

ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (19E013ЕНТ)
- јануар 2023 -

Београд, 26.01.2023.

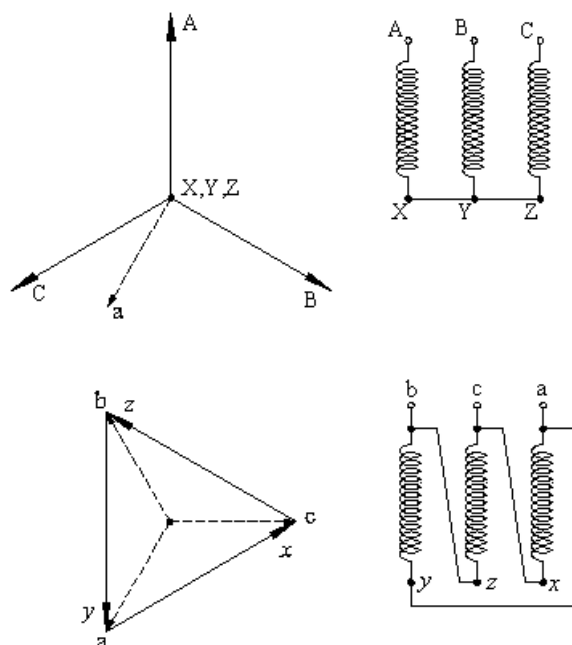
Трофазни енергетски уљни трансформатор са номиналним подацима: $S_n = 5 \text{ MVA}$, $U_1/U_{20} = 35/6,3 \text{ kV}$, 50 Hz , спрега Yd7, $u_k = 5 \%$, $j_0 = 1,1 \%$, $P_{Kn} = 30 \text{ kW}$, $P_{0n} = 7 \text{ kW}$, има следеће конструкцијске податке: број навојака примара $N_1 = 700$, густина струје у оба намотаја $J_n = 3 \text{ A/mm}^2$, 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 $\alpha = 10$.

1. Нацртати шеме веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове и означити све крајеве намотаја. (Т10)
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? (310)
3. Посматрајмо један монофазни трансформатор за који је у процесу пројектовања одређена номинална вредност магнетне индукције у језгру (B_m), дужина (l_{Fe}) и попречни пресек (S_{Fe}) магнетног кола. Познат је и начин преклапања лимова магнетног кола и дужина (l_0) и попречни пресек преласка магнетног поља кроз преклопе (S_0). Објаснити начин одређивања активне и реактивне компоненте струје празног хода трансформатора при номиналној индукцији у магнетном колу. Сматрати да се познате све потребне карактеристике материјала магнетног кола, дебљина лимова магнетног кола (d) и учестаност (f). (Т14)
4. Израчунати параметре еквивалентне заменске шема трансформатора са ВН стране и нацртати шему са унетим бројним вредностима свих параметара и електричним величинама. (312)
5. 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? (314)
6. Нацртати дијаграм промене температуре по затвореној контури струјања уља трансформатора. На слици приказати и приближни облик промене температуре намотаја по висини, укључујући и температуру најтоплије тачке. Које компоненте падова температуре су садржане у разликама температуре намотаја и суседног уља, као и у разликама средње температуре уља у хладњаку и температуре спољашњег расхалдног флуида? (Т10)
7. На намотаје примара задатог трансформатора наилази пренапонски талас амплитуде 2 MV . Нацртати општи облик почетне и крајње расподеле пренапона на намотају. Која су критична места и зашто? Колики је максимални потенцијал који се може јавити у току прелазног процеса? (310)
8. Скицирати промену вредности струје кратког споја у три периоде након настанка кратког споја и промену вредности силе на једној локацији у намотају. Скицу дати за случај да једносмерна компонента струје кратког споја износи око 50% вредности коју она постиже у случају да се квар деси у најнеповољнијем тренутку. Посматрати кратак спој до кога је дошло при укључењу трансформатора на мрежу. (Т12)
9. Да ли је напрезање на кидање у дозвољеним границама ($\sigma_d = 10^8 \text{ Pa}$) приликом настанка трополног кратког споја у најнеповољнијем тренутку ако је трансформатор пре кратког споја био неоптерећен? (310)
10. На колико начина се може добити трофазни аутотрансформатор спреге Yу развезивањем и поновним повезивањем намотаја датог трансформатора? Која је спрега повољнија и зашто? За повољнију спрегу израчунати номиналну снагу АТР, максимални могући степен искоришћења снаге, напон кратког споја и минимални напон на његовим секундарним крајевима при номиналном оптерећењу. (310)
11. Навести на који начин се у фази пројектовања врши провера напонске издржљивости трансформатора за простопериодичне напоне мрежне учестаности. Којим конструкционим елементима се остварује напонска издржљивост трансформатора? (Т8)

Испит траје 3 сата. Други колоквијум (задачи 6 до 11) траје 120min. Дозвољено је поседовање само једне вежбанке за рад. Прецртати што није за преглед.

др Зоран Радаковић

1.



2.

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

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

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

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

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

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

3. Предавања, Поглавље 2.

Струја магнећења: одељак 2.2.1.

Активна компонента струје празног хода је једнака количнику губитака и напона. Губици: текст испод слике 2.16. изрази (2.4) – (2.7), израз (2.16) и израз (2.17).

4.

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

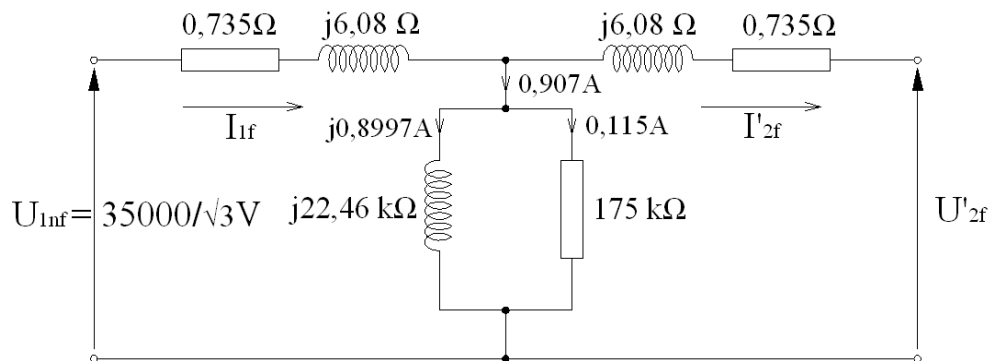
$$I_a = \frac{U_{1nf}}{R_a} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 175 \cdot 10^3} = 0,115 \text{ A}, \quad I_0 = \frac{j_0}{100} \cdot I_{1nf} = \frac{1,1}{100} \cdot 82,48 = 0,907 \text{ A}$$

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

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

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

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



5.

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

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

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

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

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

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

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

6. Предавања, Поглавље 5, слика 5.Б + први пасус одељка 5.2.2.

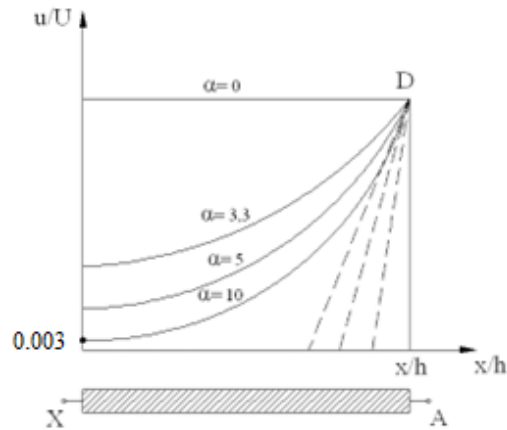
7.

$$U_m = 2MV$$

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

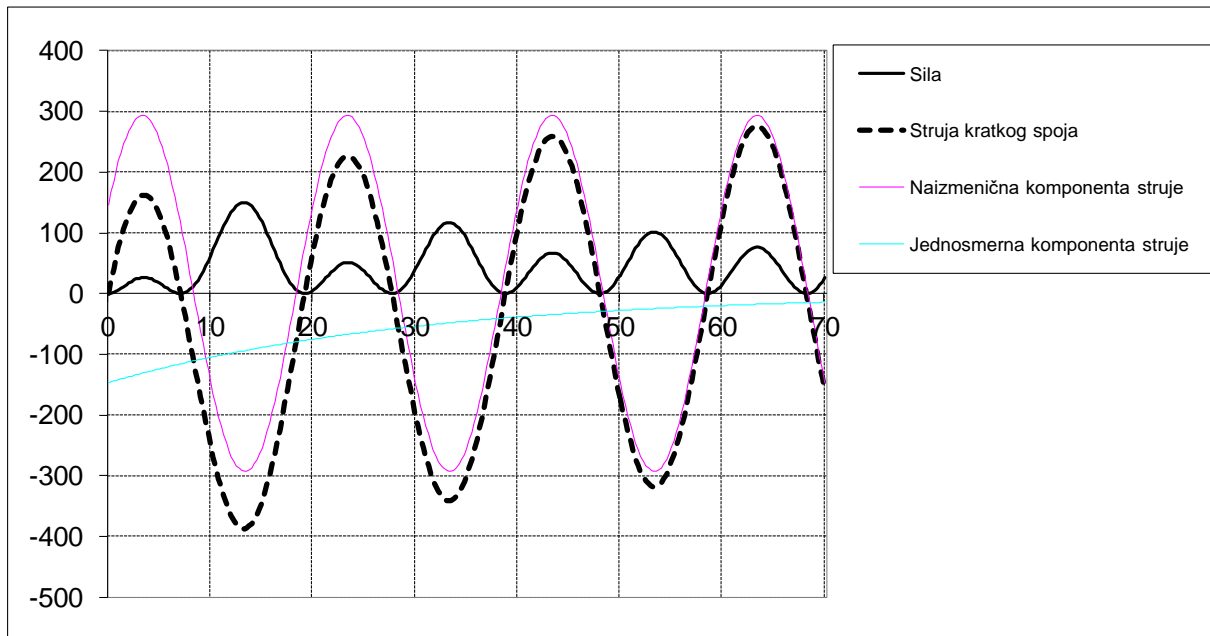
$$U(x=0) = 2 \cdot 10^6 \frac{1}{332,6} = 6014V$$

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



Потенцијал дуж намотаја у стационарном стању (крајња расподела потенцијала) има константну вредност $u(x) = U$.

8.



9.

$$I_{1ku} = \frac{100 \cdot I_{1n}}{u_{k\%}} = \frac{100 \cdot 82,48}{5} = 1649,6A$$

$$\text{најнеповољнији тренутак } \varphi_0 - \varphi_k = -\frac{\pi}{2} \text{ и } t = \frac{\pi}{\omega} :$$

$$I_{1kr} = \sqrt{2} I_{1ku} \left(1 + e^{-\frac{R_k \cdot \pi}{X_k}} \right) = \sqrt{2} \cdot 1649,6 \cdot \left(1 + e^{-\frac{0,6 \cdot \pi}{4,96}} \right) = 2332,9 \cdot 1,684 = 3928,2 \text{ A}$$

$$D_1 = D_2 + b + 2\delta + a = 414 + 46 + 40 + 40 = 540 \text{ mm}$$

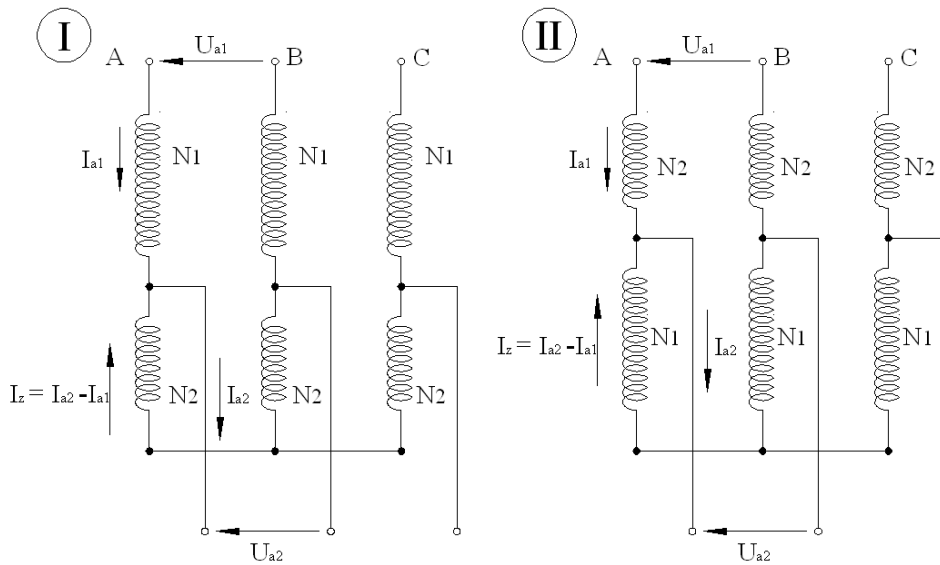
$$k_R = 1 - \frac{a + \delta + b}{\pi h} = 1 - \frac{40 + 20 + 46}{\pi \cdot 650} = 0,948$$

$$F_r = \frac{\mu_0 \pi}{2} \cdot (N_1 I_{kr})^2 \cdot D_1 \cdot \frac{k_R}{h} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot 10^{-7}}{2} \cdot (700 \cdot 3928,2)^2 \cdot \frac{540}{650} \cdot 0,948 = 11,76 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$F_y = \frac{F_r}{\pi \cdot D_1 \cdot N_1} \cdot R_1 = \frac{11,76 \cdot 10^6}{2 \cdot \pi \cdot 700} = 2,674 \text{ kN}, \quad S_{Cu} = \frac{I_{ln}}{j} = \frac{82,48}{3 \cdot 10^6} = 27,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\sigma_r = \frac{F_y}{S_{Cu}} = \frac{2,674 \cdot 10^3}{27,5 \cdot 10^{-6}} = 9,72 \cdot 10^7 \text{ Pa} < \sigma_d = 10^8 \text{ Pa}$$

10.



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

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

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

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

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

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

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

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

11. Предавања, Поглавље 6, одељак 6.3., слика 6.16 са пропратним текстом.