

ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13E013ЕНТ)

- септембар 2022 -

Београд, 16.09.2022.

Трофазни уљни дистрибутивни трансформатор има следеће номиналне податке: $S_n = 4000$ kVA, $U_{1n} / U_{02} = 35 \pm 2 \times 2,5 \% / 10$ kV, $f = 50$ Hz, спрега Dyn7, $P_0 = 5,34$ kW, $j_0 = 0,64$ %, $P_k = 28$ kW, $u_k = 5,8$ %. Однос номиналних губитака услед хистерезиса и вихорних струја је $P_{hm} / P_{vn} = 3$. Висина оба намотаја је приближно иста и износи 650 mm, а корен карактеристичне једначине за израчунавање расподеле пренапона је $\alpha = 5$.

1. Нацртати шеме веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове и означити све прикључне крајеве намотаја. (Т8)
2. Како код трансформаторима са кружним намотајима на количину потребног материјала утиче испуна кружног простора магнетним лимом? Сматрати да је пројектант усвојио потребан пресек магнетног кола и попречни пресек проводника. (Т6) Нашта утиче начин слагања лимова магнетног кола? (Т4)
3. 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. (310)
4. Израчунати параметре еквивалентне заменске шеме трансформатора са НН стране. Нацртати шему са унетим бројним вредностима параметара и електричним величинама. (310)
5. Које су значајне компоненте губитака које постоје при огледу кратког споја? Због чега су губици у магнетном колу мали, па се последично могу занемарити? Који је практични разлог да се губици у огледу кратког споја мере на хладном трансформатору (при температури амбијента), а затим прерачунавају на радну температуру при номиналном оптерећењу)? (Т12)
6. Линијски напон секундара износи 9,9 kV при оптерећењу чији је фактор снаге 0,92. Израчунати привидну снагу овог оптерећења као и степен искоришћења снаге трансформатора. Користити упрошћену формулу за пад напона. (310)
7. Полазећи од тога да су познате вредности температуре вруће тачке на сваких минут времена, написати израз из кога се одређује релативна вредност старења у току годину дана. Сматрати да се интензитет старења удвостручује при порасту температуре за 6°C, а да се нормално старење има при температури 110°C. (Т6) Које параметре је потребно узети у обзир за тачније процене интензитета старења? (Т4)
8. Нацртати расподелу напона 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. Која су критична места за изолацију и због чега? (310)
9. Нацртати шему веза намотаја Скотовог трансформатора чији су напони $U_1 / U_2 = 3 \times 400 / 2 \times 200$ V. Ако су струје оптерећења са секундарне стране $I_a = (20 + j60)$ A и $I_b = (40 - j50)$ A израчунати струје са примарне стране. Реална оса комплексног координатног система је у правцу напона U_b . (310)
10. За један тронамотајни трофазни трансформатор 110kV/6kV/6kV, спреге Ynd5d5 у огледу кратког споја су одређене вредности импеданси, сведене на напонски ниво 110kV: за директни и инверзни редослед Z_{VN-NN1} , Z_{VN-NN2} , $Z_{NN1-NN2}$ и за нулти редослед, посматрано са ВН стране $Z_{0VN-NN1,NN2}$. Нацртати заменску шему трансформатора за директни, инверзни и нулти систем. Сматрати да је звездиште идеално уземљено (отпорност уземљивача једнака нули). (Т10)

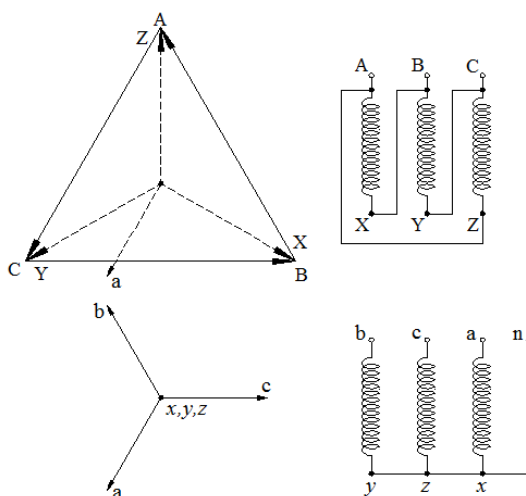
Испит траје 180 min. Дозвољено је поседовање само једне свеске за рад и концепт. Прецртати оно што није за преглед.

др Зоран Радаковић
др Зоран Лазаревић

РЕШЕЊА

16.09.2022.

1.



2. Степен испуне простора магнетним лимом утиче на унутрашњи пречник намотаја (са повећањем степена испуне смањује се унутрашњи пречник намотаја). Смањење пречника значи смањење обима навојака, што значи и смањење потребна количина бакра и цене израде трансформатора, као и губитака услед смањења отпора. Начин слагања лимова утиче на укупну вредност магнетног отпора, а тиме и на струју магнећења и реактивну снагу потребну за магнећење магнетног кола.

3. 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 :

$$N_1' = \frac{N_1 U_{60}}{U_{50}} = x \cdot N_1 = 1,069 N_1 \Rightarrow N_1 \nearrow 6,9 \%$$

4. ПХ:

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

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

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

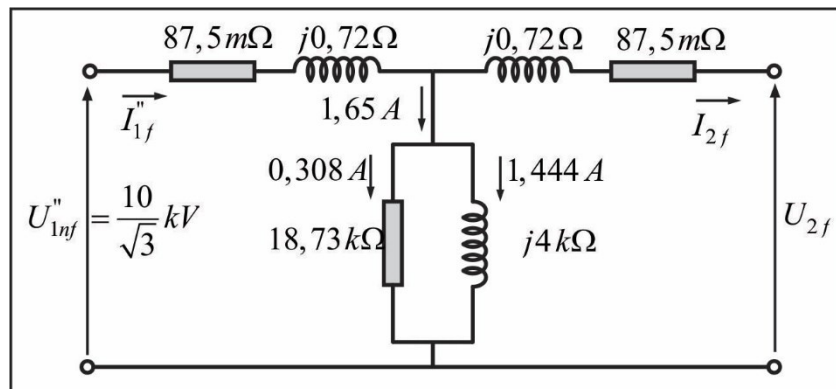
$$X_{\mu}'' = \frac{U_{02f}}{I_{\mu 2f}} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1,444} \approx 4 \text{ k}\Omega$$

КС:

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

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

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



5. Губици до којих доводи протицање струје кроз намотаје трансформатора у кратком споју се јављају у намотајима (ускед протицања главне струје и циркулационе струје у намотају) и губитака у конструкционим деловима трансформатора и суду, који настају као поседица расутог флукса.

Губици у магнетном колу су мали јер је мали флукс (а тиме и магнетна индукција) у магнетном колу.

Потребно је дуго време (10-так сати) и значајна електрична енергија да се трансформатор загреје до радне температуре (поступак који се користи при извођењу типског огледа загревања).

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

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

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

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

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

$$S_p = 0,345 \cdot 4000 \cdot 10^3 = 1378,4 \text{ kVA}$$

$$\eta = \frac{S_p \cos\varphi}{S_p \cos\varphi + \beta^2 P_{kn} + P_{0n}} = \frac{1378,4 \cdot 0,92}{1378,4 \cdot 0,92 + 0,345^2 \cdot 28 + 5,34} = 99,32 \%$$

7.

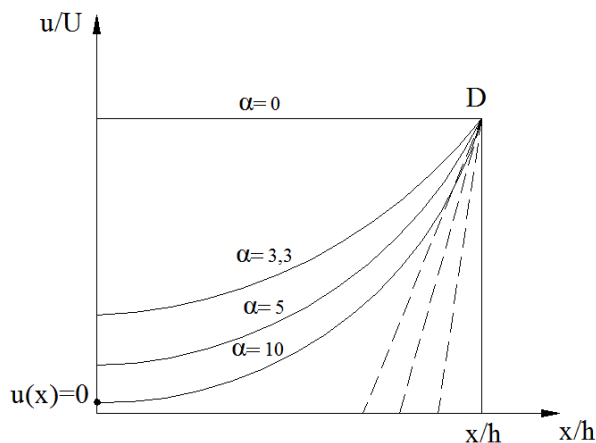
$$RS = \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 60} \sum_{i=1}^{365 \cdot 24 \cdot 60} 2^{\frac{\vartheta_{vt} - 110^\circ C}{6}}$$

Релевантни параметри који утичу на интензитет старења: влага, кисеоник и присуство киселина.

8. 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.



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

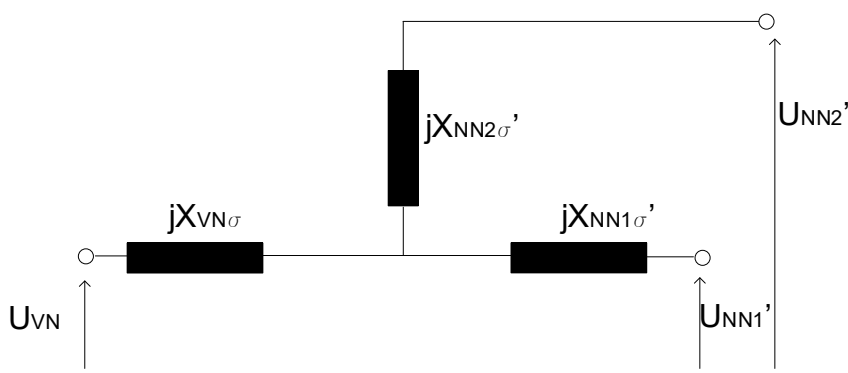
$$I_A \frac{\sqrt{3}}{2} N_1 = I_a N_2 \Rightarrow I_A = \frac{2 N_2}{\sqrt{3} N_1} I_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{200}{400} \cdot (20 + j60)\sqrt{3} = (20 + j60) A$$

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

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

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

10.

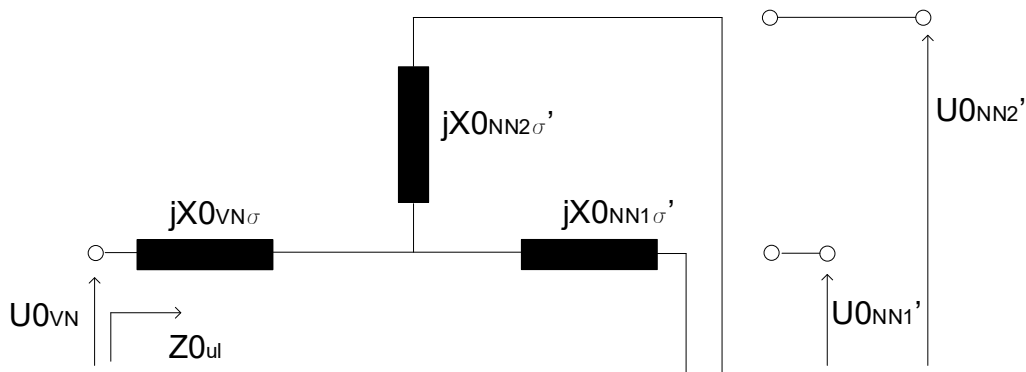


$$X_{VN\sigma} = \frac{1}{2} (X_{VN-NN1} + X_{VN-NN2} - X_{NN1-NN2})$$

$$X'_{NN1\sigma} = \frac{1}{2} (X_{VN-NN1} + X_{NN1-NN2}' - X_{VN-NN2})$$

$$X'_{NN2\sigma} = \frac{1}{2} (X_{VN-NN2} + X_{NN1-NN2}' - X_{VN-NN2})$$

Нулни систем



$$Z_{0ul} = Z_{0VN-NN1,NN2}$$