

## ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (ОГЗЕТ)

- јул 2024 -

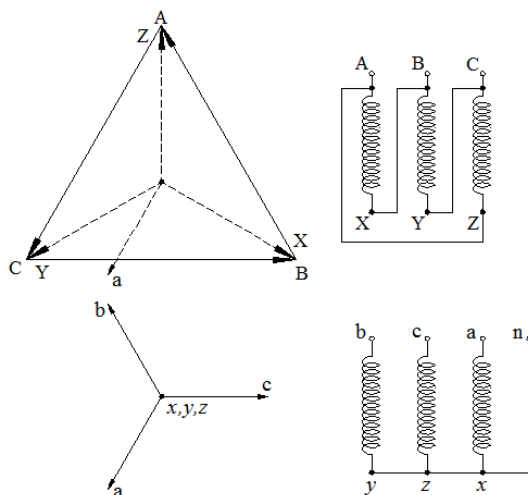
Београд, 30.06.2024.

Трофазни уљни дистрибутивни трансформатор има следеће номиналне податке:  $S_n = 4000 \text{ kVA}$ ,  $U_{1n} / U_{02} = 35 \pm 2 \times 2,5 \% / 10 \text{ kV}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , спрега Dyn7,  $P_0 = 5,34 \text{ kW}$ ,  $j_0 = 0,64 \%$ ,  $P_k = 28 \text{ kW}$ ,  $u_k = 5,8 \%$ . Однос номиналних губитака услед хистерезиса и вихорних струја је  $P_{hn}/P_{vn} = 3$ .

1. Нацртати шеме веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове и означити све крајеве намотаја. (T10)
2. Ако трансформатор треба да ради на мрежи исте ефективне вредности напона, а фреквенције 60Hz, колико процентуално треба променити број навојака примара да би губици у гвожђу били једнаки номиналним уз непромењену индукцију? Штајнмицов коефицијент је 2. (315)
3. Израчунати параметре еквивалентне заменске шеме трансформатора са НН стране. Нацртати шему са унетим бројним вредностима параметара и електричним величинама. (310)
4. Линијски напон секундара износи 9,9 kV при оптерећењу чији је фактор снаге 0,92 индуктивно. Израчунати привидну снагу овог оптерећења као и степен искоришћења снаге трансформатора. Користити упрошћену формулу за пад напона. (310)
5. Нацртати дијаграм промене температуре уља за случај трансформатора са нисконапонским (НН – 1) и високонапонским (ВН – 2) намотајем, за случај да се трансформатор налази у кратком споју, због чега нема протока уља кроз магнетно коло. Вертикална позиција дна намотаја од места уласка хладног уља у суд је различита (за НН намотај износи  $H_{d1}$ , а за ВН намотај износи  $H_{d2}$ , при чему је  $H_{d1} > H_{d2}$ ), као и висина намотаја (за НН намотај износи  $H_{N1}$ , а за ВН намотај износи  $H_{N2}$ ), при чему је  $H_{dN1} + H_{N1} > H_{d2} + H_{N2}$ . Сматрати да је компонента бу-pass-а уља (у суду, поред активног дела) занемарљиво мала. На дијаграму приказати и упрошћени дијаграм промене температуре по висини намотаја, са приказаном температуром најтоплије тачке. (T10)
6. Нацртати заменски шему и написати једначине чијим се решавањем може одредити расподела оптерећења између два паралелно везана трансформатора истих спрега, али различитих преносних односа и импеданси. Сматрати да су познати: а) преносни односи оба трансформатора, б) редне импедансе примара и секундара у заменској шеми трансформатора, в) импеданса оптерећења. Занемарити гране магнетнења. (T10)
7. Нацртати расподелу напона на намотају трансформатора при наиласку пренапона на примарну страну и израчунати највећи напон према маси који се јавља у току прелазног периода ако је амплитуда пренапонског таласа 1 MV. Висина намотаја је  $h = 650 \text{ mm}$ , а корен карактеристичне једначине расподеле пренапона је  $\alpha = 5$ . Која су критична места за изолацију и због чега? (310)
8. Скотов трансформатор чији су напони  $U_1/U_2 = 3 \times 400 / 2 \times 200 \text{ V}$  има струје оптерећења са секундарне стране  $I_a = (20 + j60) \sqrt{3} \text{ A}$  и  $I_b = (40 - j50) \text{ A}$ . Скицирати шему веза намотаја и израчунати струје са примарне стране. Усвојити да је реална оса комплексног координатног система у правцу напона  $\underline{U}_b$ . (310)
9. Из прорачуна магнетног поља добијена је промена вредности аксијалне  $H_a$  и радијалне  $H_r$  компоненте поља по запремини намотаја, на координати  $x, y, z$ , при протицању струје кратког споја  $I$  кроз намотај. Написати изразе за аксијалну  $F_a$  и радијалну  $F_r$  компоненту силе која делује по јединици дужине проводника на позицији  $x, y, z$ . Која компонента силе је релевантна при провери напрезања намотаја на кидање? (T10)
10. Написати израз за израчунавање наизменичне компоненте струје кратког споја у Амперима при двополном кратком споју без споја са земљом на ниженапонској страни трофазног трансформатора снаге  $S_n$ , спрега Dyn, за који су познати номинални линијски напони на ВН страни ( $U_1$ ) и НН страни ( $U_2$ ), као и директна ( $x_d$ ) и нулта ( $x_0$ ) реактанса у релативним јединицама. Занемарити утицај отпорности. Сматрати да су све импедансе елемената мреже занемарљиве у односу на импедансе трансформатора. (T10)

Испит траје 3h. Дозвољено је поседовање само једне свеске за рад и концепт. Прецртати што није за преглед.

1.



2. За номиналне губитке у гвожђу важе следеће релације

$$P_{Fe,n} = P_{hn} + P_{vn} = 5340 \text{ W}, P_{hn}/P_{vn} = 3 \Rightarrow P_{hn} = 0,75P_{Fe,n}, P_{vn} = 0,25P_{Fe,n}$$

Зависност компоненти губитака у гвожђу од ефективне вредности напона и фреквенције напајања може се представити следећим релацијама:

$$P_v = k_v f^2 B_m^2, P_h = k_h f B_m^2 \Rightarrow P_v \sim U^2, P_h \sim \frac{U^2}{f}$$

$$P_v^{60} = P_v^{50} \left( \frac{U_{60}}{U_{50}} \right)^2, P_h^{60} = P_h^{50} \left( \frac{U_{60}}{U_{50}} \right)^2 \left( \frac{50}{60} \right)$$

Из услова да при промењеној учестаности са новим напонем губици у гвожђу требају да буду номинални следи следећи израз:

$$P_v^{50} \left( \frac{U_{60}}{U_{50}} \right)^2 + P_h^{50} \left( \frac{U_{60}}{U_{50}} \right)^2 \left( \frac{50}{60} \right) = P_{Fe,n}$$

$$0,25P_{Fe,n}^{50} \left( \frac{U_{60}}{U_{50}} \right)^2 + 0,75P_{Fe,n}^{50} \left( \frac{U_{60}}{U_{50}} \right)^2 \left( \frac{50}{60} \right) = P_{Fe,n}$$

$$0,25 \left( \frac{U_{60}}{U_{50}} \right)^2 + 0,75 \left( \frac{U_{60}}{U_{50}} \right)^2 \left( \frac{5}{6} \right) = 1$$

Ако се уведе смена:

$$x = \frac{U_{60}}{U_{50}}$$

Добија се следећа израз за x:

$$x = \sqrt{\frac{1}{0,25 + 0,75 \cdot \frac{5}{6}}} = 1,069 \Rightarrow U_{60} = x \cdot U_{50} = 1,069 \cdot 35 = 37,4 \text{ kV}$$

Па је тражена промена броја навојака, за исто  $B_m$ :

$$N'_1 = \frac{N_1 U_{50}}{U_{60}} = \frac{N_1}{x} = 0,935 N_1 \Rightarrow N_1 \searrow 6,5 \%$$

3. ПХ:

$$I_{n2f} = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{02}} = \frac{4000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} = 230,8 \text{ A}$$

$$R_a'' = \frac{U_{02f}^2}{P_{0n}/3} = \frac{U_{02}^2}{P_{0n}} = \frac{10^2 \cdot 10^6}{5340} = 18,73 \text{ k}\Omega \Rightarrow I_{a2f} = \frac{U_{02f}}{R_a} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 18,73 \cdot 10^3} = 0,308 \text{ A}$$

$$I_{02f} = \frac{j_0}{100} \cdot I_{n2f} = 1,477 \text{ A} \Rightarrow I_{\mu 2f} = \sqrt{I_{02f}^2 - I_{a2f}^2} = 1,444 \text{ A}$$

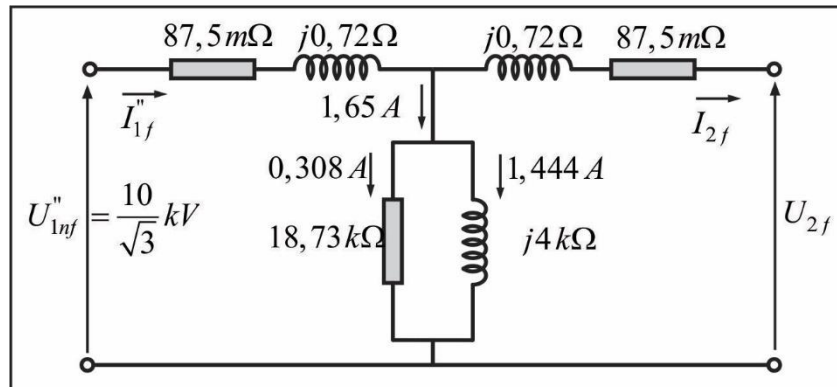
$$X_\mu'' = \frac{U_{02f}}{I_{\mu 2f}} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1,444} \approx 4 \text{ k}\Omega$$

КС:

$$R_k = \frac{P_{kn}}{3 I_{n2f}^2} = \frac{28000}{3 \cdot 230,8^2} = 175 \text{ m}\Omega \Rightarrow R_1'' = R_2 = \frac{R_k}{2} = \frac{175}{2} = 87,5 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \frac{U_{02f}}{I_{n2f}} = \frac{5,8}{100} \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 230,8} = 1,451 \Omega \Rightarrow X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \approx 1,44 \Omega$$

$$\Rightarrow X_{\sigma 1}'' \approx X_{\sigma 2} = \frac{X_k}{2} = 0,72 \Omega$$



4. Тражена привидна снага оптерећења може се добити из израза за познати пад напона трансформатора.

$$U_{2l} = 9,9 \text{ kV}, \cos \varphi = 0,92 \Rightarrow \sin \varphi = 0,392$$

$$u_r = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100 = \frac{28000}{4000 \cdot 10^3} \cdot 100 = 0,7 \%, u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = 5,76 \%$$

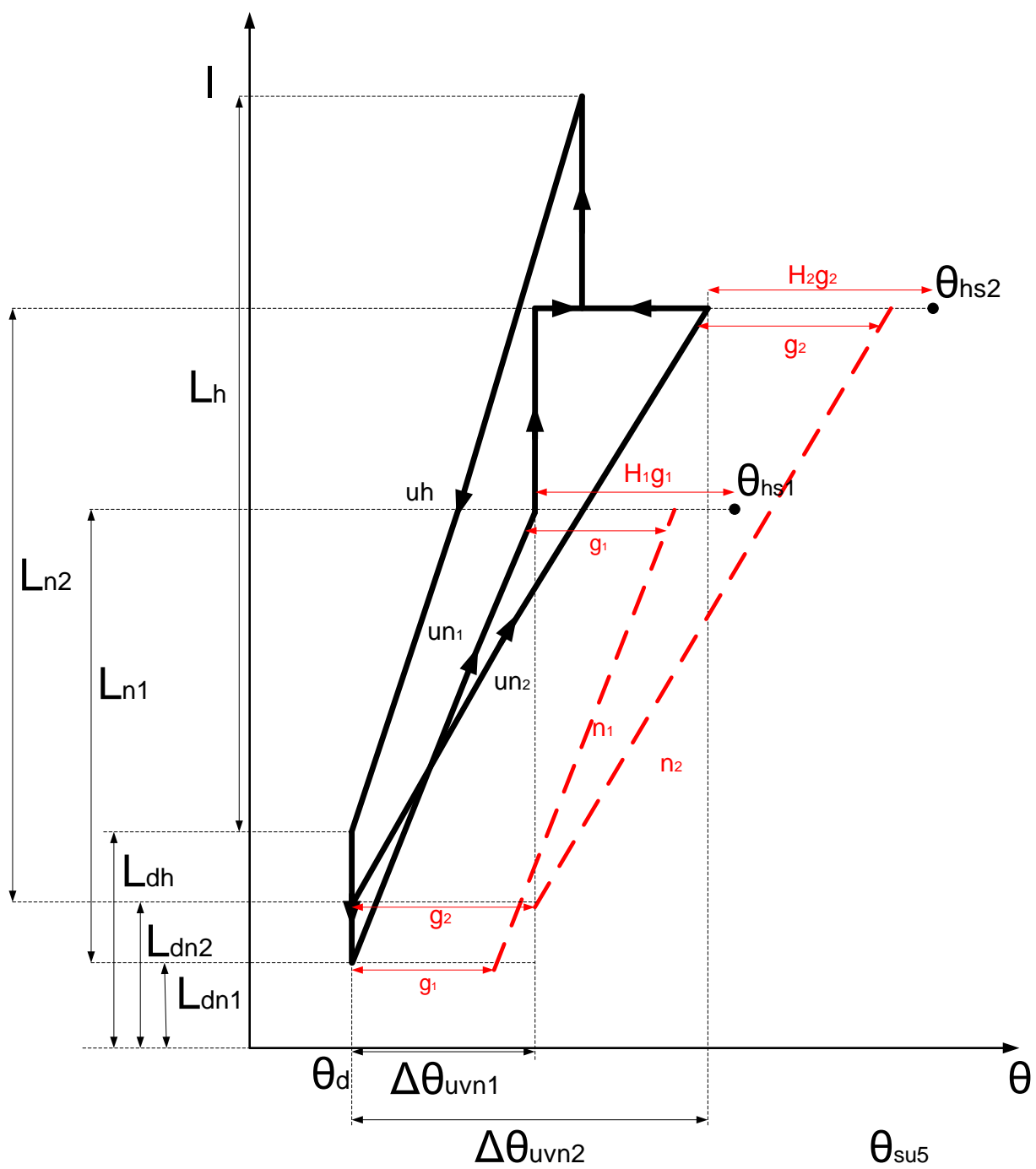
$$\Delta u_{\%} = \left(1 - \frac{U_{2l}}{U_{02l}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{9,9}{10}\right) \cdot 100 = 1 \%$$

$$\Delta u_{\%} = \beta (u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi) \Rightarrow \beta = \frac{\Delta u_{\%}}{u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi} = \frac{1}{0,7 \cdot 0,92 + 5,76 \cdot 0,392} \approx 0,345$$

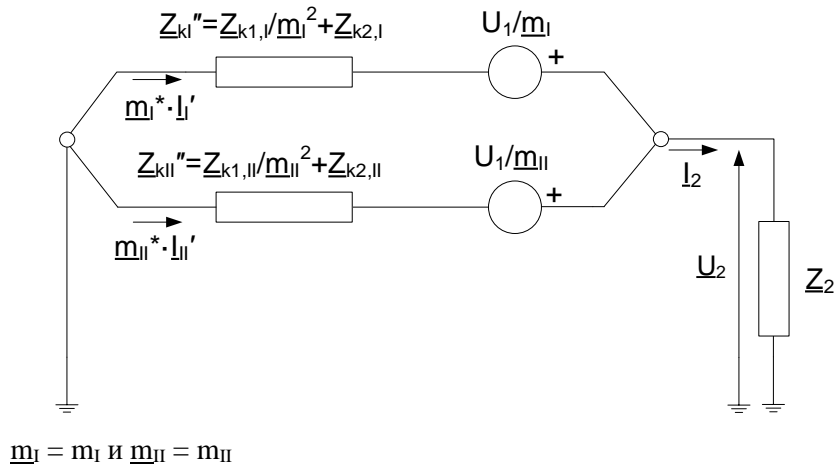
$$S_p = 0,345 \cdot 4000 \cdot 10^3 = 1378 \text{ kVA}$$

$$\eta = \frac{S_p \cos \varphi}{S_p \cos \varphi + \beta^2 P_{kn} + P_{0n}} = \frac{1378 \cdot 0,92}{1378 \cdot 0,92 + 0,345^2 \cdot 28 + 5,34} = 99,33 \%$$

5. Предавања, поглавље 5., слика 5.9.



6. Заменска шема сведена на ниженапонску страну (предавања, поглавље 7, слика 7.2):



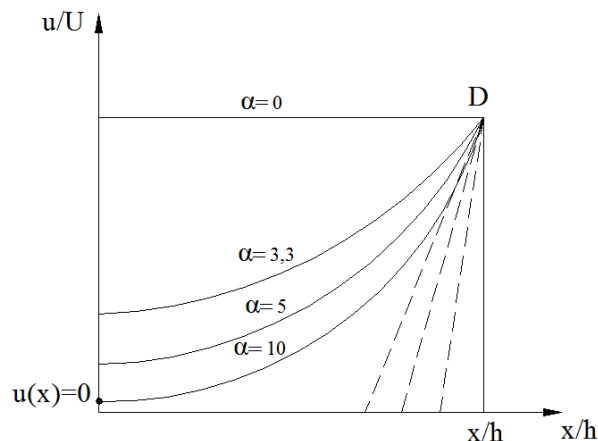
$$\underline{Z}_{kI}'' m_I I_I' - \frac{U_1}{m_I} = \underline{Z}_2 (I_I' + I_{II}')$$

$$\underline{Z}_{kII}'' m_{II} I_{II}' - \frac{U_1}{m_{II}} = \underline{Z}_2 (I_I' + I_{II}')$$

7. Највећи напон се јавља на крају неуземљеног намотаја у току прелазног режима када постоје осцилације:

$$U_m = 2U - u(x=0) = 2U - \frac{Uch(\alpha \cdot 0)}{ch(\alpha h)} = 2 - \frac{1}{ch(5 \cdot 0,65)} = 1,922 \text{ MVA}$$

У овој тачки је угрожена изолација намотаја према маси јер се у њој јавља највећи напон према маси у току прелазног процеса. Друго место је почетак намотаја где се јавља највећи градијент напона па је угрожена међузавојна изолација.



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

$$L_A \frac{\sqrt{3}}{2} N_1 = L_a N_2 \Rightarrow L_A = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1} L_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{200}{400} \cdot (20 + j60)\sqrt{3} = (20 + j60) \text{ A}$$

$$\left. \begin{aligned} I_B \frac{N_1}{2} - I_C \frac{N_1}{2} &= N_2 I_b \\ I_A + I_B + I_C &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow I_B = \frac{1}{2}(I_b - I_A), \quad I_C = -\frac{1}{2}(I_A + I_b)$$

$$I_B = \frac{1}{2}(40 - j50 - 20 - j60) = (10 - j55) \text{ A}$$

$$I_C = -\frac{1}{2}(20 + j60 + 40 - j50) = (-30 - j5) \text{ A}$$

**9.** Предавања, поглавље 6., страна 13

За проверу напрезања намотаја на кидање је релевантна радијална компонента силе.

**10.** Предавања, Поголавље 9, односно страна 557 из књиге [1], при чему је:

$$V_F = \frac{U_2}{\sqrt{3}}$$

$$X_1 = X_2 = x_d \frac{U_2^2}{S_n}$$

$$X_0 = x_0 \frac{U_2^2}{S_n}$$

$$Z_F = 0$$