

## ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (ОГЗЕТ) - фебруар 2013 -

Београд, 8.02.2013.

Трофазни дистрибутивни уљни трансформатор има следеће номиналне податке:  $S_n = 500 \text{ kVA}$ ,  $U_{1n}/U_{02} = 1000/660 \text{ V}$ ,  $50 \text{ Hz}$ , спрега  $Yzn11$ ,  $N_1 = 800$ ,  $P_{0n} = 3 \text{ kW}$ ,  $\cos\varphi_{0n} = 0,3$ ,  $u_{kn} = 6,2 \%$ ,  $\cos\varphi_{kn} = 0,48$ . Временска константа загревања трансформатора као хомогеног тела износи  $2h$ .

### I део

1. Нацртати шеме веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове. Означити све крајеве намотаја (почетке и крајеве).
2. На примар задатог трансформатора прикључени су наизменични напони  $u_1 = U_{1mnf}(\cos\omega t - 0,42\cos 3\omega t)$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$  и остала два фазна напона који су истог облика и вредности уз одговарајуће симетричне фазне помераје. Штајмницов коефицијент је  $1,8$ . Колико износе губици у гвожђу у том случају ако је при простопериодичном номиналном напајању  $P_{Hn} : P_{Vn} = 3:1$ ?
3. Израчунати параметре еквивалентне заменске шеме на ВН страни и нацртати шему са унетим бројним вредностима свих параметара и означеним електричним величинама.
4. На задати трансформатор су прикључена два оптерећења: трофазно симетрично снаге  $S_{3f} = 300 \text{ kVA}$  и фактора снаге  $\cos\varphi = 0,8$  инд., и монофазно на трећој фази снаге  $S_{1f} = 100 \text{ kVA}$  и фактора снаге  $\cos\varphi = 0,6$  инд. Одредити пад напона на најоптерећенијој фази и степен искоришћења снаге трансформатора у овом случају.
5. Одредити снагу којом се задати трансформатор може оптеретити у току  $2h$  рада, а да се не прекорачи дозвољени пораст температуре, ако је трансформатор пре тога дуго радио са оптерећењем од  $0,4S_n$ . Написати израз којим се израчунава релативно старење трансформатора. Шта је пондерисана температура и како се дефинише?

### II део

6. Извести израз за флукс при укључењу трансформатора у празан ход и израчунати максималну струју која се може јавити у овом прелазном процесу ако се зависност флукса од струје може представити функцијом  $I_0 = k \cdot \Phi^2$  и ако се трансформатор укључује први пут.
7. Колика је критична сила и њен карактер у сваком навојку примара која потиче од аксијалне компоненте поља расипања, ако је висина оба намотаја  $350 \text{ mm}$ , средњи пречник намотаја примара  $220 \text{ mm}$ , коефицијент Роговског  $0,92$  и ако је примарни намотај спољашњи? Колика је сила у пресеку дуж проводника и какво је њено дејство?
8. Паралелно задатом трансформатору прикључују се трансформатори снага  $S_{n2} = 600 \text{ kVA}$  и  $S_{n3} = 400 \text{ kVA}$  и напона кратког споја  $u_{k2} = 5 \%$  и  $u_{k3} = 7 \%$ , респективно. Како ће трансформатори поделити укупно оптерећење од  $1500 \text{ kVA}$ ? Колико износи максимална снага којом ови трансформатори могу бити оптерећени тако да у трајном раду ни један од њих не буде преоптерећен и колика су тада појединачна оптерећења?
9. Скотов трансформатор напона  $U_{1n}/U_{2n} = 10000/2 \times 200 \text{ V}$ , прикључен је на трофазни уравнотежени систем напона, а на секундару је оптерећен снагама  $S_a = 100 \text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi_a = 0,8$  кап. и  $S_b = 200 \text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi_b = 0,8$  инд.. Израчунати комплексне струје примара и секундара и нацртати векторски дијаграм напона као и шему веза намотаја овог трансформатора.
10. Тронамотајни трансформатор: примена, еквивалентна шема, дијаграм напона, одређивање параметара еквивалентног кола и њихове могуће вредности.

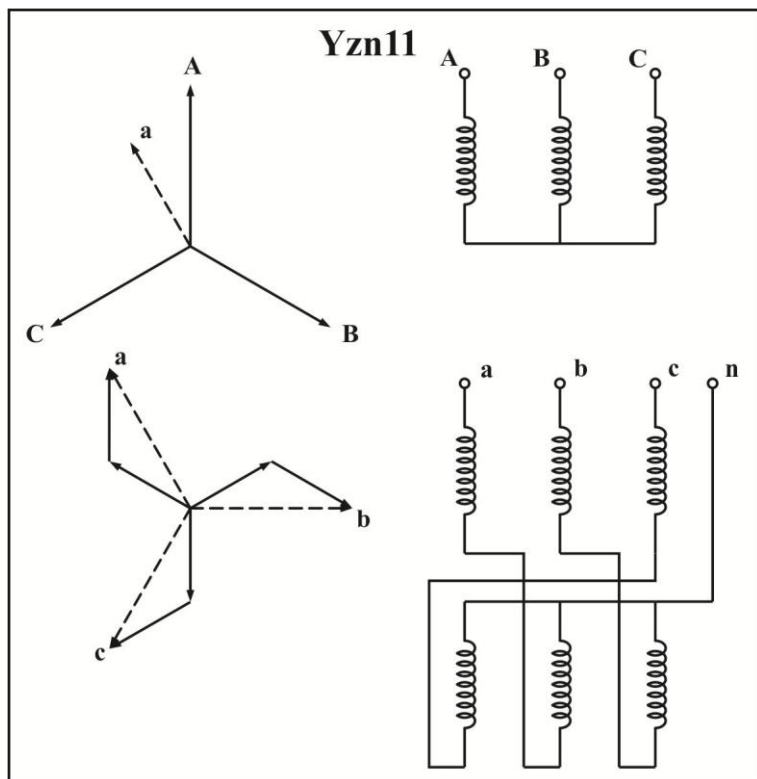
Сваки задатак вреди 11 поена за интегрални испит у трајању од 3 h, а 22 поена за други део испита у трајању од 1,45 h. Дозвољено је поседовање само једне свеске за рад и концепт. Прецртати оно што није за преглед.

Проф. др Радован Љ. Радосављевић

**ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (ОГЗЕТ)**  
- фебруар 2013 -

8.02.2013.г.

1.



2.  $u_1 = U_{1m} (\cos \omega t - 0,42 \cos 3\omega t)$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$

$$\phi_1 = \frac{1}{N_1} \int u_1 dt = \frac{1}{N_1} \frac{U_{1m}}{\omega} (\sin \omega t - 0,14 \sin 3\omega t) \Rightarrow \phi_m = \phi_{m1} + \phi_{m3} = 1,14 \phi_{m1}$$

$$P_{H1} = 0,75 P_0 = 0,75 \cdot 3000 = 2250 \text{ W}$$

$$P_{V1} = 0,25 P_0 = 0,25 \cdot 3000 = 750 \text{ W}$$

$$P_H = k_H f B_m^{1,8} \Rightarrow \frac{P'_H}{P_H} = \left( \frac{\phi_m}{\phi_{m1}} \right)^{1,8} = 1,14^{1,8}$$

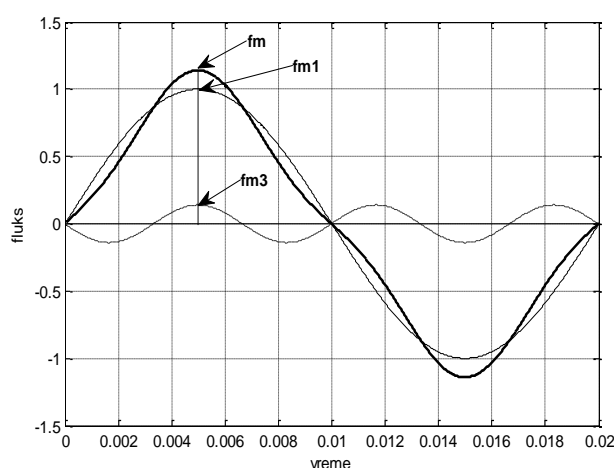
$$P'_H = 2250 \cdot 1,14^{1,8} = 2848,5 \text{ W}$$

$$P_V = k_V f^2 B_m^2 \Rightarrow \frac{P_{V3}}{P_{V1}} = \left( \frac{f_3}{f_1} \right)^2 \cdot \left( \frac{\phi_{m3}}{\phi_{m1}} \right)^2$$

$$P_{V3} = P_{V1} \cdot 9 \cdot 0,14^2 = 0,1764 \cdot P_{V1} = 132,3 \text{ W}$$

$$P'_V = P_{V1} + P_{V3} = 750 + 132,3 = 882,3 \text{ W}$$

$$P'_0 = P'_H + P'_V = 2848,5 + 882,3 = 3730,8 \text{ W}$$



3.  $I_{1nf} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}} = \frac{500 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1 \cdot 10^3} = 288,7 \text{ A}$ ,  $R_a = \frac{U_{1nf}^2}{P_0/3} = \frac{3 \cdot U_{1n}^2}{3 \cdot P_0} = \frac{3 \cdot 1^2 \cdot 10^6}{3 \cdot 3000} = 333,3 \Omega$

$$I_a = \frac{U_{1nf}}{R_a} = \frac{1 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 333,3} = 1,732 \text{ A}, \quad I_0 = \frac{I_a}{\cos \varphi_{0n}} = \frac{1,732}{0,3} = 5,77 \text{ A}$$

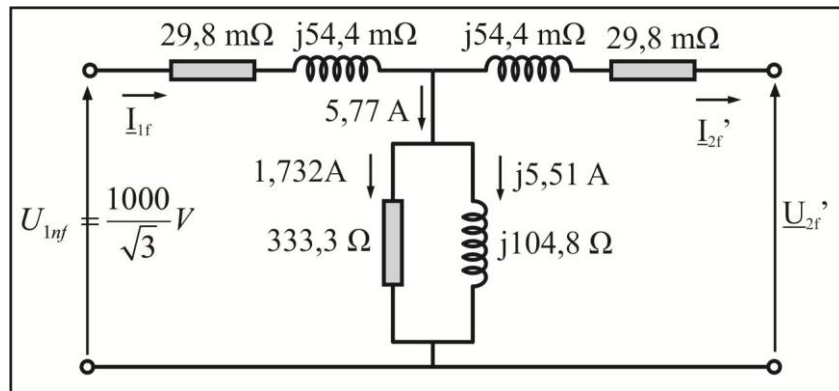
$$\cos \varphi_{0n} = 0,3 \Rightarrow \tan \varphi_{0n} = 3,18 \Rightarrow I_\mu = I_a \cdot \tan \varphi_{0n} = 1,732 \cdot 3,18 = 5,51 \text{ A}$$

$$X_\mu = \frac{U_{1nf}}{I_\mu} = \frac{1 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 5,51} = 104,8 \Omega$$

$$Z_k = \frac{u_{kn}}{100} \cdot \frac{U_{1nf}}{I_{1nf}} = \frac{6,2}{100} \cdot \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 288,7} = 124 \text{ m}\Omega \Rightarrow R_k = Z_k \cdot \cos \varphi_{kn} = 124 \cdot 10^{-3} \cdot 0,48 = 59,5 \text{ m}\Omega$$

$$R_1 \approx R_2 = \frac{R_k}{2} = \frac{59,5}{2} = 29,8 \text{ m}\Omega, \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{124^2 - 59,5^2} = 109 \text{ m}\Omega$$

$$X_{\sigma 1} \approx X_{\sigma 2} = \frac{X_k}{2} = \frac{109}{2} = 54,4 \text{ m}\Omega$$



$$4. \quad S_a = \frac{300}{3} = 100 \text{ kVA}, \quad S_b = \frac{300}{3} = 100 \text{ kVA}$$

$$S_c = \frac{300}{3} (0,8 + j0,6) + 100(0,6 + j0,8) = (140 + j140) \text{ kVA} \Rightarrow |S_c| = 198 \text{ kVA}$$

$$\beta_a = \beta_b = \frac{100}{500/3} = 0,6, \quad \beta_c = \frac{S_c}{S_n/3} = \frac{198}{500/3} = 1,188, \quad \cos \varphi_c = \sin \varphi_c = \frac{Q_c}{S_c} = 0,71$$

$$u_m = u_{kn} \cdot \cos \varphi_{kn} = 6,2 \cdot 0,48 = 2,976 \% \Rightarrow u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = \sqrt{6,2^2 - 2,976^2} = 5,439 \%$$

$$\left. \begin{aligned} a &= \beta_c (u_r \cos \varphi_c + u_x \sin \varphi_c) = 1,118 \cdot 0,71 \cdot (2,976 + 5,439) = 6,68 \% \\ b &= \beta_c (u_x \cos \varphi_c - u_r \sin \varphi_c) = 1,118 \cdot 0,71 \cdot (5,439 - 2,976) = 1,96 \% \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta u_c = a + \frac{b^2}{200} = 6,7 \%$$

$$U_{cf} = \left(1 - \frac{6,7}{100}\right) \cdot \frac{660}{\sqrt{3}} = 355,5 \text{ V}$$

$$P_{kn} = u_m \cdot \frac{S_n}{100} = 2,976 \cdot \frac{500 \cdot 10^3}{100} = 14880 \text{ W}$$

$$P_k = \frac{P_{kn}}{3} (\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2) = \frac{14880}{3} (2 \cdot 0,6^2 + 1,188^2) = 10477,5 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_c + P}{P_c + P + P_k + P_{0n}} = \frac{100 \cdot 0,6 + 300 \cdot 0,8}{100 \cdot 0,6 + 300 \cdot 0,8 + 10,478 + 3} = 0,957 \Rightarrow \eta_{\%} = 95,7 \%$$

$$5. \quad \beta_1 = \frac{S_1}{S_n} = 0,4, \quad \frac{\theta_{m1}}{\theta_{mn}} = \frac{P_0 + \beta_1^2 \cdot P_{kn}}{P_0 + P_{kn}} = \frac{3000 + 0,4^2 \cdot 14880}{3000 + 14880} = 0,3$$

$$\theta_{m1} = 0,3 \cdot \theta_{mn} = 0,3 \cdot 65 = 19,5 K \quad , \quad \theta_0 = \theta_{m1}$$

$$\theta_{mn} = \theta_{m2} \left( 1 - e^{-\frac{t_2}{T}} \right) + \theta_0 e^{-\frac{t_2}{T}} \Rightarrow 65 = \theta_{m2} \left( 1 - e^{-\frac{2}{2}} \right) + 19,5 e^{-\frac{2}{2}} \Rightarrow \theta_{m2} = 91,5 K$$

$$\frac{\theta_{m2}}{\theta_{mn}} = \frac{91,5}{65} = 1,41 = \frac{P_0 + \beta_2^2 \cdot P_{kn}}{P_0 + P_{kn}} \Rightarrow \beta_2 = 1,22 \Rightarrow S_2 = \beta_2 \cdot S_n = 1,22 \cdot 500 = 610 kVA$$

6.  $\phi_0 = [\phi_r - \phi_m \sin(\varphi_0 - \varphi)] e^{-t/T} + \phi_m \sin(\omega t + \varphi_0 - \varphi)$  - теорија

$$\phi_r = 0, \quad \varphi - \varphi_0 = -\frac{\pi}{2}, \quad t_k = \frac{\pi}{\omega} \Rightarrow \phi_{0,kr} \approx 2\phi_m$$

$$I_0 = k\phi_0^2 \Rightarrow \frac{I_{0n}}{I_{0kr}} = \left( \frac{\phi_m}{2\phi_m} \right)^2 = \frac{1}{4} \Rightarrow I_{0kr} = 4I_{0n} = 4 \cdot 5,773 = 23,1 A$$

7.  $I_{k \max 1} = \sqrt{2} \cdot k_m \cdot \frac{100 I_{ln}}{u_{k\%}}, \quad k_m = \left( 1 + e^{-\frac{u_r \pi}{u_x}} \right) = \left( 1 + e^{-\frac{2,976}{5,439} \pi} \right) = 1,179$

$$I_{k \max 1} = \sqrt{2} \cdot 1,179 \cdot \frac{100 \cdot 288,7}{6,2} = 7763,9 A$$

$$F_{r1} = \frac{1}{2} \cdot \pi \mu_0 \frac{k_R}{h} D_1 (N_1 I_{k \max 1})^2 = \frac{1}{2} \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,92}{0,35} \cdot 0,22 \cdot (800 \cdot 7763,9)^2 \approx 44 \cdot 10^6 N$$

$$F_y = f_r R_1 = \frac{F_{r1}}{2\pi N_1} = 8,75 kN$$

Сила  $F_r$  тежи да раскине намотај, а сила  $F_y$  га истеже.

8.  $S_i = \frac{S}{\frac{u_{ki}}{S_{ni}} \sum_i \left( \frac{S_{ni}}{u_{ki}} \right)}$

$$\sum_i \left( \frac{S_{ni}}{u_{ki}} \right) = \frac{S_{n1}}{u_{k1}} + \frac{S_{n2}}{u_{k2}} + \frac{S_{n3}}{u_{k3}} = \frac{500}{6,2} + \frac{600}{5} + \frac{400}{7} = 257,8$$

$$S_1 = \frac{1500}{\frac{6,2}{500} \cdot 257,8} = 469,2 kVA, \quad S_2 = \frac{1500}{\frac{5}{600} \cdot 257,8} = 698,2 kVA$$

$$S_3 = \frac{1500}{\frac{7}{400} \cdot 257,8} = 332,48 kVA$$

$$S_2 = S_{2n} = 600 kVA = \frac{S_d}{\frac{5}{600} \cdot 257,8} \Rightarrow S_d = 1289 kVA$$

$$S_1 = \frac{1289}{1500} \cdot 469,2 = 403,2 kVA, \quad S_1 = \frac{1289}{1500} \cdot 332,48 = 285,7 kVA$$

9.  $I_a = \frac{S_a}{U_2} = \frac{100 \cdot 10^3}{200} = 500 A \Rightarrow \underline{I_a} = jI_a (\cos \varphi_1 + j \sin \varphi_1) = j500 \cdot (0,8 + j0,6) = (-300 + j400) A$

$$I_b = \frac{S_b}{U_2} = \frac{200 \cdot 10^3}{200} = 1000 \text{ A} \Rightarrow \underline{I_b} = I_b (\cos \varphi_2 - j \sin \varphi_2) = 1000 \cdot (0,8 - j0,6) = (800 - j600) \text{ A}$$

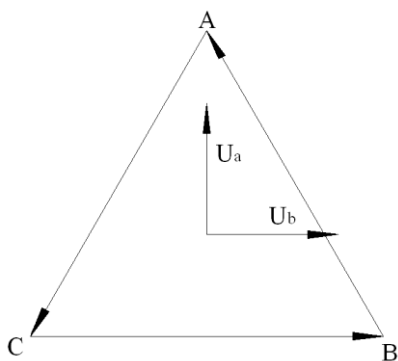
$$n_a = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{N_1}{N_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1000}{200} = 43,3, \quad n_b = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{10000}{200} = 50$$

$$\underline{I_A} = \frac{\underline{I_a}}{n_a} = \frac{(-300 + j400)}{43,3} = (-6,93 + j9,24) \text{ A}$$

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

$$I_B = -\frac{I_A}{2} + \frac{1}{n_b} \cdot \underline{I_b} = -\frac{(-6,93 + j9,24)}{2} + \frac{1}{50} \cdot (800 - j600) = (19,5 - j16,6) \text{ A}$$

$$I_C = -\frac{I_A}{2} - \frac{1}{n_b} \cdot \underline{I_b} = -\frac{(-6,93 + j9,24)}{2} - \frac{1}{50} \cdot (800 - j600) = (-12,5 + j7,38) \text{ A}$$



## 10. теорија