

Ćwiczenie S 20

BADANIE PRZESYŁU ENERGII ELEKTRYCZNEJ LINIAMI ELEKTROENERGETYCZNYMI

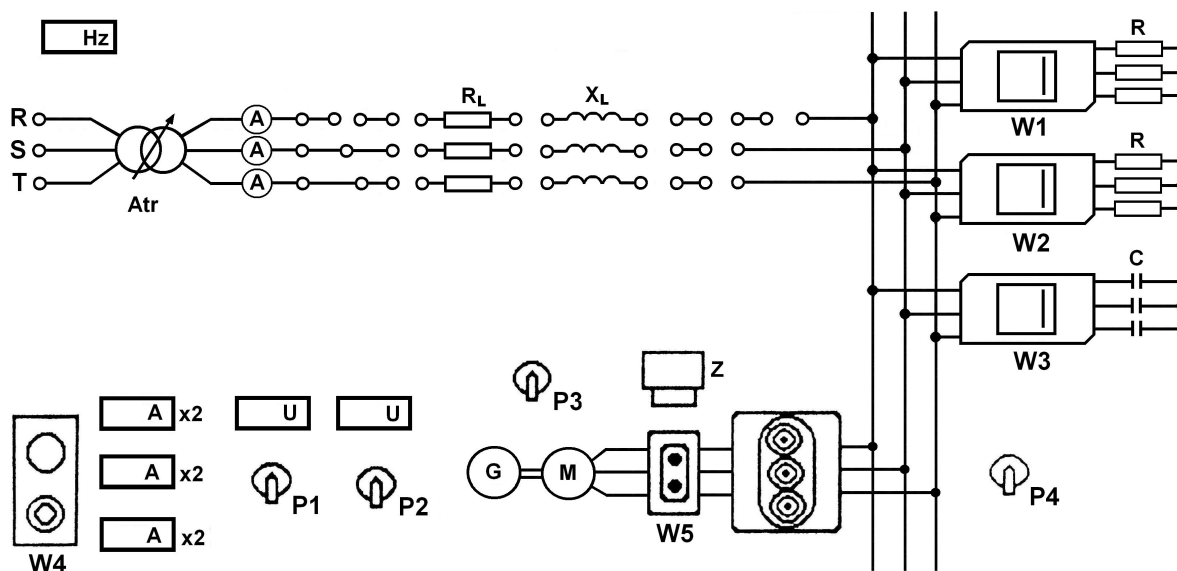
1. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest pokazanie na modelu fizycznym linii elektroenergetycznej podstawowych zjawisk występujących przy przesyłaniu energii. W szczególności zwrócona zostanie uwaga na następujące zjawiska:

- spadki i straty napięcia;
- straty mocy czynnej i biernej;
- kompensacja mocy biernej;
- regulacja napięcia w sieci elektroenergetycznej.

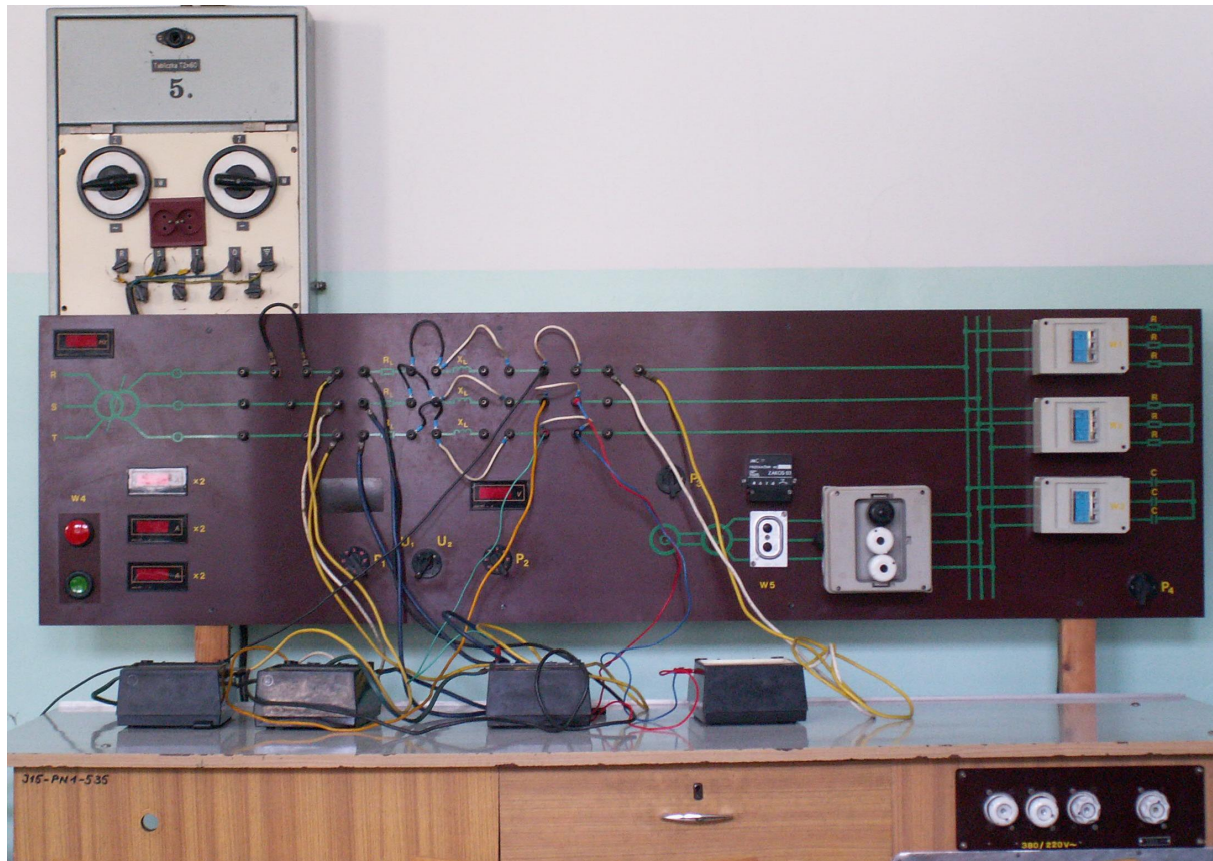
2. Opis stanowiska laboratoryjnego

Schemat płyty czołowej omawianego stanowiska laboratoryjnego przedstawiony został na rys 1.



Rys. 1. Schemat płyty czołowej laboratoryjnego stanowiska pomiarowego

Natomiast widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na fot. 1.



Fot. 1. Widok stanowiska pomiarowego do badania przesyłu energii elektrycznej

Objaśnienie oznaczeń z rys. 1.

Atr	autotransformator;
R_L	rezystancja linii
X_L	reaktancja linii;
W1,W2,W3	wyłączniki;
R	obciążenie czynne;
C	bateria kondensatorów;
A	amperomierz;
V	woltomierz;
Hz	częstotliwościomierz;
Z	zabezpieczenie podnapięciowe silnika;
P1, P2	przełączniki woltomierzowe;
P3	przełącznik obciążenia silnika;
P4	przełącznik stopni baterii kondensatorów
o	zaciski umożliwiające przyłączenie mierników do pomiaru mocy czynnych i biernych

W skład stanowiska laboratoryjnego wchodzi następujące elementy:

- Transformator o regulowanej przekładni, pozwalający na uzyskanie napięć wtórnych w zakresie 24...244V przy prądzie znamionowym $I_n=15A$;
- Trójfazowy model linii elektroenergetycznej składający się z odpowiednio łączonych elementów:
 - rezystancji $R_L=3,6 \Omega$;
 - reaktancji $X_L = 5,2 \Omega$
- Odbiory o charakterze czynnym i biernym:
 - obciążenie czynne zamodelowane za pomocą dwóch zespołów grzałek o mocy $P_n = 2,4 \text{ kW}$ każdy;
 - obciążenie indukcyjne zamodelowane za pomocą silnika indukcyjnego typu SZJe24b o danych znamionowych:
 $P_n=2,2 \text{ kW}$ $U_n=380 \text{ V}$ $I_n=5,2 \text{ A}$
napędzającego prądnicę prądu stałego o danych znamionowych:
 $P_n=2,2 \text{ kW}$ $U_n=230 \text{ V}$ $I_n=5,2 \text{ A}$
Prądnica w tym przypadku modeluje obciążenie silnika – maszynę napędzaną przez silnik;
 - obciążenie pojemnościowe (źródło mocy biernej indukcyjnej) składające się z trójczłonowej baterii kondensatorów o pojemnościach:
I człon: $8 \mu\text{F}$ II człon: $28 \mu\text{F}$ III człon: $8 \mu\text{F}$
Poszczególne człony baterii włączane są kolejno, co pozwala na uzyskanie na kolejnych stopniach kompensacji pojemności:
I człon: $8 \mu\text{F}$ II człon: $36 \mu\text{F}$ III człon: $44 \mu\text{F}$
- Układ zabezpieczeń stanowiska
Sieć zasilająca stanowisko laboratoryjne stanowi układ sieciowy typu TN–C–S, same stanowisko zasilane jest z części separowanej tj. mającej oddzielnie prowadzone przewody' neutralny N i ochronny PE. Układ ten umożliwia stosowanie ochrony przeciwporażeniowej przez samoczynne wyłączanie zasilania również za pomocą wyłączników różnicowoprądowych. Układ zabezpieczeń stanowiska składa się z:

- zabezpieczenia elementów grzejnych wyłącznikiem typu NLS 3-3/B6 firmy Schupa o charakterystyce prądowej typu B i prądzie znamionowym $I_n = 6 \text{ A}$,
- zabezpieczenia baterii kondensatorów wyłącznikiem jak wyżej;
- zabezpieczenia silnika, w skład którego wchodzi:
 - bezpieczniki o prądzie znamionowym $I_n = 6 \text{ A}$;
 - wyzwalacz termiczny o nastawach $I = 3,4-4,6 \text{ A}$;
 - przekaźnik ZAKOS 03 chroniący silnik przed zanikiem lub obniżeniem napięcia, zmianą kolejności faz i asymetrią napięć zasilających,
- zabezpieczenia autotransformatora składającego się z bezpieczników o prądzie znamionowym $I_n = 10 \text{ A}$ i charakterystyce zwłocznej;
- zabezpieczenia stanowiska laboratoryjnego bezpiecznikami o prądzie znamionowym $I_n = 25 \text{ A}$ i charakterystyce bezzwłocznej,
- wyłącznika różnicowoprądowego do ochrony przeciwporażeniowej typu BS 4293 o prądzie znamionowym $I_n = 63 \text{ A}$ i znamionowym prądzie różnicowym $I_r = 0,03 \text{ A}$;
- wszystkie części przewodzące dostępne (tj. takie, które w stanie zakłóceniovym mogą znaleźć się pod napięciem) połączone są z przewodem ochronnym,
- zabezpieczenia obwodów pomocniczych bezpiecznikami o prądzie znamionowym $I_n = 6 \text{ A}$ i charakterystyce bezzwłocznej;
- Układ pomiarowy umożliwiający pomiar:
 - prądów fazowych linii;
 - częstotliwości napięcia zasilającego;
 - wszystkich napięć na początku i końcu linii;
 - mocy czynnej i biernej na początku i końcu linii

3. Program ćwiczenia

Należy dla linii elektroenergetycznej modelowanej kolejno za pomocą:

- samej rezystancji R_L ;
- rezystancji R_L i reaktancji X_L ;

wykonać pomiary napięć, prądów, mocy czynnej i biernej (wg załączonej tabeli), dla następujących przypadków:

- kompensacji silnika (silnik pracuje bez obciążenia),
- włączenia obciążenia czynnego (silnik skompensowany),
- regulacji napięcia transformatorem;
- zrzutu obciążenia;
- wyłączenia baterii.

4. Przebieg ćwiczenia – czynności łączeniowe

4.1. Kompensacja mocy biernej silnika

- a) Połączyć na płycie czołowej stanowiska wybrany model linii zasilającej.
- b) Przekręcić w prawo wyłącznik prądu przemiennego na naściennej tablicy zasilającej (podajemy w ten sposób napięcie na autotransformator i obwody pomocnicze stanowiska).
- c) Ustawić pokrętkę regulacyjną autotransformatora w położeniu „min”.
- d) Podać napięcie na linię zasilającą przyciskiem W4.
- e) Ustawić za pomocą autotransformatora napięcie fazowe na końcu linii równe 220 V.
- f) Załączyć silnik przyciskiem W5. *Uwaga: przycisk załączający silnik należy trzymać wciśnięty do momentu zapalenia się diody na przekaźniku podnapięciowym „Z”.*
- g) Zapisać wskazania mierników według załączonej tabeli (Wyniki pomiarów). Wyłącznikiem W3 załączyć pierwszy stopień baterii kondensatorów (przy przełączniku P4 w pozycji 1).
- h) Zapisać wskazania mierników według załączonej tabeli. Przełącznikiem P4 załączyć drugi stopień baterii kondensatorów (przełącznik w pozycji 2.)
- i) Zapisać wskazania mierników według załączonej tabeli. Przełącznikiem P4 załączyć trzeci stopień baterii kondensatorów (przełącznik w pozycji 3.) Zapisać wskazania mierników według załączonej tabeli.

4.2. Włączenie rezystora

- a) Ustawić przełącznik P4 w pozycji 2 (załączony drugi stopień baterii kondensatorów).

- b) Załączyć wyłącznikiem W1 lub W2 obciążenie czynne.
- c) Zapisać wskazania mierników według załączonej tabeli.

4.3. Regulacja napięcia autotransformatorem

- a) Za pomocą pokrętła regulacyjnego autotransformatora podnieść napięcie fazowe na końcu linii do poziomu 220 V.
- b) Zapisać wskazania mierników według załączonej tabeli.

4.4. Zrzut obciążenia

- a) Wyłączyć obciążenie czynne wyłącznikiem W1 lub W2.
- b) Zapisać wskazania mierników według załączonej tabeli.

4.5. Wyłączenie baterii kondensatorów

- a) Włączyć pierwszy stopień baterii kondensatorów przez ustawienie przełącznika P4 w pozycji 1.
- b) Wyłączyć baterię kondensatorów wyłącznikiem W3.
- c) Zapisać wskazania mierników według załączonej tabeli.

4.6. Zakończenie pomiarów

- a) Wyłączyć silnik przyciskiem W5.
- b) Ustawić napięcie fazowe na końcu linii równe 200 V.
- c) Włączyć samą baterię kondensatorów wyłącznikiem W3 i ustawić trzeci stopień przez ustawienie przełącznika P4 w pozycji 3.
- d) Zaobserwować różnice napięć fazowych na początku i końcu linii.
- e) Cofnąć przełącznik P4 do pozycji 1 i wyłączyć baterię wyłącznikiem W3.

5. Opracowanie sprawozdania

Sprawozdanie z ćwiczenia powinno zawierać:

- Tabele z wynikami pomiarów i obliczeń.
- Wykresy wskazowe dla czterech przypadków kompensacji mocy biernej silnika w modelu linii zawierającym rezystancję i reaktancję indukcyjną (lub innych - podanych przez prowadzącego) z uwzględnieniem prądów fazowych wszystkich odbiorów, napięcia fazowego na końcu linii (narysowanego w osi liczb rzeczywistych), składowych fazowej straty napięcia w linii (narysowanych

w tej samej skali co napięcie na końcu linii) oraz napięcia fazowego na początku linii.

- Wykresy zależności $I_{sr} = f(C)$, $\delta U_0 = f(C)$, $\Delta P_0 = f(C)$, $\Delta Q_0 = f(C)$, sporządzone na podstawie tabel (pozycja „Kompensacja mocy biernej silnika”) dla obu modeli linii. Każdy z wykresów powinien zawierać po dwie linie łamane poprowadzone między czterema punktami uzyskanymi dla różnych wartości pojemności kompensacyjnej fazowej C ($0 \mu\text{F}$, $8 \mu\text{F}$, $36 \mu\text{F}$ i $44 \mu\text{F}$ - na liniowej skali C), odpowiadające obu modelom linii.
- Ustosunkowanie się do ewentualnych różnic między wartościami zmierzonymi (indeks „z”) i obliczonymi (indeks „o”) tych samych wielkości.
- Skomentowanie efektów kompensacji mocy biernej.
- Skomentowanie skutków przyłączenia na końcu linii samej baterii kondensatorów (wg p. 4.6) w obu modelach linii.

6. Pytania kontrolne

1. Jakie wartości może przyjmować spadek napięcia w linii elektroenergetycznej:
 - a) modelowanej rezystancją
 - b) modelowanej rezystancją i reaktancją indukcyjną.
2. Od czego zależy charakter prądu płynącego linią (tzn. prąd indukcyjny, prąd pojemnościowy)?
3. Na jakie wielkości i w jaki sposób wpływamy dołączając na końcu linii baterię kondensatorów?
4. Czy zerowy spadek napięcia w linii jest równoważny zerowej stracie napięcia?
5. Od czego zależą straty mocy w linii elektroenergetycznej?
6. Jakiego rodzaju straty mocy występują w linii modelowanej rezystancją i reaktancją przy obciążeniu linii odbiornikiem czysto rezystancyjnym?
7. Omówić pomiar mocy czynnej w obwodach trójfazowych.
8. W jaki sposób można dokonać watomierzem pomiarów mocy biernej w linii trójfazowej?

Załącznik 1.

Ćwiczenie S20 - wyniki pomiarów i obliczeń

Tabela 1. Wyniki pomiarów – linia modelowana za pomocą samej rezystancji ($R_L = 3,6 \Omega$, $X_L = 0 \Omega$)

st.	U_{Rp}	U_{Sp}	U_{Tp}	U_{Rk}	U_{Sk}	U_{Tk}	I_R	I_S	I_T	P_{Rp}	P_{Sp}	P_{Tp}	P_{Rk}	P_{Sk}	P_{Tk}	Q_{Rp}	Q_{Sp}	Q_{Tp}	Q_{Rk}	Q_{Sk}	Q_{Tk}
komp.	V	V	V	V	V	V	A	A	A	W	W	W	W	W	W	var	var	var	var	var	var
1. Kompensacja mocy biernej silnika																					
bez																					
I st.																					
II st.																					
III st.																					
2. Włączenie rezystorów (I komplet – wyłącznikiem W1)																					
II st.																					
3. Regulacja napięcia autotransformatorem																					
II st.																					
4. Zrzut obciążenia (wyłączenie rezystorów)																					
II st.																					
5. Wyłączenie baterii kondensatorów (włączony jedynie silnik)																					
bez																					

Tabela 2. Wyniki obliczeń – linia modelowana za pomocą samej rezystancji ($R_L = 3,6 \Omega$, $X_L = 0 \Omega$)

st.	U_{srp}	U_{srk}	I_{sr}	P_p	P_k	φ_p	φ_k	$\cos \varphi_k$	δU_z	δU_o	ΔU_R	ΔU_x	ΔU	ΔP_z	ΔP_o	Q_p	Q_k	ΔQ_z	ΔQ_o
komp.	V	V	A	W	W	°	°	-	V	V	V	V	V	W	W	var	var	var	var
1. Kompensacja mocy biernej silnika																			
bez																			
I st.																			
II st.																			
III st.																			
2. Włączenie rezystorów (I komplet – wyłącznikiem W1)																			
II st.																			
3. Regulacja napięcia autotransformatorem																			
II st.																			
4. Zrzut obciążenia (wyłączenie rezystorów)																			
II st.																			
5. Wyłączenie baterii kondensatorów (włączony jedynie silnik)																			
bez																			

Tabela 3. Wyniki pomiarów – linia modelowana za pomocą rezystancji i reaktancji indukcyjnej ($R_L = 3,6 \Omega$, $X_L = 5,2 \Omega$)

st.	U_{Rp}	U_{Sp}	U_{Tp}	U_{Rk}	U_{Sk}	U_{Tk}	I_R	I_S	I_T	P_{Rp}	P_{Sp}	P_{Tp}	P_{Rk}	P_{Sk}	P_{Tk}	Q_{Rp}	Q_{Sp}	Q_{Tp}	Q_{Rk}	Q_{Sk}	Q_{Tk}
komp.	V	V	V	V	V	V	A	A	A	W	W	W	W	W	W	var	var	var	var	var	var
1. Kompensacja mocy biernej silnika																					
bez																					
I st.																					
II st.																					
III st.																					
2. Włączenie rezystorów (I komplet – wyłącznikiem W1)																					
II st.																					
3. Regulacja napięcia autotransformatorem																					
II st.																					
4. Zrzut obciążenia (wyłączenie rezystorów)																					
II st.																					
5. Wyłączenie baterii kondensatorów (włączony jedynie silnik)																					
bez																					

Tabela 4. Wyniki obliczeń – linia modelowana za pomocą rezystancji i reaktancji indukcyjnej ($R_L = 3,6 \Omega$, $X_L = 5,2 \Omega$)

st.	U_{srp}	U_{srk}	I_{sr}	P_p	P_k	φ_p	φ_k	$\cos \varphi_k$	δU_z	δU_o	ΔU_R	ΔU_x	ΔU	ΔP_z	ΔP_o	Q_p	Q_k	ΔQ_z	ΔQ_o
komp.	V	V	A	W	W	°	°	-	V	V	V	V	V	W	W	var	var	var	var
1. Kompensacja mocy biernej silnika																			
bez																			
I st.																			
II st.																			
III st.																			
2. Włączenie rezystorów (I komplet – wyłącznikiem W1)																			
II st.																			
3. Regulacja napięcia autotransformatorem																			
II st.																			
4. Zrzut obciążenia (wyłączenie rezystorów)																			
II st.																			
5. Wyłączenie baterii kondensatorów (włączony jedynie silnik)																			
bez																			

Załącznik 2.

Ćwiczenie S20 – wzory potrzebne do obliczeń

$$U_{\dot{s}rp} = \frac{U_{Rp} + U_{Sp} + U_{Tp}}{3}$$

$$U_{\dot{s}rk} = \frac{U_{Rk} + U_{Sk} + U_{Tk}}{3}$$

$$I_{\dot{s}r} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3}$$

$$P_p = P_{Rp} + P_{Sp} + P_{Tp}$$

$$P_k = P_{Rk} + P_{Sk} + P_{Tk}$$

$$\varphi_p = \arctg \frac{Q_p}{P_p}$$

$$\varphi_k = \arctg \frac{Q_k}{P_k}$$

$$\delta U_z = U_{\dot{s}rp} - U_{\dot{s}rk}$$

$$\delta U_o = R_L I_{\dot{s}r} \cos \varphi_k + X_L I_{\dot{s}r} \sin \varphi_k$$

$$\Delta U_R = I_{\dot{s}r} R_L$$

$$\Delta U_X = I_{\dot{s}r} X_L$$

$$\Delta U = \sqrt{\Delta U_R^2 + \Delta U_X^2}$$

$$\Delta P_z = P_p - P_k$$

$$\Delta P_o = 3I_{\dot{s}r}^2 R_L$$

$$\Delta Q_z = Q_p - Q_k$$

$$\Delta Q_o = 3I_{\dot{s}r}^2 X_L$$

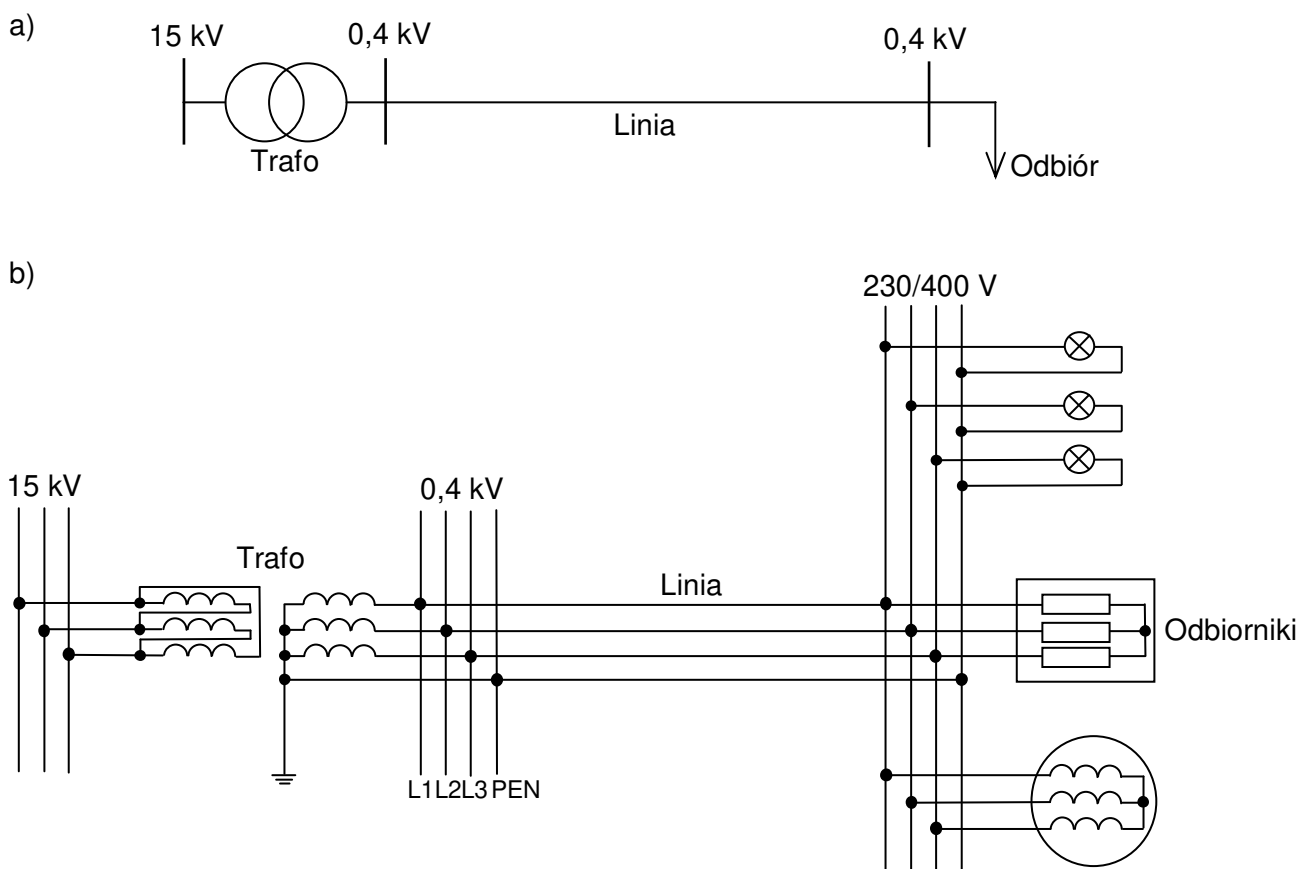
Podstawy teoretyczne – do ćwiczenia S20

Wprowadzenie

Prąd elektryczny przepływając przez sieć napotyka opór. Istnienie oporu powoduje powstanie:

- spadków napięcia,
- strat napięcia
- strat mocy i energii

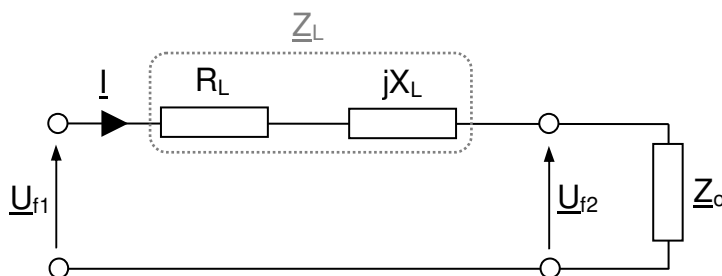
Na rys. 1. pokazany został przykładowy schemat fragmentu sieci zawierający linię przesyłową niskiego napięcia obciążoną na końcu odbiorem. Odbiór jest zbiorem odbiorników trójfazowych i jednofazowych: siłowych, oświetleniowych i grzewczych. Schemat zastępczy układu linia przesyłowa - odbiory może zostać zamodelowany jako układ połączonej szeregowo impedancji linii i impedancji odbiornika.



Rys. 1. Schemat fragmentu sieci zasilającej odbiory niskiego napięcia:

a) schemat uproszczony jednokreskowy b) schemat szczegółowy

Dla odbiorników trójfazowych symetrycznych zasilanych ze symetrycznej sieci można posługiwać się schematem zastępczym jednofazowym. Jeżeli odbiorniki jednofazowe są równomiernie rozłożone na trzy fazy to można je również traktować jako jeden symetryczny odbiornik 3-fazowy i również posługiwać się w obliczeniach schematem zastępczym jednofazowym. Schemat zastępczy przedstawiony jest na rys. 2



Rys. 2. Schemat zastępczy obciążonej linii

Rezystancja linii R_L odwzorowuje rezystancję przewodu fazowego linii zasilającej, a reaktancja X_L reaktancję linii. Ze względu na symetrię trójfazowego obwodu linii i odbiorników suma prądów fazowych równa się zero i w przewodzie neutralnym (powrotnym) prąd nie płynie. W związku z tym przewód powrotny na schemacie zastępczym jest przewodem bezimpedancyjnym (bezoporowym). Taki sam schemat zastępczy można stosować również dla linii średniego napięcia (do 30 kV włącznie dla linii; napowietrznych i wyłącznie dla linii kablowych). W liniach tych, ze względu na symetrię obciążenia przewód powrotny fizycznie nie występuje, linia składa się z trzech przewodów fazowych.

Rozważany schemat zastępczy (z rys. 2.) składa się z :

- o R_L - rezystancji linii,
- o X_L - reaktancji linii,
- o Z_0 - impedancji odbiornika;
- o napięcie U_{f1} jest napięciem fazowym na początku linii,
- o napięcie U_{f2} jest napięciem fazowym na końcu linii.

Strata napięcia i spadek napięcia

Stratą napięcia ΔU w linii nazywamy różnicę wartości skutecznych wektorów napięć w dwóch punktach sieci (np. między początkiem 1 i końcem 2 linii):

$$\Delta U = U_{f1} - U_{f2} = I Z_L$$

Spadkiem napięcia δU nazywamy algebraiczną różnicę wartości skutecznych napięć w dwóch punktach sieci:

$$\delta U = U_{f1} - U_{f2}$$

Zachodzi bardzo istotna różnica między stratą i spadkiem napięcia. Strata napięcia równa iloczynowi $I Z_L$ występuje zawsze, ilekroć przez linię o oporności Z_L płynie prąd I , natomiast w zależności od rodzaju impedancji i przesunięcia fazowego prądu (wynikającego z charakteru obciążenia linii), przy tej samej wartości bezwzględnej straty napięcia, spadek napięcia może być:

- a) dodatni,
- b) ujemny (tzn. że występuje na końcu linii wzrost napięcia, zamiast obniżenia),
- c) równy zeru.

Straty napięcia i spadki napięcia dla trzech wymienionych przypadków graficznie przedstawiono na wykresach wskazowych (rys. 3.)

Ujemny spadek napięcia może wystąpić jedynie w linii, dla której reaktancja nie równa się zero. Stosunkowo dużą reaktancję mają linie napowietrzne.

W liniach niskiego i średniego napięcia (do 30 kV włącznie dla linii napowietrznych i wyłącznie dla linii kablowych) spadek napięcia można obliczać z uproszczonej zależności:

$$\delta U = I' \cdot R_L - I'' \cdot X_L = R_L \cdot I \cos \varphi + X_L \cdot I \sin \varphi$$

przy założeniu, że wektor napięcia leży na osi liczb rzeczywistych

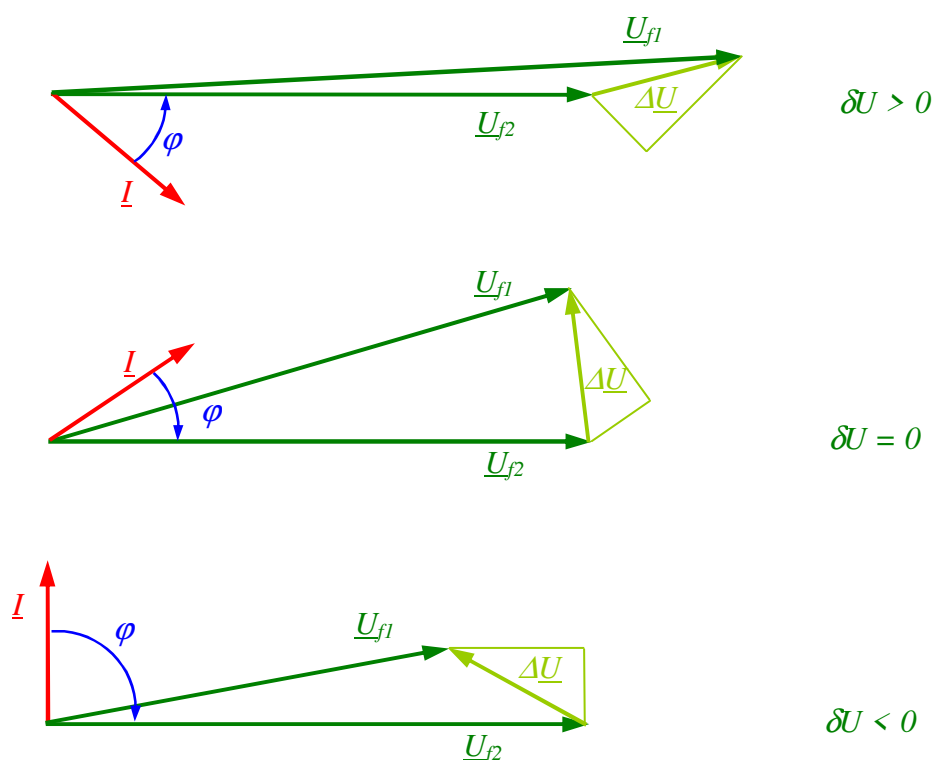
$$I = I' + jI'' = I(\cos \varphi - j \sin \varphi)$$

$$I' = I \cos \varphi - \text{część rzeczywista prądu,}$$

$$I'' = I \sin \varphi - \text{część urojona prądu,}$$

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i$$

Należy pamiętać, aby do powyższego wzoru wstawiać wartości kąta φ odbioru z odpowiednim znakiem (+) gdy ma charakter indukcyjny (-) gdy ma charakter pojemnościowy.



Rys. 3. Straty i spadki napięcia w linii dla różnych przypadków obciążenia

Straty mocy czynnej i biernej

Wszędzie gdzie w. sieci występuje rezystancja, powstaje na niej strata mocy czynnej. Stracona moc, zgodnie z prawem Joule'a zamienia się na ciepło. Straty mocy czynnej obniżają sprawność przesyłania energii elektrycznej. Ponadto powodują nagrzewanie urządzeń sieciowych, co zmusza do odpowiedniego wymiarowania urządzeń tak, aby temperatura nie przekraczała wartości dopuszczalnych dla materiałów, z których są wykonane. Straty powiększają również koszty urządzeń sieciowych, ponieważ urządzenia, poczynając od elektrowni a kończąc na instalacjach niskiego napięcia, muszą być dostosowane do wytwarzania i przesyłania mocy zwiększonej o wartość strat mocy czynnej.

Straty mocy biernej powstają na skutek istnienia w liniach, transformatorach i dławikach indukcyjności. Straty te powiększają prąd rzeczywisty (moc pozorną) przy tej samej przesyłanej

mocy czynnej. Wskutek tego urządzenia sieciowe muszą być wymiarowane na nieco większe prądy i nieco większe są straty mocy czynnej oraz spadki napięć. Występowanie reaktancji jest jedynie korzystne ze względu na ograniczanie prądów zwarciovych.

Moc pozorną przesyłaną w dowolnym punkcie sieci można określić w symetrycznych układach trójfazowych z teoretycznego wzoru:

$$\underline{S} = 3\underline{U}_f \underline{I}^*$$

Moc pozorną wyrażoną jest więc liczbą zespoloną, której część rzeczywista nazywana jest mocą czynną, zaś część urojona mocą bierną. Jest ona równa iloczynowi wektora napięcia fazowego w danym punkcie sieci oraz sprzężonego wektora prądu pomnożonemu przez 3 ze względu na występowanie 3 faz.

Zakładając, że napięcie leży w osi liczb rzeczywistych można napisać (rys. 4.)

$$\underline{I} = I(\cos \varphi_i + j \sin \varphi_i)$$

ponieważ $\varphi_u = 0$

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i = -\varphi_i$$

$$\underline{I} = I(\cos \varphi - j \sin \varphi) = \underline{I}' + j\underline{I}''$$

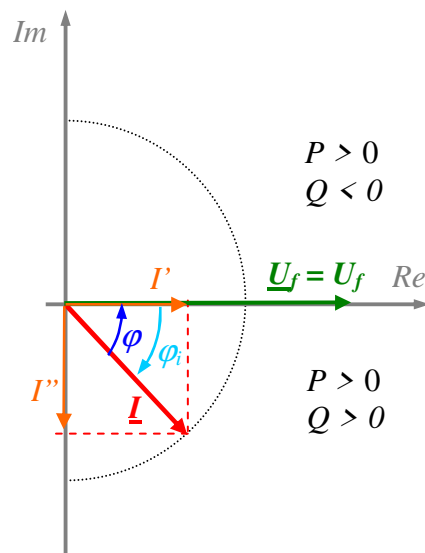
Otrzymujemy wtedy:

$$\underline{S} = 3\underline{U}_f \underline{I}^* = 3\underline{U}_f (I' - jI'') = P + jQ$$

$$P = 3U_f I' = 3U_f I \cos \varphi$$

$$Q = -3U_f I'' = 3U_f I \sin \varphi$$

gdzie: P – moc czynna pobierana przez odbiór (odbiornik)
 Q – moc bierna pobierana przez odbiór (odbiornik)



Rys. 4. Moc czynna i bierna w zależności od położenia wektora prądu

Kąt między prądem a napięciem odbiornika zmienia się w zakresie $\langle -90, +90 \rangle$ stopni, przy czym wartość $\varphi = -90^\circ$ osiąga dla obciążenia czysto pojemnościowego, a $\varphi = +90^\circ$ dla obciążenia czysto indukcyjnego (kąt φ mierzy się od wektora prądu do wektora napięcia). Jak wynika z przedstawionych wzorów moc czynna pobierana przez odbiornik w każdym przypadku spełnia warunek $P \geq 0$, natomiast moc bierna dla odbiornika o charakterze

czynno-pojemnościowym ma wartość $Q < 0$ ($\varphi < 0$), dla odbiornika o charakterze czynno-indukcyjnym $Q > 0$ ($\varphi > 0$).

Stratę mocy w dowolnym elemencie sieci można określić analogicznym wzorem:

$$\Delta S = 3\Delta U I^*$$

Ponieważ:

$$\Delta U = \underline{I}Z_L = I(R_L + jX_L)$$

Zatem;

$$\Delta S = \Delta P + j\Delta Q$$

Stąd

- strata mocy czynnej:

$$\Delta P = 3I^2 R_L$$

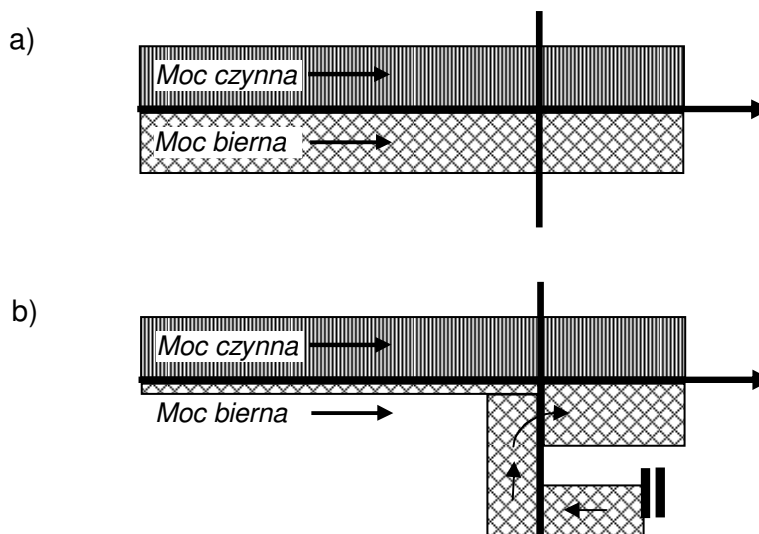
- strata mocy biernej:

$$\Delta Q = 3I^2 X_L$$

Kompensacja mocy biernej

Kompensacja mocy biernej polega na ograniczaniu przesyłania mocy biernej, czyli na poprawieniu $\cos\varphi$ odbioru. Przepływ mocy biernej liniami (jak również przez transformatory) jest niekorzystny, ponieważ powoduje dodatkowe straty mocy czynnej i zwiększa spadki napięcia. Ponieważ najczęściej odbiory mają charakter czynno-indukcyjny (albo czynny, ale wówczas nie występuje problem kompensacji) chodzi przede wszystkim o ograniczenie przesyłania mocy biernej indukcyjnej.

Najprostszym sposobem poprawy współczynnika mocy jest włączenie równoległe do odbiornika elementu pobierającego tylko moc bierną przeciwnego znaku niż moc bierna odbiornika. Inaczej mówiąc, zamiast pobierać moc bierną ze źródła energii, np. odległych elektrowni, pobiera się ją np. z baterii kondensatorów zainstalowanej w pobliżu punktów odbioru energii. Sieć zasilająca zostaje więc odciążona od przesyłu mocy biernej (rys. 5.).

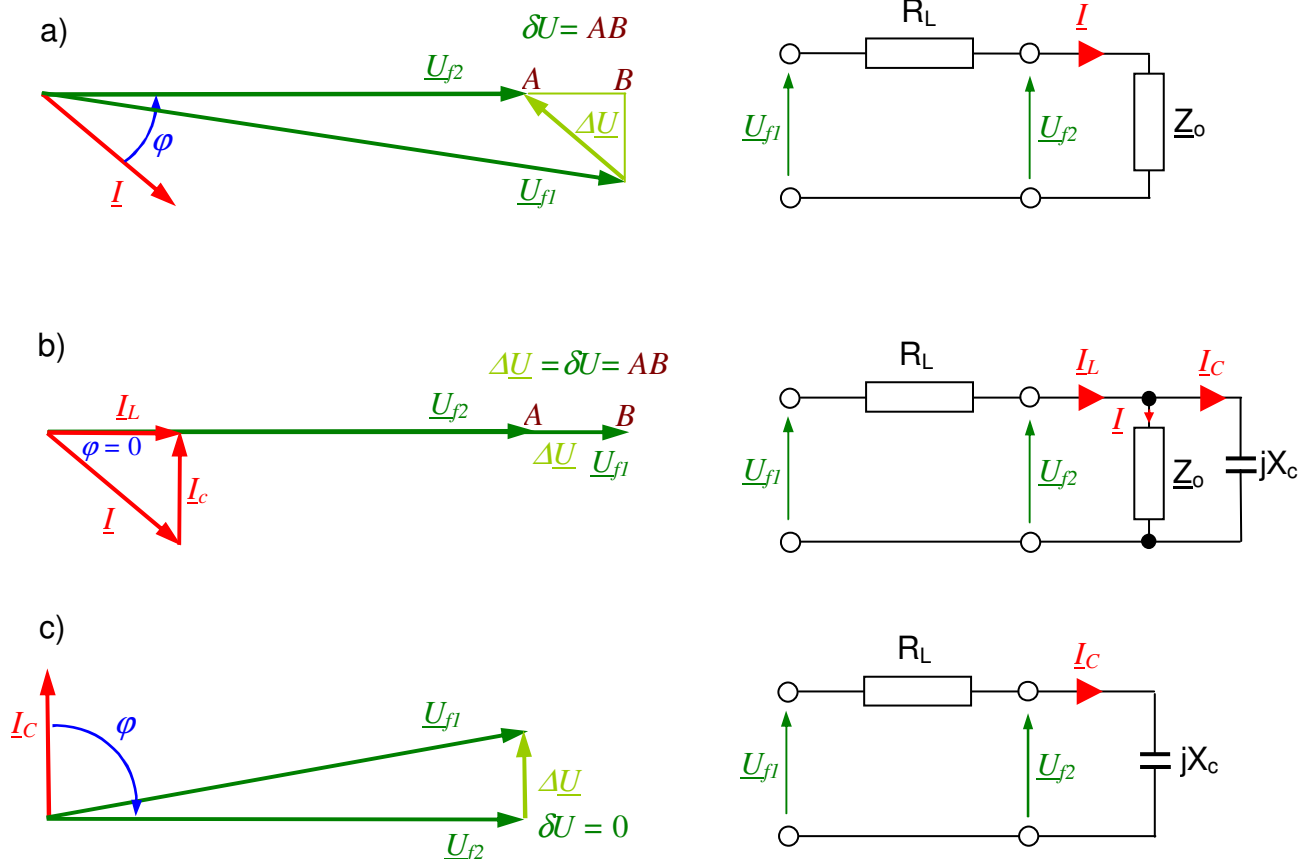


Rys. 5. Efekt kompensacji poboru mocy biernej przez instalowanie baterii kondensatorów: a) linia przed kompensacją, b) linia po kompensacji

Przykładowe wykresy wskazowe dla linii modelowanej rezystancją przedstawia rys. 6., natomiast dla linii modelowanej połączeniem szeregowym rezystancji i reaktancji rys. 7.

Rysunki te przedstawiają trzy przypadki obciążenia linii:

- a) linia obciążona odbiornikiem o charakterze czynno-indukcyjnym,
- b) przypadek kompensacji zupełnej ($\cos\varphi = 1$),
- c) zjawisko zrzutu obciążenia, czyli nagłego wyłączenia odbiornika



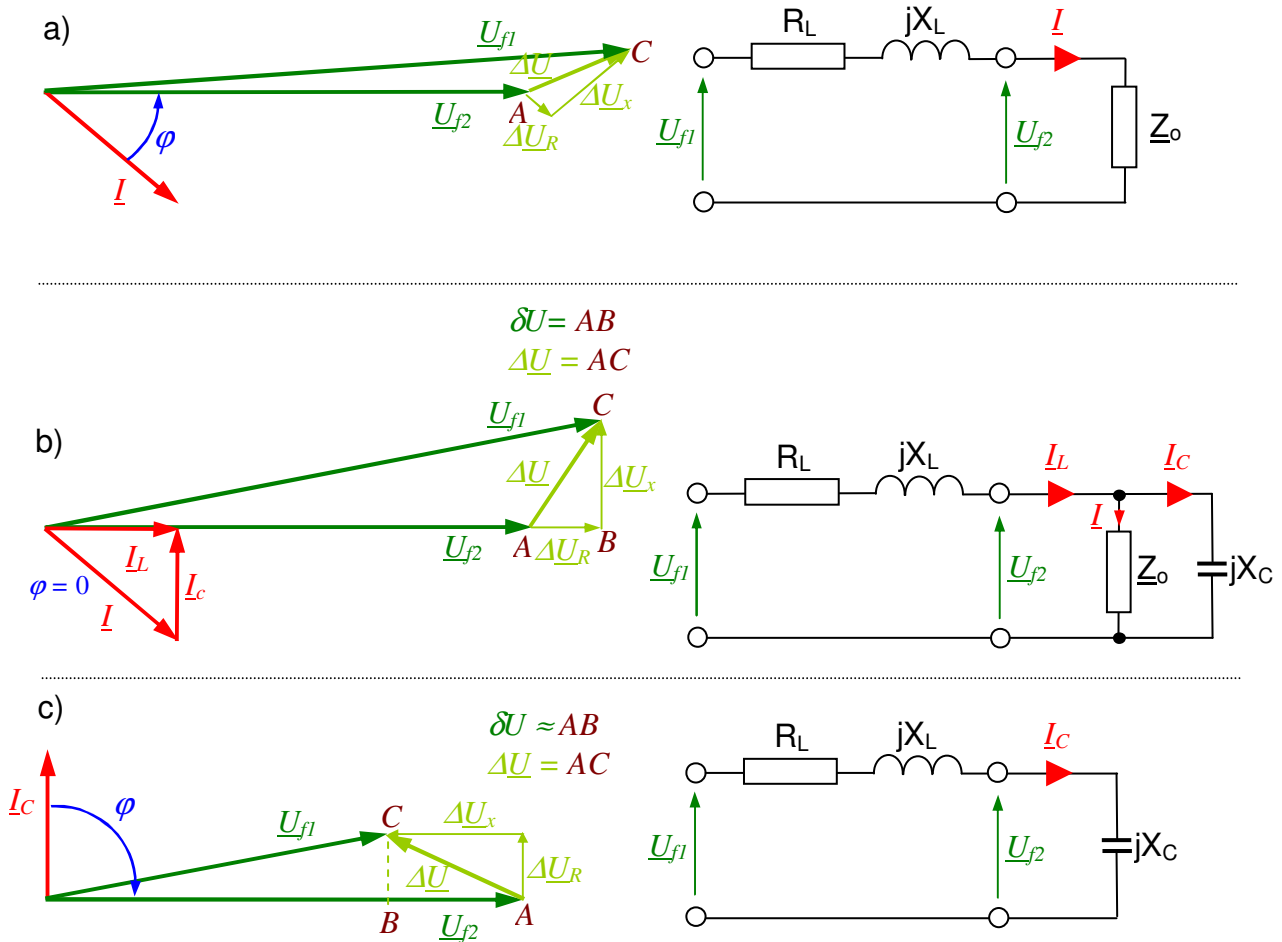
Rys. 6. Kompensacja mocy biernej i zrzut obciążenia dla linii o impedancji $Z_L = R_L$

Można zauważyć, że dla linii modelowanej rezystancją i reaktancją (rys. 7.) w przypadku b spadek napięcia uległ zmniejszeniu, a w przypadku c (po zrzucie obciążenia i przy włączonej baterii kondensatorów) ma wartość ujemną.

Sposób rysowania wykresu wskazowego zostanie omówiony na przykładzie tys. 7a.

Etapy rysowania wykresu wskazowego:

1. rozpoczynamy od narysowania napięcia \underline{U}_{f2} na końcu linii (napięcia na odbiorze) poziomo w prawo;
2. z początku wektora napięcia rysujemy pod kątem φ wektor prądu odbioru;
3. z końca wektora \underline{U}_{f2} kreślimy równoległe od prądu \underline{I} czynną stratę napięcia $\Delta\underline{U}_R$;
4. z końca $\Delta\underline{U}_R$ prostopadłe do prądu rysujemy bierną stratę napięcia;
5. rysujemy wektor napięcia na początku linii \underline{U}_{f1} - łącząc początek wykresu z końcem straty napięcia.

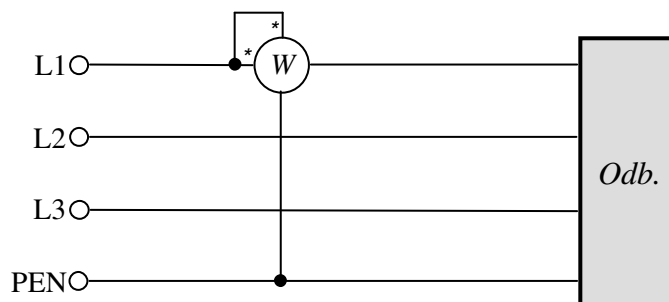


Rys. 7. Kompensacja mocy biernej i zrzut obciążenia dla linii o impedancji $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$

Pomiar mocy czynnej w obwodach trójfazowych

Układy do pomiaru mocy czynnej odbiorników trójfazowych zależą od następujących czynników:

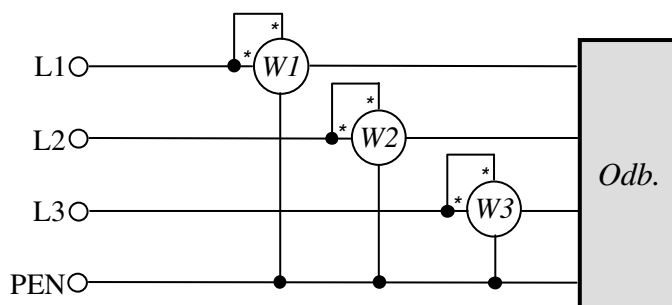
- rodzaj sieci
 - 4 – przewodowa
 - 3 – przewodowa
- rodzaj odbiornika
 - symetryczny
 - niesymetryczny
- Sieć 4 – przewodowa
 - odbiornik symetryczny



Watomierz W mierzy moc jednej fazy, a zatem jeżeli pomnożymy jego wskazanie przez 3 to otrzymamy moc odbiornika.

$$P_{odb} = 3P_W$$

- odbiornik niesymetryczny

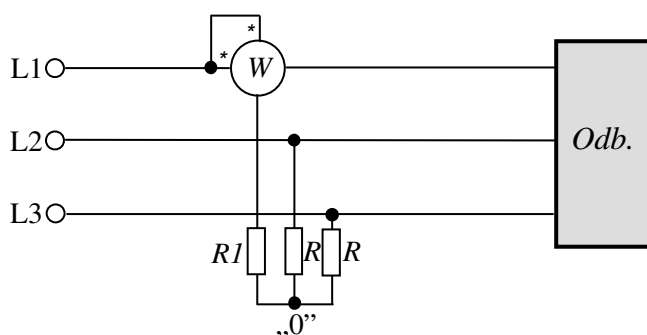


Poszczególne watomierze $W1$, $W2$, $W3$ mierzą moce poszczególnych faz odbiornika, a zatem jeżeli dodamy do siebie wskazanie poszczególnych watomierzy to otrzymamy moc odbiornika.

$$P_{odb} = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}$$

□ Sieć 3 – przewodowa

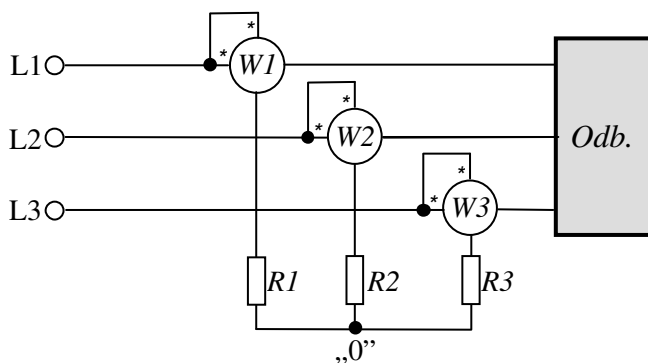
- odbiornik symetryczny



Za pomocą watomierza W mierzymy moc jednej fazy. Problem jest z tzw. punktem zerowym odbiornika, który jest niedostępny. Wobec tego watomierz łączymy w taki sposób aby stworzyć sztuczny punkt zerowy. Sztuczny punkt zerowy uzyskujemy tworząc symetryczną gwiazdę rezystancji. Oporniki R_1 , R muszą spełniać zależność: $R_1 + R_{wn} = R$ gdzie R_{wn} – rezystancja obwodu napięciowego watomierza. A zatem moc odbiornika:

$$P_{odb} = 3P_W$$

- odbiornik niesymetryczny



I w tym przypadku zachodzi potrzeba stworzenia sztucznego punktu zerowego. Jeżeli watomierze $W1$, $W2$, $W3$ są różne, to w celu stworzenia punktu zerowego włączamy oporniki o wartościach spełniających równość:

$$R_{wn1}R_1 = R_{wn2}R_2 = R_{wn3}R_3$$

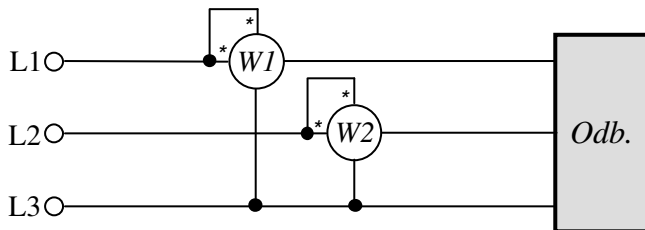
Moc odbiornika jest sumą wskazań poszczególnych watomierzy:

$$P_{odb} = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}$$

Uwaga: poszczególne watomierze nie wskazują mocy poszczególnych faz, ponieważ w odbiorniku niesymetrycznym punkty zerowe: sztuczny i rzeczywisty nie pokrywają się.

- odbiornik dowolny, symetryczny lub niesymetryczny (układ Arona)

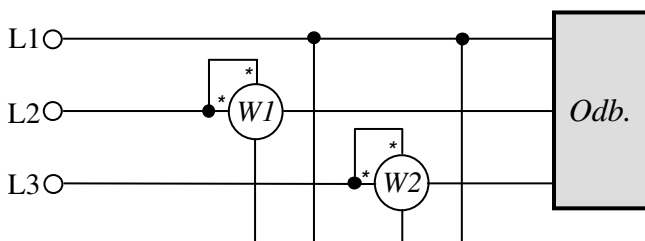
→ watomierze włączono w fazę pierwszą (L1) i drugą (L2)



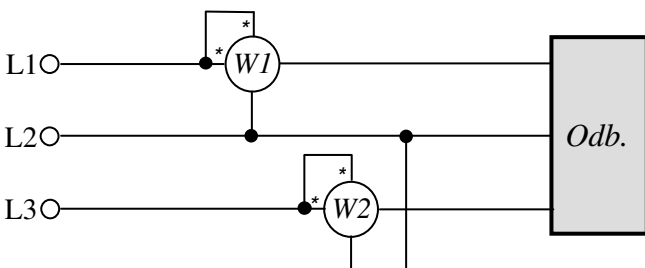
W przypadku linii 3-przewodowej, korzystając z dwóch watomierzy można zmierzyć moc odbiornika bez względu czy jest on symetryczny czy też nie. Suma wskazań watomierzy W1 i W2 daje moc pobieraną przez odbiornik:

$$P_{odb} = P_{W1} + P_{W2}$$

→ watomierze włączono w fazę drugą (L2) i trzecią (L3)



→ watomierze włączono w fazę pierwszą (L1) i trzecią (L3)



Pomiar mocy biernej w obwodach trójfazowych

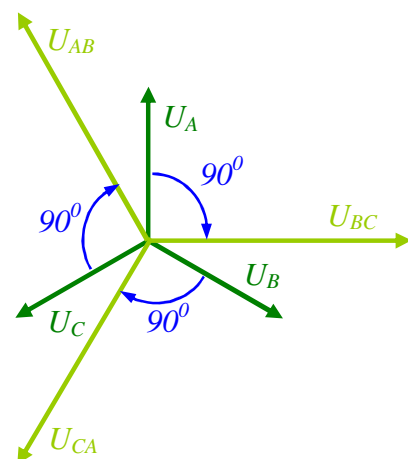
Moc bierna odbiornika trójfazowego równa jest sumie mocy biernych poszczególnych faz, czyli:

$$Q_{odb} = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C$$

Jeśli porównać to wyrażenie z wyrażeniem na moc czynną, to różnica jest tylko między cosinusem a sinusem. Przyrządy do pomiaru mocy biernej nazywa się watomierzami, będące pewną modyfikacją watomierzy. Ta modyfikacja polega na tym, że wewnątrz tego przyrządu przesuwają się o 90° , przez zastosowanie odpowiednich cewek, kąt przesunięcia między prądami w cewkach a napięciem zasilającym.

W układach trójfazowych symetrycznych, chcąc zmierzyć moc bierną, można znaleźć napięcia przesunięte względem siebie o 90° . Wykorzystując ten fakt, można tak połączyć watomierze aby ich wskazania były proporcjonalne do sinusa albo cosinusa.

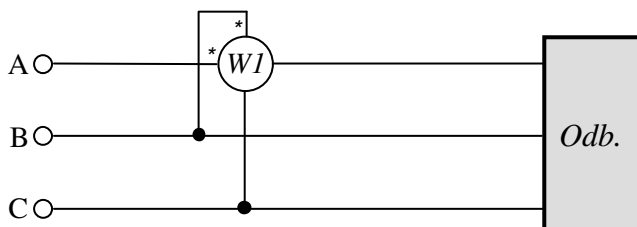
Jeśli narysować gwiazdę napięć, to można zauważyć, że pewne napięcia przewodowe są przesunięte o kąt



90° (zgodnie z ruchem wskazówek zegara) względem odpowiednich napięć fazowych. I tak : względem U_A przesunięty o 90° jest wskaz U_{BC} , względem U_B jest przesunięcia napięcia U_{CA} i wreszcie względem U_C jest przesunięte napięcie U_{AB} .

Stosując powyższą zasadę, weźmy pod uwagę najprostszy układ trójfazowy w którym zarówno odbiornik jak i zasilanie jest symetryczne. W taki przypadku, niezależnie czy linia jest 3-przewodowa, czy 4-przewodowa, można zastosować jeden watomierz, który będzie pomocny do obliczania mocy biernej całego odbiornika.

Przyjmijmy, że watomierz włączymy w fazę pierwszą (A).



Jeśli cewkę prądową watomierza włączyliśmy w fazę A (tak jak na powyższym rysunku), to z napięcia U_A musimy „przejsć” do napięcia U_{BC} , czyli tak włączyć cewkę prądową watomierza aby jej początek był przyłączony do fazy B natomiast koniec do fazy C.

Zatem moc odbiornika będzie równa:

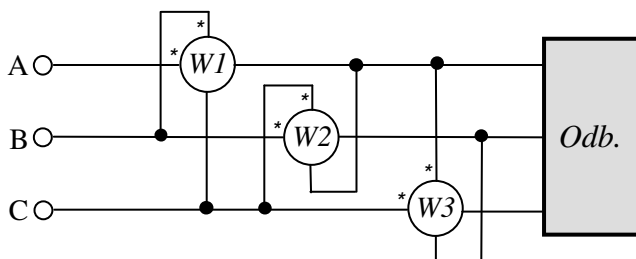
$$Q_{odb} = 3 \frac{1}{\sqrt{3}} P_{W1} = \sqrt{3} P_{W1}$$

ponieważ:

$$Q_{odb} = 3 U_f I_f \sin \varphi \text{ - moc bierna odbiornika trójfazowego symetrycznego}$$

Z uwagi na to, że watomierz $W1$ włączono nie na napięcie fazowe (U_f) lecz na napięcie przewodowe (U_p), stąd pojawił się dodatkowo, w zależności na Q_{odb} , zapis $1/\sqrt{3}$.

W obwodach trójfazowych z odbiornikiem niesymetrycznym w celu wyznaczenia mocy biernej należy użyć trzech watomierzy.



$$Q_{odb} = \frac{1}{\sqrt{3}} (P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}) = \frac{\sqrt{3}}{3} (P_{W1} + P_{W2} + P_{W3})$$