

Ćwiczenie 5

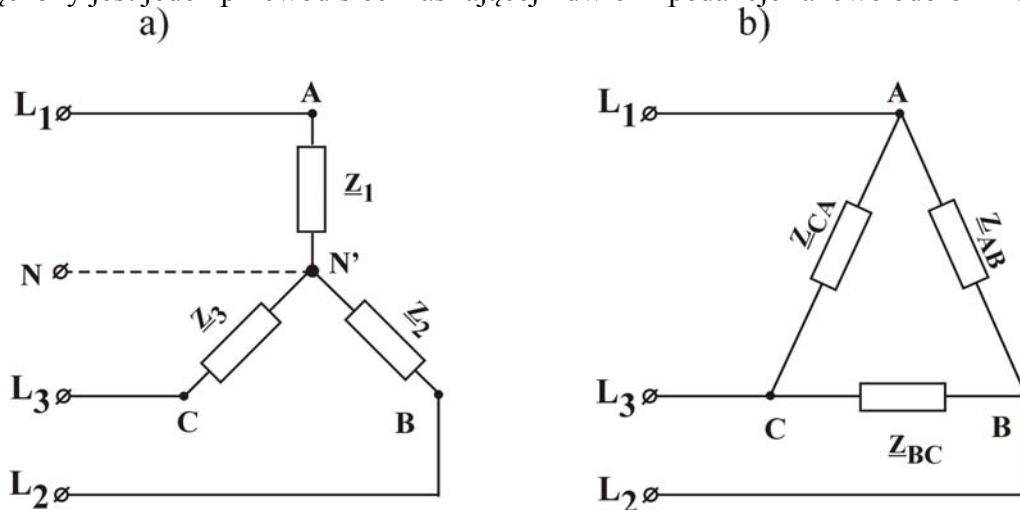
BADANIA ODBIORNIKÓW TRÓJFAZOWYCH

Celem ćwiczenia jest poznanie własności odbiorników trójfazowych symetrycznych i niesymetrycznych połączonych w trójkąt i gwiazdę w układach z przewodem neutralnym i bez przewodu neutralnego.

5.1. Odbiornik trójfazowy

Odbiornik w sieci trójfazowej składa się z trzech faz, które to mogą być połączone w gwiazdę lub w trójkąt z wyróżnionymi węzłami A, B i C. Odbiornik połączony w gwiazdę (rys.5.1.a) charakteryzuje się tym, że końce trzech faz składowych tego odbiornika $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ są z sobą połączone jednym zaciskiem tworząc wspólny węzeł neutralny odbiornika N'. Pozostałe zaciski faz odbiornika (węzły A, B i C) przyłączone są do trzech przewodów fazowych L_1, L_2, L_3 trójfazowej i trójprzewodowej sieci zasilającej. Odbiornik typu gwiazda może być połączony z czteroprzewodową siecią zasilającą L_1, L_2, L_3, N . Punkt N jest nazywany punktem neutralnym sieci zasilającej i jest on połączony w tym przypadku z punktem neutralnym N' odbiornika (linia przerywana na rys.5.1.a).

W odbiorniku połączonym w trójkąt (rys.5.1.b) impedancje fazowe odbiornika $\underline{Z}_{AB}, \underline{Z}_{BC}$ i \underline{Z}_{CA} dołączone są do dwóch przewodów trójfazowej sieci zasilającej. Do każdego wierzchołka trójkąta ABC dołączony jest jeden przewód sieci zasilającej i dwie impedancje fazowe odbiornika.



Rys.5.1. Odbiornik trójfazowy połączony: a) w gwiazdę, b) w trójkąt

Odbiornik trójfazowy może być symetryczny lub niesymetryczny. Odbiornik jest symetryczny, jeżeli ma jednakowe zespolone impedancje fazowe

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 \quad (5.1)$$

w przypadku odbiornika połączony w gwiazdę oraz

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{CA} = \underline{Z}_{BC} \quad (5.2)$$

w przypadku odbiornika połączony w trójkąt.

Oznacza to, że musi wystąpić tu równość modułów i argumentów impedancji fazowych, co można zapisać zależnościami 5.3 dla gwiazdy

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 \quad i \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 \quad (5.3)$$

oraz zależnościami 5.4 dla trójkąta

$$Z_{AB} = Z_{CA} = Z_{BC} \quad \text{i} \quad \varphi_{AB} = \varphi_{CA} = \varphi_{BC}. \quad (5.4)$$

Z powyższych równości wynika, że każda faza odbiornika trójfazowego powinna mieć taką samą rezystancję i reaktancję. Dla gwiazdy fakt ten zapisujemy

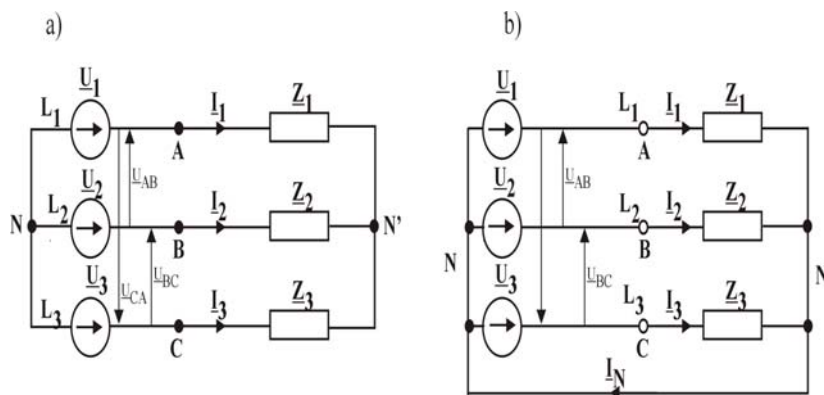
$$R_1 = R_2 = R_3 \quad \text{i} \quad x_1 = x_2 = x_3 \quad (5.5)$$

a dla trójkąta

$$R_{AB} = R_{CA} = R_{BC} \quad \text{i} \quad x_{AB} = x_{CA} = x_{BC}. \quad (5.6)$$

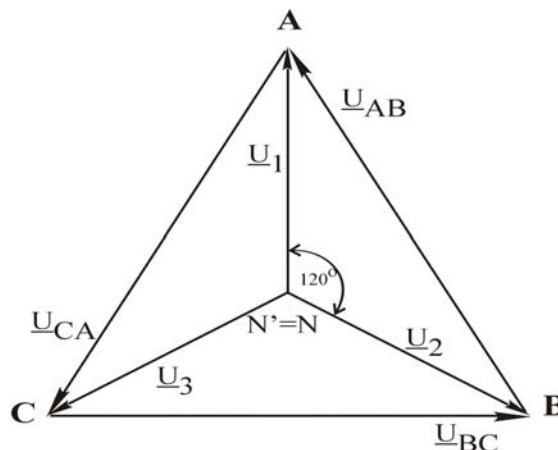
W stanach awaryjnych takich jak: zwarcie lub przerwa w linii, odbiornik symetryczny staje się niesymetryczny. Odbiornik staje się również niesymetryczny jeżeli zmianie ulegnie chociażby jedna z wielkości występujących w równaniu 5.5 lub 5.6 w stosunku do pozostałych.

Odbiorniki połączone w trójkąt zasilane są zawsze z sieci trójprzewodowej. Odbiorniki połączone w gwiazdę mogą być zasilane z sieci trójprzewodowej lub czteroprzewodowej.



Rys.5.2. Źródło i odbiornik połączone w gwiazdę w układzie: a) trójprzewodowym, b) czteroprzewodowym

Na rys.5.2 przedstawiono połączenie źródeł napięć fazowych sieci \underline{U}_1 , \underline{U}_2 , \underline{U}_3 z odbiornikiem połączonym w gwiazdę dla linii trójprzewodowej i czteroprzewodowej. Napięcia te wymuszają przepływ prądów \underline{I}_1 , \underline{I}_2 , \underline{I}_3 odpowiednio w przewodach L_1 , L_2 , L_3 . Napięcia tu występujące nazywane są wartościami skutecznymi zespolonymi napięć fazowych sieci, a ich wskaźy tworzą symetryczną gwiazdę jak na rys. 5.3. Wektory napięć fazowych sieci tworzą gwiazdę, której ramiona umieszczone są względem siebie pod kątem 120° ($2\pi/3$ rad). Końce wektorów napięć \underline{U}_1 , \underline{U}_2 , \underline{U}_3 tworzą trójkąt ABC. Na tym trójkącie oparte są wektory napięć przewodowych \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA} .



Rys.5.3. Wykresy wskazowe napięć odbiornika symetrycznego

Wskazy napięć przewodowych występujących między przewodami sieci tworzą trójkąt równoboczny opisany na gwiazdzie napięć fazowych. Oznacza to, że moduły napięć przewodowych (\underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA}) sieci zasilającej są $\sqrt{3}$ razy większe niż napięć fazowych sieci. Dla określenia rodzaju sieci zasilającej stosuje się zapis w następującej postaci: 3N ~ 50Hz 230/400V, co oznacza, że jest to sieć trójfazowa symetryczna z przewodem neutralnym o napięciu fazowym 230V i napięciu przewodowym 400V oraz częstotliwości 50 Hz.

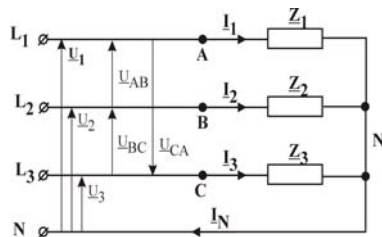
5.2. Odbiornik trójfazowy symetryczny połączony w gwiazdę

Odbiornik trójfazowy symetryczny, zasilany z sieci czteroprzewodowej przedstawiony jest na rys.5.4. Ze względu na symetrię odbiornika połączonego w gwiazdę (impedancje \underline{Z} we wszystkich fazach takie same), moduły prądów fazowych mają taką samą wartość i są określone zależnościami:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z}, \quad I_2 = \frac{U_2}{Z}, \quad I_3 = \frac{U_3}{Z} \quad \text{i} \quad I_1 = I_2 = I_3 = I_f. \quad (5.7)$$

Wskazy prądów \underline{I}_1 , \underline{I}_2 , \underline{I}_3 tworzą symetryczną gwiazdę (rys.5.5) i zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa dla węzła N'

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{I}_N = 0. \quad (5.8)$$



Rys.5.4. Napięcia i prądy odbiornika trójfazowego połączonego w gwiazdę

W symetrycznym odbiorniku połączonym w gwiazdę prąd w przewodzie neutralnym jest równy zero. Potencjały punktów N i N' są sobie równe. Wprowadzenie czy wyeliminowanie przewodu neutralnego niczego nie zmienia w rozplywie prądów \underline{I}_1 , \underline{I}_2 , \underline{I}_3 . Analiza takiego odbiornika daje jednakowe wyniki w układzie trójprzewodowym i czteroprzewodowym. W zależności od charakteru impedancji odbiornika \underline{Z} napięcia fazowe względem prądu fazowego będzie przesunięty o kąt φ .

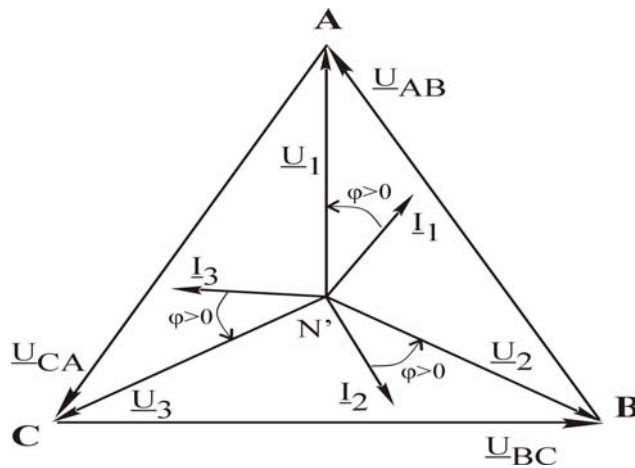
Jeżeli impedancja jednej fazy obwodu z rys.5.4. ma postać

$$\underline{Z} = R + j(x_L - x_C), \quad (5.9)$$

to kąt φ można wyznaczyć z równania

$$\varphi = \arctg \frac{x_L - x_C}{R}. \quad (5.10)$$

W przypadku odbiornika o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym wykres wskazowy prądów i napięć przedstawia rys.5.5. Powyższy wykres wskazowy uzyskano przez umieszczenie w symetrycznej gwiazdzie napięć fazowych \underline{U}_1 , \underline{U}_2 , \underline{U}_3 występujących na odbiorniku, symetrycznej gwiazdy prądów \underline{I}_1 , \underline{I}_2 , \underline{I}_3 występujących w fazach odbiornika. Punktem odniesienia dla obu gwiazd jest punkt neutralny odbiornika N'. Kąt φ zależy od charakteru odbiornika.



Rys.5.5. Wykres wskazowy odbiornika symetrycznego połączonego w gwiazdę o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym

W przypadku odbiornika o charakterze rezystancyjnym - obie gwiazdy (napięć i prądów fazowych) będą się pokrywać $\varphi=0$, dla odbiornika o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym gwiazda prądów będzie się opóźniać o kąt φ względem gwiazdy napięć fazowych jak na ry.5.5.

Moc czynną odbiornika symetrycznego (trójgałęziowego) połączonego w gwiazdę można wyznaczyć z równania

$$P = 3 U_f I_f \cos \varphi_f, \quad (5.11)$$

gdzie: U_f - napięcie fazowe na odbiorniku (napięcie na impedancji Z gwiazdy),

I_f - prąd fazowy odbiornika (prąd płynący przez impedancje Z gwiazdy),

φ_f - kąt przesunięcia fazowego między wskazem napięcia i prądu fazowego odbiornika.

Ponieważ dla połączenia odbiornika w gwiazdę prawdziwe są zależności:

$$\sqrt{3} U_f = U_p, \quad I_f = I_p, \quad (5.12)$$

gdzie: U_p - napięcie przewodowe (pomiędzy liniami sieci),

I_p - prąd przewodowy sieci,

wyrażenie na moc czynną można zapisać

$$P = \sqrt{3} U_p I_p \cos \varphi_f. \quad (5.13)$$

Moc bierna odbiornika symetrycznego połączonego w gwiazdę wynosi:

$$Q = 3 U_f I_f \sin \varphi_f, \quad (5.14)$$

lub

$$Q = \sqrt{3} U_p I_p \sin \varphi_f. \quad (5.15)$$

Moc pozorna wynosi:

$$S = 3 U_f I_f, \quad (5.16)$$

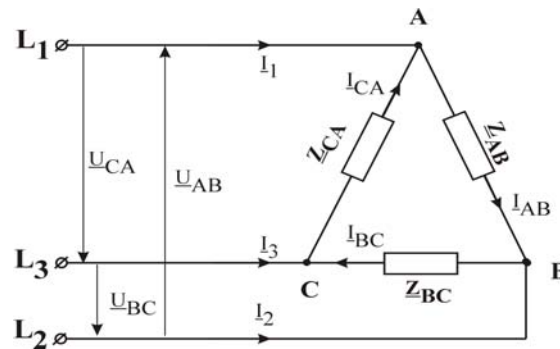
lub

$$S = \sqrt{3} U_p I_p. \quad (5.17)$$

Obliczona moc bierna wyrażana jest w warach [var] i jest dodatnia, gdy charakter odbiornika jest indukcyjny i ujemna dla odbiornika pojemnościowego. Moc bierna dla odbiornika rezystancyjnego jest równa zero. Obliczona moc czynna wyrażana jest w watach [W] a moc pozorna w woltamperach [VA]. Moc czynna i pozorna zawsze są dodatnie.

5.3. Odbiornik trójfazowy symetryczny połączony w trójkąt

Odbiornik symetryczny połączony w trójkąt zasilany z sieci trójfazowej symetrycznej przedstawiono na rys.5.6.



Rys.5.6. Odbiornik trójfazowy połączony w trójkąt

Ponieważ impedancje Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CA} we wszystkich gałęziach są takie same i równe Z oraz moduły napięć przewodowych U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} są też identyczne, to moduły prądów fazowych mają również taką samą wartość:

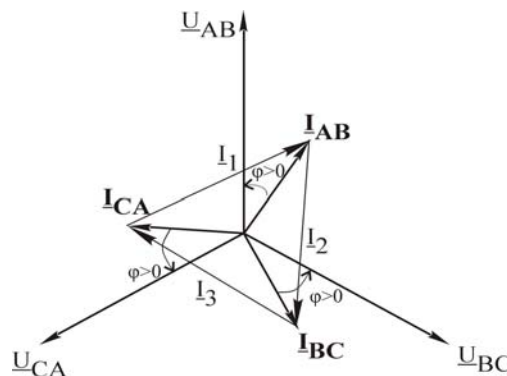
$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_{AB}}, \quad I_{BC} = \frac{U_{BC}}{Z_{BC}}, \quad I_{CA} = \frac{U_{AC}}{Z_{AC}}, \quad I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_f \quad (5.18)$$

Wskazy prądów fazowych I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} tworzą symetryczną gwiazdę jak na rys.5.7. Zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa dla węzłów A, B, C prądy przewodowe wynoszą:

$$\begin{aligned} -I_{AB} + I_{CA} + I_1 &= 0, \\ -I_{BC} + I_{AB} + I_2 &= 0, \\ -I_{CA} + I_{BC} + I_3 &= 0. \end{aligned} \quad (5.19)$$

Napięcia i prądy spełniają następujące zależności:

$$U_f = U_p, \quad \sqrt{3} I_f = I_p \quad (5.20)$$



Rys.5.7. Wykres wskazowy odbiornika symetrycznego połączanego w trójkąt o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym

Porównując odbiorniki połączone w gwiazdę i w trójkąt o tych samych impedancjach Z i zasilanych z sieci o takim samym napięciu można zauważyć, że faza odbiornika połączanego w trójkąt jest podłączona pod napięcie przewodowe sieci natomiast faza odbiornika połączanego w gwiazdę pod napięcie fazowe sieci. Prąd fazowy odbiornika połączanego w trójkąt jest więc $\sqrt{3}$ razy większy od prądu fazowego odbiornika połączanego w gwiazdę. Z kolei prądy przewodowe zasilające

odbiornik połączony w trójkąt są $\sqrt{3}$ razy większe od prądów fazowych (równanie 5.20), natomiast w odbiorniku połączonym w gwiazdę prądy przewodowe równe są prądom fazowym. Oznacza to, że przełączenie odbiornika z gwiazdy na trójkąt spowoduje trzykrotne zwiększenie wartości prądów przewodowych zasilających ten odbiornik.

W zależności od charakteru impedancji odbiornika Z napięcie fazowe względem prądu fazowego będzie przesunięte o kąt φ . Kąt ten opisuje równanie 5.10. W przypadku odbiornika o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym wykres wskazowy prądów i napięć przedstawia rys.5.7.

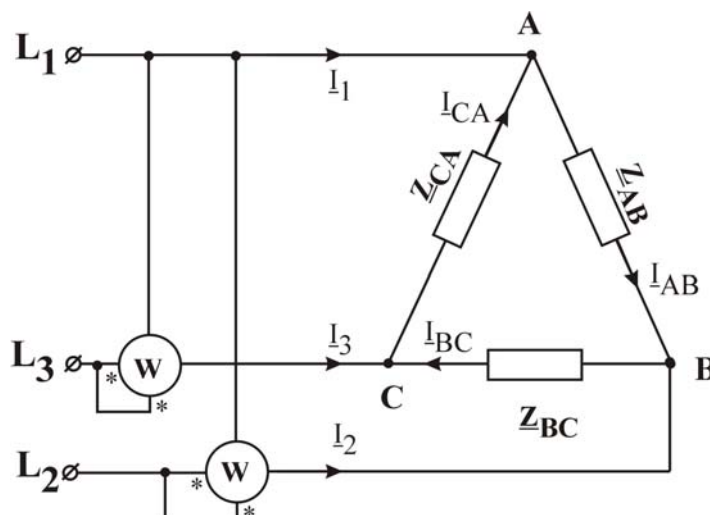
Jak już wspomniano, na fazach odbiornika połączonego w trójkąt występują napięcia przewodowe sieci zasilającej. Wskazy tych napięć można narysować także jako symetryczną gwiazdę, w której przesunięcia fazowe między wskazami napięć przewodowych wynoszą 120° . Powyższy wykres wskazowy uzyskano przez umieszczenie w symetrycznej gwiazdzie napięć przewodowych występujących na odbiorniku \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA} , symetrycznej gwiazdy prądów występujących w fazach odbiornika \underline{I}_{AB} , \underline{I}_{BC} , \underline{I}_{CA} .

W porównaniu z odbiornikiem połączonym w gwiazdę oba układy gwiazdowe wskazów prądów i napięć są $\sqrt{3}$ razy dłuższe. W związku z tym odbiornik połączony w trójkąt pobiera trzykrotnie więcej mocy niż odbiornik połączony w gwiazdę zasilany z sieci o tym samym napięciu.

Przesunięcie kątowe gwiazd napięć i prądów zależy od kąta φ , a więc od charakteru odbiornika. W przypadku odbiornika o charakterze rezystancyjnym - obie gwiazdy będą się pokrywać $\varphi=0$, dla odbiornika o charakterze indukcyjnym gwiazda prądów będzie się opóźniać o kąt $\varphi>0$. Między węzłami A, B, C odbiornika panuje napięcie międzyfazowe równe napięciu przewodowemu sieci zasilającej.

Moc czynną odbiornika symetrycznego połączony w trójkąt można wyznaczyć z równania 5.11, pamiętając że wielkości definiowane jako fazowe dotyczą wartości napięć i prądów występujących na odbiorniku. Moc bierną odbiornika symetrycznego połączony w trójkąt opisuje równanie 5.14, a moc pozorną 5.16.

Odbiornik połączony w trójkąt nie ma punktu neutralnego. W odbiornikach połączonych w gwiazdę w układzie trójprzewodowym punkt neutralny może być niedostępny (np. wewnątrz obudowy maszyny elektrycznej). Wszędzie tam, gdzie nie jest możliwy pomiar prądu fazowego odbiornika, do pomiaru mocy czynnej stosuje się metodę dwóch watomierzy (tzw. układ Arona – rys 5.8).



Rys.5.8. Pomiar mocy czynnej odbiornika trójfazowego przy wykorzystaniu dwóch watomierzy

Cewki prądowe watomierzy mierzą prądy przewodowe w dowolnie wybranych dwóch przewodach zasilających odbiornik. Cewki napięciowe włączone są tak, aby mierzyć napięcia przewodowe między fazą w której jest cewka prądowa a fazą trzecią, w której nie ma cewki

prądowej żadnego z watomierzy. Suma lub różnica wskazań obu watomierzy w zależności od kąta φ , określa moc czynną pobieraną przez odbiornik trójfazowy. W przypadku $\cos(\varphi) > 0,5$ wskazania watomierzy dodaje się a dla $\cos(\varphi) < 0,5$ odejmuje się. Jeżeli $\cos(\varphi) = 0,5$, to jeden z watomierzy wskazuje wartość zero.

5.4. Odbiornik trójfazowy niesymetryczny połączony w gwiazdę

Odbiornik trójfazowy jest niesymetryczny, jeżeli poszczególne fazy mają różne wartości modułów lub argumentów impedancji fazowych.

Poniżej rozpatrzone zostaną trzy przypadki asymetrii odbiornika trójfazowego połączonego w gwiazdę:

1. Przerwa w fazie w układzie:
 - a) czteroprzewodowym,
 - b) trójprzewodowym.
2. Zwarcie w fazie w układzie trójprzewodowym.
3. Różne impedancje w fazach w układzie:
 - a) czteroprzewodowym,
 - b) trójprzewodowym.

5.4.1. Przerwa w fazie odbiornika połączonego w gwiazdę w układzie czteroprzewodowym

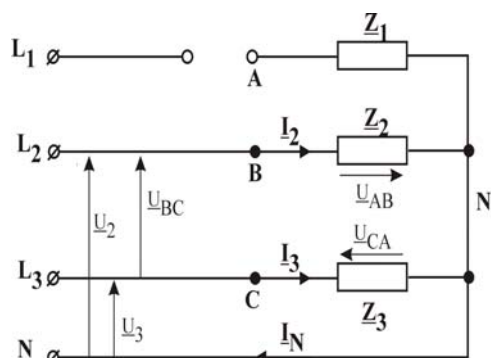
Odbiornik trójfazowy połączony w gwiazdę, w którym wystąpiła przerwa w fazie L_1 przedstawiono na rys.5.9 (przed awarią odbiornik był odbiornikiem symetrycznym). Odbiornik jest więc zasilany jedynie dwoma napięciami fazowymi \underline{U}_2 i \underline{U}_3 . Ponieważ moduły napięć fazowych są identyczne, to moduły prądów fazowych mają też taką samą wartość:

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_2}, \quad I_3 = \frac{U_3}{Z_3}, \quad I_2 = I_3 = I_f. \quad (5.21)$$

W zależności od charakteru impedancji odbiornika \underline{Z} napięcia fazowe względem prądu fazowego będzie przesunięty o kąt φ . Kąt φ wyznacza się z równania 5.10.

Wskaź prądu \underline{I}_N na wykresie wskazowym przyjmie takie położenie aby zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa dla węzła N' suma prądów \underline{I}_2 i \underline{I}_3 była równa prądowi w przewodzie neutralnym

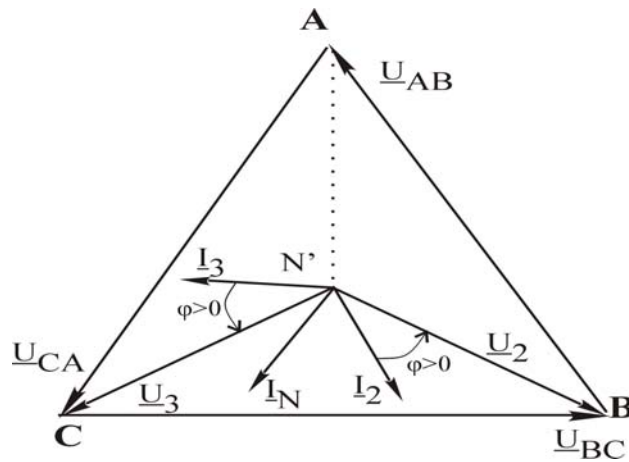
$$\underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{I}_N \quad (5.22)$$



Rys.5.9. Przerwa w fazie L_1 odbiornika trójfazowego w układzie czteroprzewodowym

Wykres wskazowy prądów i napięć dla odbiornika o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym przedstawia rys.5.10. Na wykresie wskazowym linią kropkową zaznaczono napięcie, które z powodu przerwy w fazie L_1 nie występuje na odbiorniku. Napięcia jakie występują na zasilonych

dwóch fazach odbiornika (ponieważ punkt neutralny odbiornika jest połączony przewodem neutralnym z punktem neutralnym źródła zasilania) są równe napięciom fazowym sieci zasilającej. Napięcia te przesunięte są względem siebie o $2\pi/3$ rad. W zależności od charakteru impedancji odbiornika \underline{Z} napięcie fazowe względem prądu fazowego jest przesunięte o kąt φ .



Rys.5.10. Wykres wskazowy napięć i prądów dla układu z rys.5.9

W tym miejscu należy podkreślić, że faza "A" odbiornika jest odłączona od zasilania. Mierząc napięcia przewodowe odbiornika U_{AB} i U_{CA} uzyskuje się wartości odpowiadające wartościom napięć fazowych odbiornika U_2 i U_3 .

Moc czynną pobieraną przez odbiornik można wyznaczyć z równania

$$P = 2 U_f I_f \cos \varphi_f. \quad (5.23)$$

Moc bierna odbiornika wynosi

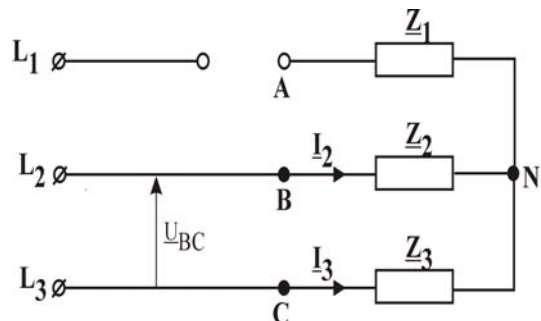
$$Q = 2 U_f I_f \sin \varphi_f. \quad (5.24)$$

Moc pozorna jest równa

$$S = 2 U_f I_f. \quad (5.25)$$

5.4.2. Przerwa w fazie odbiornika połączonego w gwiazdę w układzie trójprzewodowym

Odbiornik trójfazowy połączony w gwiazdę, w którym wystąpiła przerwa w fazie L_1 przedstawiono na rys.5.11 (przed awarią odbiornik był odbiornikiem symetrycznym).



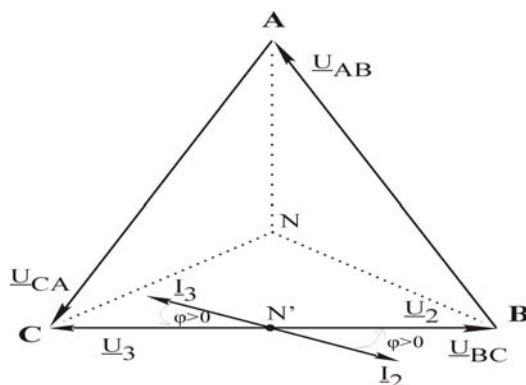
Rys.5.11. Przerwa w fazie L_1 odbiornika trójfazowego w układzie trójprzewodowym

Do odbiornika zostało doprowadzone jedynie napięcie przewodowe U_{BC} , a prądy w fazowe wynoszą

$$I_2 = -I_3 = \frac{U_{BC}}{2Z} = I_f. \quad (5.26)$$

W zależności od charakteru impedancji odbiornika Z , napięcie fazowe w odniesieniu do prądu fazowego będzie przesunięty o kąt φ dodatni lub ujemny. Kąt φ można wyznaczyć z równania (5.10). Gdy impedancje obu faz są sobie równe, na impedancjach tych pojawia się taki sam, co do wartości, spadek napięcia. Punkt N' leży więc w połowie długości wskazu napięcia U_{BC} .

Wykres wskazowy prądów i napięć dla odbiornika o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym przedstawia rys.5.12.



Rys.5.12. Wykres wskazowy napięć i prądów dla układu z rys.5.11

Na wykresie wskazowym zaznaczono linią kropkową napięcia, występujące w sieci zasilającej. Napięcia te z powodu przerwy w fazie L_1 nie występują na odbiorniku.

W zasilanych dwóch fazach odbiornika występuje ten sam co do wartości prąd fazowy powodujący jednakowe co do wartości spadki napięć na impedancjach fazowych. Spadki te, czyli inaczej napięcia fazowe odbiornika U_2 i U_3 , są równe połowie wartości napięcia przewodowego U_{BC} . Ponieważ na impedancjach fazowych Z_2 i Z_3 występują prądy o przeciwnych znakach, to napięcia fazowe U_2 i U_3 są przesunięte o π rad. W zależności od charakteru impedancji odbiornika Z napięcie fazowe względem prądu fazowego jest przesunięty o kąt φ . W tym miejscu należy podkreślić, że w fazie "A" odbiornika nie występuje prąd.

Moc czynną tego odbiornika można wyznaczyć z równania (5.23), moc bierną z równania (5.24), a moc pozorną z równania (5.25).

5.4.3. Zwarcie w fazie odbiornika połączonego w gwiazdę w układzie trójprzewodowym

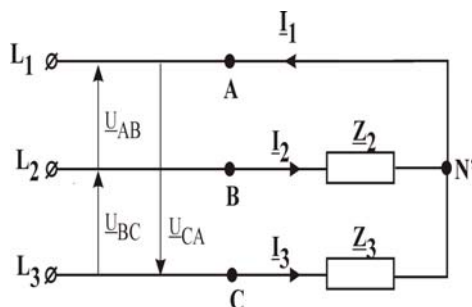
Stan awaryjny pracy odbiornika trójfazowego zwany zwarcie w fazie, podobnie jak przerwa w fazie, jest awarią odbiornika często spotykaną w układach rzeczywistych. Zwarcie w fazie - zwane zwarcie jednofazowym nagminnie występuje w napowietrznych sieciach energetycznych średniego napięcia na skutek np. przeskoku łuku elektrycznego w izolatorze oddzielającym przewód fazowy od słupa linii energetycznej. Także przepalenie się uzwojenia jednej fazy odbiornika trójfazowego w większości przypadków w pierwszej chwili powoduje wystąpienie zwarcia jednofazowego.

Zwarcie jednofazowe w układzie czteroprzewodowym powoduje pojawienie się bardzo dużego prądu zwarciovego w fazie zwartej co zwykle kończy się odłączeniem danej fazy od źródła zasilania przez układy zabezpieczeń (bezpieczniki lub wyłączniki nadprądowe) w związku z tym odbiornik pracuje jako dwufazowy zasilany siecią z przewodem neutralnym (przypadek taki był analizowany w punkcie 5.4.1). W warunkach laboratoryjnych takie zwarcie, przy korzystaniu z sieci 3N ~ 50Hz 230/400V nie może być wykonane.

Zwarcie jednofazowe w układzie bez przewodu neutralnego nie powoduje wystąpienia dużego prądu zwarcia i z tych powodów jest trudne do wykrycia przez układy zabezpieczeń. Jednak

długotrwałe występowanie takiej awarii prowadzi zwykle do przekształcenia się zwarcia jednofazowego do dwu lub trzyfazowego. Zwarcia te powodują pojawienie się bardzo dużych prądów zwarcia, które są łatwo wykrywane przez układy zabezpieczeń. W przypadku braku zabezpieczeń prądy te niszczą odbiornik i sieć zasilającą objęty awarią na skutek oddziaływań elektrodynamicznych i cieplnych.

Na rys.5.13 przedstawiono odbiornik trójfazowy połączony w gwiazdę w układzie trójprzewodowym, w którym wystąpiło zwarcie w fazie L_1 . (przed awarią odbiornik był odbiornikiem symetrycznym).



Rys.5.13. Zwarcie w fazie L_1 odbiornika w układzie trójprzewodowym

Podczas zwarcia jednofazowego fazę "A" odbiornika należy traktować jako bezimpedancyjną. Nie wystąpi na niej spadek napięcia mimo występowania w niej prądu zwarciovego I_1 . Do węzła N' przyłożony jest więc potencjał punktu "A". Wobec tego napięcie fazowe na impedancji fazy "B" jest równe napięciu przewodowemu występującemu między fazami "A" i "B" tzn. U_{AB} . Napięcie na impedancji fazy "C" wynosi odpowiednio U_{CA} . Ponieważ moduły napięć przewodowych są identyczne, moduły prądów fazowych określone poniższymi zależnościami mają taką samą wartość:

$$I_2 = \frac{U_{AB}}{Z_2}, \quad I_3 = \frac{U_{CA}}{Z_3}, \quad I_2 = I_3 = I_f. \quad (5.27)$$

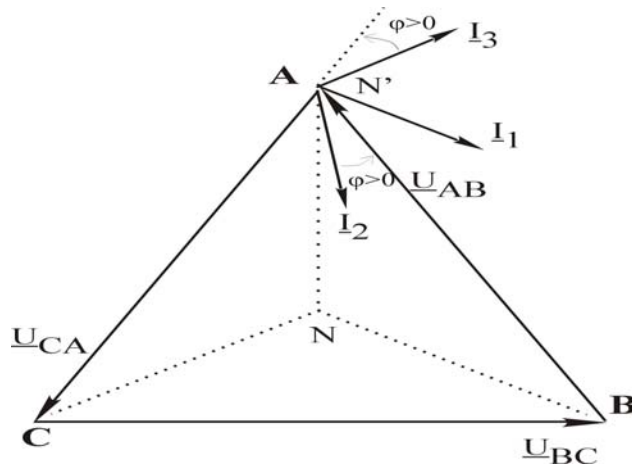
Ponieważ prąd I_2 , wymuszony przez napięcie U_{AB} , ma zwrot przeciwny do tego, jaki jest zaznaczony na rys.5.13, na wykresie wskazowym będzie jego zwrot zaznaczony przeciwnie niż to wynika z równania (5.27). W zależności od charakteru impedancji odbiornika Z napięcie fazowe względem prądu fazowego na odbiorniku będzie przesunięty o kąt φ . Kąt φ wyznacza się z równania (5.10).

Wskaz prądu I_1 na wykresie wskazowym musi przyjąć takie położenie, aby zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa dla węzła N' suma prądów wynosiła zero

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (5.28)$$

Wykres wskazowy prądów i napięć dla odbiornika o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym przedstawia rys.5.14. Na wykresie tym zaznaczono linią kropkową napięcia, które z powodu zwarcia w fazie L_1 nie występują na odbiorniku dla tego przypadku. Potencjał węzła N' odbiornika jest równy potencjałowi w punkcie "A". Zgodnie z rys.5.14 prądy fazowe w fazach "L2" i "L3" powodują wystąpienie spadków napięć równych odpowiednio U_{CA} i U_{AB} . W zależności od charakteru impedancji odbiornika Z spadki napięć względem prądów fazowych są przesunięte o kąt φ .

W tym miejscu należy podkreślić, że w fazie "A" odbiornika występuje prąd zwarcia większy jedynie o $\sqrt{3}$ od prądów pozostałych faz (widać to na rys.5.14). Taka wartość prądu zwykle nie powoduje dalszych uszkodzeń odbiornika. Natomiast w fazie "L2" i "L3" pojawiło się napięcie przewodowe U_{AB} i U_{CA} , które występując długotrwałe prowadzi do dalszych uszkodzeń (przebiecie uzwojeń, kondensatorów, izolacji kabli, itp.) i z tego powodu jest to również awaria groźna w skutkach, mimo, że jej efekty nie pojawiają się bezpośrednio po jej wystąpieniu.



Rys.5.14. Wykres wskazowy napięć i prądów dla układu z rys.5.13

Pomiar napięć fazowych odbiornika U_2 i U_3 jest równoznaczny z pomiarami napięć przewodowych U_{AB} i U_{CA} .

Moc czynną tego odbiornika można wyznaczyć z równania (5.29), moc bierną z równania (5.30) a moc pozorną z równania (5.31):

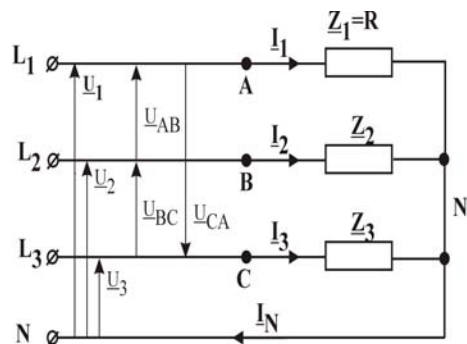
$$P = 2 U_p I_f \cos \varphi_f \quad (5.29)$$

$$Q = 2 U_p I_f \sin \varphi_f \quad (5.30)$$

$$S = 2 U_p I_f \quad (5.31)$$

5.4.4. Odbiornik z jedną fazą rezystancyjną połączony w gwiazdę w układzie czteroprzewodowym

Odbiornik trójfazowy niesymetryczny zasilany z sieci cztero-przewodowej przedstawiony jest na rys.5.15.



Rys.5.15. Odbiornik trójfazowy z jedną fazą rezystancyjną w układzie czteroprzewodowym

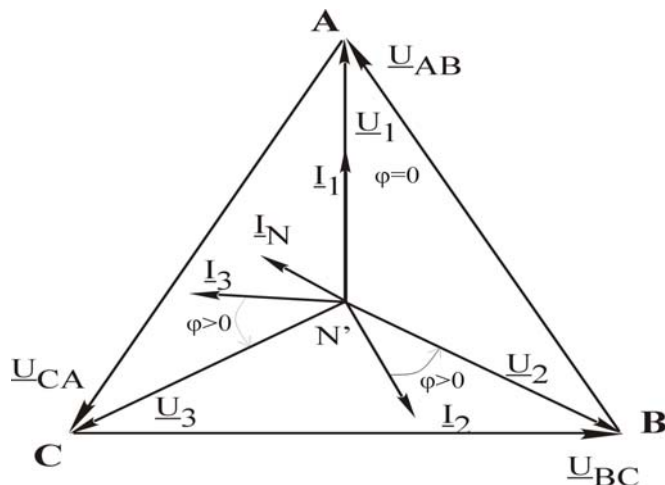
Moduły prądów fazowych są określone zależnościami:

$$I_1 = \frac{U_1}{R}, \quad I_2 = \frac{U_2}{Z_2}, \quad I_3 = \frac{U_3}{Z_3}. \quad (5.32)$$

Wskazy prądów I_1 , I_2 , I_3 utworzą asymetryczną gwiazdę i zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa dla węzła N'

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{I}_N \quad (5.33)$$

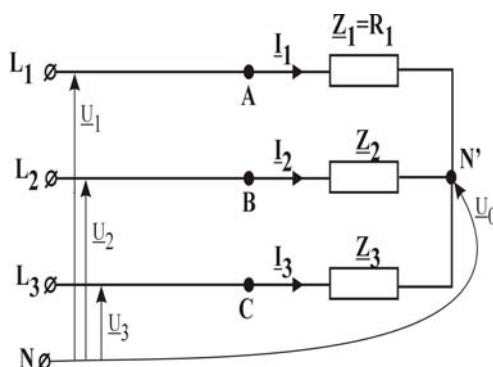
Wykres wskazowy prądów i napięć dla niesymetrycznego odbiornika o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym z jedną fazą rezystancyjną przedstawia rys.7.16.



Rys.5.16. Wykres wskazowy napięć i prądów dla układu z rys.5.15

5.4.5. Odbiornik z jedną fazą rezystancyjną połączony w gwiazdę w układzie trójprzewodowym

W układzie trójprzewodowy punkty neutralne źródła i odbiornika nie są połączone (rys.5.17).



Rys.5.17. Odbiornik trójfazowy z jedną fazą rezystancyjną w układzie trójprzewodowym

Pomiędzy punktami neutralnymi źródła i odbiornika brak jest przewodu łączącego na których występuje napięcie niesymetrii \underline{U}_0 :

$$\underline{U}_0 = \frac{\frac{\underline{U}_1}{R_1} + \frac{\underline{U}_2}{Z_2} + \frac{\underline{U}_3}{Z_3}}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right)}, \quad (5.34)$$

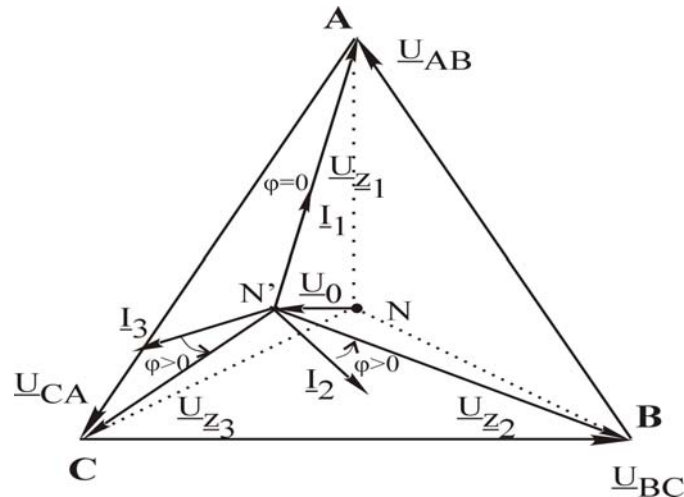
gdzie: \underline{U}_1 , \underline{U}_2 i \underline{U}_3 , są napięciami fazowymi źródła zasilania.

Napięcia fazowe odbiornika wyznacza się na podstawie wzorów:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{Z1} &= \underline{U}_1 - \underline{U}_0, \\ \underline{U}_{Z2} &= \underline{U}_2 - \underline{U}_0, \\ \underline{U}_{Z3} &= \underline{U}_3 - \underline{U}_0. \end{aligned} \quad (5.35)$$

Następnie prądy fazowe odbiornika według wzorów:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{U}_{Z1} / R_1, \\ \underline{I}_2 &= \underline{U}_{Z2} / Z_2, \\ \underline{I}_3 &= \underline{U}_{Z3} / Z_3. \end{aligned} \quad (5.36)$$



Rys.5.18. Wykres wskazowy napięć i prądów dla układu z rys.5.17

Zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa suma prądów fazowych jest równa zero

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0. \quad (5.37)$$

Do obliczenia mocy pobieranych przez odbiornik zastosowanie mają wzory:

$$P = U_{Z1} I_1 \cos(\varphi_1) + U_{Z2} I_2 \cos(\varphi_2) + U_{Z3} I_3 \cos(\varphi_3), \quad (5.38)$$

$$Q = U_{Z1} I_1 \sin(\varphi_1) + U_{Z2} I_2 \sin(\varphi_2) + U_{Z3} I_3 \sin(\varphi_3), \quad (5.39)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (5.40)$$

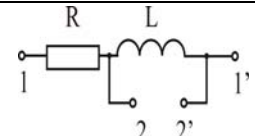
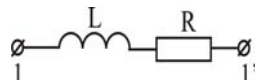
Wykres wskazowy prądów i napięć dla odbiornika o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym, z jedną fazą rezystancyjną przedstawia rys.5.18.

5.5. Pomiar

LABORATORIUM ELEKTROTECHNIKI I ELEKTRONIKI					
Grupa		Podgrupa		Numer ćwiczenia	5
Lp.	Nazwisko i imię		Ocena	Data wykonania ćwiczenia	
1.				Podpis prowadzącego zajęcia	
2.					
3.					
4.					
5.					
Temat	BADANIA ODBIORNIKÓW TRÓJFAZOWYCH				

Wykaz przyrządów

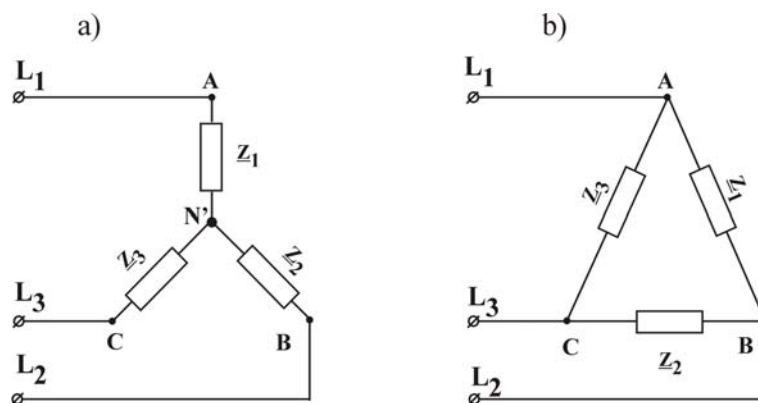
Tabela 1.

Lp.	Oznaczenie przyrządu na schemacie	Nazwa przyrządu	Typ przyrządu	Zakresy pracy	Numer
1	AC PM	Miernik wielofunkcyjny			
2	AC PM	Miernik wielofunkcyjny			
3	AC PM	Miernik wielofunkcyjny			
4	A_N	Amperomierz			
5	TRA	Transformator trójfazowy			
6	\underline{L}_1	Łącznik trójsekcyjny			
7	\underline{L}_2	Łączniki jednosekcyjne			
8	\underline{Z}_1	Rezystancja/impedancja odbiornika		R=470 Ω L=1,04 H	b/n
9	$\underline{Z}_2, \underline{Z}_3$	Impedancje odbiorników			b/n

5.5.1. Ogólna charakterystyka badań odbiornika w sieci trójfazowej

Badania odbiorników trójfazowych dotyczyć będą pomiarów mocy wydzielonej na odbiorniku połączonych z siecią trójfazową w układzie w gwiazdę i w trójkąt. Wykonane będą pomiary mocy czynnej i pozornej wydzielonej na 3 gałęziach ($\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$) obciążenia umieszczonego pomiędzy punktami ABC zgodnie z rys.5.19. Punkt N'' dla podłączenia w gwiazdę jest nazywany punktem neutralnym odbiornika.

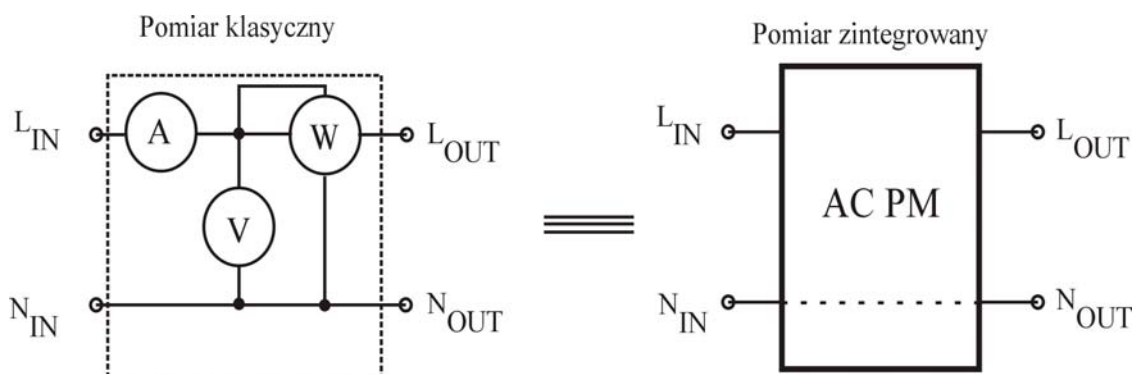
Impedancje \underline{Z} gałęzi obciążające poszczególne fazy mogą się różnić lub być jednakowe. Badania przeprowadzone będą dla przypadku symetrycznego (impedancje odbiorników wszystkich faz jednakowe) i niesymetrycznego (jedna z impedancji odbiorników różni się od pozostałych) obciążenia. Niesymetryczność wprowadzona będzie poprzez zmianę charakteru impedancji wybranej gałęzi (impedancja rzeczywista) lub rozwarcie w jednej z linii zasilających (nieskończona impedancja).



Rys.5.19. Sposoby połączenia odbiornika trójfazowego z siecią trójfazową:

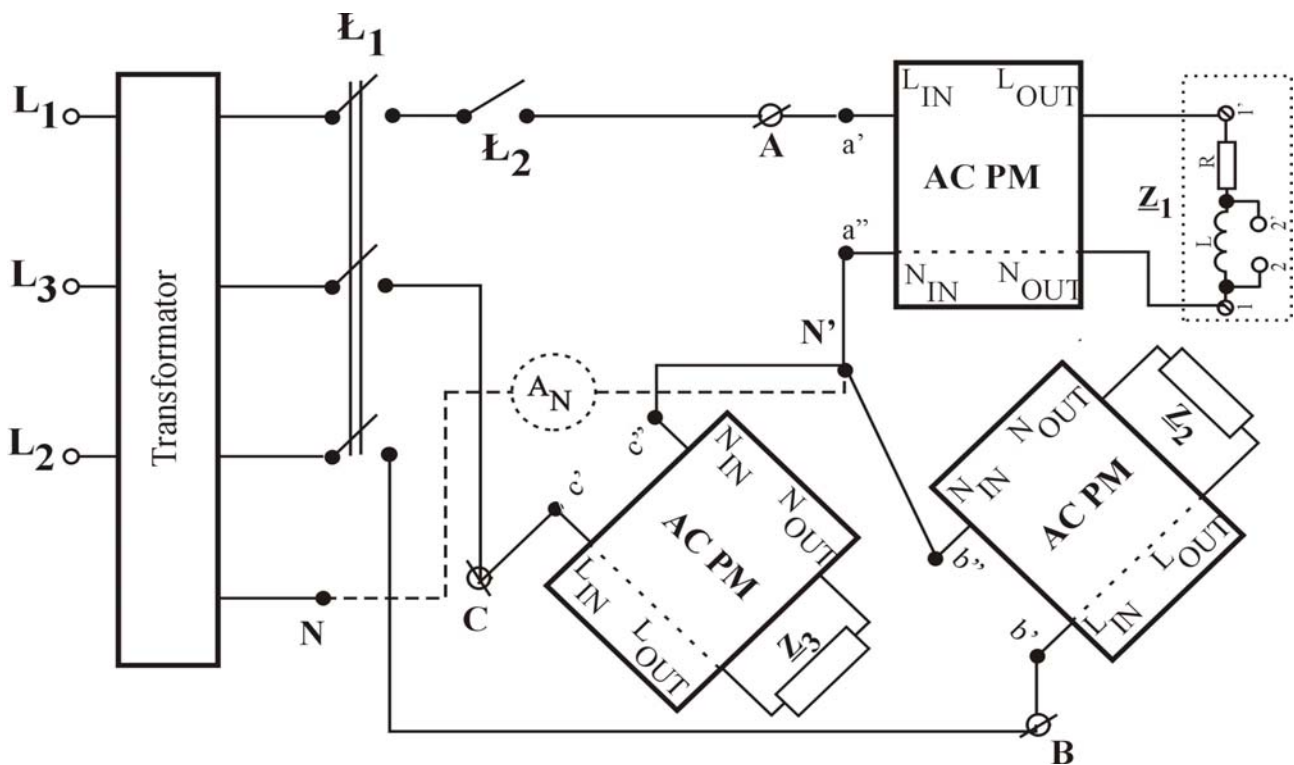
a) w gwiazdę, b) w trójkąt

Pomiary mocy (czynnej i pozornej) wydzielonej w gałęziach odbiornika mogą być realizowane klasycznymi metodami w oparciu o: watomierz, woltomierz i amperomierz lub zintegrowanym miernikiem mocy. W klasycznych pomiarach wykonywany jest pomiar mocy czynnej przy pomocy watomierza a moc pozorna wyznaczana jest w pośredni sposób poprzez pomiary wartości skutecznych prądu i i napięcia kolejnych faz odbiornika. Miernik mocy (AC PM) jest miernikiem zintegrowanym realizującym funkcje pomiarowe: watomierza, woltomierza i amperomierza. Umożliwia on między innymi pomiary: mocy czynnej (P), wartości skutecznych napięcia (U) i prądu (I) oraz współczynnika mocy ($\cos(\varphi)$). Tożsamość sposobów pomiaru mocy przedstawia rys.5.20. Punkty L_{IN} i N_{IN} należy podłączać do odpowiedniej pary punktów z rys.5.19, natomiast punkty L_{OUT} i N_{OUT} do jednej z faz odbiornika.



Rys.5.20. Klasyczny i zintegrowany sposoby pomiaru mocy w sieci zasilającej

5.5.2. Badania odbiornika połączonego w gwiazdę



Rys.5.21. Układ pomiarowy do badania odbiornika połączonego w gwiazdę

5.5.2.1. Pomiary dla sieci 3 przewodowej

Do zacisków sieci trójprzewodowej, której przewody na tablicy rozdzielczej oznakowane są jako L_1, L_2, L_3 należy podłączyć transformator obniżający napięcie. Odbiornik złożony z 3 impedancji Z połączone z miernikami mocy AC PM typu GPM-8212 połączyć z sobą w trzy pary zgodnie z rys.5.21. Zwrócić uwagę na opis zacisków miernika GPM-8212. Impedancje Z należy podłączyć do zacisków L_{OUT} i N_{OUT} odpowiedniego miernika. Wówczas z zacisków L_{IN} i N_{IN} właściwych par miernik-impedancja (np. para $a'-a''$ itd.) widoczne są gałęzie odbiornika połączonego w gwiazdę. Gałąź o zaciskach $a'-a''$ należy połączyć z zaciskami **A** i **N'** sieci. W podobny sposób połączyć gałęzie $b'-b''$ (zaciski **B** i **N'**) oraz $c'-c''$ (zaciski **C** i **N'**). Uzyskany odbiornik w połączeniu w gwiazdę o wyróżnionych zaciskach **ABC** należy połączyć z wyjściem transformatora trójfazowego 3x15V 50Hz poprzez łącznik L_1 trójsekccyjny oraz łącznik L_2 jedno-sekccyjny. Łącznik trójsekccyjny L_1 służy do podłączenia odbiornika do sieci, natomiast jedno-sekccyjny L_2 do rozwierania linii L_1 . Niesymetryczność odbiorników uzyskujemy zwierając zaciski 2 z 2' na odbiorniku Z_1 . Badania przeprowadzić dla odbiornika symetrycznego, niesymetrycznego i rozwartej jednej linii. Wyniki pomiarów wpisać do tabeli 2.

Tabela 2

Odbiornik połączony w gwiazdę (sieć 3 przewodowa)		Symetryczny	Niesymetryczny	
			Zwarte 2-2'	Rozwarta linia L ₁ .
P ₁	W			
U ₁	V			
I ₁	mA			
cos(φ ₁)				
P ₂	W			
U ₂	V			
I ₂	mA			
cos(φ ₂)				
P ₃	W			
U ₃	V			
I ₃	mA			
cos(φ ₃)				

5.5.2.2. Pomiary dla sieci 4 przewodowej

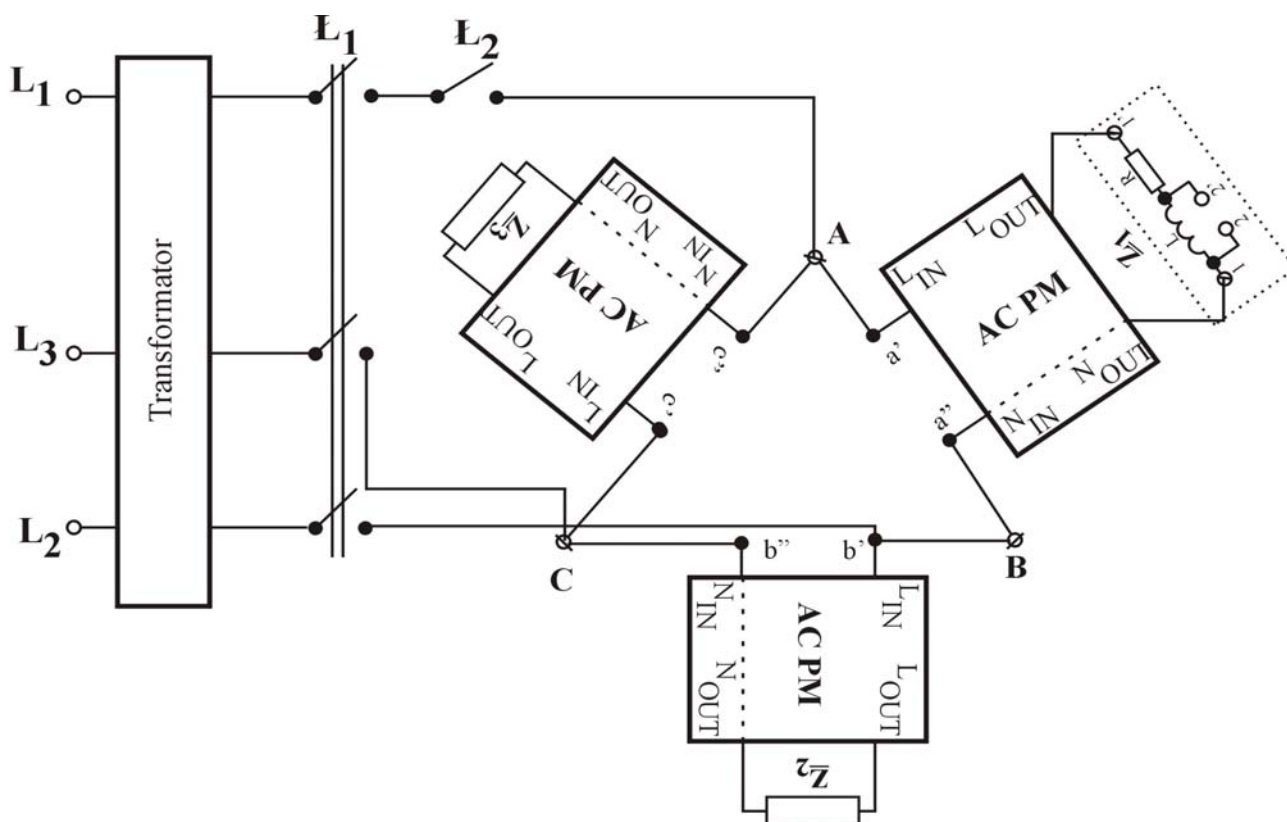
Pomiary mocy odbiornika w sieci 4 przewodowej przeprowadzamy w układzie jak na rys.5.21 po wprowadzeniu dodatkowego połączenia punktów neutralnych sieci N z punktem neutralnym N' odbiornika (linia przerywana na schemacie). Ponadto w linię dodatkowej należy włączyć amperomierz A_N. Pomiary wykonać dla przypadków jak w sieci 3 przewodowej. Wyniki wpisać do tabeli 3.

Tabela 3

Odbiornik połączony w gwiazdę (sieć 4 przewodowa)		Symetryczny	Niesymetryczny	
			Zwarte 2-2'	Rozwarta linia L ₁ .
P ₁	W			
U ₁	V			
I ₁	mA			
cos(φ ₁)				
P ₂	W			
U ₂	V			
I ₂	mA			
cos(φ ₂)				
P ₃	W			
U ₃	V			
I ₃	mA			
cos(φ ₃)				
I _N	mA			

5.5.3. Badania odbiornika połączonego w trójkąt

Zmontować układ pomiarowy zgodnie z rys.5.22. Badania przeprowadzić dla takich samych przypadków co w punkcie 5.5.2. Wyniki pomiarów wpisać do tabeli 4.



Rys.5.22. Układ pomiarowy do badania odbiornika połączonego w trójkąt

Tabela 4

Odbiornik połączony w trójkąt		Symetryczny	Niesymetryczny	
			Zwarte 2-2'	Rozwarta linia L ₁ .
P ₁	W			
U ₁	V			
I ₁	mA			
cos(φ ₁)				
P ₂	W			
U ₂	V			
I ₂	mA			
cos(φ ₂)				
P ₃	W			
U ₃	V			
I ₃	mA			
cos(φ ₃)				

5.6. Opracowanie wyników:

- obliczyć rezystancję R_k fazy odbiornika

$$R_k = \frac{P_k}{I_k^2} \quad (5.41)$$

i pozostałe wielkości wyszczególnione w tabeli 4,

- narysować wykresy wskazowe prądów i napięć na odbiorniku dla wszystkich badanych przypadków.

Dla odbiornika połączonego w trójkąt obliczenia poszczególnych parametrów zawartych w tab.5. dotyczą średnich wartości fazowych.

Tabela 5

		Odbiornik symetryczny			Odbiornik niesymetryczny					
		Gwiazda		Trójkąt	Rozwarcie L_1			Zwarcie 2-2'		
		3	4	3	Gwiazda	Trójkąt	Gwiazda	Trójkąt	Gwiazda	Trójkąt
Liczba przewodów		3	4	3	3	4	3	3	4	3
R_1	Ω				∞	∞		0	0	0
R_2	Ω									
R_3	Ω									
x_1	Ω				∞	∞				
x_2	Ω									
x_3	Ω									
$\text{tg } \varphi_1$	-				-	-				
$\text{tg } \varphi_2$	-									
$\text{tg } \varphi_3$	-									
φ_1	$[\text{ }^\circ]$				-	-		90°	90°	90°
φ_2	$[\text{ }^\circ]$									
φ_3	$[\text{ }^\circ]$									
$\cos \varphi_1$	-				-	-		0	0	0
$\cos \varphi_2$	-									
$\cos \varphi_3$	-									
$\sin \varphi_1$	-				-	-		1	1	1
$\sin \varphi_2$	-									
$\sin \varphi_3$	-									
Z_1	Ω				∞	∞				
Z_2	Ω									
Z_3	Ω									
P	W									
Q	var									
S	VA									

Literatura:

- [1] Z. Włodarczyk: Elektrotechnika cz. III Skrypt WAT, 1980.
- [2] B. Miedziński: Elektrotechnika. Podstawy i instalacje elektryczne. PWN, 1997.