

ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13Е013ЕНТ)
јануар 2020.

Трофазни енергетски уљни трансформатор са номиналним подацима: $S_n = 5 \text{ MVA}$, $U_1 / U_{20} = 35 / 6,3 \text{ kV}$, 50 Hz , спрега Yd7, $u_k = 5 \%$, $j_0 = 1,1 \%$, $P_{kn} = 30 \text{ kW}$, $P_{0n} = 7 \text{ kW}$, има следеће конструкцијске податке: број навојака примара $N_1 = 700$, средњи пречник секундара $D_2 = 414 \text{ mm}$, висина оба намотаја $h = 650 \text{ mm}$, ширине намотаја: примара и секундара $a = 40 \text{ mm}$ и $b = 46 \text{ mm}$ респективно, уз међусобни размак намотаја $\delta = 20 \text{ mm}$. Спољашњи намотај је високонапонски. Корен карактеристичне једначине за израчунавање расподеле пренапона је $\alpha = 10$.

I део

1. Нацртати шеме веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове. Означити све крајеве намотаја (почетке и крајеве). (Т-8)
2. За колико ће се променити реактанса расипања трансформатора ако се ширина радијалног канала између намотаја повећа два пута, у случају да је секундар остао исти? (З-8)
3. Израчунати параметре еквивалентне заменске шема трансформатора са ВН стране и нацртати шему са унетим бројним вредностима свих параметара и електричним величинама. (З-14)
4. При ком фактору снаге се на секундару задатог трансформатора који је номинално оптерећен има минимални напон и колико он износи? Како се при таквом оптерећењу може постићи номинални напон секундара и колико тада износи степен искоришћења снаге трансформатора? (З-14)
5. Нацртати топлотну шему са два чвора и једним топлотним капацитетом (по том моделу се сматра да се по промени оптерећења промена разлике температура намотаја и уља догађа тренутно). (Т-4) Полазећи од претпоставке да су топлотни параметри шеме познати, одредити порасте температуре намотаја и уља у односу на амбијент у стационарном стању при снази губитака у намотајима P_1' и снази губитака која се инјектира у чвор 2 P_2 . Написати израз за промену температуре намотаја за случај да оптерећење повећа тако да снага загревања са P_1' порасте на P_1'' . Занемарити промену снаге губитака која се инјектира у чвор 2 ($P_2 \approx P_2' = P_2$). (З-12)

II део

6. Увести апроксимацију стварног облика магнетног хистерезиса са две праве линије и на основу ње извести израз за максималну вредност струје при укључењу трансформатора у празном ходу. Потребно је графички или текстуално дефинисати сваку од величина које фигуришу у коначном изразу. (Т-12)
7. На намотаје примара задатог трансформатора наилази пренапонски талас амплитуде 2 MV .
 - а) Нацртати општи облик расподеле пренапона и еквивалентно коло за проучавање пренапонских појава у средини прелазног процеса. Која су критична места и зашто? (Т-6)
 - б) Колики је максимални потенцијал који се може јавити у току разматраног пренапонског прелазног процеса? (З-6)
8. Задатом трансформатору се паралелно прикључује трансформатор са следећим номиналним подацима: $S_n = 5 \text{ MVA}$, $U_1 / U_{20} = 35 / 6,3 \text{ kV}$, $u_k = 6 \%$, $\cos\varphi_k = 0,14$. Како ће трансформатори поделити укупно оптерећење од 10 MVA $\cos\varphi = 0,75$ инд и да ли је могућ трајан рад под овим условима? (З-12)
9. На колико начина се може добити трофазни аутотрансформатор спреге Yу развезивањем и поновним повезивањем намотаја датог трансформатора? Која је спрега повољнија и зашто? (Т-6) За повољнију спрегу израчунати номиналну снагу АТР, максимални степен искоришћења снаге, напон кратког споја и минимални напон на његовим секундарним крајевима при номиналном оптерећењу. (З-6)
10. Ако је између крајева а и б задатог трансформатора прикључено оптерећење које троши струју $I_b = (60 - j40) \text{ A}$, одредити колике струје теку у фазним намотајима примара? (З-12)

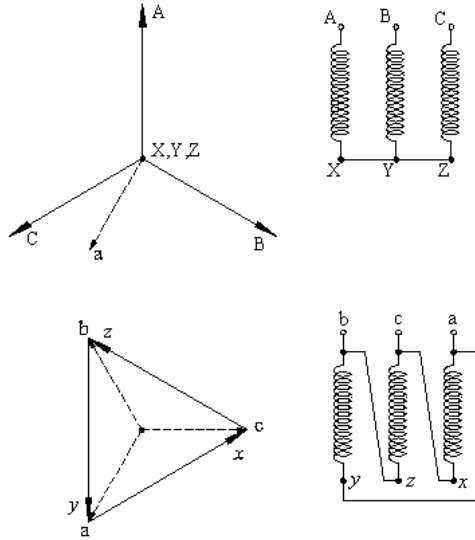
Испит траје 180 минута, а други колоквијум (питања 6-10) 120 минута. Дозвољено је поседовање само једне свеске за рад и концепт. Прецртати оно што није за преглед. Т - Теорија, З - Задаци

У Београду, 18.01.2020.

Проф. др Зоран Лазаревић
Проф. др. Зоран Радаковић

РЕШЕЊА:

1.



$$2. \quad X_k = \mu_0 \pi \alpha N^2 \frac{k_R}{h} D_m \left(\frac{a}{3} + \delta + \frac{b}{3} \right); \quad k_R = 1 - \frac{a + \delta + b}{\pi h}$$

Ако δ_1 постане δ_2 , однос $\frac{X_{k2}}{X_{k1}}$ би био:

$$\frac{X_{k2}}{X_{k1}} = \frac{\left(1 - \frac{a + \delta_2 + b}{\pi h} \right) D_{m2} \left(\frac{a+b}{3} + \delta_2 \right)}{\left(1 - \frac{a + \delta_1 + b}{\pi h} \right) D_{m1} \left(\frac{a+b}{3} + \delta_1 \right)} = \frac{D_{m2}}{D_{m1}} \cdot \frac{\pi h - (a + \delta_2 + b)}{\pi h - (a + \delta_1 + b)} \cdot \frac{(a + b + 3\delta_2)}{(a + b + 3\delta_1)}$$

$$\frac{D_{m2}}{D_{m1}} = \frac{D_2 + b + \delta_2}{D_2 + b + \delta_1} = \frac{414 + 46 + 40}{414 + 46 + 20} = 1,042; \quad \frac{\pi h - (a + \delta_2 + b)}{\pi h - (a + \delta_1 + b)} = \frac{\pi 650 - (40 + 40 + 46)}{\pi 650 - (40 + 20 + 46)} = 0,9897$$

$$\frac{(a + b + 3\delta_2)}{(a + b + 3\delta_1)} = \frac{40 + 46 + 3 \cdot 40}{40 + 46 + 3 \cdot 20} = 1,411$$

$$\frac{X_{k2}}{X_{k1}} = 1,042 \cdot 0,9897 \cdot 1,411 = 1,455 \text{ пута се повећа реактанса расипања}$$

$$3. \quad I_{1nf} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}} = \frac{5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3} = 82,48 \text{ A}, \quad R_a = \frac{U_{1nf}^2}{P_0/3} = \frac{3 \cdot 35^2 \cdot 10^6}{3 \cdot 7000} = 175 \text{ k}\Omega$$

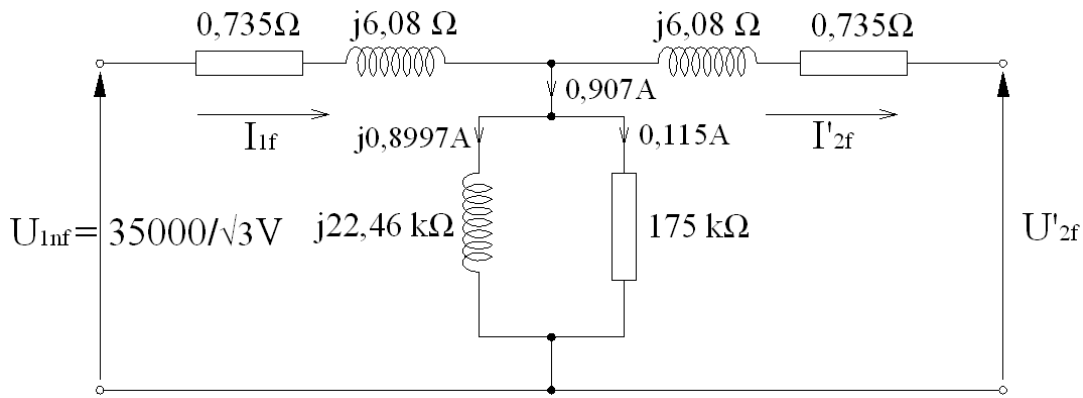
$$I_a = \frac{U_{1nf}}{R_a} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 175 \cdot 10^3} = 0,115 \text{ A}, \quad I_0 = \frac{j_0}{100} \cdot I_{1nf} = \frac{1,1}{100} \cdot 82,48 = 0,907 \text{ A}$$

$$I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_a^2} = \sqrt{0,907^2 - 0,115^2} = 0,8997 \text{ A} \Rightarrow X_\mu = \frac{U_{1nf}}{I_\mu} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,8997} = 22,46 \text{ k}\Omega$$

$$R_k = \frac{P_{kn}}{3I_k^2} = \frac{30000}{3 \cdot 82,48^2} = 1,47 \Omega \Rightarrow R_1 \approx R_2 = \frac{R_k}{2} = 0,735 \Omega,$$

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{1nf}}{I_{1nf}} = \frac{5}{100} \cdot \frac{35000}{\sqrt{3} \cdot 82,48} = 12,25 \Omega \Rightarrow X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{12,25^2 - 1,47^2} = 12,16 \Omega$$

$$X_{\sigma 1} \approx X_{\sigma 2} = \frac{X_k}{2} = \frac{12,16}{2} = 6,08 \Omega$$



$$4. \quad \Delta u \approx a = \beta(u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi), \quad \beta = \frac{S}{S_n} = 1$$

$$\frac{d\Delta u}{d\varphi} = -u_r \sin \varphi + u_x \cos \varphi = 0 \Rightarrow \operatorname{tg} \varphi_{\max} = \frac{u_x}{u_r} = \operatorname{tg} \varphi_k$$

$$u_r = \frac{P_{kn}}{S_n} \cdot 100 = \frac{30000}{5000 \cdot 10^3} \cdot 100 = 0,6\% \Rightarrow u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = \sqrt{5^2 - 0,6^2} = 4,96\%$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\max} = \frac{4,96}{0,6} = 8,27 \Rightarrow \cos \varphi_{\max} = \frac{0,6}{5} = 0,12 \quad \text{- при овом фактору снаге се има минималан напон на секундару}$$

$$\Delta u_{\max} \approx a = \beta(u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi) = u_r \cdot \frac{u_r}{u_k} + u_x \cdot \frac{u_x}{u_k} = u_k = 5\%$$

$$U_{2\min} = \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right) \cdot U_{02} = \left(1 - \frac{5}{100}\right) \cdot 6,3 = 5,985 \text{ kV}$$

$$\Delta u = a = \beta(u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi) = 0 \Rightarrow \operatorname{tg} \varphi = -\frac{u_r}{u_x} = -\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_k},$$

- постиже се убацивањем кондензаторских батерија снаге Q_c :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{S_n \sin \varphi_{\max} - Q_c}{S_n \cos \varphi_{\max}} = -\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_k}$$

$$Q_c = S_n \sin \varphi_{\max} + \frac{S_n \cos \varphi_{\max}}{\operatorname{tg} \varphi_k} = 5 \cdot 0,992 + \frac{5 \cdot 0,12}{8,27} = 5,032 \text{ MVar кап.}$$

$$\cos \varphi = 0,993$$

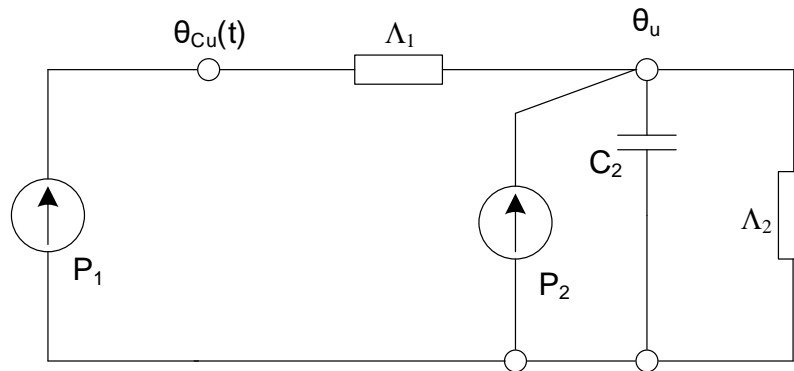
$$\eta_{\%} = \frac{\beta \cdot S_n \cos \varphi}{\beta \cdot S_n \cos \varphi + \beta^2 \cdot P_{kn} + P_{0n}} \cdot 100 = \frac{1 \cdot 5 \cdot 0,993}{1 \cdot 5 \cdot 0,993 + 0,03 + 0,007} \cdot 100 = 99,26\%$$

- други начин: повећање напона примара

$$U_1^* = \frac{U_{1n}}{\left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right)} = \frac{35000}{\left(1 - \frac{5}{100}\right)} = 36842 \text{ V} \Rightarrow \alpha = \frac{U_1^*}{U_{1n}} = \frac{36842}{35000} = 1,053$$

$$\eta = \frac{\alpha \beta S_n \cos \varphi}{\alpha \beta S_n \cos \varphi + \alpha^2 P_{0n} + \beta^2 P_{kn}} = \frac{1,053 \cdot 1 \cdot 5000 \cdot 0,12}{1,053 \cdot 1 \cdot 5000 \cdot 0,12 + 1,053^2 \cdot 7 + 30} = 0,9436 \rightarrow 94,36\%$$

5.



Порасте температуре намотаја и уља у стационарном стању при P_1' и P_2 :

$$\theta_{Cu} = \frac{P_1'}{\Lambda_1} + \frac{P_1' + P_2}{\Lambda_2}$$

$$\theta_u = \frac{P_1' + P_2}{\Lambda_2}$$

Помена температуре намотаја након повећања оптерећења и пораста снага загревања са вредности P_1' на P_1'' :

$$\theta_u(t) = \frac{P_1' + P_2}{\Lambda_2} + \left(\frac{P_1'' + P_2}{\Lambda_2} - \frac{P_1' + P_2}{\Lambda_2} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{C_2/\Lambda_2}} \right)$$

$$\theta_{Cu}(t) = \theta_u(t) + \frac{P_1''}{\Lambda_1}$$

6. Текст који укључује последњи пасус на страни 6. Предавања из Поглавља 6., закључно са формулом (6.20)

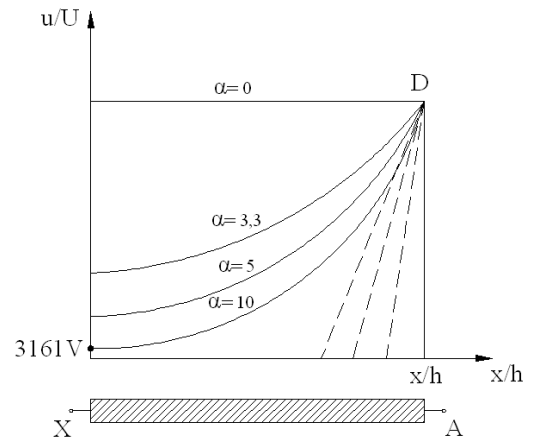
7. Еквивалентно коло: предавања, поглавље 6, слика 6.18.

$$U_m = 2 MV$$

$$u = U_m \frac{ch\alpha x}{ch\alpha h} = 2 \cdot 10^6 \frac{ch10x}{ch6,5}$$

$$U(x=0) = 2 \cdot 10^6 \frac{1}{332,6} = 6014 V$$

$$U_{max} = 4 \cdot 10^6 - 6014 = 3994 kV \approx 4 MV$$



- критична места у погледу изолације су почетак намотаја где је угрожена међузавојна изолација због велике стрмине пренапона и крај намотаја где је угрожена изолација према маси због велике амплитуде напона

8. $Z_{B1} = Z_{B2} \Rightarrow$ може се радити са импедансама у % вредностима

$$z_{k1\%} = u_{k1\%} (\cos \varphi_{k1} + j \sin \varphi_{k1}) = (0,6 + j4,96)\% = 5 | \underline{83,1^\circ} \%$$

$$z_{k2\%} = u_{k2\%} (\cos \varphi_{k2} + j \sin \varphi_{k2}) = 6 \cdot (0,14 + j0,99) = (0,84 + j5,94)\% = 6 | \underline{81,95^\circ} \%$$

$$z_{k1\%} + z_{k2\%} = (1,44 + j10,9)\% \approx 11 | \underline{82,47^\circ} \%$$

$$\underline{S} = 10 \cdot (0,75 + j0,66) MVA \Rightarrow \underline{S}^* = (7,5 - j6,6) MVA = 10 | \underline{-41,4^\circ} MVA$$

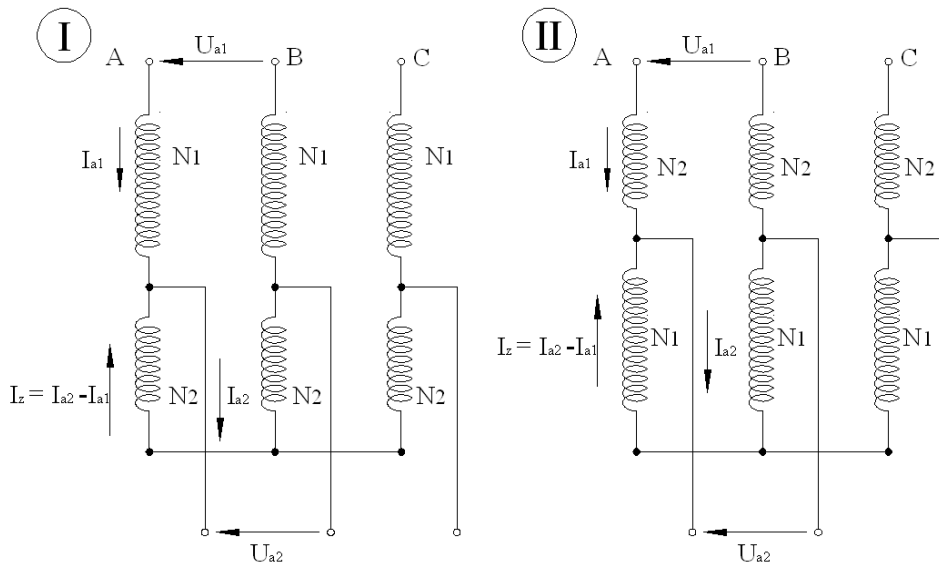
$$\underline{I}_1 = \frac{z_{k1\%}}{z_{k1\%} + z_{k2\%}} \underline{I} \Rightarrow \underline{S}_1^* = \frac{z_{k1\%}}{z_{k1\%} + z_{k2\%}} \underline{S}^* = \frac{5 | \underline{83,1^\circ} \%}{11 | \underline{82,5^\circ} \%} \cdot 10 | \underline{-41,4^\circ} = 4,5 | \underline{-40,8^\circ} MVA$$

$$\underline{S}_2^* = \frac{z_{k2\%}}{z_{k1\%} + z_{k2\%}} \underline{S}^* = \frac{6 | 81,95^\circ \%}{11 | 82,5^\circ \%} \cdot 10 | -41,4^\circ = 5,4 | -41,95^\circ MVA$$

$$\underline{S}_1 = (3,41 + j2,94) MVA \Rightarrow |\underline{S}_1| = 4,5 MVA \Rightarrow \beta = \frac{|\underline{S}_1|}{S_n} = 0,9 \rightarrow \text{подопт. за } 10 \%$$

$$\underline{S}_2 = (4,016 + j3,61) MVA \Rightarrow |\underline{S}_2| = 5,4 MVA \Rightarrow \beta = \frac{|\underline{S}_2|}{S_n} = 1,08 \rightarrow \text{преопт. за } 8 \%$$

- није могућ трајан рад због преоптерећења другог трансформатора



9.

$$\text{I} \quad U_{1af} = \frac{35}{\sqrt{3}} + 6,3 = 26,51 kV, \quad U_{2af} = 6,3 kV, \quad n_{a1} = U_{1af} / U_{2af} = 26,51 / 6,3 = 4,21$$

$$S_{a1} = S_n \cdot \frac{n_{a1}}{n_{a1} - 1} = 5 \cdot \frac{4,21}{4,21 - 1} = 6,6 MVA$$

$$\text{II} \quad U_{1af} = \frac{35}{\sqrt{3}} + 6,3 = 26,51 kV, \quad U_{2af} = \frac{35}{\sqrt{3}} kV, \quad n_{a2} = U_{1af} / U_{2af} = 26,51 / 20,21 = 1,31$$

$$S_{a2} = S_n \cdot \frac{n_{a2}}{n_{a2} - 1} = 5 \cdot \frac{1,31}{1,31 - 1} = 21,13 MVA \quad - \text{повољнија јер је } S_a \text{ веће}$$

$$\eta_a = \frac{\beta_m S_{na} \cos \varphi}{\beta_m S_n \cos \varphi + P_{Fen} + P_{Cun}} = \frac{0,483 \cdot 21,13 \cdot 1}{0,483 \cdot 21,13 \cdot 1 + 2 \cdot 0,007} = 0,9986 \rightarrow 99,86 \%$$

$$u_{ka} = u_k \cdot \frac{S_n}{S_{na}} = 5 \cdot \frac{5}{21,13} = 1,18 \%$$

$$\Delta u_{\max} \approx a = \beta (u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi) = u_r \cdot \frac{u_r}{u_{ka}} + u_x \cdot \frac{u_x}{u_{ka}} = u_{ka} = 1,18 \%$$

$$U_{2\min} = \left(1 - \frac{\Delta u_{\max}}{100}\right) \cdot U_{02} = \left(1 - \frac{1,18}{100}\right) \cdot 35 = 34,587 kV$$

10. $\underline{I}_{bL} = (60 - j40)A$; $\underline{I}_{aL} = -(60 - j40)A$; $\underline{I}_{cL} = 0$;

$$\left. \begin{array}{l} \underline{I}_{aL} = \underline{I}_c - \underline{I}_a \\ \underline{I}_{bL} = \underline{I}_a - \underline{I}_b \\ \underline{I}_{cL} = \underline{I}_b - \underline{I}_c \\ \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} \underline{I}_a = \frac{1}{3}(\underline{I}_{bL} - \underline{I}_{aL}) = (40 - j26,7)A \\ \underline{I}_b = \frac{1}{3}(\underline{I}_{cL} - \underline{I}_{bL}) = -(20 - j13,3)A \\ \underline{I}_c = \frac{1}{3}(\underline{I}_{aL} - \underline{I}_{cL}) = -(20 - j13,3)A \end{array}$$

$$n = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 3,21$$

$$\underline{I}_A = \frac{1}{n} \cdot \underline{I}_a = \frac{1}{3,21} \cdot (40 - j26,7) = (12,46 - j8,32)A$$

$$\underline{I}_B = \frac{1}{n} \cdot \underline{I}_b = -\frac{1}{3,21} \cdot (20 - j13,3) = -(6,23 - j4,16)A$$

$$\underline{I}_C = \frac{1}{n} \cdot \underline{I}_c = -\frac{1}{3,21} \cdot (20 - j13,3) = -(6,23 - j4,16)A$$

