

## ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13Е013ЕНТ)

Јануар 2019.

Трофазни уљни дистрибутивни индустријски трансформатор има номиналне податке:  $S_n = 1000 \text{ kVA}$ ,  $U_1 / U_{02} = 20 / 6.3 \text{ kV}$ , спрега Yd11,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $P_0 = 1.4 \text{ kW}$  ( $P_H:P_V = 3:2$ ),  $j_0 = 1.3\%$ ,  $P_k = 12.8 \text{ kW}$ ,  $u_k = 5\%$ , Филдов сачинилац (исти за оба намотаја)  $k_F = 1.06$ .

### I део

1. Нацртати шему веза и векторски дијаграм напона датог трансформатора представљајући намотаје као калемове. .... (8)
2. Ако се дати трансформатор напаја из мреже учестаности 60 Hz тако да максимална вредност индукције остане непромењена, одредити максимално дозвољено оптерећење тако да укупни губици остану исти као у номиналном режиму. .... (14)
3. Израчунати параметре еквивалентног кола датог трансформатора са ВН стране и скицирати шему са уписаним бројним вредностима свих параметара и електричних величина. .... (12)
4. Одредити снагу трофазне кондензаторске батерије коју треба везати на а) примар, б) секундар да би се на месту прикључка на мрежу (на примару) имао јединични фактор снаге. Трансформатор је оптерећен номиналним оптерећењем на секундару, уз фактор снаге 0.8 (инд). Сматрати да су губици у гвозђу и струја магнећења једнаки вредностима одређеним у огледу празног хода. .... (15)
5. Скицирати расподелу температуре уља и изолације проводника намотаја по висини трансформатора. На дијаграму приказати и температуру најтоплије тачке намотаја. Навести значење свих позиција и карактеристичних величина (компоненти) на дијаграму. .... (11)

### II део

6. Задатом трансформатору се паралелно прикључују два трансформатора исте спреге и преносног односа, чије су номиналне снаге  $S_{n2} = 500 \text{ kVA}$ ,  $S_{n3} = 630 \text{ kVA}$  и напони кратког споја  $u_{k2} = 6\%$ ,  $u_{k3} = 4\%$ . Колико је максимално дозвољено оптерећење тако да ниједан трансформатор не буде преоптерећен и колика су тада оптерећења појединачних трансформатора? Ако је фактор снаге оптерећења 0.8 (инд) и напон напајања једнак номиналном, одредити напон на крајевима секундара трансформатора. За потребе овог прорачуна, сматрати да је  $\varphi_{k1} = \varphi_{k2} = \varphi_{k3} = 90^\circ$ . .... (12)
7. Увести апроксимацију стварног облика магнетног хистерезиса са две праве линије и на основу ње извести израз за максималну вредност струје при укључењу трансформатора у празном ходу. Потребно је графички или текстуално дефинисати сваку од величина које фигуришу у коначном изразу. .... (12)
8. Скицирати временску промену потенцијала на свакој од позиција дуж висине намотаја на чији један крај наилази пренапонски талас, док је други крај уземљен. Скице дати за две вредности коефицијента који карактерише однос серијских и паралелних капацитета ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ), при чему је  $\alpha_1 \approx 3 \alpha_2$ . .... (12)
9. Нацртати еквивалентну шему тронамотајног трансформатора. Објаснити како се из мерења могу добити параметри еквивалентне шеме. .... (12)
10. Одредити фазне и линијске струје примара и секундара уколико је између крајева В и С примара доведен једнофазни напон ефективне вредности 20 kV, а на крајеве секундара прикључено симетрично трофазно резистивно оптерећење отпорности  $R_p = 50 \Omega/\text{фази}$ . .... (12)

Испит траје 180 минута, а други колоквијум (питања 6-10) 120 минута. Дозвољено је поседовање само једне свеске за рад и концепт. Прецртати оно што није за преглед.

У Београду, 19.01.2019.

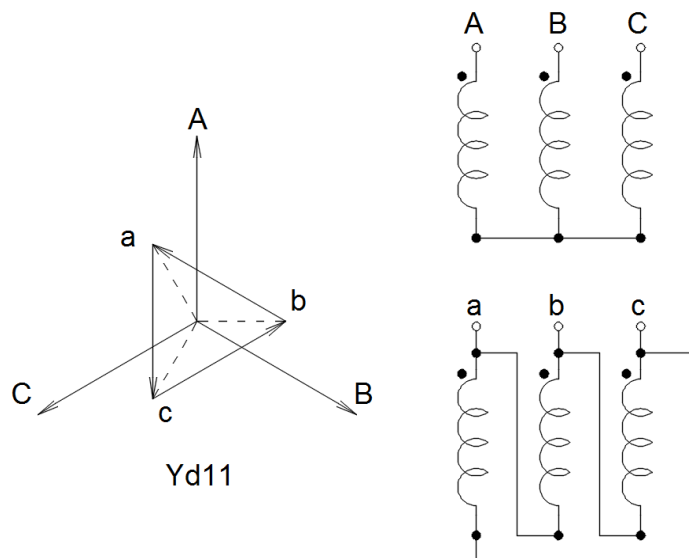
Проф. др Зоран Лазаревић  
Проф. др Зоран Радаковић

# ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (ОГЗЕТ)

Јануар 2019.

Београд, 19. 1. 2019.

1.



2. Цулови губици и додатни губици при учестаности 50 Hz:

$$P_{Cu} = \frac{P_k}{k_F} = \frac{12800}{1,06} = 12075 \text{ W} \Rightarrow P_d^{50} = 725 \text{ W}$$

Додатни губици при учестаности 60 Hz и номиналном оптерећењу:

$$P_d^{60} = P_d^{50} \cdot \left(\frac{60}{50}\right)^2 = 1044 \text{ W}$$

Укупни губици у намотајима при номиналном оптерећењу (струји) и учестаности 60 Hz:

$$P_k^{60} = P_{Cu} + P_d^{60} = 13119 \text{ W}$$

Напон напајања који обезбеђује константну вредност индукције при учестаности 60 Hz:

$$U_1^{60} = \frac{60}{50} U_1 = 24 \text{ kV}$$

Нова вредност губитака у језгру:

$$P_0^{60} = P_V^{60} + P_H^{60} = \left(\frac{60}{50}\right)^2 P_V + \frac{60}{50} P_H = 1.44 \cdot \frac{2}{5} P_0 + 1.2 \cdot \frac{3}{5} P_0 = 1.81 \text{ kW}$$

Задати услов – одредити оптерећење при ком ће вредност губитака при 60 Hz бити једнака оној у номиналном режиму:

$$\beta^2 P_k^{60} + P_0^{60} = P_k + P_0 = 14.2 \text{ kW} \Rightarrow \boxed{\beta = 0.9718}$$

Дакле, максимално допуштено оптерећење при новој учестаности је 97.18% од номиналног оптерећења.

3. ПХ:

$$R_a = \frac{U_{1nf}^2}{P_0/3} = \frac{20000^2}{1400} = 285,7 \text{ k}\Omega \Rightarrow I_{af} = \frac{U_{1nf}}{R_a} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 285,7 \cdot 10^3} = 0,04 \text{ A}$$

$$I_{0f} = \frac{j_0}{100} \cdot I_{1nf} = \frac{1,3}{100} \cdot 28,87 = 0,375 \text{ A} \Rightarrow I_{\mu f} = \sqrt{I_{0f}^2 - I_{af}^2} = \sqrt{0,375^2 - 0,04^2} = 0,373 \text{ A}$$

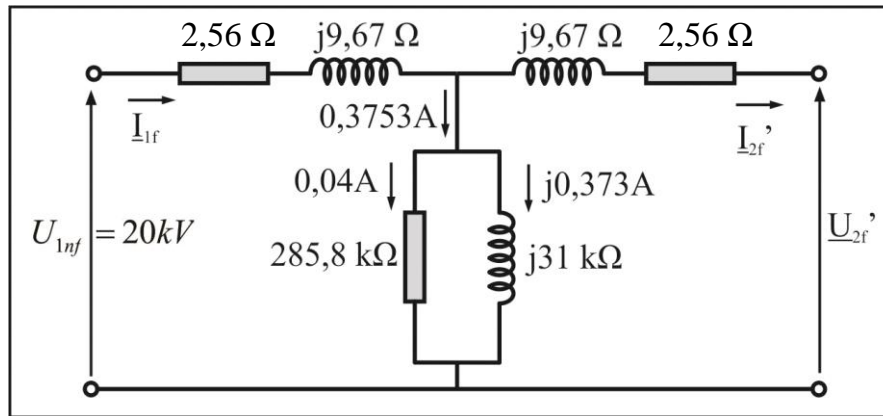
$$X_\mu = \frac{U_{1nf}}{I_{\mu f}} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 0,373} \approx 31 \text{ k}\Omega$$

КС:

$$R_k = \frac{P_{kn}}{3I_{1nf}^2} = \frac{12800}{3 \cdot 28.87^2} = 5.12 \Omega \Rightarrow R_1 \approx R_2' = \frac{R_k}{2} = 2.56 \Omega$$

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{1nf}}{I_{1nf}} = \frac{5}{100} \cdot \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 28.87} = 20 \Omega$$

$$\Rightarrow X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 19.33 \Omega \Rightarrow X_{\sigma 1} \approx X_{\sigma 2}' = \frac{X_k}{2} = 9.67 \Omega$$



4. У оба случаја је потребно да реактивна снага која се узима из мреже, тј. на улазним прикључцима примара, буде једнака нули. Биланс реактивних снага је приказан на слици испод. С обзиром на услов да је струја магнећења константна, оправдано је посматрати „Г“ шему трансформатора. Поред тога, биће сматрано да су напони на крајевима примара и секундара једнаки номиналним вредностима, тј. биће занемарен пад напона. Лева слика се односи на случај под (а), а десна слика на случај под (б). Ознаке на сликама имају следеће значење:  $Q_1$  – реактивна снага на прикључцима примара,  $Q_C$  – реактивна снага батерије кондензатора,  $Q_\mu$  – реактивна снага магнећења,  $Q_k$  – реактивна снага расипања,  $Q_p$  – реактивна снага потрошача. Може се видети да, на основу биланса реактивних снага (обратити пажњу на контуру назначену испрекиданом линијом), у оба случаја мора да буде испуњен услов:

$$Q_1 + Q_C - Q_k - Q_p - Q_\mu = 0 \Rightarrow Q_C = Q_k + Q_p + Q_\mu \dots\dots\dots (*)$$

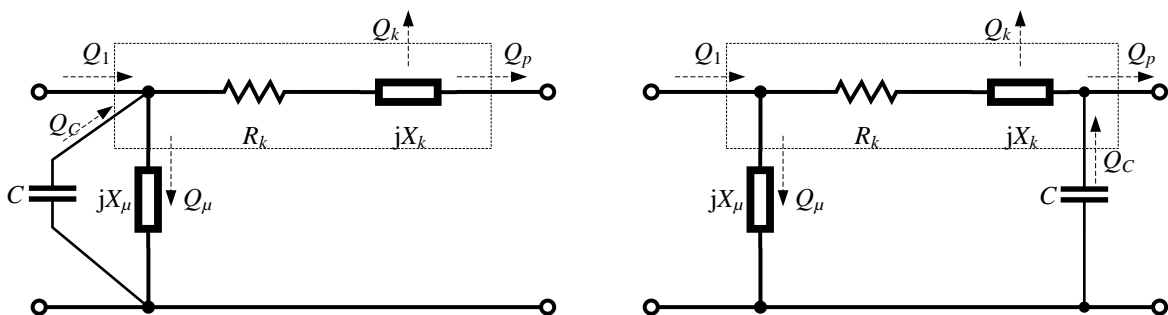
Реактивна снага потрошача  $Q_p$  и реактивна снага магнећења  $Q_\mu$  су константне и независне од прикључења батерије кондензатора:

$$Q_\mu = 3U_{1nf} I_{\mu f} = 12.92 \text{ kvar}$$

$$Q_p = S_n \sin \varphi = 0.6 S_n = 600 \text{ kvar}$$

Једино ће реактивна снага расипања зависити од места прикључења батерије кондензатора, јер се снага која се кроз трансформатора преноси ка оптерећењу мења, па самим тим и струја у намотајима, а последично и реактивна снага расипања:

$$Q_k = 3X_k I_{1f}^2$$



а) С обзиром на то да је компензација извршена на прикључцима примара, струја у намотајима трансформатора имаће номиналну вредност, с обзиром на то да се кроз

трансформатор преноси целокупна снага оптерећења (погледати леву слику). С обзиром на то, реактивна снага расипања једнака је:

$$Q_{ka} = 3X_k I_{1nf}^2 = 48.33 \text{ kvar}$$

па је на основу релације (\*) потребна снага батерије кондензатора:

$$Q_C = Q_{ka} + Q_p + Q_\mu = \boxed{661.25 \text{ kvar}}$$

(б) У овом случају се компензација изводи на секундарним крајевима, тако да се директно компензује реактивна снага оптерећења, па се тиме смањује реактивна снага која се преноси кроз трансформатор. Снага која се преноси кроз трансформатор једнака је:

$$P = P_p = 0.8S_n = 800 \text{ kW}$$

$$Q = Q_p - Q_C = 600 \text{ kvar} - Q_C$$

Дакле, струја трансформатора биће мања од номиналне, па ће доћи до смањења реактивне снаге расипања:

$$I_{1f} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{3U_{1nf}^2} = I_{1nf} \cdot \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{S_n} \Rightarrow Q_{k\bar{o}} = X_k I_{1f}^2 = \underbrace{X_k I_{1nf}^2}_{Q_{ka}} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{S_n^2} = Q_{ka} \cdot \frac{P^2 + (Q_p - Q_C)^2}{S_n^2}$$

Увођењем добијеног израза за  $Q_{k\bar{o}}$  у релацију (\*), добија се квадратна једначина по  $Q_C$ :

$$Q_C = Q_{k\bar{o}} + Q_p + Q_\mu = Q_{ka} \cdot \frac{P^2 + (Q_p - Q_C)^2}{S_n^2} + Q_p + Q_\mu \Leftrightarrow$$

$$\frac{Q_{ka}}{S_n^2} Q_C^2 - \left(1 + \frac{2Q_p Q_{ka}}{S_n^2}\right) Q_C + Q_{ka} \frac{\overbrace{P^2 + Q_p^2}^{S_n^2}}{S_n^2} + Q_p + Q_\mu = 0 \Leftrightarrow$$

$$Q_C^2 - \left(\frac{S_n^2}{Q_{ka}} + 2Q_p\right) Q_C + S_n^2 \left(1 + \frac{Q_p}{Q_{ka}} + \frac{Q_\mu}{Q_{ka}}\right) = 0$$

Усваја се решење добијене квадратне једначине које има практичан значај (друго решење је  $>20 \text{ Mvar}$ ):

$$\boxed{Q_C = 643.9 \text{ kvar}}$$

Може се уочити да се исти услов остварује са мањом примењеном снагом батерије кондензатора у случају када се компензација врши на крајевима секундара, јер се у том случају смањује реактивна снага расипања.

5. Поглавље 5, од последњег пасуса на страни 14 до краја одељка 5.2.3.

$$6. \sum \frac{S_{ni}}{u_{ki}} = \frac{1000}{5} + \frac{500}{6} + \frac{630}{4} = 440.83$$

Најугроженији је трансформатор који има најмањи напон кратког споја, те је потребно максимално дозвољено оптерећење одредити тако да он не буде преоптерећен:

$$S_{dozv} = u_{k \min} \sum \frac{S_{ni}}{u_{ki}} = u_{k3} \sum \frac{S_{ni}}{u_{ki}} = 4 \cdot 440.83 = \boxed{1763.3 \text{ kVA}}$$

$$\Rightarrow S_1 = 800 \text{ kVA}, S_2 = 333 \text{ kVA}, S_3 = 630 \text{ kVA}$$

Напон секундара се може одредити прорачуном пада напона на било ком од три паралелно везана трансформатора ( $u_{r1} = u_{r2} = u_{r3} = 0$  због услова  $\varphi_{k1} = \varphi_{k2} = \varphi_{k3} = 90^\circ$ ):

$$\beta_3 = 1, \cos \varphi_3 = 1$$

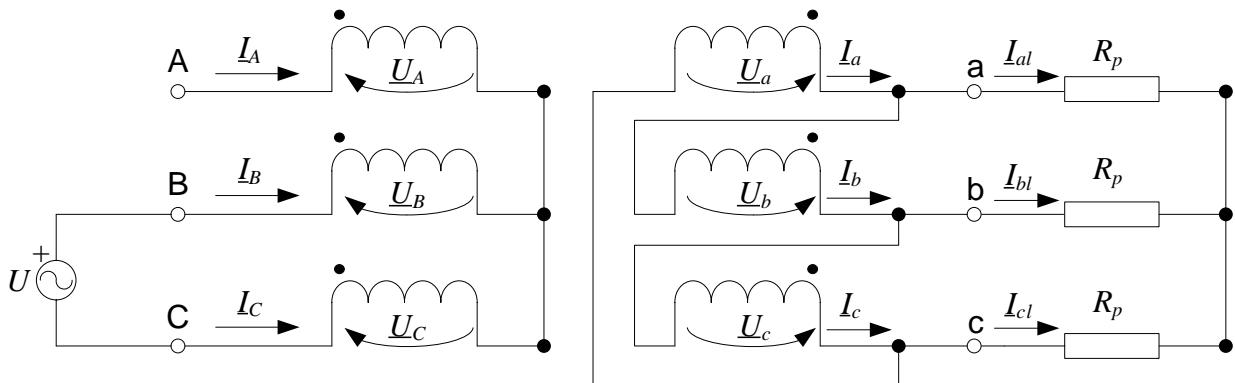
$$\Rightarrow a_3 = \beta_3 (u_{r3} \cos \varphi_3 + u_{x3} \sin \varphi_3) = 0.6u_{k3} = 2.4\%$$

$$\Rightarrow b_3 = \beta_3 (u_{x3} \cos \varphi_3 - u_{r3} \sin \varphi_3) = 0.8u_{k3} = 3.2\%$$

$$\Rightarrow \Delta u = a_3 + \frac{b_3^2}{200} = 2.45\%$$

$$\Rightarrow U_2 = U_{02} \cdot \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right) = 6.14 \text{ kV}$$

7. Поглавље 6, од последњег пасуса на страни 14 до формуле на страни 16.
8. Поглавље 6, Слика 6.22 и Слика 6.26.
9. Поглавље 10, од друге половине стране 5 до табеле 10.1., укључујући и табелу.
10. Шема веза која одговара описаном режиму приказана је на слици испод.



Једначине физичке очигледности у фазном домену и у домену симетричних компоненти:

- Примар:

$$U_B - U_C = U \Rightarrow (a^2 - a)(U_{1d} - U_{1i}) = U$$

$$\left. \begin{array}{l} I_A = 0 \\ I_B = -I_C \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} I_{10} = 0 \\ I_{1d} = -I_{1i} \end{array}$$

- Секундар:

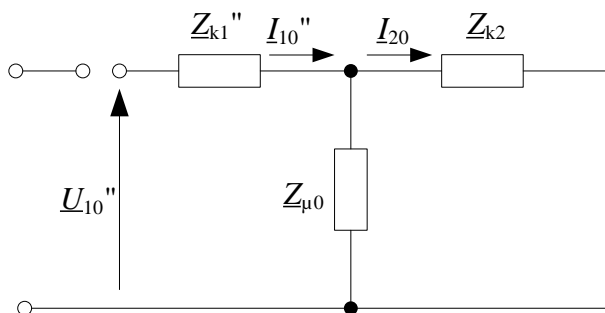
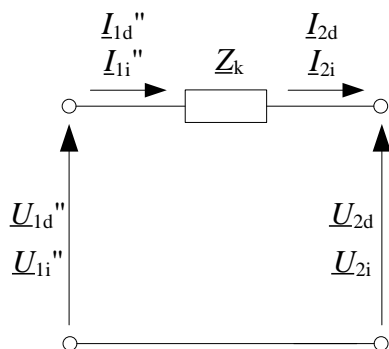
$$\left. \begin{array}{l} U_a = R_p(I_{al} - I_{cl}) = R_p(I_a - I_b - I_c + I_a) = R_p(2I_a - I_b - I_c) \\ U_b = R_p(I_{bl} - I_{al}) = R_p(I_b - I_c - I_a + I_b) = R_p(2I_b - I_c - I_a) \\ U_a + U_b + U_c = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} U_{2d} + U_{2i} = 3R_p(I_{2d} + I_{2i}) \\ a^2U_{2d} + aU_{2i} = 3R_p(a^2I_{2d} + aI_{2i}) \\ U_{20} = 0 \end{array}$$

Из прве две једначине једноставно се долази до релација:

$$U_{2d} = 3R_p I_{2d}$$

$$U_{2i} = 3R_p I_{2i}$$

На основу претходних релација, може се закључити да у разматраном случају не постоје нулте компоненте напона и струја. До овог закључка се могло доћи и интуитивно, имајући у виду да не постоји побуда која би створила нулте компоненте струја (погледати еквивалентно коло трансформатора за нулти редослед дато на десној слици испод).



Дакле, у даљем разматрању биће анализирани само величине директног и инверзног редоследа. На основу еквивалентног кола за директни и инверзни редослед (слика изнад лево), има се да је  $I_{2d} = I_{1d}''$  и  $I_{2i} = I_{1i}''$ , тако да важи  $I_{2d} = -I_{2i}$ . Напонске једначине за директни и инверзни редослед гласе:

$$U_{1d}'' - Z_k I_{2d} = U_{2d}$$

$$U_{1i}'' - Z_k I_{2i} = U_{2i}$$

Множењем обе једнакости са  $(a^2 - a)$  и њиховим одузимањем, добија се следећа релација:

$$(a^2 - a)(U_{1d}'' - U_{1i}'') - Z_k (a^2 - a)(I_{2d} - I_{2i}) = (a^2 - a)(U_{2d} - U_{2i}) \Leftrightarrow$$

$$U'' - 2Z_k (a^2 - a) I_{2d} = 6R_p (a^2 - a) I_{2d} \Rightarrow I_{2d} = \frac{U''}{(a^2 - a)(6R_p + 2Z_k)}$$

Уз уважавање чињенице да је  $Z_k \ll R_p$  и  $a^2 - a = -j\sqrt{3}$ , добијени израз се може поједноставити:

$$I_{2d} \approx \frac{jU/n}{6\sqrt{3}R_p} = \frac{j6300\sqrt{3}}{6\sqrt{3}R_p} = j21 \text{ A}$$

$$I_{2i} = -I_{2d} = -j21 \text{ A}$$

Фазне струје секундара једнаке су:

$$I_a = I_{2d} + I_{2i} = 0$$

$$I_b = a^2 I_{2d} + a I_{2i} = 36.37 \text{ A}$$

$$I_c = a I_{2d} + a^2 I_{2i} = -36.37 \text{ A}$$

Линијске струје секундара:

$$I_{al} = I_a - I_b = -36.37 \text{ A}$$

$$I_{bl} = I_b - I_c = 73.75 \text{ A}$$

$$I_{cl} = I_c - I_a = -36.37 \text{ A}$$

Фазне (истовремено и линијске) струје примара:

$$I_A = I_{1d} + I_{1i} = \frac{1}{n}(I_{2d} + I_{2i}) = \frac{1}{n} I_a = 0$$

$$I_B = a^2 I_{1d} + a I_{1i} = \frac{1}{n}(a^2 I_{2d} + a I_{2i}) = \frac{1}{n} I_b = 19.84 \text{ A}$$

$$I_C = a I_{1d} + a^2 I_{1i} = \frac{1}{n}(a I_{2d} + a^2 I_{2i}) = \frac{1}{n} I_c = -19.84 \text{ A} (\equiv -I_B)$$