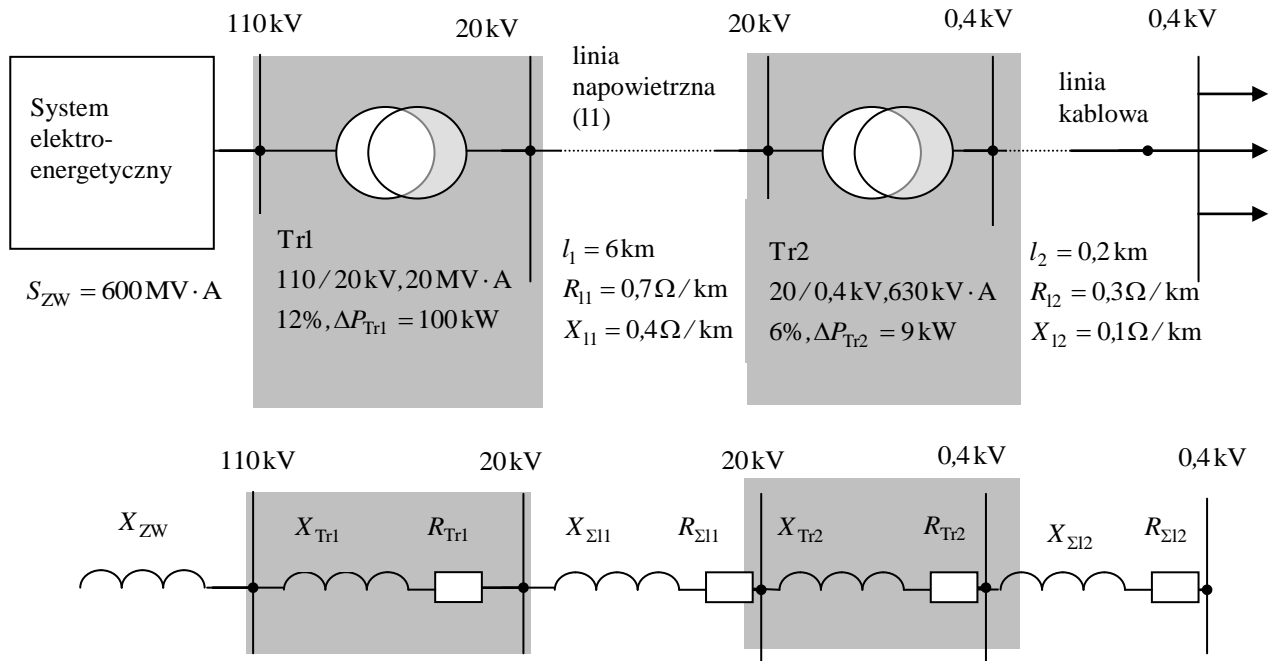


### PRZYKŁAD 3.1. [1]

Dla układu jak na rysunku Z8.1:

- o wyznaczyć parametry schematu zastępczego
- o wyznaczyć wartość mocy zwarciowej na poziomie 0,4 kV.



Rysunek Z8.1. Schemat ideowy i zastępczy sieci zasilającej (Przykład 3.1)

Impedancja sieci zasilającej:

$$X_{ZW} = \frac{U_N^2}{S_{ZW}} = \frac{110^2}{600} = 20,16 \Omega \quad (\text{na poziomie } 110 \text{ kV})$$

$$X_{ZW}^* = X_{ZW} \left( \frac{U}{U_N} \right)^2 = 20,16 \cdot \left( \frac{0,4}{110} \right)^2 = 0,27 \text{ m}\Omega \quad (\text{na poziomie } 0,4 \text{ kV})$$

Impedancja zastępcza transformatora Tr1:

$$U_R = \frac{100 \Delta P_{Tr1}}{S_{Tr1}} = \frac{100 \cdot 100 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^6} = 0,5\% \quad U_X = \sqrt{U_{ZW,Tr1}^2 - U_R^2} = \sqrt{12^2 - 0,5^2} = 11,99\%$$

gdzie  $U_{ZW,Tr1}$  jest napięciem zwarcia transformatora Tr1.

$$X_{Tr1} = \frac{U_X}{100} \frac{U_{Tr1}^2}{S_{Tr1}} = \frac{11,99}{100} \frac{20^2}{20} = 2,4 \Omega \quad (\text{na poziomie } 20 \text{ kV})$$

$$X_{Tr1}^* = X_{Tr1} \left( \frac{U}{U_{Tr1}} \right)^2 = 2,4 \left( \frac{0,4}{20} \right)^2 = 0,96 \text{ m}\Omega \quad (\text{na poziomie } 0,4 \text{ kV})$$

$$R_{Tr1} = \frac{U_R}{100} \frac{U_{Tr1}^2}{S_{Tr1}} = \frac{0,5}{100} \frac{20^2}{20} = 0,1 \Omega \quad (\text{na poziomie } 20 \text{ kV})$$

$$R_{Tr1}^* = R_{Tr1} \left( \frac{U}{U_{Tr1}} \right)^2 = 0,1 \left( \frac{0,4}{20} \right)^2 = 0,04 \text{ m}\Omega \quad (\text{na poziomie } 0,4 \text{ kV})$$

Impedancja zastępcza transformatora Tr2:

$$U_R = \frac{100 \Delta P_{Tr2}}{S_{Tr2}} = \frac{100 \cdot 9}{630} = 1,43\% \quad U_X = \sqrt{U_{ZW,Tr2}^2 - U_R^2} = \sqrt{6^2 - 1,43^2} = 5,83\%$$

gdzie  $U_{ZW,Tr2}$  jest napięciem zwarcia transformatora Tr2.

$$X_{Tr2} = \frac{U_X}{100} \frac{U_{Tr2}^2}{S_{Tr2}} = \frac{5,83}{100} \frac{0,4^2}{0,630} = 14,8 \text{ m}\Omega = X_{Tr2}^* \quad (\text{na poziomie } 0,4 \text{ kV})$$

$$R_{Tr2} = \frac{U_R}{100} \frac{U_{Tr2}^2}{S_{Tr2}} = \frac{1,43}{100} \frac{0,4^2}{0,630} = 3,63 \text{ m}\Omega = R_{Tr2}^* \quad (\text{na poziomie } 0,4 \text{ kV})$$

Impedancja zastępcza linii napowietrznej:

$$R_{\Sigma 11} = R_{11} l_1 = 0,7 \cdot 6 = 4,2 \Omega \quad (\text{na poziomie } 20 \text{ kV})$$

$$R_{\Sigma 11}^* = R_{\Sigma 11} \left( \frac{0,4}{20} \right)^2 = 1,68 \text{ m}\Omega \quad (\text{na poziomie } 0,4 \text{ kV})$$

$$X_{\Sigma 11} = X_{11} l_1 = 0,4 \cdot 6 = 2,4 \Omega \quad (\text{na poziomie } 20 \text{ kV})$$

$$X_{\Sigma 11}^* = X_{\Sigma 11} \left( \frac{0,4}{20} \right)^2 = 0,96 \text{ m}\Omega \quad (\text{na poziomie } 0,4 \text{ kV})$$

Impedancja zastępcza kabla:

$$R_{\Sigma 12} = R_{12} l_2 = 0,3 \cdot 0,2 = 60 \text{ m}\Omega = R_{\Sigma 12}^* \quad X_{\Sigma 12} = X_{12} l_2 = 0,1 \cdot 0,2 = 20 \text{ m}\Omega = X_{\Sigma 12}^*$$

Impedancja zastępcza w punkcie odbiorczym:

$$R = \sum R^* = R_{Tr1}^* + R_{Tr2}^* + R_{\Sigma 11}^* + R_{\Sigma 12}^* = 0,04 + 3,63 + 1,68 + 60 = 65,35 \text{ m}\Omega$$

$$X = \sum X^* = X_{ZW}^* + X_{Tr1}^* + X_{Tr2}^* + X_{\Sigma 11}^* + X_{\Sigma 12}^* = 0,27 + 0,96 + 14,8 + 0,96 + 20 = 36,99 \text{ m}\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = 75,1 \text{ m}\Omega \quad \Phi = \arctg \frac{X}{R} = 29,5^0$$

Moc zwarciowa w punkcie odbiorczym:

$$S_{ZW,odb.} = \frac{U^2}{Z} = \frac{400^2}{75,1 \cdot 10^{-3}} = 2,13 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

Moc zwarciowa przed linią kablową:

$$R' = R_{Tr1}^* + R_{Tr2}^* + R_{\Sigma 11}^* = 5,35 \text{ m}\Omega \quad X' = X_{ZW}^* + X_{Tr1}^* + X_{Tr2}^* + X_{\Sigma 11}^* = 16,99 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}' = R' + jX' = 5,35 + j16,99 = 17,81 \exp(j72,5^0) \text{ m}\Omega$$

$$S'_{ZW} = \frac{U^2}{Z'} = \frac{400^2}{17,81 \cdot 10^{-3}} = 8,98 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

Widać wyraźnie, że wypadkowa impedancja w sieci zasilającej niskiego napięcia zależy głównie od impedancji transformatorów i linii nN. W rozważanym przypadku przesunięcie rozważań do punktu przed linią kablową powoduje wzrost mocy zwarciowej 4,22 razy i kąt fazowy impedancji zwarciowej zmienia się z  $29,5^0$  na  $72,50^0$ .

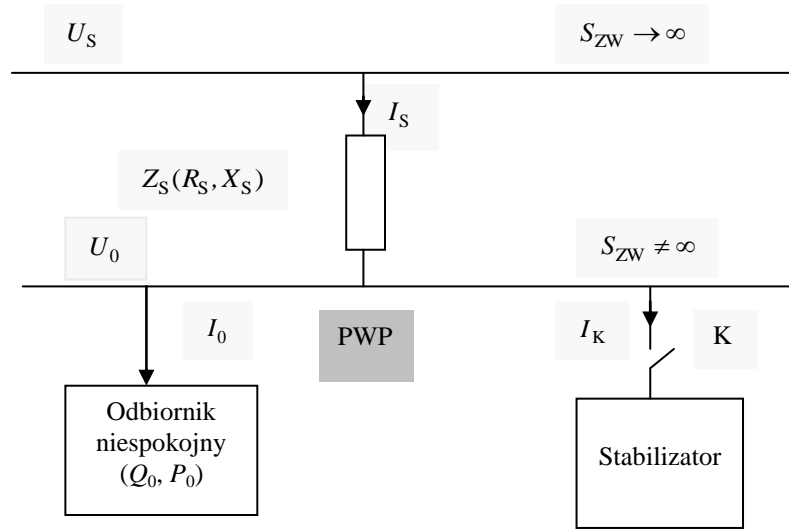
## LITERATURA

1. Mielczarski W.: Quality of electricity supply and management of network losses. Puma Press 1997.

### PRZYKŁAD 3.2. [1]

Linia zasilająca o napięciu 10 kV, mocy zwarciowej  $S_{ZW} = 250 \text{ MV} \cdot \text{A}$  i współczynniku  $\frac{X_S}{R_S} = 5$  ( $X_S, R_S$  - odpowiednio reaktancja i rezystancja sieci) zasilą połączony w gwiazdę odbiornik, którego moc czynna  $P_0$  ma wartość 25 MW, a moc bierna  $Q_0$  zmienia się w przedziale: (0-50) Mvar (Rys. Z8.2) **[Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.]**. Wszystkie wartości liczbowe dotyczą wielkości fazowych. Wyznaczyć:

1. maksymalną wartość spadku napięcia na zaciskach odbiornika.
2. wartość mocy biernej stabilizatora dla przypadku, gdy napięcie odbiornika  $U_0 = 10 \text{ kV}$ .
3. wartość napięcia na zaciskach odbiornika dla przypadku gdy stabilizator kompensuje moc bierną odbiornika.



Rysunek Z8.2. Schemat ideowy analizowanego obwodu (Przykład 3.2)

Zastępcza impedancja zwarciowa sieci zasilającej:

$$Z_S = \frac{U_S^2}{S_{ZW}} = \frac{(10 \text{ kV})^2}{250 \text{ MV} \cdot \text{A}} = 0,4 \Omega \quad \frac{X_S}{R_S} = \text{tg} \varphi_S = 5 \Rightarrow \varphi_S = 78,69^\circ$$

$$X_S = Z_S \sin \varphi_S = 0,4 \cdot \sin 78,69^\circ = 0,3922 \Omega \quad R_S = Z_S \cos \varphi_S = 0,4 \cdot \cos 78,69^\circ = 0,0784 \Omega$$

Łącznik K na rysunku Z8.2 otwarty:

$$\text{Kąt fazowy impedancji odbiornika: } \text{tg} \varphi_0 = \frac{Q_0}{P_0} = 2 \Rightarrow \varphi_0 = -63,44^\circ$$

Na podstawie rysunku Z8.3:

$$\Delta U_R = R_S I_0 \cos \varphi_0 + X_S I_0 \sin \varphi_0 = \frac{R_S P_0}{U_0} + \frac{X_S Q_0}{U_0} \quad \Delta U_X = X_S I_0 \cos \varphi_0 - R_S I_0 \sin \varphi_0 = \frac{X_S P_0}{U_0} - \frac{R_S Q_0}{U_0}$$

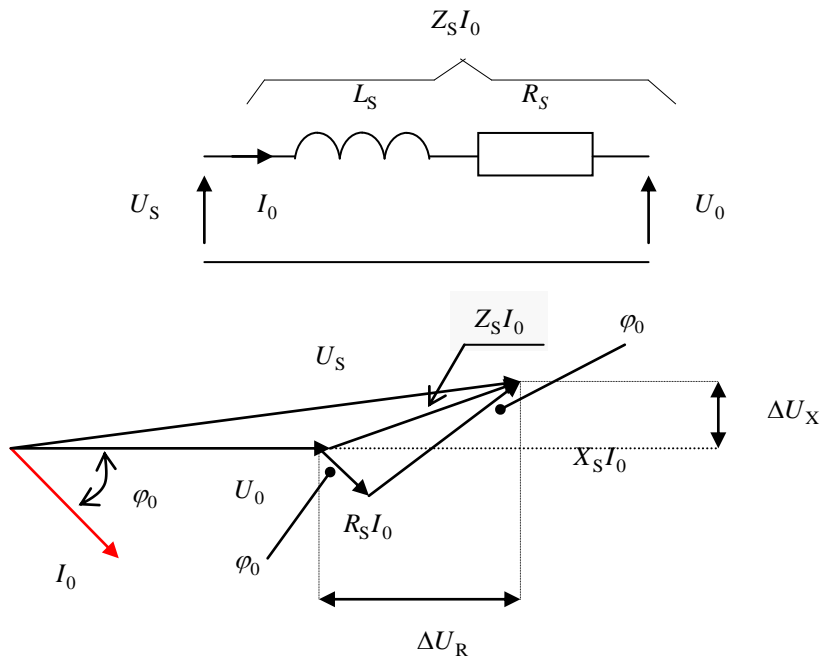
Na podstawie wykresu wskazowego jak na rysunku Z8.3:

$$(U_0 + \Delta U_R)^2 + (\Delta U_X)^2 = (U_S)^2 \quad \left( U_0 + \frac{X_S Q_0}{U_0} + \frac{R_S P_0}{U_0} \right)^2 + \left( \frac{X_S P_0}{U_0} - \frac{R_S Q_0}{U_0} \right)^2 = (U_S)^2$$

Na podstawie powyższego równania można wyznaczyć wartość napięcia odbiornika  $U_0$ . Wynosi ono:

$$U_0 = 6,782 \text{ kV}$$

$$\text{Stąd prąd odbiornika: } \underline{I}_0 = \frac{P_0}{U_0} - j \frac{Q_0}{U_0} = \frac{25 \text{ MW}}{6,782 \text{ kV}} - j \frac{50 \text{ Mvar}}{6,782 \text{ kV}} = (3,686 - j7,372) \text{ kA} = 8,242 \exp(-63,44^\circ)$$



Rysunek Z8.3. Łącznik K na rysunku Z8.2 otwarty (Przykład 3.2)

Stąd podłużny i poprzeczny spadek napięcia:

$$\Delta U_R = \frac{R_S P_0}{U_0} + \frac{X_S Q_0}{U_0} = \frac{0,0784 \Omega \cdot 25 \text{ MW}}{6,782 \text{ kV}} + \frac{0,3922 \Omega \cdot 50 \text{ Mvar}}{6,782 \text{ kV}} = 3,1805 \text{ kV}$$

$$\Delta U_X = \frac{X_S P_0}{U_0} - \frac{R_S Q_0}{U_0} = \frac{0,3922 \Omega \cdot 25 \text{ MW}}{6,782 \text{ kV}} - \frac{0,0784 \Omega \cdot 50 \text{ Mvar}}{6,782 \text{ kV}} = 0,8677 \text{ kV}$$

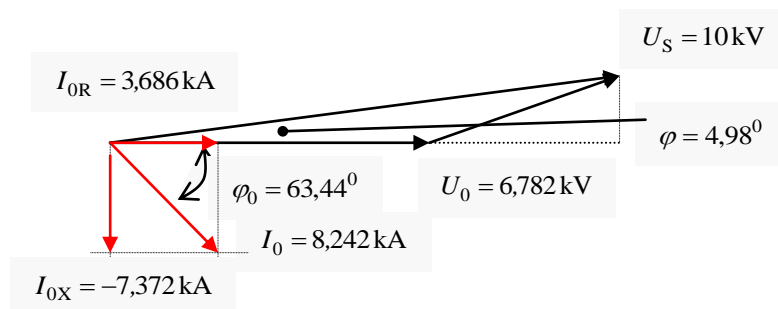
Na rysunku Z8.3 przedstawiono wykres wskazowy dla tego przypadku. Spadek napięcia na zaciskach odbiornika:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{10 - 6,782}{10} 100\% = 32,18\%$$

#### Łącznik K na rysunku Z8.2 zamknięty

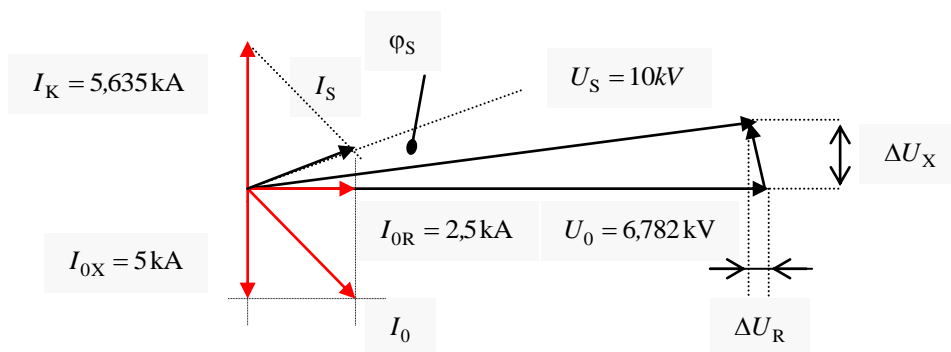
Dla przypadku gdy napięcie odbiornika ma wartość 10 kV, składowe prądu mają wartości odpowiednio (Rys. Z8.4):

$$I_{0X} = \frac{Q_0}{U_0} = \frac{50 \text{ Mvar}}{10 \text{ kV}} = 5 \text{ kA} \quad I_{0R} = \frac{P_0}{U_0} = \frac{25 \text{ MW}}{10 \text{ kV}} = 2,5 \text{ kA}$$



Rysunek Z8.4. Łącznik K na rysunku Z8.2 otwarty (Przykład 3.2)

W celu spełnienia warunku  $U_0 = U_S$  kompensator o mocy  $Q_K$ , reprezentowany na rysunku Z8.5 wskaźem prądu  $I_K$ , musi spowodować pojemnościowy charakter prądu sieci zasilającej.



Rysunek Z8.5. Łącznik K na rysunku Z8.2 zamknięty (Przykład 3.2)

Na podstawie rysunku Z8.5:

$$(U_0 - \Delta U_R)^2 + (\Delta U_X)^2 = (U_S)^2 \quad \left( U_0 - \frac{X_S Q_S}{U_0} - \frac{R_S P_0}{U_0} \right)^2 + \left( \frac{X_S P_0}{U_0} - \frac{R_S Q_S}{U_0} \right)^2 = (U_S)^2$$

Stąd:  $Q_S = -6,35 \text{ Mvar (poj.)}$

Moc bierna kompensatora:  $Q_K = Q_S - Q_0 = -6,35 - 50 = -56,35 \text{ Mvar}$

Prąd kompensatora:  $I_K = \frac{|Q_K|}{U_0} = 5,635 \text{ kA}$

Prąd sieci zasilającej:

$$\underline{I}_S = \underline{I}_0 + jI_K = I_{0R} + jI_{0X} + jI_K = \frac{P_0}{U_0} - j\frac{Q_0}{U_0} + j\frac{Q_K}{U_0} = 2,5 - j5 + j5,635 = (2,5 + j0,635) \text{ kA}$$

Podłużny i poprzeczny spadek napięcia:

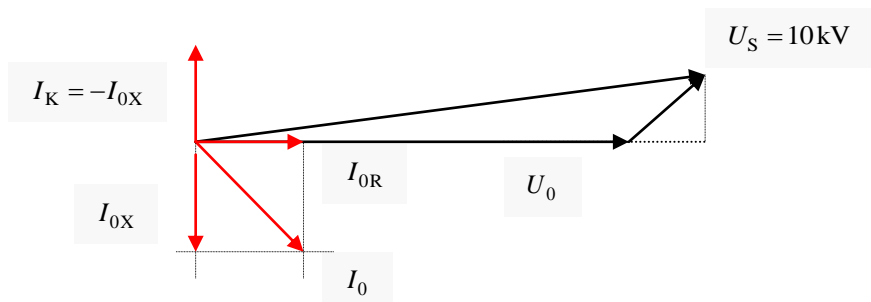
$$\Delta U_R = \frac{R_S P_0}{U_0} + \frac{X_S Q_S}{U_0} = \frac{0,0784 \Omega \cdot 25 \text{ MW}}{10 \text{ kV}} + \frac{0,3922 \Omega \cdot (-6,35) \text{ Mvar}}{10 \text{ kV}} = -0,0532 \text{ kV}$$

$$\Delta U_X = \frac{X_S P_0}{U_0} - \frac{R_S Q_S}{U_0} = \frac{0,3922 \Omega \cdot 25 \text{ MW}}{10 \text{ kV}} - \frac{0,0784 \Omega \cdot (-6,35) \text{ Mvar}}{10 \text{ kV}} = 1,03 \text{ kV}$$

Moc bierna kompensatora nie jest równa mocy biernej odbiornika lecz przewyższa ją o 6,35 Mvar (poj.) w efekcie kompensacji również spadku napięcia wywołanego składową czynną prądu. W konsekwencji współczynnik mocy obwodu jest różny od jedności i ma charakter pojemnościowy.

$$\cos \varphi_S = \frac{P_0}{\sqrt{(P_0)^2 + (Q_0)^2}} = \frac{25 \text{ MW}}{\sqrt{(25 \text{ MW})^2 + (6,35 \text{ Mvar})^2}} = 0,969 \Rightarrow \varphi_S = 14,3^\circ$$

Kompensacja do współczynnika mocy równego jeden - łącznik K na rysunku Z8.2 zamknięty



Rysunek Z8.6. Kompensacja do współczynnika mocy równego jeden - łącznik K na rysunku Z8.2 zamknięty (Przykład 3.2)

Moc bierna kompensatora jest równa mocy biernej odbiornika tzn.  $Q_K = -Q_0$ . Wykres wskazowy dla tego przypadku przedstawia rysunku Z8.6. Na podstawie zależności:

$$(U_0 + \Delta U_R)^2 + (\Delta U_X)^2 = (U_S)^2 \quad \left( U_0 + \frac{R_S P_0}{U_0} \right)^2 + \left( \frac{X_S P_0}{U_0} \right)^2 = (U_S)^2$$

$$U_0^2 + 2R_S P_0 + R_S^2 P_0^2 + \frac{X_S^2 P_0^2}{U_0^2} = U_S^2 \Rightarrow U_0 = 9,748 \text{ kV}$$

Podłużny i poprzeczny spadek napięcia:

$$\Delta U_R = \frac{R_S P_0}{U_0} = \frac{0,0784 \Omega \cdot 25 \text{ MW}}{9,748 \text{ kV}} = 0,201 \text{ kV} \quad \Delta U_X = \frac{X_S P_0}{U_0} = \frac{0,3922 \Omega \cdot 25 \text{ MW}}{9,748 \text{ kV}} = 1,006 \text{ kV}$$

Spadek napięcia wynosi w tym przypadku:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{10 - 9,748}{10} 100\% = 2,5\%$$

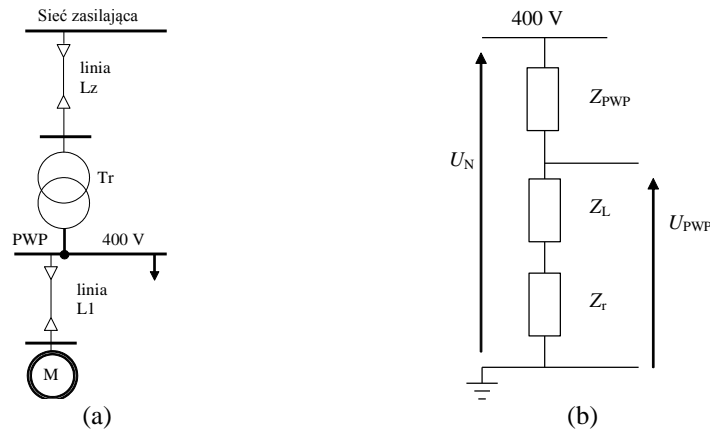
Kompensacja mocy biernej zmniejsza wartość spadku napięcia na zaciskach odbiornika.

## LITERATURA

1. Miller T.J.: Reactive power control in electric systems. John Wiley & Sons, 1982.

## PRZYKŁAD 4.1.

Odbiorca przemysłowy planuje przyłączenie nowego napędu elektrycznego w układzie jak na rysunku Z8.7.



Rysunek Z8.7. Schemat ideowy i zastępczy analizowanego układu (Przykład 4.1)

*Dane sieci zasilającej:*

- impedancja linii zasilającej  $Z_{Lz}$ :  $\underline{Z}_{Lz} = (1,55 + j1,66) \text{ m}\Omega$ ,  $Z_{Lz} = 2,27 \text{ m}\Omega$
- impedancja linii zasilającej od PWP do zacisków silnika:  $\underline{Z}_L = (25 + j60) \text{ m}\Omega$ ,  $Z_L = 65 \text{ m}\Omega$

*Dane transformatora:*

- moc znamionowa:  $S_N = 1 \text{ MV} \cdot \text{A}$
- napięcie zwarcia:  $u_{\%} = 5\%$
- iloraz reaktancji i rezystancji zastępczej:  $X/R = 5$

*Dane silnika:*

- napięcie znamionowe:  $U_N = 400 \text{ V}$
- moc znamionowa:  $P_N = 75 \text{ kW}$
- współczynnik mocy podczas rozruchu:  $PF_r = \cos\varphi_r = 0,3$
- współczynnik przeciążeniowy podczas rozruchu  $k_r$ :  $k_r = 7 \text{ kV} \cdot \text{A/kW}$
- liczba rozruchów: 20/h

Przyjmując dopuszczalny poziom wahań napięcia jako kryterium ocenić, czy rozważany silnik może być przyłączony do sieci zasilającej. Dla planowanej liczby rozruchów dopuszczalna względna wartość zmiany napięcia wynosi  $\Delta U = 3\%$ .

Moc pozorna silnika podczas rozruchu:  $S_r = k_r P_N = 7 \cdot 75 = 525 \text{ kV} \cdot \text{A}$

Impedancja silnika podczas rozruchu:  $\underline{Z}_r = \frac{U_N^2}{S_r} (\cos\varphi_r + j\sin\varphi_r) = \frac{400^2}{525} (0,3 + j0,954) = (91,4 + j87,2) \text{ m}\Omega$

Wartość napięcia w PWP wyznaczona na podstawie dzielnika napięcia jak na rysunku Z8.7.

$$U_{\text{PWP}} = U_N \frac{|\underline{Z}_r + \underline{Z}_L|}{|\underline{Z}_r + \underline{Z}_L + \underline{Z}_{\text{PWP}}|}$$

Stąd względna zmiana napięcia:

$$k_u = \frac{U_{\text{PWP}}}{U_N} = \frac{|\underline{Z}_{\Sigma}|}{|\underline{Z}_{\Sigma} + \underline{Z}_{\text{PWP}}|} \quad \text{gdzie} \quad \underline{Z}_{\Sigma} = \underline{Z}_r + \underline{Z}_L = (116,4 + j147,2) \text{ m}\Omega$$

Impedancja zastępcza sieci zasilającej w PWP jest sumą impedancji linii  $Lz$  i transformatora  $Tr$ :

$$\underline{Z}_{\text{PWP}} = \underline{Z}_{Tr} + \underline{Z}_{Lz}$$

Impedancja transformatora:

$$\underline{Z}_{Tr} = \underline{Z}_{Tr} (\cos\varphi_{Tr} + j\sin\varphi_{Tr}) \quad \text{gdzie} \quad \underline{Z}_{Tr} = \frac{u_{\%}}{100} \frac{U_N^2}{S_N} = 0,05 \cdot \frac{0,4^2}{1} = 8 \text{ m}\Omega$$

$$\text{Kat fazowy impedancji } \varphi_{Tr} : \quad \text{tg}\varphi_{Tr} = \frac{X}{R} = 5, \quad \varphi_{Tr} = 78,69^\circ$$

$$\text{Stąd:} \quad \underline{Z}_{Tr} = 8 \cdot (0,196 + j0,98) = (1,57 + j7,84) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{PWP} = (3,12 + j9,5) \text{ m}\Omega$$

Współczynnik podziału napięcia w dzielniku impedancyjnym (rys. Z8.7):

$$k_u = \frac{|116,4 + j147,2|}{|119,52 + j156,7|} = \frac{187,66}{197,08} = 0,95 \quad k_u = 95\%$$

Współczynnik względnej zmiany napięcia:

$$K_u = \frac{\Delta U_{PWP}}{U_N}$$

gdzie  $\Delta U_{PWP}$  jest zmianą napięcia w PWP podczas rozruchu silnika:

$$\Delta U_{PWP} = U_N - k_u U_N = 400(1 - 0,95) = 19,12 \text{ V}$$

$$\text{Stąd:} \quad K_u = \frac{19,12}{400} = 0,0478 \quad K_u = 4,78\%$$

Ponieważ wartość współczynnika przekracza poziom dopuszczalny 3%, silnik nie może być bezpośrednio przyłączony do sieci zasilającej.

## PRZYKŁAD 4.2 [1]

Do sieci 11 kV przyłączony jest silnik indukcyjny o mocy 900 kW stanowiący napęd zgniatacza na składowisku złomu. Podjęto decyzję o przyłączeniu kolejnego zgniatacza z silnikiem indukcyjnym o mocy 1500 kW. Impedancja sieci zasilającej w punkcie przyłączenia stanowi  $R_{jw} + jX_{jw} = (37,5 + j82)\%$  impedancji odpowiadającej mocy bazowej 100 MV·A. Rozruch istniejącego silnika jest rozruchem bezpośrednim z mocą 3,3 MV·A przy współczynniku mocy 0,3 odbywającym się raz dziennie. Współczynnik mocy silnika podczas normalnej jego pracy wynosi 0,9. Zmiana napięcia występująca podczas rozruchu ma wartość:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{S}{S_{base}} (R_{jw} \cos \varphi + X_{jw} \sin \varphi) = \frac{3,3}{100} (37,5 \cdot 0,3 + 82 \cdot 0,95) = 2,94\%.$$

Zmiana napięcia, która może wystąpić podczas rozruchu planowanego napędu, mającego analogiczne charakterystyki eksploatacyjne, wynosi:  $2,94 \frac{1500}{900} = 4,90\%$ . Uwzględniając prawdopodobieństwo równoczesnego rozruchu obydwu napędów oraz możliwość przyłączenia dodatkowych odbiorników niespokojnych prawdopodobne jest przekroczenie poziomu dopuszczalnego (6% zgodnie z Tabelą 3.1). Podjęto więc decyzję o przyłączeniu rozważanych silników do punktu sieci o większej mocy zwarciowej, w którym impedancja zastępcza ma wartość  $R_{jw}^* + jX_{jw}^* = (1,3 + j48,8)\%$  impedancji odpowiadającej mocy bazowej 100 MV·A. W tym przypadku zmiana napięcia wywołana rozruchem większego silnika wynosi:

$$\frac{3,3}{100} \frac{1500}{900} (1,3 \cdot 0,3 + 48,8 \cdot 0,95) = 2,57\%. \text{ Wykonano następujące pomiary wahań napięcia:}$$

1. wahania napięcia dla istniejącej lokalizacji (wyłączony silnik 900 kW),  $P_{st1} = 0,3$
2. wahania napięcia podczas rozruchu silnika 900 kW dla istniejącej lokalizacji  $P_{st2} = 0,56$
3. wahania napięcia podczas normalnej pracy silnika 900 kW dla istniejącej lokalizacji,  $P_{st2} = 0,54$
4. wahania napięcia dla przyszłej lokalizacji (tło),  $P_{st2} = 0,24$

W celu oszacowania łącznego poziomu wahań napięcia spowodowanych pracą obydwu silników przyjęto współczynnik  $m = 3$ . Wahania napięcia wywołane tylko rozruchem silnika 900 kW:  $P_{st} = \sqrt[3]{0,56^3 - 0,3^3} = 0,53$ .

W celu wyznaczenia wahań napięcia dla nowej lokalizacji, należy określić iloraz zmian napięcia pomiędzy dwoma rozważanymi lokalizacjami. Dla istniejącej lokalizacji zmiana napięcia wynosi 2,94%. W przypadku nowej lokalizacji będzie miała wartość:  $\frac{3,3}{100} (1,3 \cdot 0,3 + 48,8 \cdot 0,95) = 1,54\%$ . Stąd wahania napięcia wywołane

$$\text{rozruchem silnika 900 kW w nowej planowanej lokalizacji wynoszą: } 0,53 \frac{1,54}{2,94} = 0,28.$$

Nowy, planowany napęd wywoła wahania napięcia, których poziom można określić poprzez skalowanie wahań od silnika 900 kW:  $0,28 \frac{1500}{900} = 0,47$ .

W celu oszacowania poziomu wahań napięcia wywołanych wyłącznie pracą silnika 900 kW w nowym miejscu niezbędne jest wyznaczenie współczynnika skalującego dla obydwu lokalizacji: istniejącej i planowanej dla współczynnika mocy odpowiadającego pracy normalnej napędu:

$$\frac{\cos \varphi^* R_{jw}^* + \sin \varphi^* X_{jw}^*}{\cos \varphi R_{jw} + \sin \varphi X_{jw}} = \frac{1,3 \cdot 0,9 + 48,8 \cdot 0,44}{37,5 \cdot 0,9 + 82 \cdot 0,44} = 0,32. \text{ Dla proponowanego silnika o mocy 1500 kW wahania}$$

napięcia można oszacować na podstawie skalowania wyniku dla silnika 900 kW (współczynnik: 1500/900). Wypadkowe wahania napięcia otrzymuje się na podstawie sumowania wahań pochodzących od równoległej pracy obydwu napędów z uwzględnieniem tła:

$$P_{st} = \sqrt[3]{(0,56 \cdot 0,32)^3 + \left(0,56 \cdot 0,32 \cdot \frac{1500}{900}\right)^3} + 0,24^3 = 0,46$$

W jednej z dwunastu rozważanych wartości  $P_{st}$  (niezbędnych do wyznaczenia  $P_{it}$ ) należy uwzględnić także rozruch silników.

## LITERATURA

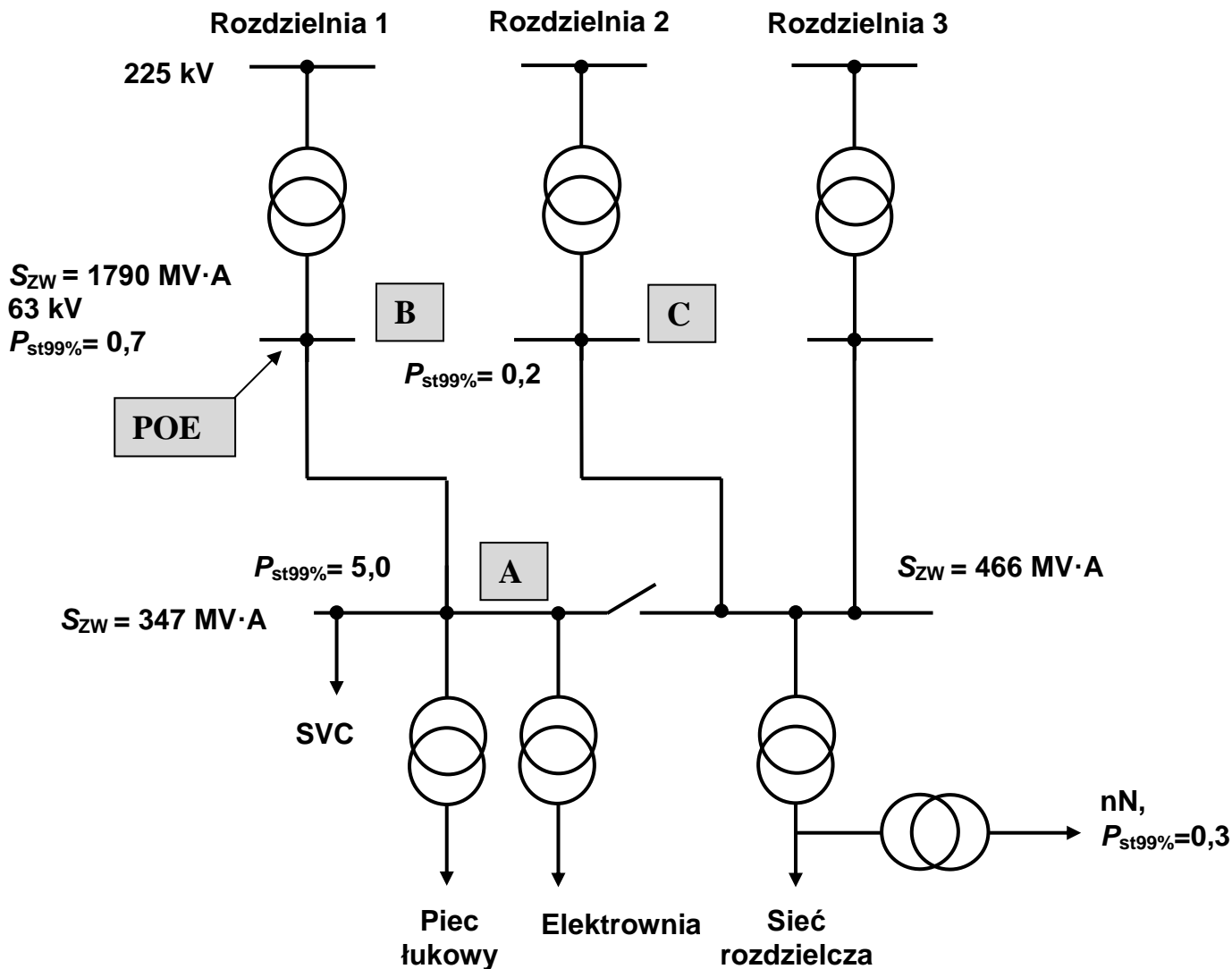
1. IEC 1000-3-7: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems – basic EMC publication.

### PRZYKŁAD 4.3. [1]

Rozdzielnia 63 kV składa się dwóch sekcji: pierwsza zasilą sieć rozdzielczą, druga elektrostalownię o mocy umownej  $S_i=47 \text{ MV}\cdot\text{A}$ . Rozdzielnia zasilana jest trzema liniami z rozdzielnic 225/63 kV oznaczonymi na rysunkach Z8.8-11 odpowiednio jako Rozdzielnie 1, 2 i 3.

A. Normalny układ zasilania (rys. Z8.8):

- sprzęgło międzysekcyjne jest otwarte
- elektrostalownia jest zasilona z Rozdzielni 1
- sieć rozdzielcza jest zasilona z Rozdzielni 2 i 3
- pracuje kompensator statyczny SVC.



Rysunek Z8.8. Normalny układ pracy sieci (FIZYKALIA 7.5)

Na rysunku Z8.8 POE (punkt w którym przeprowadzana jest ocena) znajduje się na szynach 63 kV w Rozdzielni 1. Moc zwarcia w tym punkcie wynosi:  $S_{ZW}= 1\,790 \text{ MV}\cdot\text{A}$  i  $\Delta S/S_{ZW}=2,6\%$ . Pierwszy etap rozważań (rys. 4.65) nie może być zastosowany ze względu na wartość współczynnika zjawieniowego.

Stosując procedurę etapu 2, ustalono poziom planowany o wartości:  $P_{stWN}^{(P)}=1$ . Z Rozdzielni 1 jest zasilony tylko

jeden odbiorca, tak więc  $S_{iWN}=47 \text{ MV}\cdot\text{A}$ . W konsekwencji:  $P_{sti}=P_{stWN}^{(P)}\sqrt[3]{\frac{47}{47}}=1$ .

Zmierzone wartości  $P_{st95\%}$  wynoszą odpowiednio:

- 5 na szynach elektrostalowni (punkt A)
- 0,7 w Rozdzielni 1 (punkt B), 63 kV
- 0,2 w Rozdzielni 2 (punkt C), 63 kV
- 0,3 w sieci niskiego napięcia.

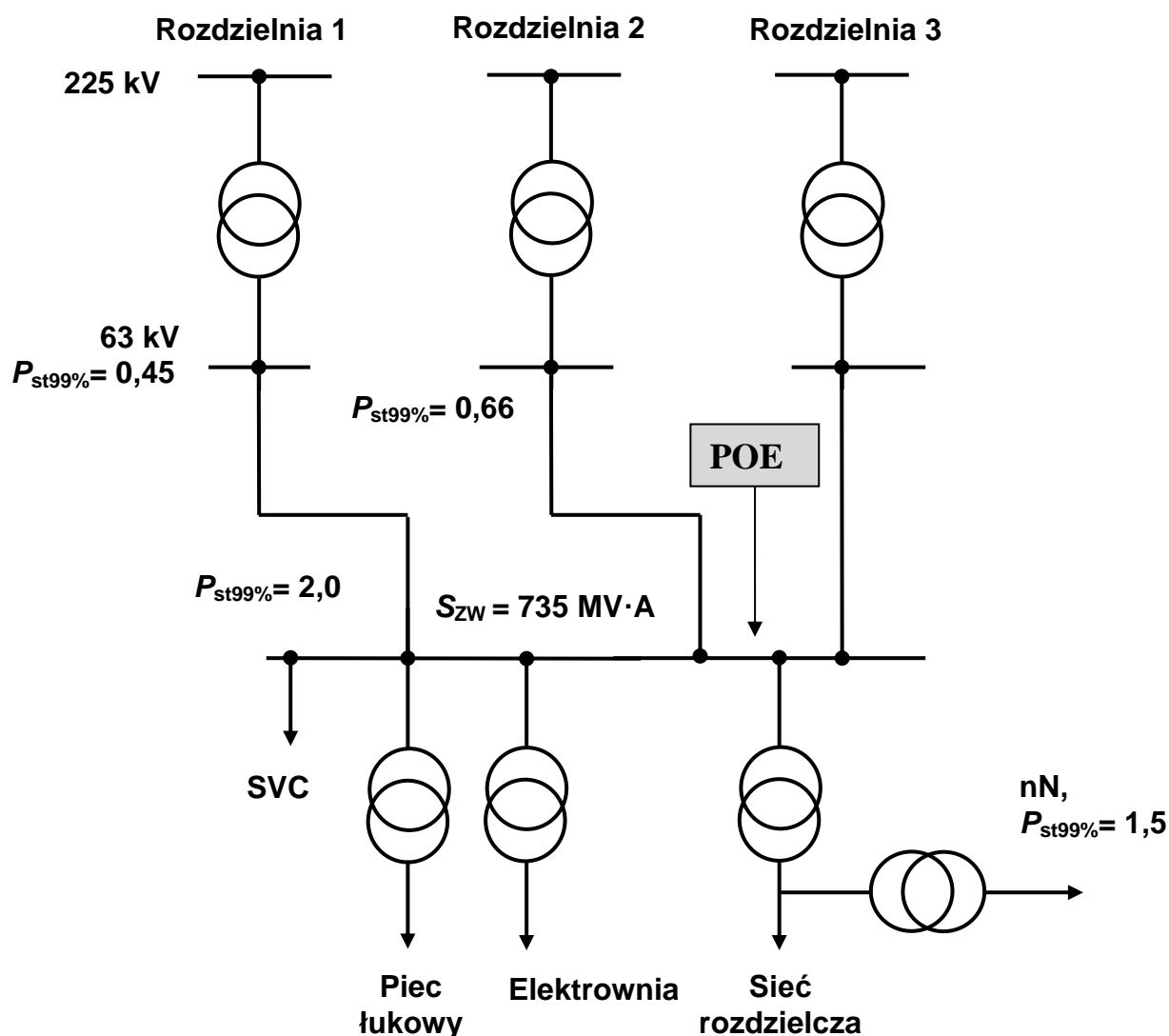
Tak więc w normalnej konfiguracji sieci stan ten jest akceptowalny zgodnie z wymaganiami etapu 2.

Rozważono trzy dodatkowe możliwe układy zasilania.

Współczynnik propagacji  $P_{st}$  pomiędzy sieciami WN, SN i nN wyznaczone pomiarowo dla Rozdzielni 2 i 3 wynosi odpowiednio:  $T_{P_{st}WN/SN}=0,97$  dla sieci WN i SN oraz  $T_{P_{st}SN/nN}=0,95$  dla sieci SN i nN. Są to duże wartości ponieważ w sąsiedztwie elektrostalowni są wsie i bardzo niewiele odbiorników przemysłowych, które mają wpływ na wartość mocy zwarciowej na poziomie SN. Nie mierzono współczynnika propagacji w Rozdzielni 1, ale ze względu na podobieństwo układu zasilania przyjęto jego wartość pomiędzy sieciami WN i nN dla tej rozdzielni na poziomie:  $T_{P_{st}WN/nN}=0,92 (= T_{P_{st}WN/SN} \cdot T_{P_{st}SN/nN})$ . Wartości dopuszczalne  $P_{st}$  dotyczą WN (225 kV).

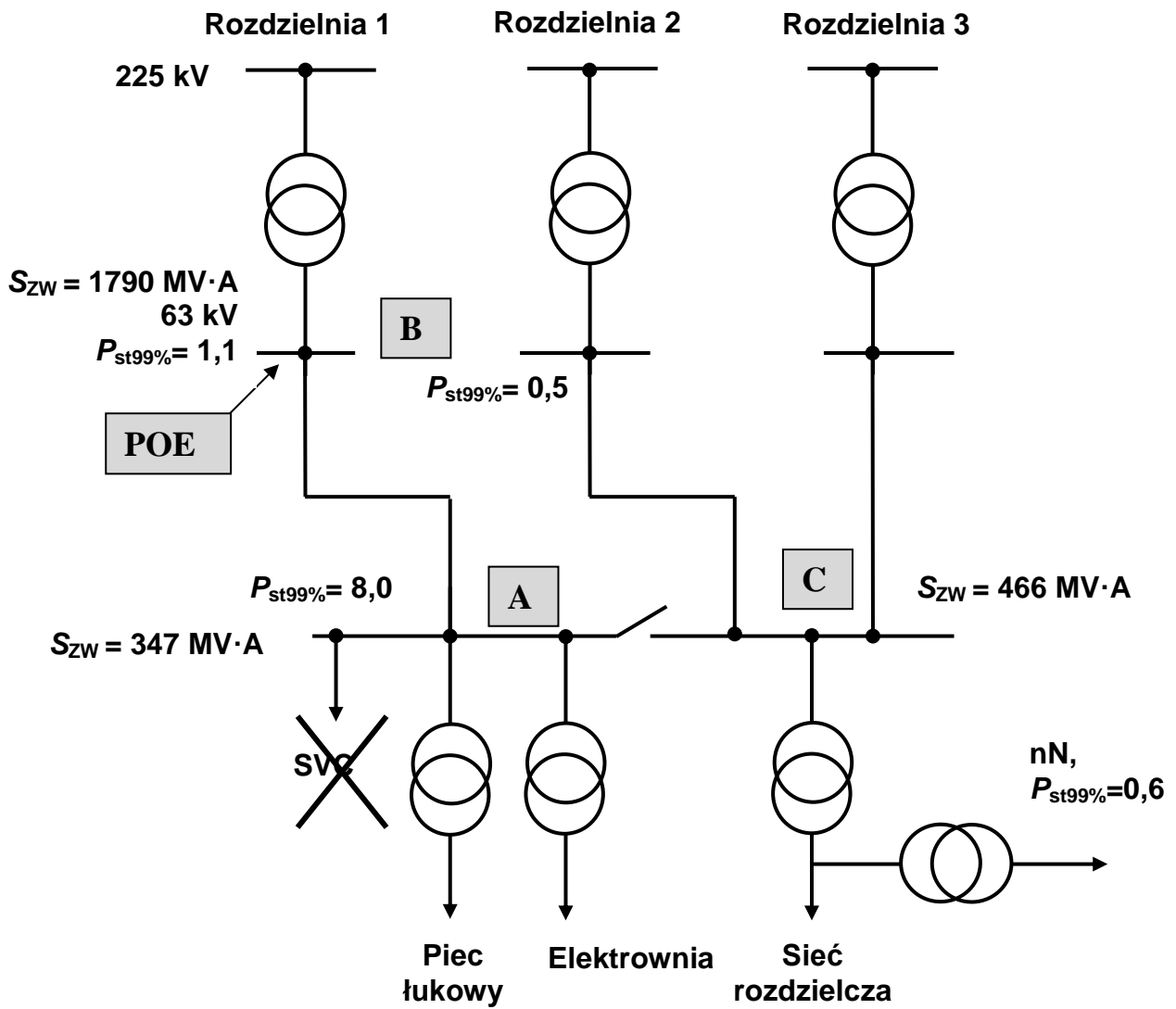
### B. Zamknięte sprzęgło pomiędzy szynami

Na rysunku Z8.9 przedstawiono wyniki pomiarów. Konfiguracja ta prowadzi do nieakceptowalnie wysokiego poziomu  $P_{st}$  w nowym punkcie POE. Główną przyczyną jest zmiana położenia POE i zmniejszenie „elektrycznej” odległości pomiędzy elektrostalownią i siecią rozdzielczą.



Rysunek Z8.9. Układ z zamkniętym sprzęgłem międzysekcyjnym (Przykład 4.3)





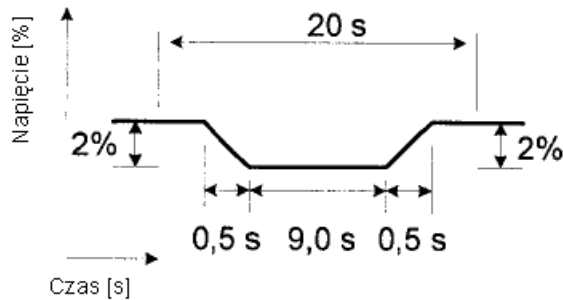
Rysunek Z8.11. Praca z wyłączonym SVC (Przykład 4.3)

## LITERATURA

1. IEC 1000-3-7: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems – basic EMC publication.

## PRZYKŁAD 4.4. [1]

Do sieci zasilającej ma być przyłączona walcarka wywołująca zmiany napięcia o przewidywanym kształcie jak na rysunku Z8.12.



Rysunek Z8.12. Przykładowa zmiana napięcia wywołana pracą walcarki (Przykład 4.4)

Ponieważ średnia liczba zmian na min. wynosi 6 (2 zmiany w 20 s) i  $\Delta U (\approx \Delta S / S_{ZW}) = 2\%$  odbiornik nie spełnia wymagań określonych w pierwszym etapie procedury wydawania warunków technicznych przyłączenia (Tabela 4.14, rys. 4.65) i dlatego ocena jest przeprowadzana zgodnie z wymaganiami drugiego etapu. Przyjmując maksymalny całkowity udział emisji lokalnych odbiorców w sieci SN na poziomie  $P_{stSN}^{(E)} = 0,78$ , dopuszczalną moc obciążenia rzędu  $20 \text{ MV}\cdot\text{A}$  i moc umowną odbiorcy  $3 \text{ MV}\cdot\text{A}$ , wartość graniczna dopuszczalnej emisji wahań odbiorcy wynosząca  $P_{st} = 0,41$  jest wyznaczana za pomocą poniższej zależności (przyjęto  $m = 3$ ), przy założeniu, że moc całkowitego obciążenia na poziomie nN,  $S_{nN}$  wynosi zero.

$$P_{stSN}^{(E)} = \sqrt[3]{\left(P_{stSN}^{(P)}\right)^3 - T_{PstEWN,SN}^3 \left(P_{stWN}^{(P)}\right)^3} = \sqrt[3]{0,9^3 - 0,8^3 \cdot 0,8^3} = 0,78 \quad P_{sti} = P_{stSN}^{(E)} \sqrt[3]{\frac{S_i}{S_t - S_{nN}}} = 0,78 \sqrt[3]{\frac{3}{20}} = 0,41$$

Dla prostokątnych zmian napięcia – 6 zmian/min, wartość zmian napięcia wymagana do  $P_{st} = 1$ , na podstawie rysunku 4.14 wynosi 1,6 (dla 230 V). Dla trapezowych zmian napięcia, współczynnik kształtu dla zbocza o czasie narastania 0,5 s wynosi około 0,31 (Tabela 4.16). Stosując równanie (4.49), wartość współczynnika  $P_{st}$  dla zmian napięcia jak na rysunku Z8.12 wynosi:

$$P_{st} = \left( \frac{d}{d_{P_{st}=1}} \right) \cdot F = \left( \frac{2}{1,6} \right) \cdot 0,31 = 0,39$$

Ten poziom emisji jest mniejszy niż wartość graniczna 0,41, tak więc rozważany odbiornik może być przyłączony do sieci zasilającej.

## LITERATURA

1. IEC 1000-3-7: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems – basic EMC publication.

## PRZYKŁAD 4.5. [1]

W układzie jak na rysunku Z8.13a jest przyłączony międzyfazowo piec rezystancyjny. Szyny są zasilone przez dwa równoległe kable o długości 1,5 km i przekroju poprzecznym 185 mm<sup>2</sup>. Impedancja zwarcia systemu na poziomie 10 kV:  $X_S = Z_S = U_N^2/S_{ZW} = 0,529 \Omega$ . Wartości rezystancji i reaktancji zastępczej kabla na jednostkę długości wynosi odpowiednio: rezystancja – 0,164  $\Omega$ /km; reaktancja – 0,090  $\Omega$ /km. Stąd wartości impedancji zastępczej całego kabla:  $X_L = \frac{1}{2} \cdot 0,090 \Omega/\text{km} \cdot 1,5 \text{ km} = 0,068 \Omega$ ;  $R_L = \frac{1}{2} \cdot 0,164 \Omega/\text{km} \cdot 1,5 \text{ km} = 0,123 \Omega$ . Parametry transformatora (przeliczone na stronę napięcia średniego 10 kV):  $R_{Tr} \approx 0$ ;  $Z_{Tr} = X_{Tr} = u_{ZW}(U_N^2/S_{TrN}) = 1,5 \Omega$ . Schemat zastępczy układu przyjmuje postać jak na rysunku Z8.13b.

Mocy czynna pieca zmienia swa wartość w przedziale (600-1400) kW tworząc w czasie przebieg prostokątny (rys. Z8.13c). Ocenę wahań napięcia wywołanych pracą odbiornika należy przeprowadzić dla punktu V. Dla obciążenia 600 kW, spadek napięcia (napięcia międzyfazowego):  $\Delta U_0 = 2I_0 Z_\Sigma$ , gdzie:  $Z_\Sigma = \sqrt{(X_S + X_L)^2 + R_L^2}$ .

Po podstawieniu danych liczbowych:  $I_0 = S_0/U_N$ ;  $Z_\Sigma = 0,6095 \Omega$ ;  $I_0 = 60 \text{ A}$ ;  $\Delta U_0 = 73,14 \text{ V}$ .

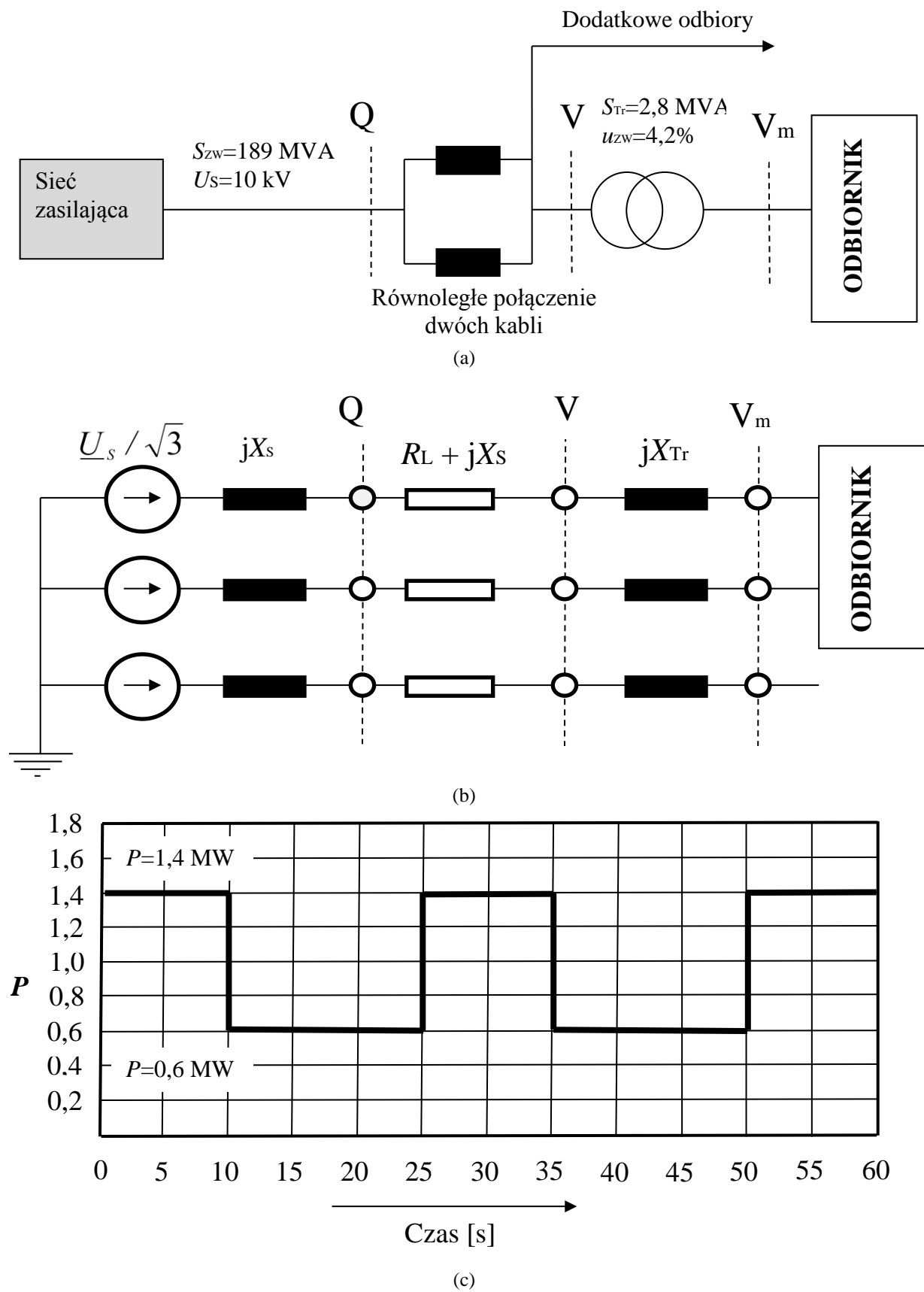
Jeżeli moc przyjmie wartość 1,4 MW, spadek napięcia:  $\Delta U_{01} = \Delta U_0 (1,4 \text{ MW}/600 \text{ kW}) = 170,66 \text{ V}$ . Zatem zmiana napięcia:  $\Delta U = U_{01} - U_0 = 97,52 \text{ V}$ . Stąd względna zmiana napięcia:  $d = (\sqrt{3} \Delta U_f/U_0) = 0,0073 \Rightarrow 0,73\%$ . Uwzględniając, że dla rozważanego przebiegu zmian napięcia współczynnik kształtu  $F=1$ , na podstawie zależności (4.50):  $t_f = 2,3(dF)^{3,2} = 0,84$ . Przyjmując, że w przedziale 10 min występuje 50 zmian obciążenia, a w

przedziale 2h – 600:  $P_{st} = \left( \frac{\sum t_f}{T_p} \right)^{1/3,2} = \left[ \frac{50 \cdot t_f}{10 \cdot 60 \text{ s}} \right]^{1/3,2} = 0,44$ ;  $P_{lt} = \left( \frac{\sum t_f}{T_p} \right)^{1/3,2} = \left[ \frac{600 \cdot t_f}{120 \cdot 60 \text{ s}} \right]^{1/3,2} = 0,44$ . Ze

względu na okresowość zmian napięcia wartości obydwu wskaźników są takie same.

## LITERATURA

1. Schlabbach J., Blume D., Stephanblome T.: Voltage quality in electrical power systems, IEEE, 1999.



Rysunek Z8.13. Przykład 4.5: (a) schemat ideowy i (b) zastępczy oraz (c) zmiana mocy czynnej pieca

## PRZYKŁAD 4.6. [1]

Producent zamierza zainstalować trzy zgrzewarki punktowe o cyklach zgrzewania odpowiednio: 0,2 s; 1 s i 2,5 s. Zgrzewarki wywołują spadki napięcia o wartościach odpowiednio: 0,5%; 0,4% i 0,25% i czasach trwania: 0,1; 0,2 i 0,3 s (rys. Z8.14).

Dla pierwszej zgrzewarki ( $t_1 = 0,1$  s i  $t_2 = 0,1$  s) na podstawie charakterystyk (d) w Tabeli 4.16, stosując interpolację pomiędzy charakterystykami dla czterech i siedmiu okresów w celu wyznaczenia wartości  $P_{st,2\%} = 4,43$ , otrzymuje się (zależność 4.52):

$$P_{st} = \left(\frac{d}{2}\right) P_{st,2\%} = \left(\frac{0,5}{2}\right) 4,43 = 1,10$$

Dla drugiej zgrzewarki ( $t_1 = 0,2$  s i  $t_2 = 0,8$  s), nie jest potrzebna interpolacja do wyznaczenia wartości  $P_{st,2\%} = 2,58$  na podstawie charakterystyk (d) w Tabeli 4.16:

$$P_{st} = \left(\frac{d}{2}\right) P_{st,2\%} = \left(\frac{0,4}{2}\right) 2,58 = 0,52$$

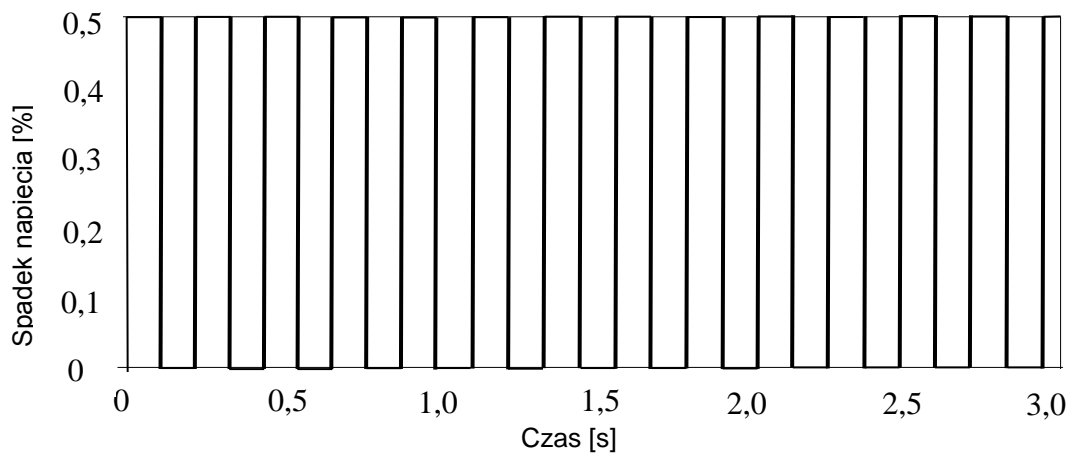
Podobnie dla trzeciej zgrzewarki ( $t_1 = 0,3$  s i  $t_2 = 2,2$  s) także nie jest potrzebna interpolacja do wyznaczenia wartości  $P_{st,2\%} = 2,1$ :

$$P_{st} = \left(\frac{d}{2}\right) P_{st,2\%} = \left(\frac{0,25}{2}\right) 2,1 = 0,26$$

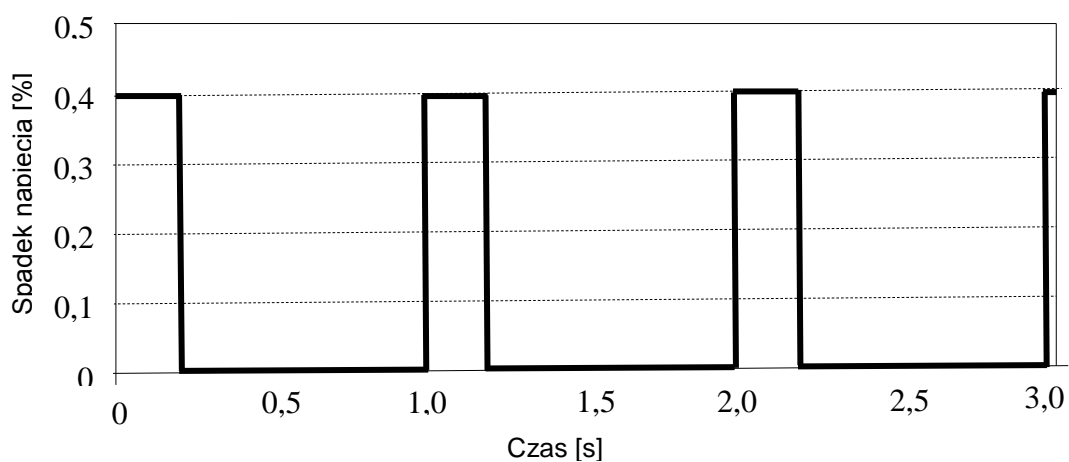
Ponieważ zmiany napięcia następują w czasie krótszym niż 0,1 s, ryzyko równoczesnego ich wystąpienia jest bardzo duże i nie jest oczywiste którą wartość wykładnika  $m$  wybrać (zależność 4.25). Przyjęcie maksymalnej zbieżności w czasie zmian napięcia ( $m=1$ ) daje najgorszy przypadek i  $P_{st} = 1,88$ . Niezależnie od przyjętej wartości wykładnika  $m$ , całkowita wartość  $P_{st}$  przekroczy 1,0 i instalacja nie powinna być przyłączona, jeżeli nie zostanie zwiększony poziom planowany lub nie zostaną zastosowane odpowiednie urządzenia redukujące poziom zaburzenia.

## LITERATURA

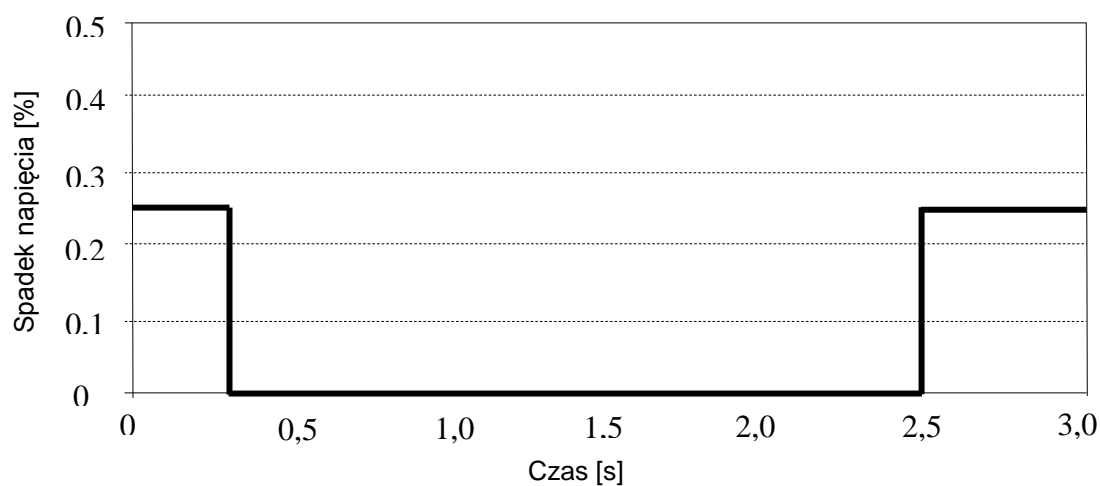
1. IEC 1000-3-7: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems – basic EMC publication.



(a) Spawarka 1



(b) Spawarka 2

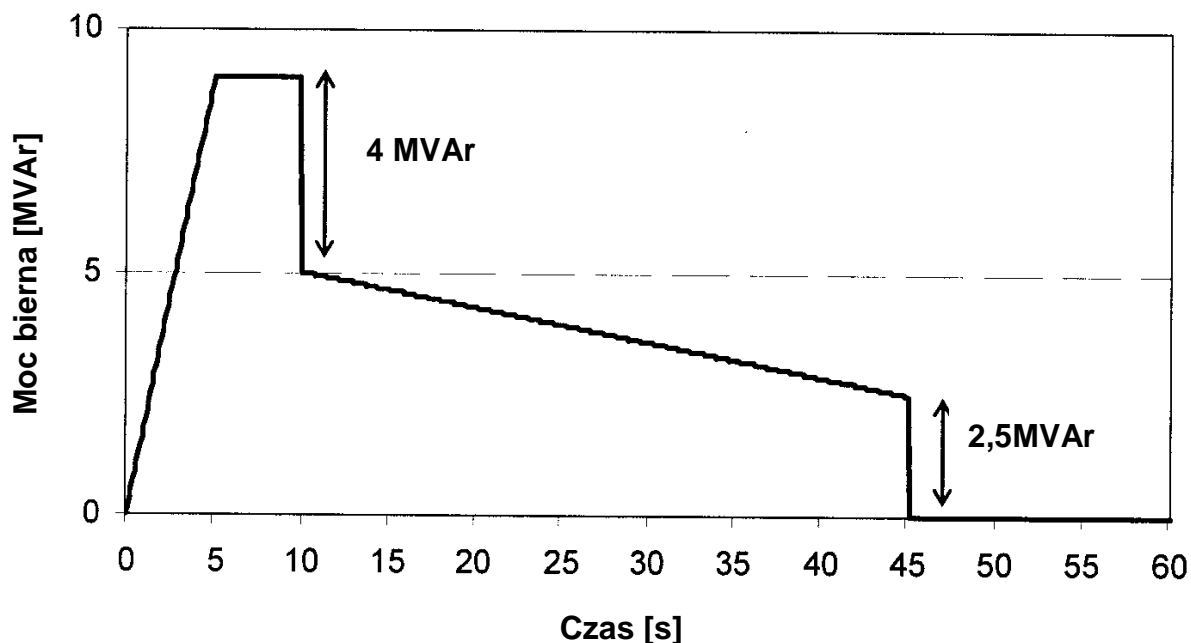


(c) Spawarka 3

Rysunek Z8.14. Zmiany napięcia wywołane pracą spawarek (Przykład 4.6)

### Przykład 4.7. [1]

Trzy maszyny wyciągowe o mocy 5 MW każda, mają być przyłączone do sieci zasilającej o mocy zwarciowej 400 MV·A. Na rysunku Z8.15 przedstawiono przebieg zmian mocy biernej podczas przykładowego cyklu pracy maszyny. Należy ocenić poziom wahań napięcia wywołany jednoczesną pracą trzech napędów o podobnych lecz nie jednakowych cyklach pracy trwających około 60 s.



Rysunek Z8.15. Przykładowa charakterystyka zmian mocy biernej maszyny wyciągowej (Przykład 4.7)

Zmiany napięcia są w przybliżeniu proporcjonalne do zmian mocy biernej. I tak zmianie 4 Mvar odpowiada 1% zmiany napięcia, a 2,5 Mvar zmiana 0,63%. Na podstawie charakterystyk (a) w Tabeli 4.16 widać, że zmiana napięcia trwająca dłużej niż 1 s ma mniejszy skutek w porównaniu ze skokową zmianą napięcia o podobnej amplitudzie. Dlatego wahania napięcia będą powodowane głównie zmianą mocy biernej 4 Mvar, która występuje 10 s po załączeniu i w mniejszym stopniu zmianą 2,5 Mvar która występuje podczas wyłączenia maszyny.

W przypadku jednej maszyny - przyjmując, że największa zmiana napięcia w PWP wynosząca 1% występuje z częstością jeden raz na minutę - wartość współczynnika  $P_{st}$  może być wyznaczona na podstawie rysunku 4.14. Na podstawie rysunku  $P_{st} = 1$  dla jednej zmiany napięcia na minutę o wartości 2,7%. Stąd w rozważanym przypadku wartość współczynnika  $P_{st} = 1/2,7 = 0,37$  dla zmiany o wartości 1%, a dla zmiany o wartości 0,63%,  $P_{st} = 0,37 \cdot 0,63 = 0,23$ . Dla obydwu zmian napięcia:  $P_{st} = \sqrt[3]{0,37^3 + 0,23^3} = 0,40$ . Jeżeli praca maszyn wyciągowych jest niezależna, wartość wskaźnika wahań może być wyznaczona na podstawie prawa sumowania (przyjęto  $m = 3$ ):  $P_{st} = \sqrt[3]{3 \cdot 0,4^3} = 0,58$ . W rozważaniach pominięto - jako mało prawdopodobną - równoczesną zmianę napięcia występującą we wszystkich trzech maszynach.

#### LITERATURA

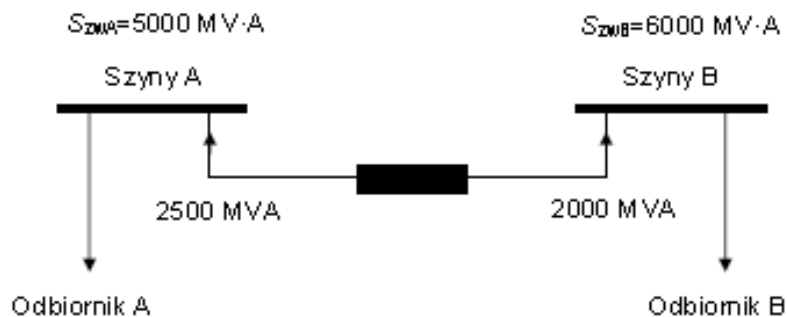
1. IEC 1000-3-7: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems – basic EMC publication.

### Przykład 4.8. [1]

W przypadku, gdy konieczne jest wyznaczenie wahań napięcia w punkcie sieci zasilającej w którym ma być przyłączony kolejny odbiornik niespokojny można wyróżnić trzy przypadki:

- o rozważany punkt znajduje się w dużej „elektrycznej” odległości od innych źródeł wahań i można przyjąć, że poziom zaburzenia w tym punkcie nie zależy od emisji innych odbiorników niespokojnych;
- o rozważany punkt znajduje się w niewielkiej odległości od innego źródła wahań, dlatego obydwie instalacje mogą być traktowane jako jeden zagregowany odbiór niespokojny
- o poziom wahań napięcia w rozważanym punkcie jest efektem sumowania zaburzeń pochodzących od innego lub wielu różnych odbiorników niespokojnych przyłączonych w niewielkiej odległości, co sprawia, że niezbędne jest uwzględnienie ich wzajemnego wpływu.

Na rysunku Z8.16 przedstawiono schemat sieci z dwoma odbiornikami niespokojnymi, które ze względu na odległość elektryczna wpływają wzajemnie na siebie.



Rysunek Z8.16. Dwa odbiorniki niespokojne zasilane z dwóch punktów „elektrycznie” bliskich (Przykład 4.8)

Ocenie podlega poziom wahań napięcia na szynach A. Zaburzenie powodowane jest pracą odbiornika A oraz pracą odbiornika B zainstalowanego w pewnej „elektrycznej” odległości.

Podczas pracy wyłącznie odbiornika A poziom wahań napięcia określony jest wartością wskaźnika  $P_{stA}$  zmierzonego w punkcie A:  $P_{stA} = 0,8$ .

Podczas pracy wyłącznie odbiornika B poziom wahań napięcia określony jest wartością wskaźnika  $P_{stB}$  zmierzonego w punkcie B:  $P_{stB} = 0,6$ .

Procedura oceny wzajemnego oddziaływania polega w tym przypadku na zastąpieniu odbiornika B, odbiornikiem B1 o zredukowanej mocy, który w punkcie A wywoła takie same wahanie jak odbiornik B, lecz będzie przyłączony do szyn A. Wówczas wskaźnik  $P_{stA,B1}$  zmierzony w punkcie A będący miarą liczbową wahań wywołanych przez odbiornik B1 ma wartość:

$$P_{stA,B1} = P_{stB} \left[ \frac{\text{udział szyn A w poziomie mocy zwarcia szyn B}}{S_{zwA} - \text{udział szyn B w poziomie mocy zwarcia szyn A}} \right] = 0,6 \cdot \left[ \frac{2000}{5000 - 2500} \right] = 0,48$$

Całkowity poziom zaburzenia na szynach A można wyznaczyć na podstawie zależności (4.25) przyjmując przykładowo  $m=3$ :

$$P_{stA,B} = \sqrt[3]{0,8^3 + 0,48^3} = 0,85$$

### LITERATURA

1. ER P28: Electricity Association Eng. Recommendation P28: Planning limits for voltage fluctuation caused by industrial, commercial and domestic equipment in the United Kingdom, 1989.

### Przykład 4.9. [1,2]

Wyznaczyć moc zastępczą ośmiu pieców łukowych pracujących w jednej stalowni o mocach (tzw. metoda Jenkinsa):

$$P_1 = 80 \text{ MW} \quad P_2 = 80 \text{ MW} \quad P_3 = 65 \text{ MW} \quad P_4 = 65 \text{ MW} \quad P_5 = 16 \text{ MW} \quad P_6 = 16 \text{ MW} \quad P_7 = 16 \text{ MW} \quad P_8 = 16 \text{ MW}$$

**Krok 1:** normalizacja mocy pieców względem największego pieca

$$P_1^\# = 1 \quad P_2^\# = 1 \quad P_3^\# = 65/80 = 0,8125 \quad P_4^\# = 0,8125 \quad P_5^\# = 16/80 = 0,2 \quad P_6^\# = 0,2 \quad P_7^\# = 0,2 \quad P_8^\# = 0,2$$

**Krok 2:** wyznaczanie momentów statystycznych

$$M_1 = 0,1638 \left[ (1) + (1)^2 + (0,8125)^2 + (0,8125)^2 + (0,2)^2 + (0,2)^2 + (0,2)^2 + (0,2)^2 \right] = 0,5701$$

$$M_2 = 0,0485 \left[ (1) + (1)^4 + (0,8125)^4 + (0,8125)^4 + (0,2)^4 + (0,2)^4 + (0,2)^4 + (0,2)^4 \right] = 0,1396$$

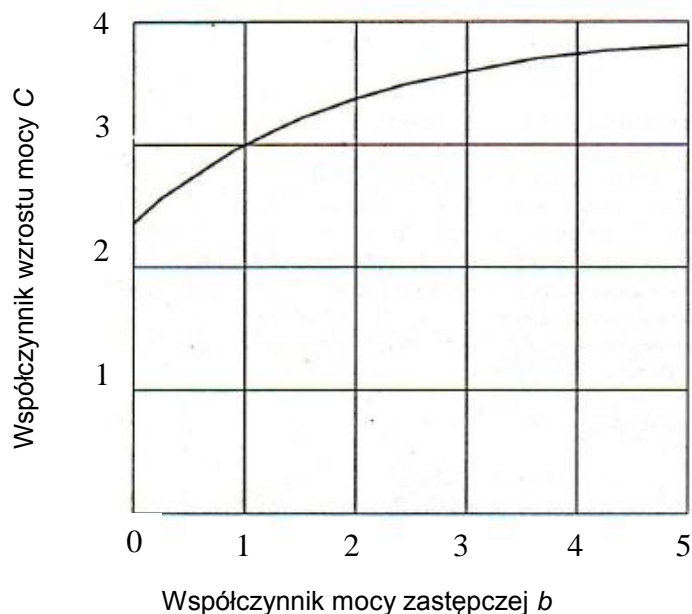
$$M_3 = 0,0239 \left[ (1) + (1)^6 + (0,8125)^6 + (0,8125)^6 + (0,2)^6 + (0,2)^6 + (0,2)^6 + (0,2)^6 \right] = 0,0615$$

**Krok 3:** wyznaczanie współczynnika mocy zastępczej (ang. *guide number*)

$$b = \frac{M_3^2}{M_2^3} = \frac{0,0615^2}{0,1396^3} = 1,39$$

**Krok 4:** wyznaczanie współczynnika wzrostu moc C (ang. *stretch factor*)

Współczynnik ten może być estymowany na podstawie charakterystyki jak na rysunku Z8.17.



Rysunek Z8.17. Zależność współczynnika wzrostu mocy od współczynnika mocy zastępczej [1] (Przykład 4.9)

**Krok 5:** Wyznaczanie mocy zastępczego pieca łukowego

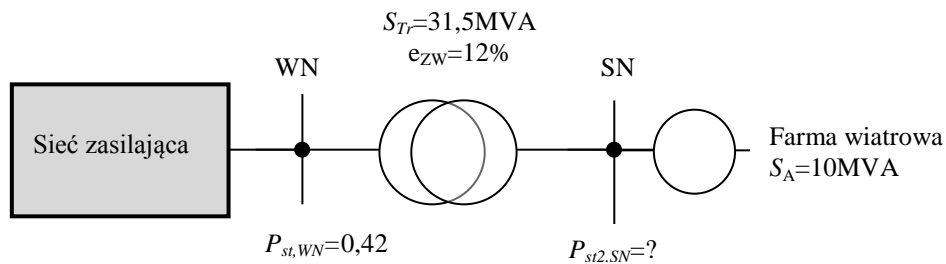
$$P_\Sigma = P_1 \sqrt{M_1 + C \sqrt{M_2}} = 80 \sqrt{0,5701 + 3,15 \sqrt{0,1396}} = 80 \cdot (1,31) = 106 \text{ MW}$$

#### LITERATURA

1. Mendis S.R., Bishop M.T., Do A.V., Boyd D.M.: Investigation of transmission system voltage flicker due to multiple AC and DC furnace operations, IEEE Trans. on Power Del., 1, 10, 1995.
2. Oltrogge A.R.: Arc-furnace voltage can be critical, Electrical World, Dec. 1974.

### Przykład 4.10. [1]

Wyznaczyć udział wahań napięcia pochodzących z sieci WN w miejscu przyłączenia farmy wiatrowej o mocy  $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$  (generatory synchroniczne, rys. Z8.18).



Rysunek Z8.18. Propagacja wahań napięcia z sieci WN do sieci SN (Przykład 4.10)

Współczynnik transformacji wahań (Tabela 4.14):

$$T_{P_{st,WN-SN}} \approx \frac{1}{1 + \frac{e_{ZW\%} S_A}{100 S_{Tr}}} = \frac{1}{1 + \frac{12 \cdot 10 \text{ MV} \cdot \text{A}}{100 \cdot 31,5 \text{ MV} \cdot \text{A}}} = 0,96$$

Stąd:  $P_{st,SN} = T_{P_{st,WN-SN}} \cdot P_{st,WN} = 0,96 \cdot 0,42 = 0,40$

### LITERATURA

1. Mombauer W. (materiał otrzymany od autora)

### Przykład 4.11. [1]

Wyznaczyć poziom wahań napięcia w sieci SN w układzie jak na rysunku Z8.18 dla następujących danych:

poziom tła w sieci WN (wyłączona turbina wiatrowa)	- $P_{st,WN} = 0,36$
moc i napięcie zwarcia transformatora Tr	- $S_{Tr} = 1 \text{ MV} \cdot \text{A}; 10\%$
turbina wiatrowa (maszyna asynchroniczna)	- $S_{GN} = 1 \text{ MV} \cdot \text{A}; I_A/I_N = 6$
wahania napięcia wywołane pracą turbiny w sieci SN	- $P_{st,SN,G} = 0,37$

$$S_A = \frac{I_A}{I_N} S_{GN} = 6 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$\text{Współczynnik transformacji: } T_{P_{st,WN-SN}} \approx \frac{1}{1 + \frac{e_{ZW\%} S_A}{100 S_{Tr}}} = \frac{1}{1 + \frac{10 \cdot 6 \text{ MV} \cdot \text{A}}{100 \cdot 1 \text{ MV} \cdot \text{A}}} = 0,625$$

Poziom wahań napięcia w sieci SN pochodzący od źródeł zlokalizowanych w sieci WN:

$$P_{st,WN-SN} = T_{P_{st,WN-SN}} P_{st,WN} = 0,625 \cdot 0,36 = 0,225$$

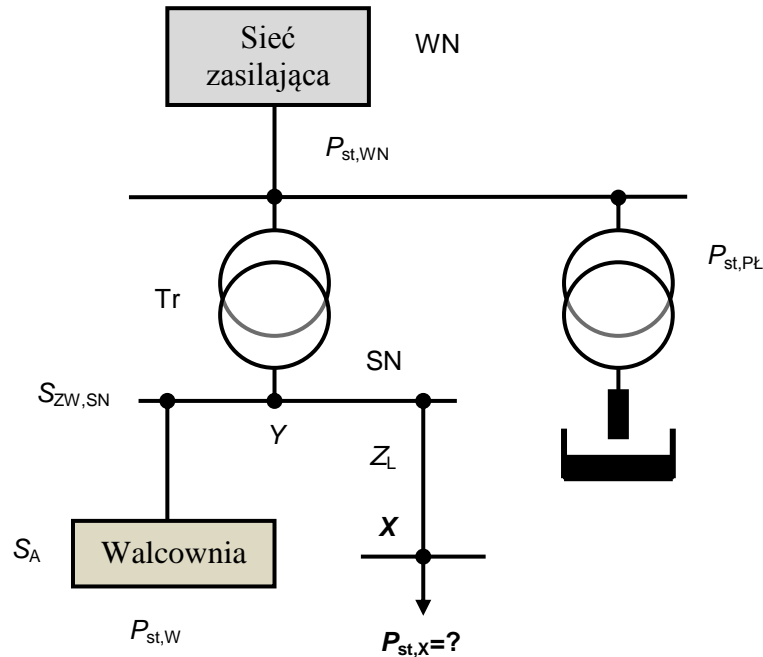
Całkowity poziom wahań w sieci SN:

$$P_{st,SN} = \sqrt[3]{P_{st,WN-SN}^3 + P_{st,SN,G}^3} = \sqrt[3]{0,225^3 + 0,36^3} = 0,39$$

#### LITERATURA

1. Mombauer W. (materiał otrzymany od autora)

**Przykład 4.12.** [1]



Rysunek Z8.19. Sieć zasilająca z walcarką i piecem łukowym (Przykład 4.12)

Dla układu jak na rysunku Z8.19 wyznaczyć poziom wahań napięcia w punkcie X.

- |  |   |
|--|---|
| poziom wahań napięcia wywołanych pracą walcarki                              | - $P_{st,W} = 0,43$   |
| poziom wahań napięcia wywołanych pracą pieca łukowego                        | - $P_{st,PL} = 0,63$  |
| poziom wahań napięcia w sieci WN<br>(tło, wyłączona walcownia i piec łukowy) | - $P_{st,T} = 0,24$   |
| moc i napięcie zwarcia transformatora  | - $S_{Tr} = 31,5 \text{ MV} \cdot \text{A}$ , $e_{ZW}=12\%$ |
| walcarka   | - $S_N = 10 \text{ MV} \cdot \text{A}$ , $I_A/I_N = 6$      |

Moc walcarki w stanie dynamicznym:

$$S_A = S_N \frac{I_A}{I_N} = 10 \cdot 6 = 60 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

Współczynnik propagacji wahań napięcia z sieci WN do sieci SN:

$$T_{P_{st,WN-SN}} \approx \frac{1}{1 + \frac{e_{ZW\%} S_A}{100 S_{Tr}}} = \frac{1}{1 + \frac{12 \cdot 60}{100 \cdot 31,5}} = 0,81$$

Poziom wahań napięcia w sieci WN:

$$P_{st,WN} = \sqrt[3]{P_{st,T}^3 + P_{st,PL}^3} = \sqrt[3]{0,24^3 + 0,63^3} = 0,64$$

Transformacja wahań napięcia z sieci WN do sieci SN (punkt Y):

$$P_{st,WN-SN} = T_{P_{st,WN-SN}} \cdot P_{st,WN} = 0,81 \cdot 0,64 = 0,52$$

Całkowity poziom wahań napięcia w punkcie Y:

$$P_{st,Y} = \sqrt[3]{P_{st,WN-SN}^3 + P_{st,W}^3} = \sqrt[3]{0,52^3 + 0,43^3} = 0,60$$

Taki sam poziom wahań napięcia wystąpi w punkcie X.

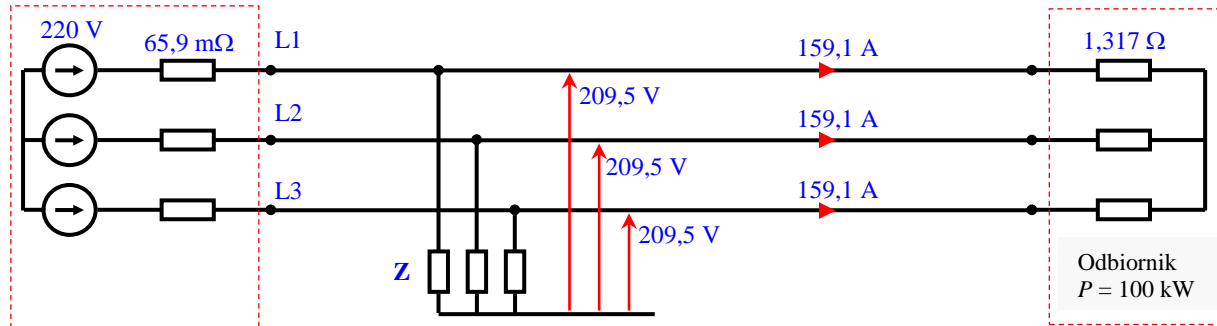
**LITERATURA**

1. Mombauer W. (materiał otrzymany od autora)

## PRZYKŁAD 5.1 [1]

Trójfazowe źródło napięcia zasila odbiorniki liniowe o mocy czynnej 100 kW. W zależności od charakteru odbiornika otrzymuje się różne wartości mocy pozornych (zależność 5.22) i różne wartości współczynników mocy – Przypadek 1-3.

**Przypadek 1:** Odbiornik symetryczny ( $R$ ) (rys. Z8.20)

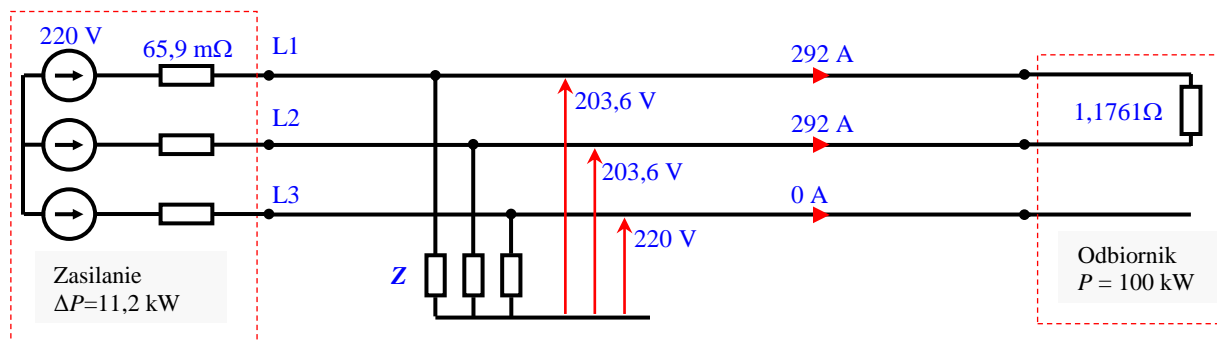


Rysunek Z8.20. Przypadek 1 (Przykład 5.1) [1]

$$S_A = S_G = S_B = 100 \text{ kV} \cdot \text{A} \quad PF = \frac{P_\Sigma}{S} = PF_A = \frac{P_\Sigma}{S_A} = PF_G = \frac{P_\Sigma}{S_G} = PF_B = \frac{P_\Sigma}{S_B} = 1$$

gdzie:  $P_\Sigma = P_{L1} + P_{L2} + P_{L3}$      $Q_\Sigma = Q_{L1} + Q_{L2} + Q_{L3}$

**Przypadek 2:** Odbiornik niesymetryczny ( $R$ ) (rys. Z8.21)



Rysunek Z8.21. Przypadek 2 (Przykład 5.1) [1]

$$S_A = 119 \text{ kV} \cdot \text{A} \quad S_G = 100 \text{ kV} \cdot \text{A} \quad S_B = 149,6 \text{ kV} \cdot \text{A}$$

$$PF_A = \frac{P_\Sigma}{S_A} = 0,84 \quad PF_G = \frac{P_\Sigma}{S_G} = 1 \quad PF_B = \frac{P_\Sigma}{S_B} = 0,67$$

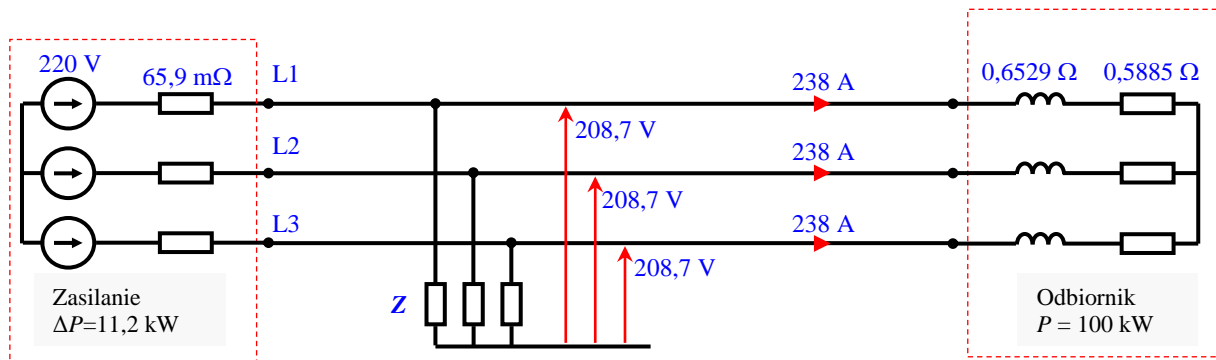
**Przypadek 3:** Odbiornik symetryczny ( $RL$ ) (rys. Z8.22)

$$S_A = 149,4 \text{ kV} \cdot \text{A} \quad S_G = 149,4 \text{ kV} \cdot \text{A} \quad S_B = 149,4 \text{ kV} \cdot \text{A}$$

$$PF_A = \frac{P_\Sigma}{S_A} = PF_G = \frac{P_\Sigma}{S_G} = PF_B = \frac{P_\Sigma}{S_B} = 0,67$$

## LITERATURA

1. Czarniecki L.: Moce i kompensacja w obwodach z okresowymi przebiegami prądu i napięcia, Część 6: Moce w niezrównoważonych obwodach trójfazowych z przebiegami sinusoidalnymi prądu i napięcia, JUEE, 6, 1, 2000.

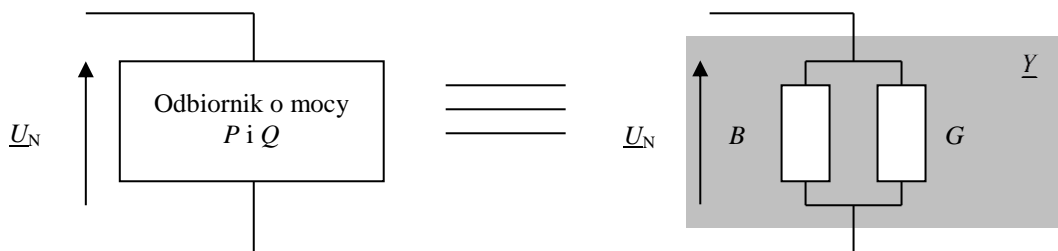


Rysunek Z8.22. Przypadek 3 (Przykład 5.1) [1]

## PRZYKŁAD 5.2.

Dla trzech odbiorników o napięciu znamionowym 400 V i mocach odpowiednio:  $P_A = 8,0$  kW,  $Q_A = 8,0$  kvar (ind.);  $P_B = 8,0$  kW,  $Q_B = 8,0$  kvar (poj.);  $P_C = 8,0$  kW,  $Q_C = 0$  połączonych w trójkąt i zasilanych z trójfazowej sieci 3x400/230 V określić sposób ich przyłączenia do poszczególnych faz układu, gwarantujący minimalną wartość współczynnika asymetrii prądu.

Na podstawie mocy czynnych i biernych można wyznaczyć elementy admittancji zastępczej odbiornika: tzn. susceptancję ( $B = \frac{Q}{U^2}$ ) i konduktancję ( $G = \frac{P}{U^2}$ ) (rys. Z8.23).



Rysunek Z8.23. Odbiornik o mocach:  $P$  i  $Q$  oraz jego zastępcza admittancja (Przykład 5.2)

$$\text{Stąd: } \underline{Y}_A = G_A + jB_A = \frac{P_A}{U^2} - j\frac{Q_A}{U^2} = \frac{8\text{ kW}}{(400\text{ V})^2} - j\frac{8\text{ kvar}}{(400\text{ V})^2} = (0,05 - j0,05)\text{ S}$$

$$\underline{Y}_B = G_B + jB_B = \frac{P_B}{U^2} + j\frac{Q_B}{U^2} = \frac{8\text{ kW}}{(400\text{ V})^2} + j\frac{8\text{ kvar}}{(400\text{ V})^2} = (0,05 + j0,05)\text{ S}$$

$$\underline{Y}_C = G_C + jB_C = \frac{P_C}{U^2} + j\frac{Q_C}{U^2} = \frac{8\text{ kW}}{(400\text{ V})^2} + j\frac{0\text{ kvar}}{(400\text{ V})^2} = 0,1\text{ S}$$

Wariant połączenia Nr 1 – Układ połączeń odbiorników jak na rysunku Z8.24:

$$\underline{U}_{L1} = 220\exp(j0^0)$$

$$\underline{U}_{L2} = a^2\underline{U}_{L1}$$

$$\underline{U}_{L3} = a\underline{U}_{L1}$$

$$\underline{U}_{L12} = \sqrt{3}\underline{U}_{L1}\exp(j30^0)$$

$$\underline{U}_{L23} = a^2\underline{U}_{L12}$$

$$\underline{U}_{L31} = a\underline{U}_{L12}$$

$$\underline{I}_{L12} = \underline{U}_{L12}\underline{Y}_{L12} = 380\exp(j30^0) \cdot (0,05 - j0,05) = (25,954 - j6,954)\text{ A}$$

$$\underline{I}_{L23} = \underline{U}_{L23}\underline{Y}_{L23} = (18,999 - j18,999)\text{ A}$$

$$\underline{I}_{L31} = \underline{U}_{L31}\underline{Y}_{L31} = (-32,908 - j25,952)\text{ A}$$

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{L12} - \underline{I}_{L31} = (58,862 - j25,952)\text{ A}$$

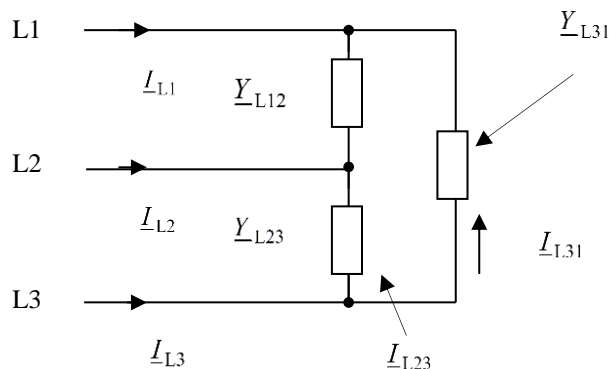
$$\underline{I}_{L2} = \underline{I}_{L23} - \underline{I}_{L12} = (-6,955 - j12,045)\text{ A}$$

$$\underline{I}_{L3} = \underline{I}_{L31} - \underline{I}_{L23} = (-51,907 + j37,997)\text{ A}$$

$$\underline{Y}_{L12} = \underline{Y}_A$$

$$\underline{Y}_{L23} = \underline{Y}_B$$

$$\underline{Y}_{L31} = \underline{Y}_C$$



Rysunek Z8.24. Wariant połączenia odbiorników Nr 1 (Przykład 5.2)

Składowa symetryczna kolejności przeciwnej:

$$I_2 = \frac{1}{3}(\underline{I}_{L1} + a^2 \underline{I}_{L2} + a \underline{I}_{L3}) = (14,986 - j25,952)A$$

Składowa symetryczna kolejności zgodnej:

$$I_1 = \frac{1}{3}(\underline{I}_{L1} + a \underline{I}_{L2} + a^2 \underline{I}_{L3}) = (43,876 + j0,00017)A$$

Współczynnik asymetrii prądu:

$$k_{1\%} = \frac{|I_2|}{|I_1|} 100\% = 68,3\%$$

Wartość współczynnika asymetrii prądu można wyznaczyć także na podstawie znajomości admitancji zastępczych odbiorników połączonych w trójkąt:

$$k_{1\%} = \frac{|I_2|}{|I_1|} 100\% = \frac{|a^2 \underline{Y}_{L12} + \underline{Y}_{L23} + a \underline{Y}_{L31}|}{|\underline{Y}_{L12} + \underline{Y}_{L23} + \underline{Y}_{L31}|} 100\% = 68,3\%$$

Przebiegi czasowe napięć i prądów fazowych przedstawiono na rysunku Z8.25b.

Wariant połączenia Nr 2 -

$$\underline{Y}_{L12} = \underline{Y}_A$$

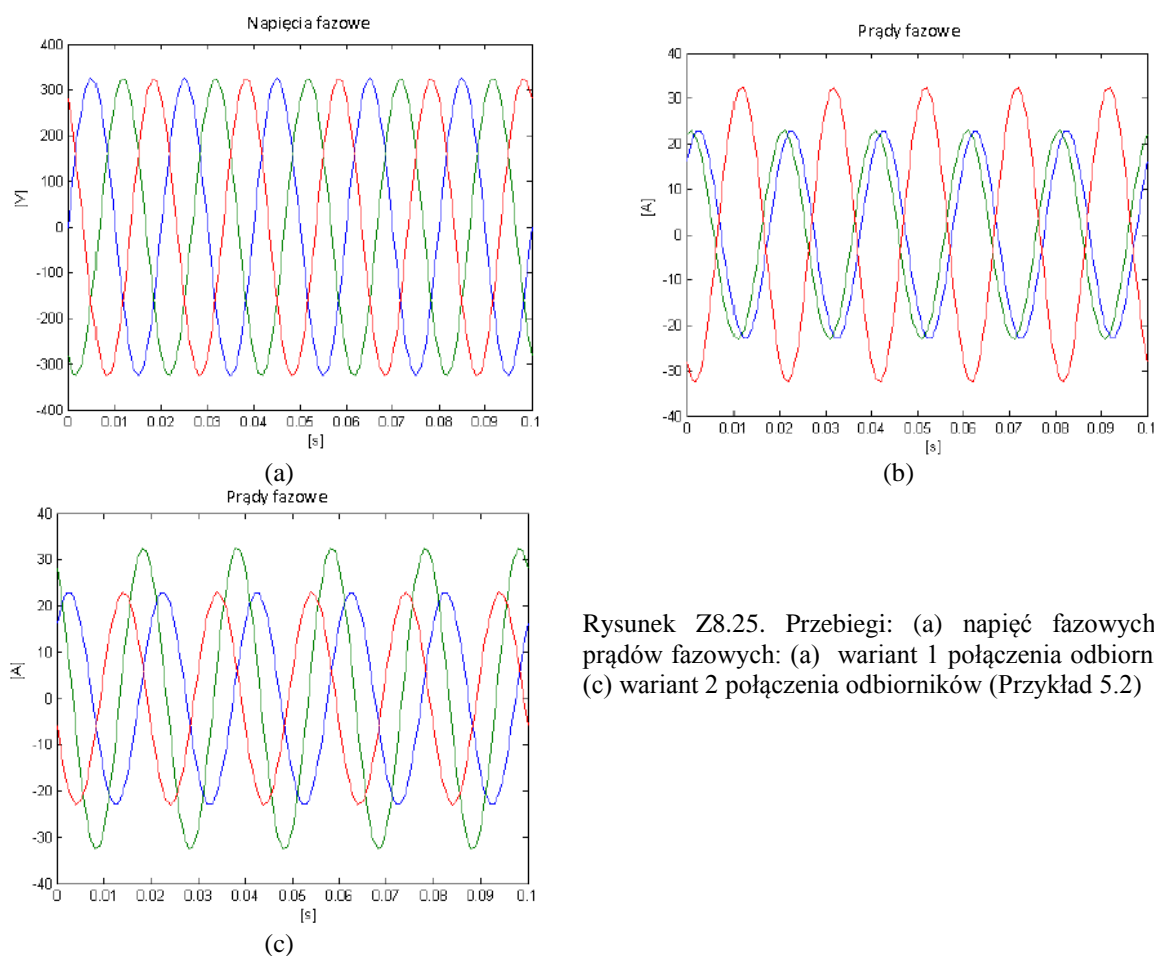
$$\underline{Y}_{L23} = \underline{Y}_C$$

$$\underline{Y}_{L31} = \underline{Y}_B$$

Współczynnik asymetrii prądu:

$$k_{1\%} = \frac{|I_2|}{|I_1|} 100\% = \frac{|a^2 \underline{Y}_{L12} + \underline{Y}_{L23} + a \underline{Y}_{L31}|}{|\underline{Y}_{L12} + \underline{Y}_{L23} + \underline{Y}_{L31}|} 100\% = 18,3\%$$

Jest to najmniejsza wartość współczynnika asymetrii prądu, którą można uzyskać stosując różne konfiguracje przyłączenia impedancji do poszczególnych napięć międzyfazowych. Ten układ połączeń przyjęto do dalszych rozważań.



Rysunek Z8.25. Przebiegi: (a) napięć fazowych; (b) prądów fazowych: (a) wariant 1 połączenia odbiorników; (c) wariant 2 połączenia odbiorników (Przykład 5.2)

### PRZYKŁAD 5.3.

Niesymetryczny odbiornik o admitancjach jak na rysunku Z8.26 jest zasilony z symetrycznej, trójfazowej, trójprzewodowej sieci 3x400/230 V.

$$\underline{U}_{L1} = 230V \quad \underline{U}_{L2} = a^2 230V \quad \underline{U}_{L3} = a 230V$$

$$\underline{I}_{L12} = \underline{U}_{L12} Y_{L12} = (32,9 + j19)A \quad \underline{I}_{L23} = \underline{U}_{L23} Y_{L23} = -j76A \quad \underline{I}_{L31} = \underline{U}_{L31} Y_{L31} = (-98,72 + j57)A$$

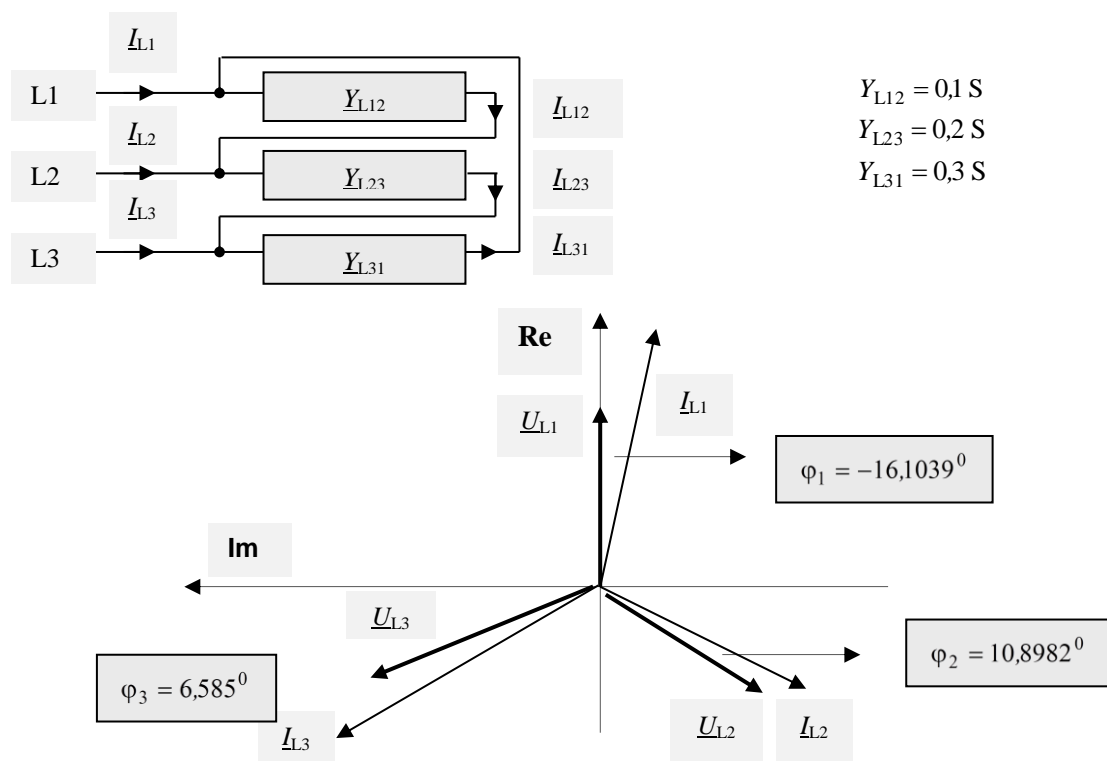
$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{L12} - \underline{I}_{L31} = 131,62 - j38 = 136,995 \exp(-j16,1039^\circ)A$$

$$\underline{I}_{L2} = \underline{I}_{L23} - \underline{I}_{L12} = -32,9 - j95 = 100,5356 \exp(-j109,101^\circ)A$$

$$\underline{I}_{L3} = \underline{I}_{L31} - \underline{I}_{L23} = -98,72 + j133 = 165,634 \exp(j126,585^\circ)A$$

Moc czynna odbiornika:

$$P_{\Sigma} = U^2 (Y_{L12} + Y_{L23} + Y_{L31}) = 400^2 (0,1 + 0,2 + 0,3) = 86640 W$$



Rysunek Z8.26. Schemat zastępczy przykładowego odbiornika asymetrycznego (a) oraz wykres wskazowy prądów i napięć sieci zasilającej (Przykład 5.3)

#### Parametry dwójnika symetryzującego

Sposób symetryzacji asymetrycznych prądów sieci zasilającej:  $\underline{I}_{L1} \neq \underline{I}_{L2} \neq \underline{I}_{L3}$  za pomocą jednofazowych dwójników wywołujących przepływ odpowiednich prądów symetryzujących przedstawiono dla trzech możliwych przypadków.

W wariancie Nr 1, symetryczne prądy sieci zasilającej:  $\underline{I}_{L1}^* = \underline{I}_{L1}$ ,  $\underline{I}_{L2}^* = a^2 \underline{I}_{L1}^*$  oraz  $\underline{I}_{L3}^* = a \underline{I}_{L1}^*$  (indeks (\*) oznacza stan po symetryzacji) występują wówczas, gdy do źródła napięcia  $\underline{U}_{L23}$  zostanie przyłączony dwójnik

wywołujący przepływ prądu  $\underline{I}_{dL23}$ , który spełnia równości:  $\underline{I}_{L2}^* = \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{dL23}$  oraz  $\underline{I}_{L3}^* = \underline{I}_{L3} - \underline{I}_{dL23}$ .

Przyłączenie elementu symetryzacyjnego, o impedancji  $\underline{Z}_{dij}$  ( $i, j = L1, L2, L3$ ;  $i \neq j$ ) prawie zawsze wiąże się z dodatkową mocą czynną i bierną, bowiem jednoelementowy symetryzator w ogólnym przypadku zawiera rezystancję i reaktancję zastępczą. Znak jego mocy czynnej i biernej może być zarówno dodatni jak i ujemny. Oznacza to różny charakter mocy biernej (indukcyjna lub pojemnościowa) oraz różny kierunek przepływu mocy czynnej (dostarczanie lub odbiór mocy).

W analogiczny sposób można dokonać symetryzacji przyjmując za nie podlegający zmianie w tym procesie odpowiednio:

- o prąd  $\underline{I}_{L2}$ . Wówczas po symetryzacji:  $\underline{I}_{L2}^{**} = \underline{I}_{L2}$ ,  $\underline{I}_{L3}^{**} = a^2 \underline{I}_{L2}^{**}$  oraz  $\underline{I}_{L1}^{**} = a \underline{I}_{L2}^{**}$ . Jednoelementowy symetryzator przyłączany jest do źródła napięcia  $U_{L31}$  (Wariant Nr 2)
- o prąd  $\underline{I}_{L3}$ . Wówczas po symetryzacji:  $\underline{I}_{L3}^{***} = \underline{I}_{L3}$ ,  $\underline{I}_{L1}^{***} = a^2 \underline{I}_{L3}^{***}$  oraz  $\underline{I}_{L2}^{***} = a \underline{I}_{L3}^{***}$ . Jednoelementowy symetryzator przyłączany jest do źródła napięcia  $U_{L12}$  (Wariant Nr 3).

Na podstawie zależności opisujących związki prądowo-napięciowe dla układu jak na rysunku Z8.25 można wykazać, że pomiędzy impedancjami jednofazowych elementów symetryzujących istnieje zależność:

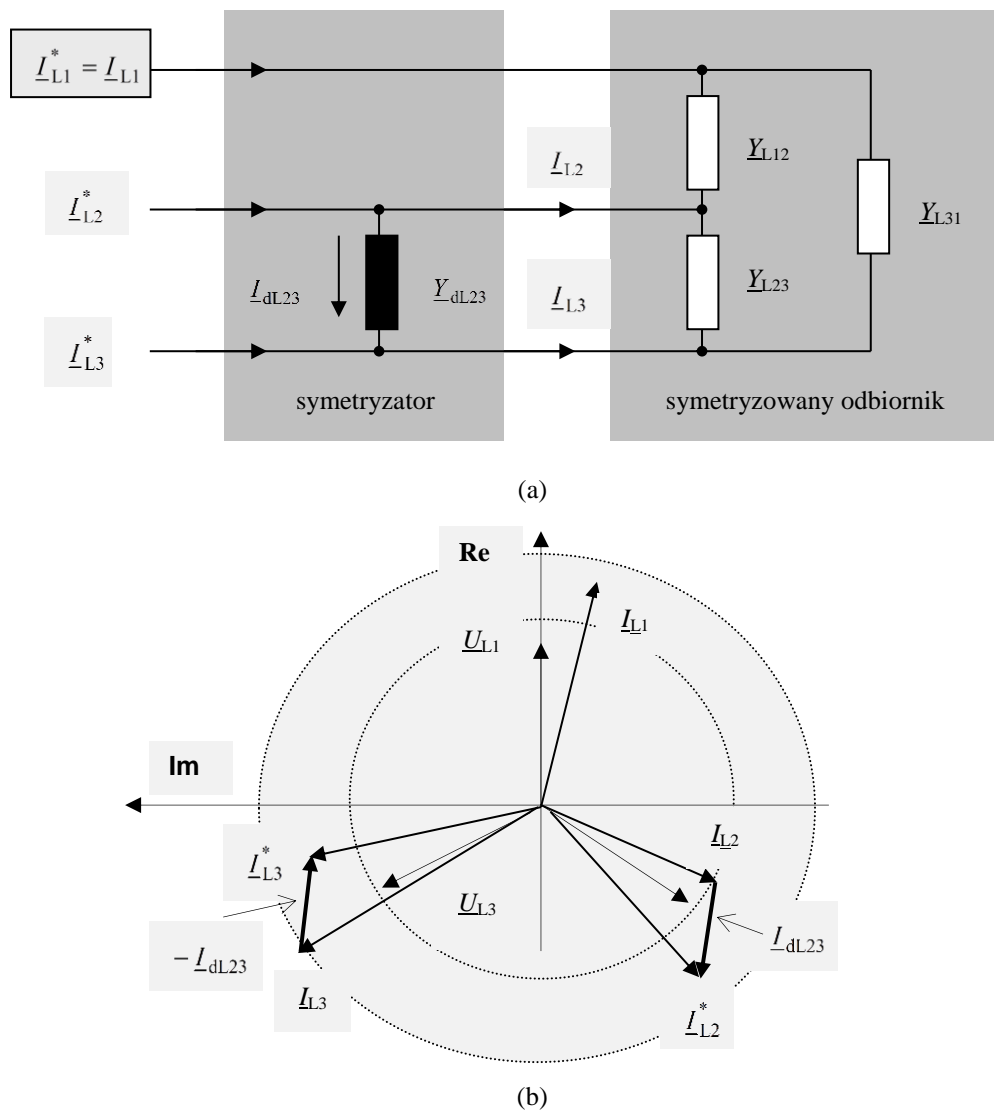
$$\underline{Z}_{dL12} = a^2 \underline{Z}_{dL23} = a \underline{Z}_{dL31} = -(\underline{Y}_{L12} + a \underline{Y}_{L23} + a^2 \underline{Y}_{L31})^{-1} = |\underline{Z}_{dL12}| \exp(j\varphi_{dL12})$$

Analogiczny związek występuje pomiędzy zespolonymi mocami pozornymi symetryzujących odbiorników:

$$\underline{S}_{dL23} = |\underline{S}_d| \exp(j\varphi_d) = a^2 \underline{S}_{dL23} = a \underline{S}_{dL12}$$

Zawsze istnieje więc możliwość określenia składowej niesymetrycznej odbiornika jako elementu realnego fizycznie (dodatnia część rzeczywista).

#### Wariant Nr 1 (rysunek Z8.27)



Rysunek Z8.27. Symetryzacja odbiornika przy warunku  $\underline{I}_{L1}^* = \underline{I}_{L1}$  (Wariant Nr 1) (Przykład 5.3)

$$\underline{I}_{L1}^* = \underline{I}_{L1} = (131,62 - j38)A$$

$$\underline{I}_{L2}^* = a^2 \underline{I}_{L1}^* = (-98,718 - j94,986)A$$

$$\underline{I}_{L3}^* = a \underline{I}_{L1}^* = (-32,901 - j132,986)A$$

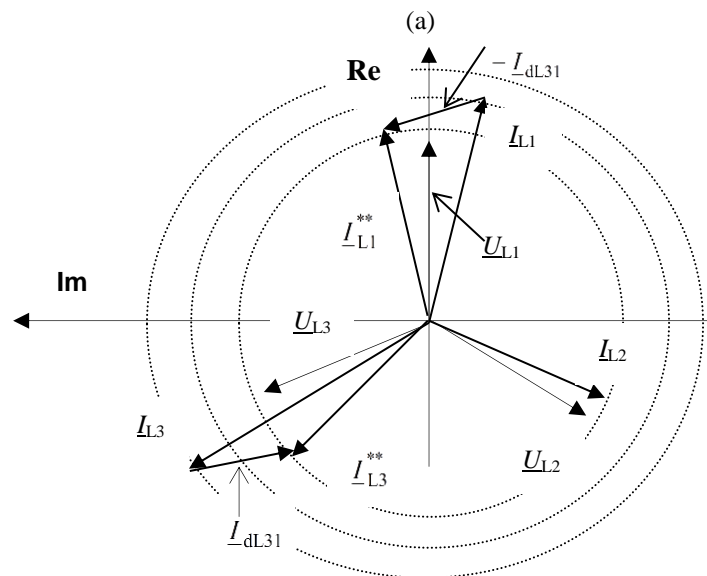
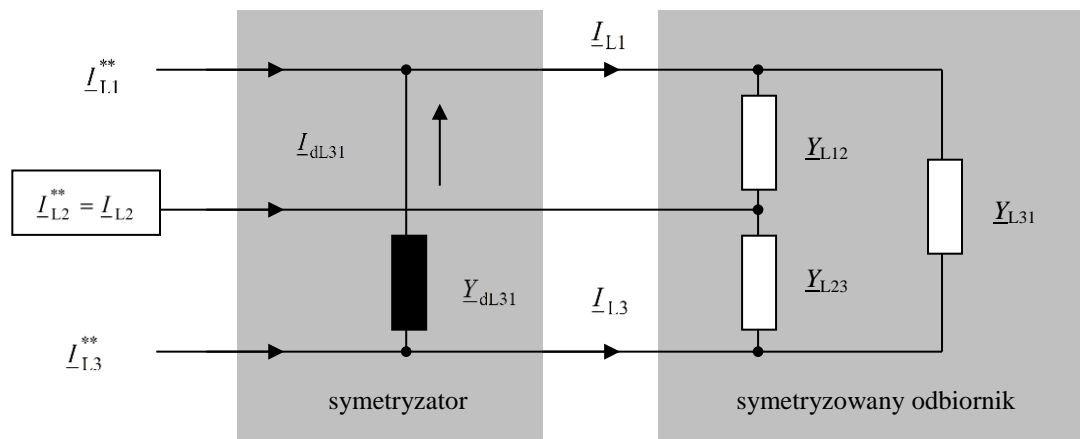
Stąd:  $\underline{I}_{dL23} = \underline{I}_{L2}^* - \underline{I}_{L2} = -(\underline{I}_{L3}^* - \underline{I}_{L3}) = (-65,818 + j0,013)A$

Schemat ideowy układu oraz wykres wskazowy napięć i prądów przedstawia rysunek Z8.27b.

$$\underline{Z}_{dL23} = \frac{1}{\underline{Y}_{dL23}} = \frac{\underline{U}_{L23}}{\underline{I}_{dL23}} = (-a^2 \underline{Y}_{L12} - \underline{Y}_{L23} - a \underline{Y}_{L31})^{-1} = a \underline{Z}_{dL12} = 5,7735 \exp(j90^\circ) = j5,7735 \Omega$$

Moc elementu symetryzującego:  $\underline{S}_{dL23} = \underline{U}_{L23} \underline{I}_{dL23} = j25011,2048 \text{ var} = |S| \exp(j90^\circ)$

Wariant 2 (rys. Z8.28)



(b)

Rysunek Z8.28. Symetryzacja odbiornika przy warunku  $\underline{I}_{L2}^{**} = \underline{I}_{L2}$  (Wariant Nr 2) (Przykład 5.3)

$$\underline{I}_{L2}^{**} = \underline{I}_{L2} = (-32,9 - j95)A$$

$$\underline{I}_{L3}^{**} = a^2 \underline{I}_{L2}^{**} = (-65,8224 + j75,992)A$$

$$\underline{I}_{L1}^{**} = a\underline{I}_{L2}^{**} = (98,722 + j19,007)\text{A}$$

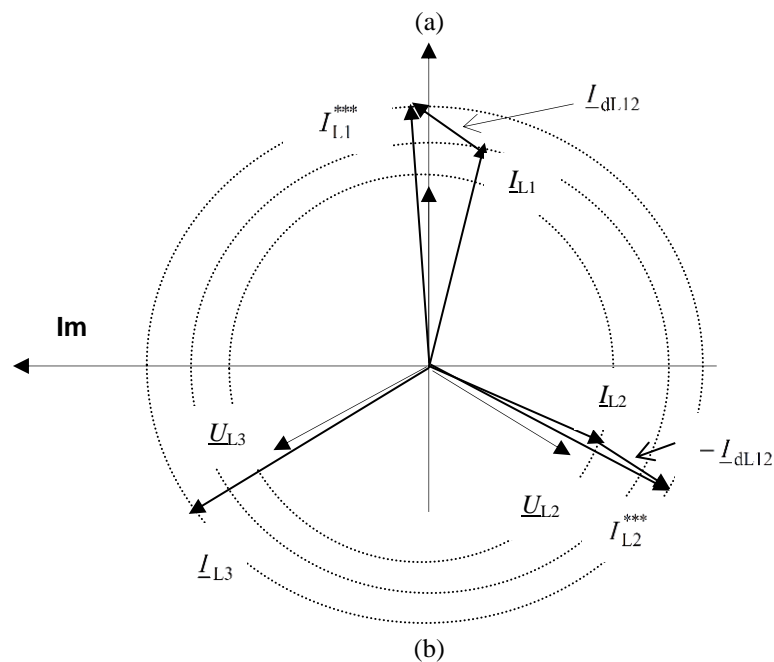
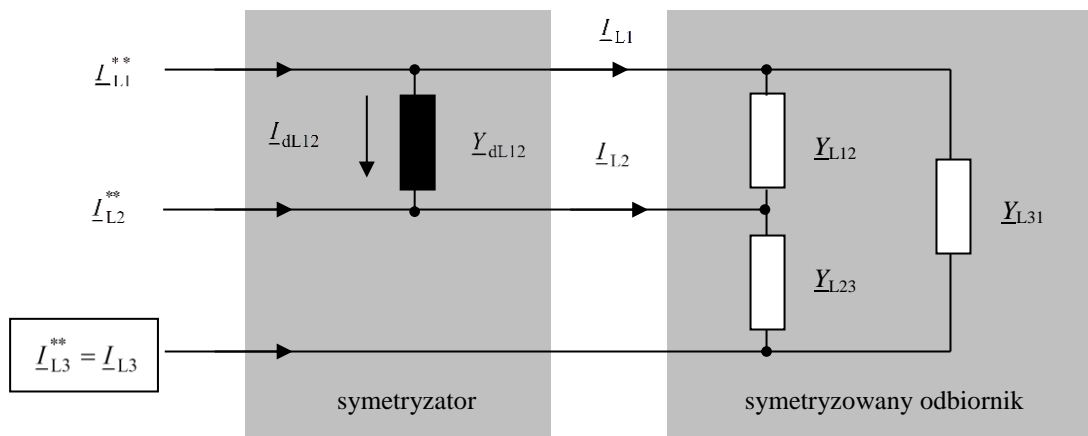
Stąd:  $\underline{I}_{dL31} = \underline{I}_{L3}^{**} - \underline{I}_{L3} = -(\underline{I}_{L1}^{**} - \underline{I}_{L1}) = (32,897 - j57,007)\text{A}$

Schemat ideowy układu oraz wykres wskazowy napięć i prądów przedstawia rysunek Z8.28b.

$$\underline{Z}_{dL31} = \frac{1}{\underline{Y}_{dL31}} = \frac{\underline{U}_{L31}}{\underline{I}_{dL31}} = (-a\underline{Y}_{L12} - a^2\underline{Y}_{L23} - \underline{Y}_{L31})^{-1} = a^2\underline{Z}_{dL12} = (-5 - j2,886) = 5,773\exp(j210^0)\Omega$$

Moc elementu symetryzującego:  $\underline{S}_{d31} = \underline{U}_{L31}\underline{I}_{d31} = 25011,204\exp(210^0)\text{var} = |S|\exp(j210^0)$

Wariant Nr 3 (rys. Z8.29)



$$\underline{I}_{L3}^{***} = \underline{I}_{L3} = (-98,72 + j133)\text{A}$$

$$\underline{I}_{L1}^{***} = a^2\underline{I}_{L3}^{***} = (164,541 + j18,994)\text{A}$$

$$\underline{I}_{L2}^{***} = a\underline{I}_{L3}^{***} = (-65,821 - j151,994)\text{A}$$

Stąd:  $\underline{I}_{dL12} = \underline{I}_{L1}^{***} - \underline{I}_{L1} = -(\underline{I}_{L2}^{***} - \underline{I}_{L2}) = (32,921 + j56,994)\text{A} = 65,819\exp(j60^0)$

Schemat ideowy układu oraz wykres wskazowy napięć i prądów przedstawia rysunek Z8.29b.

$$\underline{Z}_{dL12} = \frac{1}{\underline{Y}_{dL12}} = \frac{\underline{U}_{L12}}{\underline{I}_{dL12}} = (-\underline{Y}_{L12} - a\underline{Y}_{L23} - a^2\underline{Y}_{L31})^{-1} = (5 - j2,886) = 5,773\exp(-j30^0)\Omega$$

Moc elementu symetryzującego:  $\underline{S}_{dL12} = \underline{U}_{L12}\underline{I}_{dL12} = 25011,204\exp(-j30^0) \text{ var} = |S|\exp(-j30^0)$

Przedstawione trzy różne układy umożliwiające osiągnięcie symetrii prądów za pomocą dwójników symetryzujących przyłączanych do odpowiednich napięć międzyfazowych są ze względów ekonomicznych i technicznych (zwiększenie poboru mocy oraz wymagane źródło energii) mało przydatne w praktyce przemysłowej.

## LITERATURA

1. Kurbiel A., Hanzelka Z.: Symmetrization of supply network current – graphical approach. 5<sup>th</sup> Inter. Conf. Power Quality and Utilaization, Kraków-Przegorzały, 15-17 Sep. 1999.

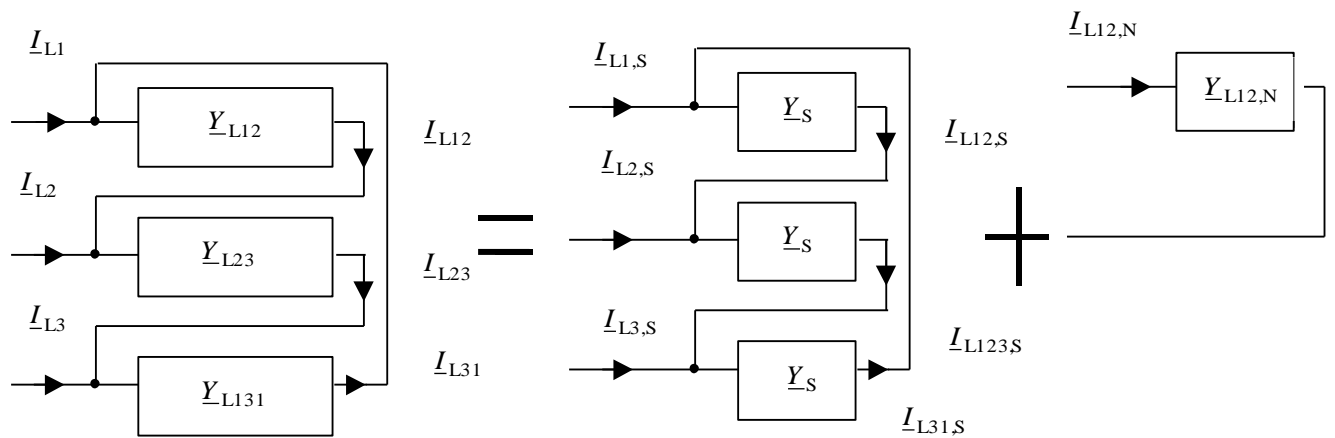
## PRZYKŁAD 5.4

Skoro prądy  $\underline{I}_{dLij}$  i związane z nimi impedancje  $\underline{Z}_{dLij}$  są potrzebne do symetryzacji, to te same impedancje ze znakiem przeciwnym (ujemne prądy  $\underline{I}_{dLij}$ ) są miarą asymetrii odbiornika. Tak więc dowolny niesymetryczny odbiornik można przedstawić - zachowując niezmienną wartość prądów sieci zasilającej i mocy fazowych – za pomocą sumy dwóch zastępczych odbiorników:

- o symetrycznego pobierającego moc czynną i bierną (indeks S przy symbolach);
- o niesymetrycznego mającego postać odbiornika jednofazowego włączonego pomiędzy odpowiednie fazy (indeks  $(\prime_d)$  przy symbolach).

Dla układu jak w PRZYKŁADZIE 5.3, wariant 3, w którym prąd  $\underline{I}_{L3}$  nie podlega zmianie w procesie symetryzacji, odbiornik niesymetryczny można przedstawić jak na rysunku Z8.30 gdzie:

$$\underline{Y}_S = \frac{(a+2)(\underline{Y}_{L31} - a\underline{Y}_{L23})}{3} \quad \underline{Y}'_{dL12} = \underline{Y}_{L12} + a\underline{Y}_{L23} + a^2\underline{Y}_{L31} = -\underline{Y}_{dL12} = -\underline{Z}_{dL12}^{-1} \quad (Z8.1)$$



Rysunek Z8.30. Zastąpienie odbiornika niesymetrycznego sumą odbiornika symetrycznego i odbiornika jednoelementowego reprezentującego niesymetrię (Przykład 5.4)

Jeżeli element jednofazowy, będący miarą niesymetrii rzeczywistego odbiornika jest przyłączony do innego napięcia międzyfazowego, wówczas zmieniają się odpowiednio indeksy w zależnościach (Z8.1) zgodnie z zasadą następstwa indeksów w układzie trójfazowym:  $\underline{Y}'_{dL12} = a\underline{Y}'_{dL23} = a^2\underline{Y}'_{dL31}$ .

Dla danych liczbowych jak w PRZYKŁADZIE 5.3, Wariant Nr 3 na podstawie zależności (Z8.1):

$$\begin{aligned} \underline{Y}_S &= (0,249 + j0,0289)S & \underline{Y}'_{dL12} &= (-0,15 - j0,086)S & \underline{I}_{dL12} &= \underline{U}_{L12}\underline{Y}'_{dL12} = (-32,909 - j56,99)A \\ \underline{I}_{L12,S} &= \underline{U}_{L12}\underline{Y}_S = (76,723 + j56,95)A & \underline{I}_{L1,S} &= \underline{I}_{L12,S} - \underline{I}_{L31,S} = (164,413 + j18,995)A \\ \underline{I}_{L23,S} &= \underline{U}_{L23}\underline{Y}_S = (10,966 - j94,924)A & \underline{I}_{L2,S} &= \underline{I}_{L23,S} - \underline{I}_{L12,S} = (-65,756 - j151,883)A \\ \underline{I}_{L31,S} &= \underline{U}_{L31}\underline{Y}_S = (-87,689 + j37,964)A & \underline{I}_{L3,S} &= \underline{I}_{L31,S} - \underline{I}_{L23,S} = (-98,656 + j132,888)A \end{aligned}$$

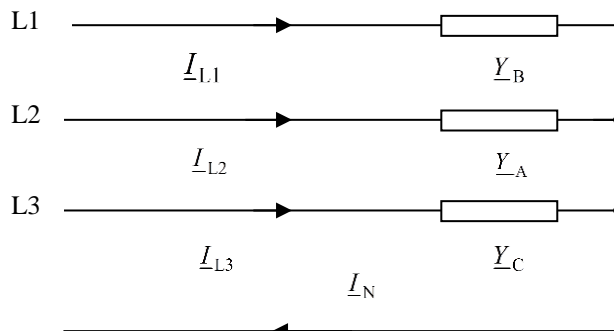
Podział odbiornika niesymetrycznego na dwa odbiorniki zastępcze – symetryczny trójfazowy i jednoelementowy, nie zmienia wartości prądów liniowych, które są takie same jak w PRZYKŁADZIE 5.3, Wariant Nr 3.

## PRZYKŁAD 5.5.

Do rozważań przyjęto sposób połączenia jak na rysunku Z8.31 – charakteryzuje się on minimalną wartością współczynnika asymetrii prądu (wartości elementów jak w PRZYKŁADZIE 5.2).

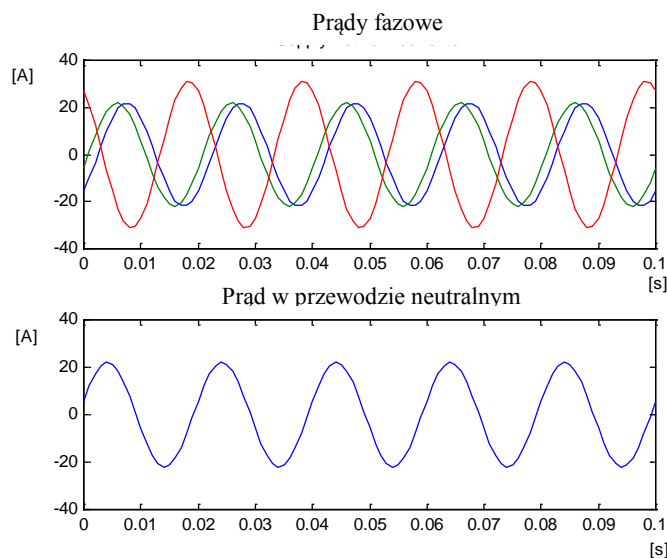
$$\underline{I}_{L1} = \underline{U}_{L1} \underline{Y}_B = 230 \cdot (0,05 + j0,05) = (11,5 + j11,5) \text{ A}$$

$$\underline{I}_{L2} = \underline{U}_{L2} \underline{Y}_A = (-15,709 - j4,209) \text{ A} \quad \underline{I}_{L3} = \underline{U}_{L3} \underline{Y}_C = (-11,5 - j19,889) \text{ A}$$



Rysunek Z8.31. Sieć trójfazowa, czteroprzewodowa, odbiornik połączony w gwiazdę z przewodem neutralnym (Przykład 5.5)

Prąd w przewodzie neutralnym (rys. Z8.32):  $\underline{I}_N = 3\underline{I}_0 = \underline{I}_{L1} + \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3} = (-15,709 - j27,209) \text{ A}$



Rysunek Z8.32. Prądy fazowe i prąd w przewodzie neutralnym przed symetryzacją (Przykład 5.5)

gdzie  $\underline{I}_0$  jest składową symetryczną kolejności zerowej prądu. Składowa symetryczna kolejności przeciwej:

$$\underline{I}_2 = \frac{1}{3}(\underline{I}_{L1} + a^2 \underline{I}_{L2} + a \underline{I}_{L3}) = (1,403 + j2,430) \text{ A}$$

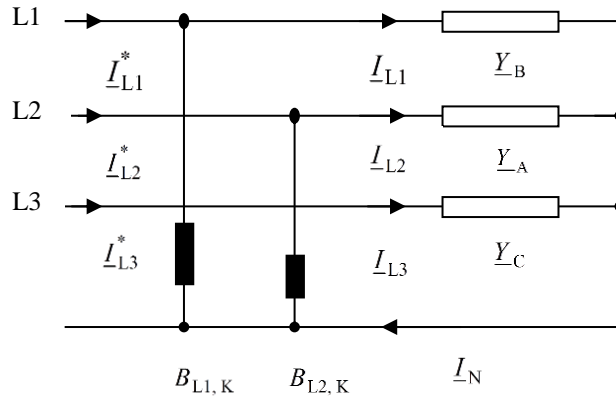
Składowa symetryczna kolejności zgodnej:  $\underline{I}_1 = \frac{1}{3}(\underline{I}_{L1} + a \underline{I}_{L2} + a^2 \underline{I}_{L3}) = 15,333 \text{ A}$

Współczynnik asymetrii prądu:  $k_{1\%} = \frac{|\underline{I}_2|}{|\underline{I}_1|} 100\% = 50\%$

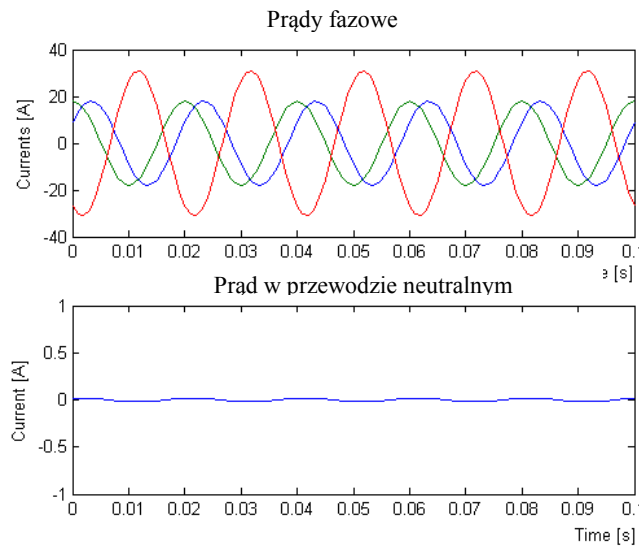
Eliminacja składowej zerowej prądu realizowana jest za pomocą dwuelementowego symetryzatora w przykładowym układzie jak na rysunku Z8.33.

Prądy źródła zasilania:

$$\underline{I}_{L1}^* = \underline{U}_{L1} (\underline{Y}_B + j\underline{B}_{L1,K}) \quad \underline{I}_{L2}^* = \underline{U}_{L2} (\underline{Y}_A + j\underline{B}_{L2,K}) \quad \underline{I}_{L3}^* = \underline{U}_{L3} \underline{Y}_C$$



Rysunek Z8.33. Eliminacja składowej symetrycznej kolejności zerowej (Przykład 5.5)



Rysunek Z8.34. Prądy fazowe i prąd w przewodzie neutralnym po symetryzacji (Przykład 5.5)

Warunek zerowania się prądu w przewodzie neutralnym przyjmuje postać:

$$\underline{I}_{L1}^* + \underline{I}_{L2}^* + \underline{I}_{L3}^* = 0$$

$$\text{Stąd: } \text{Im}(\underline{I}_{L1}^* + \underline{I}_{L2}^* + \underline{I}_{L3}^*) = 0 \quad \text{i} \quad \text{Re}(\underline{I}_{L1}^* + \underline{I}_{L2}^* + \underline{I}_{L3}^*) = 0$$

Po podstawieniu danych liczbowych:

$$0,05 - 0,0683 + 0,866B_{L2,K} - 0,05 = 0 \quad \text{i} \quad 0,05 + B_{L1,K} - 0,0183 - 0,5B_{L2,K} + 0,0866 = 0$$

$$\text{Stąd: } B_{L1,K} = -0,0789\text{S} \quad B_{L2,K} = 0,0789\text{S}$$

$$\underline{Y}_{\Sigma L1} = \underline{Y}_B + jB_{L1,K} = (0,05 - j0,0289)\text{S}$$

$$\underline{Y}_{\Sigma L2} = \underline{Y}_A + jB_{L2,K} = (0,05 + j0,0289)\text{S}$$

$$\underline{Y}_{\Sigma L3} = \underline{Y}_C + jB_{L3,K} = 0,1\text{S}$$

$$\underline{I}_{L1}^* = \underline{U}_{L1} \underline{Y}_{\Sigma L1} = 230 \cdot (0,005 - j0,0289) = (11,5 - j6,647)\text{A}$$

$$\underline{I}_{L2}^* = \underline{U}_{L2} \underline{Y}_{\Sigma L2} = (0,006 - j13,282)\text{A}$$

$$\underline{I}_{L3}^* = \underline{U}_{L3} \underline{Y}_{\Sigma L3} = (-11,5 + j19,918)\text{A}$$

$$\underline{I}_{L1}^* + \underline{I}_{L2}^* + \underline{I}_{L3}^* \cong 0 \quad \text{Efekt symetryzacji składowej zerowej został osiągnięty (rys. Z8.34).}$$

Składowa symetryczna kolejności przeciwnej: 
$$\underline{I}_2^* = \frac{1}{3}(\underline{I}_{L1}^* + a^2 \underline{I}_{L2}^* + a \underline{I}_{L3}^*) = (-3,667 - j6,354) \text{ A}$$

Składowa symetryczna kolejności zgodnej: 
$$\underline{I}_1^* = \frac{1}{3}(\underline{I}_{L1}^* + a \underline{I}_{L2}^* + a^2 \underline{I}_{L3}^*) = 14,667 \text{ A}$$

Współczynnik asymetrii prądu: 
$$k_{p\%} = \frac{|\underline{I}_2^*|}{|\underline{I}_1^*|} 100\% = 50\%$$

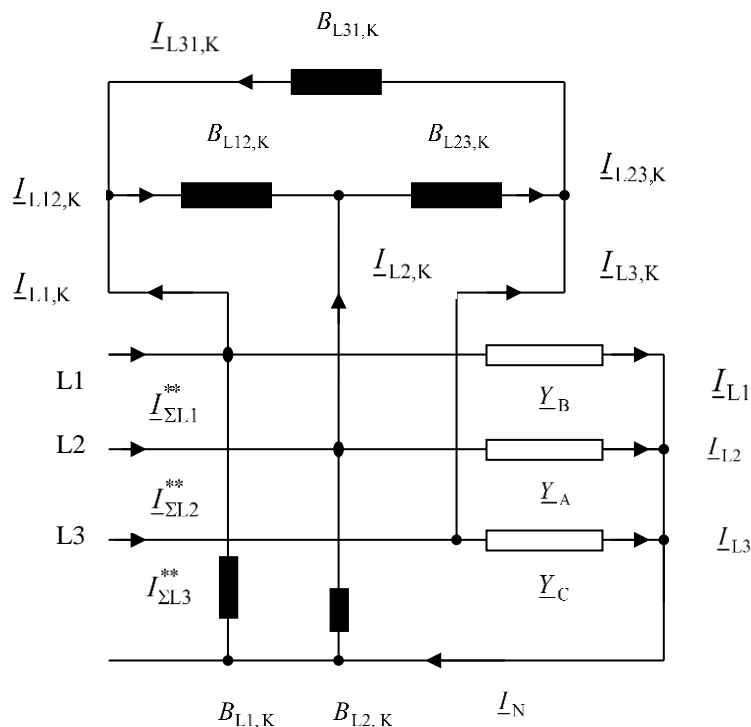
Eliminacja składowej symetrycznej kolejności przeciwnej prądu - susceptancje symetryzatora (zależność 5.66):

$$B_{L12,K} = -\frac{1}{3}(B_{\Sigma L1} + B_{\Sigma L2} - B_{\Sigma L3}) = -\frac{1}{3}(-0,0289 + 0,0289 - 0) = 0 \text{ S}$$

$$B_{L23,K} = -\frac{1}{3}(B_{\Sigma L2} + B_{\Sigma L3} - B_{\Sigma L1}) = -\frac{1}{3}(0,0289 + 0 + 0,0289) = -0,0193 \text{ S}$$

$$B_{L31,K} = -\frac{1}{3}(B_{\Sigma L3} + B_{\Sigma L1} - B_{\Sigma L2}) = -\frac{1}{3}(0 - 0,0289 - 0,0289) = 0,0193 \text{ S}$$

Na rysunku Z8.35 przedstawiono niesymetryczny odbiornik wraz kompensatorem składowych symetrycznych kolejności zerowej i przeciwnej prądu.



Rysunek Z8.35. Kompensator składowej symetrycznej kolejności zerowej i przeciwnej (Przykład 5.5)

Impedancje zastępcze symetryzatora, połączonego w gwiazdę której punkt neutralny ma potencjał punktu neutralnego źródła zasilania (rys. Z8.36):

$$\underline{Y}_{L1,K} = \frac{\underline{I}_{L1,K}}{\underline{U}_{L1}} = \frac{3,667 + j6,351}{220} = (0,0166 + j0,0288) \text{ S}$$

$$\underline{Y}_{L2,K} = \frac{\underline{I}_{L2,K}}{\underline{U}_{L2}} = (0,0166 - j0,0288) \text{ S}$$

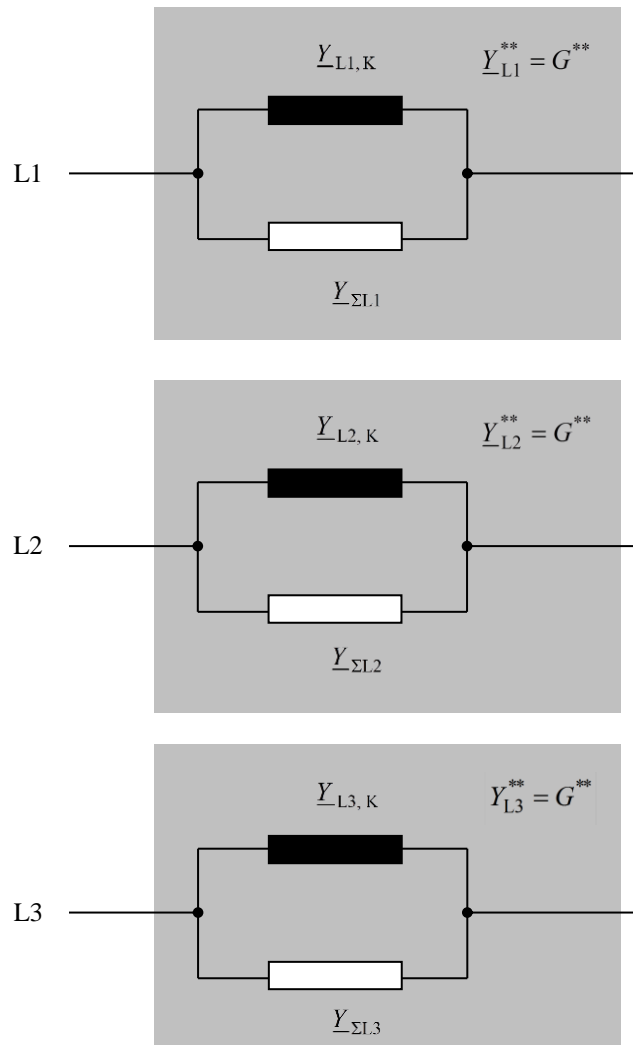
$$\underline{Y}_{L3,K} = \frac{\underline{I}_{L3,K}}{\underline{U}_{L3}} = -0,0333 \text{ S}$$

$$\underline{I}_{L1}^{**} = \underline{I}_{L1}^* + \underline{I}_{L1,K} = 3,667 + j6,351 + 11 - j6,368 = (14,667 - j0,007) \text{ A}$$

$$\underline{I}_{L2}^{**} = \underline{I}_{L2}^* + \underline{I}_{L2,K} = (-7,328 - j12,705) \text{ A}$$

$$\underline{I}_{L3}^{**} = \underline{I}_{L3}^* + \underline{I}_{L3,K} = (-7,333 + j12,701) \text{ A}$$

$$\underline{I}_{L1}^{**} + \underline{I}_{L2}^{**} + \underline{I}_{L3}^{**} = (0,006 - j0,011) \cong 0!$$



Rysunek Z8.36. Odbiornik wraz kompensatorem stanowiący dla sieci zasilającej symetryczne obciążenie o charakterze rezystancyjnym (Przykład 5.5)

Składowa symetryczna kolejności przeciwnej:

$$\underline{I}_{L2}^{**} = \frac{1}{3}(\underline{I}_{L1}^{**} + a^2 \underline{I}_{L2}^{**} + a \underline{I}_{L3}^{**}) = (-0,0017 - j0,0027) \text{ A} \cong 0 \quad (\text{symetryzacja})$$

Składowa symetryczna kolejności zgodnej:

$$\underline{I}_{L1}^{**} = \frac{1}{3}(\underline{I}_{L1}^{**} + a \underline{I}_{L2}^{**} + a^2 \underline{I}_{L3}^{**}) = (14,667 - j0,002) \text{ A} \quad \text{Im}(\underline{I}_{L1}^{**}) \rightarrow 0 \quad (\text{kompensacja})$$

Zastępcze impedancje fazowe odbiornika i symetryzatora/kompensatora (rys. Z8.36):

$$\underline{Y}_{L1}^{**} = \underline{Y}_{L2}^{**} = \underline{Y}_{L3}^{**} = G^{**} = 0,0666 \text{ S}$$

## LITERATURA

1. Hanzelka Z.: Zastosowanie kompensatorów statycznych do symetryzacji i kompensacji asymetrycznych odbiorników energii elektrycznej. Elektrotechnika 4/1987.

## PRZYKŁAD 5.6.

Dla połączenia odbiorników jak w PRZYKŁADZIE 5.2 – Wariant II susceptancje połączonego w trójkąt symetryzatora/kompensatora wynoszą:

$$B_{L12,K} = -B_{L12,A} - \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{L23} - G_{L31}) = 0,0211S \quad B_{L23,K} = -B_{L23} - \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{L31} - G_{L12}) = 0S$$

$$B_{L31,K} = -B_{L31} - \frac{1}{\sqrt{3}}(G_{L12} - G_{L23}) = -0,0211S$$

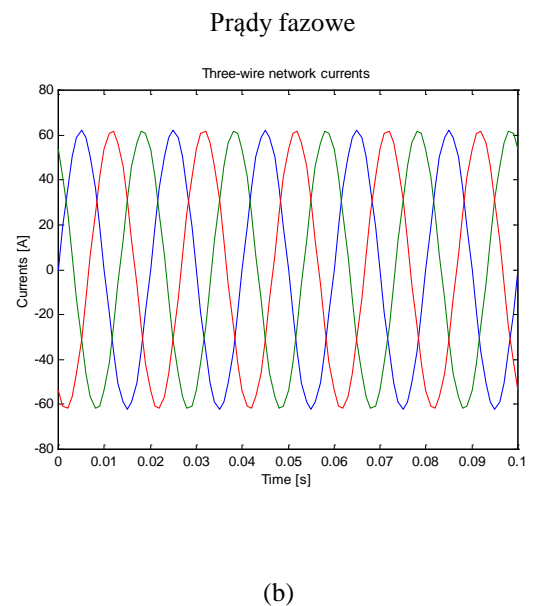
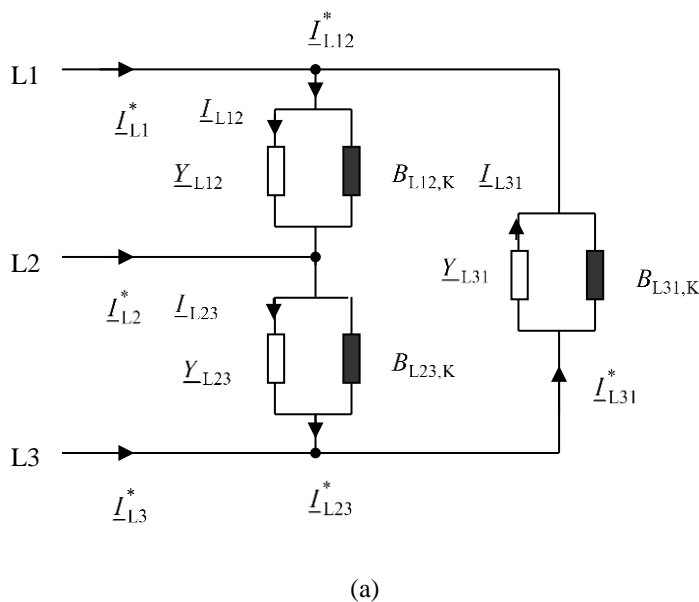
Znak „+” przed susceptancją oznacza jej pojemnościowy charakter, znak „-”, indukcyjny. Pojemność kondensatora włączonego pomiędzy fazy L1-L2 wyznaczana jest na podstawie zależności:

$$C_{L12,K} = \frac{B_{L12,K}}{2\pi f} = \frac{0,0211S}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}} \cong 67,2 \mu\text{F}$$

Indukcyjność dławika włączonego pomiędzy fazy L3-L1 wyznaczana jest na podstawie zależności:

$$L_{L31,K} = \frac{1}{2\pi f B_{L31,K}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,0211S} \cong 150 \text{ mH}$$

Odbiornik wraz z kompensatorem przedstawiono na rysunku Z8.37a.



Rysunek Z8.37. (a) Niesymetryczny odbiornik połączony w trójkąt wraz z symetryzatorem; (b) prądy fazowe źródła zasilania po kompensacji (Przykład 5.6)

Po dołączeniu kompensatora/symetryzatora:

$$I_{L1}^* = I_{L12}^* - I_{L31}^* = (45,885 + j0,001) \text{ A} \cong 45,885 \exp(j0^\circ) \text{ A}$$

$$I_{L2}^* = I_{L23}^* - I_{L12}^* = (-22,9425 - j39,714) \text{ A} \cong 45,864 \exp(-j120^\circ) \text{ A}$$

$$I_{L3}^* = I_{L31}^* - I_{L23}^* = (-22,9425 + j39,713) \text{ A} \cong 45,86 \exp(j120^\circ) \text{ A}$$

## LITERATURA

1. Hanzelka Z.: Zastosowanie kompensatorów statycznych do symetryzacji i kompensacji asymetrycznych odbiorników energii elektrycznej. Elektrotechnika 4/1987.

## PRZYKŁAD 5.7

Poszczególne impedancje są połączone w układzie jak na rysunku Z8.38. Różnica potencjałów pomiędzy punktami gwiazdowymi źródła zasilania i odbiornika:

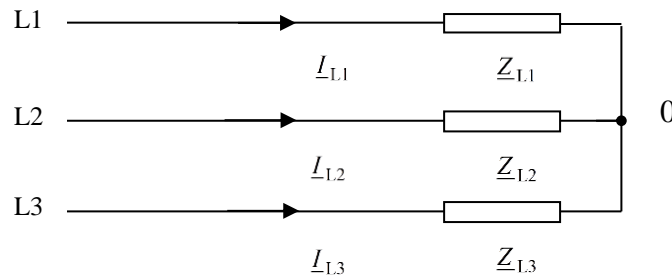
$$\underline{U}_{0N} = \frac{\underline{U}_{L1}\underline{Y}_{L1} + \underline{U}_{L2}\underline{Y}_{L2} + \underline{U}_{L3}\underline{Y}_{L3}}{\underline{Y}_{L1} + \underline{Y}_{L2} + \underline{Y}_{L3}} = (20,13 - j34,87) \text{ V}$$

Stąd:

$$\underline{I}_{L1} = (\underline{U}_{L1} - \underline{U}_{0N})\underline{Y}_{L1} = [220 - (20,13 - j34,87)] \cdot (0,05 - j0,05) = (11,737 - j8,25) \text{ A}$$

$$\underline{I}_{L2} = (\underline{U}_{L2} - \underline{U}_{0N})\underline{Y}_{L2} = (1,276 - j14,289) \text{ A}$$

$$\underline{I}_{L3} = (\underline{U}_{L3} - \underline{U}_{0N})\underline{Y}_{L3} = (-13,013 + j22,539) \text{ A}$$



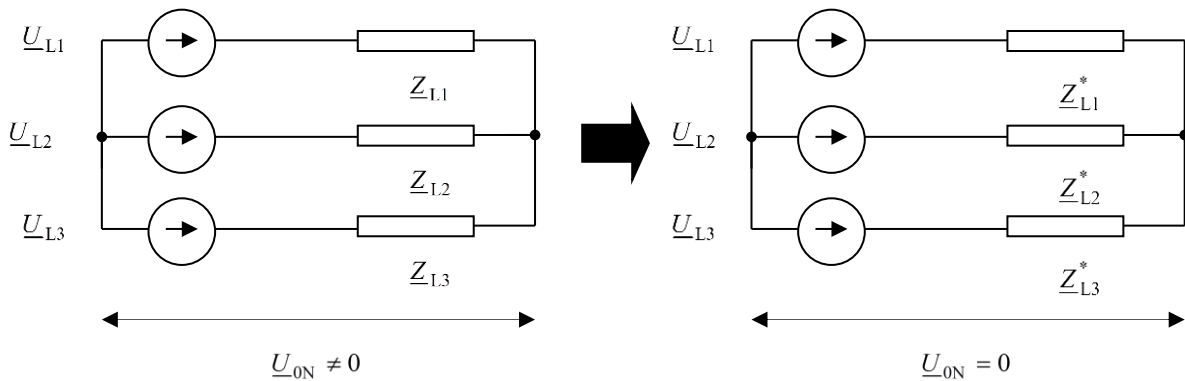
Rysunek Z8.38. Sieć trójfazowa, czteroprzewodowa, odbiornik połączony w gwiazdę bez przewodu neutralnego (Przykład 5.7)

Składowa symetryczna kolejności przeciwnej:  $\underline{I}_2 = \frac{1}{3}(\underline{I}_{L1} + a^2 \underline{I}_{L2} + a \underline{I}_{L3}) = (-4,762 - j8,25) \text{ A}$

Składowa symetryczna kolejności zgodnej:  $\underline{I}_1 = \frac{1}{3}(\underline{I}_{L1} + a \underline{I}_{L2} + a^2 \underline{I}_{L3}) = (16,499 - j0,0007) \text{ A}$

Współczynnik asymetrii prądu:  $k_{1\%} = \frac{|\underline{I}_2|}{|\underline{I}_1|} 100\% = 57,7\%$

Taką samą wartość ma współczynnik asymetrii dla innych możliwych połączeń impedancji i faz układu zasilania. Do dalszych rozważań przyjęto więc układ jak na rysunku Z8.39.



Rysunek Z8.39. Transformacja odbiornika połączonego w gwiazdę bez przewodu neutralnego w odbiornik połączony w gwiazdę, której punkt neutralny ma potencjał punktu neutralnego źródła zasilania (Przykład 5.7)

Impedancje zastępcze – w relacji do rzeczywistych, przyjętych na rysunku Z8.38 – połączenia w gwiazdę której punkt zerowy ma potencjał punktu zerowego układu zasilającego (rys. Z8.39).

$$\underline{Y}_{L1}^* = \frac{1}{\underline{Z}_{L1}^*} = \frac{\underline{I}_{L1}}{\underline{U}_{L1}} = \frac{11,737 - j8,25}{220} = G_{L1}^* + jB_{L1}^* = (0,0534 - j0,0375) \text{ S}$$

$$\underline{Y}_{L2}^* = \frac{1}{\underline{Z}_{L2}^*} = \frac{\underline{I}_{L2}}{\underline{U}_{L2}} = G_{L2}^* + jB_{L2}^* = (0,0534 + j0,0375) \text{ S}$$

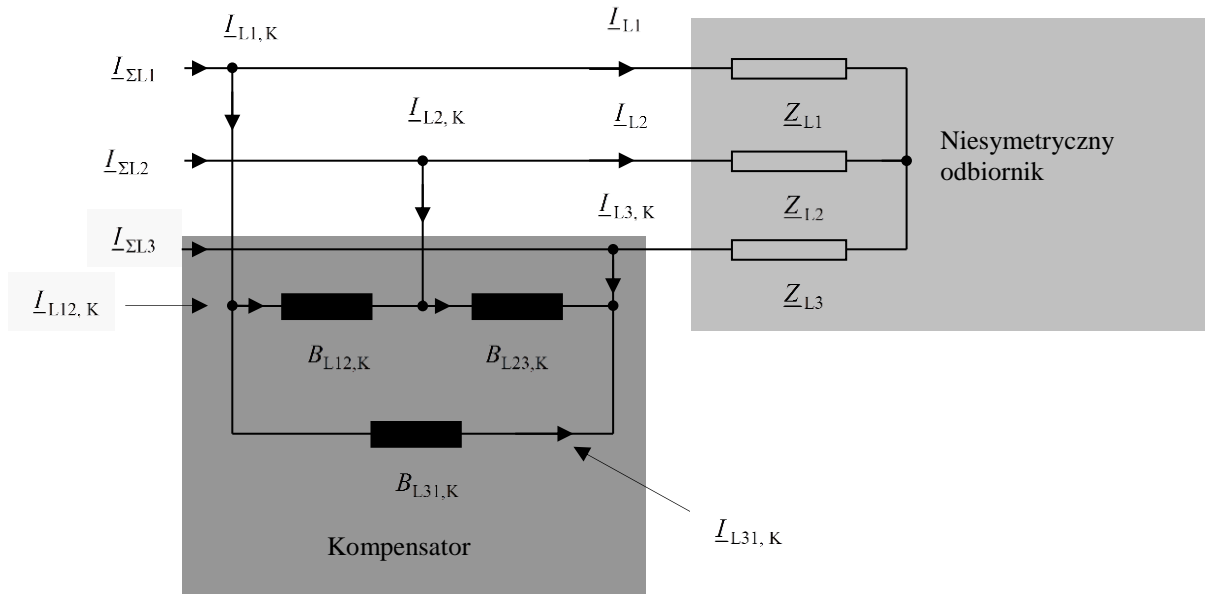
$$\underline{Y}_{L3}^* = \frac{1}{\underline{Z}_{L3}^*} = \frac{\underline{I}_{L3}}{\underline{U}_{L3}} = G_{L3}^* + jB_{L3}^* = 0,1183S$$

Stąd parametry symetryzatora/kompensatora (rys. Z8.40):

$$B_{L12,K} = -\frac{1}{3}(B_{L1}^* + B_{L2}^* - B_{L3}^*) = 0$$

$$B_{L23,K} = -\frac{1}{3}(B_{L2}^* + B_{L3}^* - B_{L1}^*) = -0,025S$$

$$B_{L31,K} = -\frac{1}{3}(B_{L3}^* + B_{L1}^* - B_{L2}^*) = 0,025S$$



Rysunek Z8.40. Odbiornik wraz z kompensatorem/symetryzатorem (Przykład 5.7)

Dla wyznaczonych wartości susceptancji symetryzatora:

$$\underline{I}_{L12,K} = \underline{U}_{L31}(jB_{L31,K}) = 0$$

$$\underline{I}_{L23,K} = \underline{U}_{L23}(jB_{L23,K}) = -9,5 A$$

$$\underline{I}_{L31,K} = \underline{U}_{L31}(jB_{L31,K}) = (-4,75 - j8,23) A$$

$$\underline{I}_{L1,K} = \underline{I}_{L12,K} - \underline{I}_{L31,K} = (4,75 + j8,23) A$$

$$\underline{I}_{L2,K} = \underline{I}_{L23,K} - \underline{I}_{L12,K} = -9,5 A$$

$$\underline{I}_{L3,K} = \underline{I}_{L31,K} - \underline{I}_{L23,K} = (4,75 - j8,23) A$$

Prądy źródła zasilania:

$$\underline{I}_{\Sigma 1} = \underline{I}_{L1} + \underline{I}_{L1,K} = (16,487 - j0,02) A$$

$$\underline{I}_{\Sigma 2} = \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L2,K} = (-8,224 - j14,289) A$$

$$\underline{I}_{\Sigma 3} = \underline{I}_{L3} + \underline{I}_{L3,K} = (-8,263 + j14,309) A$$

Składowa symetryczna kolejności przeciwnej:

$$\underline{I}_{\Sigma 2} = \frac{1}{3}(\underline{I}_{\Sigma 1} + a^2 \underline{I}_{\Sigma 2} + a \underline{I}_{\Sigma 3}) = (-0,012 - j0,021) A \rightarrow 0 \quad (\text{symetryzacja})$$

Składowa symetryczna kolejności zgodnej:

$$\underline{I}_{\Sigma 1} = \frac{1}{3}(\underline{I}_{\Sigma 1} + a \underline{I}_{\Sigma 2} + a^2 \underline{I}_{\Sigma 3}) = (16,5 + j0,001) A \quad \text{Im}(\underline{I}_{\Sigma 1}) \rightarrow 0 \quad (\text{kompensacja})$$

W przypadku odbiornika połączonego w trójkąt admitancje zastępczej gwiazdy, której punkt zerowy ma potencjał punktu neutralnego źródła zasilania można wyznaczyć na podstawie admitancji odbiornika.

$$\underline{Y}_{L1} = G_{L1} + jB_{L1} = \frac{3}{2} \left\{ \left[ G_{L12} + G_{L31} - \frac{1}{\sqrt{3}} (B_{L12} - B_{L31}) \right] + j \left[ B_{L12} + B_{L31} + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{L31} - G_{L12}) \right] \right\}$$

$$\underline{Y}_{L2} = G_{L2} + jB_{L2} = \frac{3}{2} \left\{ \left[ G_{L23} + G_{L12} - \frac{1}{\sqrt{3}} (B_{L23} - B_{L12}) \right] + j \left[ B_{L23} + B_{L12} + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{L12} - G_{L23}) \right] \right\}$$

$$\underline{Y}_{L3} = G_{L3} + jB_{L3} = \frac{3}{2} \left\{ \left[ G_{L31} + G_{L23} - \frac{1}{\sqrt{3}} (B_{L31} - B_{L23}) \right] + j \left[ B_{L31} + B_{L23} + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{L23} - G_{L31}) \right] \right\}$$

## LITERATURA

1. Hanzelka Z.: Zastosowanie kompensatorów statycznych do symetryzacji i kompensacji asymetrycznych odbiorników energii elektrycznej. Elektrotechnika 4/1987.

## PRZYKŁAD 5.8.

Dobrać parametry symetryzatora/kompensatora ( $\cos \varphi_{\Sigma} = 1$ ) dla odbiornika jak na rysunku Z8.41 zasilanego z sieci o symetrycznym napięciu  $3 \times 380/220$  V. Zmierzone wartości dwóch prądów fazowych:  $I_{L1} = 220$  A,  $\angle(U_{L1}, I_{L1}) = 30^0$  (ind.) oraz  $I_{L2} = 110$  A,  $\angle(U_{L2}, I_{L2}) = 60^0$  (ind.).

Napięcia fazowe:

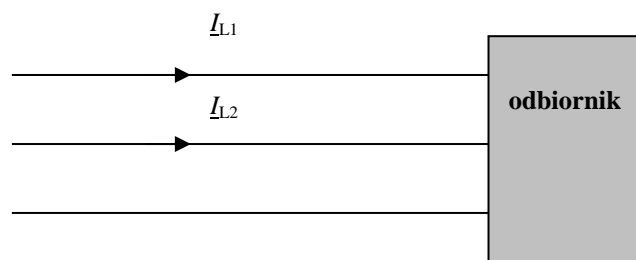
$$\underline{U}_{L1} = 220 \text{ V} \quad \underline{U}_{L2} = \underline{U}_{L1} a^2 = (-110 - j190,525) \text{ V}$$

$$\underline{U}_{L3} = \underline{U}_{L1} a = (-110 + j190,525) \text{ V}$$

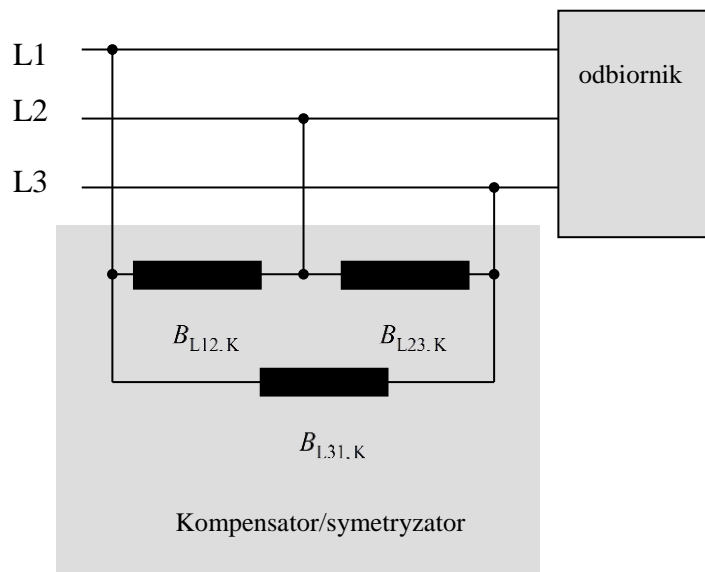
Prądy fazowe:

$$\underline{I}_{L1} = 220 \exp(-j30^0) \text{ A} = (190,525 - j110) \text{ A} \quad \underline{I}_{L2} = 110 a^2 \exp(-j60^0) \text{ A} = -110 \text{ A}$$

$$\underline{I}_{L3} = -(\underline{I}_{L1} + \underline{I}_{L2}) = (-80,525 + j110) \text{ A} = 136,324 \exp(126,205^0) \text{ A}$$



Rysunek Z8.41. Kompensacja/symetryzacja odbiornika typu „czarna skrzynka” (Przykład 5.8)



Rysunek Z8.42. Całkowita kompensacja mocy biernej i symetryzacja odbiornika typu „czarna skrzynka” (Przykład 5.8)

Zastępcze admitancje fazowe połączone w gwiazdę, której punkt zerowy ma potencjał punktu zerowego systemu zasilającego:

$$\underline{Y}_{L1} = \frac{\underline{I}_{L1}}{\underline{U}_{L1}} = \frac{220 \exp(-j30^0) \text{ A}}{220 \text{ V}} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right) \text{ S}$$

$$\underline{Y}_{L2} = \frac{\underline{I}_{L2}}{\underline{U}_{L2}} = \frac{110 \exp(-j180^0) \text{ A}}{220 a^2 \text{ V}} = \left(\frac{1}{4} - j\frac{\sqrt{3}}{4}\right) \text{ S}$$

$$\underline{Y}_{L3} = \frac{\underline{I}_{L3}}{\underline{U}_{L3}} = \frac{220 \exp(-j30^0) \text{ A}}{220 \text{ V}} = (0,616 + j0,067) \text{ S}$$

Susceptancje kompensująco/symetryzujące (rys. Z8.42):

$$B_{L12,K} = -\frac{1}{3}(B_{L1} + B_{L2} - B_{L3}) = \frac{1}{3}S$$

$$B_{L23,K} = -\frac{1}{3}(B_{L2} + B_{L3} - B_{L1}) = -0,0447S$$

$$B_{L31,K} = -\frac{1}{3}(B_{L3} + B_{L1} - B_{L2}) = 0S$$

Jak zmienią się parametry symetryzatora jeżeli kompensacja będzie realizowana do  $\cos \varphi_{\Sigma} = 0,95$  ?

Fazowe moce czynne:

$$P_{L1} = \text{Re}(\underline{U}_{L1} \underline{I}_{L1}^*) = U_{L1} I_{L1} \cos \varphi_{L1} = 220 \cdot 220 \cdot \cos(30^\circ) = 41915,629 \text{ W}$$

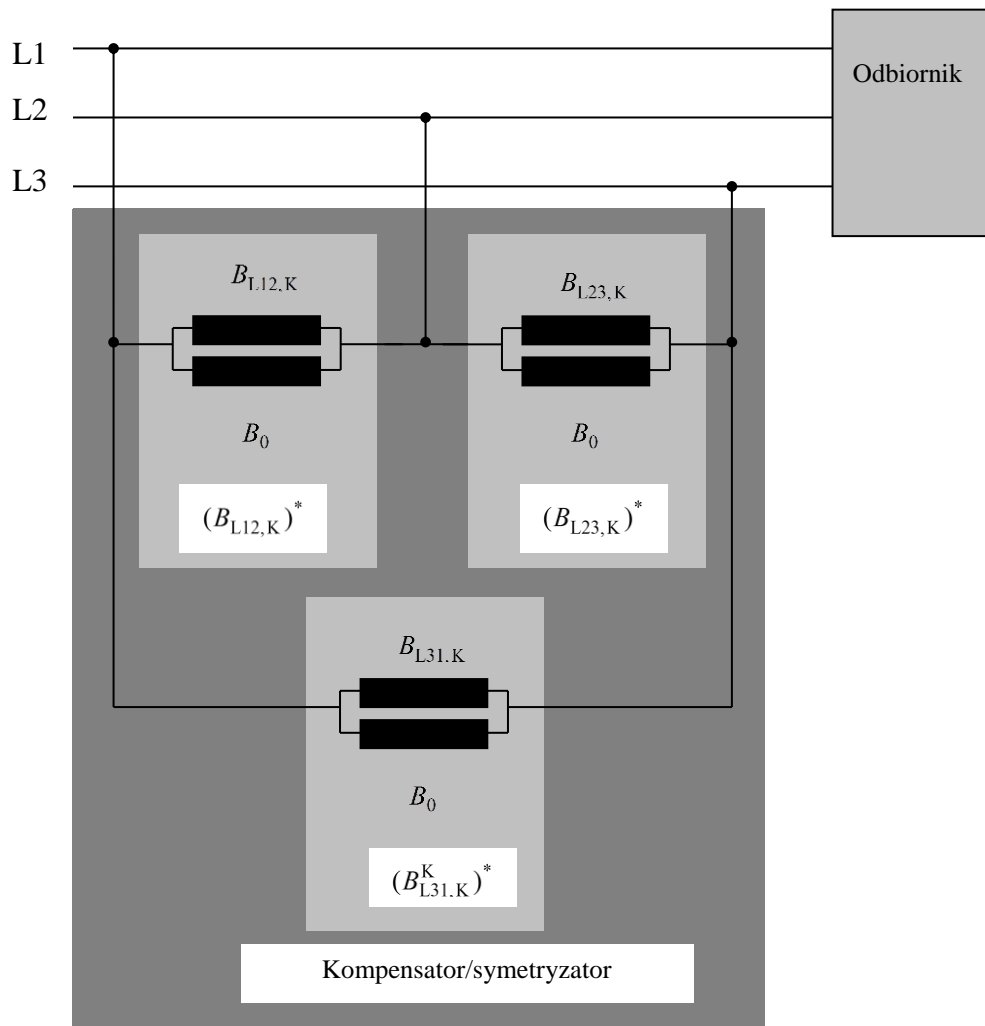
$$P_{L2} = \text{Re}(\underline{U}_{L2} \underline{I}_{L2}^*) = U_{L2} I_{L2} \cos \varphi_{L2} = 220 \cdot 110 \cdot \cos(60^\circ) = 12100 \text{ W}$$

$$P_{L3} = \text{Re}(\underline{U}_{L3} \underline{I}_{L3}^*) = \text{Re}[220 \exp(j120^\circ) \cdot 136,324 \exp(-j126,205^\circ)] = 29815,577 \text{ W}$$

Całkowita moc czynna odbiornika:  $P_{\Sigma} = P_{L1} + P_{L2} + P_{L3} = 83831,20615 \text{ W}$

Współczynnik mocy odbiornika:  $\cos \varphi = 0,95 \Rightarrow \varphi = 18,195^\circ$

Moc bierna:  $Q = P_{\Sigma} \text{tg} \varphi = 83831,20615 \text{tg} 18,195^\circ = 27554,19194 \text{ var}$



Rysunek Z8.43. Niecałkowita (współczynnik mocy różny od jeden) kompensacja mocy biernej i symetryzacja odbiornika typu „czarna skrzynka” (Przykład 5.8)

Susceptancja  $B_0$  (rys. Z8.43):

$$B_0 = \frac{Q}{U^2} = \frac{9184,7306 \text{ var}}{(380 \text{ V})^2} = 0,063606 \text{ S}$$

Ostateczne wartości susceptancji symetryzujących i kompensujących odbiornik do  $\cos\varphi = 0,95$  :

$$(B_{L12,K})^* = B_{L12,K} - B_0 = 0,26973 \text{ S}$$

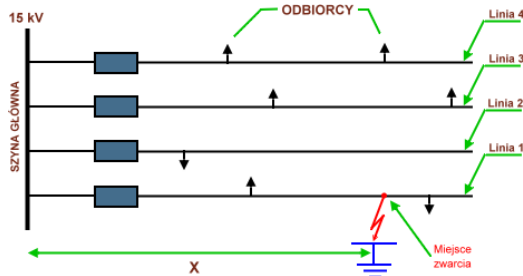
$$(B_{L23,K})^* = B_{L23,K} - B_0 = -0,1083 \text{ S}$$

$$(B_{L31,K})^* = B_{L31,K} - B_0 = -0,063606 \text{ S}$$

## PRZYKŁAD 6.1 [1,2]

W sieci zasilającej 15 kV wystąpiło trójfazowe zwarcie w linii 1, w odległości  $x$  kilometrów od szyn rozdzielni (rys. Z8.44). Każda linia zasilą około 2000 odbiorców, co daje łącznie prawie 8000 odbiorców (tylko 7 z nich przedstawiono dla przykładu na rysunku Z8.44).

Impedancja linii  $\underline{Z} = \underline{z}l$ , gdzie  $l$  jest długością w kilometrach, a  $\underline{z}$  zespoloną impedancją linii w  $\Omega/\text{km}$ . Prąd zwarciový na szynach rozdzielni 15 kV wynosi  $I_{ZW}$ . Założono, że rezystancja źródła zasilania  $R_S$  jest pomijalnie mała.

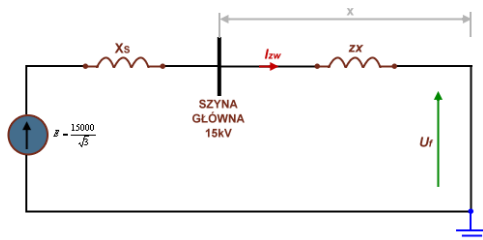


Rysunek Z8.44. Trójfazowe zwarcie w linii 1 w odległości  $x$  kilometrów od rozdzielni 15 kV (Przykład 6.1)

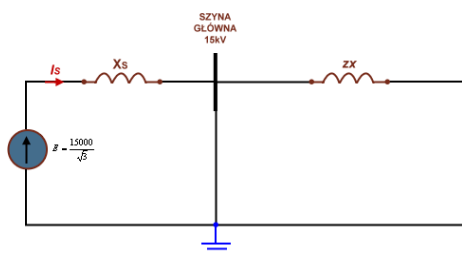
Wyznaczyć wartość napięcia:

- o w miejscu zwarcia
- o pomiędzy miejscem zwarcia i końcem linii
- o pomiędzy miejscem zwarcia i szynami rozdzielni
- o gdziekolwiek wzdłuż linii 2, 3 i 4.

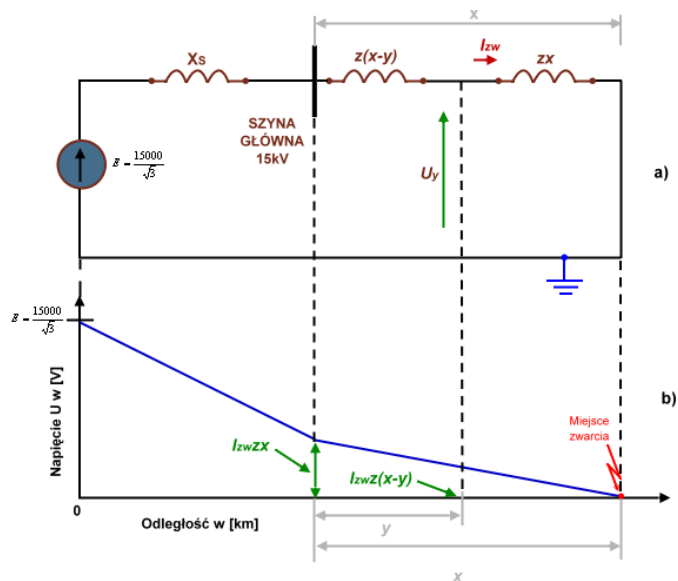
W obliczeniach zwarciovych pominięto prąd obciążenia. Ze względu na symetrię zwarcia oraz symetrię rozważanego obwodu można ograniczyć rozważania do układu jednofazowego jak na rysunku Z8.45 (faza L1).



Rysunek Z8.45. Schemat zastępczy obwodu dla zwarcia w linii 1 w odległości  $x$  kilometrów od szyn głównych (rys. Z8.44) (Przykład 6.1)



Rysunek Z8.46. Jednofazowy schemat zastępczy dla zwarcia, które wystąpiło na szynach głównych rozdzielni (Przykład 6.1)



Rysunek Z8.47. Jednofazowy schemat zastępczy linii 1 z symetrycznym trójfazowym zwarcie zlokalizowanym  $x$  kilometrów od szyny głównej.  $U_y$  jest napięciem fazowym, a) schemat; b) rozkład napięcia (Przykład 6.1)

Prąd zwarciový:  $I_{ZW} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_S + \underline{z}x}$  gdzie:  $E$  - napięcie fazowe o wartości  $\frac{15}{\sqrt{3}}$  kV  
 $\underline{z}x$  - całkowita impedancja do miejsca zwarcia  
 $\underline{Z}_S = X_S$  - impedancja zwarciový systemu zasilającego.

Przyjęto  $\underline{Z}_S \approx X_S e^{j90^\circ}$ . Na rysunku Z8.46 przedstawiono schemat zastępczy obwodu dla przypadku, gdyby zwarcie wystąpiło na szynach rozdzielni głównej:

Dla tego przypadku: 
$$I_S = \frac{E}{X_S} \quad \Rightarrow \quad X_S = \frac{E}{I_S}$$

Napięcie w miejscu zwarcia – rysunek Z8.46 - wynosi  $U_f = 0,0$  V. Od miejsca uszkodzenia do końca linii, napięcie we wszystkich punktach wynosi  $0,0$  V.

Na rysunku Z8.47a przedstawiono schemat zastępczy obwodu oraz charakterystykę napięcia  $U_y$  wzdłuż linii przy zwarciu w odległości  $y$  kilometrów od szyn głównych rozdzielni (rys. Z8.47b). Napięcie dla wszystkich odbiorców w liniach 2,3,4 z rysunku Z8.44 w wyniku zwarcia w linii 1 jest takie samo jak na szynach głównych:

$$U_{szgl} = I_{zw} \cdot z \cdot x.$$

Dla symetrycznego trójfazowego zwarcia sieci w odległości 2 km od szyn głównych jak pokazano na rysunku Z8.45 wyznaczyć wartość amplitudy zapadu napięcia  $\Delta U_{1\%}$  w odległości  $y = 1$  km oraz  $\Delta U_{0\%}$  na szynach głównych ( $y = 0$  km) – rysunek Z8.47.

Dane:  $z = (0,2388 + j0,3735) \Omega/\text{km}$ ,  $x = 2$  km;  $I_S = 24000$  A,  $E = \frac{15000}{\sqrt{3}} = 8660e^{j0}$  V.

Na podstawie rysunku Z8.46:  $X_S = \frac{E}{I_S}$      $E = \frac{15000}{\sqrt{3}} = 8660e^{j0}$  V     $I_S = 24000e^{-j90}$  A

$$X_S = \frac{8660e^{j0}}{24000e^{-j90}} = \frac{8660}{-j24000} = j0,3608 = 0,3608e^{j90} \Omega$$

Na podstawie rysunku Z8.45:

$$\underline{I}_{zw} = \frac{E}{jX_S + z x} = \frac{8660}{j0,3608 + (0,2388 + j0,3735) \cdot 2} = \frac{8660}{0,4776 + j1,1078} = 2842 - j6592 = 7178e^{-j67} \text{ A}$$

- dla  $y = 1$  km

$$\underline{U}_{y1} = \underline{I}_{zw} \cdot z \cdot (x - y) = (2842 - j6592) \cdot (0,2388 + j0,3735) \cdot (2 - 1) = 3140,8 - j512,7 = 3182e^{-j9,3} \text{ V}$$

Wartość względna napięcia resztkowego w odległości 1 km od szyn głównych:

$$U_{y1\%} = \frac{3182}{8660} \cdot 100\% = 36,7\%$$

Wartość względna amplitudy zapadu:

$$\Delta U_{1\%} = \frac{8660 - 3182}{8660} \cdot 100\% = 63,3\%$$

- dla  $y = 0$  km

$$\underline{U}_{y0} = \underline{I}_{zw} \cdot z \cdot (x - y) = (2842 - j6592) \cdot (0,2388 + j0,3735) \cdot (2 - 0) = 6281,6 - j1025,4 = 6365e^{-j9,3} \text{ V}$$

Wartość względna napięcia resztkowego na szynach głównych:

$$U_{y0\%} = \frac{6365}{8660} \cdot 100\% = 73,5\%$$

Wartość względna amplitudy zapadu:

$$\Delta U_{0\%} = \frac{8660 - 6365}{8660} \cdot 100\% = 26,5\%$$

W jakiej odległości  $x$  od szyny głównej wystąpiło zwarcie, jeżeli wartość amplitudy zapadu na szynach głównych wynosi 30% ?

Dla takiego zapadu napięcie resztkowe na szynach głównych wynosi:

$$0,7 \cdot 8660 = 6062 \text{ V} \quad \Rightarrow \quad \underline{U}_y = 6062e^{j0} \text{ V}$$

$$\underline{U}_y = \underline{I}_{zw} \cdot z \cdot (x - y) \Rightarrow 6062 = (2842 - j6592) \cdot (0,2388 + j0,3276) \cdot x = (3104,8 - j512,7) \cdot x = 3182e^{-j9,3} \cdot x$$

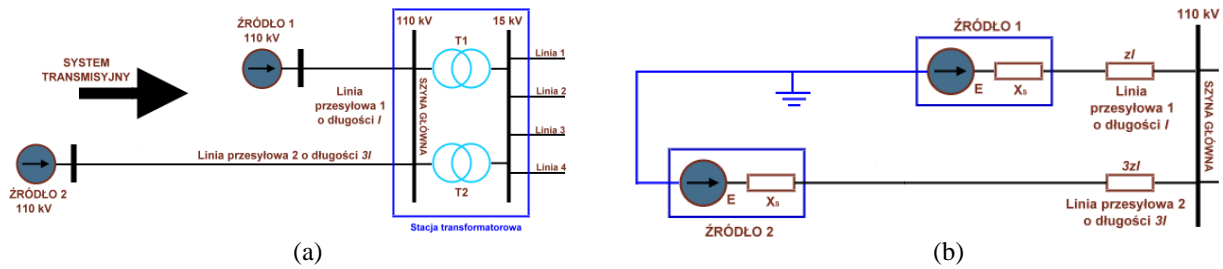
Stąd:  $x = \frac{6062}{3182} = 1,88 \text{ km}$

#### LITERATURA

1. Gulachenski E.M.: *Advanced Power Quality Analysis*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers 1998.
2. Michalik B.: *Zapady napięcia, krótkie przerwy w zasilaniu. Przyczyny, skutki, sposoby poprawy*. Praca dyplomowa AGH, Kraków 2001.

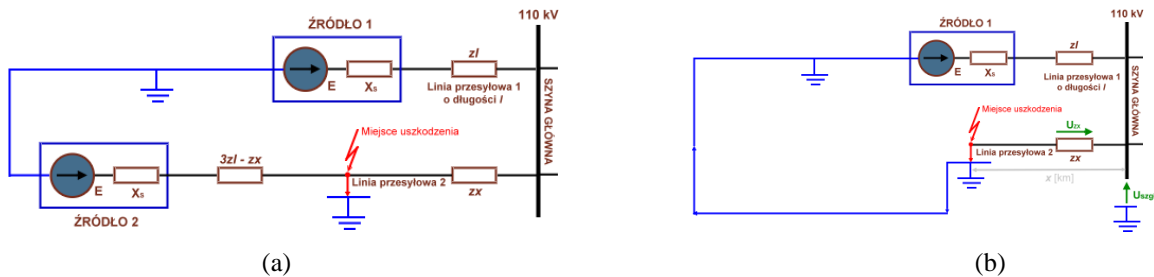
## PRZYKŁAD 6.2 [1,2]

Przykładowy obwód, będący podstawą analiz w niniejszym przykładzie, jest przedstawiony na rysunku Z8.48.



Rysunek Z8.48. Schemat ideowy (a) i zastępczy (b) dla sieci zasilającej analizowanej w Przykładzie 6.1 (Przykład 6.2)

W linii przesyłowej 2 wystąpiło zwarcie, którego skutkiem był przepływ prądu zwarciovego  $I_{zw}$ . Schemat zastępczy dla trójfazowego symetrycznego zwarcia w dłuższej z dwu linii przesyłowych w odległości  $x$  kilometrów od szyny głównej stacji transformatorowej pokazano na rysunku Z8.49a. Obydwie linie przesyłowe są identycznie zbudowane, a ich impedancja zastępcza wynosi  $z \Omega/\text{km}$ . Obydwa źródła mają taką samą impedancję wewnętrzną  $X_S \Omega$ . Impedancja linii policzona jest w Przykładzie 6.1. Wartość źródła napięcia  $E$  jest stała i wynosi  $110/\sqrt{3}$  kV.



Rysunek Z8.49. Schematy zastępcze dla trójfazowego zwarcia w linii przesyłowej 2,  $x$  kilometrów od szyn głównych rozdzielni 110 kV (Przykład 6.2)

Wyznaczyć wartości amplitudy zapadu napięcia  $\Delta U_{\%szgl}$  na szynach głównych 110 kV podczas symetrycznego trójfazowego zwarcia jak na rysunku Z8.49 dla:

- $x = 0$  km - zwarcie na szynach głównych
- $x = 3l$  km.

Jak zmieniać się będzie wartość napięcia  $\Delta U_{\%szgl}$  w zależności od miejsca zwarcia?

Jak wynika z rysunku Z8.49b, napięcie  $U_{szgl}$  jest równe spadkowi napięcia  $U_{zx}$  na impedancji  $zx$  części linii przesyłowej 2 w wyniku przepływu prądu zwarciovego  $I_{zw}$ :

$$U_{szgl} = U_{zx} = I_{zw}zx \quad I_{zw} = \frac{E}{X_S + zl + zx} \quad U_{szgl} = \frac{Ezx}{X_S + zl + zx} \quad (Z8.2)$$

$$\text{dla } x=0 \quad U_{szgl} = 0 \quad \text{dla } x=3l \quad U_{szgl} = \frac{Ez3l}{X_S + 4zl}$$

Ponieważ w rzeczywistości wartość reaktancji źródła  $X_S$  jest dużo mniejsza w porównaniu z impedancją  $4zl$  obwodu powstałego w wyniku zwarcia, równanie (Z8.2) można uprościć do postaci:

$$U_{szgl} = \frac{Ezx}{z(l+x)} \quad (Z8.3)$$

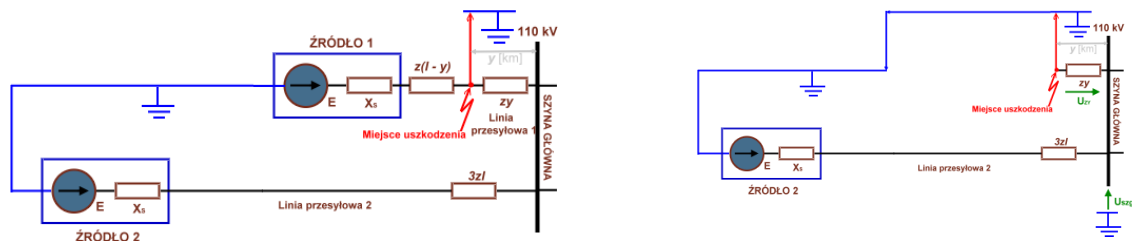
W rozważanych przypadkach:

$$\text{dla } x=0 \quad U_{szgl} = 0 \quad \Delta U_{\%szgl} = \frac{E - U_{szgl}}{E} \cdot 100\% = \frac{E - 0}{E} \cdot 100\% = 100\%$$

$$\text{dla } x=3l \quad U_{szgl} = \frac{Ez3l}{4zl} = 0,75E \quad \Delta U_{\%szgl} = \frac{E - U_{szgl}}{E} \cdot 100\% = \frac{E - 0,75E}{E} \cdot 100\% = 25\%$$

Napięcie  $U_{szgl}$  na szynie głównej 110 kV dla trójfazowego zwarcia jest w przybliżeniu równe  $0,75E$ , jeżeli zwarcie nastąpiło w odległości  $3l$  licząc od szyn głównych, natomiast wartość amplitudy zapadu  $\Delta U_{\%szgl}$  odpowiednio 25%.

Ponieważ linie rozdzielcze stacji transformatorowych 15kV (Przykład 6.1) nie mają znaczących źródeł energii, wartość amplitudy zapadu we wszystkich liniach: 1, 2, 3, 4 (rys. Z8.44) będzie zmieniać się w przedziale od 100% do 25% w zależności od miejsca uszkodzenia w linii przesyłowej 2 (Przykład 6.1).



Rysunek Z8.50. Schematy zastępcze dla trójfazowego zwarcia w linii przesyłowej 1, y kilometrów od szyn głównych rozdzielni 110 kV (Przykład 6.2)

W dalszej części przyjęto, że uszkodzenie w linii przesyłowej 1 nastąpiło w odległości y kilometrów od szyn głównych stacji 110 kV (rys. Z8.50). W wyniku zwarcia, wystąpił prąd zwarciovowy  $I_{zw}$ . Schemat zastępczy dla trójfazowego symetrycznego zwarcia w krótszej z dwu linii przesyłowych w odległości y kilometrów od szyny głównej stacji transformatorowej jest pokazany na rysunku Z8.50.

Wyznaczyć wartości amplitudy zapadu napięcia  $\Delta U_{\%szgl}$  na szynie głównej 110 kV podczas symetrycznego trójfazowego zwarcia pokazanego na rysunku Z8.50 dla:

- o  $y = 0$  km – zwarcie na szynach głównych
- o  $y = l$  km.

Jak zmieniać się będzie wartość zapadu napięcia  $\Delta U_{\%szgl}$  w zależności od miejsca zwarcia ?

Jak wynika z rysunku Z8.50 napięcie  $U_{szgl}$  jest równe spadkowi napięcia  $U_{zy}$  na impedancji  $zy$  części linii przesyłowej 1 w wyniku przepływu prądu zwarciovowego  $I_{zw}$ :

$$U_{szgl} = U_{zy} = I_{zw} z_y \quad I_{zw} = \frac{E}{X_S + 3z_l + z_y} \quad U_{szgl} = \frac{E z_y}{X_S + 3z_l + z_y} \quad (Z8.4)$$

$$\text{dla } y=0 \quad U_{szgl} = 0 \quad \text{dla } y=l \quad U_{szgl} = \frac{Ez_l}{X_S + 4z_l}$$

Ponieważ w rzeczywistości wartość reaktancji źródła  $X_S$  jest dużo mniejsza w porównaniu z impedancją  $4z_l$  obwodu powstałego w wyniku zwarcia, równanie (Z8.4) można uprościć do postaci:

$$U_{szgl} = \frac{Ez_y}{z(3l + y)} \quad (Z8.5)$$

W rozważanych przypadkach:

$$\text{dla } y=0 \quad U_{szgl} = 0 \quad \Delta U_{\%szgl} = \frac{E - U_{szgl}}{E} \cdot 100\% = \frac{E - 0}{E} \cdot 100\% = 100\%$$

$$\text{dla } y=l \quad U_{szgl} = \frac{Ez_l}{4z_l} = 0,25E \quad \Delta U_{\%szgl} = \frac{E - U_{szgl}}{E} \cdot 100\% = \frac{E - 0,25E}{E} \cdot 100\% = 75\%$$

Napięcie resztkowe  $U_{szgl}$  na szynie głównej 110 kV dla trójfazowego zwarcia jest w przybliżeniu równe  $0,25E$  jeżeli zwarcie nastąpiło w odległości  $l$  od końca linii przesyłowej 1, natomiast wartość amplitudy zapadu  $\Delta U_{\%szgl}$  wynosi 25%.

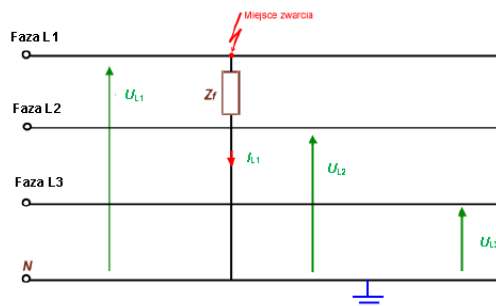
Ponieważ linie rozdzielcze stacji transformatorowej 15 kV (Przykład 6.1) nie mają znaczących źródeł energii, wartość amplitudy zapadu we wszystkich liniach: 1, 2, 3, 4 (rys. Z8.44) będzie zmieniać się w przedziale od 100% do 75% w zależności od miejsca zwarcia w linii przesyłowej 1.

#### LITERATURA

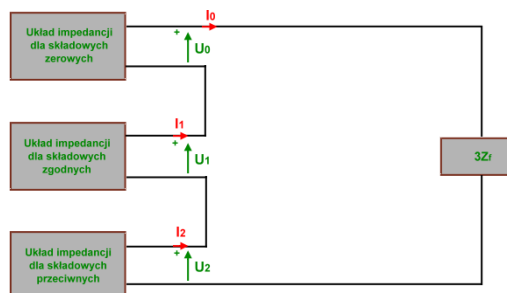
1. Gulachenski E.M.: *Advanced Power Quality Analysis*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers 1998.
2. Michalik B.: *Zapady napięcia, krótkie przerwy w zasilaniu. Przyczyny, skutki, sposoby poprawy*. Praca dyplomowa AGH, Kraków 2001.

### PRZYKŁAD 6.3. [1,2]

W układzie przedstawionym na rysunku Z8.51 wystąpił stan asymetrii napięcia spowodowany zwarcie fazy „L1” z ziemią przez impedancję  $Z_f$ . Napięcia źródłowe tworzą układ symetryczny. Wyznaczyć wartości amplitud zapadów w poszczególnych fazach względem przewodu neutralnego N.



Rysunek Z8.51. Jednofazowe zwarcie doziemne przez impedancję  $Z_f$  (Przykład 6.3)



Rysunek Z8.52. Impedancyjny schemat zastępczy w układzie składowych symetrycznych (Przykład 6.3)

W miejscu zwarcia:

$$\underline{U}_{L1} = Z_f \underline{I}_{L1} \qquad \underline{I}_{L2} = \underline{I}_{L3} = 0 \qquad (Z8.6)$$

Dodatkowo słuszne są zależności:

$$\underline{U}_{L1} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = Z_f (\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0) \qquad (Z8.7)$$

$$\underline{I}_{L2} = a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \qquad (Z8.8)$$

$$\underline{I}_{L3} = a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \qquad (Z8.9)$$

Po odjęciu stronami (Z8.9) i (Z8.8) otrzymuje się:

$$\begin{aligned} a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0 &= a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0 \\ \underline{I}_{L2} = \underline{I}_{L3} \quad \Rightarrow \quad (a^2 - a) \underline{I}_1 &= (a^2 - a) \underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 \end{aligned}$$

Podstawiając do równania (Z8.8)  $\underline{I}_1 = \underline{I}_2$ :

$$\underline{I}_{L2} = \underline{I}_0 + (a^2 + a) \underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}_1 = 0 \quad \text{czyli} \quad \underline{I}_0 = \underline{I}_1 = \underline{I}_2 \qquad (Z8.10)$$

$$\text{Podstawiając (Z8.10) do (Z8.7):} \quad \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 3Z_f \underline{I}_0 \qquad (Z8.11)$$

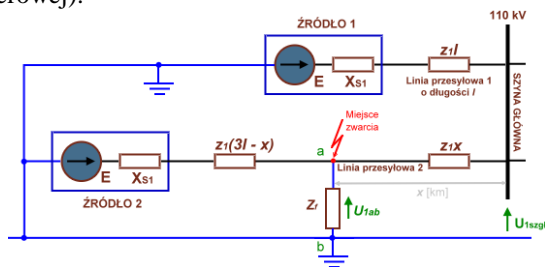
Niesymetryczny układ zasilający można przedstawić jako szeregowe połączenie trzech symetrycznych układów, każdy dla innej składowej (rys. Z8.52). Każdy z nich jest redukowany do równoważnych obwodów Thevenina. Rozwiązanie przedstawiono w pięciu kolejnych krokach:

- Krok I – Schematy zastępcze dla każdej składowej symetrycznej
- Krok II – Zastosowanie metody Thevenina w miejscu zwarcia dla każdej składowej symetrycznej
- Krok III – Zastosowanie zasady superpozycji dla układów kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej
- Krok IV – Wyznaczenie prądów i napięć w układzie składowych symetrycznych
- Krok V – Zamiana składowych symetrycznych na współrzędne naturalne.

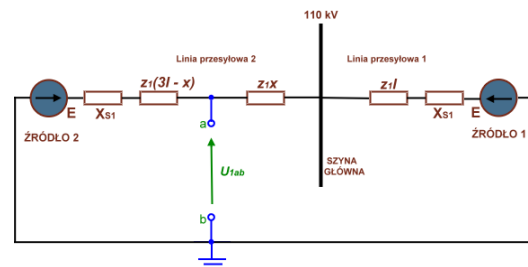
Schematy zastępcze obwodu jak na rysunku Z8.51 dla poszczególnych składowych przedstawiono na rysunkach Z8.53-58. Schematy zastępcze dla układów kolejności zgodnej i przeciwnej są takie same. Schematy na rysunkach Z8.55-58 nie zawierają źródeł napięcia ponieważ dla przypadku, gdy napięcia źródłowe tworzą układ symetryczny – źródła napięcia zawierają tylko składowe zgodne. Dla zerowej kolejności układ impedancji jest taki sam, ale inne mogą być ich wartości w porównaniu z układami kolejności zgodnej i przeciwnej.

## KROK II

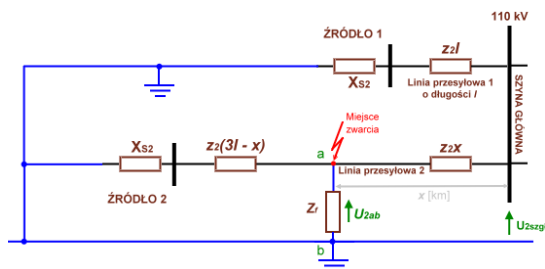
Dalsze uproszczenie obwodów polega na sprowadzeniu ich do obwodów nierozgałęzionych jednogłęziowych w celu zastosowania metody Thevenina. Rysunki: Z8.53, Z8.55, Z8.57 zostaną przekształcone do postaci pozwalającej na łatwiejsze wyznaczenie impedancji zastępczej  $Z_w$  i napięć źródłowych  $\underline{E}_w$  względem zacisków „ab” powstałych po wyłączeniu z obwodu impedancji  $Z_f$ . Odpowiadające im schematy zastępcze przedstawiono na rysunkach: Z8.54 (układ kolejności zgodnej), Z8.56 (układ kolejności przeciwnej) i Z8.58 (układ kolejności zerowej).



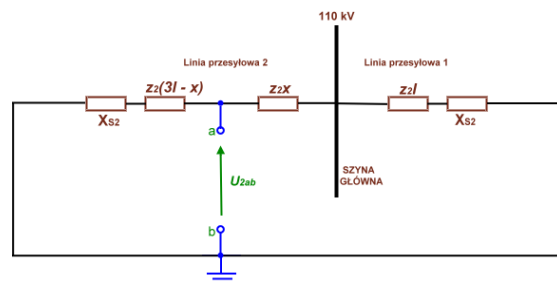
Rysunek Z8.53. Schemat zastępczy dla układu jak na rysunku Z8.51 – układ kolejności zgodnej (Przykład 6.3)



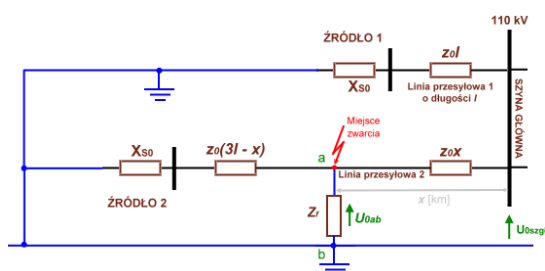
Rysunek Z8.54. Schemat zastępczy dla przekształconego układu z rysunku Z8.53 (Przykład 6.3)



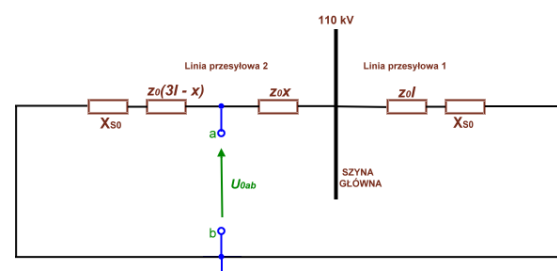
Rysunek Z8.55. Schemat zastępczy dla układu jak na rysunku Z8.51 – układ kolejności przeciwnej (Przykład 6.3)



Rysunek Z8.56. Schemat zastępczy dla przekształconego układu z rysunku Z8.55 (Przykład 6.3)

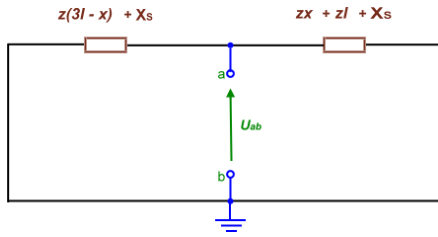


Rysunek Z8.57. Schemat zastępczy dla układu jak na rysunku Z8.51 – układ kolejności zerowej (Przykład 6.3)

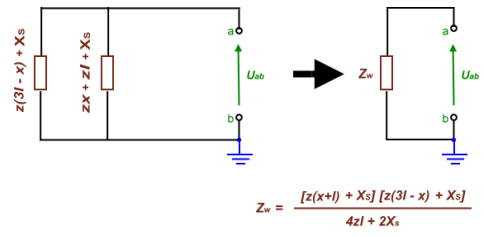


Rysunek Z8.58. Schemat zastępczy dla przekształconego układu z rysunku Z8.57 (Przykład 6.3)

W celu wyznaczenia impedancji zastępczej zwraca się źródła napięcia i sumuje impedancje w obwodzie względem zacisków „ab” (dalsze obliczenia i przekształcenia będą identyczne dla obwodów wszystkich składowych dlatego pominięto indeksy składowych symetrycznych) rysunki Z8.55-57.

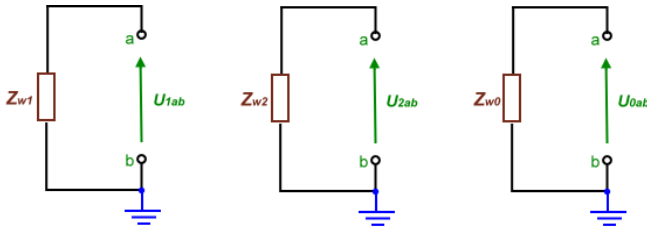


Rysunek Z8.59. Obwód impedancyjny dla obliczenia  $Z_w$  (Przykład 6.3)



$$Z_w = \frac{[z(x+l) + X_{S1}][z(3l-x) + X_{S1}]}{4Z_1l + 2X_{S1}}$$

Rysunek Z8.60. Układ z rysunku Z8.59 w prostszej postaci (Przykład 6.3)



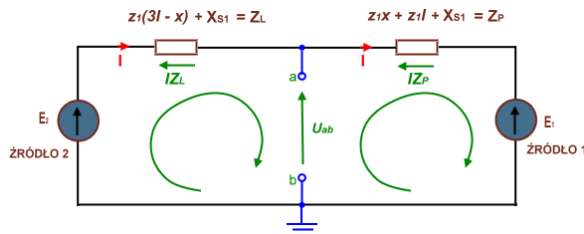
$$Z_{w2} = \frac{[Z_2(x+l) + X_{S2}][Z_2(3l-x) + X_{S2}]}{4Z_2l + 2X_{S2}}$$

Rysunek Z8.61. Prostsza postać układów impedancyjnych dla poszczególnych składowych symetrycznych (Przykład 6.3)

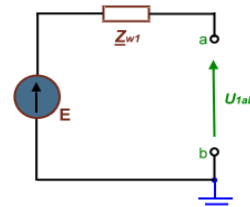
$$Z_{w1} = \frac{[Z_1(x+l) + X_{S1}][Z_1(3l-x) + X_{S1}]}{4Z_1l + 2X_{S1}}$$

$$Z_{w0} = \frac{[Z_0(x+l) + X_{S0}][Z_0(3l-x) + X_{S0}]}{4Z_0l + 2X_{S0}}$$

Ponieważ wartość napięcia źródła 1 jest taka sama jak źródła 2 i wynosi  $E$ , więc prąd  $I = 0$ , a wartość napięcia  $U_{ab} = E$ . Wyliczenia wykonane do tego miejsca pozwalają na stworzenie układu zastępczego zgodnie z twierdzeniem Thevenina dla układu kolejności zgodnej, który przedstawiony jest na rysunku Z8.62 i Z8.63. Układ zastępczy dla układu kolejności przeciwnej przedstawiono na rysunku Z8.60 – wartość impedancji  $Z_w$  taka sama, ale brak źródła  $E$ .

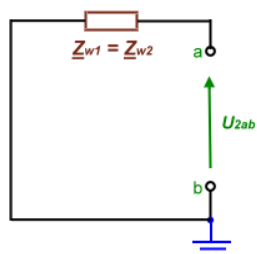


Rysunek Z8.62. Wyliczenie napięcia Thevenina dla układu kolejności zgodnej (Przykład 6.3)



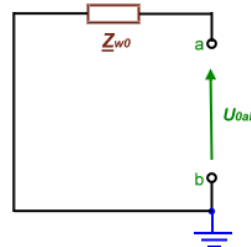
Rysunek Z8.63. Schemat zastępczy Thevenina dla układu kolejności zgodnej (Przykład 6.3)

$$Z_{w1} = \frac{[Z_1(x+l) + X_{S1}][Z_1(3l-x) + X_{S1}]}{4Z_1l + 2X_{S1}}$$



Rysunek Z8.64. Schemat zastępczy Thevenina dla układu kolejności przeciwnej (Przykład 6.3)

$$Z_{w2} = \frac{[Z_2(x+l) + X_{S1}][Z_2(3l-x) + X_{S2}]}{4Z_2l + 2X_{S2}} \quad !$$



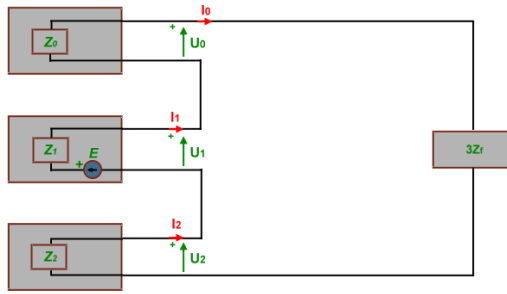
Rysunek Z8.65. Schemat zastępczy Thevenina dla układu kolejności zerowej (Przykład 6.3)

$$Z_{w0} = \frac{[Z_0(x+l) + X_{S0}][Z_0(3l-x) + X_{S0}]}{4Z_0l + 2X_{S0}}$$

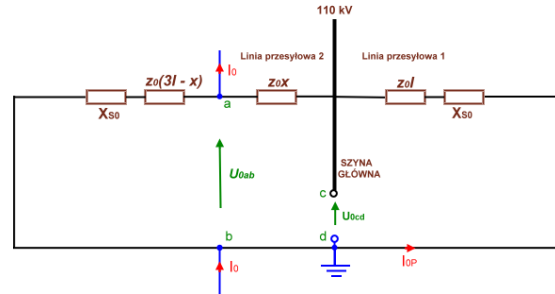
Dla układu kolejności zerowej wartość impedancji wylicza się w analogiczny sposób, a schemat zastępczy przedstawiono na rysunku Z8.65.

### KROK 3

Zastosowanie zasady superpozycji dla układów kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej (rys. Z8.66).



Rysunek Z8.66. Zastosowanie metody superpozycji (Przykład 6.3)



Rysunek Z8.67. Układ kolejności zerowej dla wyliczenia napięcia  $U_{0cd}$  (Przykład 6.3)

#### KROK 4

Składowe symetryczne prądów i napięć dla zwarcia na szynach głównych 110kV (przyjmując, że impedancja zwarcia  $Z_f$  jest w przybliżeniu równa 0 – bezpośrednie połączenie przewodu fazy z ziemią).

Na podstawie rysunku Z8.66:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{w1} + \underline{Z}_{w2} + \underline{Z}_{w0}} \quad (\text{Z8.12})$$

Na podstawie napięciowego prawa Kirchoffa:

$$\underline{U}_0 = -\underline{I}_0 \underline{Z}_0 \quad (\text{Z8.13})$$

$$\underline{U}_2 = -\underline{I}_2 \underline{Z}_2 \quad (\text{Z8.14})$$

$$\underline{E} = \underline{I}_1 \underline{Z}_1 + \underline{U}_1 \Rightarrow \underline{U}_1 = \underline{E} - \underline{I}_1 \underline{Z}_1 \quad (\text{Z8.15})$$

Dla zwarcia, które wystąpiło na szynach głównych, czyli w odległości  $x = 0$  km można, korzystając z wcześniejszych wskazówek odpowiednio przekształcić obwody tak, aby była możliwość wyznaczenia odpowiednich wartości dla układów kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej.

Dla układu kolejności zerowej znane jest już  $I_0$  i  $U_0$ , należy wykonać obliczenia dla napięcia  $U_{szgl} = U_{cd}$  (zmiana indeksu w celu łatwiejszego zapisu, rys. Z8.67). Na podstawie napięciowego prawa Kirchoffa:

$$\underline{U}_{0cd} + \underline{I}_{0P} \cdot (\underline{X}_{S0} + \underline{z}_0 l) = 0 \quad \underline{U}_{0cd} = -\underline{I}_{0P} \cdot (\underline{X}_{S0} + \underline{z}_0 l) \quad (\text{Z8.16})$$

Prąd  $I_0$  rozplywa się pomiędzy dwie równoległe gałęzie: (a) prawą o sumarycznej impedancji  $Z_p$  oraz (b) lewą o sumarycznej impedancji  $Z_L$ .

$$\underline{Z}_{0L} = \underline{X}_{0S} + \underline{Z}_0(3l - x) \quad \underline{Z}_{0P} = \underline{X}_{S0} + \underline{Z}_0(l + x)$$

Stąd:

$$\underline{U}_{0ab} = \frac{\underline{Z}_{0L} \cdot \underline{Z}_{0P}}{\underline{Z}_{0L} + \underline{Z}_{0P}} \cdot \underline{I}_0 \quad \underline{U}_{0ab} = \underline{Z}_{0P} \cdot \underline{I}_{0P}$$

a więc:

$$\frac{\underline{Z}_{0L} \cdot \underline{Z}_{0P}}{\underline{Z}_{0L} + \underline{Z}_{0P}} \cdot \underline{I}_0 = \underline{I}_{0P} \cdot \underline{Z}_{0P} \Rightarrow \underline{I}_{0P} = \frac{\underline{I}_0 \underline{Z}_{0L}}{\underline{Z}_{0L} + \underline{Z}_{0P}} \quad (\text{Z8.17})$$

Stosując tę samą formę zapisu dla układów kolejności przeciwnej (rys. Z8.68):

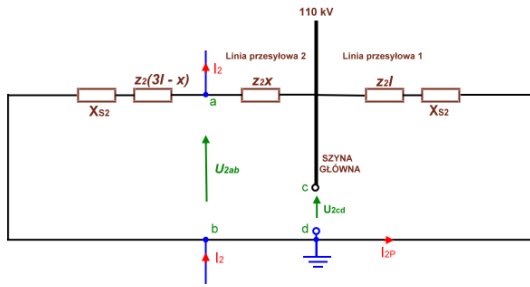
$$\underline{U}_{2cd} + \underline{I}_{2P} \cdot (\underline{X}_{S2} + \underline{Z}_2 l) = 0 \quad \underline{U}_{2cd} = -\underline{I}_{2P} \cdot (\underline{X}_{S2} + \underline{Z}_2 l) \quad (\text{Z8.18})$$

$$\underline{Z}_{2L} = \underline{X}_{2S} + \underline{Z}_2(3l - x) \quad \underline{Z}_{2P} = \underline{X}_{S2} + \underline{Z}_2(l + x)$$

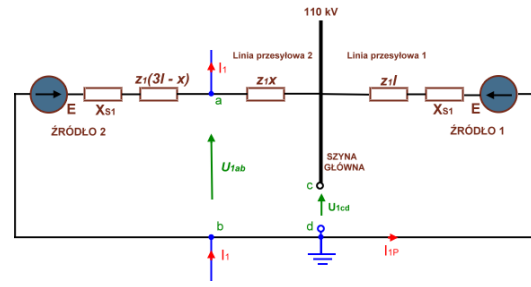
$$\underline{U}_{2ab} = \frac{\underline{Z}_{2L} \cdot \underline{Z}_{2P}}{\underline{Z}_{2L} + \underline{Z}_{2P}} \cdot \underline{I}_2 \quad \underline{U}_{2ab} = \underline{Z}_{2P} \cdot \underline{I}_{2P}$$

Stąd:

$$\frac{\underline{Z}_{2L} \cdot \underline{Z}_{2P}}{\underline{Z}_{2L} + \underline{Z}_{2P}} \cdot \underline{I}_2 = \underline{I}_{2P} \cdot \underline{Z}_{2P} \Rightarrow \underline{I}_{2P} = \frac{\underline{I}_2 \underline{Z}_{2L}}{\underline{Z}_{2L} + \underline{Z}_{2P}} \quad (\text{Z8.19})$$



Rysunek Z8.68. Układ kolejności przeciwnej dla wyliczenia napięcia  $U_{2cd}$  (Przykład 6.3)



Rysunek Z8.69. Układ kolejności przeciwnej dla wyliczenia napięcia  $U_{2cd}$  (Przykład 6.3)

Inaczej będzie dla układu kolejności zgodnej, gdzie obwód zawiera źródła zasilania. Wykorzystując schemat z rysunku Z8.69 do wyznaczenia  $U_{1cd}$  otrzymuje się:

$$\underline{U}_{1cd} - \underline{E} + I_{1P} \cdot (\underline{X}_{S1} + \underline{Z}_1 l) = 0 \quad \underline{U}_{1cd} = \underline{E} - I_{1P} \cdot (\underline{X}_{S1} + \underline{Z}_1 l) \quad (Z8.20)$$

$$\underline{Z}_{1P} = \underline{X}_{S1} + \underline{Z}_1(l+x) \quad I_{1P} = \frac{\underline{E} - \underline{U}_{1ab}}{\underline{Z}_{1P}} \quad (Z8.21)$$

### KROK V

Napięcia fazowe L1, L2, L3 na szynie głównej 110kV:

$$\underline{U}_{L1cd} = \underline{U}_{0cd} + \underline{U}_{1cd} + \underline{U}_{2cd} \quad (Z8.22)$$

$$\underline{U}_{L2cd} = \underline{U}_{0cd} + a^2 \underline{U}_{1cd} + a \underline{U}_{2cd} \quad (Z8.23)$$

$$\underline{U}_{L3cd} = \underline{U}_{0cd} + a \underline{U}_{1cd} + a^2 \underline{U}_{2cd} \quad (Z8.24)$$

Dla systemu energetycznego jak na rysunku Z8.48 wyznaczyć wartość zapadów napięcia dla poszczególnych faz L1, L2 i L3 na szynach głównych 110 kV dla zwarcia pojedynczej fazy (fazy L1) do ziemi w odległości  $x = 0$  od szyn głównych rozdzielni 110 kV. Linie 110 kV to linie napowietrzne 1-torowe AFL-6 240 mm<sup>2</sup> prowadzone na słupach w układzie płaskim.

### Dane:

Impedancje dla:

- układu kolejności zgodnej:

$$\underline{z}_1 = (0,075 + j0,374) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

- układu kolejności przeciwnej:

$$\underline{z}_2 = (0,075 + j0,0,374) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

- układu kolejności zerowej

$$\underline{z}_0 = (0,252 + j1,562) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

- źródła

$$\underline{X}_{S1} = \underline{X}_{S2} = \underline{X}_{S0} = (j0,333) \Omega$$

- długość linii przesyłowej 1

$$l = 8 \text{ km}$$

- długość linii przesyłowej 2

$$3l = 24 \text{ km}$$

- odległość do miejsca zwarcia

$$x = 0 \text{ km}$$

### Szukane:

$$\Delta U_{L1cd}\%, \Delta U_{L2cd}\%, \Delta U_{L3cd}\%$$

Policzymy napięcia faz L1, L2, L3 na szynie głównej używając wcześniej przedstawionej procedury czyli:

### KROK 1

Schematy zastępcze dla:

- układu kolejności zgodnej
- układu kolejności przeciwnej
- układu kolejności zerowej

### KROK 2

- dla układu kolejności zgodnej:

$$\underline{Z}_{w1} = \frac{[\underline{z}_1 \cdot (x+l) + \underline{X}_{S1}] \cdot [\underline{z}_1 \cdot (3l-x) + \underline{X}_{S1}]}{4\underline{z}_1 l + 2\underline{X}_{S1}}$$

$$\text{dla } x=0: \quad \underline{Z}_{w1} = \frac{(\underline{z}_1 l + \underline{X}_{S1}) \cdot (3\underline{z}_1 l + \underline{X}_{S1})}{4\underline{z}_1 l + 2\underline{X}_{S1}}$$

$$l = 8 \text{ km} \quad E = \frac{110}{\sqrt{3}} \text{ kV} = 63508 \text{ V}$$

$$\underline{z}_1 l = (0,075 + j0,374) \cdot 8 = (0,6 + j2,992) \Omega$$

$$\underline{Z}_{w1} = \frac{(0,6 + j2,992 + j0,333) \cdot [3 \cdot (0,6 + j2,992) + j0,333]}{4 \cdot (0,6 + j2,992) + 2 \cdot j0,333}$$

$$\underline{Z}_{w1} = \frac{(0,6 + j3,325) \cdot (1,8 + j8,976 + j0,333)}{2,4 + j11,968 + j0,666}$$

$$\underline{Z}_{w1} = \frac{(0,6 + j3,325) \cdot (1,8 + j9,309)}{2,4 + j12,634}$$

$$\underline{Z}_{w1} = \frac{-29,872 + j11,57}{2,4 + j12,634} = (0,45 + j2,45) \Omega = 2,49e^{j79,6} \Omega$$

- dla układu kolejności przeciwnej:  $\underline{Z}_{w1} = \underline{Z}_{w2}$ . Stąd  $\underline{Z}_{w2} = (0,45 + j2,45) \Omega = 2,49e^{j79,6} \Omega$ .

- dla układu kolejności zerowej:

$$\underline{Z}_{w0} = \frac{[\underline{z}_0 \cdot (x+l) + \underline{X}_{S0}] \cdot [\underline{z}_0 \cdot (3l-x) + \underline{X}_{S0}]}{4\underline{z}_0 l + 2\underline{X}_{S0}}$$

dla  $x = 0$ :

$$\underline{Z}_{w0} = \frac{(\underline{z}_0 l + \underline{X}_{S0})(3\underline{z}_0 l + \underline{X}_{S0})}{4\underline{z}_0 l + 2\underline{X}_{S0}}$$

$$l = 8 \text{ km} \quad E = \frac{110}{\sqrt{3}} \text{ kV} = 63508 \text{ V}$$

$$\underline{z}_0 l = (0,252 + j1,562) \cdot 8 = (2,016 + j12,496) \Omega$$

$$\underline{Z}_{w0} = \frac{(2,016 + j12,496 + j0,333) \cdot [3 \cdot (2,016 + j12,496) + j0,333]}{4 \cdot (2,016 + j12,496) + 2 \cdot j0,333}$$

$$\underline{Z}_{w0} = \frac{(2,016 + j12,829) \cdot (6,048 + j37,488 + j0,333)}{8,064 + j49,984 + j0,666}$$

$$\underline{Z}_{w0} = \frac{(2,016 + j12,829) \cdot (6,048 + j37,821)}{8,064 + j50,65}$$

$$\underline{Z}_{w0} = \frac{-473,01 + j153,84}{8,064 + j50,65} = (1,51 + j9,58) \Omega = 9,7e^{j81} \Omega$$

### KROK 3

Zastosowanie metody superpozycji do układów wszystkich kolejności dla jednofazowego zwarcia do ziemi

### KROK 4

Wyznaczenie prądów i napięć dla poszczególnych składowych.

- dla zwarcia zlokalizowanego  $x = 0$  km od szyn głównych:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{w0} + \underline{Z}_{w1} + \underline{Z}_{w2}} = \frac{63508}{2 \cdot (0,45 + j2,45) + 1,51 + j9,58} =$$

$$= \frac{63508}{2,41 + j14,48} = 710,3 - j4267,7 = 4326,4e^{-j80,6} \text{ A}$$

$$\underline{U}_{0ab} = -\underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_{w0}$$

$$\underline{U}_{0ab} = -(710,3 - j4267,7) \cdot (1,51 + j9,58) = (-41957 - j360,5) \text{ V}$$

$$\underline{U}_{0ab} = -41958,7e^{-j179,5} \text{ V} \quad \Rightarrow \quad U_{0ab} = 41,96 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{2ab} = -\underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{w2}$$

$$\underline{U}_{2ab} = -(710,3 - j4267,7) \cdot (0,45 + j2,45) = (-10775,5 + j180,2) \text{ V}$$

$$\underline{U}_{2ab} = -10777e^{j179} \text{ V} \quad \Rightarrow \quad U_{2ab} = 10,8 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{1ab} = \underline{E} - \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_{w1}$$

$$\underline{U}_{1ab} = 63508 - (710,3 - j4267,7) \cdot (0,45 + j2,45) = 63508 - (10775,5 - j180,2) \text{ V}$$

$$\underline{U}_{1ab} = 52732,5 + j180,2 = 52732,8e^{j0,2} \text{ V} \quad \Rightarrow \quad U_{1ab} = 52,7 \text{ kV}$$

## KROK 5

Transformacja składowych symetrycznych do układu współrzędnych naturalnych:

$$\underline{U}_{L1cd} = \underline{U}_{0cd} + \underline{U}_{1cd} + \underline{U}_{2cd}$$

$$\underline{U}_{L2cd} = \underline{U}_{0cd} + a^2 \underline{U}_{1cd} + a \underline{U}_{2cd}$$

$$\underline{U}_{L3cd} = \underline{U}_{0cd} + a \underline{U}_{1cd} + a^2 \underline{U}_{2cd}$$

Dla  $x = 0$

$$\underline{U}_{0cd} = U_{0ab}$$

$$\underline{U}_{1cd} = U_{1ab}$$

$$\underline{U}_{2cd} = U_{2ab}$$

Czyli:

$$\underline{U}_{L1cd} = (-41957,1 - j360,5) + (52732,5 + j180,2) + (-10775,5 + j180,2) \approx 0 \text{ V}$$

$$\underline{U}_{L2cd} = (-41957,1 - j360,8) + (-0,5 - j0,866) \cdot (52732,5 + j180,2) +$$

$$+ (-0,5 + j0,866) \cdot (-10775,5 + j180,2) =$$

$$= (-41957,1 - j360,5) + (-26210,2 - j45756,4) + (5231,7 - j9421,7) =$$

$$= -62935,6 - j55538,6 = 83937e^{-j138,6} \text{ V}$$

$$\underline{U}_{L3cd} = (-41957,1 - j360,8) + (-0,5 + j0,866) \cdot (52732,5 + j180,2) +$$

$$+ (-0,5 - j0,866) \cdot (-10775,5 + j180,2) =$$

$$= (-41957,1 - j360,5) + (-26522,3 - j45576,2) + (5543,8 - j9241,5) =$$

$$= -62935,6 - j54457,2 = 83225,4e^{j139,1} \text{ V}$$

$$U_{Acd} = 0 \text{ V}$$

$$U_{Bcd} = 83937 \text{ V}$$

$$U_{Ccd} = 83225 \text{ V}$$

$$\frac{83937}{63508} \cdot 100\% = 132\%$$

$$\frac{83225}{63508} \cdot 100\% = 131\%$$

Wartości zapadów napięcia dla poszczególnych faz:

$$\text{Faza L1} \quad \Delta U_{L1cd\%} = \frac{63508 - 0}{63508} \cdot 100\% = 100\%$$

$$\text{Faza L2} \quad \Delta U_{L2cd\%} = \frac{63508 - 83937}{63508} \cdot 100\% = -32,2\%$$

$$\text{Faza L3} \quad \Delta U_{L3cd\%} = \frac{63508 - 83225}{63508} \cdot 100\% = -31,0\%$$

Napięcia fazy L2 i fazy L3 wynoszą odpowiednio 83937 V i 83225 V co stanowi około 132% napięcia znamionowego. Wzrost napięcia w fazach L2 i L3 będzie się utrzymywać do chwili usunięcia zwarcia w fazie L1.

*Dla systemu energetycznego jak na rysunku Z8.48 wyznaczyć wartości amplitud zapadów poszczególnych faz L1, L2 i L3 na szynach głównych rozdzielni 110 kV dla zwarcia fazy L1 do ziemi zlokalizowanego na końcu 2 linii, czyli w odległości  $x = 24$  od szyn głównych.*

### KROK 1

Schematy zastępcze dla:

- układu kolejności zgodnej
- układu kolejności przeciwnej
- układu kolejności zerowej

### KROK 2

- dla układu kolejności zgodnej:

$$\underline{Z}_{w1} = \frac{[\underline{z}_1 \cdot (x+l) + \underline{X}_{S1}] \cdot [\underline{z}_1 \cdot (3l-x) + \underline{X}_{S1}]}{4\underline{z}_1 l + 2\underline{X}_{S1}}$$

$$l = 8 \text{ km} \qquad E = \frac{110}{\sqrt{3}} \text{ kV} = 63508 \text{ V}$$

$$\underline{z}_1(x+l) = (0,075 + j0,374) \cdot 32 = (2,4 + j1,1968) \Omega$$

$$\underline{z}_1 l = (0,075 + j0,374) \cdot 8 = (0,6 + j2,992) \Omega$$

$$\underline{Z}_{w1} = \frac{(2,4 + j1,1968 + j0,333) \cdot (j0,333)}{4 \cdot (0,6 + j2,992) + 2 \cdot j0,333}$$

$$\underline{Z}_{w1} = \frac{-4,096 + j0,799}{2,4 + j12,634} = (0,002 + j0,325) \Omega = 0,325e^{j89,7} \Omega$$

- dla układu kolejności przeciwnej:

$$\underline{Z}_{w1} = \underline{Z}_{w2} \cdot \text{Stąd } \underline{Z}_{w2} = (0,002 + j0,325) \Omega = 0,325e^{j89,7} \Omega$$

- dla układu kolejności zerowej:

$$\underline{Z}_{w0} = \frac{[\underline{z}_0 \cdot (x+l) + \underline{X}_{S0}] \cdot [\underline{z}_0 \cdot (3l-x) + \underline{X}_{S0}]}{4\underline{z}_0 l + 2\underline{X}_{S0}}$$

$$\underline{z}_0(x+l) = (0,252 + j1,562) \cdot 32 = (8,064 + j49,984) \Omega$$

$$\underline{z}_0 l = (0,252 + j1,562) \cdot 8 = (2,016 + j12,496) \Omega$$

$$\underline{Z}_{w0} = \frac{(8,064 + j49,984 + j0,333) \cdot [j0,333]}{4 \cdot (2,016 + j12,496) + 2 \cdot j0,333} \Omega$$

$$\underline{Z}_{w0} = \frac{-16,755 + j2,685}{8,064 + j50,65} = j0,331 = 0,331e^{j89,9} \Omega$$

### KROK 3

Zastosowanie metody superpozycji do układów wszystkich kolejności dla jednofazowego zwarcia do ziemi

#### KROK 4

Wyznaczenie prądów i napięć dla poszczególnych składowych.

- dla zwarcia zlokalizowanego  $x = 24$  km od szyn głównych:

$$\begin{aligned} \underline{I}_0 = \underline{I}_1 = \underline{I}_2 &= \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_{w0} + \underline{Z}_{w1} + \underline{Z}_{w2}} = \frac{63508}{j0,331 + 2 \cdot (0,002 + j0,325)} = \\ &= \frac{63508}{0,004 + j0,983} = 262,89 - j64605,2 = 64605,8e^{-j89,8} \text{ A} \end{aligned}$$

$$\underline{U}_1 = \underline{E} - \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_{w1}$$

$$\underline{U}_1 = 63508 - (262,89 - j64605,2) \cdot (0,002 + j0,325) = 63508 - (20997,2 - j43,8) \text{ V}$$

$$\underline{U}_1 = 42510,8 + j43,8 = 42510,8e^{j0,06} \text{ V} \quad \Rightarrow \quad U_1 = 42,5 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{0cd} = -\underline{I}_{0P} \cdot (\underline{X}_{S0} + \underline{z}_0 l)$$

$$\underline{Z}_{0L} = \underline{X}_{0S} + \underline{z}_0(3l - x) = j0,333 + (0,252 + j1,562) \cdot (3 \cdot 8 - 24) = j0,333 \Omega$$

$$\underline{Z}_{0P} = \underline{X}_{S0} + \underline{z}_0(l + x) = j0,333 + (0,252 + j1,562) \cdot (32) = (8,064 + j50,317) \Omega$$

$$\underline{I}_{0P} = \frac{\underline{I}_0 \underline{Z}_{0L}}{\underline{Z}_{0L} + \underline{Z}_{0P}} = \frac{(262,89 - j64605,2) \cdot j0,333}{(8,064 + j50,317) + j0,333} = \frac{21513,5 + j87,5}{8,064 + j50,65} \text{ A}$$

$$\underline{I}_{0P} = 67,64 - j413,98 = 419,5e^{-j80,7} \Omega$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{0cd} &= -[67,64 - j413,98] \cdot [j0,333 + (0,252 + j1,562) \cdot 8] = \\ &= -[67,64 - j413,98] \cdot [2,016 + j12,829] = -5447,3 - j33,2 = 5447,4e^{j0,35} \text{ V} \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{2cd} = -\underline{I}_{2P} \cdot (\underline{X}_{S2} + \underline{z}_2 l)$$

$$\underline{Z}_{2L} = \underline{X}_{2S} + \underline{z}_2(3l - x) = j0,333 \Omega$$

$$\underline{Z}_{2P} = \underline{X}_{S2} + \underline{z}_2(l + x) = j0,333 + (0,075 + j0,374) \cdot (32) = (2,4 + j12,301) \Omega$$

$$\underline{I}_{2P} = \frac{\underline{I}_2 \underline{Z}_{2L}}{\underline{Z}_{2L} + \underline{Z}_{2P}} = \frac{(262,89 - j64605,2) \cdot j0,333}{(2,4 + j12,301) + j0,333} = \frac{21513,5 + j87,5}{2,4 + j12,634} \text{ A}$$

$$\underline{I}_{2P} = 318,9 - j1642,2 = 1677,9e^{-j79} \Omega$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{2cd} &= -[318,9 - j1642,2] \cdot [j0,333 + (0,075 + j0,374) \cdot 8] = \\ &= -[318,9 - j1642,2] \cdot [0,6 + j3,325] = -5798,7 - j105,8 = 5799,6e^{-j178,9} \text{ V} \end{aligned}$$

$$\underline{U}_{1cd} = \underline{E} - \underline{I}_{1P} \cdot (\underline{X}_{S1} + \underline{z}_1 l)$$

$$\underline{Z}_{1P} = \underline{X}_{S1} + \underline{z}_1(l + x) = j0,333 + (0,075 + j0,374) \cdot (32) = (2,4 + j12,301) \Omega$$

$$\underline{I}_{2P} = \frac{\underline{E} - \underline{U}_1}{\underline{Z}_{1P}} = \frac{63508 - (42510,8 + j43,8)}{2,4 + j12,301} = \frac{20997,2 - j43,8}{2,4 + j12,301} \text{ A}$$

$$\underline{I}_{2P} = 317,4 - j1645 = 1675,3e^{-j79,1} \text{ A}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1cd} &= 63508 - [317,4 - j1645] \cdot [j0,333 + (0,075 + j0,374) \cdot 8] = \\ &= 63508 - [317,4 - j1645] \cdot [0,6 + j3,325] = 63508 - [5660,1 + j68,3] = \\ &= 57847,9 - j68,3 = 57847,9e^{j0} \text{ V} \end{aligned}$$

## KROK 5

$$\begin{aligned}\underline{U}_{L1cd} &= \underline{U}_{0cd} + \underline{U}_{1cd} + \underline{U}_{2cd} \\ \underline{U}_{L1cd} &= (-5447,3 - j33,2) + (57847,9 - j68,3) + (-5798,7 - j105,8) \\ &= 46601,9 - j207,3 = 46602,4e^{-j0,25} \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{U}_{L2cd} &= \underline{U}_{0cd} + a^2 \underline{U}_{1cd} + a \underline{U}_{2cd} \\ \underline{U}_{L2cd} &= (-5447,3 - j33,2) + (-0,5 - j0,866) \cdot (57847,9 - j68,3) + \\ &+ (-0,5 + j0,866) \cdot (-5798,7 - j105,8) = \\ &= (-5447,3 - j33,2) + (-28983,1 - j50062,1) + (2991 - j4968,8) = \\ &= -31439,4 - j55064,1 = 63407,3e^{-j119,7} \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{U}_{L3cd} &= \underline{U}_{0cd} + a \underline{U}_{1cd} + a^2 \underline{U}_{2cd} \\ \underline{U}_{L3cd} &= (-5447,3 - j33,2) + (-0,5 + j0,866) \cdot (57847,9 - j68,3) + \\ &+ (-0,5 - j0,866) \cdot (-5798,7 - j105,8) = \\ &= (-5447,3 - j33,2) + (-28864,8 + j50130,4) + (2807,7 + j5074,6) = \\ &= -31504,4 + j55171,8 = 63533,1e^{j119,7} \text{ V}\end{aligned}$$

$$U_{L1cd} = 46602,4 \text{ V} \quad U_{L2cd} = 63407,3 \text{ V} \quad U_{L3cd} = 63533,1 \text{ V}$$

Wartości zapadów napięcia dla poszczególnych faz:

$$\Delta U_{L1cd\%} = \frac{63508 - 46602}{63508} \cdot 100\% = 26,6\%$$

$$\Delta U_{L2cd\%} = \frac{63508 - 63407}{63508} \cdot 100\% = 0,2\%$$

$$\Delta U_{L3cd\%} = \frac{63508 - 63533}{63508} \cdot 100\% = 0,0\%$$

## LITERATURA

1. Gulachenski E.M.: *Advanced Power Quality Analysis*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers 1998.
2. Michalik B.: *Zapady napięcia, krótkie przerwy w zasilaniu. Przyczyny, skutki, sposoby poprawy*. Praca dyplomowa AGH, Kraków 2001.

## PRZYKŁAD 6.4 [1,2]

Nie uwzględniając impedancji transformatora – wyznaczyć dla układu jak w Przykładach 6.1-3:

- amplitudy zapadów napięć:  $\Delta U_{L1N\%}$ ,  $\Delta U_{L2N\%}$ ,  $\Delta U_{L3N\%}$ , w linii 15 kV dla jednofazowego zwarcia do ziemi po stronie 110 kV i transformatora: Y/y
- jak w punkcie (a), transformator Dd
- jak w punkcie (a), transformator Dy
- jak w punkcie (a), zwarcie 24 kilometry od szyn głównych 110 kV.

W zadaniu przyjęto jednotorową linię napowietrzną wykonaną przewodami 110 kV AFL-6 240 mm<sup>2</sup> w układzie płaskim, której parametry zostały przyjęte jak w PRZYKŁADZIE 6.3.

### Dane:

- impedancja składowej kolejności zgodnej:  $\underline{z}_1 = (0,075 + j0,374) \frac{\Omega}{\text{km}}$
- impedancja składowej kolejności przeciwnej:  $\underline{z}_2 = (0,075 + j0,0,374) \frac{\Omega}{\text{km}}$
- impedancja składowej kolejności zerowej:  $\underline{z}_0 = (0,252 + j1,562) \frac{\Omega}{\text{km}}$
- źródła zasilania:  $X_{S1} = X_{S2} = X_{S0} = (j0,333) \Omega$
- długość linii przesyłowej 1:  $l = 8 \text{ km}$
- długość linii przesyłowej 2:  $3l = 24 \text{ km}$
- odległość do miejsca zwarcia:  $x = 0 \text{ km}$

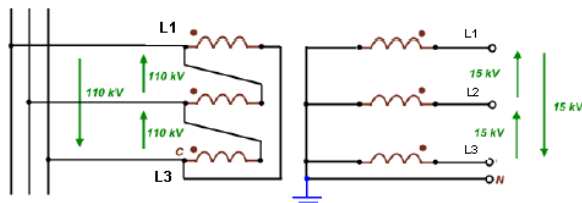
Wartości zapadów napięcia na szynach głównych 110 kV będą miały te same wartości jak wyznaczone w Przykładzie 6.3 czyli:

W fazie L1 wartość zapadu  $\Delta U_{\%} = 100\%$

W fazie L2 wartość zapadu  $\Delta U_{\%} = -32\%$

W fazie L3 wartość zapadu  $\Delta U_{\%} = -31\%$

Skojarzenie uzwojeń transformatora: trójkąt-trójkąt i gwiazda-gwiazda nie wnosi nic prócz przełożenia napięcia, to znaczy, że wartości zapadów napięcia po stronie pierwotnej przenoszą się na stronę wtórną bez zmiany wartości (w jednostkach względnych). Odmienna sytuacja występuje w przypadku połączeń gwiazda-trójkąt i trójkąt-gwiazda (rys. Z8.70).



Rysunek Z8.70. Transformacja zapadów dla transformatora o skojarzeniu uzwojeń trójkąt-gwiazda (110/15 kV) (Przykład 6.4)

Dla tych połączeń składowe symetryczne kolejności zgodnej po stronie wysokiego napięcia wyprzedzają układ kolejności zgodnej po stronie niskiego napięcia o 30 stopni. Dla układu kolejności przeciwnej jest odwrotnie - układ wskazów po stronie pierwotnej jest opóźniony o 30 stopni względem odpowiadającego mu układowi po stronie wtórnej.

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{L1N} &= \frac{15}{110} \cdot [\underline{U}_{0cd} + \underline{U}_{1cd} \cdot (e^{-j30^\circ}) + \underline{U}_{2cd} \cdot (e^{j30^\circ})] \\
 \underline{U}_{L2N} &= \frac{15}{110} \cdot [\underline{U}_{0cd} + a^2 \underline{U}_{1cd} \cdot (e^{-j30^\circ}) + a \underline{U}_{2cd} \cdot (e^{j30^\circ})] \\
 \underline{U}_{L3N} &= \frac{15}{110} \cdot [\underline{U}_{0cd} + a \underline{U}_{1cd} \cdot (e^{-j30^\circ}) + a^2 \underline{U}_{2cd} \cdot (e^{j30^\circ})]
 \end{aligned}
 \tag{Z8.25}$$

Do wyznaczenia pozostają zatem wartości zapadów napięcia na zaciskach 15 kV transformatora. Napięcie transformatora po stronie wtórnej zależy będzie od połączenia uzwojeń transformatora.

Dla połączeń gwiazda-gwiazda i trójkąt-trójkąt amplituda zapadów  $\Delta U_{\%}$  po stronie wtórnej jest taka sama jak po stronie pierwotnej 110 kV. Tak więc rozwiązaniem problemów (a) i (b) będą wartości zapadów policzone w Przykładzie 6.3, czyli:

$$\text{W fazie L1 wartość zapadu } \Delta U_{L1N\%} = 100\%$$

$$\text{W fazie L2 wartość zapadu } \Delta U_{L2N\%} = -32\%$$

$$\text{W fazie L3 wartość zapadu } \Delta U_{L3N\%} = -31\%$$

Wszyscy odbiorcy po stronie 15 kV będą doświadczać zapadów napięcia we wszystkich punktach podłączenia wzdłuż linii rozdzielczych wychodzących ze stacji transformatorowej.

Dla przypadku (c) połączenia uzwojeń transformatora mają konfigurację trójkąt-gwiazda 110/15 kV. Żeby wyznaczyć wartość zapadów po stronie wtórnej, należy dokonać przesunięcia o  $30^\circ$  składowych symetrycznych kolejności zgodnej i przeciwniej o wartościach jak w Przykładzie 6.3:

$$\underline{U}_{0ab} = (-41957 - j360,5) = -41958,7e^{-j179,5} \text{ V} \quad U_{0ab} = 41,96 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{2ab} = (-10775,5 + j180,2) = -10777e^{j179} \text{ V} \quad U_{2ab} = 10,8 \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{1ab} = 52732,5 + j180,2 = 52732,8e^{j0,2} \text{ V} \quad U_{1ab} = 52,7 \text{ kV}$$

$$\text{Dla } x = 0: U_{0cd} = U_{0ab} \quad U_{1cd} = U_{1ab} \quad U_{2cd} = U_{2ab}$$

Stąd:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L1N} &= \frac{15}{110} [(-41957,1 - j360,5) + (52732,5 + j180,2) \cdot (0,866 - j0,5) + (-10775,5 + j180,2) \cdot (0,866 + j0,5)] = \\ &= -766,7 - j4336,7 = 4403,9e^{-j100} \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L2N} &= \frac{15}{110} [(-41957,1 - j360,8) + (-0,5 - j0,866) \cdot (52732,5 + j180,2) \cdot (0,866 - j0,5) \\ &+ (-0,5 + j0,866) \cdot (-10775,5 + j180,2) \cdot (0,866 + j0,5)] \\ &= (-10676,1 - j4421,4) = 11555,5e^{-j157,5} \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{L3N} &= \frac{15}{110} [(-41957,1 - j360,8) + (-0,5 + j0,866) \cdot (52732,5 + j180,2) \cdot (0,866 - j0,5) + \\ &+ (-0,5 - j0,866) \cdot (-10775,5 + j180,2) \cdot (0,866 + j0,5)] = \\ &= (-5721,4 + 8610,6) = 10338,2e^{j123} \text{ V} \end{aligned}$$

Wartości amplitud zapadów napięcia dla poszczególnych faz po stronie pierwotnej wynoszą zgodnie z Przykładem 6.2):

$$\text{Faza L1} \quad \Delta U_{L1cd\%} = \frac{63508 - 0}{63508} \cdot 100\% = 100\%$$

$$\text{Faza L2} \quad \Delta U_{L2cd\%} = \frac{63508 - 83937}{63508} \cdot 100\% = -32,2\%$$

$$\text{Faza L3} \quad \Delta U_{L3cd\%} = \frac{63508 - 83225}{63508} \cdot 100\% = -31,0\%$$

Znamionowe napięcie fazy do przewodu neutralnego po stronie 15 kV transformatora wynosi:

$$\frac{15000}{\sqrt{3}} = 8660 \text{ V}$$

A więc wartości amplitud zapadów napięcia dla poszczególnych faz po stronie 15 kV wynoszą:

$$\Delta U_{L1N\%} = \frac{8660 - 4404}{8660} \cdot 100\% = 49,1\%$$

$$\Delta U_{L2N\%} = \frac{8660 - 11555}{8660} \cdot 100\% = -33,4\%$$

$$\Delta U_{L3N\%} = \frac{8660 - 10338}{8660} \cdot 100\% = -19,4\%$$

Wyznaczyć wartości zapadów napięć:  $\Delta U_{L1N\%}$ ,  $\Delta U_{L2N\%}$ ,  $\Delta U_{L3N\%}$ , na szynie 15 kV dla jednofazowego zwarcia do ziemi po stronie 110 kV w odległości  $x = 24$  km od szyn głównych 110 kV. Połączenia uzwojeń transformatora trójkąt – gwiazda.

Dla pojedynczego zwarcia fazy do ziemi na końcu linii 2 (24 kilometry od szyn głównych stacji transformatorowej 110 kV), zgodnie z Przykładem 6.3 wartości napięć dla poszczególnych składowych symetrycznych wynoszą:

$$\underline{U}_{0cd} = -5447,3 - j33,2 = 5447,4e^{j0,35} \text{ V}$$

$$\underline{U}_{2cd} = -5798,7 - j105,8 = 5799,6e^{-j178,9} \text{ V}$$

$$\underline{U}_{1cd} = 57847,9 - j68,3 = 57847,9e^{j0} \text{ V}$$

Stąd:

$$\begin{aligned} U_{L1N} &= \frac{15}{110} [(-5447,3 - j33,2) + (57847,9 - j68,3) \cdot (0,866 - j0,5) + \\ &+ (-5798,7 - j105,8) \cdot (0,866 + j0,5)] = 5406,3 - j4364,6 = 6948,2e^{-j38,9} \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{L2N} &= \frac{15}{110} [(-5447,3 - j33,2) + (-0,5 - j0,866) \cdot (57847,9 - j68,3) \cdot (0,866 - j0,5) + \\ &+ (-0,5 + j0,866) \cdot (-5798,7 - j105,8) \cdot (0,866 + j0,5)] = -6886,8 - j4323,1 = 8131,2e^{-j148,9} \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{L3N} &= \frac{15}{110} [(-5447,3 - j33,2) + (-0,5 + j0,866) \cdot (57847,9 - j68,3) \cdot (0,866 - j0,5) + \\ &+ (-0,5 - j0,866) \cdot (-5798,7 - j105,8) \cdot (0,866 + j0,5)] = -747,9 + j8674,1 = 8706,3e^{j94,9} \text{ V} \end{aligned}$$

Wartości amplitud zapadów napięcia dla poszczególnych faz po stronie pierwotnej i wtórnej wynoszą:

Strona pierwotna transformatora 110 kV  
(Przykład 6.3)

$$\Delta U_{L1cd\%} = \frac{63508 - 46602}{63508} \cdot 100\% = 26,6\%$$

$$\Delta U_{L2cd\%} = \frac{63508 - 63407}{63508} \cdot 100\% = 0,2\%$$

$$\Delta U_{L3cd\%} = \frac{63508 - 63533}{63508} \cdot 100\% = 0,0\%$$

Strona wtórna transformatora 15 kV  
(Przykład 6.3)

$$\Delta U_{L1N\%} = \frac{8660 - 6948}{8660} \cdot 100\% = 19,8\%$$

$$\Delta U_{L2N\%} = \frac{8660 - 8131}{8660} \cdot 100\% = 6,1\%$$

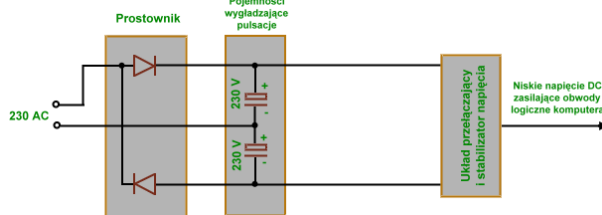
$$\Delta U_{L3N\%} = \frac{8660 - 8706}{8660} \cdot 100\% = -0,5\%$$

## LITERATURA

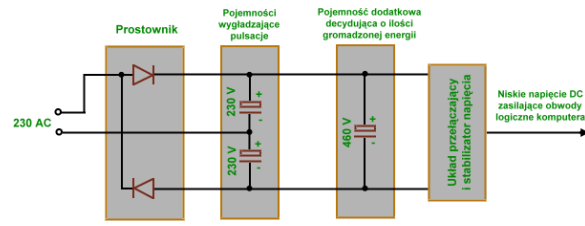
1. Gulachenski E.M.: *Advanced Power Quality Analysis*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers 1998.
2. Michalik B.: *Zapady napięcia, krótkie przerwy w zasilaniu. Przyczyny, skutki, sposoby poprawy*. Praca dyplomowa AGH, Kraków 2001.

## PRZYKŁAD 6.5 [1,2]

Zasilacz AC/DC, z mostkiem diodowym i kondensatorem, jest powszechnie stosowany do zasilania układów sterowania i innych urządzeń elektronicznych (komputery, systemy telekomunikacyjne, sterowniki programowalne itp.) – rysunek Z8.71. Jego obciążeniem jest zwykle przekształtnik DC/DC który zapewnia właściwy poziom napięć zasilających dla końcowych urządzeń. Energia zmagazynowana w kondensatorach po stronie DC, gwarantuje zwykle bardzo krótkie autonomiczne zasilanie w przypadku wystąpienia zapadu. Napięcie DC maleje do zera w czasie ułamków sekund. Takie układy zasilające i zasilany przez nie sprzęt są więc bardzo czułe na zapady i przerwy w zasilaniu. Sytuacja może ulec poprawie po zainstalowaniu dodatkowego kondensatora jak na rysunku Z8.72. Dzięki temu wiele zasilaczy posiada zdolność podtrzymania zasilania w dłuższym czasie.

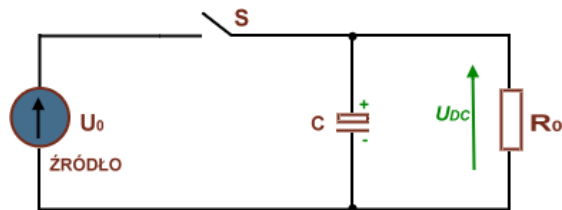


Rysunek Z8.71. Schemat najprostszego zasilacza AC/DC (Przykład 6.5)



Rysunek Z8.72. Zmiana struktury zasilacza z rysunku Z8.67 zwiększająca jego odporność na zapady (Przykład 6.5)

Schemat obwodu jak na rysunku Z8.73 można wykorzystać do wyznaczenia czasu podtrzymania napięcia zasilania DC powyżej poziomu powodującego wyłączenie urządzenia np. komputera.



Rysunek Z8.73. Obwód RC, jako podstawa wyznaczenia napięcia wyłączenia komputera w wyniku przerwy w zasilaniu (Przykład 6.5)

- $U_0$  – znamionowe napięcie *dc*, określone przez producenta
- $C$  – całkowita pojemność na wyjściu zasilacza jak na rysunku Z8.73
- $R$  – całkowita rezystancja odbiornika (np. komputer) w  $[\Omega]$  po stronie DC zasilacza
- $U_{DC}$  – stałe napięcie w V na wyjściu zasilacza podczas otwartego łącznika S
- S – łącznik (rozarty – oznacza przerwę w zasilaniu AC)

$$U_{DC} = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{gdzie } t - \text{czas w s} \quad (Z8.26)$$

Dla standardowych zasilaczy komputerowych wartość pojemności wyjściowej to około  $120 \cdot 10^{-6} \text{ F}$  i  $1200 \cdot 10^{-6} \text{ F}$  dla zasilaczy o zwiększonej odporności. Przykładowa moc zasilacza 48 W.

$$U_0 = \sqrt{2} \cdot 230 \cdot 2 - \Delta U_D = 650 - 10 = 640 \text{ V}$$

gdzie  $\Delta U_D$  - to tolerancja napięcia wyjściowego zasilacza (przyjęto  $\pm 10 \text{ V}$ ).

$$R = \frac{U_0^2}{P} = \frac{640^2}{48} = 8533,3 \Omega \quad t = -RC \ln\left(\frac{U_{DC}}{U_0}\right) = -8533,3 \cdot 120 \cdot 10^{-6} \ln\left(\frac{0,7 \cdot 640}{640}\right) = 0,36 \text{ s}$$

Kiedy wartość napięcia zbliży się do granicy  $0,7U_0$  czyli 448 V – progu wyłączenia, komputer wyłączy się po czasie 0,36 s. Przedłużenie czasu podtrzymania pracy komputera w powyższych warunkach, może nastąpić poprzez dodanie dodatkowej pojemności w obwód wyjściowy zasilacza.

Wartość dodatkowej pojemności, którą należy dodać, aby wartość napięcia na wyjściu zasilacza nie zmaląła poniżej 0,7 wartości znamionowej  $U_0$  przez czas co najmniej równy  $t = 1 \text{ s}$ :

$$U_{DC} = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \Rightarrow C = -\frac{t}{R \ln\left(\frac{U_{DC}}{U_0}\right)} \text{ F}$$

Przyjmując, że  $\frac{U_{DC}}{U_0} = 0,7$ , oraz  $t = 1$  s:

$$C = -\frac{t}{R \ln\left(\frac{U_{DC}}{U_0}\right)} = -\frac{t}{\frac{U_0^2}{P} \ln\left(\frac{U_{DC}}{U_0}\right)} = \frac{-1}{640^2 \ln(0,7)} \cdot P = 6,8 \cdot P \text{ } \mu\text{F}$$

Zależność ta pozwala oszacować wartość pojemności potrzebnej na wyjściu zasilacza, aby praca urządzenia o mocy  $P$  była podtrzymana, podczas zapadu napięcia o czasie trwania 1 s.

## LITERATURA

1. Gulachenski E.M.: *Advanced Power Quality Analysis*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers 1998.
2. Michalik B.: *Zapady napięcia, krótkie przerwy w zasilaniu. Przyczyny, skutki, sposoby poprawy*. Praca dyplomowa AGH, Kraków 2001.