

**ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (ОГЗЕТ)**  
**- колоквијум - децембар 2012 -**

**Београд, 03.12.2012.**

Трофазни уљни дистрибутивни трансформатор има номиналне податке:  $S_n = 1600 \text{ kVA}$ ,  $U_1/U_{02} = 20/0,4 \text{ kV}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , спрега Dd10. Штајнмицов коефицијент је 2, број навојака примара је 1124 и  $P_{Hn}/P_{Vn} = 4$ . При испитивању трансформатора у огледима празног хода и кратког споја, добијени су следећи подаци:

ПХ:  $U_0 = 400 \text{ V}$ ,  $I_0 = 25,4 \text{ A}$ ,  $P_0 = 2500 \text{ W}$

КС:  $U_k = 600 \text{ V}$ ,  $I_k = 20\sqrt{3} \text{ A}$ ,  $P_k = 7519 \text{ W}$ , сведени на  $75^\circ\text{C}$

1. Нацртати шему веза намотаја и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове и означити крајеве намотаја (почетке и крајеве). **(12п.)**
2. Одредити приближно индукцију у језгру датог трансформатора ако је познато да је примљена реактивна снага у празном ходу  $17,5 \text{ kVA}$ , маса језгра  $1586 \text{ kg}$ , а специфична реактивна снага  $q_{Fe} = 2,7 \text{ VAr/kg}$ . **(12п.)**
3. Ако се фреквенција задатог трансформатора повећа за  $10 \%$ , а напон напајања за  $5 \%$ , одредити нову снагу губитака у гвожђу трансформатора. **(12п.)**
4. Нацртати векторски дијаграм за пручавање вихорних струја у намотајима трансформатора уз краћа објашњења и дефиницију Филдовога сачиниоца. **(12п.)**
5. Израчунати све параметре еквивалентне заменске шеме датог трансформатора на ВН страни. Нацртати шему са уписаним бројним вредностима параметара и свим електричним величинама. **(16п.)**
6. При ком фактору снаге оптерећења наступа максимални пад напона номинално оптерећеног трансформатора и колико он износи? Колика треба да буде реактивна снага батерија кондензатора које се прикључују паралелно са датим оптерећењем тако да нема пада напона на крајевима трансформатора? Ако остану прикључене само кондензаторске батерије одредити колико тада износи напон секундара трансформатора. Користити упрошћену формулу за пад напона. **(16п.)**
7. Када наступа максимални могући степен искоришћења снаге задатог трансформатора и колико износи? Због чега се дистрибутивни трансформатори пројектују тако да имају максимални степен искоришћења снаге при  $S < S_n$ ? **(10п.)**
8. Одредити термичку временску константу задатог трансформатора као хомогеног тела, ако се зна да из охлађеног стања за  $2 \text{ h}$  достиже пораст температуре од  $30 \text{ K}$  при оптерећењу од  $1320 \text{ kVA}$ . **(10п.)**
9. Нацртати вертикалну расподелу температуре у трансформатору, означити карактеристичне тачке и дати краћа објашњења. Како се одређује температура вруће тачке? **(10п.)**
10. Известити изразе за поређење по првом критеријуму: напона, струја, привидних снага и губитака два трансформатора сличних конструкција. **(10п.)**

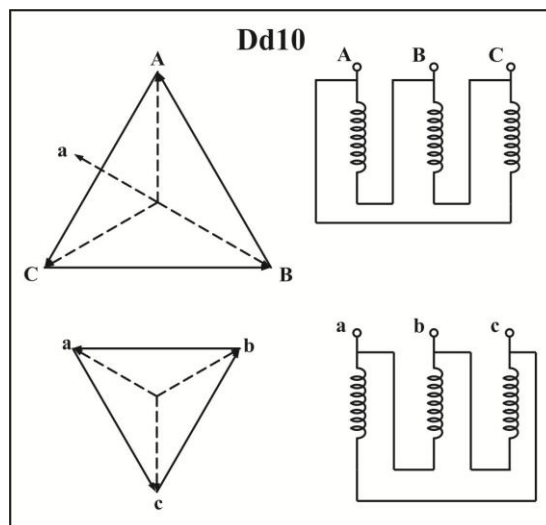
Колоквијум траје  $3\text{h}$ .  $\Sigma$ поена = 120. Дозвољено је коришћење само вежбанке за рад. Прецртати што није за преглед.

Проф. др Радован Љ. Радосављевић

**ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (ОГЗЕТ)**  
**- колоквијум-децембар 2012 -**

**3.12.2012.г.**

**1.**



- 2.** За процену вредности густине флуksа у језгру може се искористити приближна формула за реактивну снагу трансформатора у празном ходу која гласи:

$$Q_0 = m_{Fe} q_{Fe} + 440 B_m E_1$$

Пошто је индукована емс-а по навојку:

$$E_1 = \frac{U_{1nf}}{N_1} = \frac{20 \cdot 10^3}{1124} = 17,79 \text{ V}$$

Максимална индукција у језгру је:

$$B_m = \frac{Q_0 - m_{Fe} q_{Fe}}{440 E_1} = \frac{17500 - 1586 \cdot 2,7}{440 \cdot 17,79} \approx 1,69 \text{ T}$$

- 3.** Прво је потребно израчунати номиналне губитке услед хистерезиса и вихорних струја:

$$P_{Fen} = P_{Hn} + P_{Vn} = 5P_{Vn} \Rightarrow P_{Vn} = 0,2P_{Fen} = 0,2 \cdot 2500 = 500 \text{ W} \Rightarrow P_{Hn} = 2000 \text{ W}$$

Сада треба одредити промену ових губитака у новим условима напајања:

$$\frac{P_V}{P_{Vn}} = \left( \frac{U_1}{U_{1nf}} \right)^2 \Rightarrow P_V = P_{Vn} \left( \frac{U_1}{U_{1nf}} \right)^2 = 500 \cdot (1,05)^2 = 551,25 \text{ W}$$

$$\frac{P_H}{P_{Hn}} = \left( \frac{f}{f_n} \right) \left( \frac{B_m}{B_{mn}} \right)^2 = \left( \frac{f}{f_n} \right) \left( \frac{U_1}{U_{1nf}} \right)^2 \left( \frac{f_n}{f} \right)^2 = \left( \frac{f_n}{f} \right) \left( \frac{U_1}{U_{1nf}} \right)^2$$

$$\Rightarrow P_H = P_{Hn} \left( \frac{f_n}{f} \right) \left( \frac{U_1}{U_{1nf}} \right)^2 = \frac{2000 \cdot (1,05)^2}{1,1} = 2004,5 \text{ W}$$

$$P'_{Fe} = P_V + P_H = 551,25 + 2004,5 = 2556 \text{ W}$$

**4. ТЕОРИЈА**

**5. ПХ:** Оглед је рађен са нисконапонске стране са номиналним напонем тако да се параметри могу израчунати директно са примарне стране коришћењем номиналног примарног напона и мерене снаге:

$$R_{a1} = \frac{U_{1nf}^2}{P_{0n}/3} = \frac{20^2 \cdot 10^6}{2500/3} = 480 \text{ k}\Omega \Rightarrow I_{a1} = \frac{U_{1nf}}{R_{a1}} = \frac{20 \cdot 10^3}{480 \cdot 10^3} = 0,0417 \text{ A} = 41,7 \text{ mA}$$

$$I_{01} = \frac{I_{02}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_{02}}{U_{1n}} = \frac{25,4}{\sqrt{3}} \cdot \frac{0,4}{20} = 0,293 \text{ A} = 293 \text{ mA} \Rightarrow I_{\mu 1} = \sqrt{I_{01}^2 - I_{a1}^2} = 290 \text{ mA}$$

$$X_{\mu 1} = \frac{U_{1nf}}{I_{\mu 1}} = \frac{20 \cdot 10^3}{0,29} \approx 69 \text{ k}\Omega$$

**КС:** Оглед је рађен са примарне стране и то са струјом која је мања од номиналне струје:

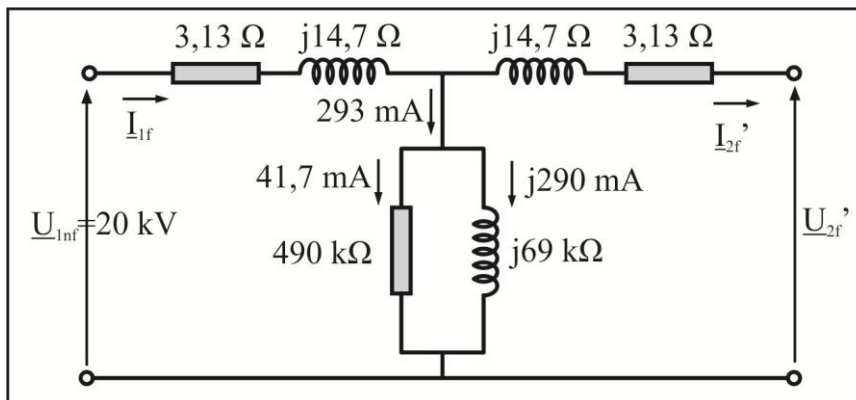
$$I_{1nf} = \frac{S_n}{3U_{1n}} = \frac{1600}{3 \cdot 20} = 26,7 \text{ A}$$

Зато се морају прерачунати напон кратког споја и губици у бакру на номиналне вредности због прорачуна који следе у наредним задацима. Параметри не зависе од јачине струје па је према томе:

$$R_k = \frac{P_k}{3I_{kf}^2} = \frac{7519}{3 \cdot 20^2} = 6,26 \Omega \Rightarrow R_1 \approx R'_2 = \frac{R_k}{2} = 3,13 \Omega$$

$$Z_k = \frac{U_{kf}}{I_{kf}} = \frac{600}{20} = 30 \Omega \Rightarrow X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \approx 29,3 \Omega$$

$$\Rightarrow X_{\sigma 1} \approx X'_{\sigma 2} = \frac{X_k}{2} = 14,7 \Omega$$



Сада се могу израчунати и номиналне вредности напона кратког споја и губитака у бакру:

$$U_{kn} = U_k \cdot \frac{I_{1nf}}{I_{kf}} = 600 \cdot \frac{26,7}{20} \approx 800 \text{ V} \Rightarrow u_{kn} = \frac{U_{kn}}{U_{1nf}} 100 = \frac{800}{20000} \cdot 100 = 4 \%$$

$$P_{kn} = P_k \left( \frac{I_{1nf}}{I_{kf}} \right)^2 = 7519 \cdot \left( \frac{26,7}{20} \right)^2 = 13400 \text{ W}$$

**6.** За потребе овог задатка увешћемо следећу апроксимацију:

$$\Delta u_{\%} \approx a = \beta(u_{rn} \cos \varphi + u_{xn} \sin \varphi)$$

Да би пронашли фактор снаге при ком наступа максимални пад напона треба наћи извод горње функције по углу  $\varphi$  и изједначити са нулом:

$$\frac{d(\Delta u)}{d\varphi} = -u_{rn} \sin \varphi + u_{xn} \cos \varphi = 0 \Rightarrow \tan \varphi = \frac{u_{xn}}{u_{rn}} = \tan \varphi_k$$

Компоненте напона кратког споја износе:

$$u_{rn} = \frac{P_{kn}}{S_n} \cdot 100 = \frac{13,4}{1600} \cdot 100 = 0,838 \% \Rightarrow u_{xn} = \sqrt{u_{kn}^2 - u_{rn}^2} = \sqrt{16 - 0,838^2} = 3,91 \%$$

$$\cos \varphi_1 = \cos \varphi_k = \frac{u_{rn}}{u_{kn}} = \frac{0,838}{4} = 0,21 \text{ инд.} \Rightarrow \sin \varphi_1 = 0,978$$

$$\Delta u_m = u_{rn} \cos \varphi + u_{xn} \sin \varphi = \frac{u_{rn}^2 + u_{xn}^2}{u_{kn}} = u_{kn} = 4 \%$$

$$\Rightarrow U_{02} \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right) = 400 \cdot \left(1 - \frac{4}{100}\right) = 384 \text{ V}$$

Ако нема пада напона на крајевима трансформатора тада је:

$$\Delta u_{\%} \approx a = \beta(u_{rn} \cos \varphi + u_{xn} \sin \varphi) = 0 \Rightarrow \tan \varphi_2 = -\frac{u_{rn}}{u_{xn}} = -\frac{1}{\tan \varphi_k} = -0,214$$

Сада се може одредити реактивна снага батерија кондензатора:

$$\tan \varphi_2 = -0,214 = \frac{S_n \sin \varphi_1 - Q_c}{S_n \cos \varphi_1} = \frac{1600 \cdot 0,978 - Q_c}{1600 \cdot 0,21} \Rightarrow Q_c = 1636,7 \text{ kVA}$$

Ако остану прикључене само батерије кондензатора тада је пад напона на секундарним крајевима:

$$\sin \varphi_3 = -1 \Rightarrow \cos \varphi_3 = 0, \quad \beta = \frac{Q_c}{S_n} = 1,023$$

$$a = \beta u_x \sin \varphi_3 = -1,023 \cdot 3,91 \approx -4 \%$$

$$\Delta u_{\%} = a [\%] \approx -4 \%$$

$$\Rightarrow U_2 = U_{02} - \frac{\Delta u}{100} U_{02} = U_{02} \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right) = 400 \cdot \left(1 + \frac{4}{100}\right) = 416 \text{ V}$$

7. Апсолутни максимум степена искоришћења снаге наступа за:

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_{on}}{P_{kn}}} = \sqrt{\frac{2500}{13400}} = 0,43, \quad \cos \varphi = 1$$

Па је максимални степен искоришћења снаге:

$$\eta_m = \frac{\beta_m S_n}{\beta_m S_n + 2P_{on}} = \frac{0,43 \cdot 1600}{0,43 \cdot 1600 + 2 \cdot 2,5} = 0,9928 \Rightarrow \eta_{m,\%} = 99,28 \%$$

## ТЕОРИЈА

8. Ако је оптерећење трансформатора 1320 kVA релативно оптерећење износи:

$$\beta = \frac{1320}{1600} = 0,825$$

Па ће максимални пораст температуре односно температура устаљеног стања бити:

$$\theta_m = \theta_{mn} \frac{\beta^2 P_{kn} + P_{on}}{P_{kn} + P_{on}} = 65 \cdot \frac{0,825^2 \cdot 13400 + 2500}{13400 + 2500} = 47,5 \text{ K}$$

На основу овога и једначине загревања уз услов да је почетна температура једнака нули добија се тражена термичка временска константа трансформатора као хомогеног тела:

$$\theta = 30 \text{ K} = \theta_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \Rightarrow T = \frac{-t}{\ln\left(1 - \frac{\theta}{\theta_m}\right)} = \frac{-2}{\ln\left(1 - \frac{30}{47,5}\right)} = 2 \text{ h}$$

Ако се прикључи додатно оптерећење од 400 kVA тада ће релативно оптерећење бити:

$$\beta = \frac{1720}{1600} = 1,075$$

Пораст температуре коју би трансформатор достигао када би радио бесконачно дуго са датим оптерећењем износи:

$$\theta_m = \theta_{mn} \frac{\beta^2 P_{kn} + P_{on}}{P_{kn} + P_{on}} = 65 \cdot \frac{1,075^2 \cdot 13400 + 2500}{13400 + 2500} = 73,5 \text{ K}$$

Време које је потребно трансформатору да достигне максимални номинални пораст температуре са новим оптерећењем износи:

$$\begin{aligned} \theta &= 65 \text{ K} = \theta_0 e^{-\frac{t}{T}} + \theta_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \\ \Rightarrow t &= -T \cdot \ln\left(\frac{\theta_m - \theta}{\theta_m - \theta_0}\right) = -2 \cdot \ln\left(\frac{73,5 - 65}{73,5 - 30}\right) = 3,3 \text{ h} \end{aligned}$$

**9.** Теорија

**10.** Теорија