Laboratorium Podstaw Elektrotechniki

Temat ćwiczenia:

Badanie układów trójfazowych

Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii -

Zakład Elektrotechniki Teoretycznej

1. Cela i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zjawisk występujących w układach trójfazowych, porównanie wyników pomiaru z analizą teoretyczną oraz interpretacja uzyskanych wyników za pomocą wykresów wskazowych.

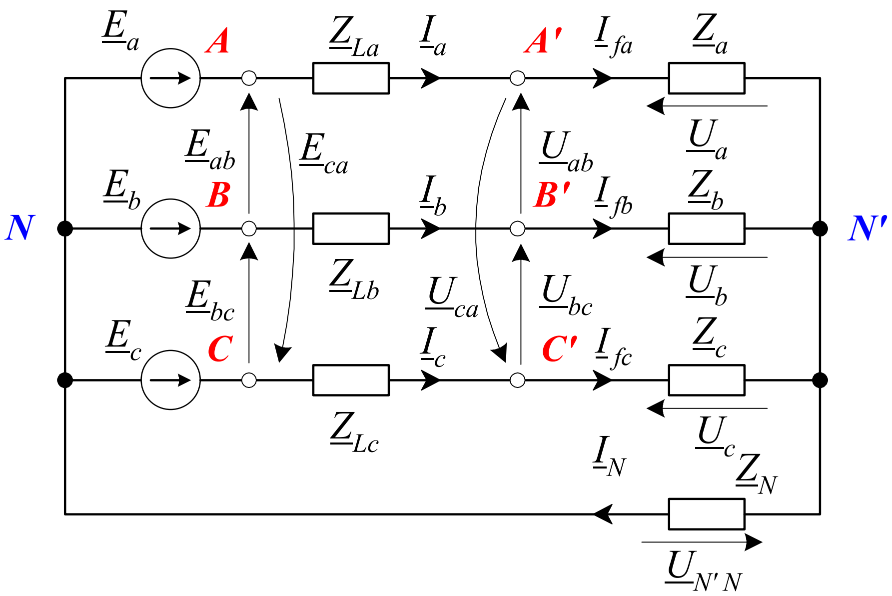
Przedmiotem badań jest sieć trójfazowa, zasilana z symetrycznego źródła napięcia, przy dwóch rodzajach połączeń odbiornika - w gwiazdę oraz trójkąt, zarówno w warunkach pracy normalnej, jak i awaryjnej.

Jeżeli napięcia źródłowe tworzą układ symetryczny, a impedancja obciążenia każdej fazy jest taka sama, to taki układ nazywamy układem **symetrycznym**. Jeśli któryś z tych warunków nie jest spełniony, to taki układ jest układem **niesymetrycznym**.

2. Układy trójfazowe z odbiornikiem połączonym w gwiazdę.

2.1. Zależności ogólne.

Rozpatrzmy przedstawiony na Rys. 2.1 układ trójfazowy. Składa się on z trzech odbiorników $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ połączonych w gwiazdę i zasilanych trzema synchronicznymi źródłami napięcia $\underline{E}_a, \underline{E}_b, \underline{E}_c$, połączonymi również w gwiazdę o punkcie neutralnym *N*.



Rys. 2.1

Przestawiony układ jest układem czteroprzewodowym, tj. punkty neutralne źródła i odbiornika połączone są dodatkowo tzw. przewodem zerowym o impedancji $\underline{Z}_N$.

W układzie z odbiornikiem połączonym w gwiazdę stosuje się następujące nazwy wielkości:

- Prądy $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$ - nazywa się prądami przewodowymi, natomiast $\underline{I}_{fa}, \underline{I}_{fb}, \underline{I}_{fc}$ - prądami fazowymi, przy czym:

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{fa}, \ \underline{I}_b = \underline{I}_{fb}. \ \underline{I}_c = \underline{I}_{fc} \tag{2.1}$$

- Napięcia $\underline{E}_a, \underline{E}_b. \underline{E}_c$ nazywa się napięciami fazowymi źródła, a $\underline{U}_a, \underline{U}_b. \underline{U}_c$ napięciami fazowymi odbiornika.

- Napięcia $\underline{E}_{ab},\underline{E}_{bc}.\underline{E}_{ca}$ oraz $\underline{U}_{ab},\underline{U}_{bc}.\underline{U}_{ca}$ są to tzw. napięcia międzyfazowe (*dawn. przewodowe*) odpowiednio - źródła i odbiornika. Wynikają one z różnicy napięć fazowych:

$$\underline{E}_{ab}=\underline{E}_a-\underline{E}_b,\quad \underline{E}_{bc}=\underline{E}_b-\underline{E}_c,\quad \underline{E}_{ca}=\underline{E}_c-\underline{E}_a \tag{2.2}$$

$$\underline{U}_{ab}=\underline{U}_a-\underline{U}_b,\quad \underline{U}_{bc}=\underline{U}_b-\underline{U}_c,\quad \underline{U}_{ca}=\underline{U}_c-\underline{U}_a \tag{2.3}$$

Niezależnie od impedancji odbiornika, wskazy napięć międzyfazowych tworzą trójkąt, tzn. ich suma jest zawsze równa zero (oznacza to, że układ napięć międzyfazowych zawiera wyłącznie składowe symetryczne zgodną i przeciwną)

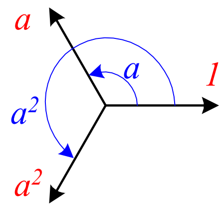
$$\underline{U}_{ab}+\underline{U}_{bc}+\underline{U}_{ca}=0,\quad \underline{E}_{ab}+\underline{E}_{bc}+\underline{E}_{ca}=0 \tag{2.4}$$

Jeżeli impedancje linii zasilających są pomijalnie małe to odpowiednie napięcia międzyfazowe źródła i odbiornika są sobie równe.

W dalszej części niniejszego opracowania zakładać będziemy zgodną kolejność faz źródeł napięcia, czyli:

$$\begin{aligned}\underline{E}_a&=E\,e^{j\psi}\\ \underline{E}_b&=e^{-j\frac{2\pi}{3}}\underline{E}_a=a^{-1}\underline{E}_a=a^2\,\underline{E}_a\\ \underline{E}_c&=e^{j\frac{2\pi}{3}}\underline{E}_a=a\,\underline{E}_a\end{aligned} \tag{2.5}$$

gdzie: $a=e^{j\frac{2\pi}{3}}$ - oznacza – operator obrotu o kąt 120^0



Rys. 2.2

W ogólnym przypadku odbiornika połączonego w gwiazdę wyznaczenie prądów w poszczególnych fazach układu odbywa się w następujący sposób:

1. Wyznaczamy napięcie między punktami neutralnymi odbiornika i źródła.\:

$$\underline{U}_{N'N}=\frac{\underline{Y}_a\underline{E}_a+\underline{Y}_b\underline{E}_b+\underline{Y}_c\underline{E}_c}{\underline{Y}_a+\underline{Y}_b+\underline{Y}_c+\underline{Y}_N} \tag{2.6}$$

2. Wykorzystując (2.6) obliczamy napięcia fazowe odbiornika:

$$\underline{U}_a=\underline{E}_a-\underline{U}_{N'N},\quad \underline{U}_b=\underline{E}_b-\underline{U}_{N'N},\quad \underline{U}_c=\underline{E}_c-\underline{U}_{N'N} \tag{2.7}$$

3. Przy założeniu, że odbiornik nie zawiera sprzężeń magnetycznych, wyznaczmy prądy w fazach odbiornika oraz w przewodzie zerowym:

$$\underline{I}_{fa}=\frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a+\underline{Z}_{La}},\quad \underline{I}_{fb}=\frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b+\underline{Z}_{Lb}},\quad \underline{I}_{fc}=\frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c+\underline{Z}_{Lc}},\quad \underline{I}_N=\frac{\underline{U}_{N'N}}{\underline{Z}_N}=\underline{I}_a+\underline{I}_b+\underline{I}_c \tag{2.8}$$

4. Prądy przewodowe określone są związkami (2.1)

Rozważyć można dwa szczególne przypadki zasilania:

a) $\underline{Z}_N = 0 \quad \underline{Y}_N = \infty$ -

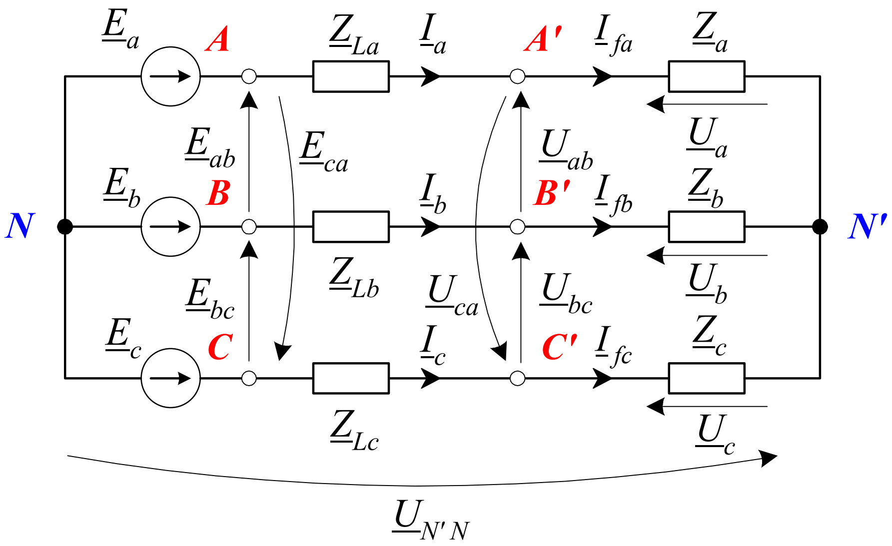
Wówczas dla dowolnych wartości impedancji fazowych (różnych od zera)

$$\underline{U}_{N'N} = 0 \tag{2.9}$$

oraz

$$\underline{U}_a = \underline{E}_a \text{ , } \underline{U}_b = \underline{E}_b \text{ , } \underline{U}_c = \underline{E}_c \tag{2.10}$$

b) $\underline{Y}_N = 0 \quad \underline{Z}_N = \infty$ - jest to zasilanie trójprzewodowe (tzw. odbiornik z izolowanym punktem zerowym) (Rys. 2.3).

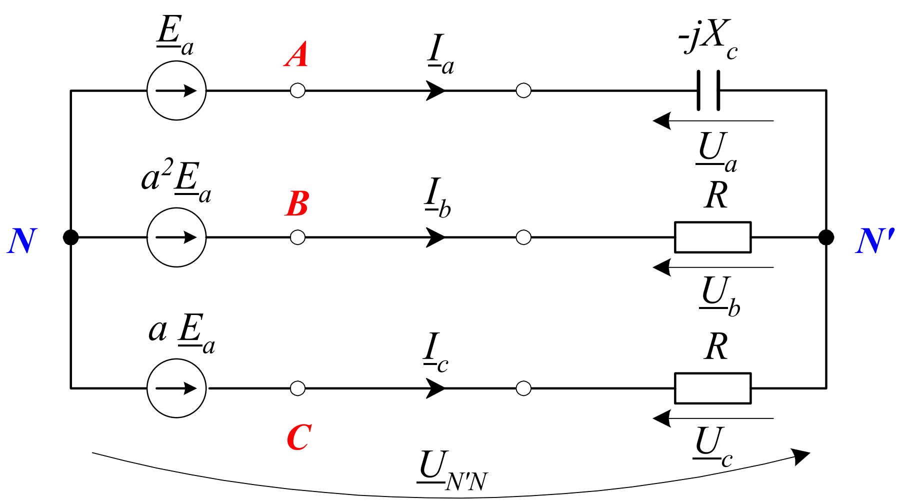


Rys. 2.3

Zachodzi w tym przypadku oczywisty związek

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0 \tag{2.11}$$

Jako ilustrację rozważmy obwód przestawiony na Rys. 2.4. W układzie tym w jednej fazie włączono kondensator, a pozostałych dwóch rezystory. Niech dodatkowo spełniony będzie warunek $X_c = R$. Wykażemy, że układ ten można wykorzystać do kontroli kolejności faz, poprzez pomiar napięć w fazach zawierających rezystory.



Rys. 2.4

Uwzględniając w zależności (2.6) zgodną kolejność faz wg (2.5) obliczamy napięcie $\underline{U}_{N'N}$

$$\underline{U}_{N'N} = \frac{\frac{1}{-jX_c}\underline{E}_a + \frac{1}{R}\underline{E}_b + \frac{1}{R}\underline{E}_c}{\frac{1}{-jX_c} + \frac{2}{R}} \overset{R=X_c}{=} \frac{j\underline{E}_a + \underline{E}_b + \underline{E}_c}{2+j} = \frac{-1+j}{2+j}\underline{E}_a \tag{2.12}$$

Stąd na podstawie (2.7), wartości zespolone napięć fazowych $\underline{U}_b$ i $\underline{U}_c$ wynoszą

$$\begin{aligned} \underline{U}_b &= \underline{E}_b - \underline{U}_{N'N} = a^2\underline{E}_a - \frac{-1+j}{2+j}\underline{E}_a = \left(a^2 - \frac{-1+j}{2+j}\right)\underline{E}_a \\ \underline{U}_c &= \underline{E}_c - \underline{U}_{N'N} = a\underline{E}_a - \frac{-1+j}{2+j}\underline{E}_a = \left(a - \frac{-1+j}{2+j}\right)\underline{E}_a \end{aligned} \tag{2.13}$$

Po kilku prostych działaniach

$$a^2 = -\tfrac{1}{2} - j\tfrac{\sqrt{3}}{2}, \quad a = -\tfrac{1}{2} + j\tfrac{\sqrt{3}}{2} \qquad\qquad \frac{-1+j}{2+j} = \frac{(-1+j)(2-j)}{5} = \frac{-1+3j}{5} = -\tfrac{1}{5} + j\tfrac{3}{5}$$

$$\left|a^2 - \frac{-1+j}{2+j}\right| = \left|-\tfrac{1}{2} - j\tfrac{\sqrt{3}}{2} - \left(-\tfrac{1}{5} + j\tfrac{3}{5}\right)\right| = \left|-\tfrac{1}{2} + \tfrac{1}{5} - j\left(\tfrac{\sqrt{3}}{2} + \tfrac{3}{5}\right)\right| = \tfrac{1}{10}\left|-3 - j\left(5\sqrt{3} + 6\right)\right| \approx 1.5$$

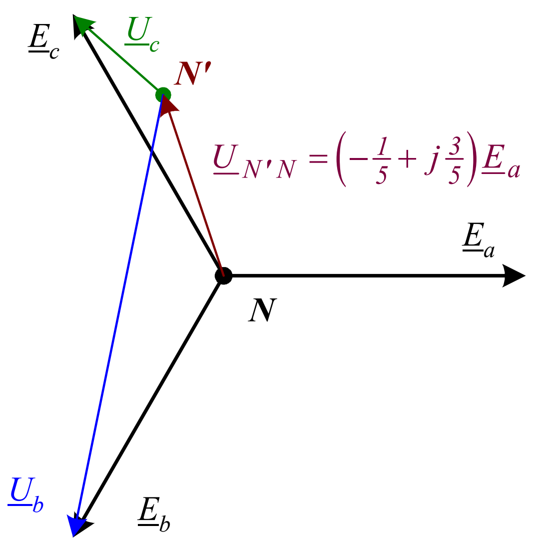
$$\left|a - \frac{-1+j}{2+j}\right| = \left|-\tfrac{1}{2} + j\tfrac{\sqrt{3}}{2} - \left(-\tfrac{1}{5} + j\tfrac{3}{5}\right)\right| = \left|-\tfrac{1}{2} + \tfrac{1}{5} + j\left(\tfrac{\sqrt{3}}{2} - \tfrac{3}{5}\right)\right| = \tfrac{1}{10}\left|-3 + j\left(5\sqrt{3} - 6\right)\right| \approx\sim 0.4$$

otrzymujemy ostatecznie

$$\begin{aligned} U_b &= \left|a^2 - \frac{-1+j}{2+j}\right| E_a \approx 1.5E_a \\ U_c &= \left|a - \frac{-1+j}{2+j}\right| E_a = 0.4E_a \end{aligned} \tag{2.14}$$

Stwierdzamy więc, że napięcie fazowe w fazie opóźnionej względem fazy, w której włączony został kondensator, jest blisko czterokrotnie większe aniżeli w fazie poprzedzającej tę fazę (por. wykres wskazowy Rys. 2.5).

Jeżeli zatem jako rezystory użyjemy żarówek, wówczas łatwo zaobserwujemy różnicę w jasności ich świecenia, odzwierciedlającą różnicę wartości napięć (2.14).

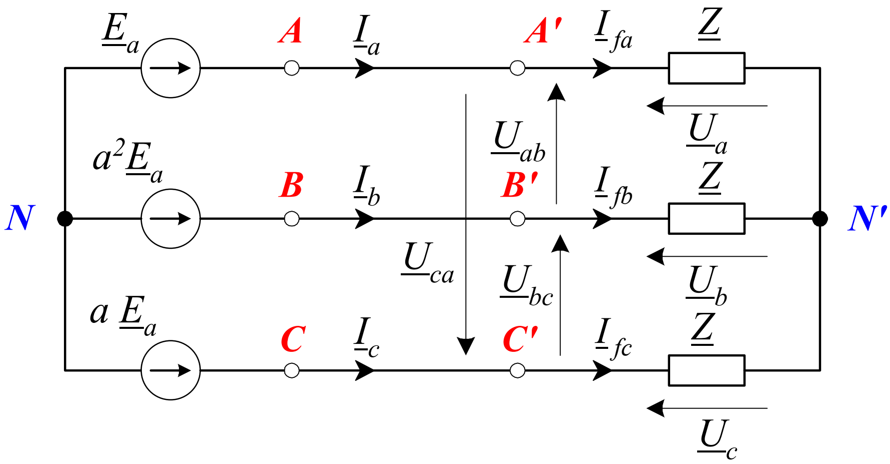


Rys. 2.5

2.2. Układ symetryczny.

W tym przypadku impedancje faz odbiornika są równe i wyrażają się wzorem:

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z} = R + jX = Ze^{j\varphi} \tag{2.15}$$



Rys. 2.6

Ponieważ suma napięć fazowych symetrycznego źródła zgodnego jest równa zeru, tak więc w tym przypadku $\underline{U}_{N`N} = 0$.

$$\underline{U}_{N'N} = \frac{\underline{Y}_a\underline{E}_a + \underline{Y}_b\underline{E}_b + \underline{Y}_c\underline{E}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N} = \frac{\underline{Y}\left(\underline{E}_a + \underline{E}_b + \underline{E}_c\right)}{3\underline{Y}} = 0 \tag{2.16}$$

gdzie: $\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}$

Uwzględniając dodatkowo (2.7) stwierdzamy, że napięcia fazowe odbiornika (przy pominięciu impedancji przewodów zasilających) wynoszą odpowiednio:

$$\underline{U}_a = \underline{E}_a\ , \quad \underline{U}_b = \underline{E}_b\ , \quad \underline{U}_c = \underline{E}_c \tag{2.17}$$

Stąd obliczamy prądy poszczególnych faz :

$$\begin{aligned}
\underline{I}_a &= \frac{\underline{E}_a}{\underline{Z}} = \frac{E}{Z}e^{j(\psi-\varphi)} \\
\underline{I}_b &= \frac{\underline{E}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{E}{Z}a^2e^{j(\psi-\varphi)} = a^2\underline{I}_a\ , \\
\underline{I}_c &= \frac{\underline{E}_b}{\underline{Z}_c} = \frac{E}{Z}a\,e^{j(\psi-\varphi)} = a\,\underline{I}_a
\end{aligned} \tag{2.18}$$

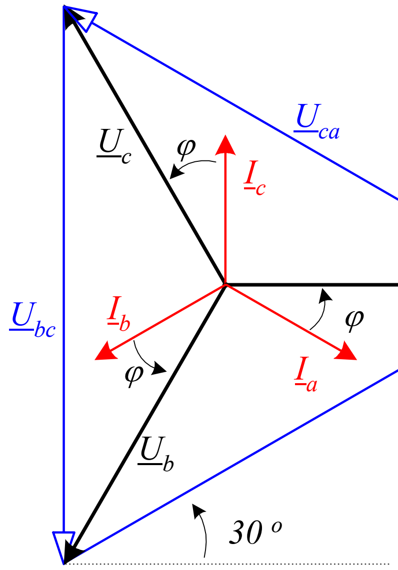
Uwzględniając (2.17) obliczamy napięcia międzyfazowe :

$$\begin{aligned}
\underline{U}_{ab} &= \underline{U}_a - \underline{U}_b = \underline{E}_a - a^2\underline{E}_a = \left(1-a^2\right)\underline{E}_a = \sqrt{3}e^{j30^0}\underline{E}_a \\
\underline{U}_{bc} &= \underline{U}_b - \underline{U}_c = a^2\underline{E}_a - a\,\underline{E}_a = \left(a^2-a\right)\underline{E}_a = -j\sqrt{3}\underline{E}_a \\
\underline{U}_{ca} &= \underline{U}_c - \underline{U}_a = a\underline{E}_a - \underline{E}_a = \left(a-1\right)\underline{E}_a = \sqrt{3}e^{j150^0}\underline{E}_a
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Moduły napięć międzyfazowych są zatem jednakowe i równe modułowi napięcia fazowego pomnożonego przez $\sqrt{3}$

$$U = \sqrt{3}\,U_f \tag{2.20}$$

Na Rys. 2.7 przedstawiono przykładowy wykres wskazowy, dla układu symetrycznego z odbiornikiem o charakterze indukcyjnym.

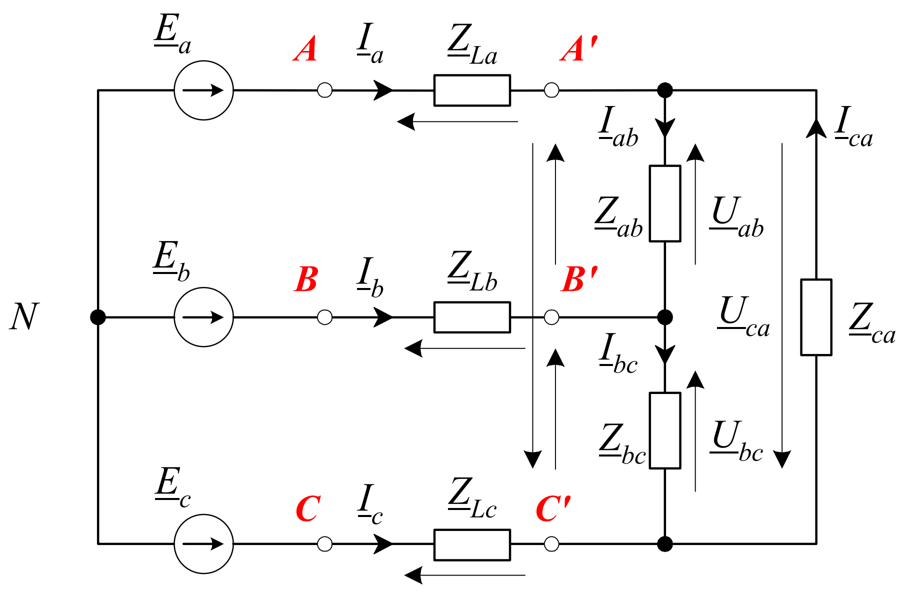


Rys. 2.7

3. Układy trójfazowe z odbiornikiem połączonym w trójkąt.

3.1. Zależności ogólne.

Drugim podstawowym układem odbiornika jest połączenie impedancji fazowych w tzw. trójkąt Rys. 3.1.



Rys. 3.1

Zachodzą w tym przypadku następujące (oczywiste) związki oraz właściwości:

- odbiornik jest zasilany zawsze linią trójprzewodową ,

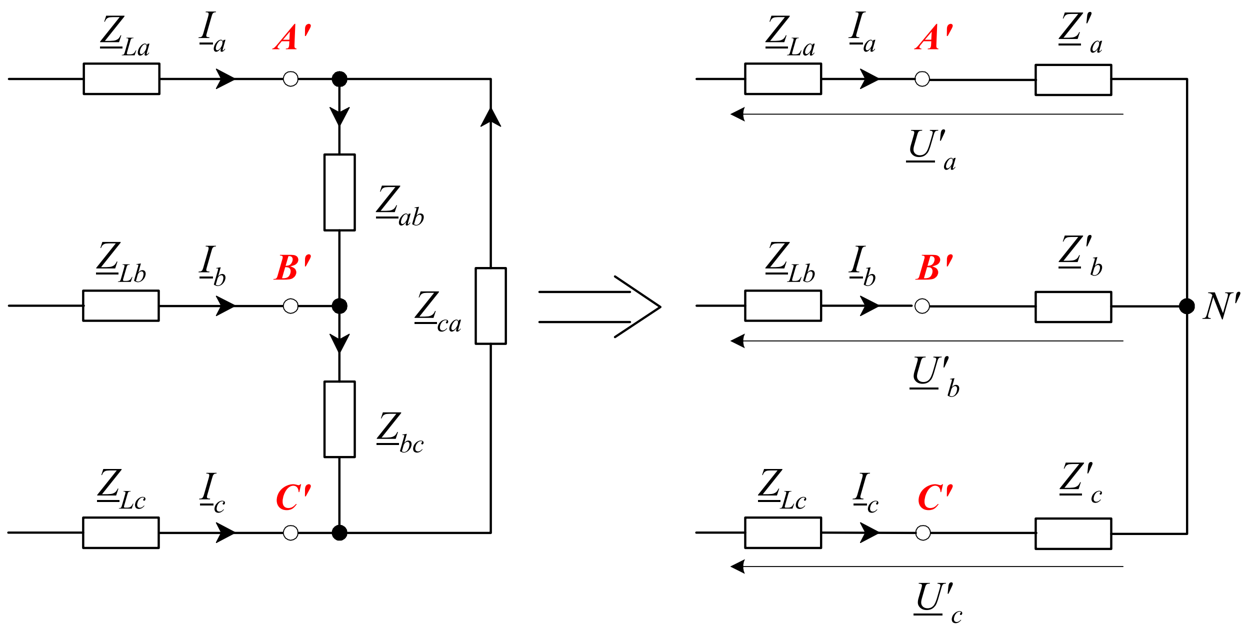
- prądy przewodowe stanowią różnice prądów fazowych

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, \quad \underline{I}_b = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, \quad \underline{I}_c = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} \tag{3.1}$$

- napięcia fazowe odbiornika równe są napięciom międzyfazowym.

Obliczanie prądów w obwodzie może być przeprowadzane w następujący sposób:

1. Zamieniamy trójkąt w równoważną gwiazdę (zal. (3.2))



Rys. 3.2

$$\underline{Z}'_a = \frac{\underline{Z}_{ab}\underline{Z}_{ca}}{\underline{Z}_{ab}+\underline{Z}_{bc}+\underline{Z}_{ca}},\quad \underline{Z}'_b = \frac{\underline{Z}_{bc}\underline{Z}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}+\underline{Z}_{bc}+\underline{Z}_{ca}},\quad \underline{Z}'_c = \frac{\underline{Z}_{ca}\underline{Z}_{bc}}{\underline{Z}_{ab}+\underline{Z}_{bc}+\underline{Z}_{ca}} \tag{3.2}$$

2. Wykorzystując wzór (2.6) obliczamy zastępcze napięcie $\underline{U}_{N'N}$ $(\underline{Y}_N = 0)$

$$\underline{U}_{N'N} = \frac{\underline{Y}_a\underline{E}_a + \underline{Y}_b\underline{E}_b + \underline{Y}_c\underline{E}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c} \tag{3.3}$$

gdzie:

$$\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}'_a + \underline{Z}_{La}},\quad \underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}'_b + \underline{Z}_{Lb}},\quad \underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}'_c + \underline{Z}_{Lc}} \tag{3.4}$$

3. Prądy w fazach zastępczej gwiazdy odpowiadają prądom przewodowym układu z Rys. 3.1

$$\underline{I}_a = \underline{Y}_a\underline{U}'_a,\quad \underline{I}_b = \underline{Y}_b\underline{U}'_b,\quad \underline{I}_c = \underline{Y}_c\underline{U}'_c \tag{3.5}$$

gdzie:

$$\underline{U}'_a = \underline{E}_a - \underline{U}_{N'N},\quad \underline{U}'_b = \underline{E}_b - \underline{U}_{N'N},\quad \underline{U}'_c = \underline{E}_c - \underline{U}_{N'N} \tag{3.6}$$

4. Z odpowiednich "oczek" wyznaczamy napięcia fazowe odbiornika:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{ab} &= \underline{E}_a - \underline{E}_b + \underline{Z}_{Lb}\underline{I}_b - \underline{Z}_{La}\underline{I}_a\\ \underline{U}_{bc} &= \underline{E}_b - \underline{E}_c + \underline{Z}_{Lc}\underline{I}_c - \underline{Z}_{Lb}\underline{I}_b\\ \underline{U}_{ca} &= \underline{E}_c - \underline{E}_a + \underline{Z}_{La}\underline{I}_a - \underline{Z}_{Lc}\underline{I}_c\end{aligned} \tag{3.7}$$

5. Ostatecznie prądy fazowe wynoszą

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}},\quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}},\quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} \tag{3.8}$$

Jeżeli impedancje linii są równe zero, wówczas kolejność wyznaczania prądów ulega zmianie.
Bezpośrednio na podstawie napięć źródłowych obliczamy napięcia fazowe

$$\begin{aligned} \underline{U}_{ab} &= \underline{E}_{ab} = \underline{E}_a - \underline{E}_b \\ \underline{U}_{bc} &= \underline{E}_{bc} = \underline{E}_b - \underline{E}_c \\ \underline{U}_{ca} &= \underline{E}_{ca} = \underline{E}_c - \underline{E}_a \end{aligned} \tag{3.9}$$

Następnie wg (3.8) wyznaczamy prądy fazowe, na podstawie których (stosując (3.1)) otrzymujemy prądy przewodowe.

Uwaga.

Należy zaznaczyć, że o ile zawsze jest spełniony warunek $\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0$, to niekoniecznie musi zachodzić $\underline{I}_{ab} + \underline{I}_{bc} + \underline{I}_{ca} = 0$.

Podobnie w przypadku gwiazdy - dla napięć międzyfazowych zawsze obowiązuje $\underline{U}_{ab} + \underline{U}_{bc} + \underline{U}_{ca} = 0$, natomiast nie musi być $\underline{U}_a + \underline{U}_b + \underline{U}_c = 0$.

Z powyższej uwagi wynikają następujące wnioski dla odbiorników niesymetrycznych:

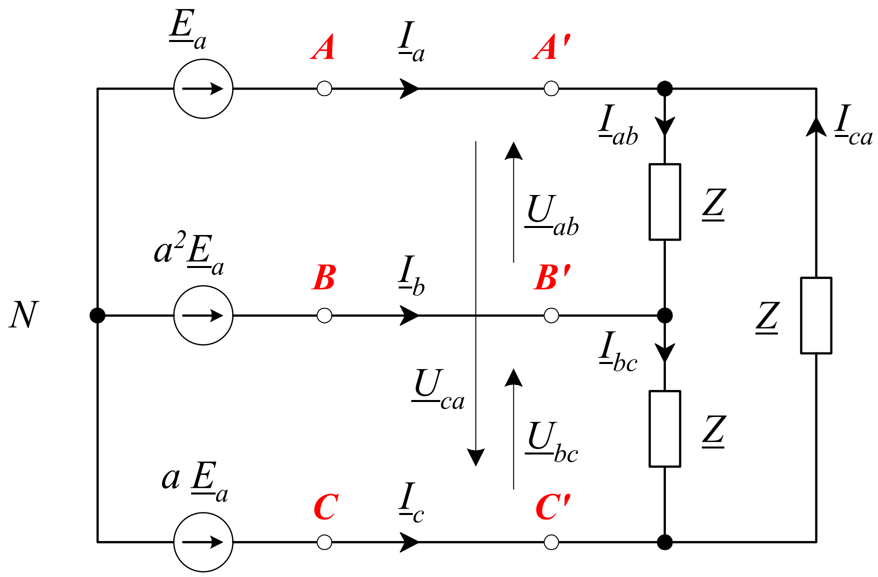
W przypadku gwiazdy, ogólnie nie można na podstawie napięć międzyfazowych "odtworzyć" napięć fazowych, natomiast dla trójkąta - prądów fazowych na podstawie prądów przewodowych.

3.2. Układ symetryczny.

Jeżeli układ odbiorczy jest symetryczny, tzn. gdy impedancje fazowe są sobie równe Rys. 3.3,

$$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z} = Z\, e^{j\varphi} \tag{3.10}$$

to ze względu na równość modułów napięć źródłowych, prądy w fazach odbiornika oraz prądy przewodowe również będą posiadać jednakowe moduły, a wskazy tych wielkości tworzyć będą odpowiedni układ symetryczny, o kolejności takiej jak źródło.



Rys. 3.3

Przyjmując zerową impedancję linii oraz symetryczne – zgodne zasilanie - możemy napisać:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{ab} &= \underline{E}_{ab} = \underline{E}_a - \underline{E}_b = \sqrt{3}\, e^{j30^0}\, \underline{E}_a = \sqrt{3} E\, e^{j\left(\psi+30^o\right)} = U e^{j\left(\psi+30^o\right)} \\ \underline{U}_{bc} &= \underline{E}_{bc} = \underline{E}_b - \underline{E}_c = -j\sqrt{3}\,\underline{E}_a = a^2 \underline{U}_{ab} = \sqrt{3} E\, e^{j\left(\psi-90^o\right)} = U e^{j\left(\psi-90^o\right)} \\ \underline{U}_{ca} &= \underline{E}_{ca} = \underline{E}_c - \underline{E}_a = \sqrt{3}\, e^{j150^0}\, \underline{E}_a = a\,\underline{U}_{ab} = \sqrt{3} E\, e^{j\left(\psi+150^o\right)} = U e^{j\left(\psi+150^o\right)} \end{aligned} \tag{3.11}$$

gdzie: $\underline{E}_a = E\, e^{j\psi}$

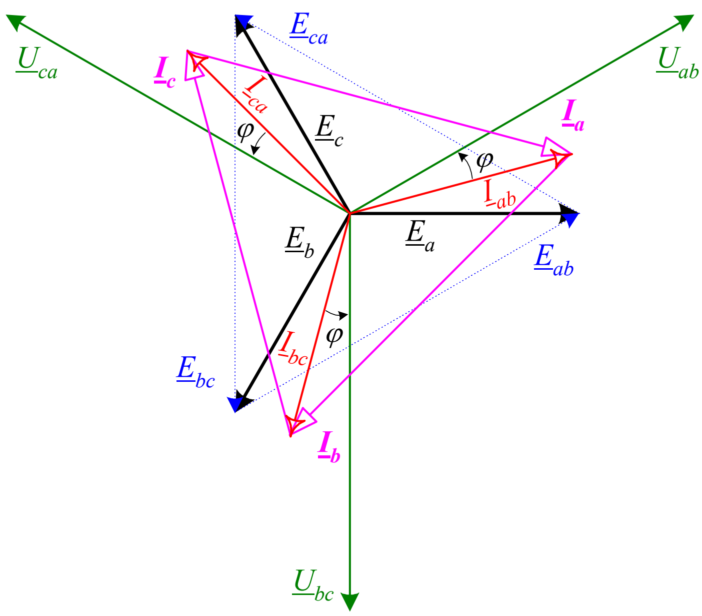
$$\begin{aligned} \underline{I}_{ab} &= \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}} = \sqrt{3}\,\frac{E}{Z}\, e^{j\left(30^o+\psi-\varphi\right)} \\ \underline{I}_{bc} &= \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}} = a^2\, \underline{I}_{ab} = \sqrt{3}\,\frac{E}{Z}\, e^{j\left(\psi-90^o-\varphi\right)} \\ \underline{I}_{ca} &= \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}} = a\, \underline{I}_{ab} = \sqrt{3}\,\frac{E}{Z}\, e^{j\left(\psi+150^o-\varphi\right)} \end{aligned} \tag{3.12}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = (1-a)\,\underline{I}_{ab} = \sqrt{3}\,\underline{I}_{ab}\, e^{-j30^o} = 3\frac{E}{Z} e^{j(\psi-\varphi)} \\ \underline{I}_b &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = \left(a^2-1\right)\underline{I}_{ab} = \sqrt{3}\,\underline{I}_{ab}\, e^{-j150^o} = 3\frac{E}{Z} e^{j\left(\psi-120^o-\varphi\right)} = a^2\, \underline{I}_a \\ \underline{I}_c &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = \left(a-a^2\right)\underline{I}_{ab} = \sqrt{3}\,\underline{I}_{ab}\, e^{j90^o} = 3\frac{E}{Z} e^{j\left(\psi+120^o-\varphi\right)} = a\, \underline{I}_a \end{aligned} \tag{3.13}$$

Z ostatnich zależności możemy stwierdzić, że w układzie symetrycznym z odbiornikiem połączonym w trójkąt, moduły prądów przewodowych są $\sqrt{3}$ razy większe od modułów prądów fazowych odbiornika.

$$I = \sqrt{3} I_f \tag{3.14}$$

Przykładowy wykres wskazowy, uwzględniający wszystkie powyższe zależności, dla odbiornika o charakterze indukcyjnym ($\varphi = 15^o$), przedstawiono na Rys. 3.4.



Rys. 3.4

4. Moc w układach trójfazowych

4.1. Zależności ogólne

Moc czynna pobierana przez odbiornik trójfazowy równa się sumie mocy dostarczonej do poszczególnych faz układu. Dla odbiornika niesymetrycznego można zapisać ją następująco:

Dla gwiazdy:
$$\begin{aligned} P &= P_a + P_b + P_c = \boldsymbol{Re}\,\underline{U}_a \underline{I}_a^* + \boldsymbol{Re}\,\underline{U}_b \underline{I}_b^* + \boldsymbol{Re}\,\underline{U}_c \underline{I}_c^* = \\ &= U_a I_a \boldsymbol{cos}\,\varphi_a + U_b I_b \boldsymbol{cos}\,\varphi_b + U_c I_c \boldsymbol{cos}\,\varphi_c \end{aligned} \tag{3.15}$$

Dla trójkąta:
$$\begin{aligned} P &= P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = \boldsymbol{Re}\,\underline{U}_{ab} \underline{I}_{ab}^* + \boldsymbol{Re}\,\underline{U}_{bc} \underline{I}_{bc}^* + \boldsymbol{Re}\,\underline{U}_{ca} \underline{I}_{ca}^* = \\ &= U_{ab} I_{ab} \boldsymbol{cos}\,\varphi_{ab} + U_{bc} I_{bc} \boldsymbol{cos}\,\varphi_{bc} + U_{ca} I_{ca} \boldsymbol{cos}\,\varphi_{ca} \end{aligned} \tag{3.16}$$

Analogiczna sytuacja zachodzi w przypadku mocy biernej oraz pozornej

$$\begin{aligned} Q &= Q_a + Q_b + Q_c = \boldsymbol{Im}\,\underline{U}_a \underline{I}_a^* + \boldsymbol{Im}\,\underline{U}_b \underline{I}_b^* + \boldsymbol{Im}\,\underline{U}_c \underline{I}_c^* = \\ &= U_a I_a \boldsymbol{sin}\,\varphi_a + U_b I_b \boldsymbol{sin}\,\varphi_b + U_c I_c \boldsymbol{sin}\,\varphi_c \end{aligned} \tag{3.17}$$

$$\begin{aligned} Q &= Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca} = \boldsymbol{Im}\,\underline{U}_{ab} \underline{I}_{ab}^* + \boldsymbol{Im}\,\underline{U}_{bc} \underline{I}_{bc}^* + \boldsymbol{Im}\,\underline{U}_{ca} \underline{I}_{ca}^* = \\ &= U_{ab} I_{ab} \boldsymbol{sin}\,\varphi_{ab} + U_{bc} I_{bc} \boldsymbol{sin}\,\varphi_{bc} + U_{ca} I_{ca} \boldsymbol{sin}\,\varphi_{ca} \end{aligned} \tag{3.18}$$

$$\underline{S} = P + jQ = \underline{S}_a + \underline{S}_b + \underline{S}_c = \underline{U}_a \underline{I}_a^* + \underline{U}_b \underline{I}_b^* + \underline{U}_c \underline{I}_c^* = U_a I_a e^{j\varphi_a} + U_b I_b e^{j\varphi_b} + U_c I_c e^{j\varphi_c} \tag{3.19}$$

$$\begin{aligned} \underline{S} &= P + jQ = \underline{S}_{ab} + \underline{S}_{bc} + \underline{S}_{ca} = \underline{U}_{ab} \underline{I}_{ab}^* + \underline{U}_{bc} \underline{I}_b^* c + \underline{U}_{ca} \underline{I}_{ca}^* = \\ &= U_{ab} I_{ab} e^{j\varphi_{ab}} + U_{bc} I_{bc} e^{j\varphi_{bc}} + U_{ca} I_{ca} e^{j\varphi_{ca}} \end{aligned} \tag{3.20}$$

W przypadku odbiornika symetrycznego równość modułów napięć oraz prądów fazowych pozwala na stosowanie uproszczonych zależności

$$\begin{aligned} P &= 3P_f = 3U_f I_f \boldsymbol{cos}\,\varphi = 3R I_f^2 \\ Q &= 3Q_f = 3U_f I_f \boldsymbol{sin}\,\varphi = 3X I_f^2 \\ \underline{S} &= 3\underline{S}_f = 3U_f I_f e^{j\varphi} = 3\underline{Z} I_f^2 \end{aligned} \tag{3.21}$$

Po dodatkowym uwzględnieniu związków między napięciami fazowymi i międzyfazowymi dla odbiornika połączonego w gwiazdę oraz prądami fazowymi i przewodowymi w przypadku odbiornika połączonego w trójkąt otrzymujemy uniwersalne wzory na poszczególne moce, wyrażone wyłącznie za pomocą napięcia międzyfazowego i prądu przewodowego.

- Dla gwiazdy:

$$U = \sqrt{3} U_f , \quad I = I_f \tag{3.22}$$

- Dla trójkąta:

$$I = \sqrt{3} I_f , \quad U = U_f \tag{3.23}$$

A zatem zależności (3.21) przyjmują postać

$$\begin{gathered} P = 3U_f I_f \boldsymbol{cos}\,\varphi = \underbrace{3 \tfrac{U}{\sqrt{3}} I \boldsymbol{cos}\,\varphi}_{dla\ gwiazdy} = \underbrace{3U \tfrac{I}{\sqrt{3}} \boldsymbol{cos}\,\varphi}_{dla\ trójkąta} = \sqrt{3}\, U I \boldsymbol{cos}\,\varphi \\ Q = \sqrt{3}\, U I \boldsymbol{sin}\,\varphi , \qquad \underline{S} = \sqrt{3}\, U I e^{j\varphi} \end{gathered} \tag{3.24}$$

4.2. Wybrane układy do pomiaru mocy.

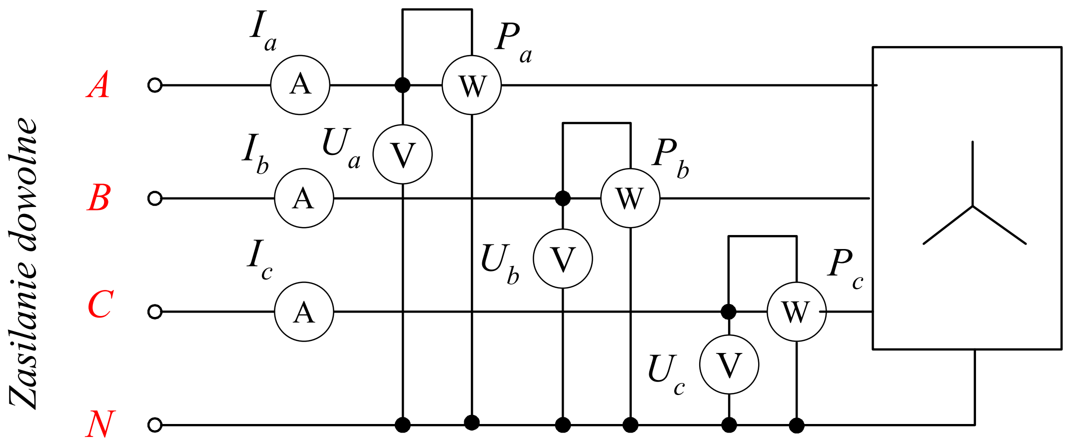
4.2.1. Pomiar mocy w układzie czteroprzewodowym.

a) Zasilanie dowolne, odbiornik niesymetryczny połączony w gwiazdę.

$$P = P_a + P_b + P_c \tag{4.1}$$

$$S = U_a I_a + U_b I_b + U_c I_c \tag{4.2}$$

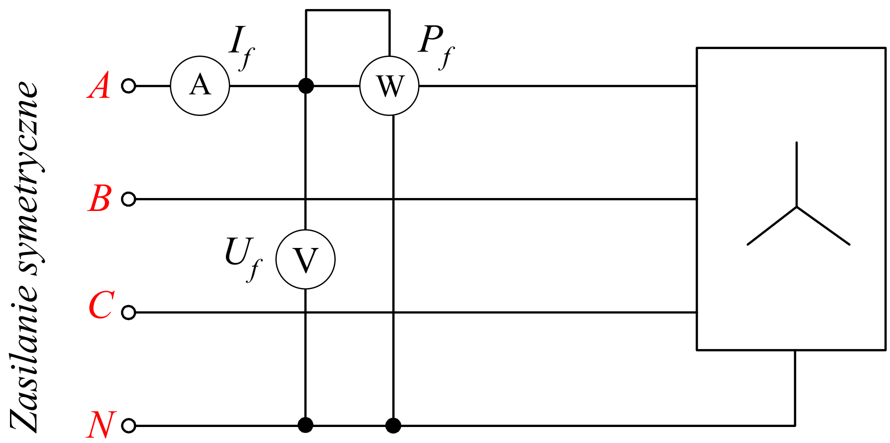
$$Q = \pm\sqrt{S^2 - P^2} \tag{4.3}$$



Rys. 4.1 Układ do pomiaru mocy za pomocą trzech watomierzy

b) Zasilanie symetryczne, odbiornik symetryczny połączony w gwiazdę, z punktem neutralnym.

$$P = 3P_f, \quad S = 3U_f I_f, \quad Q = \pm\sqrt{S^2 - P^2} \tag{4.4}$$

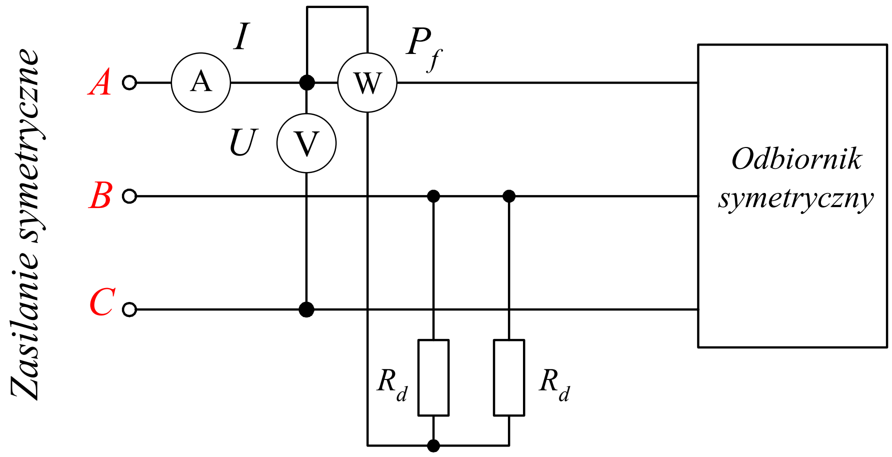


Rys. 4.2 Układ do pomiaru mocy za pomocą jednego watomierza

4.2.2. Pomiar mocy w układach trójprzewodowych

a) Zasilanie symetryczne, odbiornik symetryczny – dowolne połączenie odbiornika.

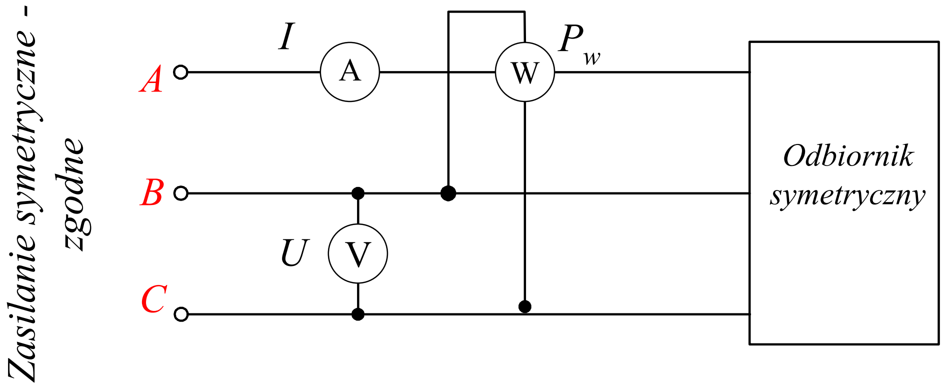
$$P = 3P_f\,,\quad S = \sqrt{3}U\,I\,,\quad Q = \pm\sqrt{S^2 - P^2} \tag{4.5}$$



Rys. 4.3 Układ z tzw. sztucznym punktem zerowym.

b) Układ do bezpośredniego pomiaru mocy biernej.

$$Q = \sqrt{3}P_w \tag{4.6}$$



Rys. 4.4

Wzór (4.6) wykażemy dla przypadku odbiornika połączonego w gwiazdę

$$\begin{aligned} P_w &= \boldsymbol{Re}\,\underline{U}_w\underline{I}_w^* = \boldsymbol{Re}\,\underline{U}_{bc}\underline{I}_a^* = \boldsymbol{Re}\left\{-j\sqrt{3}\underline{U}_a\underline{I}_a^*\right\} = -\sqrt{3}\,\boldsymbol{Re}\left\{jU_a e^{j\psi_{u_a}} I_a e^{-j\psi_{i_a}}\right\} = \\ &= -\sqrt{3}U_a I_a\,\boldsymbol{Re}\left\{je^{j\left(\psi_{u_a}-\psi_{i_a}\right)}\right\} = -\sqrt{3}U_a I_a\,\boldsymbol{Re}\left\{je^{j\varphi}\right\} = -\sqrt{3}U_a I_a\,\boldsymbol{Re}\left\{je^{j\varphi}\right\} = \\ &= -\sqrt{3}U_a I_a\,\boldsymbol{Re}\left\{j\left(\boldsymbol{cos}\,\varphi + j\,\boldsymbol{sin}\,\varphi\right)\right\} = -\sqrt{3}U_a I_a\,\boldsymbol{Re}\left\{j\,\boldsymbol{cos}\,\varphi - \boldsymbol{sin}\,\varphi\right\} = \sqrt{3}U_a I_a\,\boldsymbol{sin}\,\varphi \end{aligned} \tag{4.7}$$

A zatem

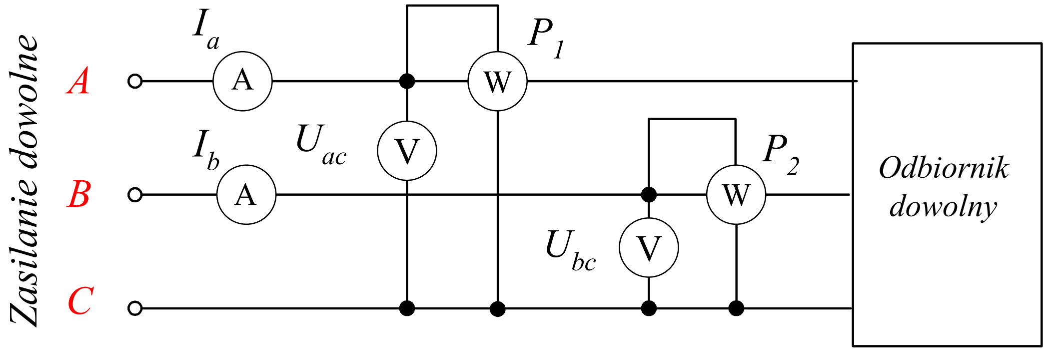
$$P_w = \sqrt{3}Q_f = \sqrt{3}\,\frac{Q}{3} = \frac{Q}{\sqrt{3}} \tag{4.8}$$

Stąd otrzymujemy (4.6).

c) Zasilanie dowolne, odbiornik symetryczny lub niesymetryczny, połączenie odbiornika dowolne.

Niniejsza metoda jest podstawową metodą pomiaru mocy czynnej w układach trójfazowych zasilanych linią trójprzewodową. Nazywa się ona **metodą Arona** lub metodą dwóch watomierzy (Rys. 4.5).

Jedynym warunkiem stosowania tej metody jest zasilanie trójprzewodowe, tzn. $\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0$.



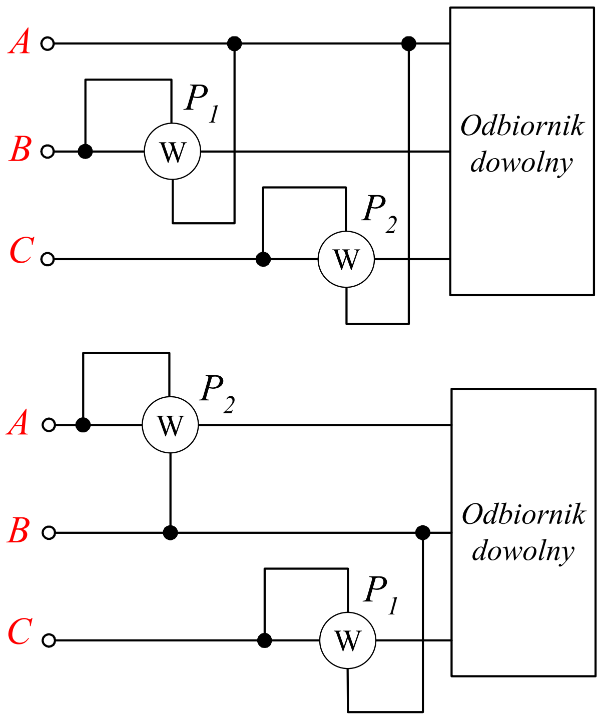
Rys. 4.5 Układ podstawowy metody Arona

Według tej metody moc czynna pobierana przez układ równa jest sumie wskazań obu watomierzy.

$$P = P_1 + P_2 \tag{4.9}$$

Jeżeli jeden z watomierzy "próbuje " wychylić się w niewłaściwą stronę, to należy zamienić kolejność dowolnych zacisków prądowych bądź napięciowych tego watomierza, a jego wskazanie uwzględnić w sumie (4.9) ze znakiem "minus".

Poniżej na Rys. 4.6 przedstawiono inne - równoważne sposoby włączania watomierzy.



Rys. 4.6 Równoważne sposoby włączania watomierzy w metodzie Arona.

Wzór (4.9) udowodnimy zakładając, że odbiornik połączony jest w gwiazdę:

$$\begin{aligned} P_1+P_2 &= \mathbf{Re}\left\{\underline{U}_{ac}\underline{I}_a^*\right\}+\mathbf{Re}\left\{\underline{U}_{bc}\underline{I}_b^*\right\}=\mathbf{Re}\left\{\left(\underline{U}_a-\underline{U}_c\right)\underline{I}_a^*+\left(\underline{U}_b-\underline{U}_c\right)\underline{I}_b^*\right\}= \\ &= \mathbf{Re}\left\{\underline{U}_a\underline{I}_a^*+\underline{U}_b\underline{I}_b^*-\underline{U}_c\left(\underline{I}_a^*+\underline{I}_b^*\right)\right\}=\mathbf{Re}\left\{\underline{U}_a\underline{I}_a^*+\underline{U}_b\underline{I}_b^*-\underline{U}_c\left(-\underline{I}_c^*\right)\right\}= \\ &= \mathbf{Re}\left\{\underline{U}_a\underline{I}_a^*+\underline{U}_b\underline{I}_b^*+\underline{U}_c\underline{I}_c^*\right\}=P_a+P_b+P_c=P \end{aligned} \tag{4.10}$$

Jeżeli układ jest symetryczny, to za pomocą metody dwóch watomierzy można mierzyć również moc bierną. Przyjmując tak jak poprzednio, że odbiornik połączony jest w gwiazdę, a zasilanie jest symetryczne – zgodne, obliczymy różnicę wskazań watomierzy

$$\begin{aligned} P_1-P_2 &= \mathbf{Re}\left\{\underline{U}_{ac}\underline{I}_a^*\right\}-\mathbf{Re}\left\{\underline{U}_{bc}\underline{I}_b^*\right\}=\mathbf{Re}\left\{(1-a)\underline{U}_a\underline{I}_a^*-\left(a^2-a\right)\underline{U}_a\left(a^2\underline{I}_a\right)^*\right\}= \\ &= \mathbf{Re}\left\{(1-a)\underline{U}_a\underline{I}_a^*-\left(a^2-a\right)\underline{U}_a a\underline{I}_a^*\right\}=\mathbf{Re}\left\{(1-a)\underline{U}_a\underline{I}_a^*-\left(1-a^2\right)\underline{U}_a\underline{I}_a^*\right\}= \\ &= \mathbf{Re}\left\{\left(a^2-a\right)\underline{U}_a\underline{I}_a^*\right\}=\mathbf{Re}\left\{-j\sqrt{3}\,U_aI_ae^{j\left(\psi_{u_a}-\psi_{i_a}\right)}\right\}=\sqrt{3}U_aI_a\,\mathbf{Re}\left\{-je^{j\varphi}\right\}= \\ &= \sqrt{3}U_aI_a\,\mathbf{Re}\left\{-j\left(\mathbf{cos}\,\varphi+j\,\mathbf{sin}\,\varphi\right)\right\}=\sqrt{3}U_aI_a\,\mathbf{sin}\,\varphi=\sqrt{3}Q_a=\sqrt{3}Q_f=\tfrac{1}{\sqrt{3}}Q \end{aligned} \tag{4.11}$$

Stąd, ostatecznie całkowita moc bierna odbiornika symetrycznego wynosi

$$Q=\sqrt{3}\left(P_1-P_2\right) \tag{4.12}$$

Dla odbiornika symetrycznego można bezpośrednio wyrazić wskazania watomierzy w funkcji argumentu impedancji. Zależności te pozwolą określić zakres kąta fazowego, przy których wskazania poszczególnych watomierzy będą ujemne.

Zapiszmy wskazania watomierzy w nieco innej postaci:

$$P_1=\mathbf{Re}\left\{\underline{U}_{ac}\underline{I}_a^*\right\}=U_{ac}I_a\,\mathbf{cos}\,\varphi_1,\qquad P_2=\mathbf{Re}\left\{\underline{U}_{bc}\underline{I}_b^*\right\}=U_{bc}I_b\,\mathbf{cos}\,\varphi_2 \tag{4.13}$$

Na podstawie wcześniejszych rozważań :

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \psi_{u_{ac}}-\psi_{i_a}=\psi_{u_a}-30^o-\psi_{i_a}=\varphi-30^o \\ \varphi_2 &= \psi_{u_{bc}}-\psi_{i_b}=\psi_{u_b}+30^o-\psi_{i_b}=\varphi+30^o \end{aligned} \tag{4.14}$$

$$U_{ac}=U_{bc}=U=\sqrt{3}U_f,\qquad I_a=I_b=I_f$$

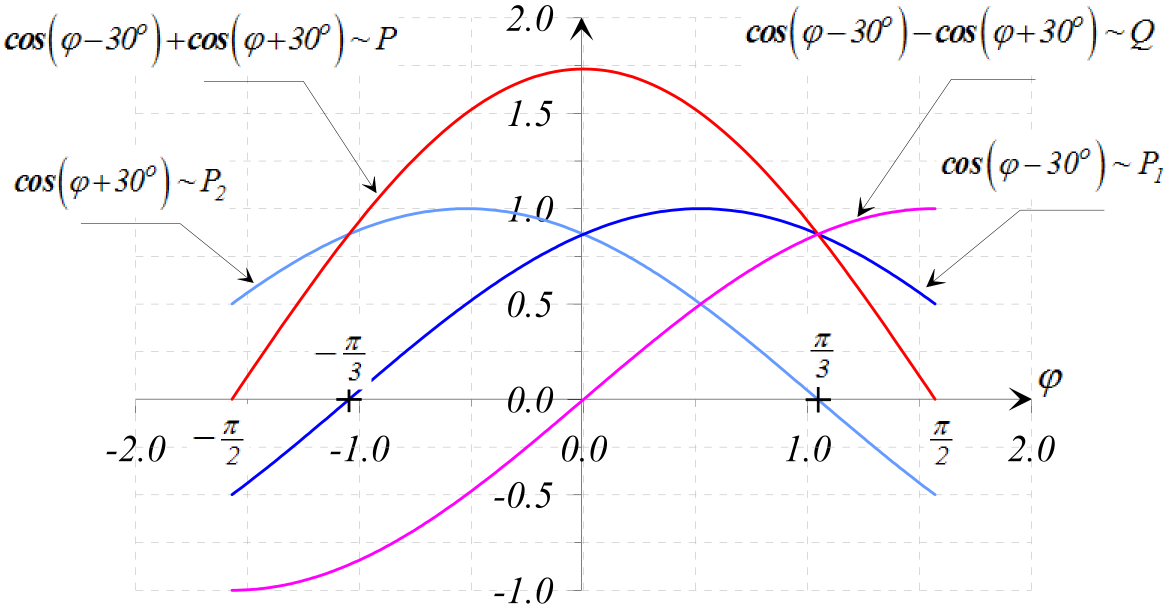
Stąd otrzymujemy

$$P_1=\sqrt{3}U_fI_f\,\mathbf{cos}\left(\varphi-30^o\right),\qquad P_2=\sqrt{3}U_fI_f\,\mathbf{cos}\left(\varphi+30^o\right) \tag{4.15}$$

Uwzględniając zatem zależność (4.15) w (4.9) i (4.12) można napisać

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3}U_fI_f\left[\mathbf{cos}\left(\varphi-30^o\right)+\mathbf{cos}\left(\varphi+30^o\right)\right] \\ Q &= 3U_fI_f\left[\mathbf{cos}\left(\varphi-30^o\right)-\mathbf{cos}\left(\varphi+30^o\right)\right] \end{aligned} \tag{4.16}$$

Wyznaczone zależności zostały zilustrowane na poniższym wykresie



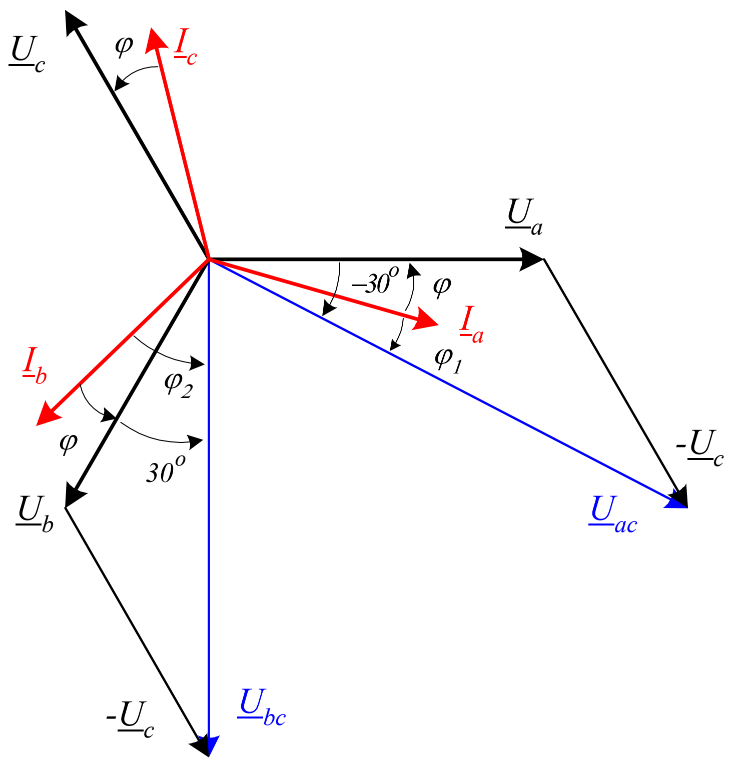
Rys. 4.7 Wykresy zależności wyrażeń odpowiadających wskazaniom poszczególnych watomierzy oraz ich sumie i różnicy

Można zauważyć, że watomierz P_1 będzie wskazywał wartość ujemną dla odbiornika o charakterze pojemnościowym, gdy

$$\varphi_1 = \varphi - 30^o < -90^o \Rightarrow \varphi < -60^o$$

Analogicznie, watomierz P_2 dla odbiornika o charakterze indukcyjnym, jeżeli

$$\varphi_2 = \varphi + 30^o > 90^o \Rightarrow \varphi > 60^o$$

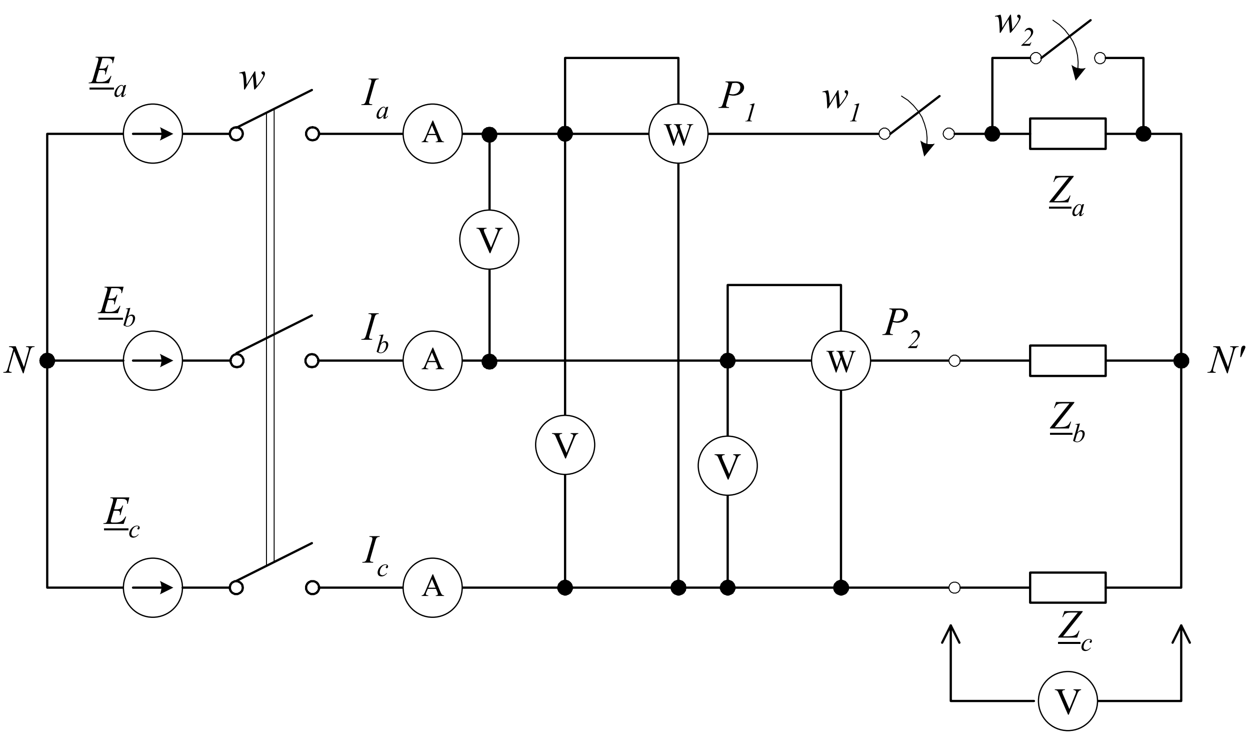


Rys. 4.8 Wykres wskazowy układu trójfazowego - symetrycznego, przy obciążeniu indukcyjnym

5. Opis badanych układów

5.1. Odbiornika połączony w gwiazdę.

Schemat układu pomiarowego jest przedstawiony na Rys. 5.1. Układ jest zasilany z sieci 400/230 V przez autotransformator trójfazowy. Układ odbiorczy stanowią trzy odbiorniki o charakterze rezystancyjnym bądź pojemnościowym połączone w gwiazdę.



Rys. 5.1 Schemat badanego układu trójfazowego z odbiornikiem połączonym w gwiazdę

Badanie układu przeprowadza się dla następujących warunków pracy:

a) Odbiornik symetryczny (klucz w_1 – zamknięty, w_2 – otwarty), $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R$,

b) Nastawienie różnych wartości rezystancji gwiazdy (klucz w_1 – zamknięty, w_2 – otwarty), $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R$, $\underline{Z}_a = \frac{1}{2}R$,

c) Przerwę w jednej z faz układu (klucze w_1 otwarty), $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R$, $\underline{Z}_a = \infty$,

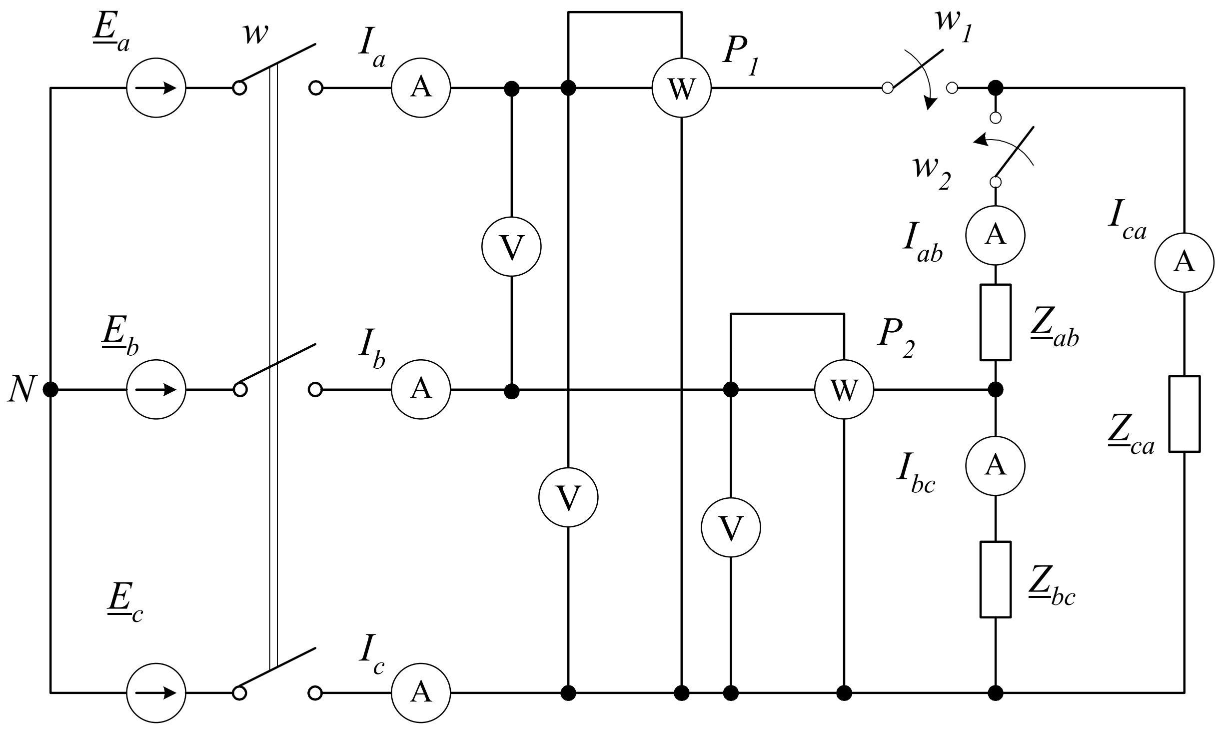
d) Zwarcie jednej fazy odbiornika (klucze w_1 i w_2 – zamknięte), $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R$, $\underline{Z}_a = 0$,

e) Układ niesymetryczny – $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = R$, $\underline{Z}_a = -jX_c$, $X_c = R$ (Rys. 2.4).

Pomiarowi podlegają prądy w przewodach zasilających, moc odbiornika (metoda dwóch watomierzy) i napięcia w różnych częściach układu (fazowe odbiornika, międzyfazowe oraz napięcie między punktami neutralnymi źródła i odbiornika).

5.2. Odbiornik połączony w trójkąt.

Schemat układu jest przedstawiony na Rys. 5.2. Układ odbiorczy stanowią trzy odbiorniki o charakterze rezystancyjnym połączone w trójkąt.



Rys. 5.2 Schemat badanego układu trójfazowego z odbiornikiem połączonym w trójkąt

Niesymetrię układu odbiorczego osiąga się przez:

a) Ustawienie różnych wartości rezystancji trójkąta, np. $\underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = R$, $\underline{Z}_{ab} = \frac{1}{2}R$,

b) Przerwę w jednej z faz układu trójkątowego (klucz w_1 – zamknięty, w_2 – otwarty),

c) Przerwę w przewodzie zasilającym trójkąt (klucz w_1 – otwarty, w_2 – zamknięty).

6. Program ćwiczenia

1. Zmontować układ pomiarowy według schematu na Rys. 5.1.

2. Nastawić na trzech danych rezystorach suwakowych jednakowe wartości rezystancji R według wskazań prowadzącego ćwiczenia. Zmierzyć i zanotować wartości rezystancji.

3. Zamknąć wyłącznik w i zmierzyć kolejno wszystkie napięcia w układzie. Odczytać wskazania amperomierzy i watomierzy. Zmierzone wartości wpisać do tabeli 1a.

4. Wykonać podobne jak w p.6.3 pomiary w przypadkach, gdy:

a) Rezystancja fazy A została zmniejszona do ok. $0.5\ R$,

b) Przerwa w fazie A - klucz w_1 otwarty, w tym przypadku napięcie na odbiorniku tej fazy powinno być zmierzone pomiędzy punktem N' a zaciskiem wyłącznika w_1 po stronie zasilania,

c) Stan zwarcia fazy A odbiornika - klucze w_1 oraz w_2 zamknięte.

5. W miejsce rezystora w fazie A włączyć kondensator, którego reaktancja jest równa jednakowym rezystancjom w fazach B i C. Wykonać pomiary analogicznie jak w p.6.3.

6. Zmontować układ połączeń według schematu na Rys. 5.2.

7. Wykonać pomiary napięć, prądów i mocy:

a) Podczas symetrycznej pracy układu - jednakowe wartości impedancji (rezystancji) odbiornika $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = R$, (klucze w_1 i w_2 zamknięte),

b) Przy przerwie w jednej z gałęzi trójkąta - klucz w_2 otwarty,

c) Przy przerwie w przewodzie zasilającym - klucz w_1 otwarty, w_2 zamknięty,

d) Nastawić różne wartości rezystancji odbiornika: np. $\underline{Z}_{ab} \approx 0.5R$, $\underline{Z}_{bc} \approx 0.75R$, $\underline{Z}_{ca} = R$.

Wyniki pomiarów wpisać do tabeli 2a, według podanego wzoru.

7. Opracowanie sprawozdania

1. Przedstawić krótko przedmiot i zakres badań, schematy układów pomiarowych.

2. Zanotować wartość rezystancji i reaktancji elementów badanego obwodu.

3. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów w punktach 6.3 i 6.4 a-c oraz 6.5 wykonać wykresy wskazowe na płaszczyźnie zespolonej przyjmując symetryczne zasilanie Wyznaczyć wykreślnie położenie topograficzne punktu N' oraz wykreślić napięcia fazowe odbiornika.

4. Dla przyjętego układu symetrycznego napięć fazowych i danych impedancji fazowych odbiorników, dla wszystkich stanów pracy układu, obliczyć wartości zespolone napięcia $\underline{U}_{N`N}$, napięć fazowych i prądów. Wyniki obliczeń wpisać kolejno do wierszy tabeli 1b. Porównać obliczone wartości $\underline{U}_{N`N}$ z wartościami otrzymanymi metodą wykreślną. Porównać obliczone wartości skuteczne prądów z wynikami pomiarów. Nanieść wskazy prądów na wykresy wykonane w p.7.3.

5. Dla przyjętego symetrycznego układu zasilającego napisać wartości zespolone napięć międzyfazowych, na które włączone są cewki napięciowe watomierzy i obliczone wartości zespolone prądów. Obliczyć moce: $\underline{S}_1 = \underline{U}_{ac}\overset{*}{\underline{I}_a}$; $\underline{S}_2 = \underline{U}_{bc}\overset{*}{\underline{I}_b}$ oraz moc czynną $P_{obl} = \boldsymbol{Re}\left(\underline{S}_1 + \underline{S}_2\right)$. Porównać obliczoną wartość P_{obl} z sumą wskazań watomierzy zanotowanych w tabeli 1a. Obliczenia wykonać dla wszystkich stanów pracy układu.

6. Wykonać analogiczne czynności dla układu z odbiornikiem połączonym w trójkąt, dla wszystkich stanów pracy układu. Obliczone wartości wpisywać do tabeli 2b.

8. Pytania kontrolne

1. Przedstawić metodę obliczania prądów w układzie trójfazowym przy symetrycznym układzie odbiorników połączonych w gwiazdę (trójkąt).

2. Przedstawić metodę obliczenia prądów w układzie trójfazowym przy niesymetrycznym układzie odbiorników połączonych w gwiazdę (trójkąt).

3. Jak obliczamy napięcie $\underline{U}_{N`N}$ między punktami neutralnymi układu zasilającego i układu odbiorczego przy połączeniu w gwiazdę ?

4. Jak należy wykonać pomiar napięcia fazowego w fazie, w której występuje przerwa ?

5. Przedstawić sposób obliczenia prądu podczas zwarcia jednej z faz układu trójfazowego, przy połączeniu odbiorników w gwiazdę.

6. Jak można przy danym układzie wskazów napięć zasilających symetrycznych międzyfazowych wyznaczyć potencjał punktu neutralnego N' układu odbiorników niesymetrycznych połączonych w gwiazdę, znając wartości skuteczne ich napięć fazowych ?

7. Narysować układ do pomiaru mocy czynnej w układach trójfazowych metodą dwóch watomierzy .

8. Przedstawić warunki stosowania metody dwóch watomierzy dla układów trójfazowych niesymetrycznych.

9. Udowodnić, że w metodzie dwóch watomierzy moc czynna układu trójfazowego równa się sumie wskazań watomierzy (dla gwiazdy i trójkąta).

10. Dla jakich odbiorników kolejność faz ma podstawowe znaczenie, tak że włączenie napięcia o niewłaściwej kolejności może zakłócić pracę urządzeń.

11. Omówić działanie układu do kontroli kolejności faz. Jak zmieni się procedura wyznaczania kolejności faz jeżeli kondensator zastąpimy cewką indukcyjną (dławikiem) ?

9. LITERATURA

S. Bolkowski: *Teoria obwodów elektrycznych*. WNT, Warszawa 1995.

Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Wypełnioną tabelkę (wzór):

<table>
<tr><td>Politechnika Wrocławska

Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii</td><td>Nazwiska i imiona osób danej grupy ćwiczeniowej
(wykonujących ćwiczenie)</td><td>Rok.

Grupa. (dzień tyg.) n/p

Grupa lab.</td></tr>
<tr><td colspan="3">LABORATORIUM PODSTAW ELEKTROTECHNIKI</td></tr>
<tr><td>Data ćwiczenia:</td><td rowspan="2">Temat:</td><td rowspan="2">Ocena:</td></tr>
<tr><td>Nr ćwiczenia:</td></tr>
</table>

2. Cel ćwiczenia
3. Aktualny schemat pomiarowy badanego układu
4. Tabele pomiarowe
5. Dla każdej z tabel przykład obliczeniowy dla wybranego wiersza tabeli
6. Wykresy wskazowe napięć i prądów
7. Wnioski, uwagi, spostrzeżenia

UWAGA:

Zarówno schemat układu pomiarowego, jak i realizacja poszczególnych punktów ćwiczenia może ulec zmianie na życzenie prowadzącego ćwiczenie.

Wzory Tabel

Pomiary w układzie trójfazowym z odbiornikiem połączonym w gwiazdę.

Tabela 1a – pomiary

układ	$\underline{Z}_a$	$\underline{Z}_b$	$\underline{Z}_c$	E	U_a	U_b	U_c	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	$U_{N'N}$	I_a	I_b	I_c	P_1	P_2	P
	Ω	Ω	Ω	V	V	V	V	V	V	V	V	A	A	A	W	W	W
p.6.3																	
p.6.4a																	
p.6.4b																	
p.6.4c																	
p.6.5																	

Tabela 1b – obliczenia

układ	$\underline{U}_a$	$\underline{U}_b$	$\underline{U}_c$	$\underline{U}_{ab}$	$\underline{U}_{bc}$	$\underline{U}_{ca}$	$\underline{U}_{N'N}$	$\underline{I}_a$	$\underline{I}_b$	$\underline{I}_c$	$\underline{I}_a$	$\underline{I}_b$	$\underline{I}_c$	Q_a	$\underline{S}_1$	$\underline{S}_2$	$\underline{S}$	P_{obl}
	V	V	V	V	V	V	V	A	A	A	A	A	A	VAr	VA	VA	VA	W
p.6.3																		
p.6.4a																		
p.6.4b																		
p.6.4c																		
p.6.5																		

Pomiary w układzie trójfazowym z odbiornikiem połączonym w trójkąt.

Tabela 2a – pomiary

układ	$\underline{Z}_{ab}$	$\underline{Z}_{bc}$	$\underline{Z}_{ca}$	E	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	I_{ab}	I_{bc}	I_{ca}	I_a	I_b	I_c	P_1	P_2	P
	Ω	Ω	Ω	V	V	V	V	A	A	A	A	A	A	W	W	W
p.6.7a																
p.6.7b																
p.6.7c																
p.6.7d																

Tabela 2b – obliczenia

układ	$\underline{U}_{ab}$	$\underline{U}_{bc}$	$\underline{U}_{ca}$	$\underline{I}_{ab}$	$\underline{I}_{bc}$	$\underline{I}_{ca}$	$\underline{I}_a$	$\underline{I}_b$	$\underline{I}_c$	$\underline{S}_1$	$\underline{S}_2$	$\underline{S}$	P_{obl}
	V	V	V	A	A	A	A	A	A	VA	VA	VA	W
p.6.7a													
p.6.7b													
p.6.7c													
p.6.7d													