

ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13E013ЕНТ, 19E013ЕНТ)

- септембар 2023 -

Београд, 18.9.2023.

Трофазни уљни дистрибутивни трансформатор са номиналним подацима: $S_n = 8 \text{ MVA}$, $U_1 / U_{20} = 35 \pm 2 \times 2,5\% / 10,5 \text{ kV}$, 50 Hz , спрега $Dz4$, хлађење $ONAN$, $S_{Fe} = 1084 \text{ cm}^2$, $B_m = 1,67 \text{ T}$, испитиван је у огледима празног хода и кратког споја на температури 75°C при чему је измерено: $U_0 = 10,5 \text{ kV}$, $I_0 = 2,81 \text{ A}$, $P_0 = 8670 \text{ W}$, $U_k = 2060 \text{ V}$, $I_k = I_{In}$, $P_{kn} = 49,1 \text{ kW}$.

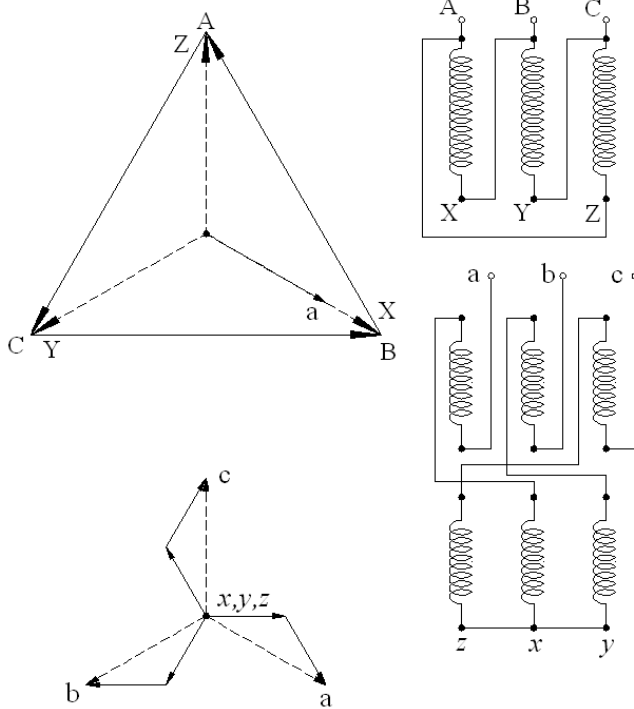
1. Нацртати шеме веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове и означити све прикључне крајеве намотаја.
2. Израчунати стварне отпорности фазних намотаја које треба да се добију мерењем једносмерном струјом на 20°C , ако се зна да је $R_{lf, DC} / R'_{2f, DC} = 5/4$. Колики су додатни губици намотаја при средњој температури намотаја од 60°C ? Филдов сачинилац који је исти за оба намотаја износи $K_{Fn} = 1,06$.
3. Израчунати параметре еквивалентне заменске шеме на ВН страни и нацртати је са уписаним бројним вредностима свих параметара и електричним величинама. Уколико нисте решили задатак 2 можете сматрати да је $R_{lf, DC} / R'_{2f, DC} = 1$.
4. Написати израз за степен искоришћења снаге при оптерећењу трансформатора β . Сматрати да се термичким прорачунима може одредити функционална зависност средње температуре бакарних намотаја ϑ_{Cu} од оптерећења $\vartheta_{Cu}(\beta)$, као и конструкционих делова $\vartheta_{konst}(\beta)$. Познате су вредности номиналних губитака у намотајима P_{k75} (при номиналној струји и средњој температури 75°C) и однос $\vartheta_{улових}$ и укупних губитака k_f у намотајима при 75°C . Сматрати да губици у магнетном колу не зависе од β и да су једнаки номиналним губицима у празном ходу P_{on} . Позната је вредност губитака у конструкционим деловима трансформатора при номиналном оптерећењу P_{konstn} (тада њихова температура износи ϑ_{konstn}) као то да они расту са квадратом оптерећења и да су обрнуто сразмерни електричној отпорности конструкционих делова, за коју сматрати да се са температуром мења као специфична отпорност бакра.
5. Трансформатор сличне конструкције као задати има све линеарне димензија веће за 20% , а исти пораст температуре и коефицијент одношења топлоте. Известити изразе и израчунати стварне вредности следећих величина другог трансформатора: губици, струја и напон примара, максимална индукција и снага?
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, а које у разликама температуре уља у хладњаку и температуре спољашњег расхладног флуида на истој висинској позицији?
7. Колики је однос времена успостављања струје празног хода у односу на струју кратког споја овог трансформатора? Да ли је повољније (уз коментар) да се овај трансформатор укључује у празан ход са ВН или са НН стране? Како то утиче на тражени однос времена?
8. Навести 5 конструкционих величина једног проводника у намотају ослоњеног на аксијални одстојник од којих зависи његова механичка издржљивост на савијање услед радијалне силе.
9. Који је критеријум који се мора задовољити при пројектовању трансформатора како би се обезбедило да не дође до пробоја услед напона мрежне учестаности. Да ли је у анализе потребно укључити само чврсту изолацију, или и чврсту изолацију и уље? Навести три елемента конструкције којима се може остварити изолациони систем потребних карактеристика.
10. Колики ће бити напон секундара аутотрансформатора добијеног превезивањем задатог за напоне $41,06/6,06 \text{ kV}$, а који се привремено оптерети снагом 11 MVA при фактору снаге $\cos\phi = 0,8 \text{ кап.}$?

Испит траје **180 min**. Сваки од задатака **2, 3, 5, 7 и 10** и теоријских питања, доноси максимално **10** поена. Дозвољено је поседовање само једне вежбанке. Прецртати оно што није за преглед.

РЕШЕЊА

18.9.2023.

1.



2.

$$I_{1nf} = \frac{S_n}{3 \cdot U_{1n}} = \frac{8 \cdot 10^6}{3 \cdot 35 \cdot 10^3} = 76,19 \text{ A}$$

$$P_{Cu}^{75} = \frac{P_{kn}}{K_{Fn}} = \frac{49100}{1,06} = 46,32 \text{ kW} \Rightarrow P_{dn} = P_{kn} - P_{Cu}^{75} = 2780 \text{ W}$$

$$P_{Cu}^{20} = P_{Cu}^{75} \cdot \frac{255}{310} = 38,1 \text{ kW} \Rightarrow R_{Cu}^{20} = \frac{P_{Cu}^{20}}{3 \cdot I_{1nf}^2} = \frac{38100}{3 \cdot 76,19^2} = 2,188 \Omega$$

$$R_{1f=}^{20} = \frac{5}{9} \cdot 2,188 = 1,216 \Omega; \quad R_{2f=}^{20} = \frac{4}{9} \cdot 2,188 = 0,972 \Omega$$

$$R_{2f=}^{20} = R_{2f=}^{20} \cdot \left(\frac{U_{02f}}{U_{1nf}} \right)^2 = 0,972 \cdot \left(\frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 35} \right)^2 = 0,0292 \Omega$$

$$P_d^{60} = P_{dn} \cdot \frac{310}{295} = 2780 \cdot \frac{310}{295} = 2921 \text{ W}$$

3. ПХ:

$$U_0 = U_{02} = 10,5 \text{ kV} \Rightarrow R_a' = \frac{U_{1nf}^2}{P_{0n}/3} = \frac{3 \cdot 35^2 \cdot 10^6}{8,67 \cdot 10^3} = 423,9 \text{ k}\Omega$$

$$I_a' = \frac{U_{1nf}}{R_a'} = \frac{35 \cdot 10^3}{423,9 \cdot 10^3} = 0,0826 \text{ A};$$

$$I_0 = I_{0f} = 2,81 \text{ A} \Rightarrow I_0' = 2,81 \cdot \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 35} = 0,4867 \text{ A} \Rightarrow I_\mu' = \sqrt{I_0'^2 - I_a'^2} = 0,4796 \text{ A}$$

$$X'_{\mu} = \frac{U_{1nf}}{I'_{\mu}} = \frac{35 \cdot 10^3}{0,4796} = 72,97 \text{ k}\Omega$$

КС:

$$R_{1f=}^{75} = R_{1f=}^{20} \cdot \frac{310}{255} = 1,216 \cdot \frac{310}{255} = 1,478 \Omega; R_{2f=}^{75} = R_{2f=}^{20} \cdot \frac{310}{255} = 0,972 \cdot \frac{310}{255} = 1,182 \Omega$$

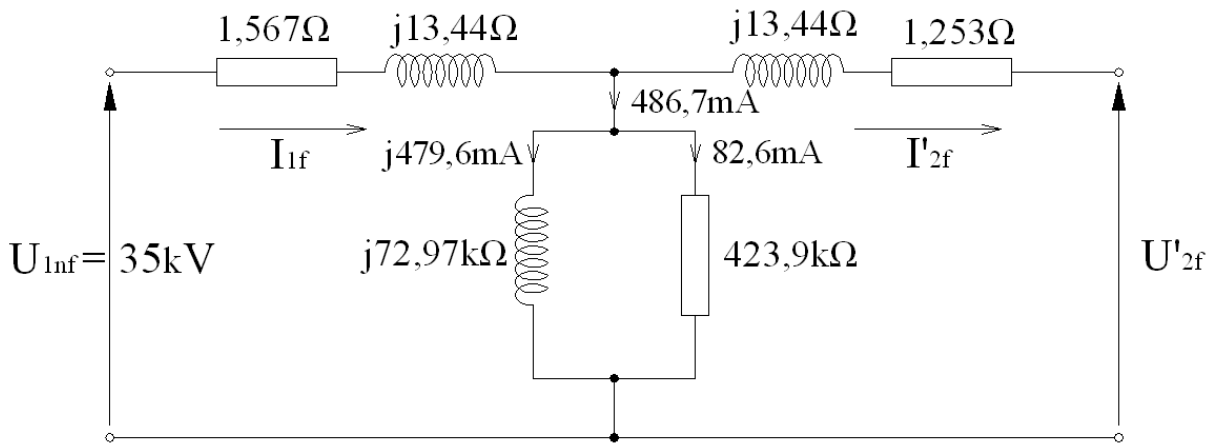
$$R_{1f\sim}^{75} = k_F \cdot R_{1f=}^{75} = 1,06 \cdot 1,478 = 1,567 \Omega; R_{2f\sim}^{75} = k_F \cdot R_{1f=}^{20} = 1,06 \cdot 1,182 = 1,253 \Omega$$

$$R_k^{75} = 2,82 \Omega$$

Напомена: Вредност R_k^{75} је могуће израчунати и директно из података добијених у огледу КС.

$$Z_k = \frac{U_{kf}}{I_{kf}} = \frac{U_{kf}}{I_{1nf}} = \frac{2060}{76,19} = 27,04 \Omega$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 26,89 \Omega \Rightarrow X_{\sigma 1} \approx X_{\sigma 2}'' = \frac{X_k}{2} = 13,44 \Omega$$



4.

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi}{\beta S_n \cos \varphi + P_{\gamma}}$$

$$P_{\gamma} = \beta^2 \left(\frac{235 + \vartheta(\beta)}{235 + 75} k_J P_{k75} + \frac{235 + 75}{235 + \vartheta(\beta)} (1 - k_J) P_{k75} + \frac{235 + \vartheta_{konstn}}{235 + \vartheta_{konst}(\beta)} P_{konstn} \right) + P_{on}$$

5. $\theta_{mn}, \alpha = \text{const } l_1/l_2 = k = 1,2$

$$\theta_{mn} = \frac{\Sigma P_{\gamma}}{\Sigma \alpha S} \Rightarrow \Sigma P_{\gamma} \sim k^2 \Rightarrow \Sigma P_{\gamma} = k^2 (P_{kn} + P_{on}) = 1,2^2 (49,1 + 8,67) = 83,19 \text{ kW}$$

$$I = \sqrt{\frac{P_k}{R}} \sim k^{\frac{3}{2}} \Rightarrow I'_{1n} = k^{\frac{3}{2}} I_{1n} = 1,2^{\frac{3}{2}} \cdot 76,19 = 100,15 \text{ A}$$

$$B_m = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{V}} \sim \frac{1}{\sqrt{k}} \Rightarrow B'_m = \frac{B_m}{\sqrt{k}} = \frac{1,67}{\sqrt{1,2}} = 1,52 \text{ T}$$

$$U \sim \Phi_m = B_m S_{Fe} \sim k^{\frac{3}{2}} \Rightarrow U'_{1n} = k^{\frac{3}{2}} U_{1n} = 1,2^{\frac{3}{2}} \cdot 35 = 46 \text{ kV}$$

$$S_n \sim UI \sim k^3 \Rightarrow S'_n = k^3 S_n = 1,2^3 \cdot 8 = 13,8 \text{ MVA}$$

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

$$7. n = \frac{4T_0}{4T_k} = \frac{X_\mu / R_1 \omega}{X_k / R_k \omega} \approx 2 \frac{X_\mu}{X_k} = 2 \frac{72,97 \cdot 10^3}{26,89} = 5427$$

$$\frac{I_{0mVN}}{I_{0mNN}} = \frac{S_{Fe}/S_{0VN}}{S_{Fe}/S_{0NN}} = \frac{S_{0NN}}{S_{0VN}} < 1 \Rightarrow \text{повољније је са ВН стране}$$

Времена остају иста

8. Одговор на питање: Ширина проводника, висина проводника, пречник навојка, број аксијалних одстојника и ширина аксијалних одстојника.

Напомена: Напрезање проводника на савијање зависи и од вредности радијалне силе, која је одређена вредношћу магнетног поља на месту проводника. Расподела магнетног поља у простору намотаја зависи од вредности струје и геометрије целокупног намотаја.

9. Вредност електричног поља мора бити мања од вредности пробојног електричног поља. Дакле, избором (пројектовањем) уљних канала и изолационих елемената треба остварити довољно ниске вредности електричног поља у уљу и у чврстој изолацији. До расподеле електричног поља се долази прорачунски, са геометријом и карактеристикама материјала, као и напонима између различитих намотаја, као и између намотаја и масе, као улазним параметрима. Елементи конструкције којима се може остварити изолациони систем потребних карактеристика: 1) Изолација самих проводника, 2) Профилисани изолациони делова који се стављају на проводник у зонама великих поља (на пример спољашњи горњи угао проводника на врху намотаја), 3) Изолациони цилиндри између делова трансформатора (на пример између стуба магнетног кола и намотаја или између два намотаја), 4) Профилисани изолациони елемената, пре свега између врха / дна намотаја и јарма трансформатора, 5) Метални (еквипотенцијални) прстенови који служе за обликовање потенцијала – на пример у зони изнад намотаја, како би се умањили ивични ефекти, односно појава великих вредности електричног поља у зони углова.

$$10. S_a = \frac{n_a}{n_a - 1} \cdot S_{nT} = \frac{41,06}{41,06 - 6,06} \cdot 8 = 9,38 MVA; \beta = \frac{11}{9,38} = 1,172$$

$$u_{ka} = \frac{S_{nT}}{S_a} \cdot u_k = \frac{8}{9,38} \cdot 5,88 = 5,01\%; u_{ra} = \frac{P_{kn}}{S_a} \cdot 100 = \frac{49,1}{9,38 \cdot 10^3} \cdot 100 = 0,523\%$$

$$u_{xa} = \sqrt{u_{ka}^2 - u_{ra}^2} = 4,98\%$$

$$a_a = \beta(u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi) = 1,172 \cdot (0,523 \cdot 0,8 - 5,01 \cdot 0,6) = -3,03\%$$

$$b_b = \beta(u_x \cos \varphi - u_r \sin \varphi) = 1,172 \cdot (5,01 \cdot 0,8 + 0,523 \cdot 0,6) = 5,06\%$$

$$\Delta u_a = a_a + \frac{b_a}{200} = -3,03 + \frac{5,06^2}{200} = -2,9\%$$

$$U_2 = \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right) \cdot U_{02} \approx 6236V$$