

## ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13Е013ЕНТ)

Колоквијум – децембар 2018.

Трофазни уљни енергетски трансформатор има следеће номиналне податке:  $S_n = 100 \text{ kVA}$ ,  $U_1 / U_{02} = 10 / 0.4 \text{ kV}$ , спрега Dy7,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $P_{kn} = 2 \text{ kW}$ ,  $u_k = 6\%$ ,  $P_0 = 400 \text{ W}$ ,  $j_0 = 3.2\%$ .

1. Скицирати шеме веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове. Означити фазне прикључке намотаја и позиције хомологних крајева. .... (8)
2. Израчунати параметре еквивалентне заменске шеме на нисконапонској страни. Скицирати шему са уписаним бројним вредностима свих параметара. .... (15)
3. Губици у гвожђу датог трансформатора при напону напајања облика  $u_1(t) = U_1 \sqrt{2}(\cos \omega t + 0.3 \cos 3\omega t)$  износе  $380 \text{ W}$  ( $\omega = 2\pi f$ ). Одредити губитке услед вихорних струја и услед хистерезиса у номиналном режиму ( $u_1(t) = U_1 \sqrt{2} \cos \omega t$ ,  $P_{Fe} = P_0 = 400 \text{ W}$ ). Штајнмицов коефицијент једнак је 2. .... (16)
4. Уколико се број навојака оба намотаја смањи за по 10% ( $N_1' = 0.9N_1$ ,  $N_2' = 0.9N_2$ ), при задржавању истог попречног пресека проводника, проценити нове вредности: струје празног хода (%) и губитака у гвожђу при номиналном напону и учестаности, и напона кратког споја (%) и губитака у намотајима при номиналној вредности струје. Ефективна вредност и учестаност напона напајања су остали непромењени. Занемарити промене димензија намотаја (висине, ширине, средње дужине навојка) са променом броја навојака, као и промене магнетских карактеристика језгра услед евентуалне промене индукције. При прорачуну напона кратког споја сматрати да је  $X_k \gg R_k$ , тј.  $u_k \approx u_x$ . .... (18)
5. Снага загревања током првог дела огледа загревања **трофазног** двонамотајног трансформатора номиналне снаге  $50 \text{ MVA}$  у краткој споју (загревање укупном номиналном снагом губитака) износи  $P_{g \text{ tot}} = 264350 \text{ W}$ . Номинални губици у магнетном колу, измерени у огледу празног хода, износе  $P_0 = 15600 \text{ W}$ . Губици у сваком од намотаја (LV/HV), 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  $P_{\text{dod LV/HV}} = 2772 \text{ W} / 2870 \text{ W}$ .
  - а) Израчунати колико износи и објаснити где је јавља снага једнака разлици  $P_{raz} = P_{g \text{ tot}} - P_0 - P_{Cu}$ . ... (9)
  - б) Која два начина одређивања вредности  $P_{raz}$  се користе у пракси у фази пројектовања трансформатора?. (6)
6. Написати изразе чијим се решавањем може доћи до вредности пада напона на трансформатору без да се врши било какво занемарење у заменској шеми трансформатора:
  - а) Једну једначину по првом и три једначине по другом Кирхофовом закону, чијим се решавањем могу добити струје у свим гранама заменске шеме. .... (5)
  - б) Израз за напон на секундару, сматрајући да су једначине под а) решене. .... (5)
  - в) Израз за процентуалну вредност пада напона. .... (5)

Импеданса оптерећења секундра је позната и износи  $Z$ . Отпорности и индуктивности расипања примара и секундара су познате, као и вредности реактансе магнећења ( $X_m$ ) паралелно везане са отпорношћу ( $R_a$ ) у грани магнећења.

7. Трансформатор је номинално оптерећен ( $\beta = 1$ ), при чему је пад напона једнак напону кратког споја ( $\Delta u = u_k$ ). Одредити степен искоришћења трансформатора у овом режиму. Одредити потребну (трофазну) реактивну снагу батерија кондензатора које треба прикључити паралелно оптерећењу како би напон секундара био једнак напону празног хода  $U_{02}$ . У свим прорачунима занемарити попречну компоненту пада напона. .... (16)
8.
  - а) Нацртати топлотну шему са три чвора (један чвор за намотај примара, један чвор за намотај секундара и један чвор за остале делове трансформатора – уље, језгро и суд) и три топлотна капацитета. .... (7)
  - б) Навести значење сваког од елемената на шеми. .... (5)
  - в) Која карактеристика елемената топлотне шеме проистиче из претпоставке да су топлотни процеси линеарни? .... (5)

Колоквијум траје 150 минута. Дозвољено је поседовање само једне свеске за рад и концепт. Прецртати оно што није за преглед.

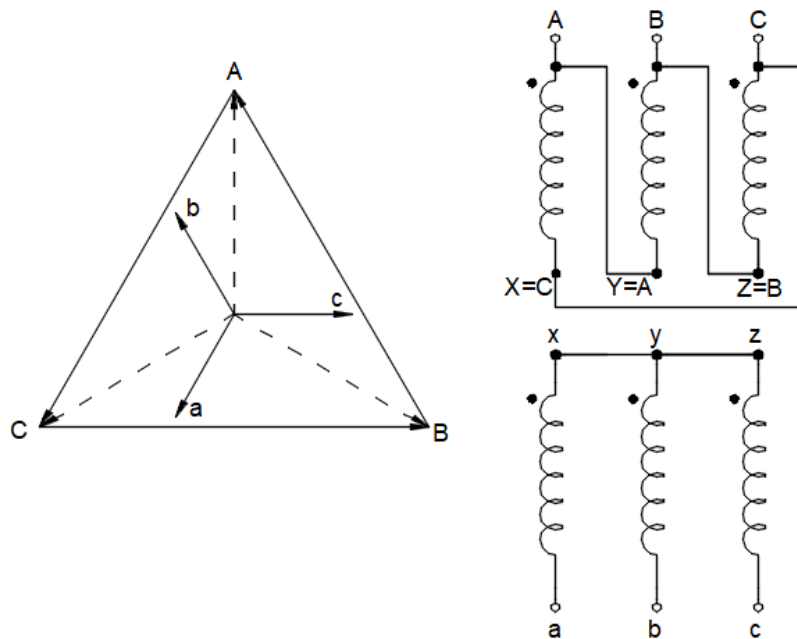
У Београду, 8. 12. 2018.

Проф. др Зоран Лазаревић  
Проф. др Зоран Радаковић

# ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13Е013ЕНТ)

Колоквијум – децембар 2018.

1. Векторски дијаграм и шема веза намотаја су приказани на слици.



2. ПХ:

$$R_a'' = \frac{U_{02f}^2}{P_{0f}} = \frac{(U_{02}/\sqrt{3})^2}{P_0/3} = 400 \, \Omega$$

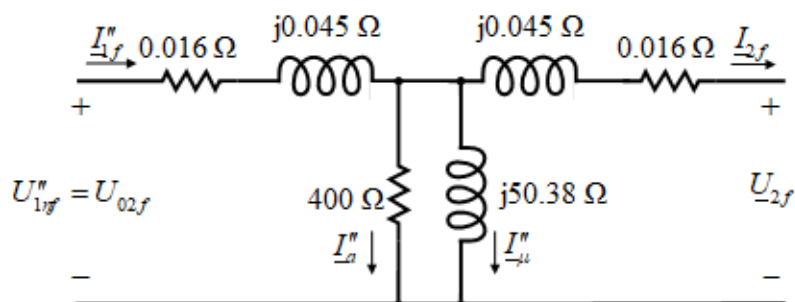
$$\left. \begin{aligned} I_{0f}'' &= \frac{j_0}{100} \cdot I_{2nf} = \frac{j_0}{100} \cdot \frac{S_n}{3U_{02f}} = 4.62 \, \text{A} \\ I_a'' &= \frac{U_{02f}}{R_a''} = 0.577 \, \text{A} \end{aligned} \right\} \Rightarrow I_\mu'' = \sqrt{(I_{0f}'')^2 - (I_{af}'')^2} = 4.58 \, \text{A}$$

$$X_\mu'' = \frac{U_{02f}}{I_\mu''} = 50.38 \, \Omega$$

КС:  $R_k'' = \frac{P_{kn}}{3I_{2nf}^2} = 0.032 \, \Omega \Rightarrow R_1'' \approx R_2'' = \frac{R_k''}{2} = 0.016 \, \Omega$

$$Z_k'' = \frac{u_k}{100} \cdot Z_B'' = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{02f}}{I_{2nf}} = 0.096 \, \Omega$$

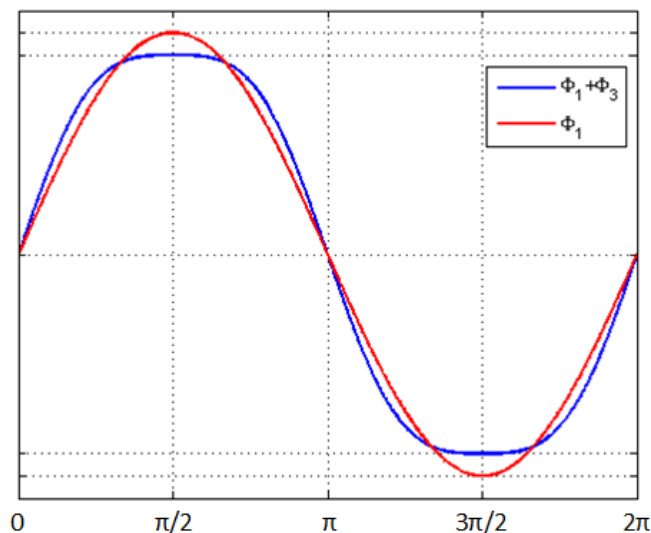
$$X_k'' = \sqrt{(Z_k'')^2 - (R_k'')^2} = 0.09 \, \Omega \Rightarrow X_{\sigma 1}'' \approx X_{\sigma 2}'' = \frac{X_k''}{2} = 0.045 \, \Omega$$



3. Флукс у језгру трансформатора одговара интегралу напона:

$$\Phi(t) = \frac{1}{N_1} \int u_1(t) dt = \frac{U_1 \sqrt{2}}{\omega N_1} (\sin \omega t + 0.1 \sin 3\omega t)$$

и његов таласни облик је дат на слици, заједно са таласним обликом флукса при напајању основним хармоником напона номиналне ефективне вредности:



Однос губитака услед вихорних струја при сложенепериодичном и простопериодичном напајању одговара односу квадрата ефективних вредности напона, а однос губитака услед хистерезиса односу одговарајућих максималних вредности индукције (флукса), с обзиром на то да је основна учестаност иста у оба случаја:

$$\frac{P'_v}{P_v} = \frac{U_1^2 + U_3^2}{U_1^2} = 1.09$$

$$\frac{P'_h}{P_h} = \left( \frac{\Phi'_{\max}}{\Phi_{1\max}} \right)^2 = \left( \frac{\Phi_{1\max} - \Phi_{3\max}}{\Phi_{1\max}} \right)^2 = 0.81$$

Сада се на основу укупних губитака у гвожђу у номиналном режиму и у режиму са додатим трећим хармоником напона могу одредити појединачни губици услед вихорних струја и хистерезиса у номиналном режиму:

$$\left. \begin{aligned} P'_{Fe} &= 380 \text{ W} = P'_v + P'_h = 1.09P_v + 0.81P_h \\ P_{Fe} &= 400 \text{ W} = P_v + P_h \end{aligned} \right\} \Rightarrow \boxed{P_v = P_h = 200 \text{ W}}$$

4. УВОДНА НАПОМЕНА: У наредним изразима, „прим“ означава величине новог трансформатора, а не величине сведене на примар. С обзиром на то да су бројеви навојака примара и секундара промењени за исти износ, сви параметри примара и секундара на које утиче промена броја навојака мењају се на исти начин, тако да је прорачун извршен разматрајући само величине са стране примара (исти односи параметара важе за секундар, као и за укупне вредности параметара).

При константном напону и учестаности, индукција (флукс) у језгру је обрнуто пропорционална броју навојака:

$$B'_m = \frac{N_1}{N'_1} B_m = 1.111 B_m \Rightarrow \Phi'_m = 1.111 \Phi_m$$

С обзиром на то да су магнетске карактеристике језгра и његове димензије непромењене, може се сматрати да је магнетски отпор на путу флукса у језгру исти као и код полазног трансформатора. Тако се,

на основу релације која повезује флукс и магнетопобудну силу намотаја може одредити потребна струја празног хода:

$$\left. \begin{aligned} \Phi'_m &= \frac{N'_1 I'_0}{R_\mu} = \frac{N'_1 \frac{j'_0}{100} \cdot I_{1nf}}{R_\mu} \\ \Phi_m &= \frac{N_1 I_0}{R_\mu} = \frac{N_1 \frac{j_0}{100} \cdot I_{1nf}}{R_\mu} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{j'_0}{j_0} = \frac{\Phi'_m}{\Phi_m} \cdot \frac{N_1}{N'_1} = \left( \frac{N_1}{N'_1} \right)^2 \Rightarrow \boxed{j'_0 = 3.95\%}$$

ДОДАТНА НАПОМЕНА: С обзиром на то да је, према услови задатка, пресек проводника непромењен, усваја се да је и номинална вредност струје такође непромењена.

С обзиром на то да је учестаност константна и да је Штајнмицов коефицијент једнак 2, и губици услед хистерезиса и губици услед вихорних струја сразмерни су квадрату магнетске индукције у језгру, па су и укупни губици у гвожђу сразмерни квадрату индукције:

$$\frac{P'_{Fe}}{P_{Fe}} = \left( \frac{B'_m}{B_m} \right)^2 = \left( \frac{N'_1}{N_1} \right)^2 \Rightarrow \boxed{P'_{Fe} = 493.8 \text{ W}}$$

Према услови задатка (а често и иначе у пракси), оправдано је претпоставити да је реактивна компонента напона кратког споја доминантна. У том случају, нова вредност напона кратког споја може се одредити на основу односа реактанси расипања новог и полазног трансформатора. С обзиром на то да су димензије намотаја непромењене, однос реактанси расипања једнак је једноставно односу квадрата бројева навојака примара и секундара (погледати израз за прорачун реактансе расипања на основу конструкционих података трансформатора):

$$\frac{u'_k}{u_k} \approx \frac{X'_k}{X_k} = \left( \frac{N'_1}{N_1} \right)^2 = 0.81 \Rightarrow \boxed{u'_k = 4.86\%}$$

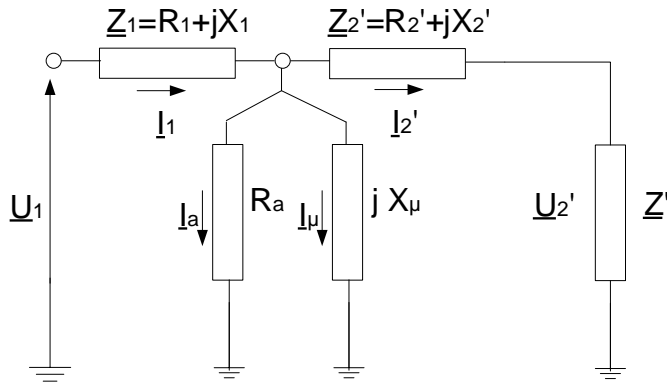
Губици у намотајима при непромењеној вредности струје биће сразмерни отпорности намотаја (с обзиром на константан попречни пресек и приближно исти распоред проводника у намотају, може се сматрати да је и Филдов сачинилац непромењен).

$$\frac{P'_k}{P_k} = \frac{R'_k}{R_k} = \frac{k_F \cdot \frac{\rho_{Cu} l'_{Cu1}}{S_{Cu1}}}{k_F \cdot \frac{\rho_{Cu} l_{Cu1}}{S_{Cu1}}} = \frac{l'_{Cu}}{l_{Cu}} = \frac{N'_1 l_{sr}}{N_1 l_{sr}} = \frac{N'_1}{N_1} \Rightarrow \boxed{P'_k = 1800 \text{ W}}$$

5. а) Разлика  $P_{g \text{ tot}} - P_o - P_{Cu}$  представља снагу губитака у конструкционим деловима и суду трансформатора ( $P_{Konstr}$ ) и износи  $P_{Konstr} = (264350 - 15600 - 3(22744 + 42239 + 2772 + 2870)) \text{ W} = 36875 \text{ W}$ .

б) Погледати други и трећи пасус у одељку 4.2.

6.



a)

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + R_a \underline{I}_a$$

$$R_a \underline{I}_a = j X_\mu \underline{I}_\mu$$

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{Z}'_2 \underline{I}'_2 + \underline{Z}' \underline{I}'_2$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_a + \underline{I}_\mu + \underline{I}'_2$$

б)

$$\underline{U}'_2 = \underline{Z}' \underline{I}'_2$$

в)

$$\Delta u_{\%} = 100 \frac{U_1 - U_2'}{U_1} = \frac{|\underline{U}_1| - |\underline{U}'_2|}{|\underline{U}_1|}$$

7.

Потребно је одредити фактор снаге оптерећења, тј. угао  $\varphi$  оптерећења, при ком је пад напона једнак напону кратког споја:

$$\Delta u = \beta(u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi) = u_k \stackrel{\beta=1}{\Rightarrow}$$

$$u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi = u_k \Leftrightarrow$$

$$u_r \sqrt{1 - \sin^2 \varphi} + u_x \sin \varphi = u_k \Leftrightarrow$$

$$u_r \sqrt{1 - \sin^2 \varphi} = u_k - u_x \sin \varphi \Leftrightarrow$$

$$u_r^2 (1 - \sin^2 \varphi) = u_k^2 - 2u_k u_x \sin \varphi + u_x^2 \sin^2 \varphi \Leftrightarrow$$

$$(u_r^2 + u_x^2) \sin^2 \varphi - 2u_k u_x \sin \varphi + (u_k^2 - u_r^2) = 0 \Leftrightarrow$$

$$u_k^2 \sin^2 \varphi - 2u_k u_x \sin \varphi + u_x^2 = 0$$

где је  $u_r = 2\%$ ,  $u_x = 5.66\%$  (на основу података из огледа КС). На основу ове анализе, долази се до фактора снаге оптерећења при којем је  $\Delta u = u_k$ :

$$\sin \varphi = \frac{u_x}{u_k} = 0.943 \Rightarrow \cos \varphi = \frac{u_r}{u_k} = 0.333 \text{ (инд)}$$

Активна и реактивна снага оптерећења једнаке су  $P = S_n \cos \varphi = 33.3 \text{ kW}$  и  $Q = S_n \sin \varphi = 94.3 \text{ kvar}$ , респективно. Приметити да је добијени фактор снаге, тј. одговарајући угао  $\varphi$ , једнак аргументу импедансе кратког споја (погледати задатак 12. (д) са часова рачунских вежби).

Степен искоришћења једнак је:

$$\eta = \frac{S_n \cos \varphi}{S_n \cos \varphi + P_{kn} + P_0} \cdot 100 = \boxed{93.28\%}$$

Фактор снаге при ком је пад напона једнак нули може се одредити из услова:

$$\Delta u' = 0 \Rightarrow \tan \varphi' = -\frac{u_r}{u_x} = -0.3536 \Rightarrow \cos \varphi' = 0.9428 \text{ (инд)}$$

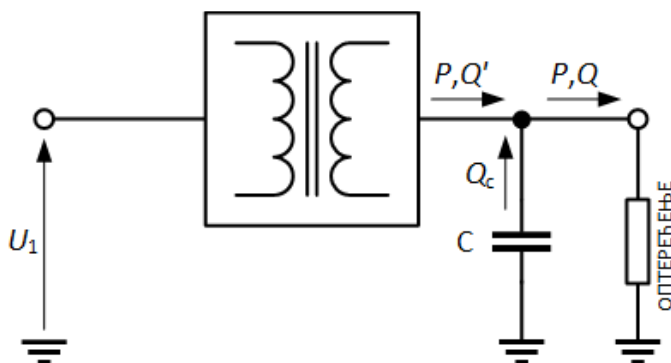
Прикључењем батерија кондензатора утиче се само на реактивну снагу оптерећења, при чему активна снага оптерећења остаје константна. Дакле, потребно је да реактивна снага оптерећења након компензације (прикључења батерија кондензатора) има вредност:

$$Q' = P \cdot \tan \varphi' = -11.78 \text{ kvar}$$

Потребна снага батерија кондензатора може се одредити као разлика реактивне снаге оптерећења пре и после компензације:

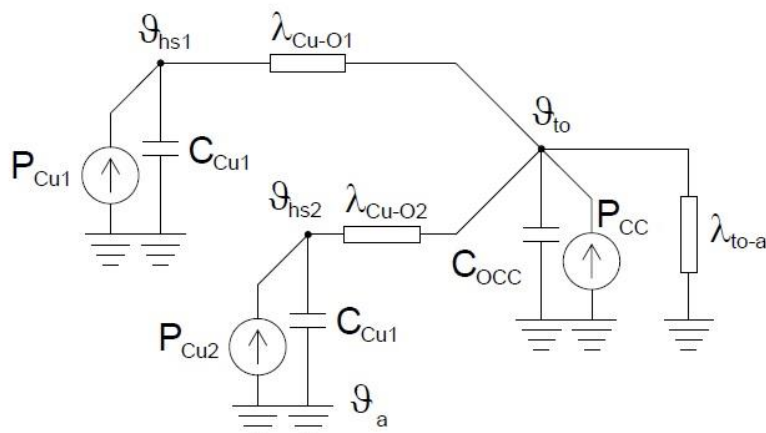
$$\boxed{Q_c = Q - Q' = 106.8 \text{ kvar}}$$

Приметити да је референтни смер реактивне снаге батерије кондензатора супротан од уобичајеног потрошачког смера, у складу са природом батерија кондензатора, које се понашају као **генератор** реактивне снаге (погледати једнополну шему испод).



8.

a)



б)

$P_{Cu1}$  - снага губитака у намотајима примара

$P_{Cu2}$  - снага губитака у намотајима секундара

$P_{CC}$  - снага губитака у језгру и у суду

$\lambda_{Cu-O1}$  - топлотна проводност преноса топлоте од намотаја примара ка уљу

$\lambda_{Cu-O2}$  - топлотна проводност преноса топлоте од намотаја секундара ка уљу

$\lambda_{to-a}$  - топлотна проводност преноса топлоте од уља, односно суда и радијатора, ка амбијенту

$C_{Cu1}$  - топлотни капацитет намотаја примара

$C_{Cu2}$  - топлотни капацитет намотаја секундара

$C_{OCC}$  - топлотни капацитет уља, језгра и суда

$\theta_{hs1}$  - карактеристична температура (најтоплија тачка) намотаја примара

$\theta_{hs2}$  - карактеристична температура (најтоплија тачка) намотаја секундара

$\theta_{to}$  - карактеристична температура (горње уље) језгра, уља и суда

$\theta_a$  - температура амбијента

в)  $\lambda_{Cu-O1}$ ,  $\lambda_{Cu-O2}$  и  $\lambda_{to-a}$  су константне вредности (не зависе од температуре)