



Seria: Wykłady

Systemy elektroenergetyczne

Wykład 2

Modele transformatorów elektroenergetycznych

Autor:

dr inż. Zbigniew Zdun
dr inż. Krzysztof Księżyk
mgr inż. Tomasz Zdun

Warszawa, 2019

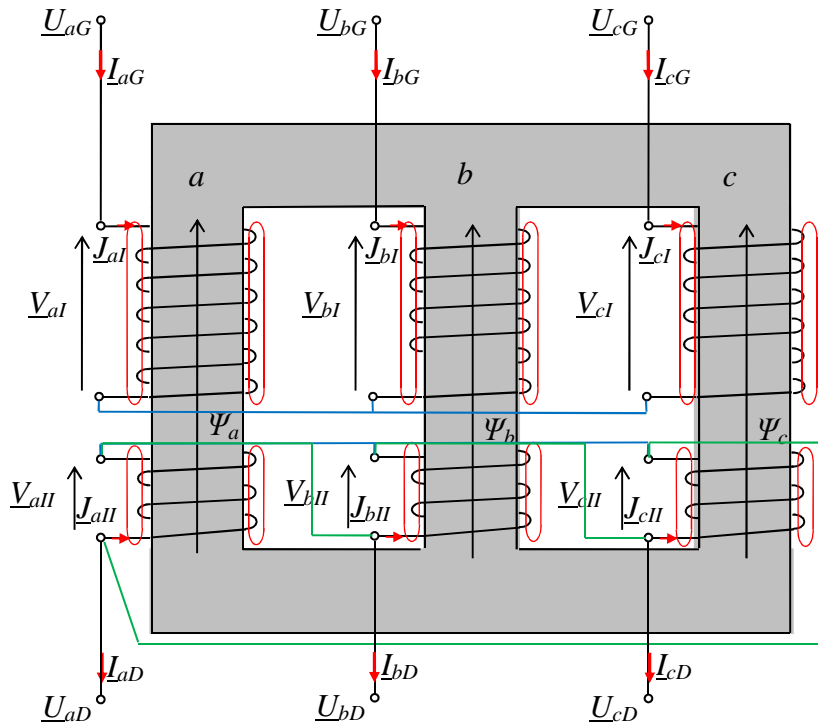
Spis treści

1.	Modele transformatorów elektroenergetycznych	4
1.1	Konstrukcja transformatora dwuzwojowego	4
1.2	Impedancje zgodne transformatora dwuzwojowego	7
1.3	Sprowadzanie impedancji transformatora do jednego poziomu napięciowego.....	9
1.3.1.	Schemat rezonansowy transformatora.....	10
1.3.2.	Przykład obliczeń transformatora dwuzwojowego.....	11
1.3.3.	Sprowadzanie impedancji elementów sieci do jednego poziomu napięciowego ..	13
1.3.4.	Jednostki względne	24
1.4	Transformatory trójzwojowe	26
1.5	Schemat transformatora dla składowej przeciwnej	28
1.6	Schematy zerowe transformatorów	28
1.7	Przykładowe obliczenia parametrów elektrycznych transformatora trójzwojowego	32
1.8	Dane katalogowe wybranych transformatorów	35
1.9	Schematy zerowe stosowane w obliczeniach zwarciovych.....	36

1. Modele transformatorów elektroenergetycznych

1.1 Konstrukcja transformatora dwuzwojowego

Zależności łączące prądy i napięcia uzwojeń transformatora wynikają z konstrukcji transformatora trójfazowego (Rys. 1.1).



Rys. 1.1. Konstrukcja transformatora trójfazowego

Jednym ze sposobów budowy modelu matematycznego transformatora jest wyznaczenie indukcyjności własnych i wzajemnych określających napięcie na zaciskach jednego z uzwojeń w funkcji prądów we wszystkich uzwojeniach transformatora. I tak napięcie na przykład V_{aI} (siła elektromotoryczna indukująca się w uzwojeniu pierwotnym w fazie a) zależy od wszystkich sześciu prądów (1.1):

$$\begin{aligned}
 \underline{V}_{aI} &= \underline{M} \underline{J}_{aI} + \underline{M}' \underline{J}_{bI} + \underline{M}' \underline{J}_{cI} + \underline{L} \underline{J}_{aII} + \underline{L}' \underline{J}_{bII} + \underline{L}' \underline{J}_{cII} \\
 \underline{V}_{bI} &= \underline{M}' \underline{J}_{aI} + \underline{M} \underline{J}_{bI} + \underline{M}' \underline{J}_{cI} + \underline{L}' \underline{J}_{aII} + \underline{L} \underline{J}_{bII} + \underline{L}' \underline{J}_{cII} \\
 \underline{V}_{cI} &= \underline{M}' \underline{J}_{aI} + \underline{M}' \underline{J}_{bI} + \underline{M} \underline{J}_{cI} + \underline{L}' \underline{J}_{aII} + \underline{L}' \underline{J}_{bII} + \underline{L} \underline{J}_{cII} \\
 \underline{V}_{aII} &= \underline{L} \underline{J}_{aI} + \underline{L}' \underline{J}_{bI} + \underline{L}' \underline{J}_{cI} + \underline{N} \underline{J}_{aII} + \underline{N}' \underline{J}_{bII} + \underline{N}' \underline{J}_{cII} \\
 \underline{V}_{bII} &= \underline{L}' \underline{J}_{aI} + \underline{L} \underline{J}_{bI} + \underline{L}' \underline{J}_{cI} + \underline{N}' \underline{J}_{aII} + \underline{N} \underline{J}_{bII} + \underline{N}' \underline{J}_{cII} \\
 \underline{V}_{cII} &= \underline{L}' \underline{J}_{aI} + \underline{L}' \underline{J}_{bI} + \underline{L} \underline{J}_{cI} + \underline{N}' \underline{J}_{aII} + \underline{N}' \underline{J}_{bII} + \underline{N} \underline{J}_{cII}
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

co można przedstawić w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_I \\ \underline{V}_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{M} & \underline{L} \\ \underline{L} & \underline{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{J}_I \\ \underline{J}_{II} \end{bmatrix}$$

lub krócej:

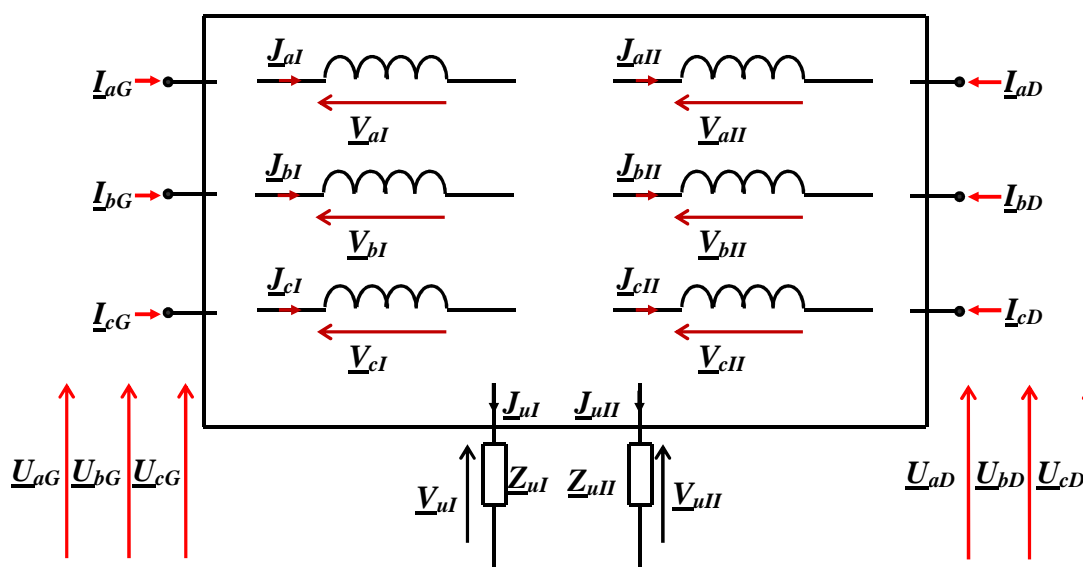
$$\underline{V} = \underline{K} \cdot \underline{J} \tag{1.1}$$

przy czym: \underline{M} , \underline{N} , \underline{L} są podmacierzami stopnia (3x3) o strukturze:

$$\underline{M} = \begin{bmatrix} M & M' & M' \\ M' & M & M' \\ M' & M' & M \end{bmatrix}$$

Wartości współczynników w tych macierzach są obliczane na podstawie rozwiązywania obwodów magnetycznych wynikających z konstrukcji transformatora: liczby uzwojeń i ich sposobu nawinięcia i rozmieszczenia oraz konstrukcji i kształtu rdzenia oraz materiału z jakiego jest wykonany.

Zależności pomiędzy napięciami i prądami fazowymi a napięciami i prądami uzwojeń transformatora wynikają z układu połączeń uzwojeń. Inne będą przy połączeniu uzwojeń w gwiazdę, a inne przy połączeniu w trójkąt. Uzwojenia transformatora trójfazowego z jego układem połączeń można przedstawić schematycznie jak na (Rys. 1.2).



Rys. 1.2. Schemat blokowy uzwojeń transformatora

Podstawowym celem jest określenie zależności pomiędzy napięciami i prądami fazowymi, najpierw w postaci impedancyjnej, a potem admitancyjnej i przekształceniu tych zależności na składowe symetryczne, a w końcu na podstawie macierzy admitancyjnych (zerowej, zgodnej i przeciwnej) utworzenie schematów zastępczych transformatora: dla składowej zerowej, zgodnej i przeciwnej. Należy więc relację

$$\underline{V} = \underline{K} \cdot \underline{J}$$

przekształcić do relacji w której zamiast napięć uzwojeń \underline{V} oraz prądów uzwojeń \underline{J} , będą występowały napięcia fazowe \underline{U} i prądy fazowe \underline{I} na zaciskach górnych i dolnych transformatora. Prądy \underline{J} w uzwojeniach transformator są liniową funkcją prądów węzłowych \underline{I} na zaciskach transformatora. Wynika to z praw Kirchoffa i sposobu połączenia uzwojeń (YΔ). W postaci macierzowej można napisać że:

$$\begin{bmatrix} \underline{J}_I \\ \underline{J}_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{C}_I & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \underline{C}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_G \\ \underline{I}_D \end{bmatrix}$$

gdzie podmacierze \underline{C}_I , \underline{C}_{II} są zerojedynkowymi macierzami, których wartości elementów wynikają z układu połączeń transformatora. Krótko można to zapisać w postaci:

$$\underline{J} = \underline{C} \cdot \underline{I}$$

Wstawiając to do równania (1.1) otrzymujemy:

$$\underline{V} = \underline{K} \cdot \underline{C} \cdot \underline{I} \quad (1.2)$$

Napięcia węzłowe fazowe \underline{U} zależą nie tylko od napięć \underline{V} uzwojeń, ale także od uziemienia punktu zerowego:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_G \\ \underline{U}_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{D}_I & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \underline{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_I \\ \underline{V}_{II} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Z}_{Iu} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \underline{Z}_{IIu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_G \\ \underline{I}_D \end{bmatrix}$$

lub krócej:

$$\underline{U} = \underline{D} \cdot \underline{V} + \underline{Z}_u \cdot \underline{I} \quad (1.3)$$

gdzie macierze \underline{D} oraz \underline{Z}_u wynikają z układu połączeń transformatora i sposobu uziemienia punktu zerowego. Podstawiamy teraz zależność (1.2) do (1.3), otrzymujemy interesującą nas zależność między prądami fazowymi i napięciami węzłowymi fazowymi w transformatorze:

$$\underline{U} = \underline{D} \cdot \underline{K} \cdot \underline{C} \cdot \underline{I} + \underline{Z}_u \cdot \underline{I}$$

lub

$$\underline{U} = (\underline{D} \cdot \underline{K} \cdot \underline{C} + \underline{Z}_u) \cdot \underline{I} \quad (1.4)$$

Stosując do równania (1.4) przekształcenie (0,1,2) - składowe symetryczne, otrzymuje się interesującą nas zależność impedancyjną pomiędzy napięciami a prądami fazowymi wyrażonymi w składowych symetrycznych:

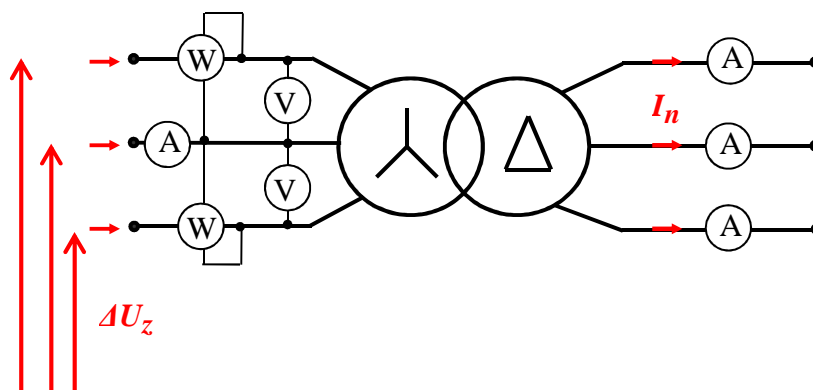
$$\underline{U}_S = \underline{Z}_S \cdot \underline{I}_S \quad (1.5)$$

Na podstawie zależności (1.5) można, po przejściu na postać admitancyjną (inwersji macierzy \underline{Z}_S) otrzymać schematy zastępcze (zerowy, zgodny i przeciwny) transformatora.

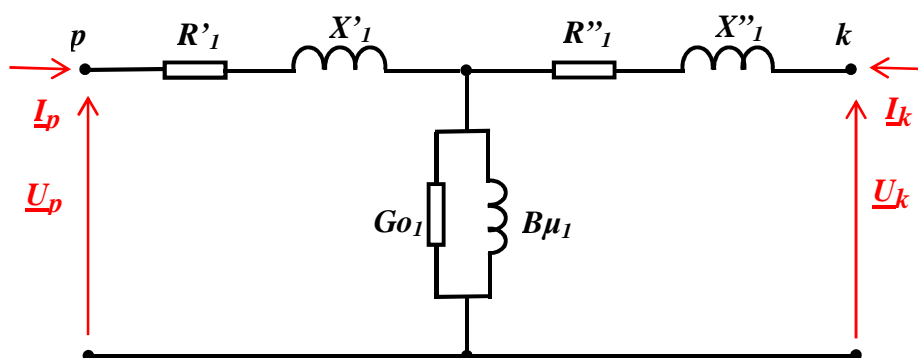
1.2 Impedancje zgodne transformatora dwuzwojowego

Jednym ze sposobów budowy modelu matematycznego transformatora jest wyznaczenie jego parametrów impedancyjnych na podstawie prób pomiarowych – próby zwarcia i próby biegu jałowego.

Schemat układu pomiarowego w próbie zwarcia (Rys. 1.3), zaś ogólny schemat zastępczy przedstawia (Rys. 1.4).



Rys. 1.3. Próby pomiarowe transformatora



Rys. 1.4. Ogólny schemat zastępczy transformatora

W celu wyznaczenia parametrów impedancyjnych transformatora przeprowadza się próby pomiarowe: próbę biegu jałowego oraz próbę zwarciovą.

Próba biegu jałowego polega na zasileniu jednej strony napięciem znamionowym, przy czym druga strony jest otwarta (nic do niej nie jest podłączone). Na podstawie takiej próby wyznacza się prąd biegu jałowego i straty mocy w żelazie wynikające ze strat na prądy wirowe i pętlę histerezy. Na podstawie danych z próby biegu jałowego można obliczyć wartości impedancji gałęzi poprzecznej – G_{01} , $B\mu_1$.

Próba zwarcia polega na zasileniu jednej strony takim napięciem, aby przy zwartych uzwojeniach drugiej strony popłynął w tych uzwojeniach (strony drugiej) prąd znamionowy. Wartość tego napięcia jest określana napięciem zwarcia transformatora. Na podstawie próby zwarcia dokonuje się więc pomiaru napięcia zwarcia oraz strat mocy w uzwojeniach transformatora przy obciążeniu znamionowym – strat w miedzi. Na podstawie danych z próby zwarcia oblicza się wartości impedancji gałęzi wzdłużnej – $R'_1 + R''_1$ oraz $X'_1 + X''_1$.

Parametry elektryczne transformatora oblicza się na podstawie danych katalogowych transformatora:

S_n – moc znamionowa [MVA],

U_{nG} – napięcie znamionowe strony górnej transformatora [kV],

U_{nD} – napięcie znamionowe strony dolnej transformatora [kV],

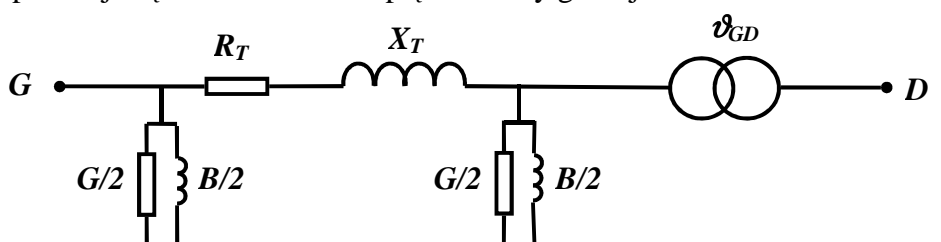
ΔU_z – napięcie zwarcia wyrażone w procentach w odniesieniu do napięcia znamionowego (strony dolnej lub górnej) [%],

ΔP_{Cu} – straty mocy w miedzi przy próbie zwarcia transformatora [kW],

I_0 – prąd biegu jałowego w procentach prądu znamionowego [%],

ΔP_{Fe} – straty mocy czynnej w żelazie (w próbie biegu jałowego) [kW],

Parametry elektryczne transformatora mogą być odniesione zarówno do napięcia górnego jak i dolnego. W praktyce stosuje się schemat zastępczy transformatora jak na (Rys. 1.5), w którym impedancje są odniesione do napięcia strony górnej.



Rys. 1.5. Schemat zastępczy transformatora

Wartości impedancji wzdłużnych transformatora wyrażone są w omach a gałęzi poprzecznej w mikrosiemensach. Na podstawie wyników pomiarowych z próby zwarcia można obliczyć moduł impedancji zastępczej transformatora:

$$|Z_T| = \frac{U_{z, fazowe} [kV]}{\sqrt{3} I_{nG} [kA]} = \frac{U_z [\%] U_{nG} [kV]}{100 \sqrt{3} I_{nG} [kA]} \frac{U_{nG} [kV]}{U_{nG} [kV]}$$

czyli:

$$|Z_T|_{\Omega} = \frac{U_z [\%] U_{nG}^2 [kV]}{100 S_n [MVA]} \cong X_T \quad (1.6)$$

oraz zastępczą rezystancję uzwojeń (sumę rezystancji uzwojeń pierwotnego i wtórnego)

$$R_T = \frac{\Delta P_{Cu} [MW]}{3 I_{nG}^2 [kA]} = \frac{\Delta P_{Cu} [kW]}{1000 \cdot 3 I_{nG} [kA]} \frac{U_{nG}^2 [kV]}{U_{nG}^2 [kV]}$$

a więc:

$$R_{T, \Omega} = \frac{\Delta P_{Cu} [kW] U_{nG}^2 [kV]}{1000 S_n^2 [MVA]} \quad (1.7)$$

Dla transformatorów elektroenergetycznych można przyjąć $X_T = |Z_T|$, ponieważ rezystancja jest mała w stosunku do reaktancji.

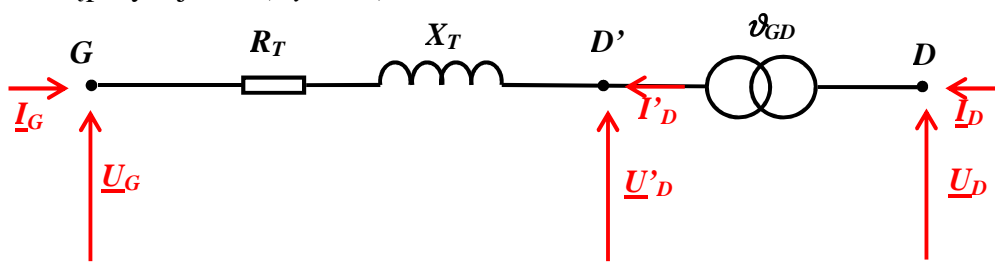
Podobnie z próby biegu jałowego można obliczyć:

$$G_{I, \mu S} = \frac{1000 \Delta P_{Fe} [kW]}{U_{nG}^2 [kV]} \quad B_{I, \mu S} = |Y_I| = \frac{I_0 [\%] S_n [MVA]}{10^{-4} U_{nG}^2 [kV]} \quad (1.8)$$

1.3 Sprowadzanie impedancji transformatora do jednego poziomu napięciowego

W sieciach elektroenergetycznych występują transformatory łączące elementy na różnych poziomach napięciowych – linie o napięciu 400 kV, 220kV, 110 kV, itd.) W obliczeniach stanów takich sieci należy wszystkie wielkości elektryczne sprowadzić do jednego poziomu napięciowego. Sprowadzając elementy z niższego poziomu napięciowego do wyższego należy napięcia pomnożyć przez przekładnię transformatora, prądy podzielić, a impedancje pomnożyć przez kwadrat przekładni. Przy użyciu algorytmów komputerowych obliczenia wykonuje się stosując macierz admittancejną węzłową, a operację "sprowadzania" można włączyć do odpowiedniego wyznaczenia elementów macierzy admittancejnej.

Przy pominięciu, dla uproszczenia elementów poprzecznych, transformator można zastąpić schematem zastępczym jak na (Rys. 1.6).



Rys. 1.6 Schemat zastępczy transformatora do wyznaczenia macierzy admittancejnej węzłowej

W prosty sposób można wyznaczyć macierz admittancejną dwójnika $G-D'$:

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I'_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_T^{-1} & -\underline{Z}_T^{-1} \\ -\underline{Z}_T^{-1} & \underline{Z}_T^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_G \\ \underline{U}'_D \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Definiując przekładnię ϑ_{GD} transformatora jako stosunek:

$$\vartheta_{GD} = \frac{U_G}{U_D} \quad \text{stad} \quad \underline{U}'_D = \vartheta_{GD} \underline{U}_D \quad \text{oraz} \quad I'_D = \frac{I_D}{\vartheta_{GD}}$$

można podstawić do (1.9) otrzymując:

$$\begin{aligned} I_G &= \underline{Z}_T^{-1} \underline{U}_G - \underline{Z}_T^{-1} \vartheta_{GD} \underline{U}_D \\ \frac{I_D}{\vartheta_{GD}} &= -\underline{Z}_T^{-1} \underline{U}_G + \underline{Z}_T^{-1} \vartheta_{GD} \underline{U}_D \end{aligned}$$

po wymnożeniu drugiego równania przez ϑ_{GD} otrzymujemy:

$$\begin{aligned} I_G &= \underline{Z}_T^{-1} \underline{U}_G - \underline{Z}_T^{-1} \vartheta_{GD} \underline{U}_D \\ I_D &= -\underline{Z}_T^{-1} \vartheta_{GD} \underline{U}_G + \underline{Z}_T^{-1} \vartheta_{GD}^2 \underline{U}_D \end{aligned}$$

lub w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_T^{-1} & -\underline{Z}_T^{-1} \vartheta_{GD} \\ -\underline{Z}_T^{-1} \vartheta_{GD} & \underline{Z}_T^{-1} \vartheta_{GD}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_G \\ \underline{U}_D \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

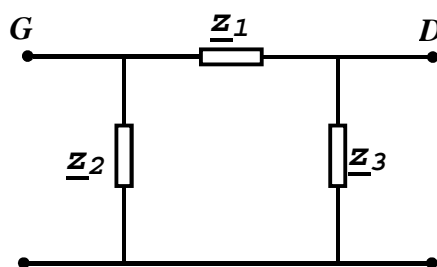
W relacji (1.10) prąd I_D oraz napięcie \underline{U}_D nie są sprowadzone do poziomu napięcia węzła początkowego. Relacja ta opisuje zależność między prądami i napięciami węzłów G, D - węzłów o różnych poziomach napięciowych.

1.3.1. Schemat rezonansowy transformatora

Macierz admitycyjną transformatora w równaniu macierzowym (1.10) można przedstawić w postaci:

$$\underline{Y}_T = \begin{bmatrix} \frac{1}{\underline{Z}_T} & -\frac{1}{\underline{Z}_T} \vartheta_{GD} \\ -\frac{1}{\underline{Z}_T} \vartheta_{GD} & \frac{1}{\underline{Z}_T} \vartheta_{GD}^2 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Na podstawie macierzy admitycyjnej z relacji można zbudować schemat zastępczy transformatora jak na (Rys. 1.7).



Rys. 1.7. Schemat rezonansowy transformatora

Impedancje w tym schemacie wynikają z zasad tworzenia macierzy admitycyjnej:

- admitycja wzajemna jest to odwrotność impedancji pomiędzy węzłami $G - D$:

$$-\frac{1}{\underline{Z}_T} \vartheta_{GD} = -\frac{1}{\underline{z}_1} \quad \text{stąd} \quad \underline{z}_1 = \frac{\underline{Z}_T}{\vartheta_{GD}} \quad (1.12)$$

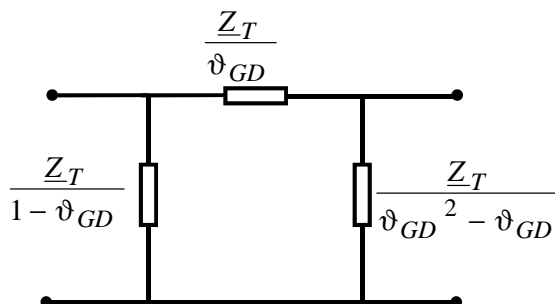
- admitycja własna węzła G jest sumą odwrotności $1/\underline{z}_1 + 1/\underline{z}_2$:

$$\frac{1}{\underline{Z}_T} = \frac{1}{\underline{z}_1} + \frac{1}{\underline{z}_2} \Rightarrow \frac{1}{\underline{Z}_T} = \frac{\vartheta_{GD}}{\underline{Z}_T} + \frac{1}{\underline{z}_2} \quad \text{stąd} \quad \underline{z}_2 = \frac{\underline{Z}_T}{1 - \vartheta_{GD}} \quad (1.13)$$

- admitycja własna węzła D jest sumą odwrotności $1/\underline{z}_1 + 1/\underline{z}_3$:

$$\frac{\vartheta_{GD}^2}{\underline{Z}_T} = \frac{1}{\underline{z}_1} + \frac{1}{\underline{z}_3} \Rightarrow \frac{\vartheta_{GD}^2}{\underline{Z}_T} = \frac{\vartheta_{GD}}{\underline{Z}_T} + \frac{1}{\underline{z}_3} \quad \text{stąd} \quad \underline{z}_3 = \frac{\underline{Z}_T}{\vartheta_{GD}^2 - \vartheta_{GD}} \quad (1.14)$$

Zatem schemat zastępczy transformator jest:



Rys. 1.8. Impedancje w schemacie rezonansowym transformatora

1.3.2. Przykład obliczeń transformatora dwuuzwojeniowego

Niech dany będzie transformator o parametrach:

$$S_n = 250 \text{ MVA} \quad \vartheta = 220/110 \text{ kV/kV} \quad \Delta U_z = 10,5\%$$

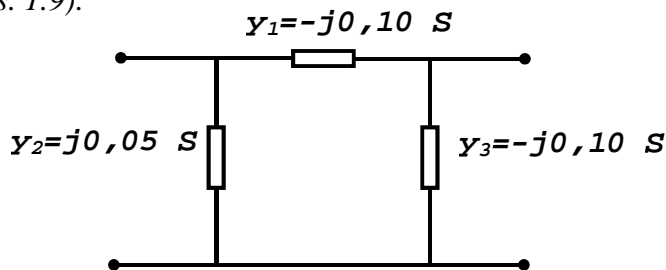
Dla przejrzystości pomińmy rezystancje i gałęzie poprzeczne.

$$X_T = \frac{\Delta U_z \Delta U_{nG}^2}{100 S_n} = \frac{10,5 \cdot 220^2}{100 \cdot 250} = 20 \Omega \quad \underline{Z}_T = (0 + j20) \Omega \quad \vartheta_{GD} = \frac{220 \text{ kV}}{110 \text{ kV}} = 2$$

Macierz admitancyjna transformatora:

$$\underline{Y}_T = \begin{bmatrix} \frac{1}{\underline{Z}_T} & -\frac{1}{\underline{Z}_T} \vartheta_{GD} \\ -\frac{1}{\underline{Z}_T} \vartheta_{GD} & \frac{1}{\underline{Z}_T} \vartheta_{GD}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{j20} & -\frac{1}{j20} \cdot 2 \\ -\frac{1}{j20} \cdot 2 & \frac{1}{j20} \cdot 2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0,05 & j0,10 \\ j0,10 & -j0,20 \end{bmatrix}_S$$

Macierzy tej odpowiada obwód elektryczny którego parametrami admitancyjnym są: wartości admitancji jak na (Rys. 1.9).

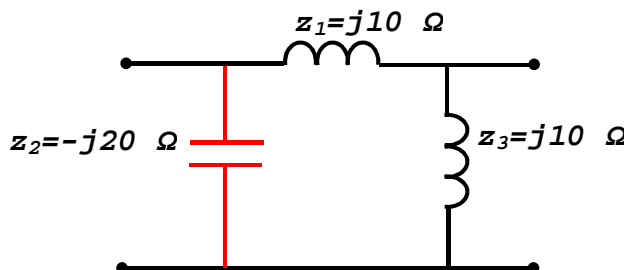


Rys. 1.9. Schemat admitancyjny

Elementy impedancyjne z_1 , z_2 , z_3 występujące na schemacie na (Rys. 1.7) oblicza się na podstawie wzorów występujących na schemacie na (Rys. 1.8):

$$\begin{aligned} z_1 &= \frac{\underline{Z}_T}{\vartheta_{GD}} = \frac{j20 \Omega}{2} = j10 \Omega = \frac{1}{-j0,10} = y_1 && \text{reaktancja} \\ z_2 &= \frac{\underline{Z}_T}{1 - \vartheta_{GD}} = \frac{j20 \Omega}{1 - 2} = -j20 \Omega = \frac{1}{j0,05} = y_2 && \text{pojemność} \\ z_3 &= \frac{\underline{Z}_T}{\vartheta_{GD}^2 - \vartheta_{GD}} = \frac{j20 \Omega}{2^2 - 2} = j10 \Omega = \frac{1}{-j0,10} = y_3 && \text{reaktancja} \end{aligned}$$

Impedancjom tym odpowiada obwód elektryczny jak na (Rys. 1.10).



Rys. 1.10. Impedancyjny rezonansowy schemat transformatora

Jak widać z (Rys. 1.10) w schemacie zastępczym transformatora występuje kondensator – element o charakterze pojemnościowym i dwa elementy o charakterze indukcyjnym. Przy uwzględnieniu rezystancji uzwojeń transformatora może występować gałąź o ujemnej rezystancji.

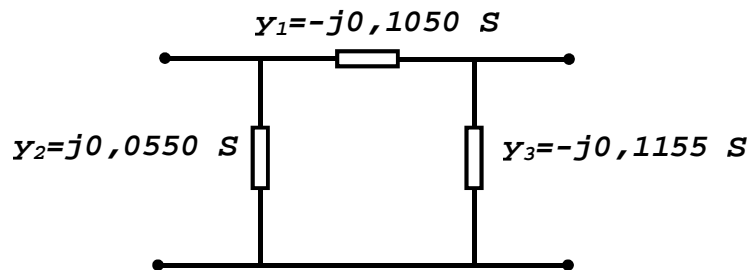
Założmy, że transformator ma zaczepty: $Lz=2I$ zaczeptów regulacyjnych o skoku napięcia na zaczept $dU_z=1,1 \text{ kV}$ (po stronie 220 kV). Jeśli transformator pracuje na zaczeptie 10-tym to $Z_{akt.}=10$, i wtedy przekładnia transformatora jest:

$$\vartheta_{GD(10)} = \frac{U_G + Z_{akt.} \Delta U_{zacz.}}{U_D} = \frac{220 + 10 \cdot 1,1}{110} = 2,1$$

a macierz admitancyjna transformatora jest:

$$\underline{Y}_T = \begin{bmatrix} \frac{1}{\underline{Z}_T} & -\frac{1}{\underline{Z}_T} \vartheta_{GD} \\ -\frac{1}{\underline{Z}_T} \vartheta_{GD} & \frac{1}{\underline{Z}_T} \vartheta_{GD}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{j20} & -\frac{1}{j20} \cdot 2,1 \\ -\frac{1}{j20} \cdot 2,1 & \frac{1}{j20} \cdot 2,1^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0,0500 & j0,1050 \\ j0,1050 & -j0,2205 \end{bmatrix}_S$$

Macierzy tej odpowiada obwód elektryczny którego parametrami admitancyjnym są: wartości admitancji jak na (Rys. 1.11).



Rys. 1.11. Schemat admitancyjny – zaczept 10

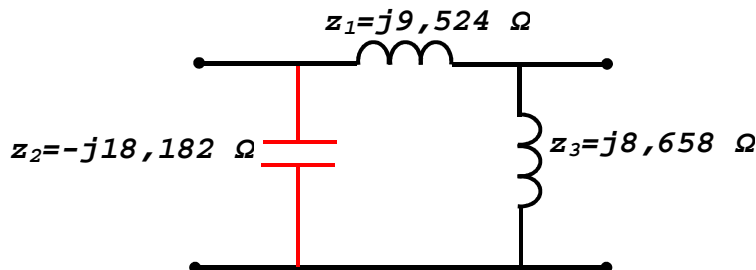
Elementy impedancyjne z_1, z_2, z_3 występujące na schemacie na (Rys. 1.7) oblicza się na podstawie wzorów występujących na schemacie na (Rys. 1.8):

$$z_1 = \frac{\underline{Z}_T}{\vartheta_{GD}} = \frac{j20\Omega}{2,1} = j9,524\Omega = \frac{1}{-j0,1050} = y_1 \quad \text{reaktancja}$$

$$z_2 = \frac{\underline{Z}_T}{1 - \vartheta_{GD}} = \frac{j20\Omega}{1 - 2,1} = -j18,182\Omega = \frac{1}{j0,0550} = y_2 \quad \text{pojemność}$$

$$z_3 = \frac{\underline{Z}_T}{\vartheta_{GD}^2 - \vartheta_{GD}} = \frac{j20\Omega}{2,1^2 - 2,1} = j8,658\Omega = \frac{1}{-j0,1155} = y_3 \quad \text{reaktancja}$$

Impedancjom tym odpowiada obwód elektryczny jak na (Rys. 1.12).

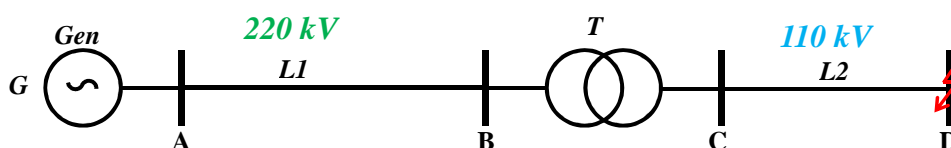


Rys. 1.12. Impedancyjny rezonansowy schemat transformatora- zaczept 10

1.3.3. Sprowadzanie impedancji elementów sieci do jednego poziomu napięciowego

W sieciach elektroenergetycznych w których występują transformatory łączące elementy na różnych poziomach napięciowych należy w obliczeniach wszystkie wielkości elektryczne sprowadzić do jednego poziomu napięciowego. Sprowadzając elementy na przykład z niższego poziomu napięciowego do wyższego należy napięcia pomnożyć przez przekładnię transformatora, prądy podzielić, a impedancje pomnożyć przez kwadrat przekładni.

Weźmy pod uwagę prosty układ przesyłowy składający się z generatora zastępczego G, jednej linii 220 kV, transformatora 220/110 kV i jednej linii 110 kV jak na (Rys. 1.13).



Rys. 1.13. Prosty układ przesyłowy

Należy dla tego układu obliczyć impedancję zastępczą pomiędzy węzłami G-D (zwinąć układ do jednej impedancji zastępczej). Dla uproszczenia obliczeń pominięte zostały rezystancje i impedancje gałęzi poprzecznych.

Założmy, że reaktancja generatora zastępczego odniesiona do napięcia 220 kV jest $X_G = 10 \Omega$, reaktancja linii L1 wynosi $X_{L1} = 60 \Omega$, a reaktancja linii L2 jest $X_{L2} = 5 \Omega$.

Parametry transformatora T1 są następujące:

$S_n = 250 \text{ MVA}$, $U_G/U_D = 220/110 \text{ kV}$, $\Delta U_z = 10,5 \%$, $L_z = 21$, $dU_z = 1,1 \text{ kV}$ (po stronie 220 kV)

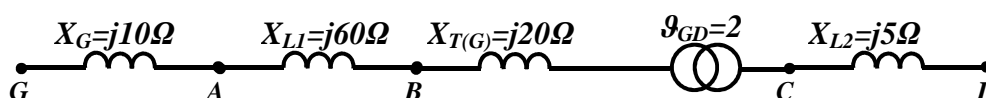
Reaktancja transformatora odniesiona do 220 kV:

$$X_{T(G)} = \frac{\Delta U_z U_{nG}^2}{100 S_n} = \frac{10,5 \cdot 220^2}{100 \cdot 250} = 20,0 \Omega \quad \vartheta_{GD} = \frac{U_G}{U_D} = \frac{220 \text{ kV}}{110 \text{ kV}} = 2$$

Reaktancja transformatora odniesiona do 110 kV:

$$X_{T(D)} = \frac{\Delta U_z U_{nD}^2}{100 S_n} = \frac{10,5 \cdot 110^2}{100 \cdot 250} = 5,0 \Omega \quad \vartheta_{DG} = \frac{U_D}{U_G} = \frac{110 \text{ kV}}{220 \text{ kV}} = 0,5$$

Schemat zastępczy prostego układu przesyłowego przy zamodelowaniu transformatora na napięciu 220 kV jest jak na (Rys. 1.14).

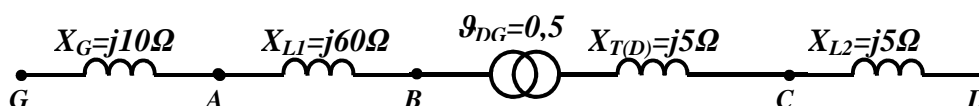


Rys. 1.14. Schemat zastępczy prostego układu przesyłowego – transformator na 220 kV

Obliczanie impedancji wypadkowej w odniesieniu do napięcia linii L1 – 220 kV:

$$X_{G-D(220kV)} = X_G + X_{L1} + X_{T(G)} + X_{L2} \vartheta_{GD}^2 = 10 + 60 + 20 + 5 \cdot 2^2 = 110 \Omega$$

Schemat zastępczy prostego układu przesyłowego przy zamodelowaniu transformatora na napięciu 110 kV jest jak na (Rys. 1.15).



Rys. 1.15. Schemat zastępczy prostego układu przesyłowego- transformator na 110 kV

Obliczanie impedancji wypadkowej w odniesieniu do napięcia linii L2 – 110 kV:

$$X_{G-D(110kV)} = (X_G + X_{LI}) * \vartheta_{DG}^2 + X_{T(D)} + X_{L2} = (10+60) * 0,5^2 + 5 + 5 = 27,5 \Omega$$

Obliczenia zwarciove – prądu i mocy zwarciovej dla zwarcia w węźle D

1. Obliczenia z wykorzystaniem impedancji wypadkowej odniesionej do napięcia 220 kV i przy założeniu że transformator pracuje na zaczeple zerowym:

- prąd zwarcia:

$$I''_{k(220kV)} = \frac{1,1 U_{ns(220kV)}}{\sqrt{3} X_{G-D(220kV)}} = \frac{1,1 \cdot 220}{\sqrt{3} \cdot 110} = 1,270 \text{ kA}$$

- moc zwarciova:

$$S_z = \sqrt{3} U_{ns(220kV)} I''_{k(220kV)} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 1,270 = 484 \text{ MVA}$$

2. Obliczenia z wykorzystaniem impedancji wypadkowej odniesionej do napięcia 110 kV i przy założeniu że transformator pracuje na zaczeple zerowym:

- prąd zwarcia:

$$I''_{k(110kV)} = \frac{1,1 U_{ns(110kV)}}{\sqrt{3} X_{G-D(110kV)}} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 27,5} = 2,540 \text{ kA}$$

- moc zwarciova:

$$S_z = \sqrt{3} U_{ns(110kV)} I''_{k(110kV)} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 2,540 = 484 \text{ MVA}$$

3. Obliczenia z wykorzystaniem impedancji wypadkowej odniesionej do napięcia 220 kV i przy założeniu że transformator pracuje na zaczeple dziesiątym

- przekładnia transformatora na zaczeple $Z_{akt.}=10$ przy skoku napięcia na zaczeple $\Delta U_{zacz.}=1,1$ kV

$$\vartheta_{GD(10)} = \frac{U_G + Z_{akt.} \Delta U_{zacz.}}{U_D} = \frac{220 + 10 \cdot 1,1}{110} = 2,1$$

- impedancja zastępcza odniesiona do 220 kV:

$$X_{G-D(220kV)} = X_G + X_{LI} + X_{T(G)} + X_{L2} \vartheta_{GD(10)}^2 = 10 + 60 + 20 + 5 \cdot 2,1^2 = 112,05 \Omega$$

- prąd zwarcia:

$$I''_{k(220kV)} = \frac{1,1 U_{ns(220kV)}}{\sqrt{3} X_{G-D(220kV)}} = \frac{1,1 \cdot 220}{\sqrt{3} \cdot 112,05} = 1,247 \text{ kA}$$

- moc zwarcia:

$$S_z = \sqrt{3} U_{ns(220kV)} I''_{k(220kV)} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 1,247 = 475 \text{ MVA}$$

4. Obliczenia z wykorzystaniem impedancji wypadkowej odniesionej do napięcia 110 kV i przy założeniu że transformator pracuje na zaczeple dziesiątym

- przekładnia transformatora na zaczeple $Z_{akt.}=10$ przy skoku napięcia na zaczeple $\Delta U_{zacz.}=1,1$ kV

$$\vartheta_{DG(10)} = \frac{U_D}{U_G + Z_{akt.} \Delta U_{zacz.}} = \frac{110}{220 + 10 \cdot 1,1} = 0,4762$$

- impedancja zastępcza odniesiona do 110 kV:

$$X_{G-D(110kV)} = (X_G + X_{L1}) * \vartheta_{DG(10)}^2 + X_{T(D)} + X_{L2} = (10 + 60) * 0,4762^2 + 5 + 5 = 25,873 \Omega$$

- prąd zwarcia:

$$I''_{k(110kV)} = \frac{1,1 U_{ns(110kV)}}{\sqrt{3} X_{G-D(110kV)}} = \frac{1,1 \cdot 110}{\sqrt{3} \cdot 25,873} = 2,700 \text{ kA}$$

- moc zwarcia:

$$S_z = \sqrt{3} U_{ns(110kV)} I''_{k(110kV)} = \sqrt{3} \cdot 110 \cdot 2,700 = 514 \text{ MVA}$$

Wnioski:

1. W obwodach elektrycznych w których występują transformatory należy parametry elektryczne takiego obwodu sprowadzić do jednego poziomu napięciowego.
2. Wybór poziomu napięciowego jest dowolny.
3. W obliczeniach prądów zwarcia można otrzymać różne wyniki mocy zwarcia – w zależności do którego poziomu napięciowego sprowadzamy impedancje elementów.

- jeśli przekładnie transformatorów pokrywają się z przekładniami wynikającymi z napięć znamionowych sieci wyniki obliczeń zwarcia nie zależą od sposobu sprowadzania impedancji. Dla przykładowej sieci niezależnie od sposobu sprowadzania elementów otrzymuje się:

$$S_z = 484 \text{ MVA}$$

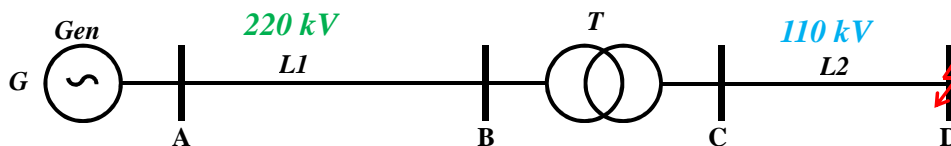
- jeśli przekładnie transformatorów są różne od przekładni sieciowych otrzymuje się różne wyniki mocy zwarcia. Dla przykładowej sieci przy sprowadzeniu impedancji do poziomu 220 kV:

$$S_z = 475 \text{ MVA}$$

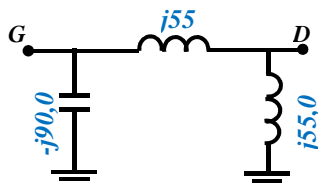
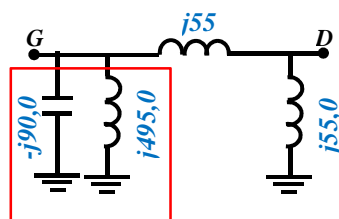
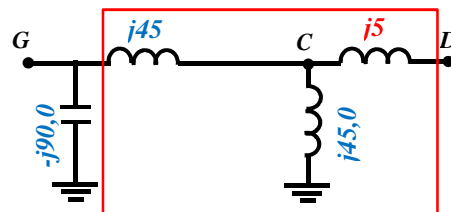
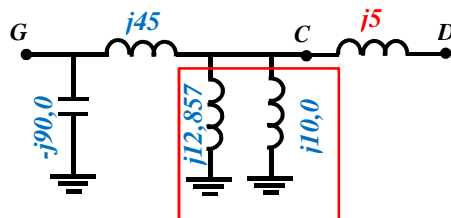
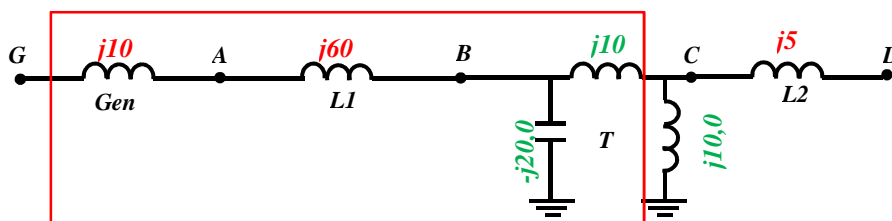
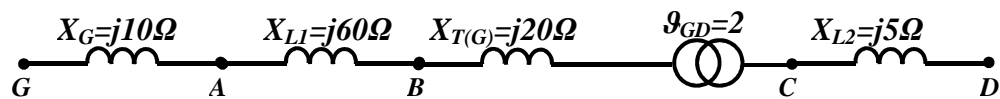
a przy sprowadzeniu impedancji do poziomu 110 kV:

$$S_z = 514 \text{ MVA}$$

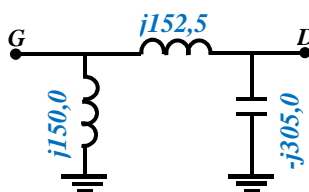
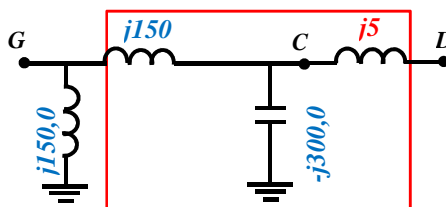
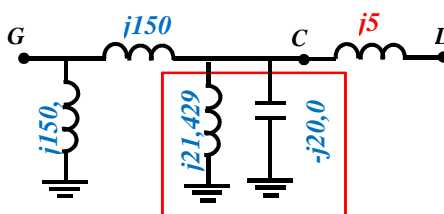
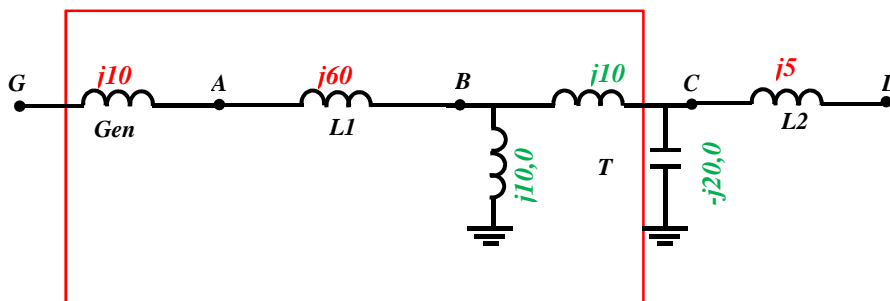
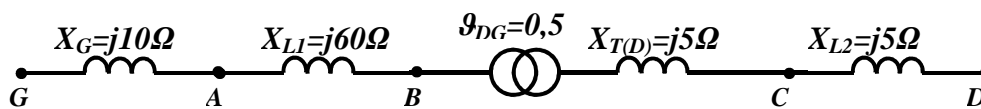
Zastosowanie schematu rezonansowego



Schemat transformatora od strony 220/110 kV:



Schemat transformatora od strony 110/220 kV:



1.3.4. Obliczanie sieci dwutransformatorowej

Weźmy pod uwagę prosty układ przesyłowy składający się z dwóch transformatorów **T1**, **T2** i dwóch linii, jednej **L1** o napięciu linii 220 kV i reaktancji 60Ω i drugiej linii **L2** o napięciu 110 kV i reaktancji 5Ω i z generatora zastępczego **S** o reaktancji zastępczej $X_G = 10 \Omega$ jak na (Rys. 1.16).

Rys. 1.16. Prosta sieć przesyłowa

Parametry transformatora T1 i T2 są następujące:

$S_n = 250 \text{ MVA}$, $U_G/U_D = 220/110 \text{ kV}$, $\Delta U_z = 10,5 \%$ $L_z = 21$, $dU_z = 1,1 \text{ kV}$ (po stronie 220 kV)

Reaktancja transformatora odniesiona do 220 kV:

$$X_{T(G)} = \frac{\Delta U_z U_{nG}^2}{100 S_n} = \frac{10,5 \cdot 220^2}{100 \cdot 250} = 20,0 \Omega \quad \vartheta_{GD} = \frac{U_G}{U_D} = \frac{220 \text{ kV}}{110 \text{ kV}} = 2$$

Reaktancja transformatora odniesiona do 110 kV:

$$X_{T(D)} = \frac{\Delta U_z U_{nD}^2}{100 S_n} = \frac{10,5 \cdot 110^2}{100 \cdot 250} = 5,0 \Omega \quad \vartheta_{DG} = \frac{U_D}{U_G} = \frac{110 \text{ kV}}{220 \text{ kV}} = 0,5$$

Dla tej sieci należy obliczyć reaktancję wypadkową pomiędzy węzłami **A** – **B**. Należy sprowadzić reaktancję linii **L2** do poziomu 220 kV, a ponieważ reaktancje transformatorów są odniesione do napięcia 220 kV to reaktancja wypadkowa gałęzi **T1** – **L2** – **T2** będzie sumą tych trzech reaktancji (połączenie szeregowe):

- sprowadzenie reaktancji linii **L2** do napięcia 220 kV:

$$X_{L2(220kV)} = X_{L2} \vartheta_{GD}^2 = 5 \cdot 2^2 = 20 \Omega$$

- połączenie szeregowe **T1** – **L2** – **T2**:

$$X_{T1-L2-T2} = X_{T1} + X_{L2} + X_{T2} = 20 + 20 + 20 = 60 \Omega$$

- połączenie równoległe:

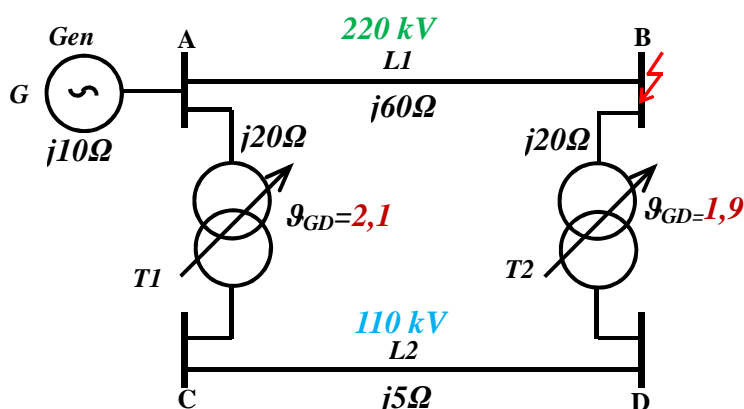
$$\frac{1}{X_{AB}} = \frac{1}{X_{T1-L2-T2}} + \frac{1}{X_{L1}} \quad \text{stad} \quad X_{AB} = \frac{X_{L1} \cdot X_{T1-L2-T2}}{X_{L1} + X_{T1-L2-T2}} = \frac{60 \cdot 60}{60 + 60} = 30 \Omega$$

Transformatory T1 i T2 posiadają regulację przekładni pod obciążeniem. Załóżmy, że przełącznik transformatora **T1** jest ustawiony na zaczeple 10 a transformatora **T2** na zaczeple -10.

Przekładnie napięciowe transformatora **T1** i **T2** są różne i wynoszą:

$$\vartheta_{T1GD(10)} = \frac{U_G + Z_{akt.} \Delta U_{zacz.}}{U_D} = \frac{220 + 10 \cdot 1,1}{110} = 2,1$$

$$\vartheta_{T2GD(-10)} = \frac{U_G + Z_{akt.} \Delta U_{zacz.}}{U_D} = \frac{220 - 10 \cdot 1,1}{110} = 1,9$$



Rys. 1.17. Sieć z różnymi nastawami przekładni transformatorów

Sprowadzając teraz reaktancję linii L2 z poziomu 110 kV do poziomu 220 kV powstaje problem, którą z przekładni wziąć pod uwagę – otrzymamy dwa różne wyniki.

Obliczenia zwarciove – prądu i mocy zwarciovej dla zwarcia w węzle B

1. Oba transformatory pracują na zaczeple zerowym:

- połączenie szeregowe **T1 – L2 – T2**:

$$X_{T1-L2-T2} = X_{T1} + X_{L2} \vartheta_{GD}^2 + X_{T2} = 20 + 20 \cdot 2^2 + 20 = 60 \Omega$$

- reaktancja wypadkowa:

$$X_{AB} = \frac{X_{L1} \cdot X_{T1-L2-T2}}{X_{L1} + X_{T1-L2-T2}} = \frac{60 \cdot 60}{60 + 60} = 30 \Omega$$

- prąd zwarcia:

$$I_{k(220kV)}'' = \frac{1,1 U_{ns(220kV)}}{\sqrt{3} (X_G + X_{AB(220kV)})} = \frac{1,1 \cdot 220}{\sqrt{3} \cdot (10 + 30)} = 3,493 \text{ kA}$$

- moc zwarciova:

$$S_z = \sqrt{3} U_{ns(220kV)} I_{k(220kV)}'' = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 3,493 = \mathbf{1331 \text{ MVA}}$$

2. Transformator T1 pracuje na zaczeple 10 a T2 na zaczeple -10. Sprowadzenie reaktancji linii **L2** do napięcia 220 kV przez przekładnię transformatora T1:

$$X_{L2(220kV)} = X_{L2} \vartheta_{T1(GD)}^2 = 5 \cdot 2,1^2 = 22,05 \Omega$$

- połączenie szeregowe **T1 – L2 – T2**:

$$X_{T1-L2-T2} = X_{T1} + X_{L2} + X_{T2} = 20 + 22,05 + 20 = 62,5 \Omega$$

- połączenie równoległe:

$$X_{AB} = \frac{X_{L1} \cdot X_{T1-L2-T2}}{X_{L1} + X_{T1-L2-T2}} = \frac{60 \cdot 62,5}{60 + 62,5} = 30,5 \Omega$$

- prąd zwarcia:

$$I_{k(220kV)}'' = \frac{1,1 U_{ns(220kV)}}{\sqrt{3}(X_G + X_{AB(220kV)})} = \frac{1,1 \cdot 220}{\sqrt{3} \cdot (10 + 30,5)} = 3,450 \text{ kA}$$

- moc zwarciowa:

$$S_z = \sqrt{3} U_{ns(220kV)} I_{k(220kV)}'' = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 3,450 = \mathbf{1315 \text{ MVA}}$$

3. Transformator T1 pracuje na zaczeple 10 a T2 na zaczeple -10. Sprowadzenie reaktancji linii **L2** do napięcia 220 kV przez przekładnię transformatora T2:

$$X_{L2(220kV)} = X_{L2} \vartheta_{T2(GD)}^2 = 5 \cdot 1,9^2 = 18,05 \Omega$$

- połączenie szeregowe **T1 – L2 – T2**:

$$X_{T1-L2-T2} = X_{T1} + X_{L2} + X_{T2} = 20 + 18,05 + 20 = 58,05 \Omega$$

- połączenie równoległe:

$$X_{AB} = \frac{X_{L1} \cdot X_{T1-L2-T2}}{X_{L1} + X_{T1-L2-T2}} = \frac{60 \cdot 58,05}{60 + 58,05} = 29,50 \Omega$$

- prąd zwarcia:

$$I_{k(220kV)}'' = \frac{1,1 U_{ns(220kV)}}{\sqrt{3}(X_G + X_{AB(220kV)})} = \frac{1,1 \cdot 220}{\sqrt{3} \cdot (10 + 29,50)} = 3,537 \text{ kA}$$

- moc zwarciowa:

$$S_z = \sqrt{3} U_{ns(220kV)} I_{k(220kV)}'' = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 3,537 = \mathbf{1348 \text{ MVA}}$$

4. Transformator **T1** pracuje na zaczeple **10** a **T2** na zaczeple **-10**. Sprowadzenie reaktancji transformatora **T1** do napięcia 110 kV, połączenie w szereg z reaktancją linii **L2** i sprowadzenie do napięcia 220 kV przez przekładnię transformatora **T2**:

- połączenie szeregowe reaktancji transformatora **T1** sprowadzonej do napięcia 110 kV i reaktancji linii **L2**:

$$X_{T1(110)} + X_{L2} = \frac{X_{T1}}{\vartheta_{T1(GD)}^2} + X_{L2} = \frac{20}{2,1^2} + 5 = 9,54 \Omega$$

- sprowadzenie reaktancji $X_{T1(110)} + X_{L2}$ do napięcia 220 kV przez przekładnię **T2** i połączenie szeregowe z reaktancją transformatora **T2**:

$$X_{T1-L2-T2} = (X_{T1(110)} + X_{L2}) \vartheta_{T2(GD)}^2 + X_{T2} = 9,54 \cdot 1,9^2 + 20 = 54,44 \Omega$$

- połączenie równoległe:

$$X_{AB} = \frac{X_{L1} \cdot X_{T1-L2-T2}}{X_{L1} + X_{T1-L2-T2}} = \frac{60 \cdot 54,44}{60 + 54,44} = 28,54 \Omega$$

- prąd zwarcia:

$$I_{k(220kV)}'' = \frac{1,1 U_{ns(220kV)}}{\sqrt{3}(X_G + X_{AB(220kV)})} = \frac{1,1 \cdot 220}{\sqrt{3} \cdot (10 + 28,54)} = 3,625 \text{ kA}$$

- moc zwarciowa:

$$S_z = \sqrt{3} U_{ns(220kV)} I_{k(220kV)}'' = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 3,625 = 1381 \text{ MVA}$$

5. Transformator **T1** pracuje na zaczepie **10** a **T2** na zaczepie **-10**. Sprowadzenie reaktancji transformatora **T2** do napięcia 110 kV, połączenie w szereg z reaktancją linii **L2** i sprowadzenie do napięcia 220 kV przez przekładnię transformatora **T1**:

- połączenie szeregowe reaktancji transformatora **T2** sprowadzonej do napięcia 110 kV i reaktancji linii **L2**:

$$X_{T2(110)} + X_{L2} = \frac{X_{T2}}{\vartheta_{T2(GD)}^2} + X_{L2} = \frac{20}{1,9^2} + 5 = 10,54 \Omega$$

- sprowadzenie reaktancji $X_{T1(110)} + X_{L2}$ do napięcia 200kV przez przekładnię **T1** i połączenie szeregowe z reaktancją transformatora **T1**:

$$X_{T1-L2-T2} = (X_{T2(110)} + X_{L2}) \vartheta_{T1(GD)}^2 + X_{T1} = 10,54 \cdot 2,1^2 + 20 = 66,48 \Omega$$

- połączenie równoległe:

$$X_{AB} = \frac{X_{L1} \cdot X_{T1-L2-T2}}{X_{L1} + X_{T1-L2-T2}} = \frac{60 \cdot 66,48}{60 + 66,48} = 31,5 \Omega$$

- prąd zwarcia:

$$I_{k(220kV)}'' = \frac{1,1 U_{ns(220kV)}}{\sqrt{3}(X_G + X_{AB(220kV)})} = \frac{1,1 \cdot 220}{\sqrt{3} \cdot (10 + 31,5)} = 3,367 \text{ kA}$$

- moc zwarciowa:

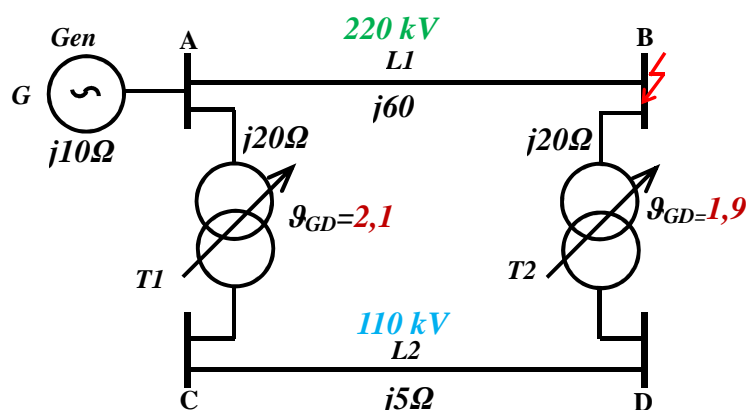
$$S_z = \sqrt{3} U_{ns(220kV)} I_{k(220kV)}'' = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 3,367 = 1283 \text{ MVA}$$

Podsumowanie:

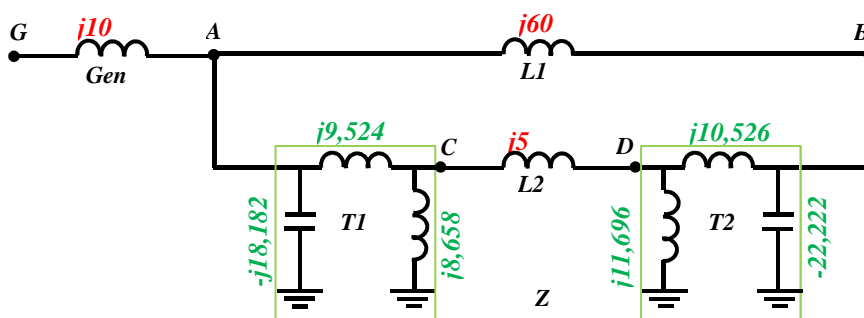
Wydaje się że wszystkie metody mają sens ale wyniki dla każdej są różne.

Metoda	Xz	Iz	Sz
-	Ω	kA	MVA
1	40	3,493	1331
2	40,35	3,450	1315
3	39,50	3,537	1348
4	38,54	3,625	1381
5	41,35	3,367	1283

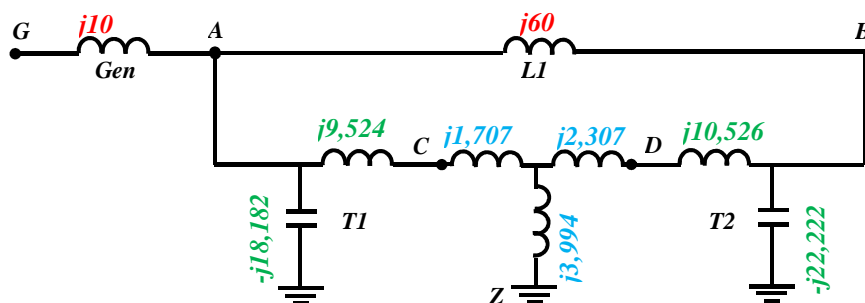
Obliczenia zwarciove – schemat rezonansowy



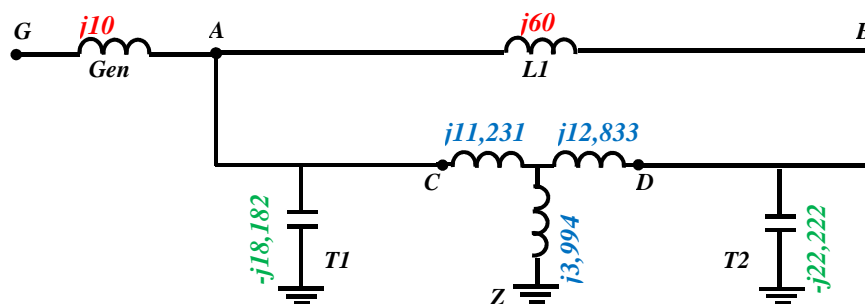
Rys. 1.18. Sieć z różnymi nastawami przekładni transformatorów



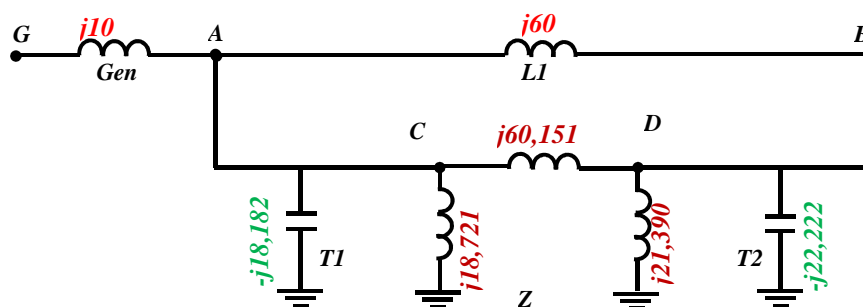
Rys. 1.19. Schemat zastępczy z modelami rezonansowymi transformatorów



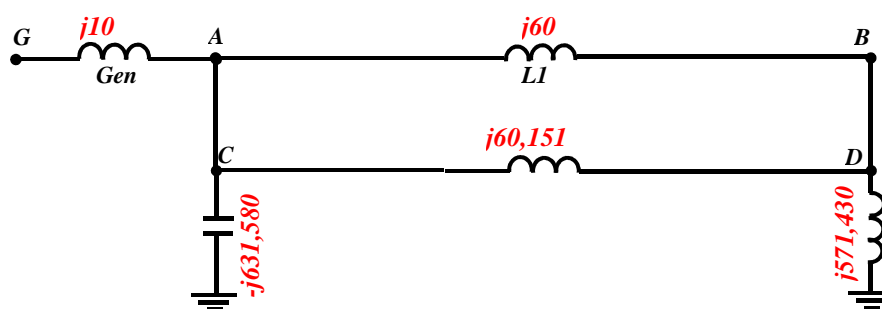
Rys. 1.20. Schemat zastępczy po zamianie trójkąta na gwiazdę



Rys. 1.21. Schemat zastępczy po połączeniu szeregowo gałęzi gwiazdy



Rys. 1.22. Schemat zastępczy po zamianie gwiazdy na trójkąt



Rys. 1.23. Schemat zastępczy po zwinięciu gałęzi równoległych

Wzory
Przekształcenie trójkąt gwiazda:

$$X_1 = \frac{X_{12} \cdot X_{13}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}$$

$$X_2 = \frac{X_{12} \cdot X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}$$

$$X_3 = \frac{X_{13} \cdot X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}$$

Przekształcenie gwiazda trójkąt

$$X_{12} = X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3}$$

$$X_{23} = X_2 + X_3 + \frac{X_2 \cdot X_3}{X_1}$$

$$X_{31} = X_3 + X_1 + \frac{X_3 \cdot X_1}{X_2}$$

1.3.5. Jednostki względne

Wielkościami elektrycznymi są: moc, napięcie, impedancja oraz prąd, przy czym dwa parametry elektryczne są niezależne a dwa pozostałe są funkcją tych pierwszych. Zatem przyjmując wielkości bazowe zwykle moc i napięcie to wartości bazowe impedancji i prądu wynikają z mocy i napięcia.

Przyjmując jednostkę odniesienia mocy $[S]=100 \text{ MVA}$ i jedną jednostkę napięcia $[U]=U_{n,sieci}$, przy czym dla sieci zawierających elementy o różnych poziomach napięciowych przyjmuje się jedną jednostkę napięcia dla dowolnie wybranego poziomu, natomiast dla pozostałych poziomów jednostki napięcia wynikają z przekładni transformatorów znajdujących się w tej sieci. Dla przyjętych wartości bazowych $[S]$ i $[U]$ jednostki bazowe impedancji $[Z]$ i $[I]$ prądu są:

$$[z]_{\Omega} = \frac{[U]_{kV}^2}{[S]_{MVA}} \qquad [I]_{kA} = \frac{[S]_{MVA}}{\sqrt{3}[U]_{kV}}$$

Wartości wielkości elektrycznych mocy, napięć, prądów i impedancji możemy wyrazić w jednostkach względnych (p.u.- per unit) w odniesieniu do wartości bazowych:

$$S_{p.u.} = \frac{S_{MVA}}{[S]} \qquad U_{p.u.} = \frac{U_{kV}}{[U]} \qquad I_{p.u.} = \frac{I_{kA}}{[I]} \qquad Z_{p.u.} = \frac{Z_{\Omega}}{[Z]}$$

Obliczanie impedancji elementów sieci przesyłowej polega na przeliczeniu wielkości w wyrażonych w jednostkach mianowanych (ohmach, Siemensach) na jednostki względne – podzieleniu przez jednostkę mocy. Dla sieci wielonapięciowej należy przyjąć jednostkę mocy i tyle jednostek napięcia ile jest poziomów napięć w sieci.

- impedancje dla linii przesyłowych oblicza się:

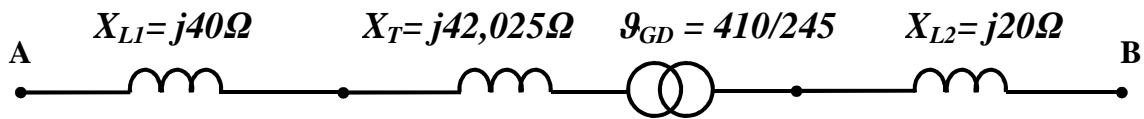
$$R_{L,p.u.} = \frac{R'_{L,\Omega} l [S]}{[U]^2} \qquad X_{L,p.u.} = \frac{X'_{L,\Omega} l [S]}{[U]^2} \qquad B_{p.u.} = \frac{B'_{L,\mu S} l \cdot \frac{1}{2} [U]^2}{[S]}$$

- dla transformatorów:

$$R_{T,p.u.} = \frac{\Delta P_{Cu} U_n^2 [S]}{1000 S_n^2 [U]^2} \qquad X_{T,p.u.} = \frac{\Delta U_z U_n^2 [S]}{100 S_n [U]^2} \qquad \vartheta_{T,p.u.} = \frac{\frac{U_{nG}}{[U_G]}}{\frac{U_{nD}}{[U_D]}}$$

Przykład obliczeń

Weźmy pod uwagę prosty układ przesyłowy jak na rys



Rys. 1.24. Prosty układ przesyłowy

Należy wykonać obliczenia reaktancji wypadkowej gałęzi **A - B** w jednostkach względnych (procentach). Przyjmując jednostkę mocy [S]=100 MVA i jednostkę napięcia [U]=400 kV to jednostka impedancji jest [Z]=400²/100=1600Ω. Można teraz wyrazić reaktancję X_{L1} oraz $X_{T,G}$ w jednostkach względnych:

$$X_{L1,\%} = \frac{X_{L1}}{[Z]} = \frac{40}{1600} \cdot 100 = 2,5\% \quad X_{T,\%} = \frac{X_T}{[Z]} = \frac{42,025}{1600} \cdot 100 = 2,627\%$$

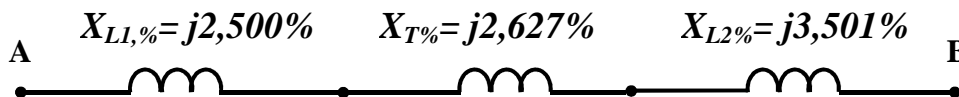
Aby wyrazić reaktancję X_{L2} w jednostkach względnych należy przeliczyć jednostkę napięcia na stronę dolną transformatora i jednostkę impedancji odnieść do tego napięcia:

$$[U]_{220} = \frac{[U]}{\vartheta_{GD}} = \frac{400}{\frac{410}{245}} = 239kV \quad [Z]_{220} = \frac{[U]_{220}^2}{[S]} = \frac{239^2}{100} = 571,3 \Omega$$

Można teraz wyrazić reaktancję X_{L2} w procentach:

$$X_{L2,\%} = \frac{X_{L2}}{[Z]_{220}} = \frac{20}{571,3} \cdot 100 = 3,501\%$$

Reaktancje te można nanieść na schemat zastępczy i obliczyć zastępczą reaktancję X_{AB} :



Rys. 1.25. Schemat zastępczy w jednostkach względnych

Wypadkowa reaktancja:

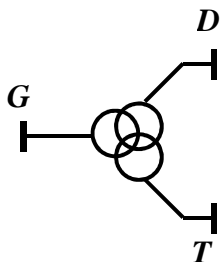
$$X_{AB,\%} = X_{L1,\%} + X_{T,\%} + X_{L2,\%} = j2,500 + j,627 + j3,501 = j8,628\%$$

Reaktancja wypadkowa gałęzi A-B przeliczona na jednostki mianowane w odniesieniu do 400 kV jest

$$X_{AB,400} = X_{AB,\%} X_{T,\%} + X_{L2,\%} = j2,500 + j,627 + j3,501 = j8,628\%$$

1.4 Transformatory trójzwojeniowe

Wszystkie dotychczasowe rozważania dotyczyły transformatorów dwuuzwojeniowych. W praktyce bardzo często instalowane są transformatory trójzwojeniowe a nawet czterouzwojeniowe. Wszystkie transformatory sieciowe sprzęgające sieci 400 kV i 220kV oraz 110kV są to przeważnie autotransformatory z trzecim uzwojeniem średniego napięcia. Transformator trójzwojeniowy posiada trzy uzwojenia: uzwojenie oznaczone na (Rys. 1.26) literą **G** (górne np. 400 kV) literą **D** (dolne np. 220 kV) oraz **T** (uzwojenie trzecie najczęściej średniego napięcia).



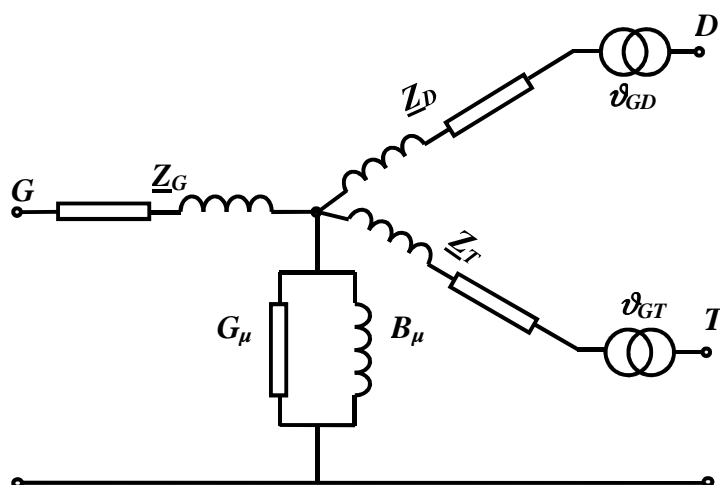
Rys. 1.26. Transformator trójzwojeniowy

Parametry elektryczne transformatora oblicza się na podstawie prób pomiarowych. Dla transformatora trójzwojeniowego wykonuje się próbę biegu jałowego oraz trzy a nawet czasami cztery pomiary w stanie zwarcia. Zatem danymi katalogowymi są:

- S_{nG} – moc znamionowa uzwojenia górnego [MVA],
- S_{nD} – moc znamionowa uzwojenia dolnego [MVA],
- S_{nS} – moc znamionowa uzwojenia średniego napięcia [MVA],
- U_{nG} – napięcie znamionowe uzwojenia górnego [kV],
- U_{nD} – napięcie znamionowe uzwojenia dolnego [kV],
- U_{nS} – napięcie znamionowe uzwojenia trzeciego [kV],
- U_{zGD} – napięcie zwarcia przy próbie zwarcia **G–D** [%],
- ΔP_{CuGD} – straty mocy w miedzi przy próbie zwarcia **G–D** (zasilane uzwojenie górnego napięcia, zwarte dolne a trzecie uzwojenie otwarte) transformatora [kW],
- U_{zGT} – napięcie zwarcia przy próbie zwarcia **G–T** [%],
- ΔP_{CuGT} – straty mocy w miedzi przy próbie zwarcia **G–T** (zasilane uzwojenie górnego napięcia, zwarte trzecie a otwarte uzwojenie dolnego napięcia) [kW],
- U_{zDT} – napięcie zwarcia przy próbie zwarcia **D–T** [%]
- ΔP_{CuDT} – straty mocy w miedzi przy próbie zwarcia **D–T** (zasilane dolnego napięcia, zwarte trzecie a otwarte uzwojenie górnego napięcia) [kW],
- I_0 – prąd biegu jałowego w procentach prądu znamionowego [%],
- ΔP_{Fe} – straty mocy czynnej w żelazie (w próbie biegu jałowego) [kW].

Schemat zastępczy transformatora trójzwojeniowego jest to schemat gwiazdowy jak na (Rys. 1.27). Parametry elektryczne transformatora mogą być odniesione zarówno do napięcia

górnego jak i dolnego czy średniego. W praktyce najczęściej wyznacza się impedancje transformatora odniesione do napięcia strony górnej.



Rys. 1.27. Zastępczy schemat gwiazdowy transformatora trójuzwojeniowego

Z próby biegu jałowego wyznacza się G_μ oraz B_μ tak jak dla transformatora dwuuzwojeniowego wzory (1.8).

Na podstawie danych pomiarowych z prób zwarciovych można obliczyć parametry impedancji schematu zastępczego. Z próby zwarcia wykonanej przy zasilaniu uzwojenia G (górnego napięcia) i zwartym uzwojeniu D (dolnym), a otwartym uzwojeniu trzecim (T) oblicza się:

$$Z_G + Z_D = Z_{GD} = \frac{U_{zGD} U_{nG}^2}{100 S_{nG}}, \Omega$$

podobnie:

$$Z_G + Z_T = Z_{GT} = \frac{U_{zGT} U_{nG}^2}{100 S_{nG}}, \Omega$$

$$Z_D + Z_T = Z_{DT} = \frac{U_{zDT} U_{nG}^2}{100 S_{nG}}, \Omega$$

Otrzymano układ trzech równań z trzema niewiadomymi: Z_G, Z_D, Z_T :

$$Z_G + Z_D = Z_{GD}$$

$$Z_G + Z_T = Z_{GT}$$

$$Z_D + Z_T = Z_{DT}$$

którego rozwiązaniem jest:

$$Z_G = 0,5 (Z_{GD} + Z_{GT} - Z_{DT})$$

$$Z_D = 0,5 (Z_{GD} + Z_{DT} - Z_{GT})$$

$$Z_T = 0,5 (Z_{GT} + Z_{DT} - Z_{GD})$$

(1.15)

Często się zdarza, że w takim schemacie zastępczym transformatora trójuzwojeniowego jedna impedancja wychodzi ujemna.

1.5 Schemat transformatora dla składowej przeciwnej

Schematy zastępcze transformatorów jak i wartości impedancji dla składowej przeciwnej są takie same jak dla składowej zgodnej. W obliczeniach stanów niesymetrycznych należy jednak pamiętać, że transformatory trójfazowe wprowadzają tak zwane przesunięcie godzinowe, a wynikające z układu połączeń transformatora, zwłaszcza transformatory o układzie połączeń gwiazda-trójkąt, (Yd5, Yd11). Mo to istotne znaczenie przy transformacji składowych symetrycznych (zgodnej i przeciwnej) z jednej strony transformatora na drugą. Składowa zgodna prądu i napięcia transformuje się zgodnie ze wzorem (1.16):

$$\underline{I}_{G1} = \frac{\underline{I}_{D1}}{\vartheta_{GD}} e^{-jN \cdot 30^\circ} \quad \underline{U}_{G1} = \underline{U}_{D1} \vartheta_{GD} e^{-jN \cdot 30^\circ} \quad (1.16)$$

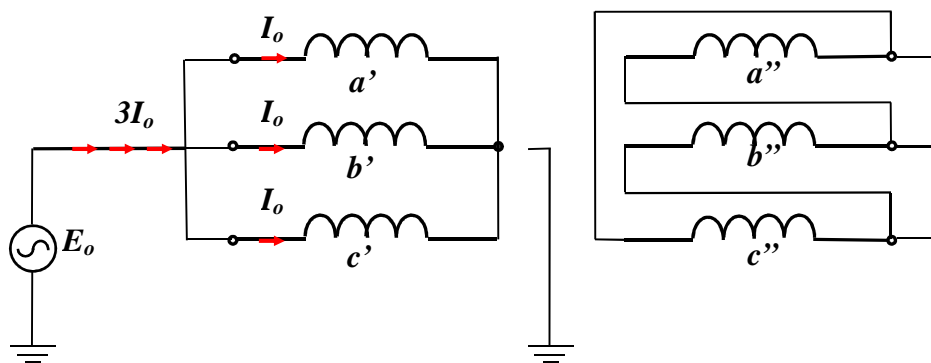
zaś składowe przeciwne według wzoru (1.17):

$$\underline{I}_{G2} = \frac{\underline{I}_{D2}}{\vartheta_{GD}} e^{+jN \cdot 30^\circ} \quad \underline{U}_{G2} = \underline{U}_{D1} \vartheta_{GD} e^{+jN \cdot 30^\circ} \quad (1.17)$$

gdzie N oznacza przesunięcie godzinowe na przykład N=5 lub 11.

1.6 Schematy zerowe transformatorów

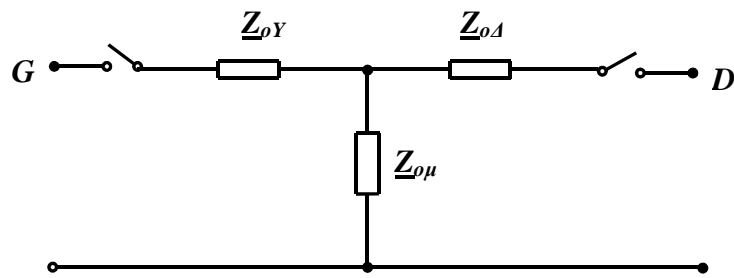
Schemat zerowy transformatora można wyznaczyć na drodze pomiarowej pamiętając, że jest to impedancja jaką przeciwstawia element prądowi zerowemu I_0 – trzem jednakowym co do modułu i kąta fazowego prądom w każdej fazie, (Rys. 1.28), będziemy więc postępowali w taki sposób, że wykonamy próby przepływu prądu zerowego przez każde uzwojenie transformatora i zbadamy na jaką napotyka impedancję. Zatem należy wykonać próbę zwarciovą polegającą na tym że zwieramy jedno z uzwojeń i zasilamy go napięciem zerowym E_0 (Rys. 1.28).



Rys. 1.28. Układ do pomiaru impedancji zerowej transformatora

Iloraz wartości napięcia E_0 do prądu I_0 jest impedancją zerową transformatora. Dla transformatora o układzie połączeń gwiazda nie uziemiona – trójkąt, po przyłożeniu napięcia zerowego od strony gwiazdy i zwartym uzwojeniu połączonym w trójkąt (Rys. 1.28) żaden prąd nie może popłynąć bo punkt zerowy gwiazdy jest nie uziemiony zatem $I_0=0$, tak więc $Z_0=\infty$, co w schemacie zastępczym transformatora (Rys. 1.29) oznacza przerwę w obwodzie.

Podobna będzie sytuacja gdy zasilane będzie napięciem zerowym uzwojenie połączone w trójkąt a zwarte będzie uzwojenie połączone w gwiazdę.



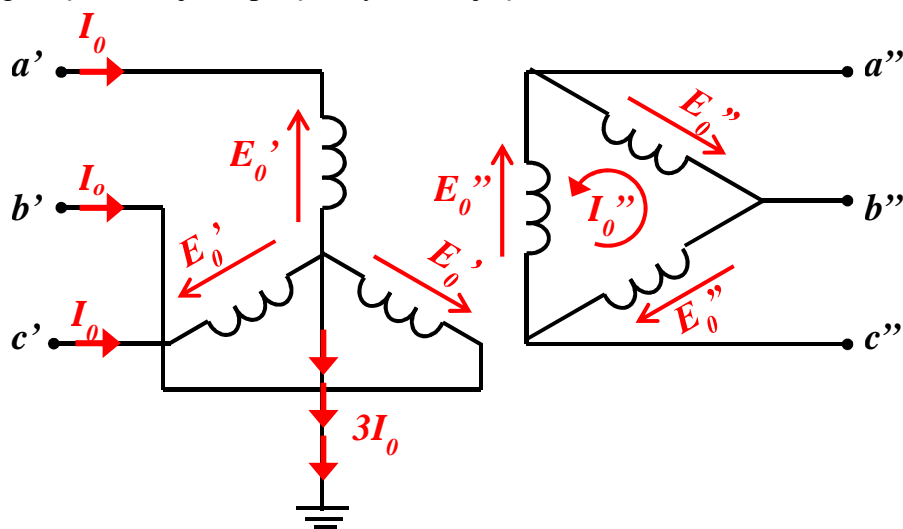
Rys. 1.29. Ogólny schemat zerowy transformatora dwuzwojowego

Wniosek I:

Jeśli uzwojenie połączone jest w gwiazdę lecz punkt gwiazdowy nie jest uziemiony, napotykamy na impedancję nieskończenie dużą, gdyż ten prąd nie ma drogi powrotnej, (Rys. 1.28). W schemacie zastępczym będzie przerwa w obwodzie. Gwiazda nie uziemiona jest równoważna połączeniu w trójkąt, tak więc podobnie patrząc od strony trójkąta w schemacie zastępczym będzie przerwana w obwodzie.

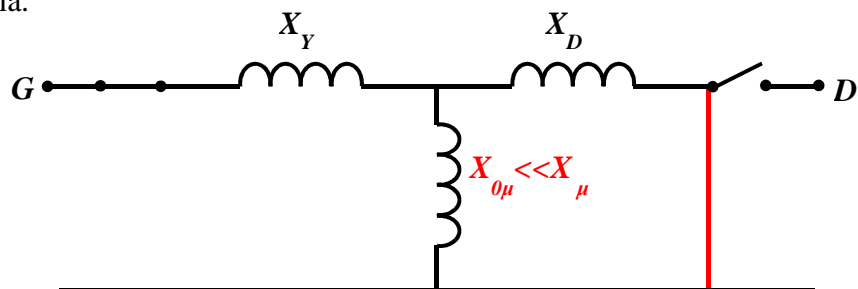
Wniosek II:

Prąd zerowy, który płynie w uziemionym uzwojeniu 1, połączonym w gwiazdę (Rys. 1.30), indukuje w uzwojeniu 2, połączony w trójkąt trzy siły elektromotoryczne E''_0 , dodające się do siebie arytmetycznie w zamkniętym obwodzie trójkąta i powoduje przepływ prądu I''_0 – prądu zamykającego się w uzwojeniu połączonym w trójkąt.



Rys. 1.30. Przepływ prądu zerowego w transformatorze YD

Spadek napięcia na impedancji rozproszenia całkowicie kompensuje indukowane SEM. Jest to typowa sytuacja zwarciowa, a więc w schemacie zerowym transformatora (Rys. 1.31) impedancję uzwojenia połączonego w trójkąt należy równolegle łączyć z impedancją magnesowania.

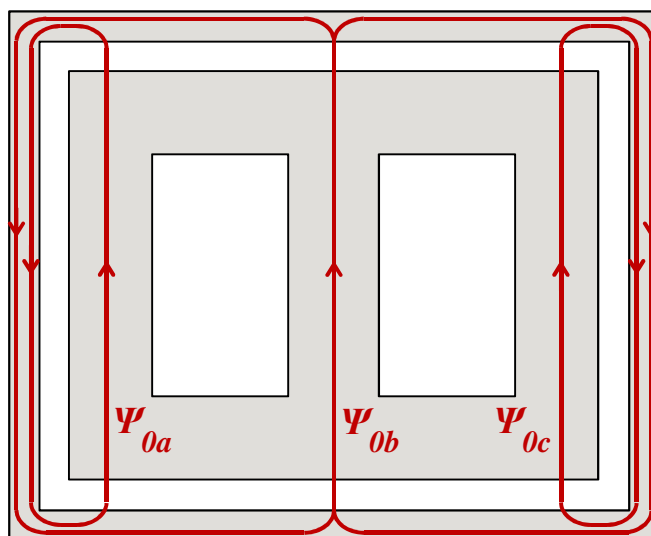


Rys. 1.31. Schemat dla składowej zerowej transformatora YD

Wartości impedancji rozproszenia są tu takie same, jak w schemacie zgodnym, (wyjątek stanowią tu transformatory o zygakowatym połączeniu uzwojeń).

Wniosek III :

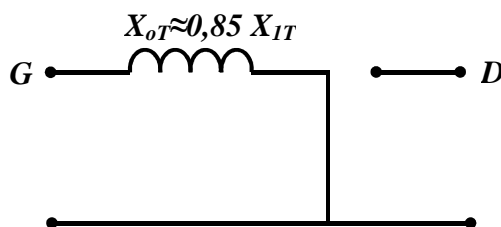
Impedancja magnesowania $Z_{0\mu}$ może się bardzo różnić od impedancji magnesowania dla składowej zgodnej. Występuje to jaskrawo w transformatorach o rdzeniach 3 - kolumnowych. Strumień zerowy w kolumnach nie może się zamykać przez rdzeń transformatora, a zamyka się przez olej i kadzi transformatora (Rys. 1.32).



Rys. 1.32. Rozkład pola magnetycznego od prądu zerowego

Te drogi strumienia mają duży opór magnetyczny, stąd mała reaktancja magnesowania. Jest ona tylko około 4 razy większa od reaktancji rozproszenia, a więc w transformatorze 110 kV jest ona rzędu 40-60%, podczas gdy reaktancja magnesowania dla składowej zgodnej jest rzędu 10000% (przy $I_0=1\%$). Rezystancja $R_{\mu 0}$ ma tu wartość 3-10 $R_{\mu l}$. Przyczyną wzrostu są straty mocy prądów wirowych w kadzi transformatora.

W praktyce przyjmuje się schemat zastępczy dla składowej zerowej dla transformatora dwuuzwojeniowego o układzie połączeń YzD jak na (Rys. 1.33).



Rys. 1.33. Reaktancja dla składowej zerowej transformatora YD

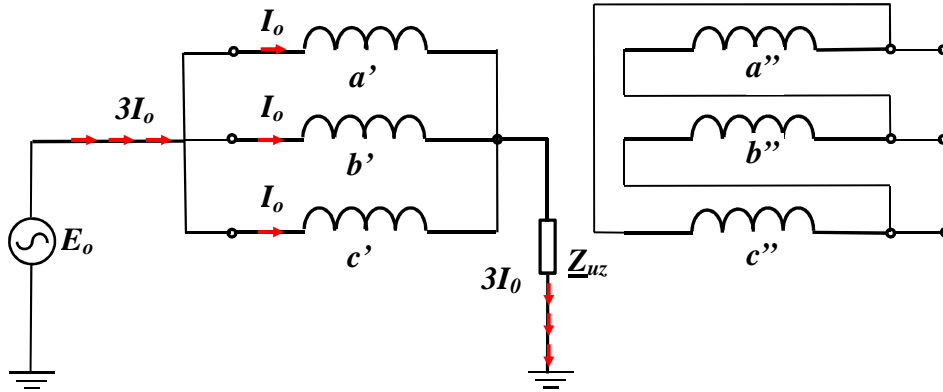
Dla transformatorów trójkolumnowych w praktyce przyjmuje się $X_{0T} \approx 0,85 X_{IT}$

W przypadku transformatorów z rdzeniami cztero i pięciokolumnowymi, a tym bardziej transformatora złożonego z trzech oddzielnych transformatorów jednofazowych, strumień pochodzący od składowej zerowej zamyka się podobnie jak dla składowej zgodnej w rdzeniu

transformatora. We wszystkich tych transformatorach istnieje zawsze zamknięta droga magnetyczna w stali dla strumieni zerowych i przyjmuje się $\underline{Z}_{\mu 0} = \underline{Z}_{\mu}$, i wtedy $\underline{Z}_{0T} = \underline{Z}_{IT}$.

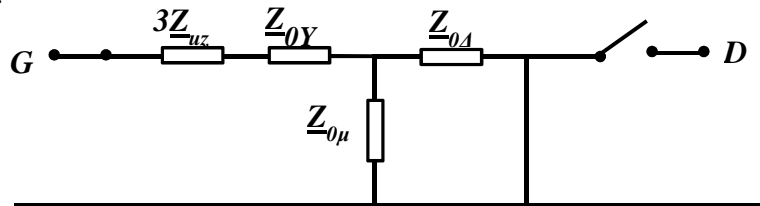
Wniosek IV:

Jeśli punkt gwiazdowy uzwojenia jest uziemiony przez impedancję \underline{Z}_{uz} , (Rys. 1.34) to ze wspomnianej definicji impedancji zerowej wynika, że przy tym samym prądzie I_0 , napięcie E_0 będzie tu większe o $3\underline{Z}_{uz} I_0$.



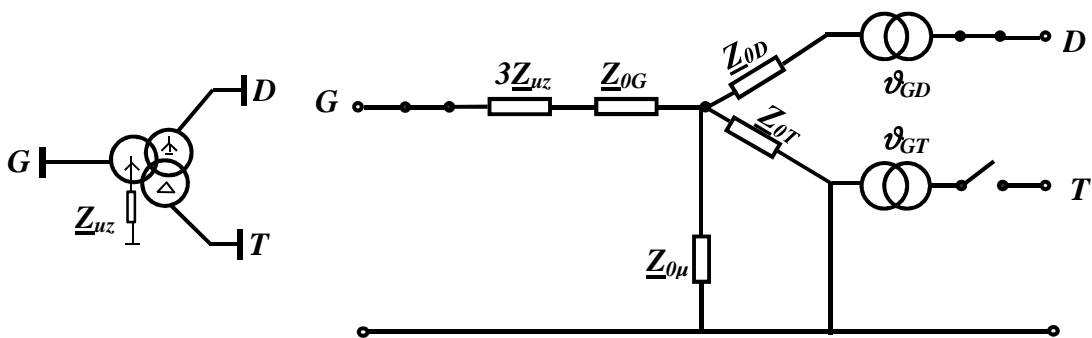
Rys. 1.34. Uziemienie punktu gwiazdowego transformatora

Odpowiada to schematowi zastępczemu z (Rys. 1.35), a więc impedancji \underline{Z}_{uz} stanowiącej uziemienie punktu zerowego transformatora nadaje się 3-krotnie większą wartość i w schemacie zastępczym transformatora łączy się ją szeregowo z zastępczą impedancją zerową gwiazdy transformatora.



Rys. 1.35. Schemat transformatora z uziemionym punktem zerowym przez impedancję

Jako przykład wyzyskania przytoczonych wniosków posłużyć może schemat zerowy transformatora trójuzwojeniowego z (Rys. 1.36), widać tu wyraźnie że impedancję $3\underline{Z}_{uz}$ należy łączyć szeregowo z impedancją rozproszenia uziemionego uzwojenia. Wartości impedancji poszczególnych uzwojeń \underline{Z}_{0D} , \underline{Z}_{0G} , \underline{Z}_{0T} oblicza się jak dla składowej zgodnej ze wzorów (1.15), natomiast impedancja $\underline{Z}_{0\mu}$ zależy od konstrukcji rdzenia.



Rys. 1.36. Transformator trójuzwojeniowy YzYDv i jego schemat zerowy

1.7 Przykładowe obliczenia parametrów elektrycznych transformatora trójzwojowego

Weźmy pod uwagę transformator trójzwojowy o mocy 25 MVA i napięciach 110/15/6 kV o następujących parametrach

$$\begin{array}{lll}
 S_{nG}=25 \text{ MVA}, & S_{nD}=16 \text{ MVA}, & S_{nS}= 16 \text{ MVA}, \\
 U_{nG}=110 \text{ kV}, & U_{nD}=16,5 \text{ kV}, & U_{nS}=6,6 \text{ kV}, \\
 \Delta P_{CuGD}=67,5 \text{ kW} & \Delta P_{CuGS}=73,2 \text{ kW} & \Delta P_{CuDS}=71,8 \text{ kW} \\
 U_{zGD}=10,68 \% & U_{zGS}=18,75 \% & U_{zDS}=6,06 \% \\
 \Delta P_{Fe}=26,2 \text{ kW} & I_o=0,45 \% & I_{o\mu}=4 I_o
 \end{array}$$

Uwaga:

Napięcia zwarcia są odniesiona do mocy znamionowej 25 MVA, natomiast straty w miedzi odniesione są do mocy przechodniej 16 MVA.

Zastępczy schemat elektryczny transformatora trójzwojowego dla składowe zgodnej jest jak na (Rys. 1.27), a parametry elektryczne oblicza się na podstawie wzorów (1.10):

- impedancje (moduły):

$$Z_{GD} = \frac{U_{zG} U_{nG}^2}{100 S_{nG}} = \frac{10,68 \cdot 115^2}{100 \cdot 25} = 56,497 \ \Omega$$

$$Z_{GT} = \frac{U_{zGT} U_{nG}^2}{100 S_{nG}} = \frac{18,57 \cdot 115^2}{100 \cdot 25} = 98,235 \ \Omega$$

$$Z_{DT} = \frac{U_{zDT} U_{nG}^2}{100 S_{nG}} = \frac{6,06 \cdot 115^2}{100 \cdot 25} = 32,057 \ \Omega$$

- rezystancje:

$$R_{GD} = \frac{\Delta P_{CuGD} U_{nG}^2}{1000 S_n^2} = \frac{67,5 \cdot 110^2}{1000 \cdot 16^2} = 3,487 \ \Omega$$

$$R_{GT} = \frac{\Delta P_{CuGT} U_{nG}^2}{1000 S_n^2} = \frac{73,2 \cdot 110^2}{1000 \cdot 16^2} = 3,782 \ \Omega$$

$$R_{DT} = \frac{\Delta P_{CuDT} U_{nG}^2}{1000 S_n^2} = \frac{71,8 \cdot 110^2}{1000 \cdot 16^2} = 3,709 \ \Omega$$

- reaktancje:

$$X_{GD} = \sqrt{Z_{GD}^2 - R_{GD}^2} = \sqrt{56,497^2 - 3,487^2} = 56,389 \ \Omega$$

$$X_{GT} = \sqrt{Z_{GT}^2 - R_{GT}^2} = \sqrt{98,235^2 - 3,782^2} = 98,162 \ \Omega$$

$$X_{DT} = \sqrt{Z_{DT}^2 - R_{DT}^2} = \sqrt{32,057^2 - 3,709^2} = 31,842 \ \Omega$$

- parametry impedancyjne schematu gwiazdowego:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_G &= \frac{1}{2} (\underline{Z}_{GD} + \underline{Z}_{GT} - \underline{Z}_{DT}) = \\ &= \frac{1}{2} [(3,487 + j56,389) + (3,782 + j98,162) - (3,709 + j31,842)] \\ &= (1,780 + j61,354) \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_D &= \frac{1}{2} (\underline{Z}_{GD} + \underline{Z}_{DT} - \underline{Z}_{GT}) = \\ &= \frac{1}{2} [(3,487 + j56,389) + (3,709 + j31,842) - (3,782 + j98,162)] \\ &= (1,707 - j4,965) \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_T &= \frac{1}{2} (\underline{Z}_{GT} + \underline{Z}_{DT} - \underline{Z}_{GD}) = \\ &= \frac{1}{2} [(3,782 + j98,162) + (3,709 + j31,842) - (3,487 + j56,389)] \\ &= (2,002 + j36,808) \Omega\end{aligned}$$

- gałąź magnesująca:

$$G_\mu = \frac{1000 \cdot \Delta P_{Fe}}{U_{nG}^2} = \frac{1000 \cdot 26,2}{115^2} = 1,981 \mu S$$

$$Y_\mu = \frac{I_0 S_n}{10^{-4} U_{nG}^2} = \frac{0,45 \cdot 25}{10^{-4} \cdot 115^2} = 8,507 \mu S$$

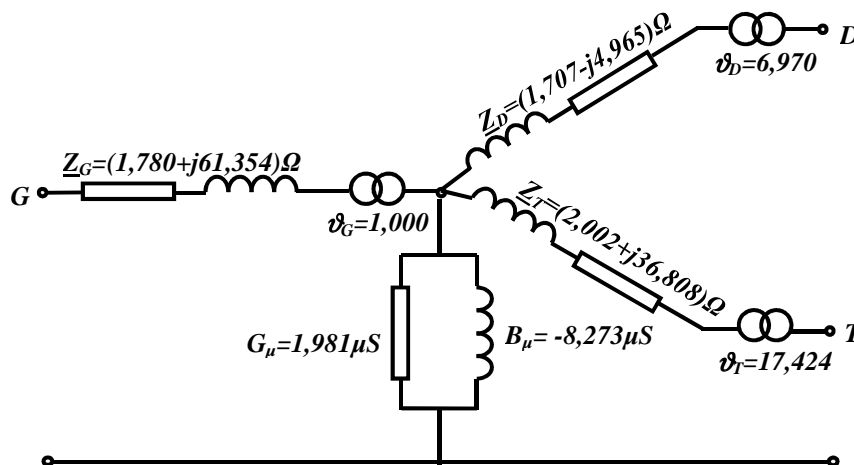
$$B_\mu = \sqrt{Y_\mu^2 - G_\mu^2} = \sqrt{8,507^2 - 1,981^2} = 8,273 \mu S$$

- przekładnie (napięcie górne U_{nG+} wynika z położenia przełącznika zaczeptów, zwykle jest on montowany po stronie górnego napięcia):

$$\vartheta_G = \frac{U_{nG+}}{U_{nG}} = \frac{115}{115} = 1,000 \text{ kV/kV}$$

$$\vartheta_D = \frac{U_{nG}}{U_{nD}} = \frac{115}{16,5} = 6,970 \text{ kV/kV}$$

$$\vartheta_T = \frac{U_{nG}}{U_{nT}} = \frac{115}{6,6} = 17,424 \text{ kV/kV}$$



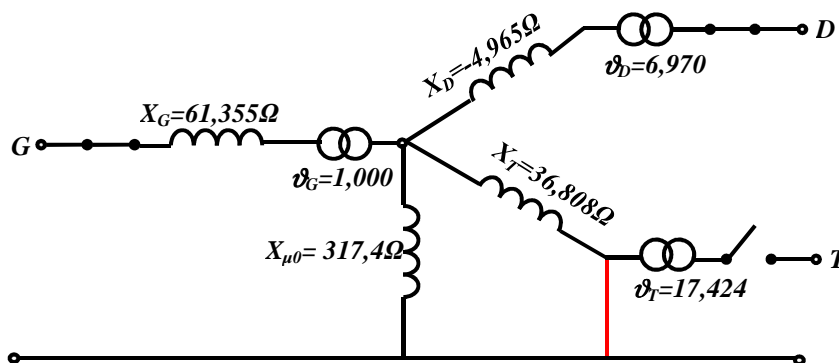
Rys. 1.37. Impedancje schematu zastępczego transformatora trójzwojeniowego

W schemacie zastępczym występują trzy gałęzie wzdłużne wszystkie o typie "transformator". W takim modelu łatwo jest modelować przełącznik zaczełów, który może być zamontowany w dowolnym uzwojeniu.

Schemat zastępczy dla składowej zerowej jest wykorzystywany głównie do obliczeń zwarciovych. W obliczeniach zwarciovych dla sieci przesyłowej pomijane są rezystancje, tak więc schemat zastępczy będzie się składał wyłącznie z reaktancji jak na (Rys.1.38). Wartości reaktancji gałęzi wzdłużnych są takie same jak dla składowej zgodnej. Natomiast reaktancje magnesowania zależy od konstrukcji rdzenia. Dla transformatorów trójkolumnowych oblicza się ją według następującego wzoru:

$$X_{\mu 0} = 0,6 \frac{U_{nG}^2}{S_n} = 0,6 \frac{115^2}{25} = 317,4 \Omega$$

Dla innych konstrukcji rdzenia przyjmuje się $X_{\mu 0}$ nieskończenie wielką.

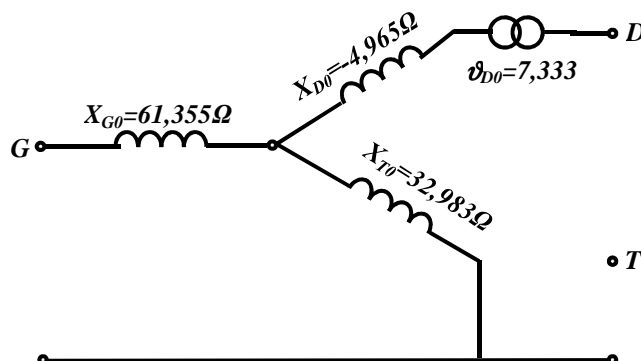


Rys. 1.38. Schemat zastępczy transformatora trójuzwojeniowego dla składowej zerowej

Łącząc równolegle reaktancję $X_{\mu 0}$ z reaktancją X_T :

$$X_{0T} = 1 / \left(\frac{1}{X_{\mu 0}} + \frac{1}{X_T} \right) = 1 / \left(\frac{1}{317,4} + \frac{1}{36,808} \right) = 32,983 \Omega$$

Ponadto przyjmuje się, że w obliczeniach zwarciovych przekładni transformatorów są równe stosunkom napięć znamionowych sieci, schemat dla składowej zerowej do obliczeń zwarciovych będzie jak na :



Rys. 1.39. Schemat dla składowej zerowej do obliczeń zwarciovych

1.8 Dane katalogowe wybranych transformatorów

Typ	TDR 3b 25	Elta-Blok	RTdXP	TFK	Electric	A00DCTN
S_n, MVA	25	240	160	250	330	1250
S_{nG}	25	240	160	250	330	417 ³⁾
S_{nD}	16	240	160	250	330	417
S_{nT}	16	-	50	50	100	80
U_{nG}, kV	115	250	245	400	410	750
$U_{nG, \min}$	96,6	-	-	-	-	-
$U_{nG, \max}$	133,4	-	-	-	-	-
U_{nD}	16,5	-	125	123	245	410
$U_{nD, \min}$	16,1	-	112	108.24	208.3	-
$U_{mD, \max}$	16,9	-	141	137.76	281.8	-
U_{nT}	6,6	15.75	10.5	31.5	31.5	15.75
$U_{nT, \min}$	-	15.75	9.45	31.5	31.5	-
$U_{nT, \max}$	-	15.75	11.85	31.5	31.5	-
P_o, kW	26,2	190(0,08%)	88(0,06%)	230(0,09%)	176(0,05%)	135(0,05%)
$I_o, \%$	0,45	0.5	0.25	0.4	0.3	0.07
$\Delta P_{CuGD}^{1)}, \text{kW}$	67,5	-	410(0,26%)	870(0,35%)	874(0,26%)	829(0,20%)
ΔP_{CuGT}	73,2	770(0,32%)	141	160	288	141
ΔP_{CuDT}	71,8	-	127	140	348	154
$U_{zGD}^{2)}, \%$	10,68	-	12.1	15	9.9	13.4
U_{zGT}	18,57	13.5	11.2	12.5	11.4	40.0
U_{zDT}	6,06	-	6.5	9	9.2	56.5
Ukł. poł.	Ynd11d11	Yd11	Yy0d11	Yy0d11	Yy0d11	
θ_{\min}	-	-	-	-	-9°	-
θ_{\max}	-	-	-	-	9°	-
R_{TGD}, Ω	3,49	0,84	0,96	2,23	1,35	0,30
X_{TGD}, Ω	56,39	35,2	45,4	96,0	50,4	60,3

- 1) – straty mocy podane są w kW, i zmierzone przy mocy przechodniej,
- 2) – napięcia zwarcia odniesione są do napięcia nominalnego U_{nG} i mocy znamionowej,
- 3) – dane dotyczą transformatora jednofazowego; transformator ten składa się z trzech jednostek jednofazowych

1.9 Schematy zerowe stosowane w obliczeniach zwarciovych

Schematy zerowe transformatorów dwuzwojeniowych

Układ połączeń	Schemat zerowy	Reaktancje zerowe w zależności od konstrukcji rdzenia	
		3 jedn.jednofaz. lub 4,5 kolumn.	3 kolumnowy
		$X_0 = X_I$	$X_0 = 0,85X_I$
		$X_0 = \infty$	$X_0 = (3 \div 5)X_I$
		$X_0 = X_I$	$X_0 = (3 \div 5)X_I$
		$X_0 = \infty$	
		$X_0 = \infty$	

X_I – reaktancja zgodna transformator obliczona według wzoru (1.6).

Schematy zerowe transformatorów trójzwojeniowych i autotransformatorów

Układ połączeń	Schemat zerowy	Reaktancje zerowe w zależności od konstrukcji rdzenia	
		3 jedn.jednofaz. lub 4,5 kolumn.	3 kolumnowy
		$X_{0I} = X_{1I}$ $X_{0II} = X_{1II}$ $X_{0III} = X_{1III}$ $X_{0\mu} = \infty$	
		$X_{0I} = X_{1I}$ $X_{0III} = X_{1III}$ $X_{0\mu} = \infty$	$X_{0\mu} = Z$
		$X_{0I} = X_{1I}$ $X_{0II} = X_{1II}$ $X_{0III} = X_{1III}$ $X_{0\mu} = \infty$	$X_{0\mu} = Z$
		$X_{0I} = X_{1I}$ $X_{0II} = X_{1II}$ $X_{0III} = X_{1III}$ $X_{0\mu} = \infty$	$X_{0\mu} = Z$

gdzie:

$X_{1I}, X_{1II}, X_{1III}$, –reaktancje dla składowej zgodnej transformatora trójzwojeniowego obliczone według wzorów (1.15).

$$Z = 0,6 \frac{U_{nG}^2}{S_n}$$