

3. Trofazni dvonamotni transformator nominalnog odnosa transformacije $m = 220/10$ kV/kV ima sljedeće karakteristike:

- nominalna snaga $S_n = 50$ MVA,
- relativni napon kratkog spoja $u_k\% = 11$ %,
- struja praznog hoda $j_o\% = 2.6$ %,
- gubici u bakru $p_{Cu}\% = 0.65$ % i
- gubici u gvožđu $p_{Fe}\% = 0.15$ %.

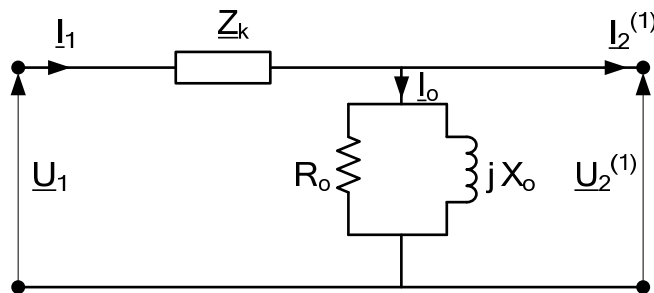
a) Izračunati parametre zamjenske obrnute „ Γ “ šeme

b) Izračunati parametre zamjenske „ Γ “ šeme

c) Odrediti gubitke aktivne i reaktivne snage u transformatoru ako je sekundarni napon $\underline{U}_2 = 11/0^\circ$ kV pri sekundarnom opterećenju $\underline{S}_2 = (30 + j40)$ MVA.

RJEŠENJE:

a) Zamjenska obrnuta „ Γ “ šema dvonamotnog transformatora je,



$$\underline{Z}_k = (R_1 + R_2^{(1)}) + j(X_1 + X_2^{(1)})$$

$$\underline{Z}_k = \frac{u_k\%}{100} \frac{U_{n1}^2}{S_n} = \frac{11}{100} \frac{220^2}{50} = 106.48 \Omega$$

$$R_k = \frac{p_{cu}\%}{100} \frac{U_{n1}^2}{S_n} = \frac{0.65}{100} \frac{220^2}{50} = 6.292 \Omega$$

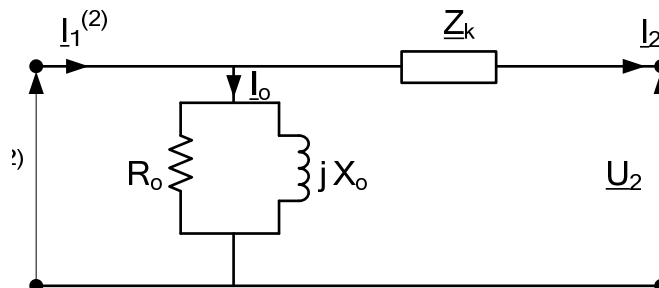
$$X_k = \sqrt{\underline{Z}_k^2 - R_k^2} = 106.294 \Omega$$

$$\underline{Z}_o = \frac{100}{j_o\%} \frac{U_{n1}^2}{S_n} = \frac{100}{2.6} \frac{220^2}{50} = 37230.769 \Omega$$

$$R_o = \frac{100}{p_{Fe}\%} \frac{U_{n1}^2}{S_n} = \frac{100}{0.15} \frac{220^2}{50} = 645333.333 \Omega$$

$$X_o = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{Z_o}\right)^2 - \left(\frac{1}{R_o}\right)^2}} = 37292.883 \Omega$$

b) Zamjenska „ Γ “ šema dvonamotnog transformatora je,



$$\underline{Z}_k = (R_1^{(2)} + R_2) + j(X_1^{(2)} + X_2)$$

$$\underline{Z}_k = \frac{u_k\%}{100} \frac{U_{n2}^2}{S_n} = \frac{11}{100} \frac{10^2}{50} = 0.22 \Omega$$

$$R_k = \frac{p_{cu}\%}{100} \frac{U_{n2}^2}{S_n} = \frac{0.65}{100} \frac{10^2}{50} = 0.013 \Omega$$

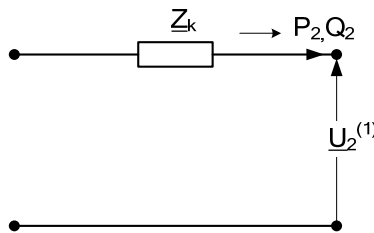
$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 0.219 \Omega$$

$$\underline{Z}_o = \frac{100}{j_o\%} \frac{U_{n2}^2}{S_n} = \frac{100}{2.6} \frac{10^2}{50} = 76.923 \Omega$$

$$R_o = \frac{100}{p_{Fe}\%} \frac{U_{n2}^2}{S_n} = \frac{100}{0.15} \frac{10^2}{50} = 1333.333 \Omega$$

$$X_o = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{Z_o}\right)^2 - \left(\frac{1}{R_o}\right)^2}} = 77.133 \Omega$$

c) Dati su napon na sekundaru i opterećenje transformatora. Ukoliko se zanemare gubici otočne grane (gubici praznog hoda), zamjenska šema transformatora je,



to je uprošćena „I“ šema dvonamotnog transformatora.

Parametri režima rada su:

$$\underline{U}_2 = 11/0^\circ \text{ kV}$$

$$\underline{S}_2 = (30 + j40) \text{ MVA}$$

Kako su poznati uslovi rada na sekundaru, gubitak se može izračunati na dva načina:

- iz „I“ šeme nastale zanemarivanjem otočne grane obrnute „Γ“ šeme
- iz „I“ šeme nastale zanemarivanjem otočne grane „Γ“ šeme

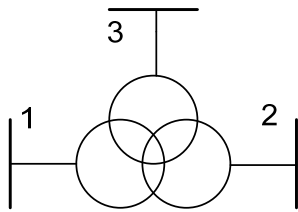
$$\underline{S}_{Z_k^{(1)}} = \underline{Z}_k^{(1)} \frac{P_2^2 + Q_2^2}{(U_2^{(1)})^2} = (6.292 + j106.294) \frac{30^2 + 40^2}{\left(11 \frac{220}{10}\right)^2} 10^6 = (0.2686 + j4.5248) \text{ MVA}$$

$$\underline{S}_{Z_k^{(2)}} = \underline{Z}_k^{(2)} \frac{P_2^2 + Q_2^2}{(U_2)^2} = (0.013 + j0.219) \frac{30^2 + 40^2}{11^2} 10^6 = (0.2686 + j4.5248) \text{ MVA}$$

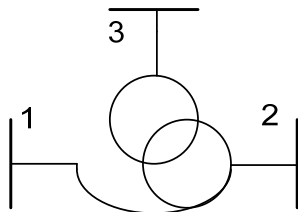
Kao što se može primjetiti u oba slučaja dobija se isto rješenje.

4. Odrediti parametre zamjenske šeme:

- trofaznog tronamotnog transformatora na sl.1
- trofaznog autotransformatora sa tercijerom sl.2
- trofaznog autotransformatora bez tercijera (sl. 3).



Slika 1



Slika 2



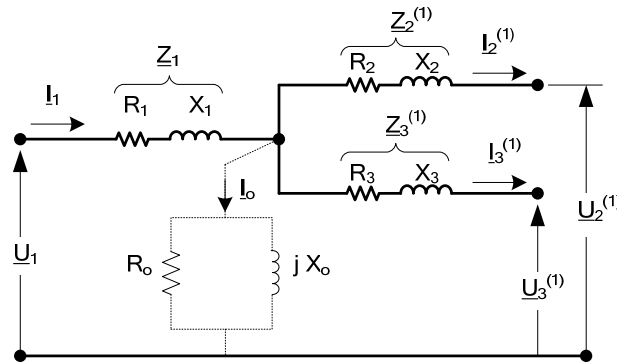
Slika 3

$m = 115/38.5/11 \text{ kV/kV/kV}$
 $S_n = 40 \text{ MVA}$
 $P_{Fe} = 63 \text{ kW}$
 $P_{Cu12} = 240 \text{ kW}$
 $P_{Cu13} = 240 \text{ kW}$
 $P_{Cu23} = 240 \text{ kW}$
 $U_{k12\%} = 10.5 \%$
 $U_{k13\%} = 7 \%$
 $U_{k23\%} = 6 \%$
 $j_{o\%} = 0.9 \%$

$m = 115/38.5/11 \text{ kV/kV/kV}$
 $S_{nAT} = S_{n12} = 40 \text{ MVA}$
 $S_3 = 13.33 \text{ MVA}$
 $P_{Fe} = 63 \text{ kW}$
 $P_{Cu12} = 240 \text{ kW}$
 $P_{Cu13} = 240 \text{ kW}$
 $P_{Cu23} = 240 \text{ kW}$
 $U_{k12\%} = 10.5 \%$
 $U_{k13\%} = 7 \%$
 $U_{k23\%} = 6 \%$
 $j_{o\%} = 0.9 \%$

$m = 115/38.5 \text{ kV/kV}$
 $S_n = 40 \text{ MVA}$
 $P_{Fe} = 63 \text{ kW}$
 $P_{Cu} = 240 \text{ kW}$
 $U_{k\%} = 10.5 \%$
 $j_{o\%} = 0.9 \%$

RJEŠENJE:



Zamjenska šema trofaznog tronamotnog transformatora data je na prethodnoj slici sa koje se može i primjetiti određena analogija sa dvonamotnim transformatorom.

Potrebno je na početku primjetiti da svaki od tri namotaja je dimenzionisan za istu snagu $S_n = 40 \text{ MVA}$.

$$Z_{12} = \left| Z_1 + Z_2^{(1)} \right| = \frac{u_{k12\%}}{100} \frac{U_{n1}^2}{S_{n12}} = \frac{10.5}{100} \frac{115^2}{40} = 34.7 \Omega$$

$$R_{12} = R_1 + R_2^{(1)} = \frac{P_{cu12\%}}{100} \frac{U_{n1}^2}{S_{n12}} = \frac{P_{cu12}}{S_{n12}} \cdot 100 \cdot \frac{U_{n1}^2}{100 S_{n12}} = \frac{P_{cu12}}{S_{n12}^2} U_{n1}^2 = 1.98 \Omega$$

$$X_{12} = \sqrt{Z_{12}^2 - R_{12}^2} = 34.7 \Omega$$

$$Z_{13} = \frac{u_{k13\%}}{100} \frac{U_{n1}^2}{S_{n13}} = 23.1 \Omega$$

$$Z_{23} = \frac{u_{k23\%}}{100} \frac{U_{n1}^2}{S_{n23}} = 23.1 \Omega$$

$$R_{13} = \frac{P_{cu13}}{S_{n13}^2} U_{n1}^2 = 1.98 \Omega$$

$$R_{23} = \frac{P_{cu23}}{S_{n23}^2} U_{n1}^2 = 1.98 \Omega$$

$$X_{13} \approx Z_{13}$$

$$X_{23} \approx Z_{23}$$

Kao i kod dvonamotnog transformatora određuju se parametri zamjenske šeme, ali se vodi računa o snazi koja se može prenijeti sa namotaja na namotaj iako je to u konkretnom slučaju pod a) ista snaga u sva tri slučaja $S_n = 40$ MVA. Vrijednosti parametara zamjenske šeme trofaznog tronamotnog transformatora dobijaju se na sljedeći način,

$$R_1 = \frac{R_{12} + R_{13} - R_{23}}{2} = 0.99 \Omega$$

$$X_1 = \frac{X_{12} + X_{13} - X_{23}}{2} = 38 \Omega$$

$$R_2^{(1)} = \frac{R_{12} + R_{23} - R_{13}}{2} = 0.99 \Omega$$

$$X_2^{(1)} = \frac{X_{12} + X_{23} - X_{13}}{2} = 31.4 \Omega$$

$$R_3^{(1)} = \frac{R_{13} + R_{23} - R_{12}}{2} = 0.99 \Omega$$

$$X_3^{(1)} = \frac{X_{13} + X_{23} - X_{12}}{2} = 4.1 \Omega$$

Parametri otočne grane računaju se kao kod dvonamotnog transformatora.

$$Z_o = \frac{100}{j_{o\%}} \frac{U_{n1}^2}{S_n} = \frac{100}{0.9} \frac{115^2}{40} = 36736.1 \Omega$$

$$R_o = \frac{U_{n1}^2}{P_{Fe}} = 209920 \Omega \quad X_o \approx Z_o$$

Djelove zadatka pod b) i c) rade se analogno prethodnom pa ih uraditi za vježbu.

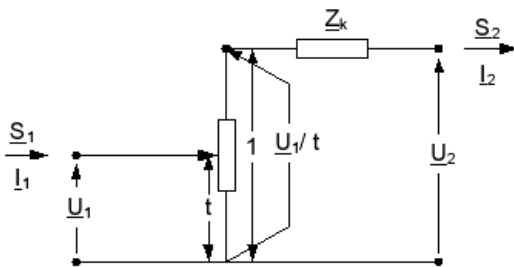
5. Trofazni dvonamotajni transformator opterećen je na strani nižeg napona prividnom snagom od 120 MVA pri faktoru snage $\cos\varphi = 1$ i naponu 110 kV pri regulacionom izvodu na strani višeg napona od -10%.

$$S_n = 150 \text{ MVA}$$

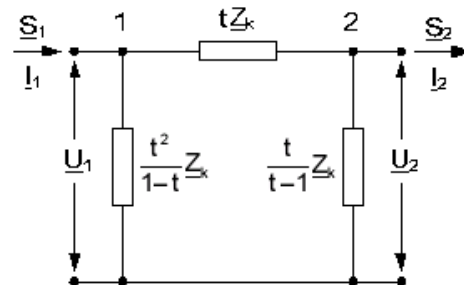
$$m = 220/110 \text{ kV/kV}$$

$$X_{k\%} = 10 \%$$

Odrediti fazor napona i kompleksnu snagu na strani namotaja višeg napona, koristeći ekvivalentno kolo sa sl.4 i kolo sa sl.5.



Slika 4.



Slika 5.

RJEŠENJE:

Zadatak je potrebno uraditi za obje šeme posebno.

a) Za ekvivalentno kolo transformatora na slici 4,

$$Z_k = X_k = \frac{10}{100} \frac{220^2}{150} = 32.3 \Omega$$

$$t = \frac{220 - 0.1 \cdot 220}{220} = 0.9 \quad U_2^{(1)} = 110 \cdot m = 110 \frac{220}{110} = 220 \text{ kV}$$

$$\frac{U_1}{t} = U_2^{(1)} + jX_k \frac{P_2}{U_2^{(1)}} = 220 + j32.3 \cdot \frac{120}{220} = (220 + j17.6) \text{ kV}$$

$$\underline{U}_1 = (198 + j15.8) \text{ kV} = 199 / 4.5^\circ \text{ kV}$$

Ako se zna da je snaga na primarnoj strani jednaka snazi na sekundarnoj strani uvećanoj za gubitke u transformatoru onda važi,

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2 + \Delta \underline{S}$$

$$\Delta \underline{S} = \Delta P + j\Delta Q$$

A kako je u zadatku zanemaren aktivni otpor namotaja transformatora, tada je,

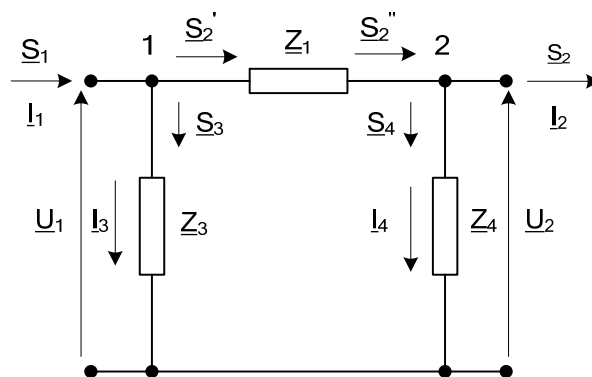
$$\Delta P = 0 \text{ jer je } R_k = 0$$

$$\Delta Q = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} X_k = \frac{120^2 + 0}{220^2} 32.3 = 9.6 \text{ MVar}$$

Sada je snaga na primarnoj strani,

$$\underline{S}_1 = (120 + j9.6) \text{ MVar}$$

b) Ako se isti proračun sprovede prema zamjenskoj šemi sa slike 5, njeni parametri su



$$\underline{Z}_1 = t\underline{Z}_k = 0.9(j32.3) = j29.1 \Omega$$

$$\underline{Z}_3 = \frac{t^2}{1-t} \underline{Z}_k = \frac{0.9^2}{1-0.9} (j32.3) = j262 \Omega$$

$$\underline{Z}_4 = \frac{t}{t-1} \underline{Z}_k = -j291 \Omega$$

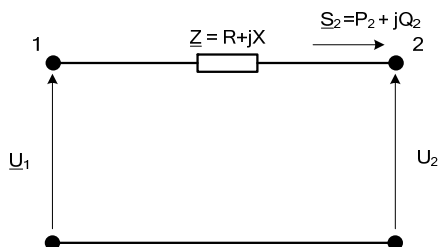
Kada se uzmu u obzir radni uslovi,

$$\underline{S}_4 = jQ_4 = \frac{U_2^2}{\underline{Z}_4^*} = \frac{220^2}{j291} = -j166.6 \text{ MVar}$$

$$\underline{S}_2'' = \underline{S}_2 + \underline{S}_4 = (120 - j166.6) \text{ MVar}$$

$$\underline{U}_1 = U_2^{(1)} + \frac{Q_2'' \cdot t \cdot Z_k}{U_2} + j \frac{P_2'' \cdot t \cdot Z_k}{U_2} = 220 - \frac{166.6 \cdot 29.1}{220} + j \frac{120 \cdot 29.1}{220} = (198 + j15.9) = 199 / 4.5^\circ \text{ kV} \quad (\#)$$

Prethodna relacija je izvedena iz jednačine za napon na početku voda sa impedansom $\underline{Z} = R + jX$ pri čemu su dati uslovi na kraju.



Izraz za napon na početku je,

$$\underline{U}_1 = U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2}$$

Treba primjetiti da je napon U_2 realan broj, tj. napon \underline{U}_2 je uzet po faznoj osi. Za razliku od njega, napon koji se traži, \underline{U}_1 je kompleksni broj.

Ako se prethodna jednačina primjeni na ovaj zadatak, lako je primjetiti da je u pitanju impedansa $\underline{Z}_1 = t\underline{Z}_k = j29.1 \Omega$, dakle aktivna otpornost je 0 i dobija se jednostavniji izraz (#), a snaga na kraju je \underline{S}_2 .

Sada je snaga prije impedance \underline{Z}_1

$$\underline{S}_2' = \underline{S}_2'' + \Delta \underline{S}_{Z_1}$$

$$\Delta Q_{Z_1} = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} Z_1 = 25.2 \text{ MVar}$$

$$\Delta P_{Z_1} = 0$$

$$\underline{S}_2' = (120 - j141.4) \text{ MVA}$$

$$\underline{S}_3 = \frac{U_1^2}{\underline{Z}_3^*} = \frac{199^2}{-j262} = j151 \text{ MVar}$$

Na kraju, snaga na ulazu (snaga na primarnoj strani transformatora) je,

$$\underline{S}_1 = \underline{S}_2' + \underline{S}_3 = (120 + j9.6) MVA$$

Zaključuje se da se na osnovu obje šeme a) i b) došlo do istog rješenja, što je i očekivano jer su obje šeme ekvivalentne.