

ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13E013ЕНТ)
- фебруар 2017 -

Трофазни уљни дистрибутивни индустријски трансформатор има номиналне податке:
 $S_n = 1000 \text{ kVA}$, $U_1 / U_{20} = 20 / 6,3 \text{ kV}$, 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. (9)
2. Израчунати параметре еквивалентне заменске шеме на ВН страни и скицирати шему са уписаним бројним вредностима свих електричних величина. (11)
3. Ако се дати трансформатор напаја из мреже учестаности 60 Hz тако да максимална вредност индукције остане непромењена, одредити при ком оптерећењу ће се имати максимална вредност степена искоришћења. Колико износи та максимална вредност степена искоришћења? (13)
4. Нацртати фазорски дијаграм за одређивање разлике напона на примарној и секундарној страни трансформатора за случај капацитивног оптерећења на секундару. Занемарити адмитансу у попречној грани заменске шеме трансформатора. (11 поена)
5. Конструисати криву струје магнећења трансформатора. (11 поена)

II део

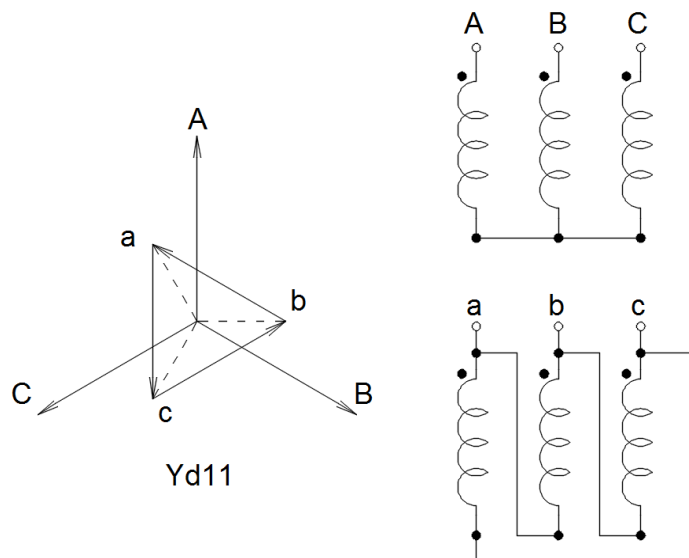
6. Полазећи од познатих вредности температуре најтоплије тачке намотаја на сваких минут времена, написати израз за одређивање релативног старења у току године (365 дана) ако је изолација нормални крафт папир. (11)
7. Задати трансформатор треба везати тако да ради као аутотрансформатор у спрези троугао са максималном могућом пролазном снагом. Одредити номиналне напоне и струје овако формираног аутотрансформатора. Колики је напон на крајевима секундара овако формираног аутотрансформатора када је оптерећен половином пролазне снаге, ако је напон напајања једнак номиналном? (11)
8. Задатом трансформатору се паралелно прикључују два трансформатора чије су номиналне снаге $S_{n2} = 500 \text{ KVA}$, $S_{n3} = 630 \text{ KVA}$ и напони кратког споја $u_{k2} = 6\%$, $u_{k3} = 4\%$, при чему је $\varphi_{k1} = \varphi_{k2} = \varphi_{k3}$. Одредити како ће се на поједине трансформаторе расподелити укупно оптерећење $S = 2500 \text{ kVA}$. Колико је максимално дозвољено оптерећење тако да ниједан трансформатор не буде преоптерећен и колика су тада оптерећења појединих трансформатора? (11)
9. Нацртати и објаснити заменску шему која описује појаве у комплетном фреквентном опсегу чела и зачеља пренапонског таласа. Од чега зависе вредности елемената шеме? (11)
10. Израчунати струје кроз намотаје и струје кроз линијске проводнике на страни примара и секундара трансформатора у случају да дође до прекида фазе c током напајања симетричног трофазног пријемника чија је привидна снага једнака номиналној привидној снази трансформатора, а фактор снаге 0.8 инд. Напајање трансформатора на примару је уравнотеженим симетричним системом напона (напон фазе b **предњачи** напону фазе a за 120°). (11)

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.

ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (ОГЗЕТ)
- фебруар 2017 -

Београд, 11.02.2017.

1.



2. ПХ:

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

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

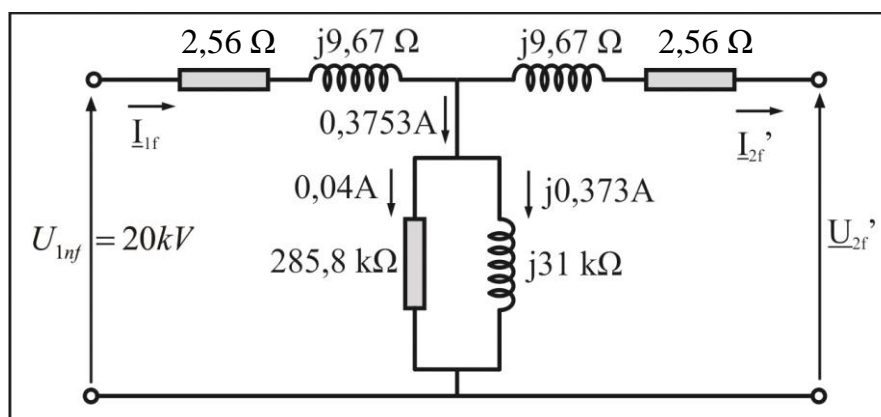
$$X_\mu = \frac{U_{1nf}}{I_{\mu f}} = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 0,373} \approx 31 \text{ k}\Omega$$

КС:

$$R_k = \frac{P_{kn}}{3I_{1nf}^2} = \frac{12800}{3 \cdot 28,87^2} = 5,12 \Omega \Rightarrow R_1 \approx R_2' = \frac{R_k}{2} = 2,56 \Omega$$

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{1nf}}{I_{1nf}} = \frac{5}{100} \cdot \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 28,87} = 20 \Omega$$

$$\Rightarrow X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 19,33 \Omega \Rightarrow X_{\sigma 1} \approx X_{\sigma 2}' = \frac{X_k}{2} = 9,67 \Omega$$



3. 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:

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

Укупни губици у намотајима при номиналној струји и учестаности 60 Hz:

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

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

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

Нова вредност губитака у језгру:

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

Максимална вредност степена искоришћења има се при релативном оптерећењу:

$$\beta_{opt} = \sqrt{\frac{P_0^{60}}{P_k^{60}}} = 0.371, \quad \cos \varphi_{opt} = 1$$

и износи:

$$\eta_{max} = \frac{\beta_{opt} \sqrt{3} U_1^{60} I_{ln}}{\beta_{opt} \sqrt{3} U_1^{60} I_{ln} + \beta_{opt}^2 P_k^{60} + P_0^{60}} \cdot 100 = 99.19\%$$

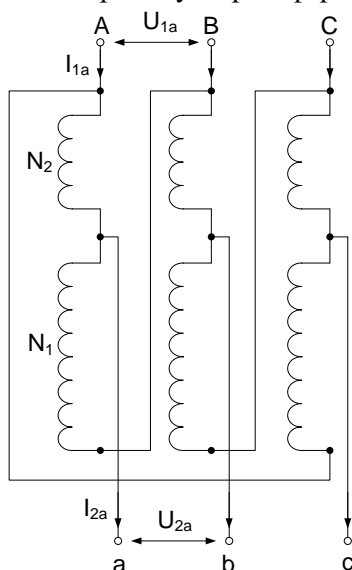
4. Слика 4. 12.

5. Одељак 2.2.2.

6. За старење у току дана видети страну 7, Поглавље 5.

$$RS = \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 60} \sum_{i=1}^{365 \cdot 24 \cdot 60} RS_i = \frac{1}{525600} \sum_{i=1}^{525600} 2^{\frac{\theta_{mi} - 98^0 C}{6}}$$

7. Тражена спрега аутотрансформатора приказана је на слици:



Преносни однос аутотрансформатора једнак је:

$$n_a = \frac{N_1}{N_1 + N_2} = \frac{U_{1nf}}{U_{1nf} + U_{2nf}} = \frac{U_1 / \sqrt{3}}{U_1 / \sqrt{3} + U_{20}} = 1.546$$

Номинални напони и струје аутотрансформатора износе:

$$U_{1a} = U_{1nf} + U_{2nf} = U_1 / \sqrt{3} + U_{20} = 17.85 \text{ kV}$$

$$U_{2a} = |U_{1nf} + U_{2nf} \cdot e^{-j2\pi/3}| = 10.01 \text{ kV}$$

$$I_{1a} = |I_{2nf} + I_{1nf} \cdot e^{j2\pi/3}| = 45.88 \text{ A}$$

$$I_{2a} = I_{1nf} + I_{2nf} = 81.78 \text{ A}$$

одакле је пролазна снага аутотрансформатора:

$$S_{Pa} = \sqrt{3} U_{1a} I_{1a} = \sqrt{3} U_{2a} I_{2a} = 1418 \text{ kVA}$$

Напон кратког споја аутотрансформатора износи:

$$u_{ka} = \frac{S_T}{S_{Pa}} \cdot 5 = 3.53\%, \quad u_{ra} = \frac{P_k}{S_{Pa}} \cdot 100 = 0.198\% \Rightarrow u_{xa} = \sqrt{u_{ka}^2 - u_{ra}^2} = 3.521\%$$

$$a = \beta(u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi) = 0.5 \cdot 0.198 \cdot 1 = 0.099\%$$

$$b = \beta(u_x \cos \varphi - u_r \sin \varphi) = 0.5 \cdot 3.521 \cdot 1 = 1.761\%$$

$$\Delta u = a + \frac{b^2}{200} = 0.1145\%$$

$$U_2 = U_{2a} \left(1 - \frac{\Delta u}{100}\right) = 10.01 \cdot \left(1 - \frac{0.1145}{100}\right) \approx 10 \text{ kV}$$

$$8. \sum \frac{S_{ni}}{u_{ki}} = \frac{1000}{5} + \frac{500}{6} + \frac{630}{4} = 440.83$$

$$S_1 = \frac{2500}{\frac{5}{1000} \cdot 440.83} = 1134.2 \text{ kVA}$$

$$S_2 = \frac{1800}{\frac{6}{500} \cdot 440.83} = 472.6 \text{ kVA}$$

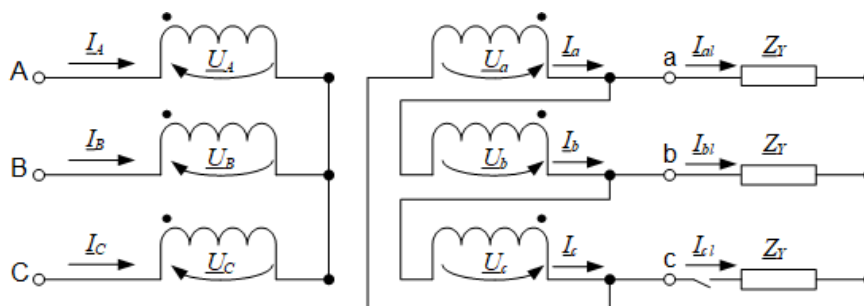
$$S_3 = \frac{2500}{\frac{4}{630} \cdot 440.83} = 893.2 \text{ kVA}$$

$$S_d = u_{k \min} \sum \frac{S_{ni}}{u_{ki}} = 4 \cdot 440.83 = 1763.3 \text{ kVA} \Rightarrow S_1' = 800 \text{ kVA}, S_2' = 333 \text{ kVA}, S_3' = 630 \text{ kVA}$$

9. Слика 6.17. и текст пасуса испред слике 6.17.

10. Решење проблема дефинисаног текстом задатка

НАПОМЕНА: Биће подразумевано да су све величине комплексне, без подвлачења. Све величине коришћене у прорачуну приказане су на слици.



Импеданса пријемника (еквивалентна, ако је пријемник спрегнут у троугао, или стварна, ако је пријемник везан у звезду) износи

$$Z_Y = \frac{U^2}{S_n} e^{j a \cos(0.8)} = \frac{6.3^2}{1} e^{j a \cos(0.8)} = 39.69 e^{j 36.86^\circ} = (31.752 + j 23.814) \Omega$$

Треба поћи од једначина физичке очигледности у фазном домену:

$$I_{cl} = 0 \Rightarrow I_c = I_a$$

$$-U_b = 2Z_Y I_{al} \Rightarrow -U_b = 2Z_Y (I_a - I_b)$$

Даље, ове једначине треба изразити у домену симетричних компоненти (на основу спреге трансформатора је очигледно да су нулте компоненте струја са обе стране једнаке нули):

$$a I_{2d} + a^2 I_{2i} = I_{2d} + I_{2i} \Rightarrow I_{2i} = \frac{a-1}{1-a^2} I_{2d} = \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) I_{2d} = a \cdot I_{2d}$$

$$-(a^2 U_{2d} + a U_{2i}) = 2Z_Y (I_{2d} + I_{2i} - a^2 I_{2d} - a I_{2i}) = 2Z_Y [(1-a^2) I_{2d} + (1-a) I_{2i}]$$

Заменом прве у другу једначину добија се:

$$-(a^2 U_{2d} + a U_{2i}) = 2Z_Y [(1-a^2) I_{2d} + (1-a) a I_{2d}] = 2Z_Y \left(1+a-2a^2 \right) I_{2d} = -6a^2 Z_Y I_{2d}$$

$$\Rightarrow \boxed{a^2 U_{2d} + a U_{2i} = 6Z_Y \cdot a^2 I_{2d}}$$

Сада треба поставити напонске једначине за директан и инверзан систем (за нулти, као што је већ објашњено, није потребно):

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

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

С обзиром на то да, према услову задатка, напон фазе В предњачи напону фазе А, напони напајања (примара) чине симетричан **инверзан** систем. С обзиром на то, директна компонента напона примара једнака је нули, а инверзна је једнака номиналном напону (сведена вредност је $U_{2nf} = 6.3 \text{ kV}$, јер је секундар везан у троугао):

$$0 - Z_k I_{2d} = U_{2d}$$

$$U_{2nf} - Z_k I_{2i} = U_{2i}$$

Множењем прве једначине са a^2 , а друге са a , и њиховим сабирањем, добија се:

$$a U_{2nf} - Z_k (a^2 I_{2d} + a I_{2i}) = a^2 U_{2d} + a U_{2i}$$

$$\Rightarrow a U_{2nf} - 2Z_k \cdot a^2 I_{2d} = 6Z_Y a^2 I_{2d}$$

$$\Rightarrow I_{2d} = \frac{a U_{2nf}}{a^2 (6Z_Y + 2Z_k)} \stackrel{Z_k \ll Z_Y}{\approx} \boxed{\frac{a^2 U_{2nf}}{6Z_Y}}$$

Сада се могу одредити фазне струје секундара:

$$I_a = I_{2d} + I_{2i} = (1+a) I_{2d} = (-3.2 - j 26.3) \text{ A} = 26.45 \angle -96.9^\circ \text{ A}$$

$$I_b = a^2 I_{2d} + a I_{2i} = (a^2 + a^2) I_{2d} = (6.3 + j 52.5) \text{ A} = 52.9 \angle 83.1^\circ \text{ A} = -52.9 \angle -96.9^\circ \text{ A}$$

$$I_c = a I_{2d} + a^2 I_{2i} = (a+1) I_{2d} = (-3.2 - j 26.3) \text{ A} = 26.45 \angle -96.9^\circ \text{ A} \equiv I_a$$

Струје кроз линијске проводнике на секундарној страни трансформатора се сада једноставно могу одредити (водити рачуна о везама између фазних прикључака):

$$I_{al} = I_a - I_b = 79.36e^{-j96.9^\circ} \text{ A}$$

$$I_{bl} = I_b - I_c = 79.36e^{j83.1^\circ} \text{ A}$$

$$I_{cl} = 0$$

Струје примара (у примарним намотајима трансформатора и у линијским проводницима на примарној страни:

$$I_A = \frac{I_a}{\left(\frac{20}{\sqrt{3}}\right)/6.3} = 14.43e^{-j96.9^\circ} \text{ A}$$

$$I_B = \frac{I_b}{\left(\frac{20}{\sqrt{3}}\right)/6.3} = -28.86e^{-j96.9^\circ} \text{ A}$$

$$I_C = \frac{I_c}{\left(\frac{20}{\sqrt{3}}\right)/6.3} = 14.43e^{-j96.9^\circ} \text{ A}$$

Решење проблема за случај да је спрега Dyn11

Импеданса пријемника (еквивалентна, ако је пријемник спрегнут у трогао, или стварна, ако је пријемник везан у звезду) износи

$$\underline{Z}_Y = \frac{U^2}{S_n} e^{ja \cos(0.8)} = \frac{6.3^2}{1} e^{ja \cos(0.8)} = 39.69e^{j36.86^\circ} = (31.752 + j23.814)\Omega$$

Струје кроз намотаје секундара:

$$\underline{I}_a = \frac{U_{02}/\sqrt{3}}{\underline{Z}_Y} = \frac{6300/\sqrt{3}}{39.69e^{j36.86^\circ}} = 91.64e^{-j36.86^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_b = \underline{a} \underline{I}_a = 91.64e^{j83.14^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_c = 0$$

Симетричне компоненте струја кроз намотаје секундара:

$$\underline{I}_0'' = \frac{1}{3}(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c) = \frac{1}{3}91.64e^{-j36.86^\circ}(1 + \underline{a}) = 30.55e^{23.14^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_d'' = \frac{1}{3}(\underline{I}_a + \underline{a} \underline{I}_b + \underline{a}^2 \underline{I}_c) = \frac{1}{3}91.64e^{-j36.86^\circ}(1 + \underline{a}^2) = 30.55e^{-j96.86^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_i'' = \frac{1}{3}(\underline{I}_a + \underline{a}^2 \underline{I}_b + \underline{a} \underline{I}_c) = \frac{1}{3}91.64e^{-j36.86^\circ}(1 + 1) = 61.10e^{-j36.86^\circ} \text{ A}$$

Струја у неутралном проводнику секундара:

$$\underline{I}_n = (\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c) = 91.64e^{-j36.86^\circ}(1 + \underline{a}) = 3\underline{I}_0''$$

Симетричне компоненте струја кроз намотаје примара:

$$\underline{I}_0' = \underline{I}_0 " \frac{20}{6.3/\sqrt{3}} = \underline{I}_0 " \frac{20}{6.3/\sqrt{3}} = 5.56 e^{23.14} \text{ A}$$

$$\underline{I}_d' = \underline{I}_d " \frac{20}{6.3/\sqrt{3}} = \underline{I}_d " \frac{20}{6.3/\sqrt{3}} = 5.56 e^{-j96.86^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_i' = \underline{I}_i " \frac{20}{6.3/\sqrt{3}} = \underline{I}_i " \frac{20}{6.3/\sqrt{3}} = 11.11 e^{-j36.86^\circ} \text{ A}$$

Струје кроз намотаје примара:

$$\underline{I}_A = (\underline{I}_0' + \underline{I}_d' + \underline{I}_i') = 16.67 e^{-j36.86^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_B = (\underline{I}_0' + \underline{a}^2 \underline{I}_d' + \underline{a} \underline{I}_i') = 16.67 e^{j83.14} \text{ A}$$

$$\underline{I}_C = (\underline{I}_0' + \underline{a} \underline{I}_d' + \underline{a}^2 \underline{I}_i') = 0 \text{ A}$$

Симетричне компоненте струје кроз линијске проводнике на примарној страни:

$$\underline{I}_{0lin} = 0$$

$$\underline{I}_{dlin} = \sqrt{3} \underline{I}_d' e^{j30^\circ} = 9.63 e^{-j66.86} \text{ A}$$

$$\underline{I}_{ilin} = \sqrt{3} \underline{I}_i' e^{-j30^\circ} = 19.2433 e^{-j66.86} \text{ A}$$

Струје кроз линијске проводнике на примарној страни:

$$\underline{I}_{Alin} = (\underline{I}_{0lin} + \underline{I}_{dlin} + \underline{I}_{ilin}) = 28.87 e^{-j66.86^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_{Blin} = (\underline{I}_{0lin} + \underline{a}^2 \underline{I}_{dlin} + \underline{a} \underline{I}_{ilin}) = 16.67 e^{83.17^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_{Clin} = (\underline{I}_{0lin} + \underline{a} \underline{I}_{dlin} + \underline{a}^2 \underline{I}_{ilin}) = 16.67 e^{j143.11^\circ} \text{ A}$$