

ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ (19E013ЕНТ)

- октобар 1 2025 -

Београд, 19.10.2025.

Трофазни уљни трансформатор са номиналним подацима: $S_n = 1600 \text{ kVA}$, $U_{1n} / U_{02} = 35 / 0,4 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$, спрега Yd7, испитан је у огледима празног хода и кратког споја, при чему је добијено: ПХ: $P_{0n} = 2,6 \text{ kW}$, $U_{0n} = 0,4 \text{ kV}$, $j_{0n} = 0,9 \%$; КС: $P_{kn} = 14,7 \text{ kW}$, $u_{kn} = 5 \%$, $I_k = I_n$

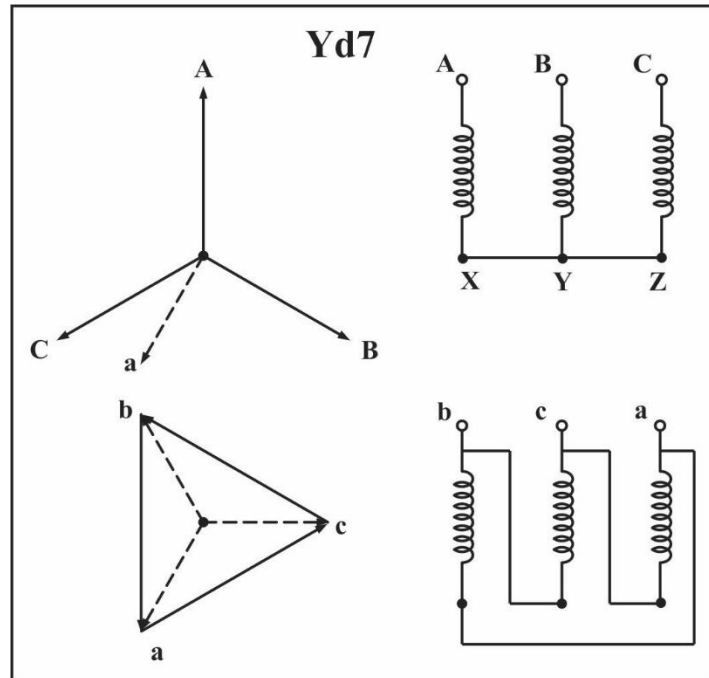
1. Нацртати шему веза и векторски дијаграм напона представљајући намотаје као калемове и означити крајеве намотаја (почетке и крајеве). (Т)
2. Израчунати Филдов сачинилац на 75°C сматрајући га истим за оба намотаја и додатне губитке на 20°C ако су отпорности мерене једносмерном струјом на 20°C између прикључних крајева примара и секундара $R_1 = 5,62 \Omega$ и $R_2 = 0,7 \text{ m}\Omega$ респективно. (З)
3. Израчунати параметре еквивалентне заменске шеме трансформатора са НН стране. Нацртати шему са унетим бројним вредностима параметара и електричним величинама. (З)
4. Асинхрони мотор следећих номиналних података: $P_n = 1 \text{ MW}$, $U_{nl} = 400 \text{ V}$, $\cos\phi = 0,82$, $\eta_n = 92 \%$, спрега Δ , прикључен је на секундарне крајеве датог трансформатора и ради у номиналном режиму. Колики је капацитет кондезатора у спрези звезда које треба прикључити паралелно датом мотору тако да напон на секундару трансформатора буде номиналан? (З)
5. Због чега постоји вертикални градијент температуре у намотајима, а због чега у радијаторима? Које компоненте падова температуре су садржане у разликама температуре намотаја и суседног уља, а које у разликама температуре уља у хладњаку и температуре спољашњег расхладног флуида на истој висинској позицији? Шта обухвата фактор најтоплије тачке? (Т)
6. Ако се задатом трансформатору паралелно прикључи трансформатор исте снаге, спреге и напона али са губицима кратког споја $16,5 \text{ kW}$ и процентуалним напоном кратког споја 6% израчунати заједнички напон на секундарним крајевима ако је линијска струја прикљученог симетричног оптерећења $(3000 + j2000) \text{ A}$. Користити упрошћену формулу за пад напона. (З)
7. Нацртати шему веза намотаја Скотовог трансформатора чији су напони $U_1/U_2 = 3 \times 400 / 2 \times 200 \text{ V}$. Ако су струје оптерећења са секундарне стране $I_a = (20 + j60)\sqrt{3} \text{ A}$ и $I_b = (40 - j50) \text{ A}$ израчунати струје са примарне стране. (З)
8. Који је критеријум који се мора проверити у фази пројектовања како би трансформатор успешно прошао фабричко испитивање напонске издржљивости за простопериодичне напоне мрежне учестаности? Којим конструкционим елементима се остварује напонска издржљивост трансформатора? (Т)
9. Колико су веће вредности поља на позицији проводника намотаја, а колико вредности сила које делују на проводнике, при кратком споју у односу на номинално оптерећени трансформатор из заглавља испитног рока? Претпоставити да је једносмерна компонента струје кратког споја једнака нули. (Т)
10. Написати израз за израчунавање симетричне струје кратког споја у Амперима при двополном кратком споју са земљом на ниженапонској страни трофазног трансформатора снаге S_n , спреге Дуп, за који су познати номинални линијски напони на ВН страни (U_1) и НН страни (U_2), као и директна (x_d) и нулта (x_0) реактанса у релативним јединицама. Занемарити утицај отпорности. Сматрати да су све импедансе елемената мреже занемарљиве у односу на импедансе трансформатора. (Т)

Испит траје максимално 3 сата. Други колоквијум (задачи 6 до 10) траје максимално 2 сата. Сваки задатак носи максимално 10 поена.

РЕШЕЊА
- октобар 1 2025 -

Београд, 17.10.2025.

1.



2.

$$R_{1fDC}^{20} = \frac{R_1}{2} = \frac{5,62}{2} = 2,81\Omega, \quad R_{2fDC}^{20} = \frac{3}{2} \cdot R_2 = \frac{3}{2} \cdot 0,7 \cdot 10^{-3} = 1,05 m\Omega$$

$$R_{1fDC}^{75} = R_{1fDC}^{20} \cdot \frac{235 + 75}{235 + 20} = 3,42\Omega, \quad R_{2fDC}^{75} = R_{2fDC}^{20} \cdot \frac{235 + 75}{235 + 20} = 1,28 m\Omega$$

$$P_{DC}^{75} = 3 \cdot (R_{1fDC}^{75} I_{1nf}^2 + R_{2fDC}^{75} I_{2nf}^2) = 3 \cdot (3,42 \cdot 26,4^2 + 1,28 \cdot 10^{-3} \cdot 1333^2) = 13974 W$$

$$P_d^{75} = P_{kn} - P_{DC}^{75} = 14700 - 13974 = 726 W$$

$$P_d^{20} = P_d^{75} \cdot \frac{310}{255} = 882,6 W, \quad k_F^{75} = \frac{P_k^{75}}{P_{DC}^{75}} = \frac{14700}{13974} = 1,052$$

3. ПХ:

$$R_a'' = \frac{U_{02f}^2}{P_{0f}} = \frac{3 \cdot 400^2}{2600} = 184,6\Omega \Rightarrow I_{a2} = \frac{U_{02f}}{R_a''} = \frac{400}{184,6} = 2,17 A$$

$$I_{02} = \frac{j_0}{100} \cdot I_{2nf} = \frac{0,9}{100} \cdot 1333 = 12 A \Rightarrow I_{\mu 2} = \sqrt{I_{02}^2 - I_{a2}^2} = \sqrt{12^2 - 2,17^2} = 11,8 A$$

$$X_\mu'' = \frac{U_{02f}}{I_{\mu 2f}} = \frac{400}{11,8} = 33,9\Omega$$

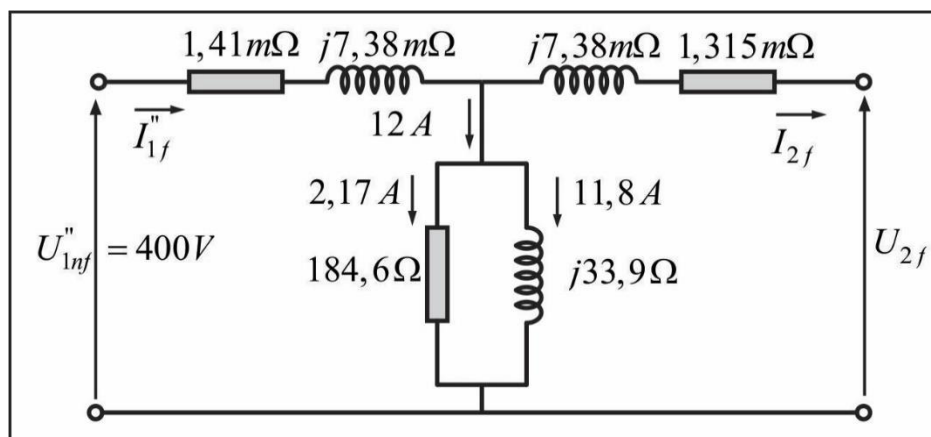
КС:

$$R_1^{75} = k_f \frac{R_{1fDC}^{75}}{n^2} = 1,41 m\Omega, \quad R_2^{75} = k_f R_{2fDC}^{75} = 1,315 m\Omega$$

$$R_k^{75} = R_1^{75} + R_2^{75} = 2,725 m\Omega$$

$$Z_k'' = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{02f}}{I_{2nf}} = \frac{5}{100} \cdot \frac{400}{1333} = 15 m\Omega \Rightarrow X_k'' = \sqrt{Z_k''^2 - R_k''^2} = 14,75 m\Omega$$

$$X_{\sigma 1}'' \approx X_{\sigma 2}'' = \frac{X_k''}{2} = 7,38 m\Omega$$



4. $P_m = P_n / \eta_n = 10^6 / 0,92 = 1087 kW$, $tg\varphi = 0,698 \Rightarrow Q_m = P_m \cdot tg\varphi = 1087 \cdot 0,698 = 759 kVAr$

$$u_r = \frac{P_{kn}}{S_n} \cdot 100 = \frac{14,7 \cdot 10^3}{1600 \cdot 10^3} \cdot 100 = 0,92\% \Rightarrow u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = 4,92\%$$

$$\Delta u = a = \beta(u_{rn} \cos \varphi + u_{xn} \sin \varphi) = 0 \Rightarrow tg\varphi = -\frac{1}{tg\varphi_k} = -\frac{u_{rn}}{u_{xn}} = \frac{Q_m + Q_c}{P_m}$$

$$\Rightarrow Q_c = -\frac{u_{rn}}{u_{xn}} P_m - Q_m = -962 kVAr$$

$$Q_c = 3 \frac{U_f^2}{X_c} = -\omega C_f U_l^2 \Rightarrow C_f = -\frac{Q_c}{\omega U_l^2} = \frac{962 \cdot 10^3}{314 \cdot 400^2} = 19,15 mF$$

5. Вертикални градијент температуре у намотајима је последица загревања уља услед преласка топлоте са намотаја на уље које струји вертикално, одоздо ка горе, кроз намотај. Вертикални градијент температуре у радијаторима је последица преласка топлоте од уља, које струји вертикално, одозго ка доле, ка спољашњем ваздуху.

Компоненте падова температуре садржане у разликама температуре намотаја и суседног уља: провођење кроз слој чврсте изолације и струјање са спољње површи изолације на уље.

Компоненте падова температуре садржане у разликама температуре уља у хладњаку и спољашњег ваздуха на истој висинској позицији: струјање са уља на зид радијатора, провођење кроз зид радијатора, струјање са спољње површи радијатора на ваздух.

Фактор најтоплије тачке обухвата неравномерност губитака у појединачним проводницима и неравномерност хлађења појединачних проводника у намотају.

6. Компоненте напона кратког споја трансформатора су:

$$u_r = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100 = \frac{16500}{1600 \cdot 10^3} \cdot 100 = 1,03 \%, u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = 5,91 \%$$

Комплексне вредности импеданси кратког споја у процентима износе:

$$z_{k2,\%} = u_{r2} + ju_{x2} = 1,03 + j5,91$$

$$z_{k1,\%} = u_{r1} + ju_{x1} = 0,92 + j4,92$$

Струја којом је оптерећен први трансформатор добија из израза за струјни разделник на импедансама два паралелно спрегнута трансформатора:

$$\underline{I}_1 = \frac{z_{k2\%}}{z_{k1\%} + z_{k2\%}} \frac{\underline{I}}{\sqrt{3}} = \frac{1,03 + j5,91}{(0,92 + j4,92) + (1,03 + j5,91)} \frac{(3000 + j2000)}{\sqrt{3}}$$

$$\underline{I}_1 = (940,7 + j634,8)A$$

Па је одатле релативна вредност оптерећења трансформатора:

$$|\underline{I}_1| = 1135 A, \quad \beta_1 = \frac{1135}{1333} = 0,851, \sin \varphi = \frac{634,8}{1135} = 0,56 \text{ кап}, \cos \varphi = \frac{940,7}{1135} = 0,83$$

Сада се може израчунати пад напона на овом трансформатору и заједнички напон на секундару два трансформатора који раде у паралели:

$$\Delta u = \beta_1(u_{r1} \cos \varphi + u_{x1} \sin \varphi) = 0,851 \cdot (0,92 \cdot 0,83 - 4,92 \cdot 0,56) = -1,98 \%$$

$$U_2 = U_{02} \left(1 - \frac{\Delta u}{100} \right) = 407,9 V$$

7. Из једначина које представљају једнакост магнетопобудних сила примарних и секундарних намотаја добијају се струје примара трансформатора у Скотовој спрези:

$$I_A \frac{\sqrt{3}}{2} N_1 = I_a N_2 \Rightarrow I_A = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1} I_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{200}{400} \cdot (20 + j60)\sqrt{3} = (20 + j60) A$$

$$\left. \begin{aligned} I_B \frac{N_1}{2} - I_C \frac{N_1}{2} &= N_2 I_b \\ I_A + I_B + I_C &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow I_B = \frac{1}{2} (I_b - I_A), \quad I_C = -\frac{1}{2} (I_A + I_b)$$

$$I_B = \frac{1}{2} (40 - j50 - 20 - j60) = (10 - j55) A$$

$$I_C = -\frac{1}{2} (20 + j60 + 40 - j50) = (-30 - j5) A$$

8. Проверава се да ли је електрично поље испод вредности при којој би дошло до пробоја у изолационом систему (у уљу или чврстим изолационим материјалима).

Остваривање потребних изолационих својстава се постиже применом следећих мера:

1) изолацијом самих проводника (произвођач трансформатора купује електрични проводник номиналног пресека електропроводног дела и номиналне дебљине изолације), 2) додавање профилисаних изолационих делова који се стављају на проводник у зонама великих поља (на пример спољашњи горњи угао навојка на врху намотаја), 3) Постављањем изолационих цилиндара између делова трансформатора (на пример између стуба магнетног кола и намотаја или између два намотаја) – ови цилиндри се постављају вертикално и заједно са уљним каналима између њих чине електричну изолацију, 4) Профилисаних изолационих

елемената, пре свега између врха / дна намотаја и јарма трансформатора, 5) Металних (еквипотенцијалних) прстенови који служе за обликовање потенцијала – на пример у зони изнад намотаја, како би се умањили ивични ефекти, односно појава великих вредности електричног поља у зони углова. На слици 6.15 у књизи приказани су неки од поменутих елемената („Angle rings,, спада у 4., а „SER“ у 5.); С означава језгро, LV намотај нижег напона и HV намотај вишег напона.

9. Вредности поља на позицији проводника намотаја, које су сразмерне струји, су веће $1 / u_{kn} = 20$ пута

Вредности сила које делују на проводнике, које су сразмерне вредностима поља и струје кроз проводник, су веће

$$(1 / u_{kn})^2 = 400 \text{ пута}$$

Стварни односи су реално још већи услед постојања једносмерне компоненте струје кратког споја, јер је однос максималне струје кратког споја и максималне струје у просто периодичном номиналном режиму већи од $1 / u_{kn}$ пута.

10. Предавања, Поглавље 9, односно страна 560 из књиге [1], при чему је:

$$V_F = \frac{U_2}{\sqrt{3}}$$

$$X_1 = X_2 = x_d \frac{U_2^2}{S_n}$$

$$X_0 = x_0 \frac{U_2^2}{S_n}$$

$$Z_F = 0$$

Једначине (9.4.12), (9.4.13) и (9.4.14), које одговарају шеми на слици 9.12 (b).

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_d \\ I_i \end{bmatrix}$$