

## ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13Е013ЕНТ)

Септембар 2019.

Трофазни уљни дистрибутивни трансформатор има номиналне податке:  $S_n = 200 \text{ kVA}$ ,  $U_1 / U_{02} = 10 \pm 2\% / 0.4 \text{ kV}$ ,  $50 \text{ Hz}$ , спрега  $Dz4$ ,  $P_{kn} = 3.6 \text{ kW}$ ,  $u_{kn} = 4\%$ ,  $P_{0n} = 400 \text{ W}$ ,  $j_0 = 2.5\%$ . Номинални пораст температура износе: пораст температуре горњег уља  $55 \text{ K}$ , разлика средње температуре намотаја и средње температуре уља  $20.9 \text{ K}$ . Фактор најтоплије тачке износи  $1.1$ . Пораст температуре горњег уља је пропорционалан укупним губицима на степен  $0.8$ , а разлика средња температуре намотаја и средње температуре уља је пропорционална губицима у намотају на степен  $0.8$ .

- Нацртати шему веза и векторски дијаграм напона задатог трансформатора представљајући намотаје као калемове. Означити хомологне крајеве намотаја. ....(5)
  - За колико ће се променити губици у гвожђу ако се временом, услед растресања магнетског кола, струја празног хода повећа на  $4\%$ ? .....(5)
- Израчунати параметре еквивалентног кола трансформатора са НН стране. Нацртати шему са унетим бројним вредностима параметара и означеним електричним величинама. ....(10)
- Трансформатор напаја потрошач фактора снаге  $\cos \varphi = 0.6$  (кап), при чему пораст температуре горњег уља у стационарном стању достиже вредност од  $65 \text{ K}$ . Колики је тада напон секундара и степен искоришћења снаге трансформатора? .....(12)
- Снага губитака **трофазног** двонамотајног трансформатора номиналне снаге  $50 \text{ MVA}$  измерена у огледу кратког споја при номиналној струји, а затим прерачуната на номиналну температуру, износи  $P_{ks} = 248750 \text{ W}$ . Губици при номиналној струји и номиналној температури **у свакој од фаза** намотаја НН и намотаја ВН, добијени прорачуном, износе: Цулови губици  $P_{JLV/HV} = 22744 \text{ W} / 42239 \text{ W}$ , а додатни губици услед утицаја магнетног поља у коме се налазе проводници  $P_{dod LV/HV} = 2772 \text{ W} / 2870 \text{ W}$ . Колико износе губици услед расутог флуksа који се затвара кроз конструкционе делове трансформатора и кроз суд при номиналној струји? .....(8)
- Написати основни прорачунски израз за релативно старење у зависности од температуре најтоплије тачке. Који фактори, поред температуре, утичу на интензитет старења изолације? Која величина, која се добија анализом узорка папира, карактерише његово стање, односно степен остарелости папира? (10)
- Написати израз за одређивање механичких напрезања којима су изложени: а) проводници (бакар), б) одстојници за формирање аксијалних и радијалних канала за хлађење? Скицирати временски ток промене струје, означити величине на њему и на основу графика назначити вредност струје при којој се јављају максималне вредности ових напрезања? .....(14)
- Полазећи од претпоставке да је простопериодични напон који се доводи на трансформатор у празном ходу једнак електромоторној сили насталој као резултат промене магнетног флуksа у језгру (занемарује се отпорност и реактанса расипања намотаја), извести израз за промену магнетног флуksа у времену. Који је критичан тренутак укључења и колико износи максимална магнетна индукција у колу (ефективна вредност напона на намотају износи  $U$ , површ пресека магнетног кола  $S$  и број навојака  $N$ )? Скицирати упрошћену криву магнетног флуksа чијим се увођењем релативно лако приближно може одредити временска промена струје при укључењу. ....(14)
- Од једнофазног трансформатора снаге  $S_n = 100 \text{ kVA}$ , напона  $U_1 / U_{02} = 400 / 220 \text{ V}$  превезивањем формирати спрегу аутотрансформатора тако да има што већу пролазну снагу. Колико износе пролазна и електромагнетска снага, напони и струје овако формираног аутотрансформатора? .....(8)
- Дати трансформатор треба да ради паралелно са трансформатором спреге  $Yy8$ , исте номиналне снаге и напона кратког споја, преносног односа  $10 / 0.42 \text{ kV}$ . При томе, напон напајања примара износи  $10 \text{ kV}$ .
  - Табеларно приказати како треба међусобно повезати крајеве примара и секундара ова два трансформатора како би се имала минимална струја изједначења. Одредити вредност струје изједначења када трансформатори раде паралелно у празном ходу. ....(7)
  - Ако су крајеви примара и секундара повезани на начин одређен под а), одредити положај регулационог извода на страни примара којим се обезбеђује минимална вредност струје изједначења. За тако одређен положај регулационог извода, израчунати нову вредност струје изједначења када трансформатори раде паралелно у празном ходу. ....(7)

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

У Београду, 26. 8. 2019.

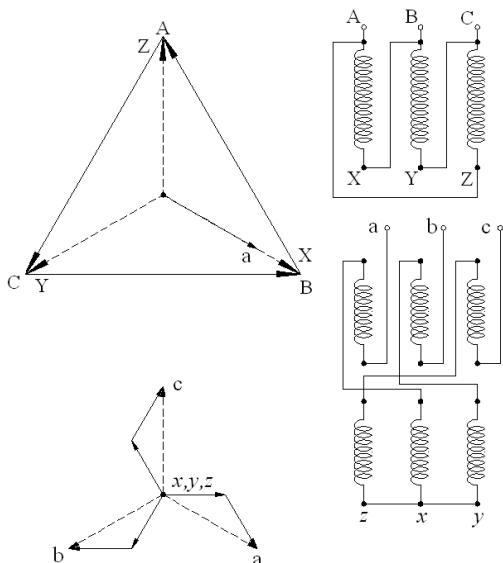
Проф. др Зоран Лазаревић, Проф. др Зоран Радаковић

# ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (ОГЗЕТ)

Септембар 2019.

Београд, 26. 8. 2019.

1. а)



б) Неће се променити, јер је:

$$U, f = \text{const} \rightarrow B_m, \Phi = \text{const} \rightarrow P_{Fe} = \text{const}$$

$$2. \quad I_{2nf} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{02f}} = \frac{200 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3} = 288,7 \text{ A} \quad I_0 = \frac{j_{0n}}{100} \cdot I_{1nf} = \frac{2,5}{100} \cdot 288,7 = 7,217 \text{ A}$$

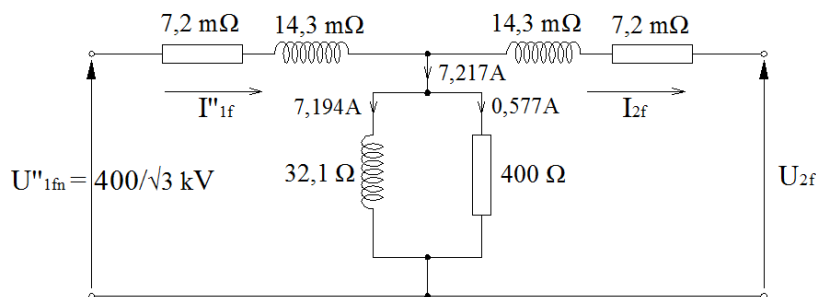
$$I_a = \frac{P_0}{3U_{02f}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{3 \cdot 400} = 0,5774 \text{ A} \Rightarrow I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_a^2} = 7,1939 \text{ A}$$

$$R_a = \frac{U_{02f}}{I_a} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 0,5774} = 400 \Omega, \quad X_\mu = \frac{U_{02f}}{I_\mu} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 7,1939} = 32,1 \Omega$$

$$R_k = \frac{P_{kn}}{3I_{2nf}^2} = \frac{3,6 \cdot 10^3}{3 \cdot 288,7^2} = 14,4 \text{ m}\Omega \Rightarrow R_1 \approx R_2' = \frac{R_k}{2} = 7,2 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{1nf}}{I_{1nf}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 288,7} = 32 \text{ m}\Omega$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{32^2 - 14,4^2} = 28,6 \text{ m}\Omega \Rightarrow X_{\sigma 1} \approx X_{\sigma 2}' = \frac{X_k}{2} = 14,3 \text{ m}\Omega$$



3. а)  $\cos \varphi = 0.6$  (kap)  $\Rightarrow \sin \varphi = -0.8$

$$\frac{\theta_m}{\theta_{mn}} = \frac{65}{55} = \left( \frac{\beta^2 \cdot 3,6 + 0,4}{3,6 + 0,4} \right)^{0,8} \Rightarrow \beta = 1,122$$

$$u_r = \frac{P_{kn}}{S_n} \cdot 100 = \frac{3,6}{200} \cdot 100 = 1,8\% \Rightarrow u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = 3,57\%$$

$$\left. \begin{aligned} a &= \beta(u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi) = 1,122 \cdot (1,8 \cdot 0,6 - 3,57 \cdot 0,8) = -1,993\% \\ b &= \beta(u_x \cos \varphi - u_r \sin \varphi) = 1,122 \cdot (3,57 \cdot 0,6 + 1,8 \cdot 0,8) = 4,019\% \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta u = a + \frac{b^2}{200} = -1,91\%$$

$$U_2 = 400 \cdot \left( 1 + \frac{1,91}{100} \right) = 407,6 V$$

$$\eta_{\%} = \frac{\beta S_n \cos \varphi}{\beta S_n \cos \varphi + \alpha^2 P_{0n} + \beta^2 P_{kn}} \cdot 100 = \frac{1,122 \cdot 200 \cdot 0,6}{1,122 \cdot 200 \cdot 0,6 + 0,4 + 1,122^2 \cdot 3,6} \cdot 100 = 96,47\%$$

$$4. \quad P_{Contr} = P_{ks} - P_{Cu1} - P_{Cu2} = 248750 \text{ W} - 3 (22744 + 2772) - 3 (42239 + 2870) = 36875 \text{ W}$$

5. Одељак 5.1.2.

$$RS = 2^{\frac{\vartheta - \vartheta_n}{6}}$$

Утиче и садржај влаге, кисеоника и киселина.

Са друге стране, један од кључних параметара на основи којих се утврђује стање чвсте изолације је његов индекс деполимеризације, који се одређује на узорку изолације који се узима на најкритичнијем месту у трансформатору.

6. Изрази према којима се израчунава механичко напрезање: одељак 6.2.3. Временски ток промене струје: слика 6.9 са пратећим текстом. Као струју при којој се имају максимална напрезања, на графику треба означити максималну вредност струје кратког споја.

7. Одељак 6.1., при чему су отпор и реактанса расипања једнаки нули. Прецизније, целокупан флуks пролази кроз магнетно коло.

$$\Psi_m = \frac{U_m}{N \omega}$$

$$\Psi(t) = (\Psi_r - \Psi_m \sin(\varphi_0 - \varphi)) + \Psi_m \sin(\omega t + \varphi_0 - \varphi)$$

$$\Psi_{max} = \Psi_r - \Psi_m \left( \sin \left( -\frac{\pi}{2} \right) \right) + \Psi_m \left( \sin \left( \pi - \frac{\pi}{2} \right) \right) = \Psi_r + 2 \Psi_m$$

Упрошћена крива магнећења: слика 6.4.

$$8. \quad \text{a) } U_{1a} = 620 \text{ V}, U_{2a} = 400 \text{ V}, n_a = \frac{620}{400} = 1.55$$

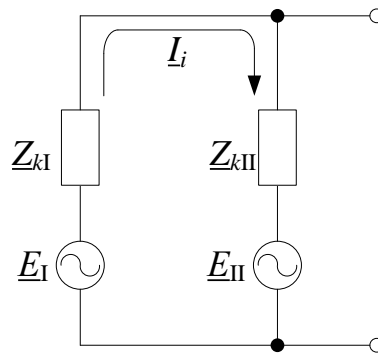
$$S_{an} = \frac{n_a}{n_a - 1} S_n = \frac{1.55}{0.55} \cdot 100 = 282 \text{ kVA},$$

$$I_{1a} = \frac{S_a}{U_{1a}} = \frac{282 \cdot 10^3}{620} = 454.8 \text{ A}, \quad I_{2a} = \frac{S_a}{U_{2a}} = \frac{253.8 \cdot 10^3}{400} = 705 \text{ A}$$

9. а) Крајеве примара и секундара треба међусобно повезати на следећи начин:

Примар	Секундар
A <sub>I</sub> – A <sub>II</sub>	a <sub>I</sub> – c <sub>II</sub>
B <sub>I</sub> – B <sub>II</sub>	b <sub>I</sub> – a <sub>II</sub>
C <sub>I</sub> – C <sub>II</sub>	c <sub>I</sub> – b <sub>II</sub>

С обзиром на то да се преносни односи датих трансформатора међусобно разликују, за анализу паралелног рада биће примењено еквивалентно коло дато на слици испод.



Параметри у еквивалентном колу представљају **еквивалентне фазне напоне** на страни секундара, и **импедансе еквивалентне звезде**, такође сведене на секундар. Активне компоненте импеданси кратког споја биће занемарене, па величине еквивалентног кола имају следеће вредности:

$$\underline{E}_I = \frac{U_{02}^I}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V}$$

$$\underline{E}_{II} = \frac{U_{02}^{II}}{\sqrt{3}} = 242.5 \text{ V}$$

$$\underline{Z}_{kI} = jX_{kI}^Y = j \frac{u_k}{100} \cdot Z_{BI}^Y = j \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{2f}^I}{I_{2lin}^I} = j \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{02}^I / \sqrt{3}}{S_{nI} / (\sqrt{3} U_{02}^I)} = j \frac{u_k}{100} \cdot \frac{(U_{02}^I)^2}{S_{nI}} = j32 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{kII} = jX_{kII}^Y = j \frac{u_k}{100} \cdot Z_{BII}^Y = j \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{2f}^{II}}{I_{2lin}^{II}} = j \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{02}^{II} / \sqrt{3}}{[S_{nII} / (3 U_{02}^{II})] \cdot \sqrt{3}} = j \frac{u_k}{100} \cdot \frac{(U_{02}^{II})^2}{S_{nII}} = j35.3 \text{ m}\Omega$$

При томе, напон кратког споја оба трансформатора једнак је  $u_k = U_k / U_{1n} \cdot 100 = 4\%$ , према услову задатка. Приметити да су напони оба трансформатора у фази, захваљујући томе што су крајеви два трансформатора међусобно повезани тако да не постоји фазни раскорак између напона секундара.

На основу датог еквивалентног кола и добијених вредности напона и импеданси, лако се добија да је струја изједначења у празном ходу једнака:

$$\underline{I}_i = \frac{\underline{E}_I - \underline{E}_{II}}{\underline{Z}_{kI} + \underline{Z}_{kII}} = \boxed{j171.58 \text{ A}}$$

- б) Како би струја изједначења била минимална, потребно је да преносни односи датих трансформатора буду што приближнији, јер ће се на тај начин остварити приближније вредности напона празног хода првог и другог трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} m_I &= \frac{U_1 \cdot (1 + x \cdot 0.02)}{U_{02}^I} \\ m_{II} &= \frac{U_1}{U_{02}^{II}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\min(|m_I - m_{II}|) \\ &x \in \{-2, -1, 0, 1, 2\} \end{aligned} \Rightarrow x = -2$$

Дакле, регулациони отцеп треба поставити у најнижи положај. Тада је вредност напона  $\underline{E}_I$ , тј. напона празног хода првог трансформатора, износи:

$$\underline{E}_{I,novo} = \frac{U_{02,novo}^I}{\sqrt{3}} = \frac{U_1 / m_{I,novo}}{\sqrt{3}} = 240.56 \text{ V}$$

Остале вредности у еквивалентном колу приказаном на слици под а) остају непромењене. Нова вредност струје изједначења износи:

$$\underline{I}_{i,novo} = \frac{\underline{E}_{I,novo} - \underline{E}_{II}}{\underline{Z}_{kI} + \underline{Z}_{kII}} = \boxed{\text{j}28.83 \text{ A}}$$