S_I = \frac{\Sigma S}{\frac{u_{kI}}{S_I} \left(\frac{S_I}{u_{kI}} + \frac{S_{II}}{u_{kII}} \right)} = \frac{13}{\frac{6,9}{8} \left(\frac{8}{6,9} + \frac{5}{5} \right)} = 6,98 \text{ MVA}$$

$$S_{II} = \Sigma S - S_I = 6,02 \text{ MVA}$$