

1. Cel ćwiczenia

Współczesne techniki pomiaru mocy i energii elektrycznej polegają na wykorzystaniu przyrządów cyfrowych w postaci mikroprocesorowych mierników parametrów sieci elektroenergetycznej lub analizatorów tych sieci o niesinusoidalnych przebiegach czasowych napięć i prądów. Zastosowanie najnowszej aparatury pomiarowej nie zwalnia jednak od znajomości podstawowych zależności opisujących właściwości sieci zasilającej elektroenergetycznej i przyłączonego do niej badanego obiektu.

Celem ćwiczenia jest poznanie metod pomiaru mocy w układach 3-fazowych o sinusoidalnych przebiegach czasowych napięć i prądów. W treści opracowania przedstawiono klasyczne układy pomiarowe umożliwiające wyznaczenie mocy czynnej i biernej w układzie 3-fazowym w oparciu o wskazania odpowiednio włączonych watomierzy jednoprzetwornikowych lub jednoustrojowych. Podstawowe badania laboratoryjne przeprowadza z założenia w ograniczonym zakresie do układów 3-fazowych o symetrycznym zasilaniu odbiorników liniowych, zasilanie niesymetryczne nie jest przedmiotem tych badań.

2. Wprowadzenie

Moc czynna pobierana z sieci zasilającej 3-fazowej jest równa sumie mocy czynnych pobieranych z poszczególnych obwodów zasilających 1-fazowych

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (1)$$

i analogicznie moc bierna

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (2)$$

Moc czynna pobierana z jednego obwodu zasilającego 1-fazowego, np. pierwszego

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (3)$$

gdzie: U_1 – wartość skuteczna napięcia fazowego, I_1 – wartość skuteczna prądu fazowego, φ_1 – przesunięcie fazowe pomiędzy napięciem fazowym $u_1(t)$ i prądem fazowym $i_1(t)$.

Moc bierna pobierana z jednego obwodu zasilającego 1-fazowego, np. pierwszego

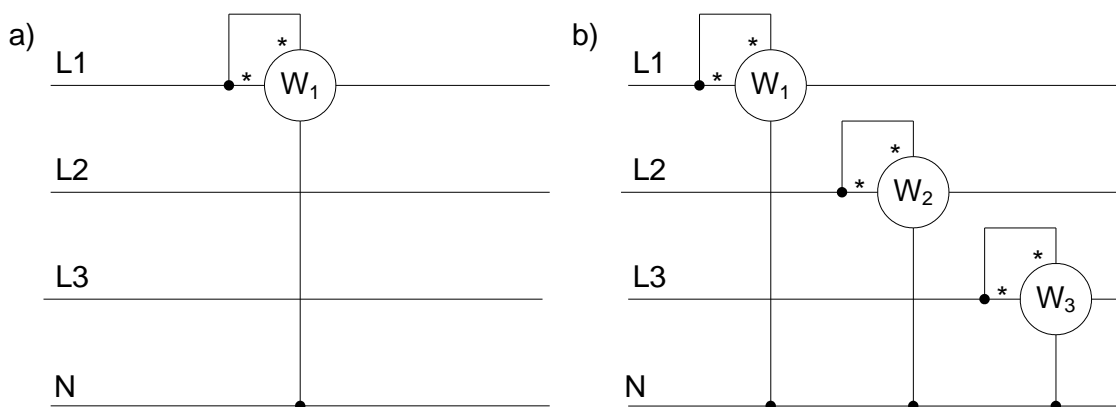
$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (4)$$

Jeżeli obwody zasilania i obciążenia są symetryczne do pomiaru mocy czynnej wystarczy użyć jednego watomierza W_1 (Rys. 1a), którego wskazanie należy pomnożyć przez 3

$$P = 3 P_1 = 3 P_{w1} . \quad (5)$$

Niektóre watomierze elektroniczne w wykonaniu 3-zaciskowym posiadają punkt wspólny „com” połączonych obwodów wejściowych napięciowych i prądowych. Odminnym z przyrządów umożliwiających bezpośredni pomiar mocy jest watomierz ferrodynamiczny posiadający cztery zaciski wejściowe: 2 napięciowe i 2 prądowe. Początki uzwojeń cewek: napięciowej i prądowej są oznaczone na obudowie przyrządu, zwykle gwiazdką (*). Z zasady początki obwodów wejściowych napięciowego i prądowego watomierza są zwierane a końce obwodu napięciowego podłączane do przewodu neutralnego N sieci zasilającej (zerowego punktu sieci). Taki układ (Rys. 1b) pozwala wyznaczyć moc czynną niezależnie od symetrii zasilania i obciążenia. Ze wzoru (1) wynika oczywista metoda pomiaru mocy czynnej za pomocą trzech watomierzy

$$P = P_{w1} + P_{w2} + P_{w3} . \quad (6)$$

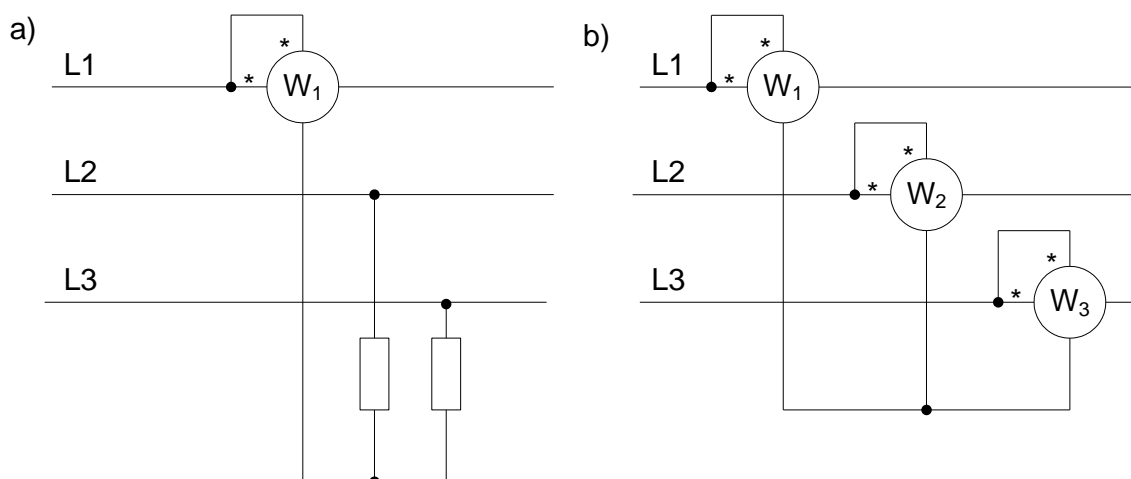


Rys. 1 Układ do pomiaru mocy czynnej pobieranej z sieci 4-przewodowej

a) o zasilaniu symetrycznym i przy obciążeniu symetrycznym,

b) o zasilaniu symetrycznym / niesymetrycznym i przy obciążeniu dowolnym

W sieci 3-przewodowej (bez przewodu neutralnego N, zerowego) zasilanej symetrycznie pomiar można wykonać realizując sztuczny punkt neutralny N_w (sztuczny punkt zerowy) przy obciążeniu symetrycznym (Rys. 2a) i przy obciążeniu dowolnym. Zastosowane w układzie dwa oporniki powinny mieć wartość rezystancji dokładnie równą rezystancji obwodu napięciowego watomierza W_1 . W przypadku ustroju ferrodynamicznego należałoby jeszcze uwzględnić wpływ indukcyjności jego cewki napięciowej.

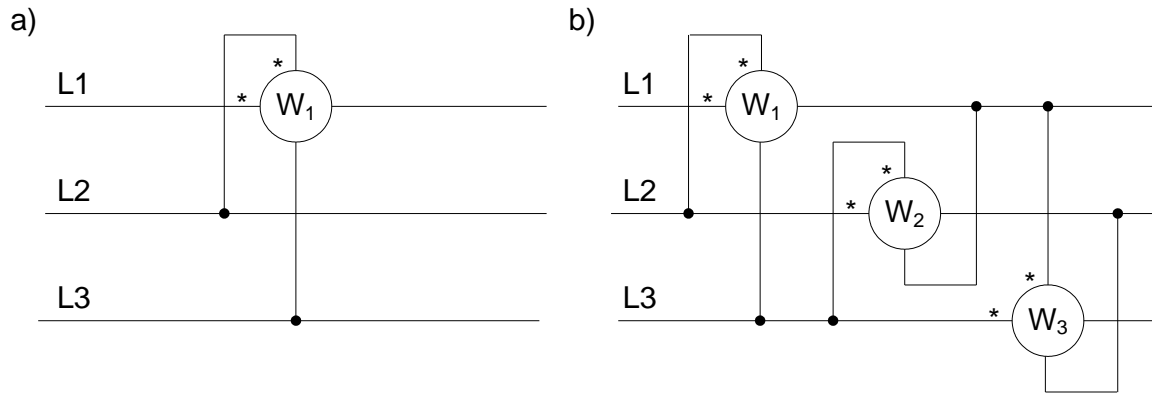


Rys. 2 Układ do pomiaru mocy czynnej pobieranej z sieci 3-przewodowej o zasilaniu symetrycznym przy obciążeniu

a) symetrycznym,

b) dowolnym

Jak wynika z porównania wzorów 3 i 4 pomiar mocy biernej za pomocą przetwornika standardowo używanego jako watomierza wymaga przesunięcia sygnału w jego obwodzie wejściowym, np. napięciowym o kąt $= \pi/2$ względem doprowadzonego napięcia. Takie przesunięcie może być realizowane bezpośrednio w przetworniku, wówczas przyrząd jest nazywany waromierzem. Zarówno w przypadku sieci 3-przewodowej (bez przewodu neutralnego N, zerowego) jak i 4-przewodowej zasilanych symetrycznie pomiar mocy biernej można zrealizować wykorzystując naturalne przesunięcia fazowe między napięciami zasilającymi oraz jeden watomierz przy obciążeniu symetrycznym zaś trzy watomierze przy obciążeniu dowolnym.



Rys. 3 Układ do pomiaru mocy bierniej pobieranej z sieci 3-przewodowej o zasilaniu symetrycznym przy obciążeniu

- a) symetrycznym,
b) dowolnym

W układzie pomiarowym z jednym watomierzem \$W_1\$ (Rys. 3a) wskazanie użytego przyrządu

$$P_{w1} = P_{w1-23} = U_{23} I_1 \cos \alpha_1, \quad (7)$$

gdzie \$\alpha_1\$ jest kątem pomiędzy wektorami \$\underline{U}_{23}\$ a \$\underline{I}_1\$. Wykorzystując właściwości układu 3-fazowego kąt ten jest równy \$(\pi/2 - \varphi_1)\$, gdzie \$\varphi_1\$ – przesunięcie fazowe pomiędzy wektorami \$\underline{U}_1\$ oraz \$\underline{I}_1\$ a wartość skuteczna napięcia międzyfazowego \$U_{23} = \sqrt{3} U_1\$.

W zależności od charakteru obciążenia (indukcyjne lub pojemnościowe) przesunięcie fazowe \$\alpha_1\$ pomiędzy napięciem i prądem mierzonymi w układzie może być większe od \$\pi/2\$ co spowoduje, że wskazanie watomierza \$W_1\$ będzie ujemne (w przypadku watomierza z ustrojem ferrodynamicznym jego wskazówka odchyła się wówczas w przeciwną stronę). Należy więc zamienić miejscami podłączenie do zacisków wejściowych obwodu napięciowego tego watomierza a jego wskazanie we wzorze (7) przyjąć jako ujemne

$$P_{w1} = -P_{w1-23} = P_{w1-32} = U_{32} I_1 \cos \alpha_1 < 0 \quad (8)$$

Reasumując wskazanie tego watomierza

$$P_{w1} = U_{23} I_1 \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_1 \right) = \sqrt{3} U_1 I_1 \sin \varphi_1 = \sqrt{3} Q_1 \quad (9)$$

a całkowita moc bierna pobierana z sieci zasilającej 3-fazowej

$$Q = 3 Q_1 = \sqrt{3} P_{w1}. \quad (10)$$

W układzie pomiarowym z trzema watomierzami (Rys. 3b) ze wzoru (2) wynika oczywista metoda pomiaru całkowitej mocy bierniej pobieranej z sieci zasilającej 3-fazowej

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (P_{w1} + P_{w2} + P_{w3}). \quad (11)$$

W przedstawionych powyżej układach pomiar mocy czynnej (Rys. 2a) i bierniej (Rys. 3b) przy obciążeniu niesymetrycznym wymaga zastosowania 3 przyrządów jednoprzetwornikowych lub jednoustrojowych.

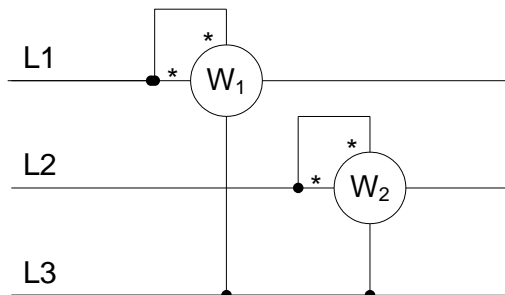
Niektóre pomiary można wykonać tylko za pomocą dwóch watomierzy, podstawą zastosowania układu (układu Arona) jest spełnienie ogólnego warunku

$$i_N(t) = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = 0, \quad (12)$$

który w naszym przypadku przybiera postać zespoloną

$$\underline{I}_N = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{0}. \quad (12a)$$

Praktycznie przyjmuje się, że warunek ten determinuje brak przewodu neutralnego N, zerowego. Przykładową konfigurację układu przedstawiono na rysunku 4. Nie ma znaczenia, w które dwa przewody fazowe zostaną włączone obwody prądowe watomierzy, istotne jest tylko aby końce obwodów napięciowych watomierzy zostały podłączone do pozostałego przewodu fazowego.



Rys. 2 Układ do pomiaru pobieranej

- a) mocy czynnej przy obciążeniu dowolnym,
 - b) biernej przy obciążeniu symetrycznym
- z sieci 3-przewodowej zasilanej symetrycznie.

Moc czynna całkowita pobierana z sieci zasilającej 3-fazowej przy obciążeniu dowolnym

$$P = P_{w1} + P_{w2} , \quad (13)$$

gdzie: P_{w1} – moc wskazywana przez watomierz W_1 , P_{w2} – moc wskazywana przez watomierz W_2

W zależności od przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem wejściowym i prądem wejściowym danego watomierza w tym układzie, które może być większe od $\pi/2$ co spowoduje, że jego wskazanie będzie ujemne. Należy więc zamienić miejscami podłączenie do zacisków wejściowych obwodu napięciowego tego watomierza a jego wskazanie przyjmując jako ujemne we wzorze (13). Aby była możliwa detekcja tego przesunięcia fazowego oba watomierze powinny być 4-ćwiartkowe co występuje w przypadku użycia watomierza, np. z ustrojem ferrodynamicznym, którego wskazówka odchyła się wówczas w przeciwną stronę. Niektóre watomierze elektroniczne w wykonaniu 3-zaciskowym posiadające punkt wspólny „com” wewnątrz połączonych obwodów wejściowych napięciowych i prądowych nie posiadają tej możliwości przełączeń.

Na podstawie uzyskanych wskazań obu watomierzy w układzie przy obciążeniu symetrycznym można wyznaczyć

$$\text{moc bierną} \quad Q = \sqrt{3} (P_{w1} - P_{w2}) \quad (14)$$

$$\text{i również kąt fazowy} \quad \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \quad (15)$$

Wyprowadzenie powyższych wzorów można znaleźć w podręcznikach z zakresu techniki pomiarowej czy metrologii elektrycznej, miernictwa elektrycznego.

3. Literatura

- [1] Czajewski J.: Podstawy Metrologii Elektrycznej, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2004
- [2] Chwałeba A, Poniński M., Siedlecki A.: Miernictwo Elektryczne, WNT, Warszawa, 2003
- [3] Kuśmierek Z.: Pomiary mocy i energii w układach elektro-energetycznych, WNT, Warszawa, 1994