

# ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13E013ЕНТ, 19E013ЕНТ)

- август 2024 -

Београд, 1.09.2024.

Трофазни енергетски уљни трансформатор са номиналним подацима:  $S_n = 5 \text{ MVA}$ ,  $U_1 / U_{02} = 35 / 6,3 \text{ kV}$ ,  $50 \text{ Hz}$ , спрега  $Yd5$ ,  $u_k = 5 \%$ ,  $j_0 = 1 \%$ ,  $P_{kn} = 28 \text{ kW}$ ,  $P_{0n} = 6,5 \text{ kW}$ , има висину оба намотаја  $h = 650 \text{ mm}$ , корен карактеристичне једначине за израчунавање расподеле пренапона  $\alpha = 5$  и номинални пораст температуре горњег уља  $55 \text{ K}$ .

1. Нацртати шеме веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове и означити почетке и крајеве намотаја. (Т)
2. Скицирати „3/0“ и „3/2“ облике магнетног кола. Који се ефекат постиже у погледу магнетних карактеристика трансформатора увођењем два додатна повратна стуба код „3/2“ облика? (Т)
3. Проценити укупну површину попречног пресека магнетског кола ако је максимална вредност индукције  $B_m = 1,7 \text{ T}$ , број навојака примара  $N_1 = 700$ , а коефицијент испуне гвожђем  $0,95$ . Какав је облик пресека магнетског кола енергетских трансформатора? (З)
4. Мерењем отпорности намотаја трансформатора на  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  измерена је 30 пута већа отпорност између примарних прикључака него између секундарних. Израчунати фазне отпорности на референтној температури ако је Филдов сачинилац исти за оба намотаја и износи  $k_F = 1,015$ . (З)
5. Израчунати параметре еквивалентне заменске шеме трансформатора са ВН стране. Нацртати шему са унетим бројним вредностима параметара и електричним величинама. (З)
6. Колико дуго може да ради трансформатор, а да не пређе номинални пораст температуре горњег уља ако му је једна фаза оптерећена снагом од  $2 \text{ MVA}$ , а преостале две снагом од по  $1,6 \text{ MVA}$  свака. Сматрати да је трансформатор претходно био неоптерећен и да је временска константа загревања горњег уља  $2,5 \text{ h}$ . (З)
7. За један трансформатор је извршен прорачун и добијена дводимензионална расподела аксијалне и радијалне компоненте магнетног поља у простору који заузима намотај при протицању струје кратког споја  $I$ . Колико износи површински притисак на одстојнике који формирају аксијалне канале за хлађење? Сматрати да су познати сви потребни параметри трансформатора, као и да се вредност магнетног поља не мења по обиму навојка.
8. Ако је задати трансформатор превезан тако да формира аутотрансформатор спреге  $Yy$ , израчунати максималну трајну снагу коју може да пренесе у том случају као и процентуалну вредност максималног пада напона при номиналном оптерећењу. Користити упрошћену формулу за пад напона. (З)
9. Колика је максимална вредност напона који се јавља у намотају примара задатог трансформатора при наиласку пренапонског таласа амплитуде  $2 \text{ MV}$ ? Која су критична места у погледу изолације и зашто? (З)
10. Колико износи струја која ће протећи кроз намотаје два паралелно везана трансформатора ( $T1$  и  $T2$ ) који имају исте спреге, сатни број, преносни однос и импедансе кратког споја, у случају да је извршено погрешно повезивање прикључних крајева трансформатора и А, В, С фаза мреже (прикључак крајева ВН намотаја:  $AT1-A$ ,  $BT1-B$ ,  $CT1-C$ ;  $BT2-A$ ,  $CT2-B$ ,  $AT2-C$ )? Посматрати неоптерећен трансформатор. Занемарити гране магнетовања. Сматрати да су познати сви потребни параметри трансформатора. (Т)

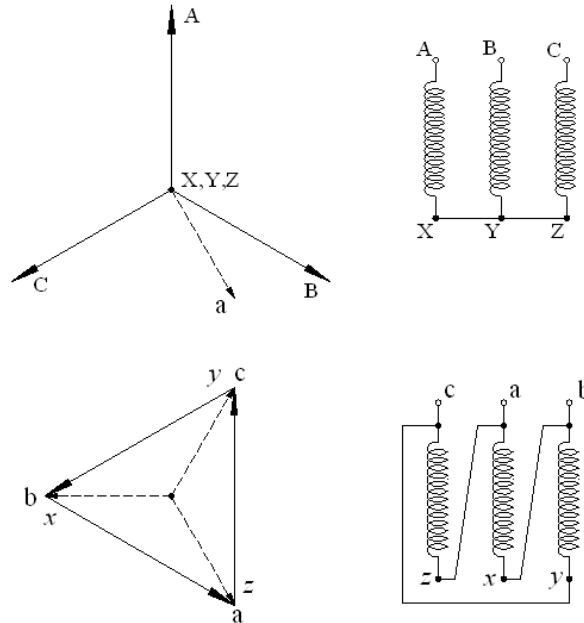
Испит траје 3h. Дозвољено је поседовање само једне свеске за рад и концепт. Прецртати што није за преглед. Максимални број поена за свако од 10 питања је 10.

## РЕШЕЊА

- август 2024 -

1.09.2024.

1.



2. Предавања, поглавље 2., слика 2.7.

Увођењем два додатна повратна стуба код „3/2“ облика магнетног кола смањује се магнетни отпор на путу флукса који се појављује у случају несиметричних трофазних режима или триплних хармоника који имају исте вредности у све три фазе трофазног система.

3.

$$S_{Fe} = \frac{U_{1f}}{4,44 N_1 f B_m k_{Fe}} = \frac{35000/\sqrt{3}}{4,44 \cdot 700 \cdot 50 \cdot 1,7 \cdot 0,95} \approx 805 \text{ cm}^2$$

- вишеструки крстаст пресек

4. Отпорности између прикључних крајева намотаја на 20°C су у односу  $R_1^{20} = 30R_2^{20}$ . Отпорности при једносмерној струји али на 75°C могу се представити следећим формулама:

$$R_{1f,DC}^{75} = \frac{R_1^{20}}{2} \cdot \frac{310}{255} = 15R_2^{20} \cdot 1,22$$

$$R_{2f,DC}^{75} = \frac{3 \cdot R_2^{20}}{2} \cdot \frac{310}{255} = 1,5R_2^{20} \cdot 1,22$$

Губици на 75°C при наизменичном напајању могу се представити преко отпорности које су дате горњим једначинама:

$$P_{kn}^{75} = 3k_F \cdot (15R_2^{20} \cdot 1,22 \cdot I_{1nf}^2 + 1,5R_2^{20} \cdot 1,22 \cdot I_{2nf}^2)$$

Одавде је:

$$R_2^{20} = \frac{28000}{3 \cdot 1,015 \cdot (15 \cdot 1,22 \cdot 82,5^2 + 1,5 \cdot 1,22 \cdot 264,6^2)} = 0,03652 \Omega$$

Па су:

$$R_{1f,DC}^{75} = 15R_2^{20} \cdot 1,22 = 0,667 \Omega$$

$$R_{2f,DC}^{75} = 1,5R_2^{20} \cdot 1,22 = 0,0667\Omega$$

Тражене отпорности намотаја на 75°C при наизменичном напајању су:

$$R_{1f,AC}^{75} = 1,015 \cdot R_{1f,DC}^{20} = 0,676 \Omega$$

$$R_{2f,AC}^{75} = 1,015 \cdot R_{2f,DC}^{20} = 0,0676\Omega$$

## 5. ПХ:

$$I_{1nf} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{1n}} = \frac{5000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3} = 82,5 A$$

$$R_a = \frac{U_{1nf}^2}{P_{0n}/3} = \frac{35^2 \cdot 10^6}{6500} = 188,5 k\Omega \Rightarrow I_{a1} = \frac{U_{1nf}}{R_a} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 188,5 \cdot 10^3} = 0,107 A$$

$$I_{01} = \frac{j_0}{100} \cdot I_{1nf} = 0,825 A \Rightarrow I_{\mu 1} = \sqrt{I_{01}^2 - I_{a1}^2} = 0,818 A$$

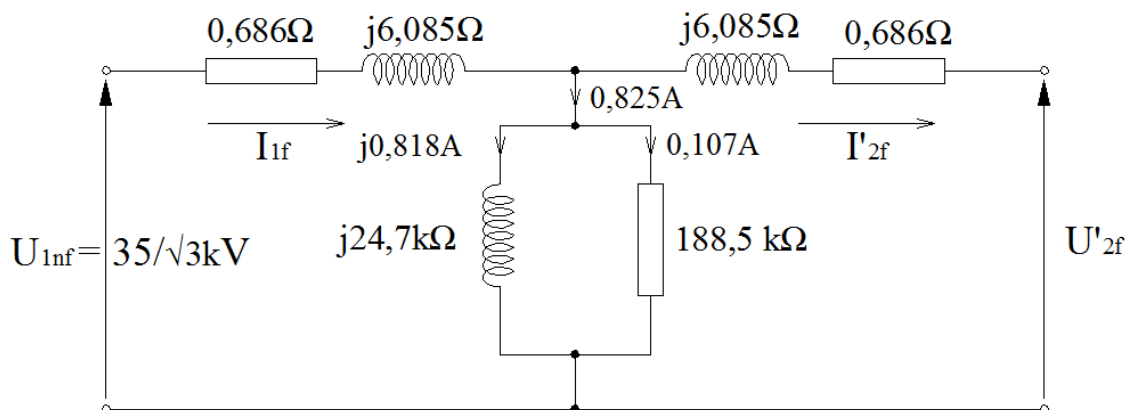
$$X_{\mu} = \frac{U_{1nf}}{I_{\mu 1}} = \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,818} = 24,7 k\Omega$$

## КС:

$$R_k = \frac{P_{kn}}{3I_{1nf}^2} = \frac{28000}{3 \cdot 82,5^2} = 1,371 \Omega \Rightarrow R_1'' = R_2 = \frac{R_k}{2} = \frac{1,371}{2} = 0,686 \Omega$$

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \frac{U_{1nf}}{I_{1nf}} = \frac{5}{100} \frac{35 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 82,5} = 12,247 \Omega \Rightarrow X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \approx 12,17 \Omega$$

$$\Rightarrow X_{\sigma 1}'' \approx X_{\sigma 2} = \frac{X_k}{2} = 6,085 \Omega$$



6. Потребно је прво израчунати релативна оптерећења по појединим фазама трансформатора:

$$S_a = 2 \text{ MVA} \Rightarrow \beta_a = \frac{S_a}{S_n/3} = 1,2$$

$$S_b = S_c = 1,6 \text{ MVA} \Rightarrow \beta_b = \beta_c = \frac{S_a}{S_n/3} = 0,96$$

Губици у бакуру овако оптерећеног трансформатора су:

$$P_k = \frac{1}{3}(\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2) \cdot P_{kn} = \frac{1}{3}(1,2^2 + 2 \cdot 0,96^2) \cdot 28000 = 30643 \text{ W}$$

Максимални пораст температуре ће бити:

$$\theta_m = \theta_{mn} \frac{P_{0n} + P_k}{P_{0n} + P_{kn}} = 55 \cdot \frac{6,5 + 30,643}{6,5 + 28} \approx 59,2 \text{ K}$$

Трансформатор сме да ради са овим оптерећењем све док не достигне максимални номинални пораст температуре:

$$\theta(t = x) = \theta_{mn} = \theta_m \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = 59,2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{2,5}}\right) \Rightarrow t = -2,5 \cdot \ln\left(1 - \frac{55}{59,2}\right) = 6,6 \text{ h}$$

7.

$$F_r = I \pi D B_a$$

Површински притисак на одстојнике који формирају аксијалне канале једнак је

$$\sigma_{ods,axial} = \frac{F_r}{N_{ods} W_{ods} H_{ods}}$$

8. Повољнија спрега аутотрансформатора је она са преносним односом који је ближи јединици јер се тада преноси већа привидна снага:

$$U_{1a} = \sqrt{3} \left( \frac{35}{\sqrt{3}} + 6,3 \right) = 45,9 \text{ kVA}$$

$$U_{2a} = \sqrt{3} \cdot \frac{35}{\sqrt{3}} = 35 \text{ kVA}$$

$$n_a = \frac{U_{1a}}{U_{2a}} = 1,31 \Rightarrow S_a = \frac{n_a}{n_a - 1} S_n = 21,12 \text{ MVA}$$

$$\Delta u_m = u_r \cdot \frac{u_r}{u_k} + u_x \cdot \frac{u_x}{u_k} = u_{ka} = u_k \cdot \frac{S_n}{S_a} = 5,5 \cdot \frac{5}{21,12} = 1,183 \%$$

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

$$U_m = 2U - u(x = 0) = 2U - \frac{Uch(\alpha \cdot 0)}{ch(\alpha h)} = 4 - 2 \cdot \frac{1}{ch(5 \cdot 0,65)} = 3,845 \text{ MVA}$$

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.

10. Разлика фазних ставова фазних напона секундара ова два трансформатора је  $120^\circ$  тако да је напон која узрокује циркулациону струју:

$$\Delta U = \sqrt{3} U_{nf},$$

а струја која се због тога јавља:

$$I = \frac{\Delta U}{2 Z_k} = \frac{\sqrt{3} U_{nf}}{2 \frac{u_k}{100} \frac{U_{nf}}{I_{nf}}}$$

Вредност релативне струје износи

$$i = \frac{I}{I_{nf}} = \frac{100 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}}{u_k} = \frac{86,6}{u_k}$$