

ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13E013ЕНТ)

Октобар 2017.

Трофазни уљни дистрибутивни трансформатор има следеће номиналне податке: $S_n = 4000 \text{ kVA}$, $U_{1n}/U_{02} = 35 \pm 2 \times 2.5\% / 10 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$, спрега Dyn7, $P_0 = 5.34 \text{ kW}$, $j_0 = 0.64\%$, $P_k = 28 \text{ kW}$, $u_k = 5.8\%$. Однос номиналних губитака услед хистерезиса и вихорних струја је $P_{hn}/P_{vn} = 3$.

1. Нацртати шеме веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове. Означити све крајеве намотаја (почетке и крајеве). (8)
2. Ако трансформатор треба да ради на мрежи исте ефективне вредности напона фреквенције 60Hz, одредити за колико би требало процентуално променити дебљину лимова да би губици у гвожђу остали једнаки номиналним? Штајнмицов коефицијент једнак је 2. (10)
3. Израчунати параметре еквивалентне заменске шеме трансформатора са НН стране. Нацртати шему са унетим бројним вредностима параметара и електричним величинама. (10)
4. Написати израз за реактансу расипања преко: а) магнетне енергије, б) укупног магнетног флукса, у простору расутог магнетног флукса (10)
5. Линијски напон секундара износи 10 kV при номиналном напону на крајевима примара и оптерећењу од 2500 kVA. Регулациони извод је у положају -2.5%. Израчунати фактор снаге оптерећења и степен искоришћења снаге трансформатора. Користити упрошћену формулу за пад напона. Занемарити утицај промене положаја регулационог извода на губитке у гвожђу и на параметре трансформатора. (12)
6. Нацртати топлотну шему са два чвора и једним топлотним капацитетом (по том моделу се сматра да се промена разлике температура намотаја и уља по промени оптерећења догађа тренутно). Написати израз за промену температуре намотаја за случај да се трансформатор у тренутку укључења налазио на температури амбијента и да је оптерећен константним номиналним оптерећењем. (16)
7. Навести која се стандардна упрошћења користе при дефинисању степена искоришћења трансформатора од релативног струјног оптерећења η (β). Полазећи од њих, извести израз за β_{max} и η_{max} . (12)
8. Израчунати струје кроз линијске проводнике на страни примара трансформатора у случају да дође до кратког споја између почетка и краја једног од намотаја на секундару (1пкс). (10)
9. Написати израз за силу на елементарној дужини проводника (познатог орта дефинисаног геометријом проводника и смером струје \vec{dl}) кроз који протиче струја I и који се налази у пољу карактерисаном вектором \vec{B} . Користећи овај израз објаснити механизам угибања / истезања проводника у аксијалном смеру. Да ли растојање између одстојника навојака утиче на механичку издржљивост трансформатора, односно на то да ли су напрезања у кратком споју таква да се не пређе граница еластичности материјала? (12)

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

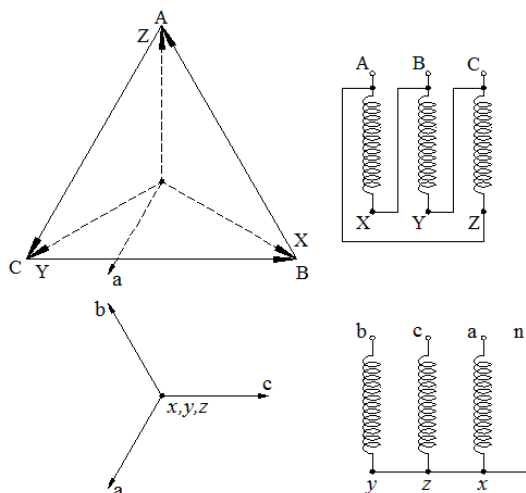
У Београду, 15.09.2017.

Проф. др Зоран Лазаревић, Проф. др Зоран Радаковић

ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (13E013ЕНТ)

Октобар 2017.

1. a)



2. За номиналне губитке у гвожђу важе следеће релације:

$$P_{Fe,n} = P_{hm} + P_{vn} = 5340 \text{ W}, P_{hm} / P_{vn} = 3 \Rightarrow P_{hm} = 0,75 P_{Fe,n}, P_{vn} = 0,25 P_{Fe,n}$$

Зависност компоненти губитака у гвожђу од ефективне вредности напона и фреквенције напајања може се представити следећим релацијама:

$$P_v = k_v f^2 B_m^2 \Rightarrow P_v \sim U^2$$

$$P_h = k_h f B_m^2 \Rightarrow P_h \sim \frac{U^2}{f}$$

Губици услед вихорних струја су сразмерни квадрату дебљине лимова, док су губици услед хистерзиса независни од дебљине лимова. Нове вредности компоненти губитака у гвожђу могу се изразити као:

$$P_v^{60} = P_{vn} \left(\frac{U_{60}}{U_{50}} \right)^2 \left(\frac{d'}{d} \right)^2 = P_{vn} \left(\frac{d'}{d} \right)^2$$

$$P_h^{60} = P_{hm} \left(\frac{U_{60}}{U_{50}} \right)^2 \left(\frac{50}{60} \right) = 0.833 P_{hm}$$

Из услова да при промењеној учестаности са новом дебљином лимова губици у гвожђу треба да буду једнаки номиналним следи:

$$0.833 P_{hm} + P_{vn} \left(\frac{d'}{d} \right)^2 = P_{Fe,n} \Rightarrow \left[0.833 \cdot 0.75 + \left(\frac{d'}{d} \right)^2 \right] P_{Fe,n} = P_{Fe,n} \Rightarrow d' = 1.225 d$$

Дакле, дебљину лимова је потребно **повећати** за 22.5%.

3. ПХ:

$$I_{n2f} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{02}} = \frac{4000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} = 230,8 \text{ A}$$

$$R_a'' = \frac{U_{02f}^2}{P_{0n}/3} = \frac{U_{02}^2}{P_{0n}} = \frac{10^2 \cdot 10^6}{5340} = 18,73 \text{ k}\Omega \Rightarrow I_{a2f} = \frac{U_{02f}}{R_a} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 18,73 \cdot 10^3} = 0,308 \text{ A}$$

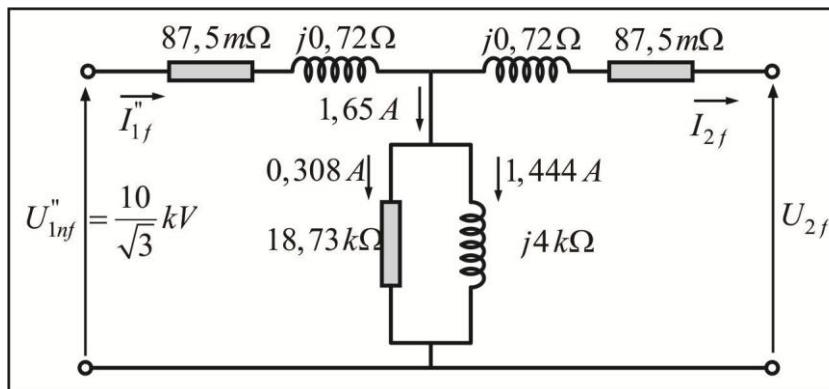
$$I_{02f} = \frac{j_0}{100} \cdot I_{n2f} = 1,477 \text{ A} \Rightarrow I_{\mu 2f} = \sqrt{I_{02f}^2 - I_{a2f}^2} = 1,444 \text{ A}$$

$$X_\mu'' = \frac{U_{02f}}{I_{\mu 2f}} = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1,444} \approx 4 \text{ k}\Omega$$

КС:

$$R_k = \frac{P_{kn}}{3I_{2nf}^2} = \frac{28000}{3 \cdot 230,8^2} = 175 \text{ m}\Omega \Rightarrow R_1'' = R_2 = \frac{R_k}{2} = \frac{175}{2} = 87,5 \text{ m}\Omega$$

$$Z_k = \frac{u_k}{100} \frac{U_{02f}}{I_{2nf}} = \frac{5,8}{100} \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 230,8} = 1,451 \Omega \Rightarrow X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \approx 1,44 \Omega \Rightarrow X_{\sigma 1}'' \approx X_{\sigma 2} = \frac{X_k}{2} = 0,72 \Omega$$



4. Поглавље 3., страна 16, други пасус.

5. Активна и реактивна компонента напона кратког споја једнаке су:

$$u_r = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100 = \frac{28000}{4000 \cdot 10^3} \cdot 100 = 0,7\%, u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = 5,76\%$$

Примарни напон сведен на секундар има вредност:

$$U_1'' = U_{1n} \cdot \frac{10}{35 \cdot (1 - 2,5/100)} = 10,265 \text{ kV}$$

Процентуални пад напона износи:

$$\Delta u_{\%} = \left(1 - \frac{U_2}{U_1''}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{10}{10.265}\right) \cdot 100 = 2.58\%$$

Релативно оптерећење трансформатора износи $\beta = S/S_n = 0.625$. Фактор снаге се може одредити из упрошћене формуле за пад напона:

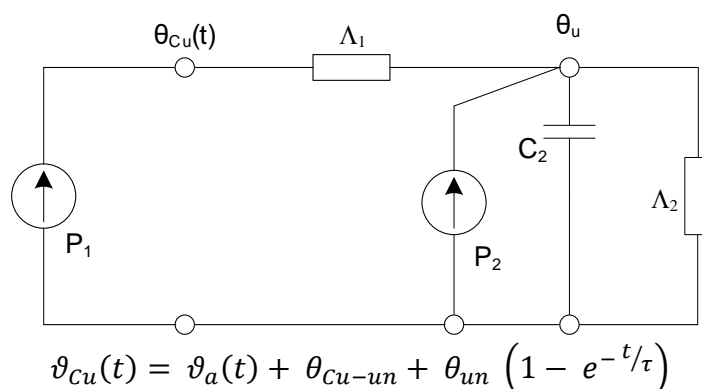
$$\Delta u_{\%} = \beta(u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi) \xRightarrow[\cos \varphi = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi}]{\text{смена:}} u_k^2 \sin^2 \varphi - \frac{2 \Delta u u_x}{\beta} \sin \varphi + \left[\left(\frac{\Delta u}{\beta} \right)^2 - u_r^2 \right] = 0 \Rightarrow \varphi = 38.4^\circ$$

па је фактор снаге трансформатора $\cos \varphi = 0.785$. Фактор снаге је **индуктиван**, јер је $\varphi > 0$, тј. струја касни за напонам.

Степен искоришћења снаге се сада може одредити као:

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \varphi}{\beta S_n \cos \varphi + \beta^2 P_{kn} + P_{0n}} \cdot 100 = \frac{2500 \cdot 0.785}{2500 \cdot 0.785 + 0.625^2 \cdot 28 + 5.34} \cdot 100 = 99.18\%$$

6.



7.

Губици у гвожђу (P_{Fe}) су једнаки губицима у празном ходу (P_0)

Губици у бакру су једнаки губицима одређеним у огледу кратког споја, прерачунатим на средњу температуру намотаја од 75°C , помноженим са квадратом степена оптерећења трансформатора (β). На овај начин се занемарује чињеница да ће при раду трансформатора температура зависити од степена оптерећења трансформатора β .

$$\eta = \frac{\beta U_{2n} I_{2n} \cos \varphi}{\beta U_{2n} I_{2n} \cos \varphi + \beta^2 P_{k75} + P_0}$$

$$\beta_{max} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{k75}}}$$

$$\eta_{max} = \eta(\beta = \beta_{max}) = \frac{\beta_{max} U_{2n} I_{2n} \cos \varphi}{\beta_{max} U_{2n} I_{2n} \cos \varphi + \beta_{max}^2 P_{k75} + P_0} =$$

$$\frac{\beta_{max} U_{2n} I_{2n} \cos \varphi}{\beta_{max} U_{2n} I_{2n} \cos \varphi + 2 P_0}$$

Највећа вредност степена искоришћења се има при јединичном фактору снаге ($\cos \varphi = 1$):

$$\eta_{max} = \eta(\beta_{max}, \cos \varphi = 1) = \frac{\beta_{max} U_{2n} I_{2n}}{\beta_{max} U_{2n} I_{2n} + 2 P_0}$$

8. На основу једначина физичке очигледности на месту квара за једнополни кратак спој код намотаја спреге уп има се да је (ако се усвоји да се кратак спој догодио између крајева фазе a):

$$\underline{I}_d'' = \underline{I}_0'' = \underline{I}_i'' = \frac{\underline{I}_a}{3}$$

$$\underline{U}_a = \underline{U}_d'' + \underline{U}_i'' + \underline{U}_0'' = 0$$

С обзиром на то да су намотаји примара спрегнути у троугао, омогућено је затварање нулте компоненте и на примарној страни, па је импеданса за нулти редослед једнака импедансама за директни и инверзни редослед: $\underline{Z}_d'' = \underline{Z}_i'' = \underline{Z}_0'' = \underline{Z}_k''$. Узимајући ову чињеницу у обзир, ако се датом сету једначина додају напонске једначине за директни, инверзни и нулти компонентни систем:

$$\underline{U}_{2nf} - \underline{Z}_d'' \underline{I}_d'' = \underline{U}_d''$$

$$0 - \underline{Z}_i'' \underline{I}_i'' = \underline{U}_i''$$

$$0 - \underline{Z}_0'' \underline{I}_0'' = \underline{U}_0''$$

добијају се изрази за симетричне компоненте струје фазе a а на основу њих и фазна струја:

$$\underline{I}_d'' = \underline{I}_0'' = \underline{I}_i'' = \frac{\underline{U}_{2nf}}{\underline{Z}_k''} \Rightarrow \underline{I}_a = \underline{I}_d'' + \underline{I}_i'' + \underline{I}_0'' = \frac{3\underline{U}_{2nf}}{\underline{Z}_k''} = (1.44 - j11.85) \text{ kA} = 11.94 \angle -83.1^\circ \text{ kA}$$

при чему је усвојено да је напон фазе a секундара у фазној оси. Струје кроз намотаје примара тада имају вредности (све симетричне компоненте се преносе у фазне намотаје примара):

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{I}_a}{n} = (237.6 - j1955.2) \text{ A} = 1969.6 \angle -83.1^\circ \text{ A}$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_C = 0$$

Линијске струје примара имају вредности (погледати шему веза намотаја, зад. 1):

$$\underline{I}_{A\text{lin}} = \underline{I}_A = (237.6 - j1955.2) \text{ A} = 1969.6 \angle -83.1^\circ \text{ A}$$

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

$$\underline{I}_{C\text{lin}} = -\underline{I}_A = (-237.6 + j1955.2) \text{ A} = 1969.6 \angle 96.9^\circ \text{ A}$$

Израз (6. Ж):

$$d\vec{F} = I d\vec{L} \times \vec{B}$$

Слика 6.15а) и три пасуса испод слике.