

4. IMPEDANCJE ELEMENTÓW SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ W UKŁADZIE SKŁADOWYCH SYMETRYCZNYCH

4.1. Maszyny synchroniczne

Rezystancję maszyn synchronicznych pomija się, gdyż jest ona bardzo mała w porównaniu z ich reaktancją. W maszynach synchronicznych o napięciu znamionowym większym od 1 kV stosunek R/X wynosi od 0.01 do 0.001.

Reaktancja maszyn synchronicznych dla składowej zgodnej wynosi:

- a) dla maszyn synchronicznych z biegunami utajonymi (turbogeneratory) lub maszyn synchronicznych z wystającymi biegunami (hydrogeneratory) ale wyposażone w uzwojenia tłumiące:

$$X_{(1)} = X_d'' \quad (4.1)$$

- b) dla maszyn synchronicznych z wystającymi biegunami (hydrogeneratory) bez uzwojeń tłumiących:

$$X_{(1)} = X_d' \quad (4.2)$$

Reaktancja maszyn synchronicznych dla składowej przeciwnej wynosi:

- a) dla maszyn synchronicznych z biegunami utajonymi (turbogeneratory) lub maszyn synchronicznych z wystającymi biegunami (hydrogeneratory) ale wyposażone w uzwojenia tłumiące:

$$X_{(2)} = \frac{X_d'' + X_q''}{2} \quad (4.3)$$

lub

$$X_{(2)} = \sqrt{X_d'' X_q''} \quad (4.4)$$

- b) dla maszyn synchronicznych z wystającymi biegunami (hydrogeneratory) bez uzwojeń tłumiących:

$$X_{(2)} = \frac{X_d' + X_q}{2} \quad (4.5)$$

Reaktancja maszyn synchronicznych dla składowej przeciwnej jest równa lub nieco większa od reaktancja dla składowej zgodnej. Różnica ta pogłębia się wraz z upływem czasu co było analizowane w rozdziale 2.5.2.

Reaktancja maszyn synchronicznych dla składowej zerowej wynosi nieskończoność albowiem maszyny te pracują z izolowanym punktem neutralnym. Gdyby jednak maszyna synchroniczna pracowała ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym to reaktancja dla składowej zerowej jest podana w karcie katalogowej a w przypadku gdy jej nie posiadamy możemy przyjąć, że wynosi ona ok. 40% reaktancji dla składowej zgodnej.

4.2. Maszyny asynchroniczne

Obliczenia prądów zwarciovych płynących od silników asynchronicznych w normie PN-74/E-05002 są oparte o wartości prądu znamionowego silnika. Znajomość impedancji silnika w stanie zwarcia nie jest wtedy potrzebna.

Obliczenia prądów zwarciovych płynących od silników asynchronicznych w normach IEC są oparte o wartość reaktancji i rezystancji silników dla składowej zgodnej. Impedancja silnika dla składowej zgodnej jest równa impedancji silnika w stanie samorozruchu i wynosi w jednostkach względnych:

$$Z_{(1)M} = \frac{1}{k_r} \frac{S_{\text{pod}}}{\frac{P_{NM}}{\cos \varphi_{NM} \eta_{NM}}} \quad (4.6)$$

lub w jednostkach mianowanych:

$$Z_{(1)M} = \frac{1}{k_r} \frac{U_{NM}^2}{\frac{P_{NM}}{\cos \varphi_{NM} \eta_{NM}}} = \frac{1}{k_r} \frac{U_{NM}}{\sqrt{3} I_{NM}} \quad (4.7)$$

gdzie:

- k_r -współczynnik samorozruchu silnika,
- P_{NM} -moc znamionowa na wale silnika,
- $\cos \varphi_{NM}$ -współczynnik mocy silnika,
- η_{NM} -sprawność silnika,
- U_{NM} -napięcie znamionowe silnika,
- I_{NM} -prąd znamionowy silnika.

Rezystancję i reaktancję silnika asynchronicznego wyznaczamy wtedy zależności od wielkości silnika:

- a) silniki wysokonapięciowe o mocy P_{NM} podzielonej przez liczbę par biegunów większej lub równej 1 MW:

$$X_{(1)M} = 0.995 Z_{(1)M} \quad (4.8)$$

$$R_{(1)M} = 0.1 X_{(1)M} \quad (4.9)$$

- b) silniki wysokonapięciowe o mocy P_{NM} podzielonej przez liczbę par biegunów mniejszej od 1 MW:

$$X_{(1)M} = 0.989 Z_{(1)M} \quad (4.10)$$

$$R_{(1)M} = 0.15 X_{(1)M} \quad (4.11)$$

c) silniki niskonapięciowe:

$$X_{(1)M} = 0.922 Z_{(1)M} \quad (4.12)$$

$$R_{(1)M} = 0.42 X_{(1)M} \quad (4.13)$$

Znajomość reaktancji maszyn asynchronicznych dla składowej przeciwnej i zerowej nie jest potrzebna albowiem metody praktyczne obliczeń zwarciovych nie wykorzystują tych wielkości. Można by tu przypomnieć że maszyny asynchroniczne pracują z izolowanym punktem neutralnym.

4.3. Dławiki przeciwzwarciove

Rezystancję dławików przeciwzwarciovych pomija się, gdyż jest ona bardzo mała w porównaniu z ich reaktancją. Z konstrukcji dławika przeciwzwarciovego wynika, że indukcyjność wzajemna dławika może być pominięta, czyli:

$$X_{(1)} = X_{(2)} = X_{(0)} \quad (4.14)$$

Dławik przeciwzwarciovowy jest charakteryzowany przez jego prąd i napięcie znamionowe oraz procentowy spadek napięcia na dławiku podczas przepływu przez niego prądu znamionowego $\Delta U_{\%}$. Z tych trzech wielkości możemy obliczyć reaktancję dławika:

$$X_{(1)D} = \frac{\Delta U_{\%}}{100} \frac{U_{ND}}{\sqrt{3} I_{ND}} \quad (4.15)$$

4.4. Impedancje wzdłużne napowietrznych linii elektroenergetycznych

W obliczeniach impedancji linii elektroenergetycznych dla składowych symetrycznych wykonywanych z wymiarów geometrycznych linii założono, że:

- linia jest w pełni symetryczna tzn. że linią jest z przepleceniami,
- przewody odgromowe są uziemione,
- uziomy słupów nie uczestniczą w odprowadzaniu prądów płynących w przewodach odgromowych.

4.4.1. Linia jednotorowa bez przewodu odgromowego

W pierwszym etapie rozpatrzono linię trójfazową bez przewodów odgromowych. Założono, że istnieje przewód powrotny dla prądów fazowych, który nazywa się także drogą powrotną. Drogą tą może być ziemia, przewód neutralny czy inny przewód. Przewód fazowy i ziemia tworzą tzw. pętlę ziemnopowrotną. Prądy fazowe wracając ziemią wybierają drogę o najmniejszej impedancji. Prądy te więc płyną w ziemi drogą wyznaczoną przez trasę linii, dla której jest najmniejsza odległość pomiędzy przewodem fazowym a drogą w ziemi co daje najmniejszą reaktancję. Impedancje własne i wzajemne pętli ziemnopowrotnej wyprowadza się stosując równania Maxwella. Impedancja własna i wzajemna kilometryczna przewodów fazowych wynosi:

$$\underline{Z}_{wk} = (R_{pk} + R_{zk}) + j0.145 \lg \frac{D_z}{r_o} \quad \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (4.16)$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$\underline{Z}_{mk} = R_{zk} + j0.145 \lg \frac{D_z}{b_m} \quad \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (4.17)$$

gdzie:

- R_{pk} - rezystancja kilometryczna przewodu fazowego obliczana z przekroju tego przewodu;
- R_{zk} - rezystancja kilometryczna ziemi (zwykle przyjmuje się, że $R_{zk} = 0.05 \frac{\Omega}{\text{km}}$);
- D_z - odległość między przewodem fazowym a umyślonym przewodem powrotnym znajdującym się w ziemi, zwykle przyjmuje się, że $D_z = 1000\text{m}$;
- r_o - zastępczy promień przewodu;
- b_m - średni odstęp przewodów od siebie.

Zastępczy promień przewodu dla pojedynczego przewodu typu AF1 wynosi 0,8 promienia rzeczywistego, a w przypadku przewodów wiązkowych, jeśli przewody w wiązce są ułożone na wierzchołkach wieloboku foremnego, wyraża się wzorem;

$$r_o = \sqrt[n]{0.8 r_{rz} D^{n-1}} \quad (4.18)$$

gdzie:

- r_{rz} - rzeczywisty promień przewodu;
- D - odległość przewodu w wiązce;
- n - liczba przewodów w wiązce.

Średni odstęp przewodów fazowych wynosi:

$$b_m = \sqrt[3]{b_{L1L2} b_{L2L3} b_{L3L1}} \quad (4.19)$$

gdzie:

- b_{L1L2} , b_{L2L3} , b_{L3L1} - rzeczywiste odstęp między przewodami fazowymi.

Impedancja kilometryczna linii dla składowej zgodnej, przeciwnej i zerowej wynosi:

$$\underline{Z}_{(1)k} = \underline{Z}_{(2)k} = \underline{Z}_{wk} - \underline{Z}_{mk} = R_{pk} + j0.145 \lg \frac{b_m}{r_o} \quad \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (4.20)$$

$$\underline{Z}_{(0)k} = \underline{Z}_{wk} + 2 \underline{Z}_{mk} = R_{pk} + 3 R_{zk} + j0.145 \lg \frac{(D_z)^3}{r_o (b_m)^2} \quad \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (4.21)$$

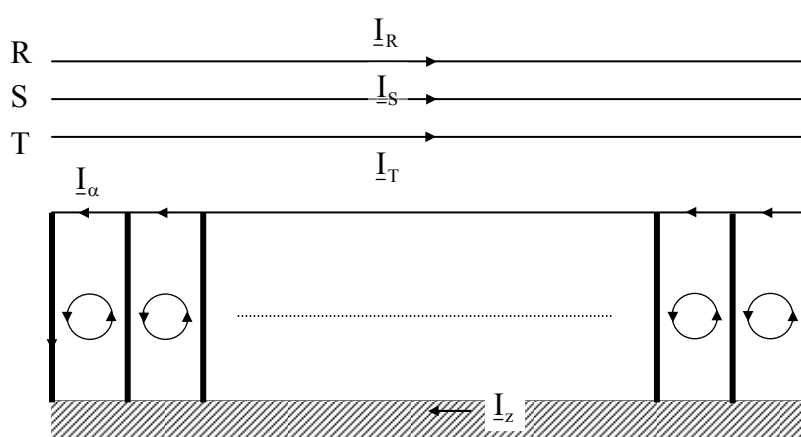
Z powyższych wzorów wynika, że impedancja dla składowej zerowej jest od 4 do 4.5 razy większa od impedancji dla składowej zgodnej.

4.4.2. Linia jednotorowa z jednym przewodem odgromowym

Linie o napięciu 110 kV i wyższym są wyposażone w jeden lub dwa przewody odgromowe na całej długości linii. Zadaniem tych przewodów jest ochrona przewodów fazowych od bezpośrednich wyładowań atmosferycznych. Przewody odgromowe są połączone z konstrukcją słupa na każdym słupie a poprzez naturalne uziemienie tego słupa przewód odgromowy jest

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

połączony z ziemią (rys. 4.1). Rezystancja tego uziemienia jest zazwyczaj dość znaczna i wynosi ok. 10÷15 Ω. Krańce przewodu odgromowego są przyłączone do uziemień stacyjnych o małej rezystancji. Suma geometryczna prądów fazowych, jeśli jest różna od zera, indukuje w przewodach odgromowych prądy. Niesymetryczne prądy fazowe indukują więc zawsze prądy w przewodach odgromowych. Rozważając jedno przeszło linii prądy te zamykają się poprzez uziemienia dwóch sąsiednich słupów. Następnie biorąc pod uwagę kolejne przeszło można zauważyć, że prądy płynące przez konstrukcję słupa od dwóch sąsiednich przeszół znoszą się - są w przeciwfazie. Można więc powiedzieć, że przez uziemienia słupów prądy nie płyną poza dwoma krańcowymi uziemieniami stacyjnymi. Powyższa uwaga potwierdza przyjęte założenie, że uziomy słupów nie uczestniczą w odprowadzaniu prądów płynących w przewodach odgromowych. Taka sytuacja ma dokładnie miejsce gdy zwarcie jest poza rozpatrywaną linią. Założenie to jest problematyczne gdy zwarcie występuje w rozpatrywanej linii. Ten przypadek jednak nie będzie rozpatrywany w niniejszym tekście.



Rys. 4.1 Schemat linii trójfazowej z jednym przewodem odgromowym α z zaznaczonym rozplywem prądów.

Impedancja własna kilometryczna $Z_{\alpha\alpha k}$ przewodu odgromowego α i wzajemna kilometryczna $Z_{m\alpha k}$ pętli przewód odgromowy - przewód fazowy przez analogię do wzorów (4.16) i (4.17) wynosi:

$$Z_{\alpha\alpha k} = (R_{\alpha k} + R_{z k}) + j0.145 \lg \frac{D_z}{r_{\alpha\alpha}} \quad \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (4.22)$$

$$Z_{m\alpha k} = R_{z k} + j0.145 \lg \frac{D_z}{b_{m\alpha}} \quad \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (4.23)$$

gdzie:

- $R_{\alpha k}$ - rezystancja kilometryczna przewodu odgromowego;
- $r_{\alpha\alpha}$ - zastępczy promień przewodu odgromowego;
- $b_{m\alpha}$ - średnia odległość między przewodem odgromowym a przewodami fazowymi.

Wielkość $b_{m\alpha}$ obliczamy z wzoru:

$$b_{m\alpha} = \sqrt[3]{b_{L1\alpha} b_{L2\alpha} b_{L3\alpha}} \quad (4.24)$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

Impedancja dla składowej zgodnej nie ulega zmianie, a dla składowej zerowej można napisać następujący układ równań – jedno równanie opisuje przewody fazowe drugie przewód odgromowy:

$$\underline{U}_{(0)} = \underline{Z}_w \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_m \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_m \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{m\alpha} \underline{I}_\alpha \quad (4.25)$$

$$\underline{U}_{(0)\alpha} = 0 = \underline{Z}_{m\alpha} 3\underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{\alpha\alpha} \underline{I}_\alpha \quad (4.26)$$

Z drugiego równania wyznaczono prąd \underline{I}_α :

$$\underline{I}_\alpha = -3\underline{I}_{(0)} \frac{\underline{Z}_{m\alpha}}{\underline{Z}_{\alpha\alpha}} \quad (4.27)$$

wstawiając go do pierwszego równania otrzymano zależność na impedancję kilometryczną składowej zerowej linii:

$$\underline{Z}_{(0)k} = \frac{\underline{U}_{(0)}}{\underline{I}_{(0)}} = \underline{Z}_{wk} + 2\underline{Z}_{mk} - \frac{3\underline{Z}_{m\alpha k}^2}{\underline{Z}_{\alpha\alpha k}} \quad (4.28)$$

Z powyższego wzoru wynika, że przewód odgromowy powoduje zmniejszanie się impedancji składowej zerowej linii. Wynika to z faktu, że prąd w przewodzie odgromowym płynie w kierunku przeciwnym niż prądy fazowe. Nazywane jest to rozmagnesowującym wpływem przewodu odgromowego.

Prąd w przewodzie odgromowym można obliczyć z wzoru (4.27), przy czym:

$$\underline{I}_\alpha = -3\underline{I}_{(0)} \frac{\underline{Z}_{m\alpha}}{\underline{Z}_{\alpha\alpha}} = -3\underline{I}_{(0)}(1 - k_r) \quad (4.29)$$

gdzie:

- k_r - współczynnik redukcyjny przewodów odgromowych, w skrócie współczynnik redukcyjny linii.

Pozostała część prądu $3\underline{I}_{(0)}$ płynącego daną linią wraca poprzez ziemię. Schemat zastępczy linii z przewodem odgromowym jest taki sam jak linii bez przewodu odgromowego, różne są jedynie impedancje kolejności zerowej.

4.4.3. Linia jednotorowa z dwoma przewodami odgromowymi

Składową zerową tej linii można opisać za pomocą układu trzech równań – jedno równanie opisuje przewody fazowe, pozostałe dwa przewody odgromowe α oraz β :

$$\underline{U}_{(0)} = \underline{Z}_w \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_m \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_m \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{m\alpha} \underline{I}_\alpha + \underline{Z}_{m\beta} \underline{I}_\beta \quad (4.30)$$

$$0 = \underline{Z}_{m\alpha} 3\underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{\alpha\alpha} \underline{I}_\alpha + \underline{Z}_{\alpha\beta} \underline{I}_\beta \quad (4.31)$$

$$0 = \underline{Z}_{m\beta} 3\underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{\beta\beta} \underline{I}_\beta + \underline{Z}_{\alpha\beta} \underline{I}_\alpha \quad (4.32)$$

gdzie:

- $\underline{Z}_{\alpha\beta}$ - impedancja wzajemna przewodów odgromowych α - przewód odgromowy β .

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

Zakładając dodatkowo, że $\underline{Z}_{m\alpha} = \underline{Z}_{m\beta}$ oraz $\underline{Z}_{\alpha\alpha} = \underline{Z}_{\beta\beta}$ czyli $\underline{I}_{\alpha} = \underline{I}_{\beta}$, impedancję linii jednorodnej z dwoma przewodami odgromowymi dla składowej zerowej wyznacza się z zależności (4.30)-(4.32) jako:

$$\underline{Z}_{(0)k} = \underline{Z}_{wk} + 2\underline{Z}_{mk} - \frac{6\underline{Z}_{m\alpha k}^2}{\underline{Z}_{\alpha\beta k} + \underline{Z}_{\alpha\alpha k}} \quad (4.33)$$

W tym przypadku średnią odległość między przewodami odgromowymi i fazowymi $b_{m\alpha}$ obliczamy z wzoru:

$$b_{m\alpha} = \sqrt[6]{b_{L1\alpha} b_{L2\alpha} b_{L3\alpha} b_{L1\beta} b_{L2\beta} b_{L3\beta}} \quad (4.34)$$

Impedancję $\underline{Z}_{\alpha\beta k}$ obliczamy z zależności:

$$\underline{Z}_{\alpha\beta k} = R_{zk} + j0.145 \lg \frac{D_z}{b_{\alpha\beta}} \quad \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (4.35)$$

gdzie:

- $b_{\alpha\beta}$ - odległość między przewodami odgromowymi.

Prąd w przewodzie odgromowym teraz wynosi:

$$\underline{I}_{\alpha} = \underline{I}_{\beta} = -3\underline{I}_{(0)} \frac{\underline{Z}_{m\alpha}}{\underline{Z}_{\alpha\alpha} + \underline{Z}_{\alpha\beta}} \quad (4.36)$$

4.4.4. Linia dwutorowa z dwoma przewodami odgromowymi

Impedancję dla składowej zgodnej każdego z torów obliczono z wzoru (4.20) podstawiając parametry danego toru. Impedancję dla składowej zerowej toru obliczono ze wzoru:

$$\underline{Z}_{(0)I} = \underline{Z}_{wI} + 2\underline{Z}_{mI} - 3 \frac{(\underline{Z}_{mI\alpha}^2 + \underline{Z}_{mII\alpha}^2) \underline{Z}_{\alpha\alpha} - 2\underline{Z}_{\alpha\beta} \underline{Z}_{mI\alpha} \underline{Z}_{mII\alpha}}{\underline{Z}_{\alpha\alpha} - \underline{Z}_{\alpha\beta}} \quad (4.37)$$

$$\underline{Z}_{(0)II} = \underline{Z}_{wII} + 2\underline{Z}_{mII} - 3 \frac{(\underline{Z}_{mI\alpha}^2 + \underline{Z}_{mII\alpha}^2) \underline{Z}_{\alpha\alpha} - 2\underline{Z}_{\alpha\beta} \underline{Z}_{mI\alpha} \underline{Z}_{mII\alpha}}{\underline{Z}_{\alpha\alpha} - \underline{Z}_{\alpha\beta}} \quad (4.38)$$

gdzie:

- $\underline{Z}_{mI\alpha}$, $\underline{Z}_{mII\alpha}$ - impedancja wzajemna przewodów odgromowy α - przewody fazowe toru I lub II, do obliczenia której wykorzystano wzór (4.23).

W przypadku linii dwutorowej występuje dodatkowa impedancja wzajemna: przewody fazowe toru I - przewody fazowe toru II modelująca sprzężenie elektromagnetyczne obu torów. Impedancję tą bez uwzględnienia wpływu przewodów odgromowych określamy z zależności:

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$\underline{Z}_{mI-IIk} = R_{zk} + j0.145 \lg \frac{D_z}{b_{mI-II}} \quad \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (4.39)$$

$$b_{mI-II} = \sqrt[3]{b_{L1I1L1II} b_{L1I1L2II} b_{L1I1L3II} b_{L2I1L1II} b_{L2I1L2II} b_{L2I1L3II} b_{L3I1L1II} b_{L3I1L2II} b_{L3I1L3II}} \quad (4.40)$$

gdzie:

- $b_{L1I1L1II}$ - odległość pomiędzy fazą L1 toru I a fazą L1 toru II.

Całkowita impedancja wzajemna tor I - tor II z uwzględnieniem przewodów odgromowych wynosi:

$$3\underline{Z}_m = 3\underline{Z}_{mI-II} - 3 \frac{2\underline{Z}_{\alpha\alpha} \underline{Z}_{mI\alpha} \underline{Z}_{mII\alpha} - (\underline{Z}_{mI\alpha}^2 + \underline{Z}_{mII\alpha}^2) \underline{Z}_{\alpha\beta}}{\underline{Z}_{\alpha\alpha}^2 - \underline{Z}_{\alpha\beta}^2} \quad (4.41)$$

Wzory (4.37), (4.38) i (4.41) można znacznie uprościć zakładając że:

$$\underline{Z}_{mI\alpha} = \underline{Z}_{mII\alpha} = \underline{Z}_{m\alpha} \quad (4.42)$$

przy czym $b_{m\alpha}$ obliczamy wtedy z wzoru:

$$b_{m\alpha} = \sqrt[3]{b_{L1I\alpha} b_{L2I\alpha} b_{L3I\alpha} b_{L1II\alpha} b_{L2II\alpha} b_{L3II\alpha}} \quad (4.43)$$

a wielkości $\underline{Z}_{(0)I}$, $\underline{Z}_{(0)II}$ i \underline{Z}_m z wzorów:

$$\underline{Z}_{(0)I} = \underline{Z}_{wI} + 2\underline{Z}_{mI} - 3 \frac{2\underline{Z}_{m\alpha}^2}{\underline{Z}_{\alpha\alpha} + \underline{Z}_{\alpha\beta}} \quad (4.44)$$

$$\underline{Z}_{(0)II} = \underline{Z}_{wII} + 2\underline{Z}_{mII} - 3 \frac{2\underline{Z}_{m\alpha}^2}{\underline{Z}_{\alpha\alpha} + \underline{Z}_{\alpha\beta}} \quad (4.45)$$

$$3\underline{Z}_m = 3\underline{Z}_{mI-II} - 3 \frac{2\underline{Z}_{m\alpha}^2}{\underline{Z}_{\alpha\alpha} + \underline{Z}_{\alpha\beta}} \quad (4.46)$$

Prądy w przewodach odgromowych można obliczyć z wzoru (4.36).

Linie dwutorowe mogą pracować w różnych układach połączeń torów pokazanych na rys. 4.2, a mianowicie:

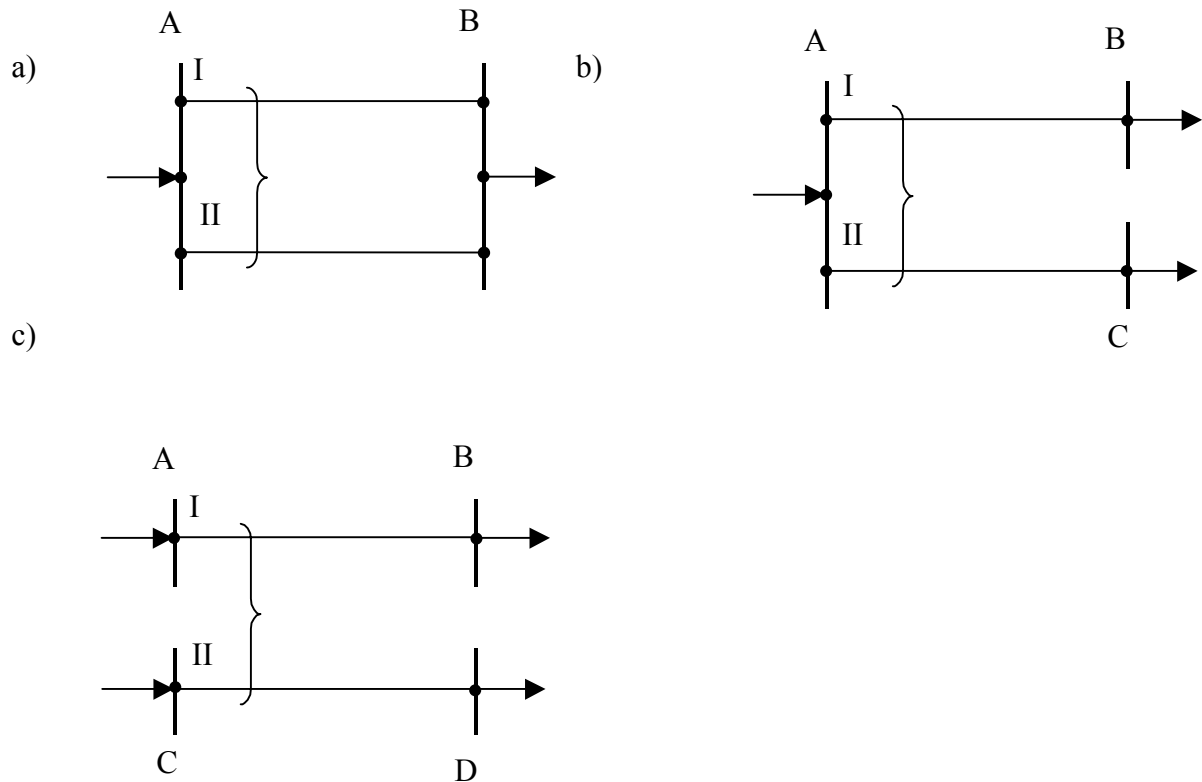
- oba tory są połączone na obu końcach,
- oba tory są połączone na jednym końcu,
- oba tory nie są połączone na obu końcach.

W rzeczywistości tory linii dwutorowych pracują raczej inaczej. Typowy przebieg trasy linii dwutorowej pokazano na rys.4.3. Linia pracuje tu pomiędzy dwoma stacjami A i D mając po drodze tzw. wcięcia do stacji odbiorczych B i C. W wyniku tego przy modelowaniu tej linii trzeba ją podzielić na 5 odcinków linii magnetycznie sprzężonych o różnych sposobach pracy początku i końca linii. W analizowanym przykładzie mamy:

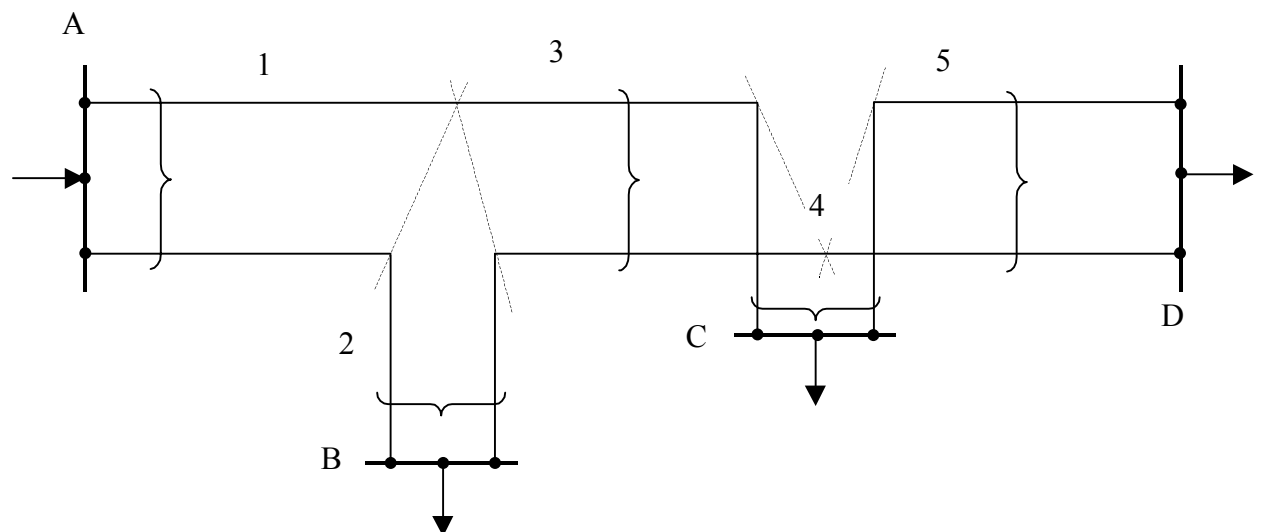
- odcinek 1 - oba tory są połączone na jednym końcu A,

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

- b) odcinek 2 - oba tory są połączone na jednym końcu B,
- c) odcinek 3 - oba tory nie są połączone na obu końcach,
- d) odcinek 4 - oba tory są połączone na jednym końcu C,
- e) odcinek 5 - oba tory są połączone na jednym końcu D.



Rys. 4.2 Układy pracy linii dwutorowych, przy czym znak } oznacza występowanie sprzężenia elektromagnetycznego pomiędzy torami linii.



Rys. 4.3 Układ pracy linii dwutorowej, gdzie liniami przerywanymi zaznaczono miejsca podziału linii na odrębne schematy zastępcze.

Schematy zastępcze rozważanych przypadków pracy torów linii dwutorowej zostały zestawione w tabl. 4.1. W tekście pominięto następujące przypadki pracy linii z torami magnetycznie sprzężonymi:

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

- jest więcej niż dwa tory linii np. linia czterotorowa,
- tory linii pracują na różnych napięciach znamionowych,
- tory linii pracują na napięciach pomiędzy którymi występuje przesunięcie fazowe,
- linia dwutorowa pracuje jako linia sześciofazowa (każdy tor jest zasilany z osobnego transformatora a transformatory te posiadają przesunięcia w tzw. przeciw fazie np. $Yy0$ i $Yy6$) przy czym w linii tej fazy są tak rozłożone, że obok siebie są fazy o przesunięciu 60° , jest to tzw. linia samokompensująca się.

Tabl.4.1. Schematy zastępcze i impedancje linii elektroenergetycznych.

L.p.	Nazwa elementu	Schemat zastępczy	Impedancje dla składowej zgodnej	Impedancje dla składowej zerowej
1	Linia dwutorowa pracująca z połączonymi torami na obu końcach		$\underline{Z}_{(1)a} = \underline{Z}_{(1)I}$ $\underline{Z}_{(1)b} = \underline{Z}_{(1)II}$	$\underline{Z}_{(0)a} = \frac{\underline{Z}_{(0)I} \underline{Z}_{(0)II} - (3 \underline{Z}_m)^2}{\underline{Z}_{(0)II} - 3 \underline{Z}_m}$ $\underline{Z}_{(0)b} = \frac{\underline{Z}_{(0)I} \underline{Z}_{(0)II} - (3 \underline{Z}_m)^2}{\underline{Z}_{(0)I} - 3 \underline{Z}_m}$
2	Linia dwutorowa pracująca z połączonymi torami na jednym końcu		$\underline{Z}_{(1)a} = \underline{Z}_{(1)I}$ $\underline{Z}_{(1)b} = \underline{Z}_{(1)II}$ $\underline{Z}_{(1)c} = k_1 \underline{Z}_{(1)I}$	$\underline{Z}_{(0)a} = \frac{\underline{Z}_{(0)I} \underline{Z}_{(0)II} - (3 \underline{Z}_m)^2}{\underline{Z}_{(0)II} - 3 \underline{Z}_m}$ $\underline{Z}_{(0)b} = \frac{\underline{Z}_{(0)I} \underline{Z}_{(0)II} - (3 \underline{Z}_m)^2}{\underline{Z}_{(0)I} - 3 \underline{Z}_m}$ $\underline{Z}_{(0)c} = \frac{\underline{Z}_{(0)I} \underline{Z}_{(0)II} - (3 \underline{Z}_m)^2}{3 \underline{Z}_m}$
3	Linia dwutorowa pracująca z nie połączonymi torami na obu końcach		$\underline{Z}_{(1)a} = \underline{Z}_{(1)I}$ $\underline{Z}_{(1)b} = \underline{Z}_{(1)II}$ $\underline{Z}_{(1)c} = k_1 \underline{Z}_{(1)I}$	$\underline{Z}_{(0)a} = \frac{\underline{Z}_{(0)I} \underline{Z}_{(0)II} - (3 \underline{Z}_m)^2}{\underline{Z}_{(0)II}}$ $\underline{Z}_{(0)b} = \frac{\underline{Z}_{(0)I} \underline{Z}_{(0)II} - (3 \underline{Z}_m)^2}{\underline{Z}_{(0)I}}$ $\underline{Z}_{(0)c} = \frac{\underline{Z}_{(0)I} \underline{Z}_{(0)II} - (3 \underline{Z}_m)^2}{3 \underline{Z}_m}$

Zazwyczaj przyjmuje się założenie, że schemat zastępczy dla składowej zgodnej i zerowej musi być taki sam. Założenie to można zrealizować poprzez wprowadzenie w schematach zastępczych elementów sieci dla składowej zgodnej i zerowej dodatkowych, sztucznych gałęzi o bardzo dużych lub małych impedancjach doprowadzających te schematy do jednakowej postaci. Dla typowych elementów sieci elektroenergetycznej, które posiadają różne schematy zastępcze, w tabl. 4.1 i tabl. 4.2 (transformatory) zestawiono wspólne schematy zastępcze tych elementów dla składowej zgodnej i zerowej.

Wyjaśnienia do tabel:

- \underline{Z}_u - impedancja uziemienia punktu gwiazdowego transformatora,
- \mathfrak{S} - przekładnia transformatora,

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

- impedancje transformatorów i autotransformatorów są sprowadzone na stronę górnego napięcia,
- w niektórych punktach pominięto gałęzie odwzorowujące impedancje magnesowania transformatora dla składowej zerowej,
- k1 - współczynnik umożliwiający modelowanie braku przepływu prądu danej składowej,
- k2 - współczynnik umożliwiający modelowanie zwarcia w schemacie danej składowej.

4.5. Pojemności linii napowietrznej

W modelu linii pominięto upływność. Założono, że pojemności linii są skupione po połowie w węzłach na jej krańcach. Dla pojemności w węźle k można napisać równanie różniczkowe:

$$\mathbf{i}_k = \mathbf{C}_L \frac{d}{dt} \mathbf{u}_k \quad (4.47)$$

gdzie:

- \mathbf{i}_k - wektor prądów płynących przez pojemności doziemne w poszczególnych fazach,
- \mathbf{u}_k - wektor napięć fazowych,
- \mathbf{C}_L - macierz pojemności linii o postaci:

$$\mathbf{C}_L = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} C_s + 2C_m & -C_m & -C_m \\ -C_m & C_s + 2C_m & -C_m \\ -C_m & -C_m & C_s + 2C_m \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

Występujące w tej macierzy pojemności doziemne C_s i międzyfazowe C_m wyznacza się korzystając ze współczynników Maxwella γ_s i γ_m

$$C_s = \frac{\gamma_s + \gamma_m}{(2\gamma_m + \gamma_s)(\gamma_s - \gamma_m)} \quad (4.49)$$

$$C_m = \frac{\gamma_m}{(2\gamma_m + \gamma_s)(\gamma_s - \gamma_m)} \quad (4.50)$$

przy czym współczynniki te wyznacza się w zależności od wymiarów geometrycznych i ułożenia przewodów linii:

$$\gamma_s = \frac{\lg\left(\frac{2h}{r}\right)}{0.02415} \quad \left[\frac{\text{km}}{\mu\text{F}} \right] \quad (4.51)$$

$$\gamma_m = \frac{\lg\left(\frac{H}{b_m}\right)}{0.02415} \quad \left[\frac{\text{km}}{\mu\text{F}} \right] \quad (4.52)$$

gdzie:

- r [m] - promień rzeczywisty przewodów;

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

- h [m] - średnia wysokość zawieszenia przewodu nad ziemią;
- H [m] - średnia odległość przewodu od lustrzanego odbicia w ziemi innych przewodów; w przybliżeniu równa $2h$.

W układzie składowych symetrycznych pojemności wyrażą się wzorami:

$$C_{(1)} = \frac{1}{\gamma_s - \gamma_m} \approx \frac{0.02415}{\lg \frac{b_m}{r}} \quad (4.53)$$

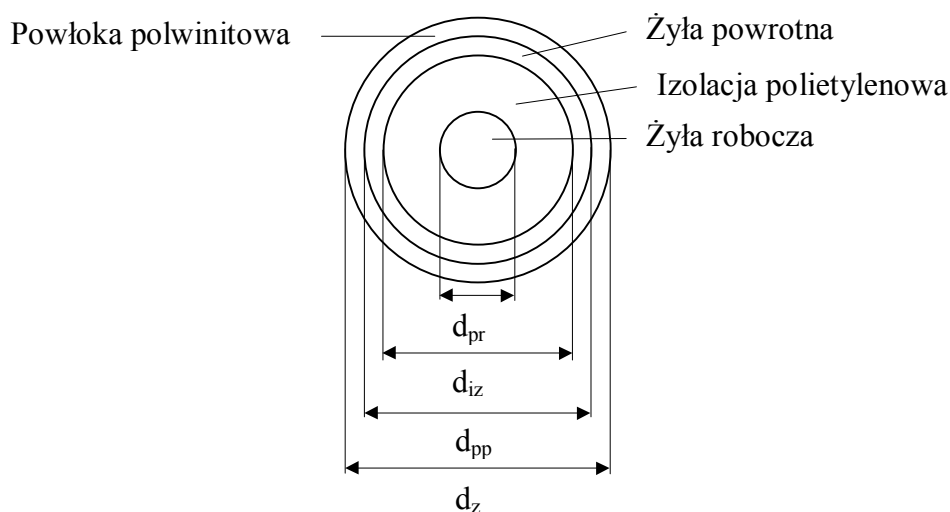
$$C_{(0)} = \frac{1}{\gamma_s + 2\gamma_m} \approx \frac{0.02415}{\lg \frac{8 \cdot h^3}{r \cdot b_m^2}} \quad (4.54)$$

W przypadku występowania linii odgromowych postępujemy podobnie jak przy obliczaniu impedancji wzdłużnych.

4.6. Impedancje wzdłużne linii kablowych

4.6.1. Linia kablowa zbudowana z kabli ekranowanych jednofazowych

Budowa typowego kabla elektroenergetycznego ekranowanego, jednofazowego została pokazana na rys. 4.4.



Rys.4.4 Przekrój poprzeczny kabla ekranowanego jednofazowego, gdzie:

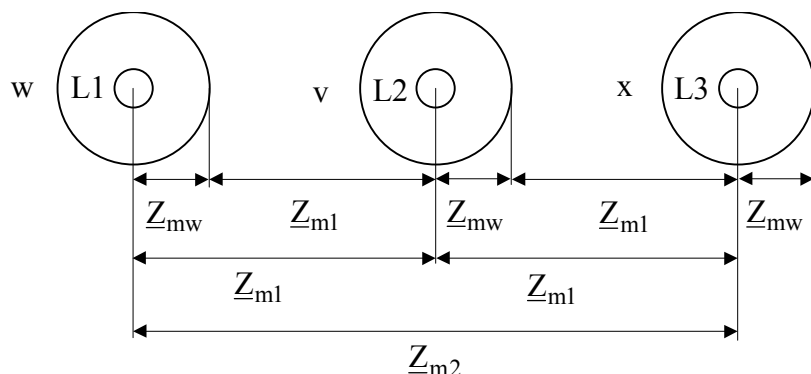
- d_{pr} - średnica żyły roboczej,
- d_{iz} - średnica izolacji (z zawartą w niej żyłą roboczą oraz cienkim ekranem na izolacji),
- d_{pp} - średnica przewodu powrotnego,
- d_z - średnica zewnętrzna kabla.

Reaktancje indukcyjne kabli są wyznaczane tak jak w liniach napowietrznych, przy czym przewód powrotny można traktować jak przewód odgromowy. Widok linii kablowej zbudowanej z trzech kabli ekranowanych, jednofazowych, w układzie płaskim jest na rys. 4.5. Na rysunku tym zaznaczając impedancje wzajemne założono, że:

$$\underline{Z}_{wL1} = \underline{Z}_{vL2} = \underline{Z}_{xL3} = \underline{Z}_{mw} \quad (4.55)$$

$$\underline{Z}_{wL2} = \underline{Z}_{vL1} = \underline{Z}_{vL3} = \underline{Z}_{xL2} = \underline{Z}_{wv} = \underline{Z}_{vx} = \underline{Z}_{L1L2} = \underline{Z}_{L2L3} = \underline{Z}_{m1} \quad (4.56)$$

$$\underline{Z}_{wL3} = \underline{Z}_{xL1} = \underline{Z}_{L1L3} = \underline{Z}_{m2} \quad (4.57)$$



Rys. 4.5 Linia kablowa zbudowana z trzech kabli ekranowanych, jednofazowych, w układzie płaskim, gdzie:

w, v, x – żyły powrotne kabli w poszczególnych fazach.

Przy założeniu, że rezystancja uziemienia przewodu powrotnego jest pomijalnie mała to dla jednej z faz i trzech przewodów powrotnych można napisać:

$$\Delta \underline{U}_{(0)} = \underline{Z}_s \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{m1} \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{m2} \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{mw} \underline{I}_w + \underline{Z}_{mw} \underline{I}_v + \underline{Z}_{mw} \underline{I}_x \quad (4.58)$$

$$\Delta \underline{U}_w = 0 = \underline{Z}_{sw} \underline{I}_w + \underline{Z}_{m1} \underline{I}_v + \underline{Z}_{m2} \underline{I}_x + \underline{Z}_{mw} \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{m1} \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{m2} \underline{I}_{(0)} \quad (4.59)$$

$$\Delta \underline{U}_v = 0 = \underline{Z}_{sv} \underline{I}_v + \underline{Z}_{m1} \underline{I}_w + \underline{Z}_{m1} \underline{I}_x + \underline{Z}_{mw} \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{m1} \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{m1} \underline{I}_{(0)} \quad (4.60)$$

$$\Delta \underline{U}_x = 0 = \underline{Z}_{sx} \underline{I}_x + \underline{Z}_{m1} \underline{I}_v + \underline{Z}_{m2} \underline{I}_w + \underline{Z}_{mw} \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{m1} \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{m2} \underline{I}_{(0)} \quad (4.61)$$

Zakładając, że prądy w przewodach powrotnych są jednakowe i je eliminując otrzymano wzór na impedancję dla składowej zerowej:

$$\underline{Z}_{(0)} = (\underline{Z}_s + \underline{Z}_{m1} + \underline{Z}_{m2}) - \frac{(\underline{Z}_{mw} + \underline{Z}_{m1} + \underline{Z}_{m2})^2}{(\underline{Z}_{sw} + \underline{Z}_{m1} + \underline{Z}_{m2})} \quad (3.62)$$

Przy obliczaniu impedancji wzajemnych można zastosować średnią odległość pomiędzy przewodami co powoduje uproszczenie wzoru na impedancję dla składowej zerowej, a mianowicie:

$$\underline{Z}_{(0)} = (\underline{Z}_s + 2\underline{Z}_m) - \frac{(\underline{Z}_{mw} + 2\underline{Z}_m)^2}{(\underline{Z}_{sw} + 2\underline{Z}_m)} \quad (4.63)$$

Gdy rezystancja uziemienia przewodu powrotnego jest bardzo duża to:

$$\underline{I}_w = -\underline{I}_{(0)} \quad (4.64)$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

Impedancja dla składowej zerowej wynosi:

$$\underline{Z}_{(0)} = (\underline{Z}_{sw} + 2\underline{Z}_m) - 3\underline{Z}_{mw} \quad (4.65)$$

Podobne wyprowadzenia są dla trójfazowego kabla ekranowanego.

4.6.2. Linia kablowa zbudowana z kabla z izolacją rdzeniową

W kablu z izolacją rdzeniową powłokę i pancierz kabla traktujemy jako przewód powrotny dla składowej zerowej. Przy założeniu, że rezystancja uziemienia powłoki jest pomijalnie mała to dla jednej z faz i przewodu powrotnego można napisać:

$$\Delta \underline{U}_{(0)} = \underline{Z}_s \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_m \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_m \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{mw} \underline{I}_w \quad (4.66)$$

$$\Delta \underline{U}_w = 0 = \underline{Z}_{sw} \underline{I}_w + \underline{Z}_{mw} \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{mw} \underline{I}_{(0)} + \underline{Z}_{mw} \underline{I}_{(0)} \quad (4.67)$$

Z powyższych równań wyprowadzono zależność na impedancję dla składowej zerowej

$$\underline{Z}_{(0)} = (\underline{Z}_{sw} + 2\underline{Z}_m) - 3 \frac{(\underline{Z}_{mw})^2}{\underline{Z}_{sw}} \quad (4.68)$$

Założenie, że rezystancja uziemienia powłoki kabla jest bardzo duża prowadzi nas do podobnych wniosków jak w poprzednim podrozdziale.

4.7. Pojemności kabli

4.7.1. Kabel trójfazowy z izolacją rdzeniową

Pojemności doziemne i międzyfazowe kabla oblicza się wykorzystując współczynniki Maxwella w analogiczny sposób, jak dla linii napowietrznej, przy czym są one postaci:

$$\gamma_s = \frac{\lg \frac{(r_1^2 - a^2)^2}{a^2 r^2}}{0.0483 \cdot \varepsilon'} \quad \left[\frac{\text{km}}{\mu\text{F}} \right] \quad (4.69)$$

$$\gamma_s = \frac{\lg \frac{(r_1^6 - a^6)}{3 a^4 (r_1^4 - a^4)}}{0.0483 \cdot \varepsilon'} \quad \left[\frac{\text{km}}{\mu\text{F}} \right] \quad (4.70)$$

gdzie:

$\varepsilon' = 3,5 \div 4,3$ - dla papieru nasyczonego olejem;

r_1 - promień izolacji rdzeniowej czyli promieniem wewnętrznym powłoki;

r - promień żyły;

a - odległość między środkiem żyły, a środkiem kabla.

4.7.2. Kabel ekranowany jednofazowy

Pojemności doziemne i międzyfazowe tego kabla oblicza się ze współczynników Maxwella, przy czym współczynniki te określają zależności:

$$\gamma_s = \frac{\lg\left(\frac{r_1}{r}\right)}{0.02415 \cdot \varepsilon'} \quad \left[\frac{\text{km}}{\mu\text{F}} \right] \quad (4.71)$$

$$\gamma_m = 0 \quad (4.72)$$

gdzie:

r_1 - promień wewnętrzny żyły powrotnej (ekranu).

4.8. Transformatory dwuuzwojeniowe

4.8.1. Wstęp

Dla składowej zgodnej impedancja transformatora wynosi:

$$Z_{(1)} = \frac{\Delta U_{Z\%}}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (4.73)$$

$$R_{(1)} = \frac{\Delta P_{\text{cu}\%}}{100} \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{\Delta P_{\text{cu}} U_n^2}{S_n^2} \quad (4.74)$$

$$X_{(1)} = \sqrt{Z_{(1)}^2 - R_{(1)}^2} \quad (4.75)$$

gdzie:

$\Delta U_{Z\%}$ - napięcie zwarcia transformatora w procentach,

$\Delta P_{\text{cu}\%}$ - straty mocy w uzwojeniach transformatora w procentach.

Transformator jest elementem statycznym, więc:

$$R_{(1)} = R_{(2)} \quad \text{oraz} \quad X_{(1)} = X_{(2)} \quad (4.76)$$

Z punktu widzenia obliczania impedancji transformator dla składowej zerowej należy rozróżniać:

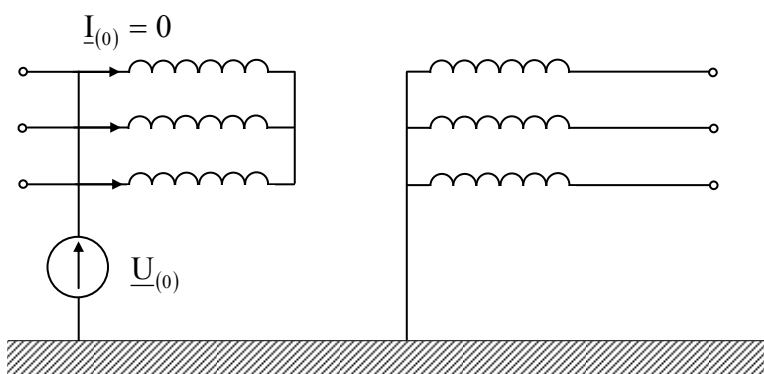
- transformator z izolowanym punktem neutralnym po stronie zwarcia,
- transformator z uziemionym punktem neutralnym po stronie zwarcia.

W przypadku transformatora z izolowanym punktem neutralnym po stronie zwarcia nie wchodzi one do obwodu zwarciovego dla składowej zerowej, gdyż obwód dla składowej zerowej prądu jest otwarty – rys. 4.6. Oznacza to, że impedancje takich transformator dla składowej zerowej są nieskończenie duże:

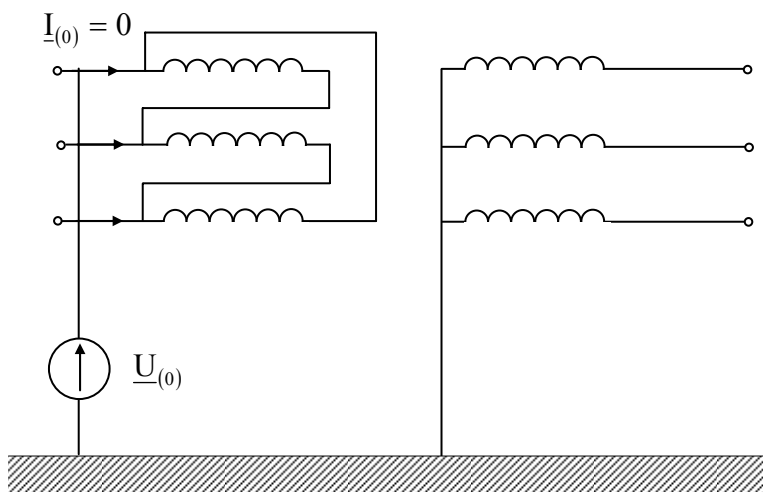
$$\underline{Z}_{(0)} = \infty \quad (4.77)$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

Transformator z uziemionym punktem neutralnym po stronie zwarcia wchodzi do obwodu zwarciovego w schemacie dla składowej symetrycznej zerowej. Wartość reaktancji dla składowej zerowej zależy od układu połączeń uzwojeń i konstrukcji transformatora. Poniżej rozpatrzono podstawowe typy tych połączeń.



Rys. 4.6 Przepływ prądu składowej zerowej przez transformator YyN.



Rys. 4.7 Przepływ prądu składowej zerowej przez transformator Dyn.

4.8.2. Transformator YNd

W celu wyprowadzenia schematu zastępczego dla składowej zerowej zwarto zaciski tego transformatora po stronie YN - rys.4.8 i zasilono je napięciem składowej zerowej. Równania tego transformatora są następujące:

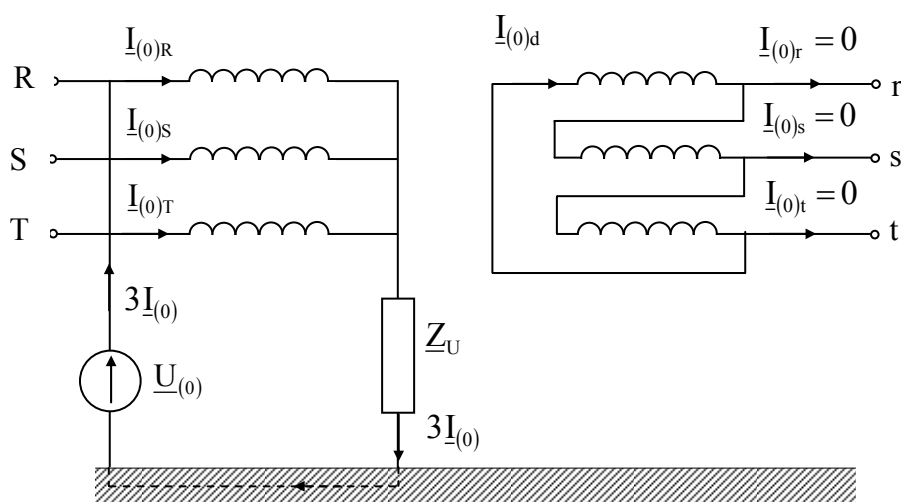
$$\underline{U}_{(0)Y} = \underline{I}_{(0)Y} \underline{Z}_{(1)Y} + \underline{I}_{(0)\mu} \underline{Z}_{(0)\mu} + 3\underline{I}_{(0)Y} \underline{Z}_u \quad (4.78)$$

$$\underline{E}_{(0)\mu} = \underline{I}_{(0)\mu} \underline{Z}_{(0)\mu} = \underline{I}'_{(0)d} \underline{Z}'_{(1)d} \quad (4.89)$$

$$\underline{I}_{(0)Y} = \underline{I}_{(0)\mu} + \underline{I}'_{(0)d} \quad (4.80)$$

gdzie:

$\underline{I}'_{(0)d}$ - prąd płynący w uzwojeniu połączonym w trójkąt sprowadzony na stronę pierwotną.

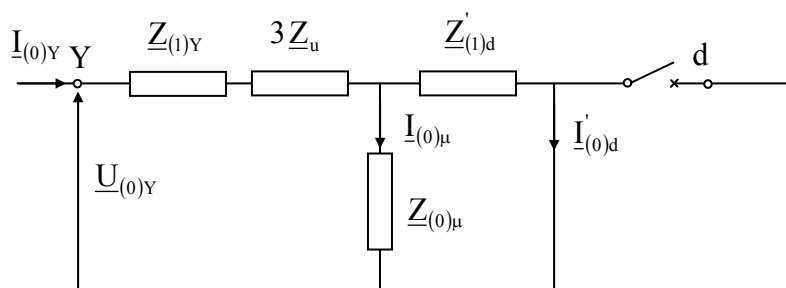


Rys. 4.8 Przepływ prądu składowej zerowej przez transformator YNd.

Po prostych przekształceniach otrzymano wzór na impedancję transformatora YNd widzianą od strony gwiazdy:

$$\underline{Z}_{(0)Y} = \frac{\underline{U}_{(0)Y}}{\underline{I}_{(0)Y}} = \underline{Z}_{(1)Y} + 3\underline{Z}_u + \frac{\underline{Z}_{(0)\mu} \underline{Z}'_{(1)d}}{\underline{Z}_{(0)\mu} + \underline{Z}'_{(1)d}} \quad (4.81)$$

W oparciu o powyższe wzory można narysować schemat zastępczy:



Rys. 4.9 Schemat zastępczy dla składowej zerowej transformatora YNd.

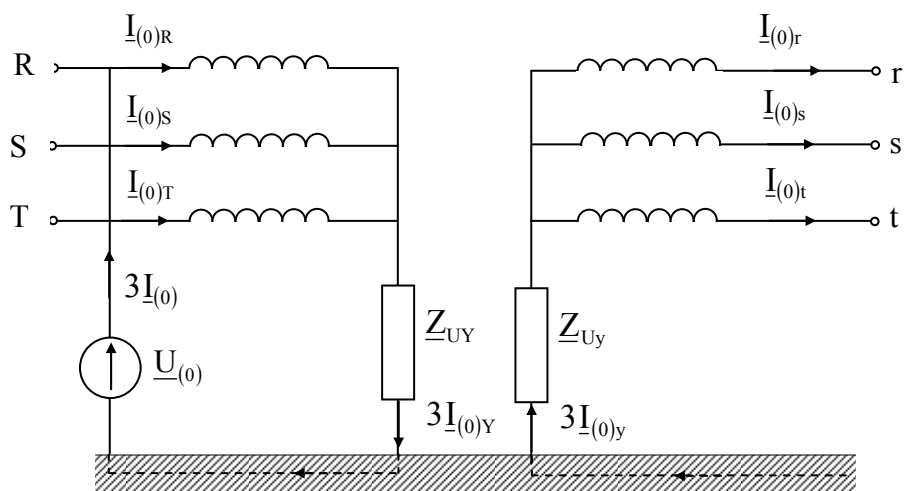
4.8.3. Transformator YNyn

Równania tego transformatora są następujące:

$$\underline{U}_{(0)Y} = \underline{I}_{(0)Y} \underline{Z}_{(1)Y} + \underline{I}_{(0)\mu} \underline{Z}_{(0)\mu} + 3\underline{I}_{(0)Y} \underline{Z}_{uY} \quad (4.82)$$

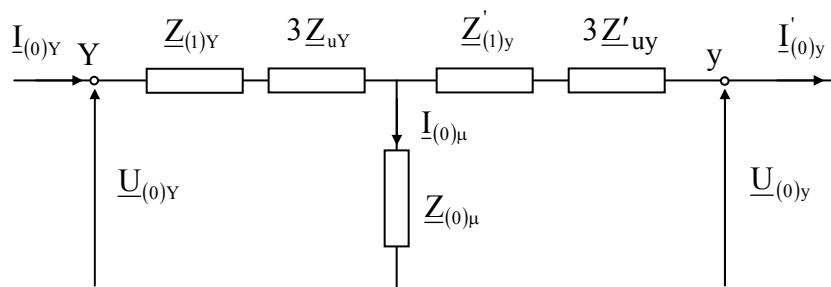
$$\underline{E}_{(0)\mu} = \underline{I}_{(0)\mu} \underline{Z}_{(0)\mu} = \underline{U}_{(0)y} + 3\underline{I}'_{(0)y} \underline{Z}_{uy} + \underline{I}'_{(0)y} \underline{Z}'_{(1)y} \quad (4.83)$$

$$\underline{I}_{(0)Y} = \underline{I}_{(0)\mu} + \underline{I}'_{(0)y} \quad (4.84)$$



Rys. 4.10 Przepływ prądu składowej zerowej przez transformator YNyn.

Równaniu temu odpowiada następujący schemat zastępczy:



Rys. 4.11 Schemat zastępczy dla składowej zerowej transformatora YNyn.

Warto zauważyć, że przepływ prądu składowej zerowej wywołany zwarcie z udziałem ziemi przez tego typu transformator jest możliwy jedynie gdy po obu stronach transformatora występują urządzenia będące źródłami (odbiornikami) składowej zerowej. Takim urządzeniem jest np. transformator YNd.

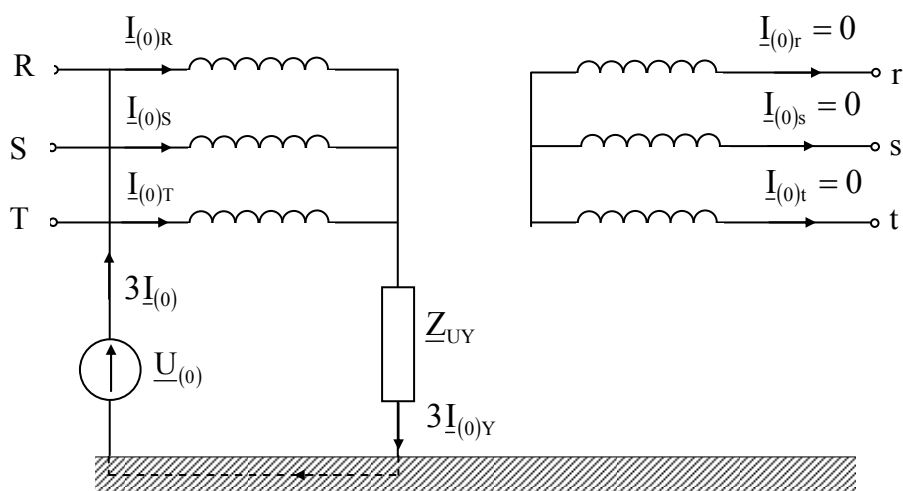
Przy założeniu, że $I_{(0)\mu} = 0$ czyli $Z_{(0)\mu} = \infty$ mamy:

$$\underline{Z}_{(0)Y} = \underline{Z}_{(0)y} = \frac{\underline{U}_{(0)Y} - \underline{U}'_{(0)y}}{\underline{I}_{(0)Y}} = \underline{Z}_{(1)Y} + \underline{Z}_{(1)y} + 3\underline{Z}_{uY} + 3\underline{Z}'_{uy} \quad (4.85)$$

$$\underline{Z}_{(1)Y} + \underline{Z}'_{(1)y} = \underline{Z}_{(1)T} \quad (4.86)$$

Gdy nie można założyć, że $Z_{(0)\mu} = \infty$ wtedy nie można bezpośrednio wyznaczyć $\underline{Z}_{(0)}$ transformatora i trzeba stosować schemat zastępczy.

4.8.4. Transformator YNy



Rys. 4.12 Przepływ prądu składowej zerowej przez transformator YNy.

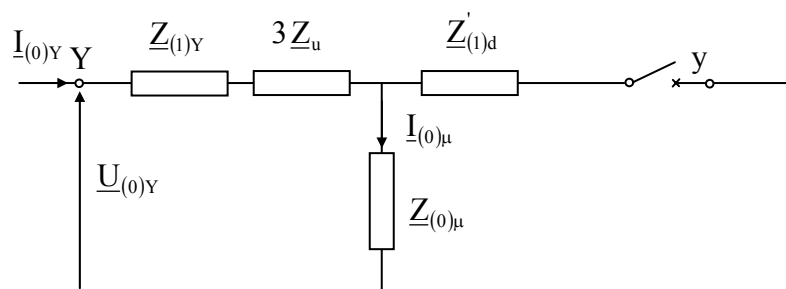
Równania tego transformatora są następujące:

$$\underline{U}_{(0)Y} = \underline{I}_{(0)Y} \underline{Z}_{(1)Y} + \underline{I}_{(0)\mu} \underline{Z}_{(0)\mu} + 3\underline{I}_{(0)Y} \underline{Z}_{uY} \quad (4.87)$$

$$\underline{E}_{(0)\mu} = \underline{I}_{(0)\mu} \underline{Z}_{(0)\mu} = \underline{U}'_{(0)d} \quad (4.88)$$

$$\underline{I}_{(0)Y} = \underline{I}_{(0)\mu} \quad (4.89)$$

Równaniu temu odpowiada następujący schemat zastępczy:



Rys. 4.13 Schemat zastępczy dla składowej zerowej transformatora YNy.

Impedancja dla składowej zerowej wynosi:

$$\underline{Z}_{(0)Y} = \frac{\underline{U}_{(0)Y} - \underline{U}'_{(0)y}}{\underline{I}_{(0)Y}} = \underline{Z}_{(1)Y} + \underline{Z}'_{(1)y} + \underline{Z}_{(0)\mu} \quad (4.90)$$

Impedancja ta zawiera składnik równy impedancji magnesującej dla składowej zerowej transformatora. Powoduje to, że impedancja ta jest duża.

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

Chcąc obliczyć poszczególne układy trzeba znać $\underline{Z}_{(1)Y}$, $\underline{Z}_{(1)y}$ lub $\underline{Z}_{(1)d}$. Praktycznie zakłada się, że:

$$\underline{Z}_{(1)Y} = \underline{Z}_{(1)y} = \underline{Z}_{(1)d} = \frac{1}{2} \underline{Z}_{(1)T} \quad (4.91)$$

4.8.5. Impedancja magnesująca transformatora dla składowej zerowej

W obliczeniach zwarciovych zamiast impedancji magnesującej transformatora dla składowej zerowej bierze się pod uwagę jedynie wartość reaktancji magnesującej transformatora dla składowej zerowej $X_{(0)\mu}$. Wielkość ta wynika z konstrukcji rdzenia transformatora. Wartość $X_{(0)\mu}$ zależy od admitancji magnetycznej strumienia $\Phi_{(0)}$ wywołanej składowymi zerowymi prądów. W transformator 5, 4 – kolumnowych oraz w zespołach 3 jednostek jednofazowych strumienie te przebiegają w stali rdzenia. Prąd magnesujący jest mały, a reaktancja $X_{(0)\mu}$ - odwrotnie proporcjonalna do $I_{(0)\mu}$ bardzo duża. W praktycznych obliczeniach przyjmuje się, że $X_{(0)\mu} = \infty$.

W transformator 3 – kolumnowych strumień $\Phi_{(0)}$ pochodzący od składowych zerowych prądu, mogą się zamknąć jedynie w powietrzu i stali kadzi. Wobec tego potrzebny jest duży prąd magnesujący – a $X_{(0)\mu}$ ma wartość skończoną.

W praktycznych obliczeniach przyjmuje się:

1. transformator YNd – rdzeń 4 lub 5-cio kolumnowy lub 3 jednostki jednofazowe:

$$X_{(0)\mu} = \infty \quad (4.92)$$

$$\underline{Z}_{(0)Y} = \underline{Z}_{(1)Y} + 3 \underline{Z}_{uY} + \frac{\underline{Z}_{(0)\mu} \underline{Z}'_{(1)d}}{\underline{Z}_{(0)\mu} + \underline{Z}'_{(1)d}} \approx 3 \underline{Z}_{uY} + \underline{Z}_{(1)T} \quad (4.93)$$

2. transformator YNd – rdzeń trójkolumnowy:

$$X_{(0)\mu} = (4 \div 6) \underline{Z}_{(1)T} \quad (4.94)$$

$$\underline{Z}_{(0)Y} \cong 3 \underline{Z}_{uY} + (0,8 \div 0,9) \underline{Z}_{(1)T} \quad (4.95)$$

3. transformator YNyn – rdzeń 4 lub 5-cio kolumnowy lub 3 jednostki jednofazowe:

$$\underline{Z}_{(0)Y} \cong 3 \underline{Z}_{uY} + 3 \underline{Z}'_{uy} + \underline{Z}_{(1)T} \quad (4.96)$$

4. transformator YNyn – rdzeń trójkolumnowy:

$$\underline{Z}_{(0)Y} \cong 3 \underline{Z}_{uY} + 3 \underline{Z}'_{uy} + \underline{Z}_{(1)T} \quad (4.97)$$

5. transformator YNy – rdzeń 4 lub 5-cio kolumnowy lub 3 jednostki jednofazowe:

$$\underline{Z}_{(0)Y} = \underline{Z}_{(0)y} = \infty \quad (4.98)$$

6. transformator YNy – rdzeń trójkolumnowy:

$$\underline{Z}_{(0)Y} = (4 \div 6) \underline{Z}_{(1)T} \quad (4.99)$$

4.9. Transformatory trójzwojeniowe

W transformatorach trójzwojeniowych produkcji polskiej napięcie zwarcia i straty w miedzi są odniesione do mocy podstawowej równej mocy znamionowej transformatora trójzwojeniowego. W transformatorach innej produkcji mogą być odniesione do mocy każdej pary uzwojeń transformator G – S, G – D, S – D. Moc znamionowa transformatora trójzwojeniowego S_n jest równa największej mocy jednego z trzech uzwojeń transformatora. Moc pary uzwojeń transformatora trójzwojeniowego np. $S_{n(G-S)}$ jest to największa moc jaka może być transformowana przez tę parę uzwojeń bez ich przeciążenia. Jest ona równa mocy uzwojenia o mniejszej mocy.

W przypadku gdy napięcia zwarcia i straty w miedzi są odniesione do mocy poszczególnych par uzwojeń, to należy je sprowadzić do mocy znamionowej np.

$$\Delta U_{Z(G-S)} = \Delta U'_{Z(G-S)} \frac{S_n}{S_{n(G-S)}} \quad (4.100)$$

$$\Delta P_{Cu(G-S)} = \Delta P'_{Cu(G-S)} \frac{S_n}{S_{n(G-S)}} \quad (4.101)$$

przy czym:

$\Delta U'_{Z(G-S)}$ i $\Delta P'_{Cu(G-S)}$ są odniesione do mocy $S_{n(G-S)}$.

W pierwszym etapie oblicza się rezystancje i reaktancje poszczególnych par uzwojeń transformatora trójzwojeniowego:

$$R_{(1)G-S} = \frac{\Delta P_{cuG-S\%}}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (4.102)$$

$$Z_{(1)G-S} = \frac{\Delta U_{ZG-S\%}}{100} \frac{U_n^2}{S_n} \quad (4.103)$$

$$X_{(1)G-S} = \sqrt{(Z_{(1)G-S})^2 - (R_{(1)G-S})^2} \quad (4.104)$$

W podobny sposób oblicza się: $R_{(1)G-D}$, $R_{(1)S-D}$, $X_{(1)G-D}$ oraz $X_{(1)S-D}$.

Następnie według poniższych wzorów liczymy rezystancje i reaktancje poszczególnych uzwojeń transformatora trójzwojeniowego:

$$R_{(1)G} = \frac{1}{2} (R_{(1)G-S} + R_{(1)G-D} - R_{(1)S-D}) \quad (4.105)$$

$$R_{(1)S} = \frac{1}{2} (R_{(1)G-S} + R_{(1)S-D} - R_{(1)G-D}) \quad (4.106)$$

$$R_{(1)D} = \frac{1}{2} (R_{(1)G-D} + R_{(1)S-D} - R_{(1)G-S}) \quad (4.107)$$

$$X_{(1)G} = \frac{1}{2} (X_{(1)G-S} + X_{(1)G-D} - X_{(1)S-D}) \quad (4.108)$$

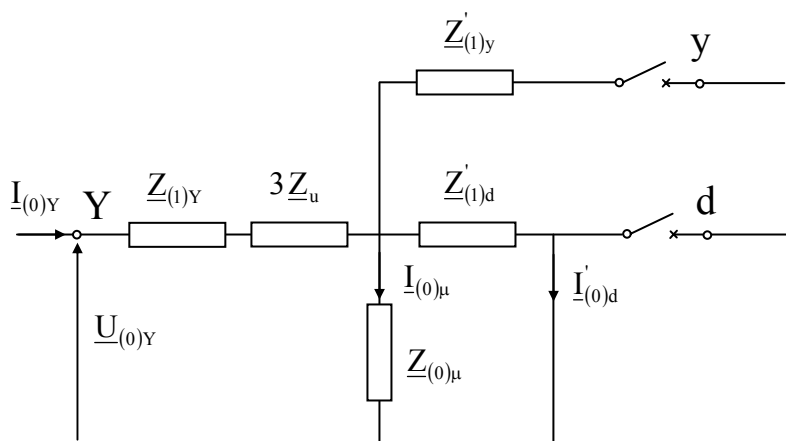
$$X_{(1)S} = \frac{1}{2} (X_{(1)G-S} + X_{(1)S-D} - X_{(1)G-D}) \quad (4.109)$$

$$X_{(1)D} = \frac{1}{2} (X_{(1)G-D} + X_{(1)S-D} - X_{(1)G-S}) \quad (4.110)$$

Z obliczeń może wynikać, że wartość jednej rezystancji lub reaktancji będzie miała znak ujemny.

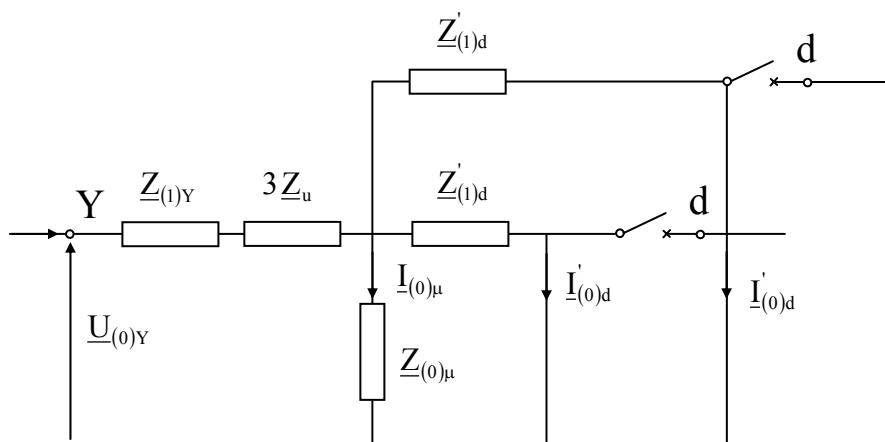
Schematy zastępcze transformatora trójzwojeniowego dla składowej zerowej są następujące:

1. YNdy



Rys. 4.14 Schemat zastępczy dla składowej zerowej transformatora trójzwojeniowego YNdy.

2. YNdd



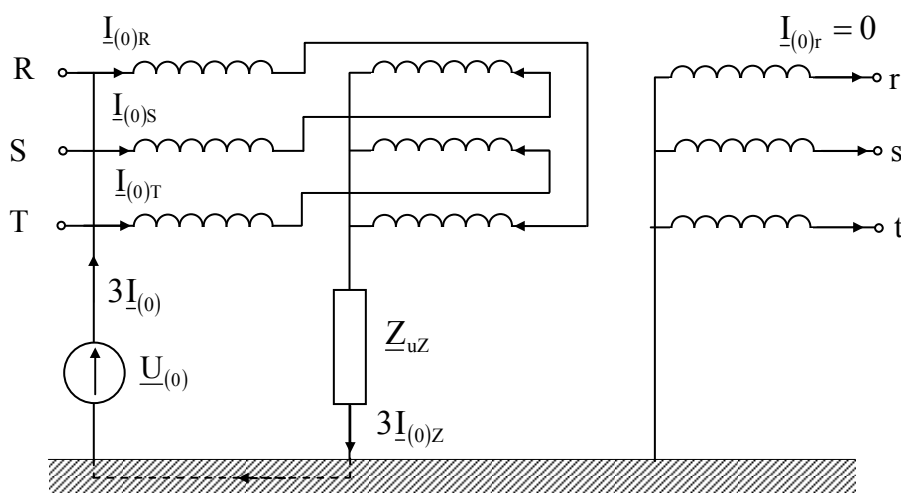
Rys. 4.15 Schemat zastępczy dla składowej zerowej transformatora trójzwojeniowego YNdd.

4.10. Transformatory dwuuzwojeniowe połączone w zygzak

W sieci elektroenergetycznej są instalowane transformatory dwuuzwojeniowe z jednym uzwojeniem połączonym w zygzak w następujących przypadkach:

- Yzn – jako transformator o przekładni SN/nn dla $S_n < 250$ kVA,
- ZNyn – jako transformator uziemiający w sieci SN dla przyłączenia dławika lub rezystora przy czym strona wtórna, niskonapięciowa służy do zasilania potrzeb własnych stacji, Impedancje dla składowej zgodnej i przeciwnej obliczamy jak dla transformatora dwuuzwojeniowego.

Rozpływ prądu składowej zerowej przez transformator ZNyn przy zwarciu doziemnym od strony zygzaka pokazano na rys.4.16.



Rys. 4.16 Przepływ prądu składowej zerowej przez transformator ZNyn przy zwarciu doziemnym od strony zygzaka.

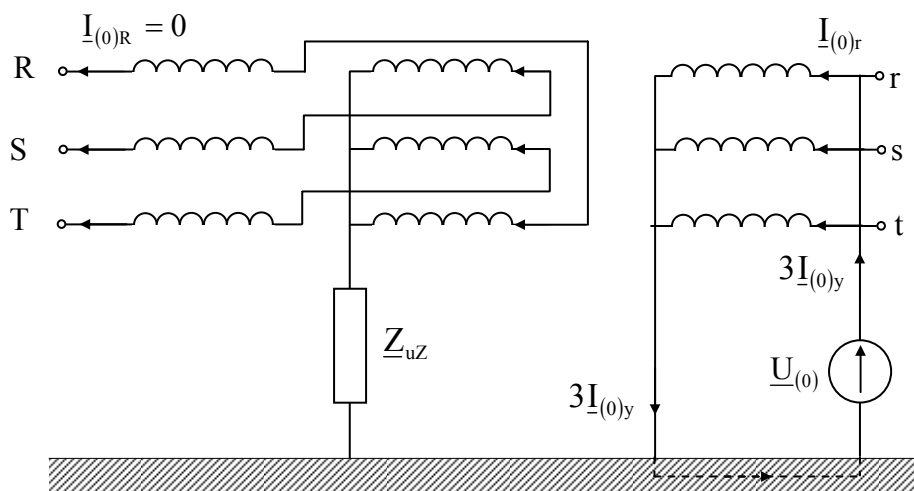
Z powyższego rozplywu wynika, że w uzwojeniu połączonym w zygzak amperozwoje kolejności zerowej znoszą się wzajemnie na każdej z kolumn (kompensują się). Taki transformator może pracować bez uzwojenia wtórnego a strumień składowej zerowej w rdzeniu jest równy zero. Po stronie gwiazdy prąd składowej zerowej nie popłynie.

Reaktancja dla prądu składowej zerowej wynika ze strumienia rozproszenia między połówkami zygzaka. Jest ona mała. Impedancja $\underline{Z}_{(0)Z}$ określona na podstawie pomiarów wynosi:

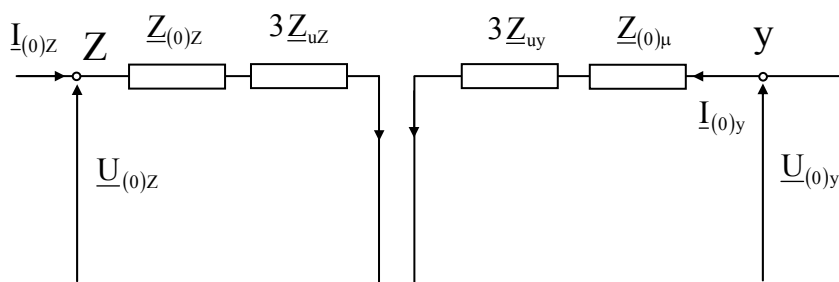
$$\underline{Z}_{(0)Z} \cong 0,4 R_{(1)} + j 0,15 X_{(1)} \quad (4.111)$$

Mała impedancja uzwojenia połączzonego w zygzak jest jego zaletą, i dlatego stosuje się go do małych transformatorów, gdzie występują duże niesymetrie obciążenia z obecnością składowej zerowej.

Przy zwarciu doziemnym od strony gwiazdy w uzwojeniu zygzaka prąd składowej zerowej nie popłynie. Rozpływ ten odpowiada układowi YNy i taka sama jest też impedancja dla składowej zerowej. Schemat transformator ZNyn jest więc następujący:



Rys. 4.17 Przepływ prądu składowej zerowej przez transformator ZNyn przy zwarciu doziemnym od strony gwiazdy.



Rys. 4.18 Schemat zastępczy dla składowej zerowej transformatora dwuuzwojeniowego ZNyn.

4.11. Autotransformatory

Impedancje dla składowej zgodnej i przeciwnej liczymy jak dla transformatora. Przeanalizowano schemat autotransformatora dla składowej zerowej i rozważono następujące przypadki układów autotransformatorów:

1. autotransformator bez uzwojenia kompensacyjnego, z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej np. rdzeń pięciokolumnowy,
2. autotransformator z uzwojeniem kompensacyjnym, z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej,
3. autotransformator z uzwojeniem kompensacyjnym, z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej oraz z nie uziemionym punktem neutralnym,
4. autotransformator bez uzwojenia kompensacyjnego z otwartą drogą dla strumienia składowej zerowej,
5. autotransformator z uzwojeniem kompensacyjnym z otwartą drogą dla strumienia składowej zerowej.

4.11.1. Autotransformator bez uzwojenia kompensacyjnego z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej

Wyprowadzając schemat zastępczy autotransformatora bez uzwojenia kompensacyjnego z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej pominięto wpływ prądów magnesujących na schemat. Przepływ prądu składowej zerowej przez autotransformator bez uzwojenia

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

kompensacyjnego YN_{auto} z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej pokazano na rys. 4.19.

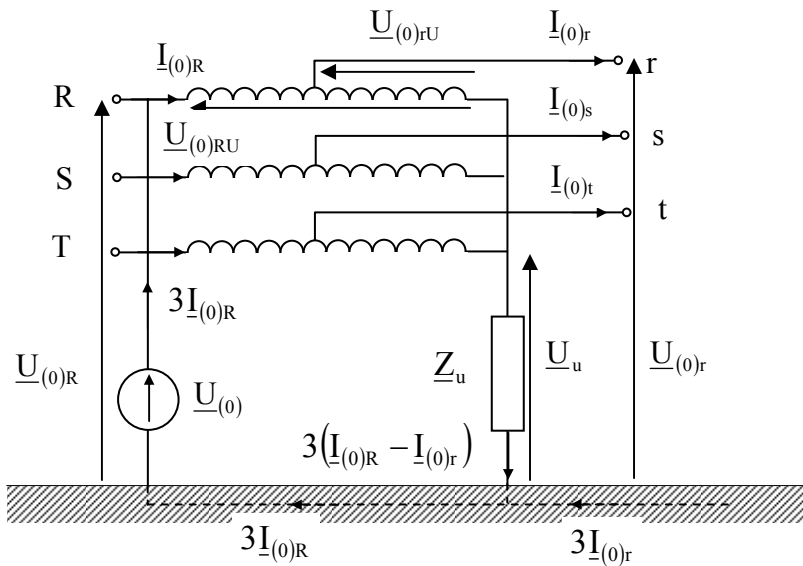
Podstawowe zależności są następujące:

$$\underline{U}_{(0)R} = \underline{U}_{(0)RU} + \underline{U}_u \quad (4.112)$$

$$\underline{U}_{(0)r} = \underline{U}_{(0)rU} + \underline{U}_u \quad (4.113)$$

$$\underline{I}_{(0)r} = \underline{I}_{(0)R} \vartheta \quad (4.114)$$

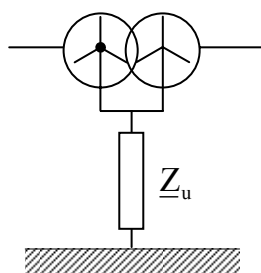
$$\underline{U}_u = 3(\underline{I}_{(0)R} - \underline{I}_{(0)r})\underline{Z}_u \quad (4.115)$$



Rys. 4.19 Przepływ prądu składowej zerowej przez autotransformator YN_{auto} .

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{(0)At} &= \frac{\underline{U}_{(0)R} - \underline{U}'_{(0)r}}{\underline{I}_{(0)R}} = \frac{\underline{U}_{(0)R} - \underline{U}_{(0)r} \vartheta}{\underline{I}_{(0)R}} = \\ &= \frac{(\underline{U}_{(0)RU} + \underline{U}_u) - (\underline{U}_{(0)rU} + \underline{U}_u) \vartheta}{\underline{I}_{(0)R}} = \\ &= \frac{\underline{U}_{(0)RU} - \underline{U}'_{(0)rU}}{\underline{I}_{(0)R}} + \frac{\underline{U}_u}{\underline{I}_{(0)R}} (1 - \vartheta) = \\ &= \underline{Z}_{(1)At} + 3 \underline{Z}_u \frac{\underline{I}_{(0)R} - \underline{I}_{(0)r}}{\underline{I}_{(0)R}} (1 - \vartheta) = \\ &= \underline{Z}_{(1)At} + 3 \underline{Z}_u (1 - \vartheta)^2 \end{aligned} \quad (4.116)$$

Podobne rozumowanie służy do wyprowadzenia schematu zastępczego transformatora YN_{yn} o wspólnym uziemieniu jak na rys. 4.20.

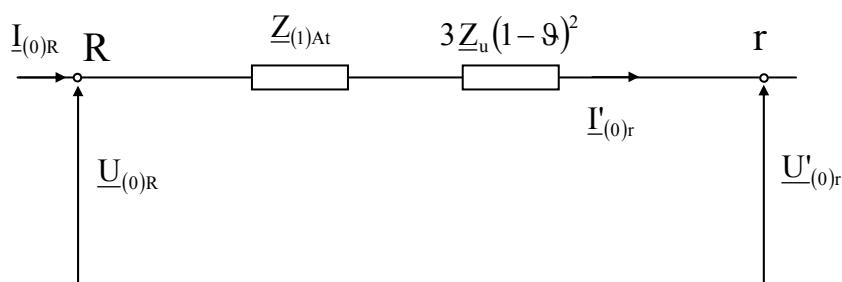


Rys. 4.20 Transformator YNyn ze wspólnym uziemieniem.

Impedancja dla składowej zerowej tego transformatora wynosi:

$$\underline{Z}_{(0)T} = \underline{Z}_{(1)T} + 3 \underline{Z}_u (1 - \vartheta)^2 \quad (4.117)$$

Schemat zastępczy autotransformatora bez uzwojenia kompensacyjnego z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej, na poziomie górnego napięcia jest następujący:



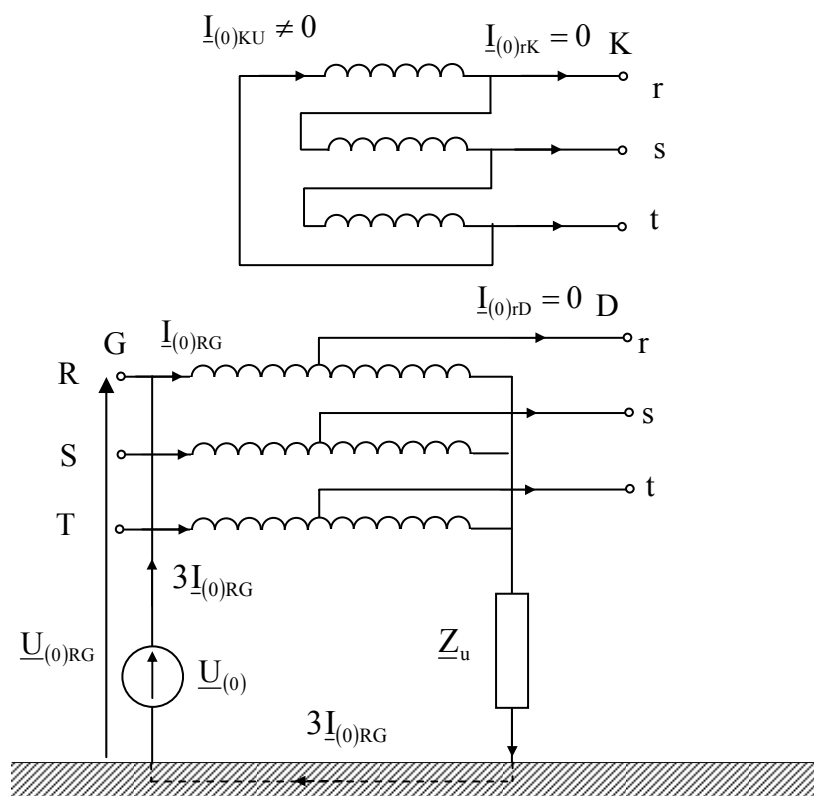
Rys. 4.21 Schemat zastępczy autotransformatora bez uzwojenia kompensacyjnego z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej.

Impedancje te zostały wyprowadzone na poziomie napięcia uzwojenia górnego. Gdybyśmy chcieli odnieść je do napięcia uzwojenia dolnego należy te impedancje pomnożyć przez ϑ^2 .

4.11.2. Autotransformator z uzwojeniem kompensacyjnym i z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej $YN_{auto}d$

W autotransformatorach lub wielkich transformatorach występuje dodatkowe uzwojenie połączone w trójkąt zwane uzwojeniem wyrównawczym lub kompensacyjnym a napięcie znamionowe tego uzwojenia wynosi od 6 do 30 kV. Uzwojenie takie służy do:

1. wykonania próby biegu jałowego transformatora i sprawdzenia izolacji podłużnej transformatora,
2. dostarczaniu trzeciej harmonicznej do prądu magnesującego autotransformatora lub transformatora,
3. zwiększeniu prądu zwarcia doziemnego przez co zmniejsza przepięcia ustalone przy zwarcu jednofazowym,
4. może służyć jako uzwojenie robocze ŚN do zasilania transformatora potrzeb własnych stacji lub do zasilania kompensatora



Rys. 4.22 Przepływ prądu składowej zerowej przez autotransformator $YN_{\text{auto}}d$ przy rozwartym uzwojeniu dolnego napięcia.

Impedancje schematu zastępczego dla składowej zerowej wyprowadzamy dla poszczególnych par uzwojeń:

1. para uzwojeń górne-dolne, uzwojenie kompensacyjne rozwarte:

$$\underline{Z}_{(0)AtG-D} = \underline{Z}_{(1)AtG-D} + 3\underline{Z}_u(1-\vartheta)^2 \quad (4.118)$$

2. para uzwojeń górne- kompensacyjne, rozwarte dolne:

$$\underline{Z}_{(0)AtG-K} = \underline{Z}_{(1)AtG-K} + 3\underline{Z}_u \quad (4.119)$$

3. para uzwojeń dolne- kompensacyjne, rozwarte górne:

$$\underline{Z}_{(0)AtD-K} = \underline{Z}_{(1)AtD-K} + 3\underline{Z}_u \vartheta^2 \quad (4.120)$$

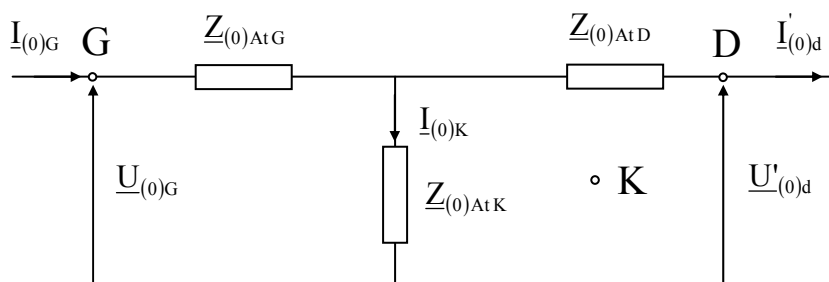
Z powyższych wzorów oblicza się impedancje schematu zastępczego dla składowej zerowej dla poszczególnych uzwojeń jak dla transformatora trójuzwojeniowego.

$$\underline{Z}_{(0)AtG} = \underline{Z}_{(1)AtG} - 3\underline{Z}_u(\vartheta - 1) \quad (4.121)$$

$$\underline{Z}_{(0)AtD} = \underline{Z}_{(1)AtD} + 3\underline{Z}_u \vartheta(\vartheta - 1) \quad (4.122)$$

$$\underline{Z}_{(0)AtK} = \underline{Z}_{(1)AtK} + 3\underline{Z}_u \vartheta \quad (4.123)$$

Schemat zastępczy będzie postaci jak na rys. 4.23.



Rys. 4.23 Schemat zastępczy autotransformatora z uzwojeniem kompensacyjnym, z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej.

4.11.3. Autotransformator z uzwojeniem kompensacyjnym, z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej oraz z nie uziemionym punktem neutralnym

Autotransformator bez uziemionego punktu neutralnego musi posiadać uzwojenie kompensacyjne albowiem bez niego jego impedancja dla składowej zerowej jest równa nieskończoności. Impedancję dla składowej zerowej oblicza się przekształcając poprzedni schemat zastępczy z gwiazdy w trójkąt i szukając granicy dla Z_u dążącego nieskończoności. W wyniku otrzymano impedancje schematu zastępczego.

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{(0)AtG-D} &= \lim_{Z_u \rightarrow \infty} \left(\underline{Z}_{(0)AtG} + \underline{Z}_{(0)AtD} + \frac{\underline{Z}_{(0)AtG} \underline{Z}_{(0)AtD}}{\underline{Z}_{(0)AtK}} \right) = \\ &= \left[\underline{Z}_{(1)AtG} \vartheta + \frac{\underline{Z}_{(0)AtD}}{\vartheta} + \underline{Z}_{(0)AtK} \frac{(\vartheta-1)^2}{\vartheta} \right] \end{aligned} \quad (4.124)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{(0)AtG-K} &= \lim_{Z_u \rightarrow \infty} \left(\underline{Z}_{(0)AtG} + \underline{Z}_{(0)AtK} + \frac{\underline{Z}_{(0)AtG} \underline{Z}_{(0)AtK}}{\underline{Z}_{(0)AtD}} \right) = \\ &= \left[\underline{Z}_{(1)AtG} \frac{\vartheta}{\vartheta-1} + \frac{\underline{Z}_{(0)AtD}}{\vartheta(\vartheta-1)} + \underline{Z}_{(0)AtK} \frac{(\vartheta-1)}{\vartheta} \right] \end{aligned} \quad (4.125)$$

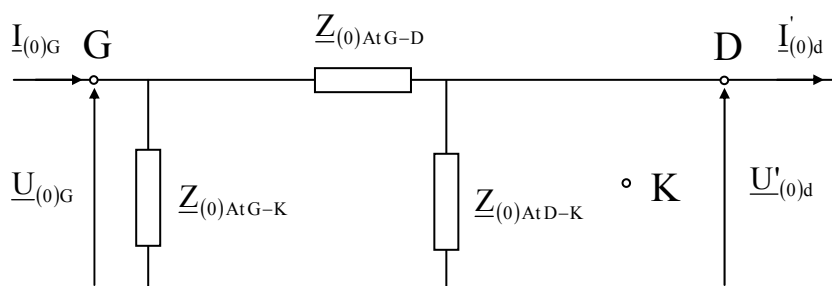
$$\begin{aligned} \underline{Z}_{(0)AtD-K} &= \lim_{Z_u \rightarrow \infty} \left(\underline{Z}_{(0)AtD} + \underline{Z}_{(0)AtK} + \frac{\underline{Z}_{(0)AtD} \underline{Z}_{(0)AtK}}{\underline{Z}_{(0)AtG}} \right) = \\ &= - \left[\underline{Z}_{(1)AtG} \frac{\vartheta^2}{\vartheta-1} + \frac{\underline{Z}_{(0)AtD}}{(\vartheta-1)} + \underline{Z}_{(0)AtK} (\vartheta-1) \right] \end{aligned} \quad (4.126)$$

Cechami charakterystycznymi są:

1. $\underline{Z}_{(0)AtD-K} < 0$ co oznacza charakter pojemnościowy,

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

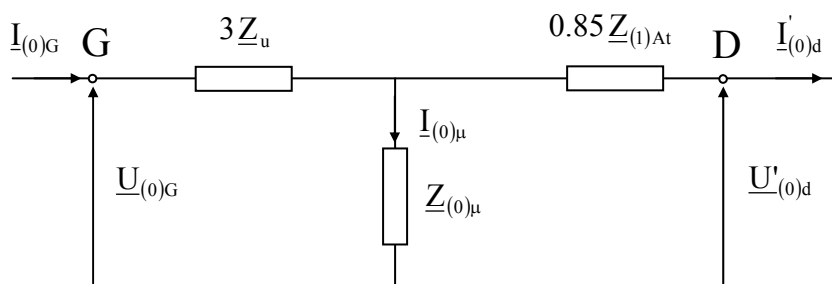
2. $\underline{Z}_{(0)AtG-D} + \underline{Z}_{(0)AtG-K} + \underline{Z}_{(0)AtD-K} = 0$, jest to tzw. rezonansowy schemat zastępczy. Schemat zastępczy będzie postaci trójkąta jak na rys. 4.24.



Rys. 4.24 Schemat zastępczy autotransformatora z uzwojeniem kompensacyjnym, z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej oraz z nie uziemionym punktem neutralnym.

4.11.4. Autotransformator trójkolumnowy bez uzwojenia kompensacyjnego

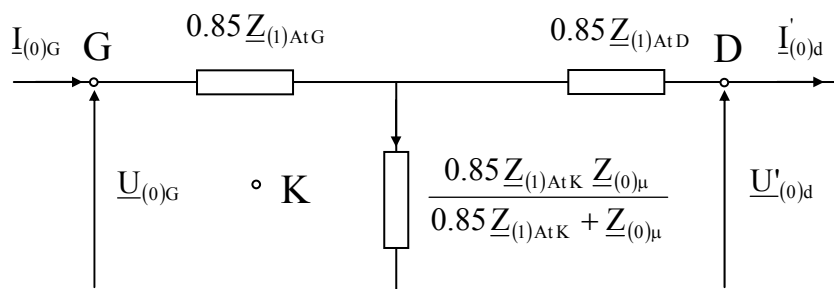
Impedancje autotransformatora trójkolumnowego bez uzwojenia kompensacyjnego wyznacza się w oparciu o pomiary, w wyniku których można narysować następujący schemat zastępczy:



Rys. 4.25 Schemat zastępczy autotransformatora trójkolumnowego bez uzwojenia kompensacyjnego.

4.11.5. Autotransformator trójkolumnowy z uzwojeniem kompensacyjnym

Impedancja autotransformatora trójkolumnowego z uzwojeniem kompensacyjnym połączonym w trójkąt wyznacza się w oparciu o pomiary, w wyniku których można narysować następujący schemat zastępczy:



Rys. 4.26 Schemat zastępczy autotransformatora trójkolumnowego z uzwojeniem kompensacyjnym.

4.12. Warunki skuteczności uziemienia punktu neutralnego sieci i sposoby pracy punktów neutralnym transformatorów elektroenergetycznych

Z punktu widzenia pracy punktów neutralnych sieci elektroenergetycznych możemy je podzielić na trzy zasadnicze grupy:

1. wysokonapięciowe sieci elektroenergetyczne pracujące ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym (sieci o napięciu znamionowym 400 kV, 220 kV oraz 110 kV),
2. sieci elektroenergetyczne pracujące z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym (sieci o napięciu znamionowym 30 kV, 20 kV, 15 kV, 10 kV, 6kV, 3kV czy 1kV – ogólnie sieci średniego napięcia),
3. niskonapięciowe sieci elektroenergetyczne pracujące ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym (sieci o napięciu znamionowym 380 V, 220 V).

Celem uziemienia punktów neutralnych sieci (transformatorów) jest zmniejszenie napięć faz nie dotkniętych zwarciami przy zwarciach niesymetrycznych $-U_{fz}$. Skuteczność tych uziemień określa tzw. współczynnik uziemienia zdefiniowany jako $k_z = \frac{|U_{fz}|}{U_N}$. Sieć jest siecią ze skutecznie

uziemionym punktem neutralnym gdy $k_z \leq 0.8$ co odpowiada wzrostowi napięć fazowych o 38%. W rozdziale 3.10 analizowano wpływ rezystancji i reaktancji składowej zerowej na wzrost napięcia fazowego faz zdrowych – rys. 3.18. Z rozważań tych wynika, że sieć jest siecią ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym gdy spełnione są warunki:

$$\frac{R_{(0)}}{X_{(1)}} \leq 1 \quad \text{oraz} \quad \frac{X_{(0)}}{X_{(1)}} \leq 3 \quad (4.127)$$

Sieci elektroenergetycznych są powiązane za pomocą transformatorów. Pamiętając o właściwościach transformatorów omówionych w rozdziałach od 3.6 do 3.9, grupy połączeń transformatorów możliwe do zastosowania są następujące:

1. dla połączenia sieci wysokonapięciowych z innymi sieciami wysokonapięciowymi gdzie można by wyróżnić następujące typowe przypadki transformacji:
 - 400 kV na 220 kV,
 - 400 kV na 110 kV,
 - 220 kV na 110 kV,stosuje się autotransformatory z uzwojeniem kompensacyjnym połączonym w trójkąt $YN_{\text{auto}}d11$, z rdzeniem trój- lub pięciokolumnowym lub w postaci trzech jednostek jednofazowych,
2. dla połączenia sieci wysokonapięciowych z sieciami średnich napięć gdzie można by wyróżnić następujące typowe przypadki transformacji:
 - transformator blokowy WN/ŚN,
 - 220 kV na ŚN (rzadki przypadek),
 - 110 kV na ŚN,stosuje się transformatory w układzie $YNd11$ lub wyjątkowo $Yd11$, z rdzeniem trój- lub pięciokolumnowym,
3. dla połączenia sieci średnich napięć z sieciami niskonapięciowymi stosuje się transformatory w układzie $Dyn5$ lub jeżeli $S_n \leq 250$ kVA transformatory $Yzn5$, z rdzeniem trójkolumnowym,
4. dla połączenia sieci średnich napięć z sieciami średnich napięć stosuje się transformatory w układzie $Yy0$ lub rzadziej $Dd0$, z rdzeniem trójkolumnowym,
5. jako transformator uziemiający pracujący w sieciach średnich napięć i dodatkowo generujący niskie napięcie dla potrzeb własnych stacji stosuje się transformatory w układzie $ZNyn5$, z rdzeniem trójkolumnowym.

4.13. Zestawienie schematów zastępczych i impedancji transformatorów elektroenergetycznych

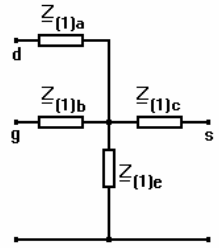
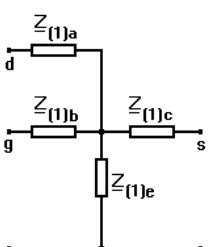
Tabl.4.2 Schematy zastępcze i impedancje transformatorów elektroenergetycznych przystosowane do programu komputerowego obliczania zwarć w sieci zarówno ze skutecznie jak i nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym w związku z tym ten sam schemat zastępczy transformatora dla składowej zgodnej i zerowej, przy czym:

- „∞” oznacza dużą liczbę np. 999999 j.w.,
- „0” oznacza małą liczbę np. 0.000001 j.w.

L.p.	Nazwa elementu	Schemat zastępczy	Impedancje dla składowej zgodnej	Impedancje dla składowej zerowej
1	2	3	4	5
1	Transformator YNd		$\underline{Z}_{(1)a} = \frac{1}{2} \underline{Z}_{(1)T}$ $\underline{Z}_{(1)b} = \frac{1}{2} \underline{Z}_{(1)T}$ $\underline{Z}_{(1)c} = \infty$	Rdzeń pięciokolumnowy: $\underline{Z}_{(0)a} = \underline{Z}_{(1)T} + 3\underline{Z}_u$ $\underline{Z}_{(0)b} = \infty$ $\underline{Z}_{(0)c} = 0$ Rdzeń trójkolumnowy: $\underline{Z}_{(0)a} = 0.9\underline{Z}_{(1)T} + 3\underline{Z}_u$ $\underline{Z}_{(0)b} = \infty$ $\underline{Z}_{(0)c} = 0$
2	Transformator YNyn (2 uziemienia)		$\underline{Z}_{(1)a} = \underline{Z}_{(1)T}$	$\underline{Z}_{(0)a} = \underline{Z}_{(1)T} + 3\underline{Z}_{uY} + 3\underline{Z}_{uy} \vartheta^2$
3	Transformator YNy		$\underline{Z}_{(1)a} = \underline{Z}_{(1)T}$	Rdzeń pięciokolumnowy: $\underline{Z}_{(0)a} = \infty$ Rdzeń trójkolumnowy: $\underline{Z}_{(0)a} = (4 \div 6) \underline{Z}_{(1)T} + 3\underline{Z}_{uY}$
4	Transformator YNyn ze wspólnym uziemieniem		$\underline{Z}_{(1)a} = \underline{Z}_{(1)T}$	$\underline{Z}_{(0)a} = \underline{Z}_{(1)T} + 3\underline{Z}_u (1 - \vartheta)^2$
5	Transformator Zyn (uziemiający)		$\underline{Z}_{(1)a} = \frac{1}{2} \underline{Z}_{(1)T}$ $\underline{Z}_{(1)b} = \frac{1}{2} \underline{Z}_{(1)T}$ $\underline{Z}_{(1)c} = \infty$	$\underline{Z}_{(0)a} = 0.4 R_{(1)T} + j0.15 X_{(1)T} + 3\underline{Z}_{uZ}$ $\underline{Z}_{(0)b} = (3 \div 4) \underline{Z}_{(1)T}$ $\underline{Z}_{(0)c} = 0$
6	Transformator Dzn lub Yzn		$\underline{Z}_{(1)a} = \frac{1}{2} \underline{Z}_{(1)T}$ $\underline{Z}_{(1)b} = \frac{1}{2} \underline{Z}_{(1)T}$ $\underline{Z}_{(1)c} = \infty$	$\underline{Z}_{(0)a} = \infty$ $\underline{Z}_{(0)b} = 0.4 R_{(1)T} + j0.15 X_{(1)T} + 3\underline{Z}_{uZ} \vartheta^2$ $\underline{Z}_{(0)c} = 0$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

c.d. tabl. 4.2.

1	2	3	4	5
7	<p>Transformator trójzwojowy YNdd gdzie:</p> <p>g - górne s - średnie d - dolne</p>		$\underline{Z}_{(1)a} = \underline{Z}_{(1)Ts}$ $\underline{Z}_{(1)b} = \underline{Z}_{(1)Tg}$ $\underline{Z}_{(1)c} = \underline{Z}_{(1)Td}$ $\underline{Z}_{(1)e} = \infty$	<p>Rdzeń pięciokolumnowy:</p> $\underline{Z}_{(0)a} = \infty$ $\underline{Z}_{(0)b} = \underline{Z}_{(1)Tg} + \frac{\underline{Z}_{(1)Ts} \underline{Z}_{(1)Td}}{\underline{Z}_{(1)Ts} + \underline{Z}_{(1)Td}} + 3\underline{Z}_u$ $\underline{Z}_{(0)c} = \infty$ $\underline{Z}_{(0)e} = 0$ <p>Rdzeń trójkolumnowy:</p> $\underline{Z}_{(0)a} = \infty$ $\underline{Z}_{(0)b} = 0.9 \left(\underline{Z}_{(1)Tg} + \frac{\underline{Z}_{(1)Ts} \underline{Z}_{(1)Td}}{\underline{Z}_{(1)Ts} + \underline{Z}_{(1)Td}} \right) + 3\underline{Z}_u$ $\underline{Z}_{(0)c} = \infty$ $\underline{Z}_{(0)e} = 0$
8	<p>Transformator trójzwojowy YNyd gdzie:</p> <p>g - górne s - średnie d - dolne</p>		$\underline{Z}_{(1)a} = \underline{Z}_{(1)Ts}$ $\underline{Z}_{(1)b} = \underline{Z}_{(1)Tg}$ $\underline{Z}_{(1)c} = \underline{Z}_{(1)Td}$ $\underline{Z}_{(1)e} = \infty$	<p>Rdzeń pięciokolumnowy:</p> $\underline{Z}_{(0)a} = \infty$ $\underline{Z}_{(0)b} = \underline{Z}_{(1)Tgd} + 3\underline{Z}_u$ $\underline{Z}_{(0)c} = \infty$ $\underline{Z}_{(0)e} = 0$ <p>Rdzeń trójkolumnowy:</p> $\underline{Z}_{(0)a} = \infty$ $\underline{Z}_{(0)b} = 0.8 \underline{Z}_{(1)Tgd} + 3\underline{Z}_u$ $\underline{Z}_{(0)c} = \infty$ $\underline{Z}_{(0)e} = 0$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

c.d. tabl. 4.2.

1	2	3	4	5
9	Autotransformator YautoNd, transformator YNynd ze wspólnym uziemieniem g–gorne s–srednie d–do lne		$\underline{Z}_{(1)a} = \underline{Z}_{(1)Tg}$ $\underline{Z}_{(1)b} = \underline{Z}_{(1)Ts}$ $\underline{Z}_{(1)c} = \underline{Z}_{(1)Td}$ $\underline{Z}_{(1)d} = 0$ $\underline{Z}_{(1)e} = \infty$	<p>Rdzeń pięciokolumnowy:</p> $\underline{Z}_{(0)a} = \underline{Z}_{(1)Tg} - 3\underline{Z}_u(\vartheta - 1)$ $\underline{Z}_{(0)b} = \underline{Z}_{(1)Ts} + 3\underline{Z}_u\vartheta(\vartheta - 1)$ $\underline{Z}_{(0)c} = \infty$ $\underline{Z}_{(0)d} = \underline{Z}_{(1)Td} + 3\underline{Z}_u\vartheta$ $\underline{Z}_{(0)e} = 0$ <p>Rdzeń trójkolumnowy:</p> $\underline{Z}_{(0)a} = 0.85\underline{Z}_{(1)Tg} - 3\underline{Z}_u(\vartheta - 1)$ $\underline{Z}_{(0)b} = 0.85\underline{Z}_{(1)Ts} + 3\underline{Z}_u\vartheta(\vartheta - 1)$ $\underline{Z}_{(0)c} = \infty$ $\underline{Z}_{(0)d} = \frac{(0.85\underline{Z}_{(1)Td} + 3\underline{Z}_u\vartheta) * 6\underline{Z}_{(1)Tgs}}{0.85\underline{Z}_{(1)Td} + 3\underline{Z}_u\vartheta + 6\underline{Z}_{(1)Tgs}}$ $\underline{Z}_{(0)e} = 0$
10	Autotransformator YautoN		$\underline{Z}_{(1)a} = \underline{Z}_{(1)AT}$	<p>Rdzeń pięciokolumnowy:</p> $\underline{Z}_{(0)a} = \underline{Z}_{(1)AT} + 3\underline{Z}_u(1 - \vartheta)^2$ <p>Rdzeń trójkolumnowy:</p> $\underline{Z}_{(0)a} = 0.85 \underline{Z}_{(1)AT} + 3\underline{Z}_u(1 - \vartheta)^2$

4.14. Transformacja prądów zwarć niesymetrycznych przez transformatory

Rozpatrzono jaka jest transformacja prądów zwarć niesymetrycznych przez transformatory o różnych grupach połączeń. Problem ten można rozwiązać na dwa sposoby:

1. wykorzystując metodę składowych symetrycznych czyli obliczając wartości prądów składowych symetrycznych po jednej stronie transformatora i dokonując ich transformacji zgodnie ze wzorami zawartymi w rozdziale 2.4,
2. postępując w następującej kolejności:
 - obliczyć wartości prądów fazowych po jednej stronie transformatora,
 - wyznaczyć ich wartości w uzwojeniach,
 - wyznaczyć ich wartości w uzwojeniach po drugiej stronie transformatora wykorzystując przekładnię zwojową transformatora,
 - obliczyć wartości prądów fazowych po drugiej stronie transformatora.

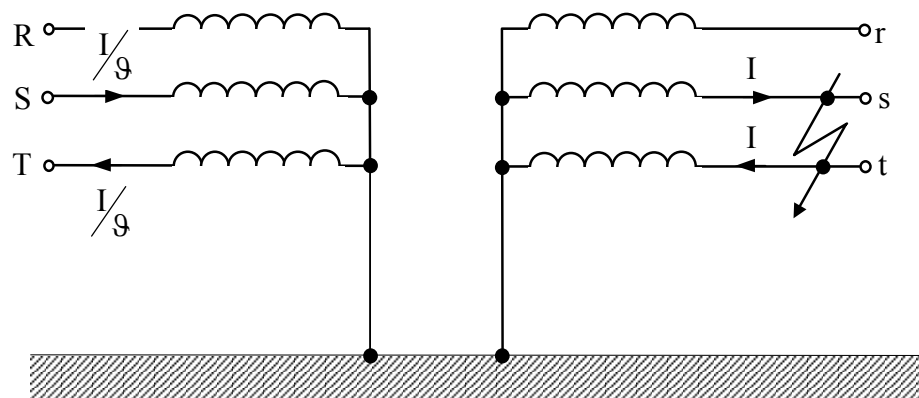
Zaprezentowano przykłady zastosowania tej drugiej metody albowiem w wielu przypadkach jest to prostszy sposób postępowania.

Założono, że:

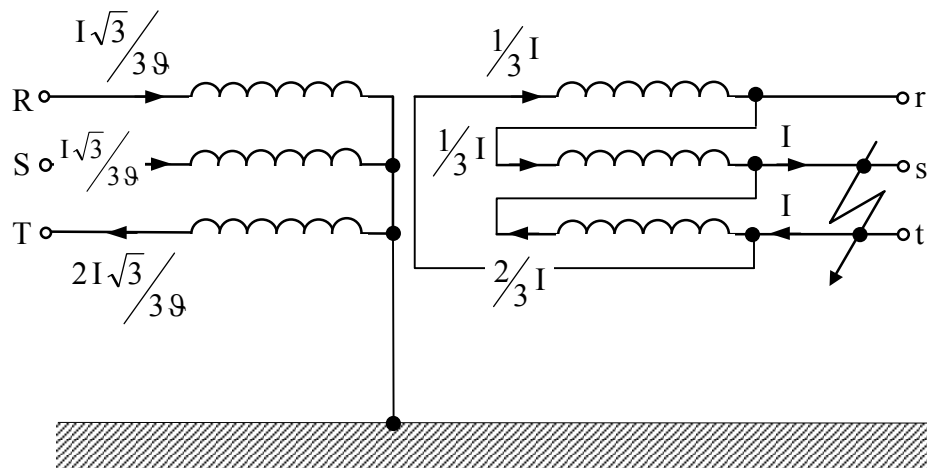
- początki uzwojeń są po stronie zacisków transformatora po obu jego stronach z wyjątkami opisanymi dalej,
- rozpatrywane przypadki zwarcia występują zawsze po stronie dolnego napięcia transformatora – przypadek przeciwny zostawiono do indywidualnego rozpatrzenia.

Przykłady podano dla zwarcia dwufazowego i trójfazowego, dla wybranych grup połączeń transformatorów takich jak: YNyn0, YNd11, Dyn5, Yzn5 oraz YNyn0d11.

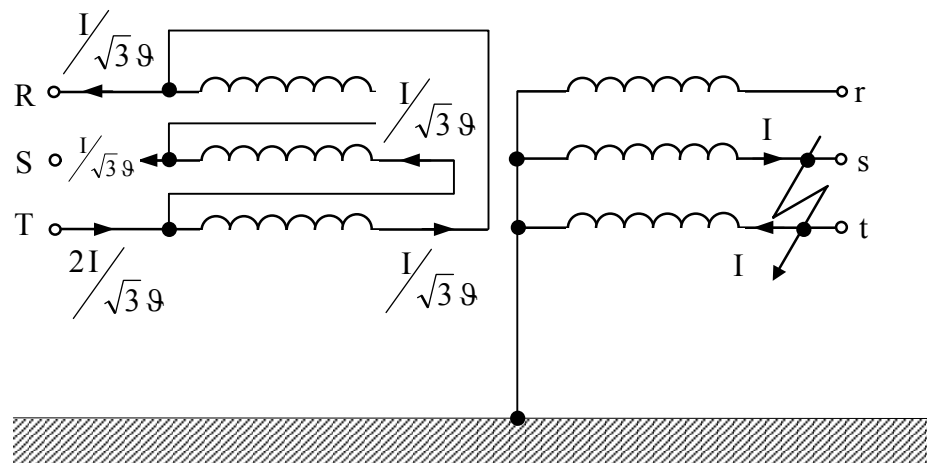
Nietrudno wykazać, że w przypadku zwarcia dwufazowego za transformatorem o grupie Yd lub Dy, wartość prądu zwarciovego po stronie zasilającej jest równa w jednej z faz wartości prądu zwarcia trójfazowego w tym samym punkcie.



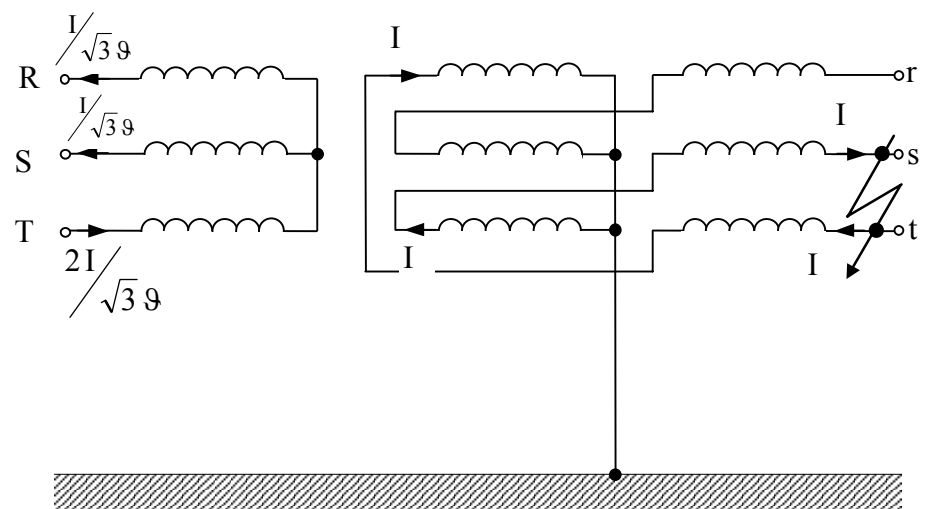
Rys. 4.27 Transformacja prądu zwarcia dwufazowego przez transformator o grupie połączeń YNyn0.



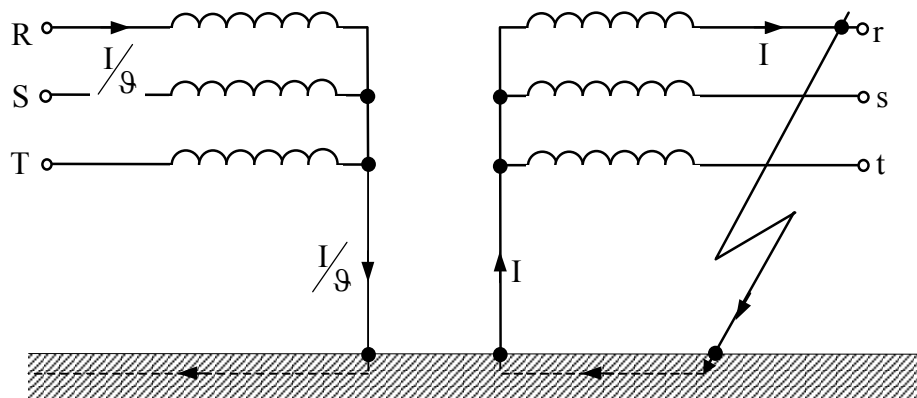
Rys. 4.28 Transformacja prądu zwarcia dwufazowego przez transformator o grupie połączeń YNd11.



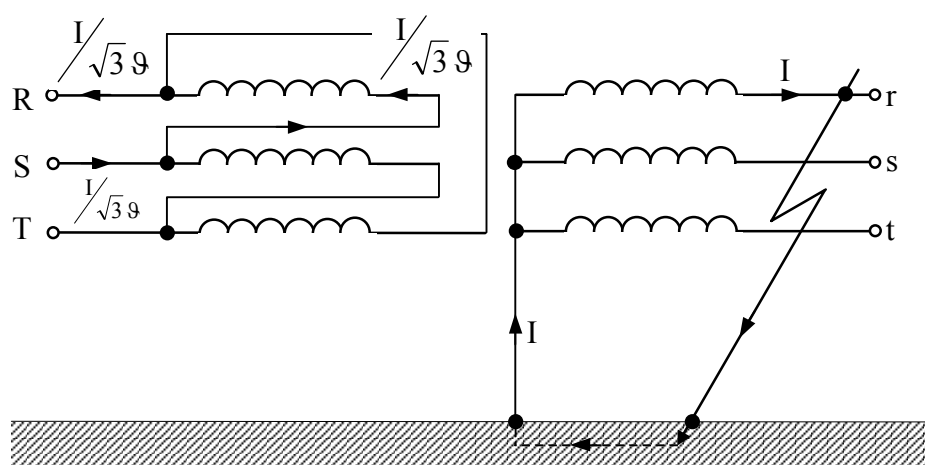
Rys. 4.29 Transformacja prądu zwarcia dwufazowego przez transformator o grupie połączeń Dyn5 (założono odwrotne położenie początków uzwojeń po stronie zasilania).



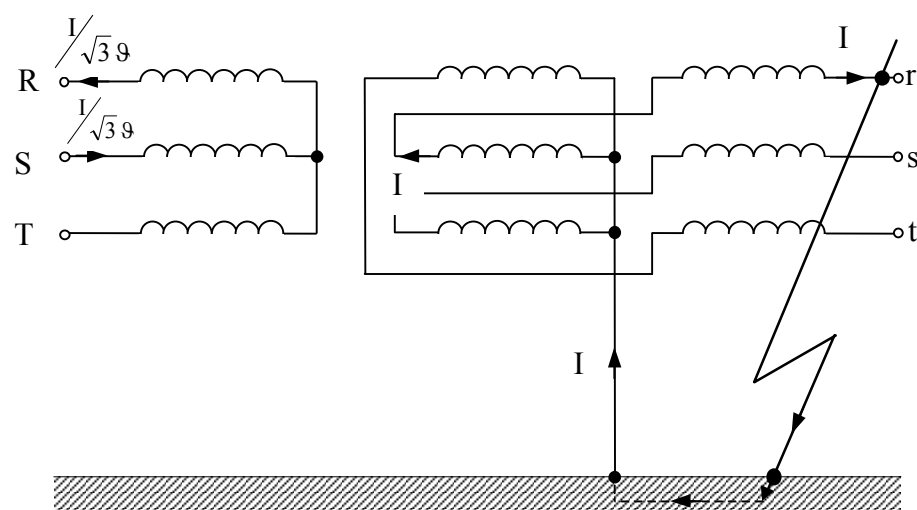
Rys. 4.30 Transformacja prądu zwarcia dwufazowego przez transformator o grupie połączeń Yzn5 (założono odwrotne położenie początków uzwojeń po stronie zasilania).



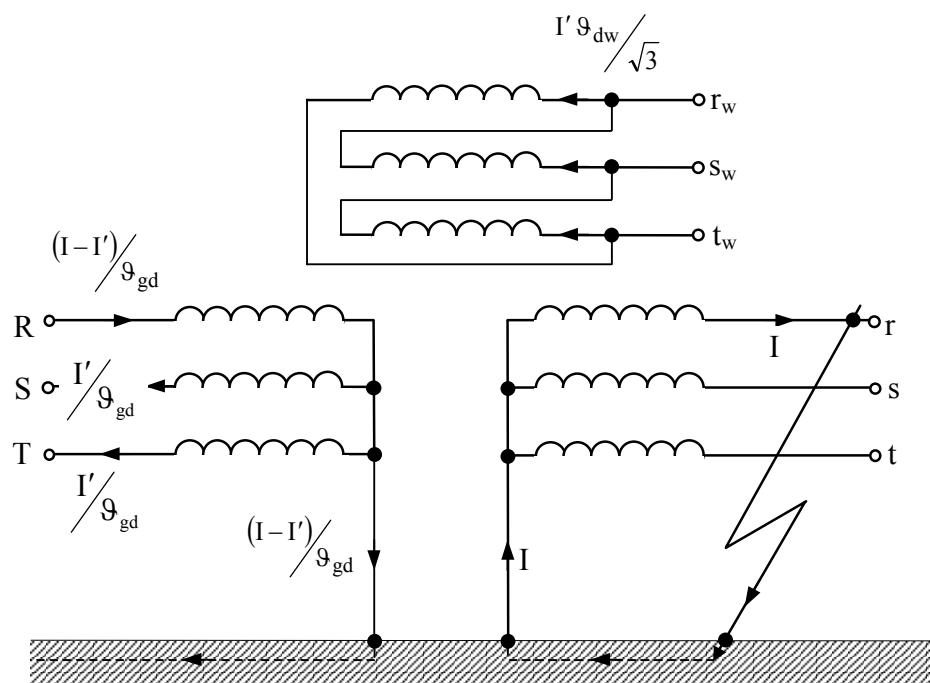
Rys. 4.31 Transformacja prądu zwarcia jednofazowego przez transformator o grupie połączeń YNyn0.



Rys. 4.32 Transformacja prądu zwarcia jednofazowego przez transformator o grupie połączeń Dyn5 (założono odwrotne położenie początków uzwojeń po stronie zasilania).



Rys. 4.33 Transformacja prądu zwarcia jednofazowego przez transformator o grupie połączeń Yzn5 (założono odwrotne położenie początków uzwojeń po stronie zasilania).



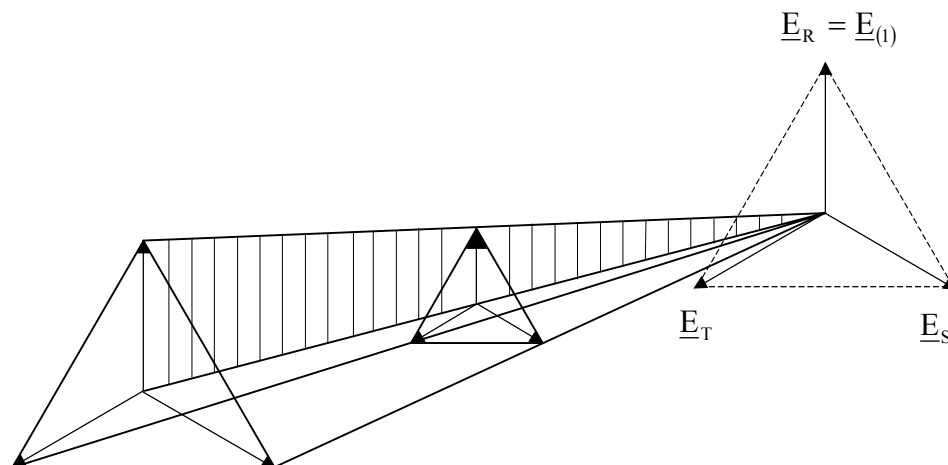
Rys. 4.34 Transformacja prądu zwarcia jednofazowego przez transformator o grupie połączeń YNyn0d11, gdzie:

$$I' = \alpha I,$$

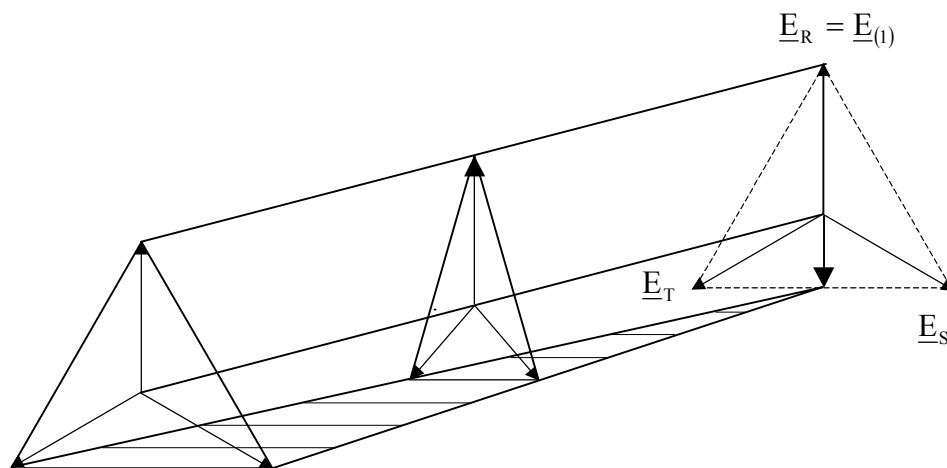
α - współczynnik zależny od parametrów transformatora i konfiguracji sieci po stronie zasilania, przy czym $0 < \alpha \leq 1$.

4.15. Napięcia poza miejscem zwarcia

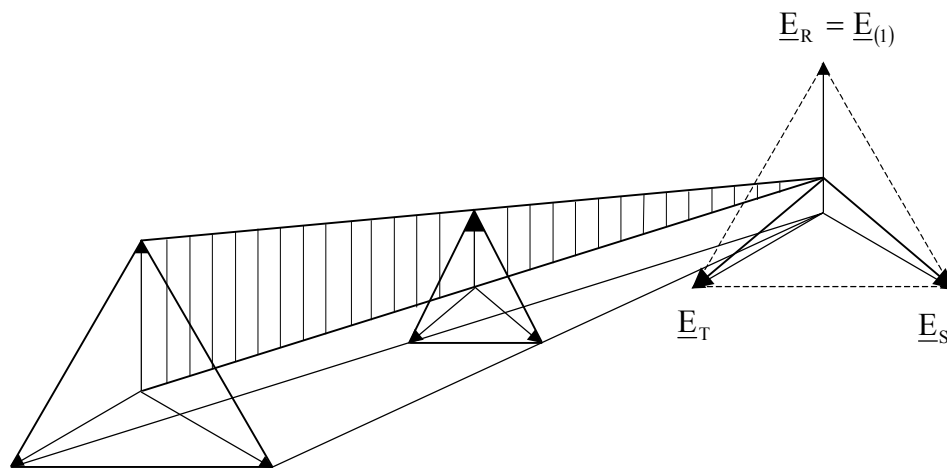
Rozważono jednorodną linię zasilaną z idealnego źródła tzn. mającego impedancję wewnętrzną równą zero. W linii pominiemy jej pojemność i rezystancję oraz założono, że na końcu tej linii występuje zwarcie. Analizowano dalej jak zmieniają się napięcia poza miejscem zwarcia. Wiadomo, że napięcie składowej zgodnej będzie zawsze rosło do wartości siły elektromotorycznej źródła, a napięcia składowej przeciwnej i zerowej będą zawsze malały do zera. W wyniku napięcia fazowe i międzyprzewodowe poza miejscem zwarcia ulegają także zmianom co pokazano na rys. od 4.35 do 4.38.



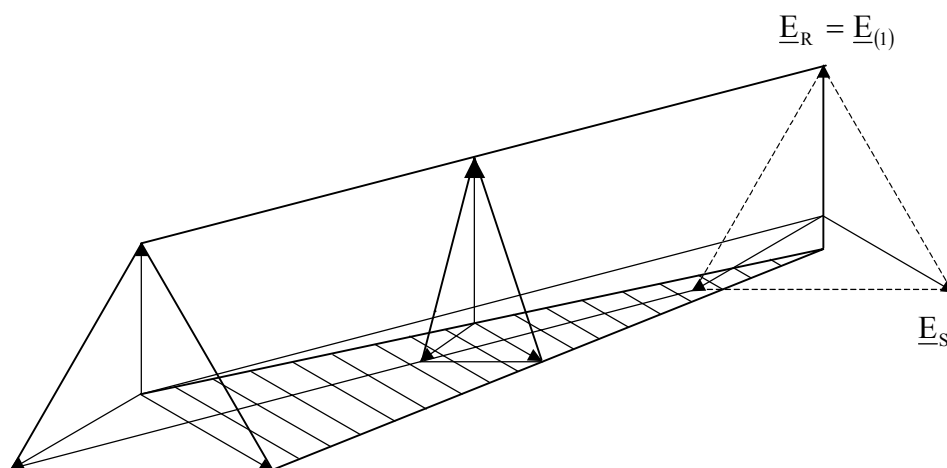
Rys. 4.35 Napięcia poza miejscem zwarcia przy zwarciu trójfazowym.



Rys. 4.36 Napięcia poza miejscem zwarcia przy zwarciu dwufazowym.



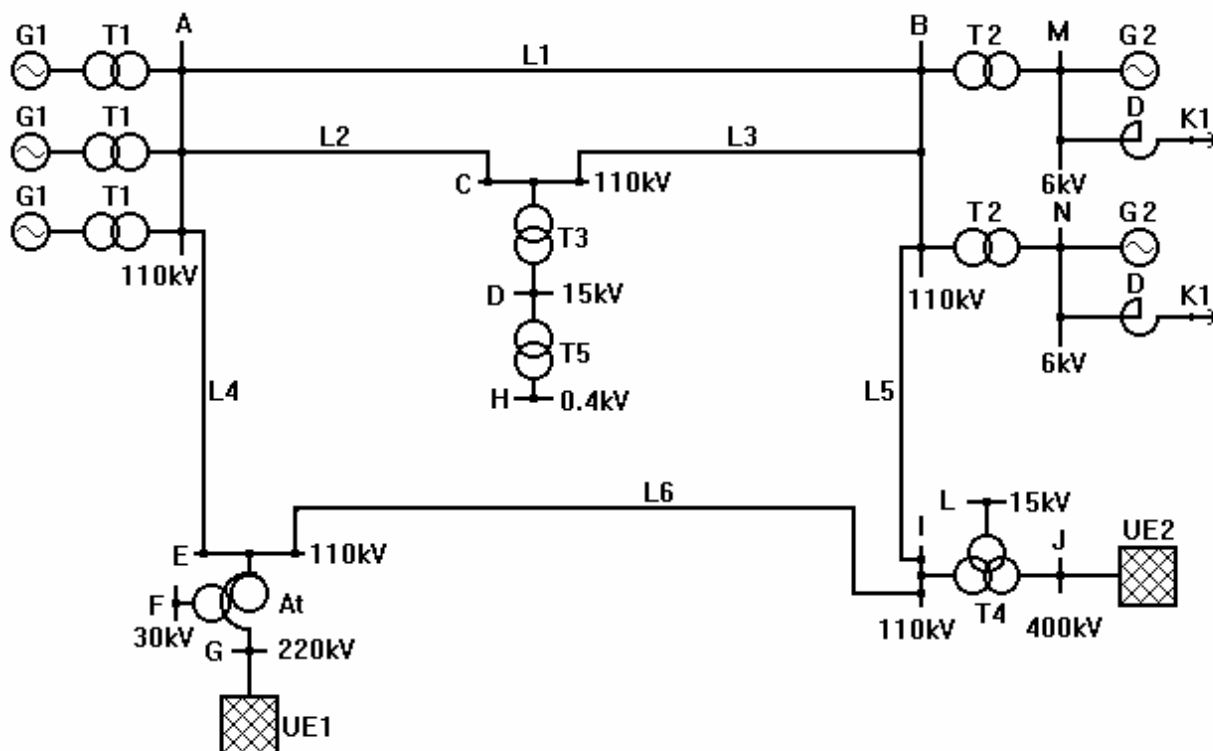
Rys. 4.37 Napięcia poza miejscem zwarcia przy zwarciu jednofazowym.



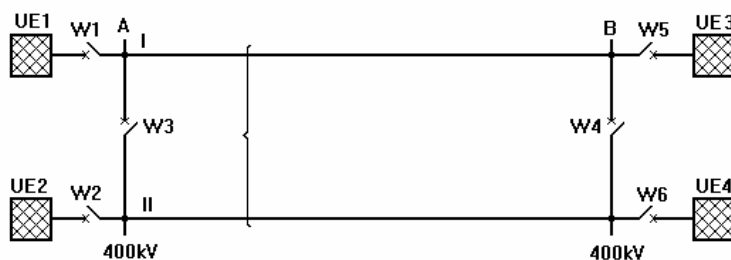
Rys. 4.38 Napięcia poza miejscem zwarcia przy zwarciu dwufazowym doziemnym.

4.16. Pytania kontrolne

1. Wyjaśnić wpływ budowy rdzenia transformatora na jego schemat zastępczy dla składowej zerowej.
2. Czy wyjęcie z kadzi transformatora o grupie połączeń Ynd11 i rdzeniu trójkolumnowym zmieni jego impedancję dla składowej zerowej?
3. Układy połączeń transformatorów stosowanych w sieci.
4. Czy można włączyć do pracy równoległej transformatory o grupach połączeń YNd11 i YNd1?
5. Omówić wpływ przewodów odgromowych i wiązkowych linii na jej impedancje dla składowej zgodnej i zerowej.
6. Omówić wpływ odłączonego i uziemionego na obu końcach jednego toru linii dwutorowej na impedancję linii dla składowej zerowej.
7. Podać przyczyny dlaczego w kablu ekranowanym pojemność dla składowej zgodnej jest równa pojemności dla składowej zerowej. Jaki jest stosunek reaktancji wzdłużnej dla składowej zerowej i składowej zgodnej w tym kablu?
8. Omówić sposób tworzenia schematów zastępczych dla składowej zgodnej i zerowej na przykładzie systemu elektroenergetycznego z rys. 4.39.
9. Czy moc zwarciova przy zwarciu na szynach G sieci z rys. 4.39 będzie większa (mniejsza, równa) od mocy zwarciovej UE1?
10. Zasady budowy schematu zastępczego sieci dla składowej zerowej.
11. Przyczyna pojawienia się prądu fazowego w fazach zdrowych elementów sieci elektroenergetycznej połączonych metalicznie z miejscem zwarcia (prąd wyrównawczy), przy zwarcu:
 - a) jednofazowym,
 - b) dwufazowym.
12. Przy jakim zwarcu:
 - a) trójfazowym,
 - b) jednofazowymna szynach H układu z rys.4.39 będzie większy prąd zwarciovy początkowy.
13. Czy przy zwarcu jednofazowym na szynach H układu z rys. 4.39 w linii L2 będzie płynął prąd składowej zerowej oraz czy w napięciu na szynach C będzie występowała składowa zerowa napięcia?
14. Czy przy zwarcu jednofazowym na szynach A będzie:
 - płynął prąd składowej zerowej w generatorze G1,
 - występowało napięcie składowej zerowej na szynach D, H i na zaciskach generatora G1?
15. Czy odłączenie generatora G1 od sieci wpłynie na prąd zwarcia jednofazowego i trójfazowego na szynach H?
16. Omówić warunki skuteczności uziemienia sieci.
17. Jaka jest wzajemna relacja między stosunkami, prądem zwarcia jednofazowego a trójfazowego oraz napięciami faz zdrowych przy zwarcu jednofazowym.
18. Jak wpłynie na napięcie faz zdrowych przy zwarcu jednofazowym odziemienie punktu gwiazdowego transformatora T1 w sieci z rys. 4.39?
19. Jakimi konsekwencjami grozi wykonanie polecenia odziemienia punktów gwiazdowych wszystkich transformatorów?
20. Czy odziemianie punktów gwiazdowych transformatorów w sieci 110 kV z rys. 4.39 ma wpływ na warunki skuteczności uziemienia w sieci 0,4 kV (niskiego napięcia)?
21. W przypadku gdy $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ dla wszystkich elementów sieci, podać który prąd początkowy jest największy i przy jakich warunkach.



Rys. 4.39 Schemat sieci.

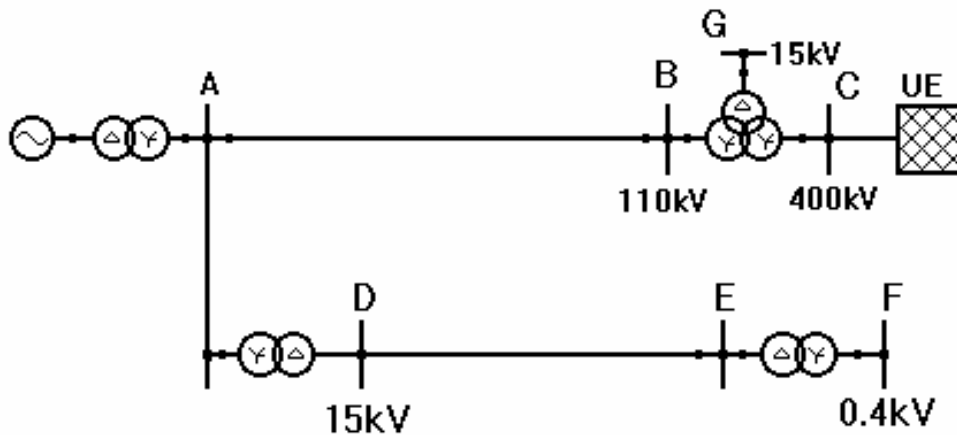


Rys. 4.40 Schemat sieci z linią magnetycznie sprzężoną

22. Omówić schematy zastępcze dla składowej zerowej układu z rys. 4.40 przy różnych sposobach połączenia ze sobą obu torów:
 - a) W1, W3, W4 i W6 zamknięte,
 - b) W1, W3 i W4 zamknięte,
 - c) W1 i W3 zamknięte,
 - d) W1, W3 i W6 zamknięte,
 - e) W1 i W2 zamknięte,
 - f) W1, W2, W5 i W6 zamknięte
 oraz przy zwarciu na końcu linii oraz wewnątrz linii.
23. Dla przypadków podanych w pytaniu od 22c) do 22f) i zwarcia jednofazowym na szynach BII narysować wykres wskazowy napięć na szynach BI.
24. W przypadku gdy oba tory nie pracują na wspólne szyny na krańcach linii, mogą się w torze zdrowym pojawić prądy fazowe. Jeśli tak, to w jakich fazach i jakie warunki muszą być spełnione aby ten fakt zaistniał.

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

25. W sieci, dla której $R_{(1)} = R_{(2)} = R_{(0)} = 0$; $X_{(2)} > X_{(1)}$; dla zwarcia dwufazowego metalicznego narysować wykres wskazowy prądów i napięć w miejscu zwarcia i poza miejscem zwarcia.
26. Przeanalizować wpływ stosunku $\frac{X_{(0)}}{X_{(1)}}$ na wartości prądów i napięć podczas zwarcia niesymetrycznych.
27. W sieci o skutecznie uziemionym punkcie neutralnym przeanalizować wpływ:
 a) rezystancji uziemienia,
 b) rezystancji przejścia
 na wartości prądów i napięć w czasie zwarcia jednofazowego. Pominąć pozostałe rezystancje obwodu.
28. Podać jakie składowe symetryczne prądu i napięcia pojawią się w zaznaczonych kropkami miejscach na rys. 4.41, podczas zwarcia:
 a) jednofazowego na szynach C,
 b) dwufazowego doziemnego na szynach F,
 c) dwufazowego na szynach E.



Rys. 4.41 Schemat sieci

29. Narysować wykres wskazowy prądów i napięć przy zwarciu jednofazowym na szynach A w układzie z rys. 4.42 Na wykresie zaznaczyć położenie punktu P. Zadanie wykonać przy następujących założeniach:
- a) $R_{(1)} = R_{(2)} = R_{(0)} = 0$;

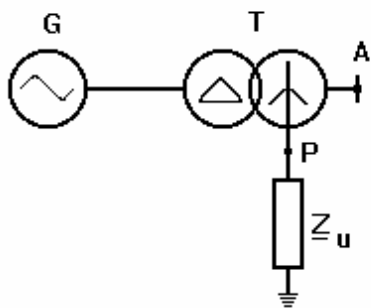
$$X_{(1)G} = X_{(2)G} = X_{(1)T} = X_{(2)T} = X_{(0)T}; \quad Z_u = \frac{1}{3} X_{(1)T};$$

Powyższe warunki oznaczają, że w układzie mamy rezystancję uziemienia o wartości podanej powyżej.

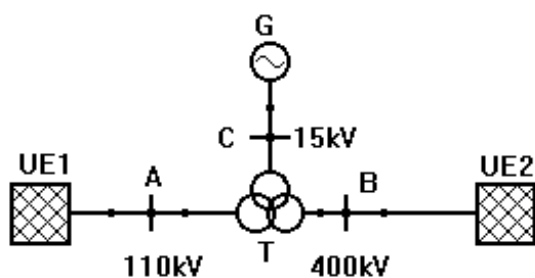
- b) $R_{(1)} = R_{(2)} = R_{(0)} = 0$;

$$X_{(1)G} = X_{(2)G} = X_{(1)T} = X_{(2)T} = X_{(0)T}; \quad Z_u = j \frac{1}{3} X_{(1)T};$$

Powyższe warunki oznaczają, że w układzie mamy reaktancję uziemienia o wartości podanej powyżej.



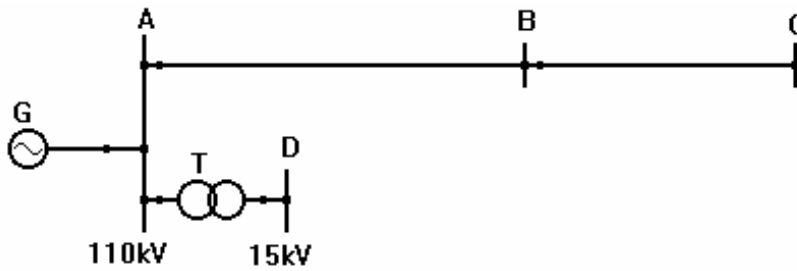
Rys. 4.42 Schemat sieci.



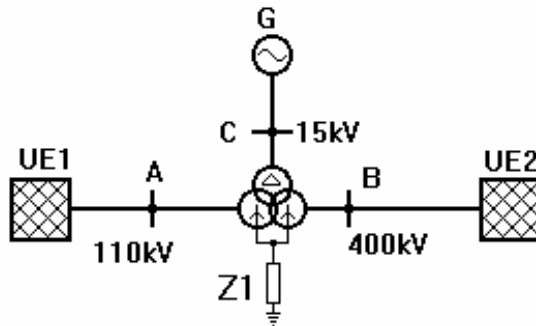
Rys. 4.43 Schemat sieci.

30. Podać jakie składowe symetryczne płyną w zaznaczonych miejscach w układzie z rys. 4.43. Zadanie to rozwiązać dla różnych grup połączeń transformatora i generatora:
- T: YNyn0d11; G: Y;
 - T: YNyn0d11; G: D;
 - T: YNy0d11; G: Y;
 - T: Yyn0d11; G: Y;
- oraz dla zwarcia jednofazowego na:
- szynach A,
 - szynach B.
- Założyć, że UE1 oraz UE2 mają skutecznie uziemiony punkt neutralny.
31. Jak w układzie z rys. 4.43 określić napięcie punktu gwiazdowego po stronie 400kV transformatora, gdy jego grupa połączeń jest Yyn0d11, znając wykres wskazowy napięć na szynach A?
32. Podać jakie składowe symetryczne i jakiej wartości płyną w zaznaczonych miejscach w układzie z rys. 4.44 podczas jednofazowego zwarcia na szynach B jeżeli prąd zwarcia wynosi 9000A? Zadanie to rozwiązać dla grupy połączeń transformatora YNd11 i generatora połączonych w trójkąt. Obliczyć prądy w uzwojeniach generatora.
33. Narysować transformację prądów zwarcia niesymetrycznych przez transformatory o różnych grupach połączeń przy założeniu, że zwarcia występują po stronie górnego napięcia transformatora. Rozważyć:
- Transformację prądu zwarcia dwufazowego przez transformator o grupie YNyn0,
 - Transformację prądu zwarcia dwufazowego przez transformator o grupie YNd11,
 - Transformację prądu zwarcia dwufazowego przez transformator o grupie Dyn5,
 - Transformację prądu zwarcia dwufazowego przez transformator o grupie Yzn5,
 - Transformację prądu zwarcia jednofazowego przez transformator o grupie Dyn5,
 - Transformację prądu zwarcia jednofazowego przez transformator o grupie Yzn5.

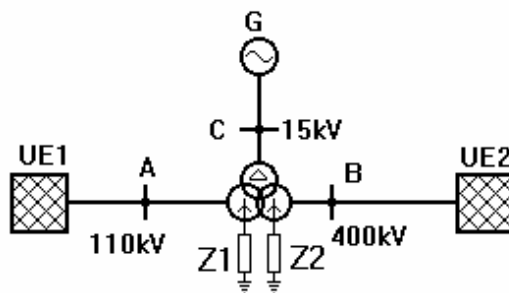
A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych



Rys. 4.44 Schemat sieci.



Rys. 4.45 Schemat sieci.



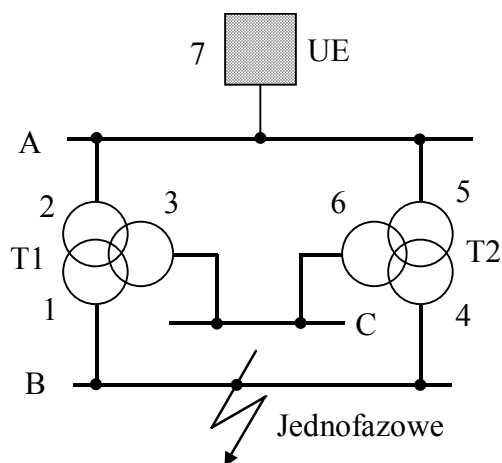
Rys. 4.46 Schemat sieci.

34. Narysować schemat dla składowej zerowej sieci z rys. 4.45 i rys. 4.46. Zakładając, że $Z_1=Z_2=1$ Ohm obliczyć te wielkości w jednostkach względnych dla $S_p=100$ MVA.
35. Wyjaśnić dlaczego podczas zwarcia jednofazowego ulegają zmianie napięcia faz zdrowych nawet w przypadku gdy podczas zwarcia nie przepływa przez nie prąd.
36. Wyprowadzić dla jakich warunków podczas zwarcia jednofazowego napięcie fazy zdrowej osiągnie wartość 1.4 w jednostkach względnych.
37. W pewnym punkcie sieci stwierdzono, że występują napięcia dla składowej zgodnej i zerowej, napięcie dla składowej przeciwnej jest równe zero.
 - a) Jaki będzie trójkąt napięć międzyprzewodowych?
 - b) W tym punkcie dołączono silnik asynchroniczny o uzwojeniach połączonych w gwiazdę.
 - Czemu będą równały się napięcia na uzwojeniach tego silnika?
 - Jakie będzie napięcie punktu gwiazdowego silnika względem ziemi?
 - Jakie składowe symetryczne będzie zwierał prąd pobierany przez ten silnik?
 - c) Co ulegnie zmianie w stosunku do podpunktu b) gdy uzwojenia silnika połączymy w trójkąt?

4.17. Zadania

4.17.1. Zadanie 1

Dany jest układ elektroenergetyczny jak na poniższym rysunku.



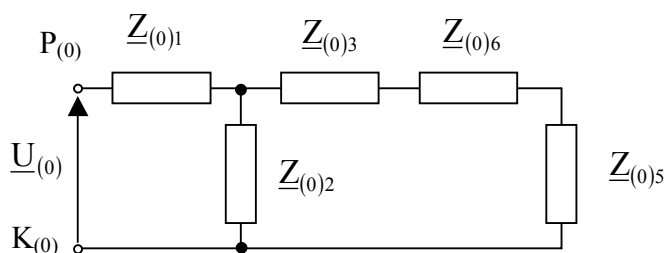
Rys. 4.47 Schemat układu elektroenergetycznego.

Narysować schemat zastępczy dla składowej zerowej oraz podać wzór na reaktancję tej składowej widzianej z miejsca zwarcia dla połączeń uzwojeń podanych w tabl. 4.3.

Tabl. 4.3 Warianty połączeń uzwojeń elementów sieci z układu z rys. 4.47.

Wariant	Numer uzwojenia i jego połączenie						
	1	2	3	4	5	6	7
1.	YN	d	yn	Y	d	YN	YN
2.	YN	yn	d	Y	yn	d	YN
3.	YN	yn	d	Y	yn	d	Y
4.	D	yn	yn	YN	d	yn	YN
5.	Y	d	y	Yn	d	yn	YN
6.	Yn	y	yn	YN	yn	d	YN
7.	YN	y	yn	Y	d	YN	YN
8.	YN	d	yn	Y	yn	yn	YN
9.	YN	yn	yn	D	yn	yn	YN
10.	YN	d	d	YN	y	yn	YN

Dla wariantu 1 na rys. 4.47 przedstawiono schemat zastępczy układu elektroenergetycznego z rys. 4.48 dla składowej zerowej.



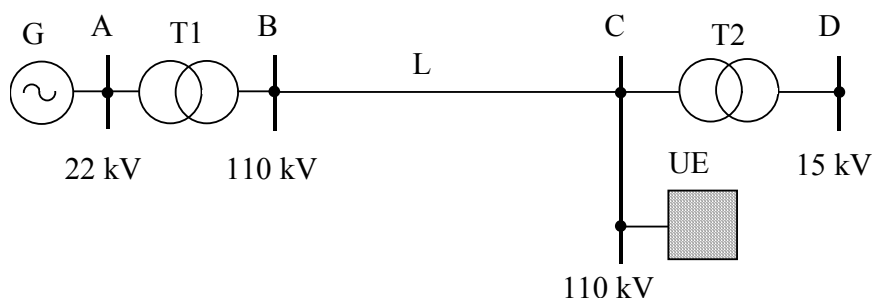
Impedancja dla składowej zerowej wynosi:

$$\underline{Z}_{(0)} = \underline{Z}_{(0)1} + \frac{\underline{Z}_{(0)2} \cdot (\underline{Z}_{(0)3} + \underline{Z}_{(0)5} + \underline{Z}_{(0)6})}{\underline{Z}_{(0)2} + \underline{Z}_{(0)3} + \underline{Z}_{(0)5} + \underline{Z}_{(0)6}}$$

Rys. 4.48 Schemat zastępczy układu elektroenergetycznego z rys. 3.42.

4.17.2. Zadanie 2

Dany jest układ elektroenergetyczny jak na poniższym rysunku.



Rys. 4.49 Schemat sieci.

Dane znamionowe elementów sieci:

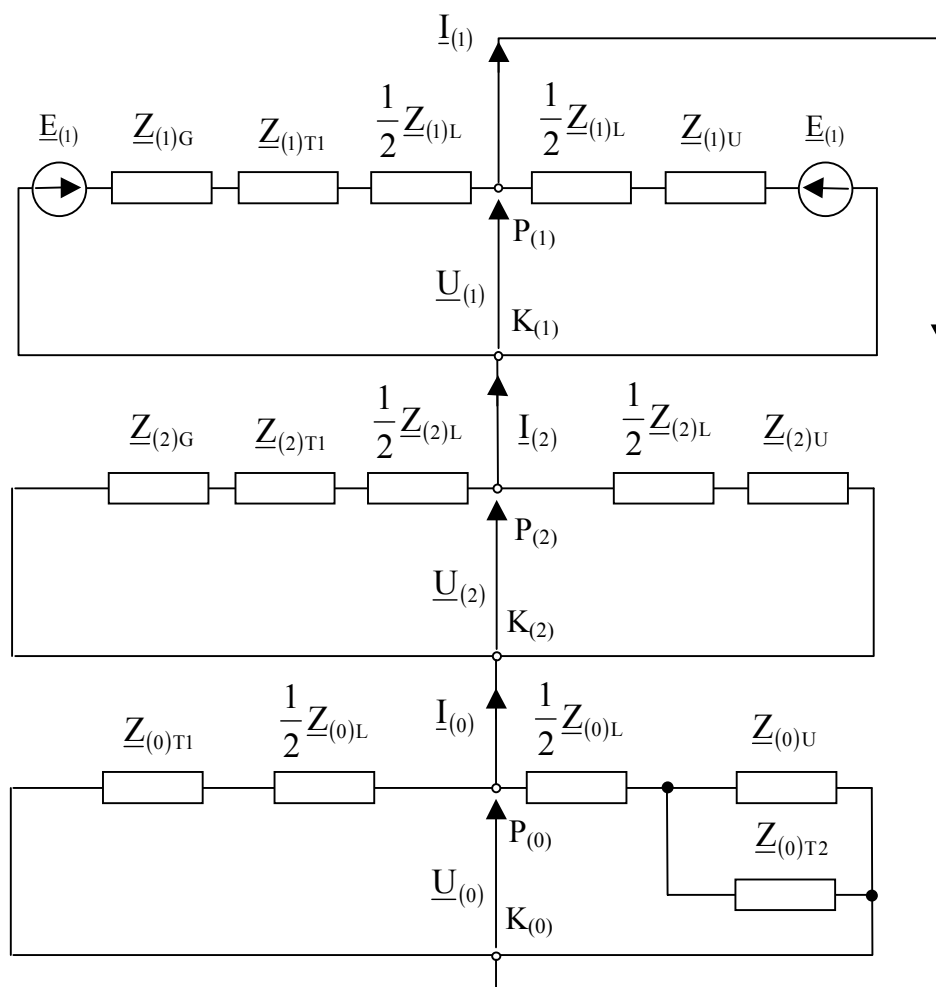
G:	$U_N=22 \text{ kV};$	$S_N=500 \text{ MVA};$	$X''_{d\%} = 15\%;$
T1:	$S_N=500 \text{ MVA};$	$\vartheta = \frac{115 \text{ kV}}{22 \text{ kV}};$	$\Delta U_{z\%}=14 \%;$
	YNd11;	rdzeń pięciokolumnowy;	
T2:	$S_N=50 \text{ MVA};$	$\vartheta = \frac{110 \text{ kV}}{15.75 \text{ kV}};$	$\Delta U_{z\%}=11 \%;$
	YNd11;	rdzeń trójkolumnowy;	
L:	$X_{(1)Lk}=0.4 \ \Omega/\text{km};$	$l=20 \text{ km};$	$\frac{X_{(0)L}}{X_{(1)L}} = 3;$
UE:	$S_Z=2500 \text{ MVA};$	$\frac{X_{(0)U}}{X_{(1)U}} = 0.9;$	

Dla zwarcia jednofazowego w połowie linii L należy obliczyć:

1. prąd i napięcie w miejscu zwarcia,
2. prądy we wszystkich gałęziach sieci,
3. napięcia we wszystkich węzłach sieci.

Rozwiązanie

1. Schemat zastępczy dla składowych symetrycznych



Rys. 4.50 Schemat zastępczy sieci dla składowych symetrycznych.

2. Przyjmujemy moc podstawową $S_{\text{pod}} = 500 \text{ MVA}$.
3. Obliczenie impedancji elementów dla składowej zgodnej

$$X_{(1)G} = \frac{X_{d\%}''}{100} \frac{S_{\text{pod}}}{S_{\text{NG}}} = \frac{15}{100} \frac{500}{500} = 0.15$$

$$X_{(1)T1} = \frac{\Delta U_{Z\%}}{100} \frac{S_{\text{pod}}}{S_{\text{NT1}}} = \frac{14}{100} \frac{500}{500} = 0.14$$

$$X_{(1)T2} = \frac{\Delta U_{Z\%}}{100} \frac{S_{\text{pod}}}{S_{\text{NT2}}} = \frac{11}{100} \frac{500}{50} = 1.1$$

$$X_{(1)L} = X_{(1)Lk} \cdot 1 \cdot \frac{S_{\text{pod}}}{(1.05 \cdot U_{\text{NL}})^2} = 0.4 \cdot 20 \cdot \frac{500}{(1.05 \cdot 110)^2} = 0.30$$

$$X_{(1)U} = \frac{S_{\text{pod}}}{S_Z} = \frac{500}{2500} = 0.20$$

4. Obliczenie impedancji elementów dla składowej zerowej

$$X_{(0)T1} = X_{(1)T1} = 0.14$$

$$X_{(0)T2} = 0.9 X_{(1)T2} = 0.9 \cdot 1.1 = 0.99$$

$$X_{(0)L} = \left(\frac{X_{(0)L}}{X_{(1)L}} \right) X_{(1)L} = 3 \cdot 0.3 = 0.9$$

$$X_{(0)U} = \left(\frac{X_{(0)U}}{X_{(1)U}} \right) X_{(1)U} = 0.9 \cdot 0.2 = 0.18$$

5. Obliczenie impedancji zwarciowej dla składowej zgodnej i przeciwnej

$$X_{(1)B} = X_{(1)G} + X_{(1)T1} + \frac{1}{2} X_{(1)L} = 0.15 + 0.14 + \frac{1}{2} \cdot 0.3 = 0.44$$

$$X_{(1)C} = X_{(1)U} + \frac{1}{2} X_{(1)L} = 0.2 + \frac{1}{2} \cdot 0.3 = 0.35$$

$$X_{(1)} = \frac{X_{(1)B} \cdot X_{(1)C}}{X_{(1)B} + X_{(1)C}} = \frac{0.44 \cdot 0.35}{0.44 + 0.35} = 0.195$$

$$X_{(2)} = X_{(1)} = 0.195$$

6. Obliczenie impedancji zwarciowej dla składowej zerowej

$$X_{(0)B} = X_{(0)T1} + \frac{1}{2} X_{(0)L} = 0.14 + \frac{1}{2} \cdot 0.9 = 0.59$$

$$X_{(0)R} = \frac{X_{(0)U} \cdot X_{(0)T2}}{X_{(0)U} + X_{(0)T2}} = \frac{0.18 \cdot 0.99}{0.18 + 0.99} = 0.152$$

$$X_{(0)C} = X_{(0)R} + \frac{1}{2} X_{(0)L} = 0.152 + \frac{1}{2} \cdot 0.9 = 0.602$$

$$X_{(0)} = \frac{X_{(0)B} \cdot X_{(0)C}}{X_{(0)B} + X_{(0)C}} = \frac{0.59 \cdot 0.602}{0.59 + 0.602} = 0.298$$

czyli

$$\frac{X_{(0)}}{X_{(1)}} = \frac{0.298}{0.195} = 1.53$$

7. Obliczenie prądów w miejsc zwarcia

$$\underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} = \frac{\underline{E}_{(1)}}{j(\underline{X}_{(1)} + \underline{X}_{(2)} + \underline{X}_{(0)})} = \frac{1.05}{j(0.195 + 0.195 + 0.298)} = -j 1.53$$

$$\underline{I}_{\text{pod}} = \frac{S_{\text{pod}}}{\sqrt{3} U_{\text{pod}}} = \frac{500}{\sqrt{3}(1.05 \cdot 110)} = 2.5 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} = -j1.53 \cdot 2.5 = -j3.82 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{\text{R}} = \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} = 3\underline{I}_{(0)} = -j4.59$$

$$\underline{I}_{\text{S}} = \underline{I}_{(0)} + a^2 \underline{I}_{(1)} + a \underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} (1 + a + a^2) = 0$$

$$\underline{I}_{\text{T}} = \underline{I}_{(0)} + a \underline{I}_{(1)} + a^2 \underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} (1 + a + a^2) = 0$$

$$\underline{I}_{\text{R}} = 4.59 \cdot 2.5 = 11.5 \text{ kA}$$

8. Obliczenie napięć w miejsc zwarcia

$$\underline{U}_{(1)} = \underline{E}_{(1)} - \underline{Z}_{(1)} \underline{I}_{(1)} = 1.05 - j0.195 \cdot (-j1.53) = 1.05 - 0.298 = 0.752$$

$$\underline{U}_{(2)} = -\underline{Z}_{(2)} \underline{I}_{(2)} = -j0.195 \cdot (-j1.53) = -0.298$$

$$\underline{U}_{(0)} = -\underline{Z}_{(0)} \underline{I}_{(0)} = -j0.298 \cdot (-j1.53) = -0.455$$

$$\underline{U}_{\text{R}} = \underline{U}_{(0)} + \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} = -0.455 + 0.752 - 0.298 = 0$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{S}} &= \underline{U}_{(0)} + a^2 \underline{U}_{(1)} + a \underline{U}_{(2)} = \\ &= -0.455 + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) 0.752 + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) (-0.298) = -0.682 - j\frac{\sqrt{3}}{2} 1.05 = \\ &= -0.682 - j0.909 = 1.14 e^{j233^\circ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{T}} &= \underline{U}_{(0)} + a \underline{U}_{(1)} + a^2 \underline{U}_{(2)} = \\ &= -0.455 + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) 0.752 + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) (-0.298) = -0.682 + j\frac{\sqrt{3}}{2} 1.05 = \\ &= -0.682 + j0.909 = 1.14 e^{j127^\circ} \end{aligned}$$

$$U_{\text{podf}} = \frac{U_{\text{pod}}}{\sqrt{3}} = \frac{1.05 \cdot 110}{\sqrt{3}} = 66.7 \text{ kV}$$

$$U_{\text{S}} = U_{\text{T}} = 1.14 \cdot 66.7 = 76.0 \text{ kV}$$

9. Obliczenie prądów w linii od strony B

$$\underline{I}_{(1)LB} = \underline{I}_{(1)} \frac{X_{(1)}}{X_{(1)A}} = -j1.53 \frac{0.195}{0.44} = -j0.676$$

$$\underline{I}_{(2)LB} = \underline{I}_{(1)LB} = -j0.676$$

$$\underline{I}_{(0)LB} = \underline{I}_{(0)} \frac{X_{(0)}}{X_{(0)A}} = -j1.53 \frac{0.298}{0.59} = -j0.771$$

Stosunek

$$\frac{\underline{I}_{(1)LB}}{\underline{I}_{(1)}} = \frac{-j0.676}{-j1.53} = 0.443$$

nazywamy **współczynnikiem udziału** składowej zgodnej prądu w linii od strony B w całej składowej zgodnej. Współczynniki udziału możemy definiować także dla innych prądów.

$$\underline{I}_{RLB} = \underline{I}_{(0)LB} + \underline{I}_{(1)LB} + \underline{I}_{(2)LB} = -j0.771 - j0.676 - j0.676 = -j2.12$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{SLB} &= \underline{I}_{(0)LB} + a^2 \underline{I}_{(1)LB} + a \underline{I}_{(2)LB} = \underline{I}_{(0)LB} + \underline{I}_{(1)LB} (a + a^2) = \underline{I}_{(0)LB} - \underline{I}_{(1)LB} = \\ &= -j0.771 + j0.676 = -j0.095 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{TLB} &= \underline{I}_{(0)LB} + a \underline{I}_{(1)LB} + a^2 \underline{I}_{(2)LB} = \underline{I}_{(0)LB} + \underline{I}_{(1)LB} (a + a^2) = \underline{I}_{(0)LB} - \underline{I}_{(1)LB} = \\ &= -j0.771 + j0.676 = -j0.095 \end{aligned}$$

Prądy, które pojawiły się w fazach zdrowych S i T linii nazywamy **prądami wyrównawczymi** i są one spowodowane nierównomiernym rozplywem składowej zgodnej i zerowej. Gdy rozplyw składowej zgodnej i zerowej jest taki sam prądy te są równe zeru.

$$\underline{I}_{RLB} = 2.12 \cdot 2.5 = 5.31 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{SLB} = \underline{I}_{TLB} = 0.095 \cdot 2.5 = 0.238 \text{ kA}$$

Wartości prądów wyrównawczych mogą osiągnąć wartość nawet powyżej 1 kA i mają istotne znaczenie przy analizie działania elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej podczas zwarcia niesymetrycznych.

10. Obliczenie prądów w linii od strony C

$$\underline{I}_{(1)LC} = \underline{I}_{(1)} \frac{X_{(1)}}{X_{(1)B}} = -j1.53 \frac{0.195}{0.35} = -j0.850$$

$$\underline{I}_{(2)LC} = \underline{I}_{(1)LC} = -j0.850$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$\underline{I}_{(0)LC} = \underline{I}_{(0)} \frac{X_{(0)}}{X_{(0)C}} = -j1.53 \frac{0.298}{0.602} = -j0.755$$

$$\underline{I}_{RLC} = \underline{I}_{(0)LC} + \underline{I}_{(1)LC} + \underline{I}_{(2)LC} = -j0.755 - j0.85 - j0.85 = -j2.46$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{SLC} &= \underline{I}_{(0)LC} + a^2 \underline{I}_{(1)LC} + a \underline{I}_{(2)LC} = \underline{I}_{(0)LC} + \underline{I}_{(1)LC} (a + a^2) = \underline{I}_{(0)LC} - \underline{I}_{(1)LC} = \\ &= -j0.755 + j0.85 = j0.095 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{TLC} &= \underline{I}_{(0)LC} + a \underline{I}_{(1)LC} + a^2 \underline{I}_{(2)LC} = \underline{I}_{(0)LC} + \underline{I}_{(1)LC} (a + a^2) = \underline{I}_{(0)LC} - \underline{I}_{(1)LC} = \\ &= -j0.755 + j0.85 = j0.095 \end{aligned}$$

$$I_{RLC} = 2.46 \cdot 2.5 = 6.14 \text{ kA}$$

$$I_{SLC} = I_{TLC} = 0.095 \cdot 2.5 = 0.238 \text{ kA}$$

11. Obliczenie prądów w układzie elektroenergetycznym

$$\underline{I}_{(1)U} = \underline{I}_{(1)LC} = -j0.850$$

$$\underline{I}_{(2)U} = \underline{I}_{(1)U} = -j0.850$$

$$\underline{I}_{(0)U} = \underline{I}_{(0)LC} \frac{X_{(0)B}}{X_{(0)U}} = -j0.755 \frac{0.152}{0.18} = -j0.638$$

$$\underline{I}_{RU} = \underline{I}_{(0)U} + \underline{I}_{(1)U} + \underline{I}_{(2)U} = -j0.638 - j0.85 - j0.85 = -j2.34$$

$$\underline{I}_{SU} = \underline{I}_{(0)U} + a^2 \underline{I}_{(1)U} + a \underline{I}_{(2)U} = \underline{I}_{(0)U} - \underline{I}_{(1)U} = -j0.638 + j0.85 = j0.212$$

$$\underline{I}_{TU} = \underline{I}_{(0)U} + a \underline{I}_{(1)U} + a^2 \underline{I}_{(2)U} = \underline{I}_{(0)U} - \underline{I}_{(1)U} = -j0.638 + j0.85 = j0.212$$

$$I_{RU} = 2.34 \cdot 2.5 = 5.85 \text{ kA}$$

$$I_{SU} = I_{TU} = 0.212 \cdot 2.5 = 0.530 \text{ kA}$$

12. Obliczanie prądów w transformatorze T2 po stronie górnej

$$\underline{I}_{(1)T2} = \underline{I}_{(2)T2} = 0$$

$$\underline{I}_{(0)T2} = \underline{I}_{(0)LC} \frac{X_{(0)B}}{X_{(0)T2}} = -j0.755 \frac{0.152}{0.99} = -j0.117$$

lub możemy obliczyć powyższą wartość z pierwszego prawa Kirchhoffa

$$\underline{I}_{(0)T2} = \underline{I}_{(0)LB} - \underline{I}_{(0)U} = -j0.755 + j0.638 = -j0.117$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$\underline{I}_{RT2} = \underline{I}_{ST2} = \underline{I}_{TT2} = \underline{I}_{(0)T2} = -j0.117$$

$$\underline{I}_{RT2} = \underline{I}_{ST2} = \underline{I}_{TT2} = 0.117 \cdot 2.5 = 0.290 \text{ kA}$$

13. Obliczanie prądów w generatorze

$$\underline{I}_{(1)G} = \underline{I}_{(1)LB} \cdot e^{-j330^\circ} = -j0.676 \cdot e^{-j330^\circ}$$

$$\underline{I}_{(2)G} = \underline{I}_{(2)LB} \cdot e^{j330^\circ} = -j0.676 \cdot e^{j330^\circ}$$

$$\underline{I}_{(0)G} = 0$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{RG} &= \underline{I}_{(0)G} + \underline{I}_{(1)G} + \underline{I}_{(2)G} = -j0.676 \cdot e^{-j330^\circ} - j0.676 \cdot e^{j330^\circ} = \\ &= -j0.676 (\cos 330^\circ - j \sin 330^\circ + \cos 330^\circ + j \sin 330^\circ) = -j0.676 \frac{\sqrt{3}}{2} 2 = -j1.17 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{SG} &= \underline{I}_{(0)G} + a^2 \underline{I}_{(1)G} + a \underline{I}_{(2)G} = -j0.676 (e^{j240^\circ} \cdot e^{-j330^\circ} + e^{j120^\circ} \cdot e^{j330^\circ}) = \\ &= -j0.676 (e^{-j90^\circ} + e^{j90^\circ}) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{TG} &= \underline{I}_{(0)G} + a \underline{I}_{(1)G} + a^2 \underline{I}_{(2)G} = -j0.676 (e^{j120^\circ} \cdot e^{-j330^\circ} + e^{j240^\circ} \cdot e^{j330^\circ}) = \\ &= -j0.676 (e^{-j210^\circ} + e^{j210^\circ}) = -j0.676 \cdot 2 \cdot \cos 210^\circ = j1.17 \end{aligned}$$

$$\underline{I}_{pod} = \frac{S_{pod}}{\sqrt{3} U_{pod}} = \frac{500}{\sqrt{3} (1.05 \cdot 22)} = 13.1 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{RG} = \underline{I}_{TG} = 1.17 \cdot 13.1 = 15.3 \text{ kA}$$

14. Obliczenie napięcia na szynach B

$$\begin{aligned} \underline{U}_{(1)B} &= \underline{U}_{(1)} + j \frac{1}{2} X_{(1)L} \cdot \underline{I}_{(1)LB} = 0.752 + j \frac{1}{2} 0.3 \cdot (-j0.676) = \\ &= 0.752 + 0.101 = 0.853 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{(2)B} &= \underline{U}_{(2)} + j \frac{1}{2} X_{(2)L} \cdot \underline{I}_{(2)LB} = -0.298 + j \frac{1}{2} 0.3 \cdot (-j0.676) = \\ &= -0.298 + 0.101 = -0.197 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{(0)B} &= \underline{U}_{(0)} + j \frac{1}{2} X_{(0)L} \cdot \underline{I}_{(0)LB} = -0.455 + j \frac{1}{2} 0.9 \cdot (-j0.771) = \\ &= -0.455 + 0.347 = -0.108 \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{RB} = \underline{U}_{(0)B} + \underline{U}_{(1)B} + \underline{U}_{(2)B} = -0.108 + 0.853 - 0.197 = 0.548$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{SB} &= \underline{U}_{(0)B} + a^2 \underline{U}_{(1)B} + a \underline{U}_{(2)B} = \\ &= -0.108 + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)0.853 + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-0.197) = -0.436 - j\frac{\sqrt{3}}{2}1.05 = -0.436 - j0.909 = 1.01 e^{j244^\circ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{TB} &= \underline{U}_{(0)B} + a \underline{U}_{(1)B} + a^2 \underline{U}_{(2)B} = \\ &= -0.108 + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)0.853 + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)(-0.197) = -0.436 + j\frac{\sqrt{3}}{2}1.05 = -0.436 + j0.909 = 1.01 e^{j116^\circ} \end{aligned}$$

$$U_{RB} = 0.548 \cdot 66.7 = 36.6 \text{ kV}$$

$$U_{SB} = U_{TB} = 1.01 \cdot 66.7 = 67.4 \text{ kV}$$

15. Obliczenie napięcia na generatorze

$$\begin{aligned} \underline{U}_{(1)G} &= (\underline{E}_{(1)} - jX_{(1)G} \cdot \underline{I}_{(1)LB}) e^{-j330^\circ} = [1.05 - j0.15 \cdot (-j0.676)] e^{-j330^\circ} = \\ &= 0.949 e^{-j330^\circ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{(2)G} &= (-jX_{(2)G} \cdot \underline{I}_{(2)LB}) e^{j330^\circ} = [-j0.15 \cdot (-j0.676)] e^{j330^\circ} = \\ &= -0.101 e^{j330^\circ} \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{(0)G} = 0$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{RG} &= \underline{U}_{(0)G} + \underline{U}_{(1)G} + \underline{U}_{(2)G} = 0.949 \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2}\right) - 0.101 \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right) = \\ &= 0.734 + j0.525 = 0.902 e^{j35.6^\circ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{SG} &= \underline{U}_{(0)G} + a^2 \underline{U}_{(1)G} + a \underline{U}_{(2)G} = \\ &= 0.949 e^{j30^\circ} e^{j240^\circ} - 0.101 e^{-j30^\circ} e^{j120^\circ} = 0.949 e^{j270^\circ} - 0.101 e^{j90^\circ} = \\ &= -j1.05 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{TG} &= \underline{U}_{(0)G} + a \underline{U}_{(1)G} + a^2 \underline{U}_{(2)G} = \\ &= 0.949 e^{j30^\circ} e^{j120^\circ} - 0.101 e^{-j30^\circ} e^{j240^\circ} = 0.949 e^{j150^\circ} - 0.101 e^{j210^\circ} = \\ &= 0.949 \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2}\right) - 0.101 \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right) = -0.734 + j0.525 = \\ &= 0.902 e^{j144^\circ} \end{aligned}$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$U_{RG} = U_{TG} = 0.902 \frac{1.05 \cdot 22}{\sqrt{3}} = 12.0 \text{ kV}$$

$$U_{SG} = 1.05 \frac{1.05 \cdot 22}{\sqrt{3}} = 14.0 \text{ kV}$$

16. Obliczenie napięcia na szynach C

$$\begin{aligned} \underline{U}_{(1)C} &= \underline{U}_{(1)} + j \frac{1}{2} X_{(1)L} \cdot \underline{I}_{(1)LC} = 0.752 + j \frac{1}{2} 0.3 \cdot (-j0.850) = \\ &= 0.752 + 0.128 = 0.880 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{(2)C} &= \underline{U}_{(2)} + j \frac{1}{2} X_{(2)L} \cdot \underline{I}_{(2)LC} = -0.298 + j \frac{1}{2} 0.3 \cdot (-j0.850) = \\ &= -0.298 + 0.128 = -0.170 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{(0)C} &= \underline{U}_{(0)} + j \frac{1}{2} X_{(0)L} \cdot \underline{I}_{(0)LC} = -0.455 + j \frac{1}{2} 0.9 \cdot (-j0.755) = \\ &= -0.455 + 0.340 = -0.115 \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{RC} = \underline{U}_{(0)C} + \underline{U}_{(1)C} + \underline{U}_{(2)C} = -0.115 + 0.880 - 0.171 = 0.594$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{SC} &= \underline{U}_{(0)C} + a^2 \underline{U}_{(1)C} + a \underline{U}_{(2)C} = \\ &= -0.115 + \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) 0.880 + \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) (-0.171) = -0.470 - j \frac{\sqrt{3}}{2} 1.05 = \\ &= -0.470 - j0.909 = 1.02 e^{j243^\circ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{TC} &= \underline{U}_{(0)C} + a \underline{U}_{(1)C} + a^2 \underline{U}_{(2)C} = \\ &= -0.115 + \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) 0.880 + \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) (-0.171) = -0.470 + j \frac{\sqrt{3}}{2} 1.05 = \\ &= -0.470 + j0.909 = 1.02 e^{j117^\circ} \end{aligned}$$

$$U_{RC} = 0.594 \cdot 66.7 = 39.6 \text{ kV}$$

$$U_{SCB} = U_{TC} = 1.02 \cdot 66.7 = 68.0 \text{ kV}$$

17. Obliczenie napięcia na szynach D

$$\underline{U}_{(1)D} = \underline{U}_{(1)C} e^{-j330^\circ} = 0.880 e^{-j330^\circ}$$

$$\underline{U}_{(2)D} = \underline{U}_{(2)C} e^{j330^\circ} = -0.171 e^{j330^\circ}$$

$$\underline{U}_{(0)D} = 0$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$\begin{aligned}\underline{U}_{RD} &= \underline{U}_{(0)D} + \underline{U}_{(1)D} + \underline{U}_{(2)D} = 0.88 \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) - 0.171 \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2} \right) = \\ &= 0.614 + j0.525 = 0.808 e^{j40.5^\circ}\end{aligned}$$

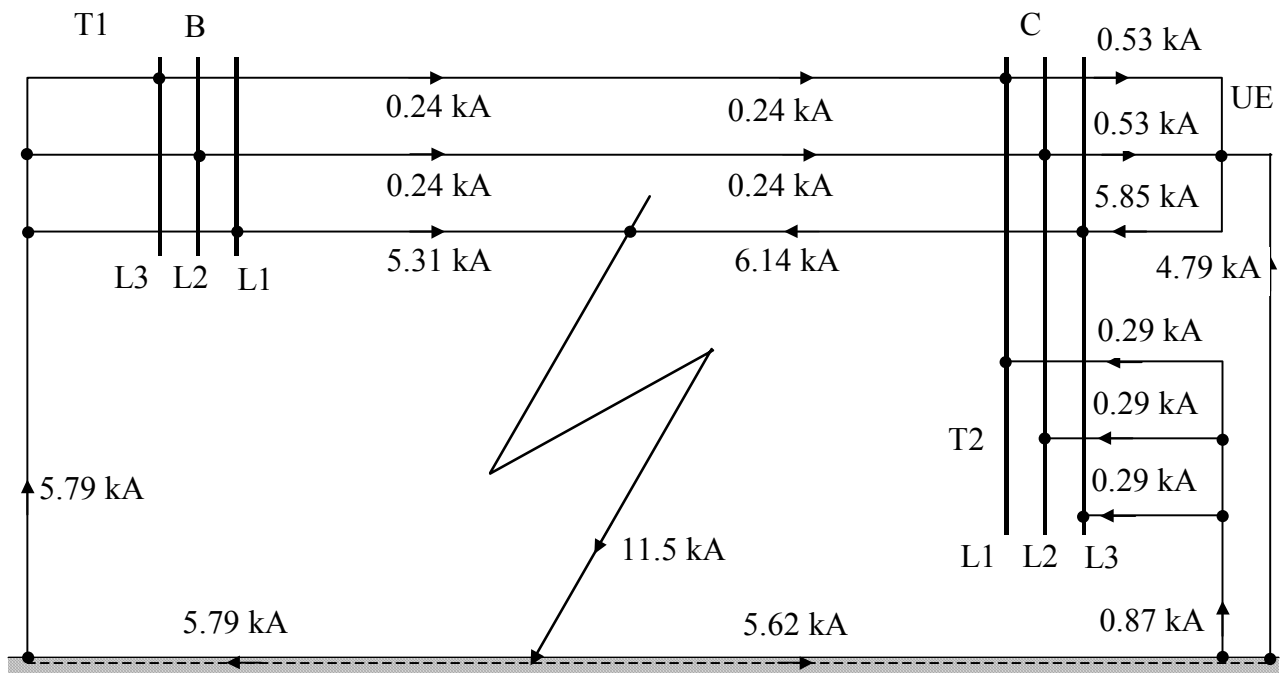
$$\begin{aligned}\underline{U}_{SD} &= \underline{U}_{(0)D} + a^2 \underline{U}_{(1)D} + a \underline{U}_{(2)D} = \\ &= 0.88 e^{j30^\circ} e^{j240^\circ} - 0.171 e^{-j30^\circ} e^{j120^\circ} = 0.88 e^{j270^\circ} - 0.171 e^{j90^\circ} = \\ &= -j1.05\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{U}_{TD} &= \underline{U}_{(0)D} + a \underline{U}_{(1)D} + a^2 \underline{U}_{(2)D} = \\ &= 0.88 e^{j30^\circ} e^{j120^\circ} - 0.171 e^{-j30^\circ} e^{j240^\circ} = 0.88 e^{j150^\circ} - 0.171 e^{j210^\circ} = \\ &= 0.88 \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) - 0.171 \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2} \right) = -0.614 + j0.525 = \\ &= 0.808 e^{j139^\circ}\end{aligned}$$

$$U_{RD} = U_{TD} = 0.808 \cdot \frac{1.05 \cdot 15}{\sqrt{3}} = 7.35 \text{ kV}$$

$$U_{SD} = 1.05 \cdot \frac{1.05 \cdot 15}{\sqrt{3}} = 9.53 \text{ kV}$$

18. Rozpływ prądów fazowych w sieci 110 kV

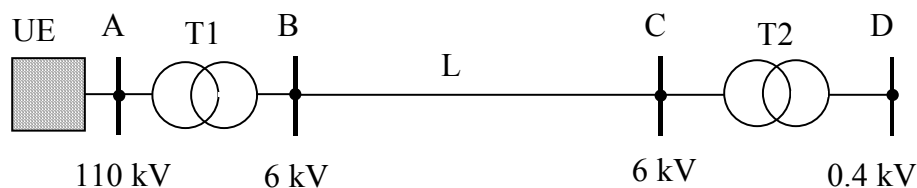


Rys. 4.50 Rozpływ prądów fazowych w sieci 110 kV.

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

4.17.3. Zadanie 3

Dany jest układ elektroenergetyczny jak na poniższym rysunku.



Rys. 4.51 Schemat sieci.

Dane znamionowe elementów sieci:

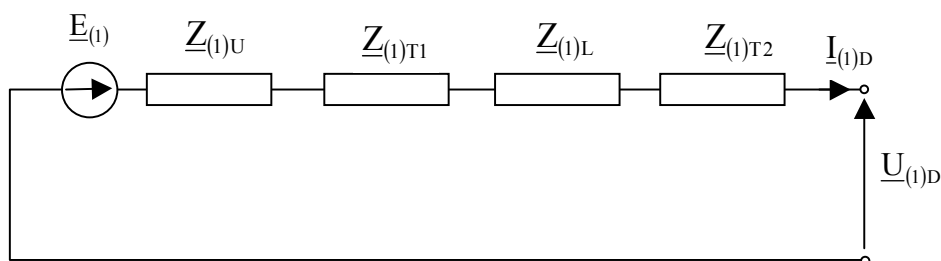
$$\begin{aligned}
 \text{UE:} \quad & S_Z = 2500 \text{ MVA}; \quad \frac{X_{(0)U}}{X_{(1)U}} = 1.2; \\
 \text{T1:} \quad & S_N = 25 \text{ MVA}; \quad \vartheta = \frac{115 \text{ kV}}{6 \text{ kV}}; \quad \Delta U_{z\%} = 11 \%; \\
 & \text{YNd11}; \quad \text{rdzeń trójkolumnowy}; \\
 \text{T2:} \quad & S_N = 1.0 \text{ MVA}; \quad \vartheta = \frac{6 \text{ kV}}{0.4 \text{ kV}}; \quad \Delta U_{z\%} = 7 \%; \\
 & \text{Dyn5}; \quad \text{rdzeń trójkolumnowy}; \\
 \text{L:} \quad & X_{(1)Lk} = 0.1 \Omega/\text{km}; \quad l = 1.0 \text{ km};
 \end{aligned}$$

Dla zwarcia:

1. jednofazowego,
 2. dwufazowego,
 3. trójfazowego,
- na szynach D należy obliczyć:
4. prąd i napięcie w miejscu zwarcia,
 5. prądy we wszystkich gałęziach sieci,
 6. napięcia we wszystkich węzłach sieci.

Rozwiązanie

1. Schemat zastępczy dla składowej zgodnej



Rys. 4.52 Schemat zastępczy sieci dla składowej zgodnej.

2. Przyjmujemy moc podstawową $S_{pod} = 250 \text{ MVA}$.

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

3. Obliczenie impedancji elementów dla składowej zgodnej

$$X_{(1)U} = \frac{S_{\text{pod}}}{S_Z} = \frac{250}{2500} = 0.10$$

$$X_{(1)T1} = \frac{\Delta U_{Z\%}}{100} \frac{S_{\text{pod}}}{S_{NT1}} = \frac{11}{100} \frac{250}{25} = 1.1$$

$$X_{(1)T2} = \frac{\Delta U_{Z\%}}{100} \frac{S_{\text{pod}}}{S_{NT2}} = \frac{7}{100} \frac{250}{1} = 17.5$$

$$X_{(1)L} = X_{(1)Lk} \cdot 1 \cdot \frac{S_{\text{pod}}}{(1.05 \cdot U_{NL})^2} = 0.1 \cdot 1.0 \cdot \frac{250}{(1.05 \cdot 6)^2} = 0.630$$

4. Zwarcie trójfazowe na szynach D

a) Obliczenie impedancji zwarciowej dla składowej zgodnej

$$X_{(1)D} = X_{(1)U} + X_{(1)T1} + X_{(1)L} + X_{(1)T2} = 0.1 + 1.1 + 0.63 + 17.5 = 19.3$$

b) Obliczenie prądów w miejsc zwarcia

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{\underline{E}_{(1)}}{j X_{(1)}} = \frac{1.05}{j 19.3} = -j0.0544$$

$$\underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} = 0$$

$$I_{\text{pod}} = \frac{S_{\text{pod}}}{\sqrt{3} U_{\text{pod}}} = \frac{250}{\sqrt{3} (1.05 \cdot 0.38)} = 362 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(1)} = -j0.0544 \cdot 362 = -j19.7 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_R = \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(1)} = -j19.7 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_S = \underline{I}_{(0)} + a^2 \underline{I}_{(1)} + a \underline{I}_{(2)} = a^2 \underline{I}_{(1)} = -j19.7 e^{j240^\circ} \text{ kA}$$

$$\underline{I}_T = \underline{I}_{(0)} + a \underline{I}_{(1)} + a^2 \underline{I}_{(2)} = a \underline{I}_{(1)} = -j19.7 e^{j120^\circ} \text{ kA}$$

c) Obliczenie przybliżonej wartości prądu w miejsc zwarcia

$$I_{NT2d} = \frac{S_{NT2}}{\sqrt{3} U_{NT2d}} = \frac{1000}{\sqrt{3} 0.4} = 1.44 \text{ kA}$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$I_P = \frac{100}{\Delta U_{z\%}} I_{NT2} = \frac{100}{7} \cdot 1.44 = 20.6 \text{ kA}$$

d) Obliczenie prądów po stronie górnej transformatora T2

$$I_{\text{pod}} = \frac{S_{\text{pod}}}{\sqrt{3} U_{\text{pod}}} = \frac{250}{\sqrt{3} (1.05 \cdot 6)} = 22.9 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(1)T2g} = \underline{I}_{(1)} e^{j150^\circ} = -j0.0544 e^{j150^\circ}$$

$$\underline{I}_{(2)T2g} = \underline{I}_{(0)T2g} = 0$$

$$\underline{I}_{RT2g} = \underline{I}_{(0)T2g} + \underline{I}_{(1)T2g} + \underline{I}_{(2)T2g} = \underline{I}_{(1)T2g} = -j0.0544 e^{j150^\circ}$$

$$\underline{I}_{ST2g} = \underline{I}_{(0)T2g} + a^2 \underline{I}_{(1)T2g} + a \underline{I}_{(2)T2g} = a^2 \underline{I}_{(1)T2g} = -j0.0544 e^{j30^\circ}$$

$$\underline{I}_{TT2g} = \underline{I}_{(0)T2g} + a \underline{I}_{(1)T2g} + a^2 \underline{I}_{(2)T2g} = a \underline{I}_{(1)T2g} = -j0.0544 e^{j270^\circ}$$

$$I_{RT2g} = I_{ST2g} = I_{TT2g} = 0.0544 \cdot 22.9 = 1.25 \text{ kA}$$

e) Obliczenie prądów po stronie górnej transformatora T1

$$I_{\text{pod}} = \frac{S_{\text{pod}}}{\sqrt{3} U_{\text{pod}}} = \frac{250}{\sqrt{3} (1.05 \cdot 110)} = 1.25 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(1)T1g} = \underline{I}_{(1)} e^{j150^\circ} e^{j330^\circ} = -j0.0544 e^{j120^\circ} \quad \underline{I}_{(2)T1g} = \underline{I}_{(0)T1g} = 0$$

$$\underline{I}_{RT1g} = \underline{I}_{(0)T1g} + \underline{I}_{(1)T1g} + \underline{I}_{(2)T1g} = \underline{I}_{(1)T1g} = -j0.0544 e^{j120^\circ}$$

$$\underline{I}_{ST1g} = \underline{I}_{(0)T1g} + a^2 \underline{I}_{(1)T1g} + a \underline{I}_{(2)T1g} = a^2 \underline{I}_{(1)T1g} = -j0.0544$$

$$\underline{I}_{TT1g} = \underline{I}_{(0)T1g} + a \underline{I}_{(1)T1g} + a^2 \underline{I}_{(2)T1g} = a \underline{I}_{(1)T1g} = -j0.0544 e^{j240^\circ}$$

$$I_{RT1g} = I_{ST1g} = I_{TT1g} = 0.0544 \cdot 1.25 = 68 \text{ A}$$

f) Obliczenie napięć po stronie górnej transformatora T2

$$\underline{U}_{(1)C} = (\underline{U}_{(1)} + j \mathbf{X}_{(1)T2} \cdot \underline{I}_{(1)}) e^{j150^\circ} = [0 + j17.5 \cdot (-j0.0544)] e^{j150^\circ} = 0.950 e^{j150^\circ}$$

$$\underline{U}_{(2)C} = \underline{U}_{(0)C} = 0$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$\underline{U}_{RC} = \underline{U}_{(0)C} + \underline{U}_{(1)C} + \underline{U}_{(2)C} = 0.950 e^{j150^\circ}$$

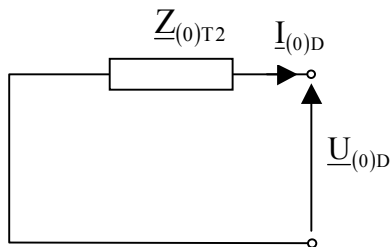
$$\underline{U}_{SC} = \underline{U}_{(0)C} + a^2 \underline{U}_{(1)C} + a \underline{U}_{(2)C} = 0.950 e^{j30^\circ}$$

$$\underline{U}_{TC} = \underline{U}_{(0)C} + a \underline{U}_{(1)C} + a^2 \underline{U}_{(2)C} = 0.950 e^{j270^\circ}$$

$$U_{RC} = U_{SC} = U_{TC} = 0.950 \cdot \frac{1.05 \cdot 6}{\sqrt{3}} = 3.46 \text{ kV}$$

5. Zwarcie jednofazowe na szynach D

a) Schemat zastępczy dla składowej zerowej



Rys. 4.53 Schemat zastępczy sieci dla składowej zerowej.

b) Obliczenie impedancji elementów dla składowej

$$X_{(0)T2} = 0.85 \cdot X_{(1)T2} = 0.85 \cdot 17.5 = 14.9$$

c) Obliczenie impedancji zwarciowej dla składowej zerowej

$$X_{(0)D} = X_{(0)T2} = 14.9$$

d) Obliczenie prądów w miejsc zwarcia

$$\underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} = \frac{\underline{E}_{(1)}}{j(X_{(1)} + X_{(2)} + X_{(0)})} = \frac{1.05}{j(19.3 + 19.3 + 14.9)} = -j0.0196$$

$$\underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} = -j0.0196 \cdot 362 = -j7.10 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_R = \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} = 3\underline{I}_{(0)} = -j21.3 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_S = \underline{I}_{(0)} + a^2 \underline{I}_{(1)} + a \underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} (1 + a + a^2) = 0$$

$$\underline{I}_T = \underline{I}_{(0)} + a \underline{I}_{(1)} + a^2 \underline{I}_{(2)} = \underline{I}_{(0)} (1 + a + a^2) = 0$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

e) Obliczenie prądów po stronie górnej transformatora T2

$$\underline{I}_{(1)T2g} = \underline{I}_{(1)} e^{j150^\circ} = -j0.0196 e^{j150^\circ}$$

$$\underline{I}_{(2)T2g} = \underline{I}_{(2)} e^{-j150^\circ} = -j0.0196 e^{-j150^\circ} \quad \underline{I}_{(0)T2g} = 0$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{RT2g} &= \underline{I}_{(0)T2g} + \underline{I}_{(1)T2g} + \underline{I}_{(2)T2g} = -j0.0196 \left(e^{j150^\circ} + e^{-j150^\circ} \right) = \\ &= -j0.0196 \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2} \right) = j\sqrt{3} 0.0196 = j0.0339 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ST2g} &= \underline{I}_{(0)T2g} + a^2 \underline{I}_{(1)T2g} + a \underline{I}_{(2)T2g} = \\ &= -j0.0196 \left(e^{j240^\circ} e^{j150^\circ} + e^{j120^\circ} e^{-j150^\circ} \right) = -j0.0196 \left(e^{j30^\circ} + e^{-j30^\circ} \right) = \\ &= -j0.0196 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2} \right) = -j\sqrt{3} 0.0196 = -j0.0339 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{TT2g} &= \underline{I}_{(0)T2g} + a \underline{I}_{(1)T2g} + a^2 \underline{I}_{(2)T2g} = a \underline{I}_{(1)T2g} = \\ &= -j0.0196 \left(e^{j120^\circ} e^{j150^\circ} + e^{j240^\circ} e^{-j150^\circ} \right) = -j0.0196 \left(e^{j270^\circ} + e^{j90^\circ} \right) = 0 \end{aligned}$$

$$\underline{I}_{RT2g} = \underline{I}_{ST2g} = 0.0336 \cdot 22.9 = 0.776 \text{ kA}$$

f) Obliczenie prądów po stronie górnej transformatora T1

$$\underline{I}_{(1)T1g} = \underline{I}_{(1)} e^{j150^\circ} e^{j330^\circ} = -j0.0196 e^{j120^\circ}$$

$$\underline{I}_{(2)T1g} = \underline{I}_{(2)} e^{-j150^\circ} e^{-j330^\circ} = -j0.0196 e^{-j120^\circ} \quad \underline{I}_{(0)T1g} = 0$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{RT1g} &= \underline{I}_{(0)T1g} + \underline{I}_{(1)T1g} + \underline{I}_{(2)T1g} = -j0.0196 \left(e^{j120^\circ} + e^{-j120^\circ} \right) = \\ &= -j0.0196 \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = j 0.0196 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ST1g} &= \underline{I}_{(0)T1g} + a^2 \underline{I}_{(1)T1g} + a \underline{I}_{(2)T1g} = \\ &= -j0.0196 \left(e^{j240^\circ} e^{j120^\circ} + e^{j120^\circ} e^{-j120^\circ} \right) = -j0.0196 \left(e^{j0^\circ} + e^{j0^\circ} \right) = -j0.0392 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{TT1g} &= \underline{I}_{(0)T1g} + a \underline{I}_{(1)T1g} + a^2 \underline{I}_{(2)T1g} = \\ &= -j0.0196 \left(e^{j120^\circ} e^{j120^\circ} + e^{j240^\circ} e^{-j120^\circ} \right) = -j0.0196 \left(e^{j240^\circ} + e^{j120^\circ} \right) = \end{aligned}$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$= -j0.0196 \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = j0.0196$$

$$I_{RT2g} = I_{TT2g} = 0.0196 \cdot 1.25 = 24.5 \text{ A}$$

$$I_{ST2g} = 0.0392 \cdot 1.25 = 49.0 \text{ A}$$

g) Obliczenie napięć w miejscu zwarcia

$$\underline{U}_{(1)D} = \underline{E}_{(1)} - jX_{(1)} \cdot \underline{I}_{(1)} = 1.05 - j19.3 \cdot (-j0.0196) = 0.671$$

$$\underline{U}_{(2)D} = -jX_{(2)} \cdot \underline{I}_{(2)} = -j19.3 \cdot (-j0.0196) = -0.379$$

$$\underline{U}_{(0)D} = -jX_{(0)} \cdot \underline{I}_{(0)} = -j14.9 \cdot (-j0.0196) = -0.292$$

$$\underline{U}_{RD} = \underline{U}_{(0)D} + \underline{U}_{(1)D} + \underline{U}_{(2)D} = -0.292 + 0.671 - 0.379 = 0$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{SD} &= \underline{U}_{(0)D} + a^2 \underline{U}_{(1)D} + a \underline{U}_{(2)D} = \\ &= -0.292 + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) 0.671 + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (-0.379) = -0.438 - j0.909 = 1.01 e^{j244^\circ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{TD} &= \underline{U}_{(0)D} + a \underline{U}_{(1)D} + a^2 \underline{U}_{(2)D} = \\ &= -0.292 + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) 0.671 + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (-0.379) = -0.438 + j0.909 = 1.01 e^{j116^\circ} \end{aligned}$$

$$U_{SD} = U_{TD} = 1.01 \frac{1.05 \cdot 380}{\sqrt{3}} = 233 \text{ V}$$

h) Obliczenie napięć po stronie górnej transformatora T2

$$\begin{aligned} \underline{U}_{(1)C} &= (\underline{U}_{(1)} + jX_{(1)T2} \cdot \underline{I}_{(1)}) e^{j150^\circ} = [0.671 + j17.5 \cdot (-j0.0196)] e^{j150^\circ} = \\ &= 1.014 e^{j150^\circ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{(2)C} &= (\underline{U}_{(2)} + jX_{(2)T2} \cdot \underline{I}_{(2)}) e^{j150^\circ} = [-0.379 + j17.5 \cdot (-j0.0196)] e^{-j150^\circ} = \\ &= -0.036 e^{-j150^\circ} \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{(0)C} = 0$$

$$\underline{U}_{RC} = \underline{U}_{(0)C} + \underline{U}_{(1)C} + \underline{U}_{(2)C} = 1.014 e^{j150^\circ} - 0.036 e^{-j150^\circ} =$$

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$= 1.014 \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) - 0.036 \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2} \right) = -0.847 + j0.525 = 0.997 e^{j148^\circ}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{SC} &= \underline{U}_{(0)C} + a^2 \underline{U}_{(1)C} + a \underline{U}_{(2)C} = 1.014 e^{j240^\circ} e^{j150^\circ} - 0.036 e^{j120^\circ} e^{-j150^\circ} = \\ &= 1.014 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) - 0.036 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2} \right) = 0.847 + j0.525 = \\ &= 0.997 e^{j32^\circ} \end{aligned}$$

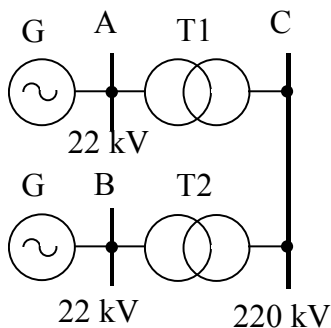
$$\begin{aligned} \underline{U}_{TC} &= \underline{U}_{(0)C} + a \underline{U}_{(1)C} + a^2 \underline{U}_{(2)C} = 1.014 e^{j120^\circ} e^{j150^\circ} - 0.036 e^{j240^\circ} e^{-j150^\circ} = \\ &= 1.014(-j1) - 0.036(j1) = -j1.05 \end{aligned}$$

$$U_{RC} = U_{SC} = 0.997 \cdot \frac{1.05 \cdot 6}{\sqrt{3}} = 3.63 \text{ kV}$$

$$U_{TC} = 1.05 \cdot \frac{1.05 \cdot 6}{\sqrt{3}} = 3.81 \text{ kV}$$

4.17.4. Zadanie 4

Dany jest układ elektroenergetyczny jak na poniższym rysunku.



Rys. 4.54 Schemat sieci.

Dane znamionowe elementów sieci:

$$G: \quad U_N=22 \text{ kV}; \quad S_N=500 \text{ MVA}; \quad X''_{d\%} = 15\%;$$

$$T1: \quad S_N=500 \text{ MVA}; \quad \vartheta = \frac{220 \text{ kV}}{22 \text{ kV}}; \quad \Delta U_{z\%}=14\%; \quad YNd11; \quad \text{rdzeń pięciokolumnowy};$$

$$T2: \quad S_N=500 \text{ MVA}; \quad \vartheta = \frac{220 \text{ kV}}{22 \text{ kV}}; \quad \Delta U_{z\%}=14\%; \quad Yd11; \quad \text{rdzeń pięciokolumnowy};$$

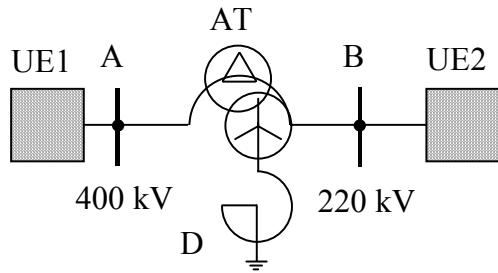
Dla jednofazowego zwarcia na szynach C obliczyć:

- prądy i napięcia w miejscu zwarcia,
- rozptyw prądów w całym układzie,
- napięcie punktu gwiazdowego transformatora T2 względem ziemi.

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

4.17.5. Zadanie 5

Dany jest układ elektroenergetyczny jak na poniższym rysunku.



Rys. 4.55 Schemat sieci.

Dane znamionowe elementów sieci:

$$\text{UE1: } S_Z=15\,000 \text{ MVA}; \quad \frac{X_{(0)U}}{X_{(1)U}} = 1.5;$$

$$\text{UE2: } S_Z=4\,000 \text{ MVA}; \quad \frac{X_{(0)U}}{X_{(1)U}} = 0.9;$$

$$\text{AT: } S_N=500/500/50 \text{ MVA}; \quad \vartheta = 400 \text{ kV}/220 \text{ kV}/15 \text{ kV};$$

$$\Delta U_{Z\,G-D}=10\%; \quad \Delta U_{Z\,G-W}=34\%; \quad \Delta U_{Z\,D-W}=20\%; \quad YN_{\text{auto}}d11;$$

rdzeń pięciokolumnowy;

$$\text{D: } X_{(1)D} = X_{(2)D} = X_{(0)D} = 1.0 \Omega.$$

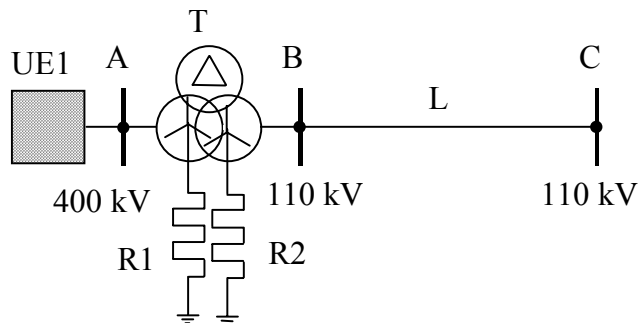
Dla zwarcia jednofazowego na szynach B obliczyć:

- s) prądy i napięcia w miejscu zwarcia,
- t) rozpyły prądów w całym układzie, w tym i prądy płynące przez dławik i w uzwojeniu wyrównawczym autotransformatora,
- u) napięcie punktu gwiazdowego autotransformatora względem ziemi.

Obliczenia powtórzyć dla bezpośredniego uzziemienia punktu gwiazdowego autotransformatora.

4.17.6. Zadanie 6

Dany jest układ elektroenergetyczny jak na poniższym rysunku.



Rys. 4.56 Schemat sieci.

A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

Dane znamionowe elementów sieci:

$$\text{UE: } S_Z = 10\,000 \text{ MVA}; \quad \frac{X_{(0)U}}{X_{(1)U}} = 1.5;$$

$$S_n = 250 \text{ MVA} / 250 \text{ MVA} / 50 \text{ MVA} \quad U_{ng} = 400 \text{ kV} \quad U_{nd} = 115 \text{ kV} \quad U_{nw} = 15 \text{ kV}$$

$$\text{T: } \Delta U_{zg-d} = 15.5\% \Delta U_{zg-w} = 12.5\% \Delta U_{zd-w} = 9.0\%$$

$$\Delta P_{cug-d} = 950 \text{ kW} \quad \Delta P_{cug-w} = 900 \text{ kW} \quad \Delta P_{cud-w} = 700 \text{ kW} \quad \text{YnYnd11}$$

rdzeń pięciokolumnowy;

$$\text{L: } U_n = 110 \text{ kV} \quad R_{(1)k} = 0.24 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad X_{(1)k} = 0.42 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad X_{(0)k} = 1.07 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad L = 20 \text{ km}$$

Rezystancje uziemienia: $R_1 = R_2 = 0.5 \Omega$;

Dla zwarcia jednofazowego na szynach C przez rezystancję łuku $R_l = 0.1 \Omega$ obliczyć:

- prądy i napięcia w miejscu zwarcia,
- rozpływ prądów w całym układzie,
- napięcia na szynach B i A,
- napięcia punktu gwiazdowego transformatora T względem ziemi,
- moc wydzielaną na R_1 oraz R_2 ,
- moc czynną składowej zerowej płynącą przez szyny B.

Dodatkowo narysować wykres wskazowy prądów i napięć na szynach C oraz B.

Obliczenia powtórzyć dla zwarcia dwufazowego doziemnego oraz dwufazowego.