



## Moce i kompensacja w obwodach z odkształconymi i niesymetrycznymi przebiegami prądu i napięcia

### Część 7. Strategie sterowania kompensatorów kluczujących

prof. dr hab. inż. Leszek S. CZARNECKI

Fellow IEEE, Alfredo M. Lopez Distinguished Professor, Louisiana State University, USA, e-mail: lsczar@cox.net

s. 44-54

#### POWERS AND COMPENSATION IN SYSTEMS WITH NONSINUSOIDAL VOLTAGES AND CURRENTS

##### Part 7. Control strategies of switching compensators

**Abstract:** Power electronics devices are the main sources of the current and voltage distortion in distribution systems, but at the same time, power electronics based switching compensators can reduce this distortion along with the reactive and unbalanced currents. Various objective of compensation and various control algorithms of switching compensators, based on the CPC-based power theory, are discussed in this paper. A control algorithm based on the Instantaneous Reactive Power  $p-q$  Theory is presented as well.

**Streszczenie:** Urządzenia energoelektroniczne są z jednej strony głównymi źródłami odkształceń przebiegów prądu i napięcia w systemach dystrybucyjnych, a z drugiej, takie właśnie urządzenia – energoelektroniczne kompensatory kluczujące mogą te odkształcenia skutecznie zredukować, kompensując jednocześnie prąd bierny i symetryzując prądy zasilania. W niniejszym artykule omówione są różne cele kompensacji oraz różne algorytmy sterowania kompensatorów kluczujących, oparte na teorii składowych fizycznych prądu (ang. Currents' Physical Components, CPC). W artykule omówiono także algorytm sterowania oparty na teorii chwilowej mocy biernej  $p-q$  (ang. Instantaneous Reactive Power  $p-q$  Theory, IRP  $p-q$ ).

**Keywords:** switching compensators, unbalanced currents, CPC Theory

**Słowa kluczowe:** kompensatory kluczujące, niesymetryczne przebiegi, teoria CPC

## 1. WPROWADZENIE

Tradycyjnym celem kompensacji w układach rozdzielczych była moc bierna. Jej redukcja pozwalała poprawić współczynnik mocy i zredukować różne niekorzystne skutki przesunięcia fazowego prądu odbiornika względem napięcia zasilania; przesunięcia powodującego pojawienie się w systemie mocy biernej. Służyły do tego i często służą i obecnie kompensatory reaktancyjne, chociaż możliwa jest także kompensacja mocy biernej niedowzбудzonymi maszynami synchronicznymi.

Kompensatorem reaktancyjnym jest w najprostszym przypadku kompensator pojemnościowy, lub kompensator LC, to jest bateria kondensatorów z szeregowo włączoną cewką indukcyjną. Bardziej złożone trójfazowe kompensatory reaktancyjne, zbudowane z gałęzi pojemnościowych i gałęzi indukcyjnych, mogą nie tylko kompensować moc bierną, lecz także symetryzować prądy zasilania [1, 3, 4, 18].

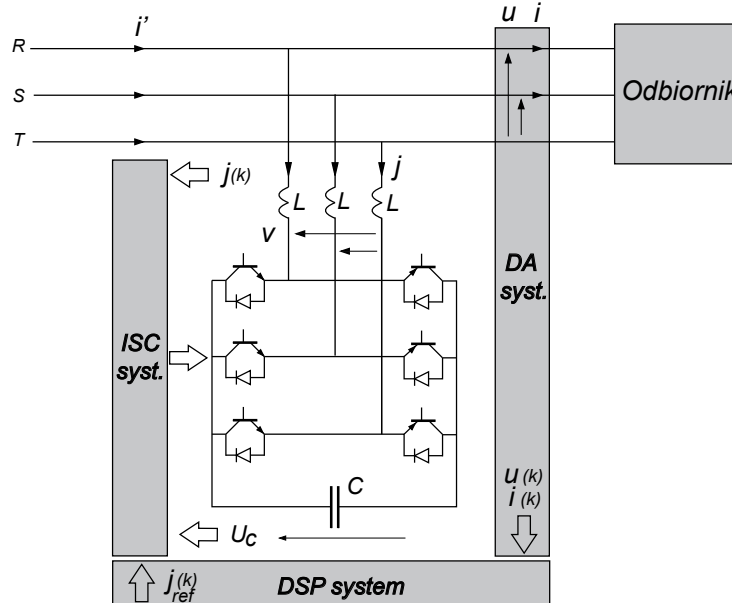
Wzrost odkształceń przebiegów prądu i napięcia, do którego przyczynia się coraz większa liczba oraz moc odbiorników nieliniowych, takich jak lampy wyładowcze, piece mikrofalowe, sprzęt elektroniczny oraz urządzenia energoelektroniczne, staje się nowym wyzwaniem dla kompensacji. Redukcji mocy biernej czy asymetrii prądowej musi często towarzyszyć redukcja harmonicznych.

Tradycyjnymi urządzeniami umożliwiającymi redukcję harmonicznych prądu generowanych przez odbiorniki nieliniowe są harmoniczne filtry rezonansowe. Niestety, ich skuteczność gwałtownie spada w obecności harmonicznych w napięciu zasilania. Już przy dopuszczalnym poziomie odkształcenia napięcia ich skuteczność może spaść do zera, a nawet mogą one powodować [8] wzrost odkształceń. Jest to spowodowane rezonansami filtru z indukcyjnością systemu rozdzielczego.

Rezonanse takie nie mogą się pojawić, jeśli filtr rezonansowy zastąpimy kompensatorem kluczującym (ang. *switching compensator*). Jego struktura pokazana jest na rysunku 1. Kompensator jest zbudowany z sześciu półprzewodnikowych przełączników, tworzących przemiennik częstotliwości (ang. *Inverter*), połączonych z siecią rozdzielczą poprzez trzy cewki indukcyjne  $L$ ; z kondensatora  $C$  utrzymującego stałe napięcie na przełącznikach oraz trzech systemów sterujących, oznaczonych na rysunku 1 jako DA, DSP oraz ISC. System DA (ang. *Data Acquisition*) jest systemem pomiaru napięć i prądów odbiornika oraz ich przetwarzania na ciąg dyskretnych próbek; system DSP

(ang. *Discrete Signal Processing*) generuje sygnał sterowania kompensatora; system ISC (ang. *Inverter Switching Control*) steruje przełącznikami tak, aby prąd kompensatora odtwarzał przebieg sygnału sterującego.

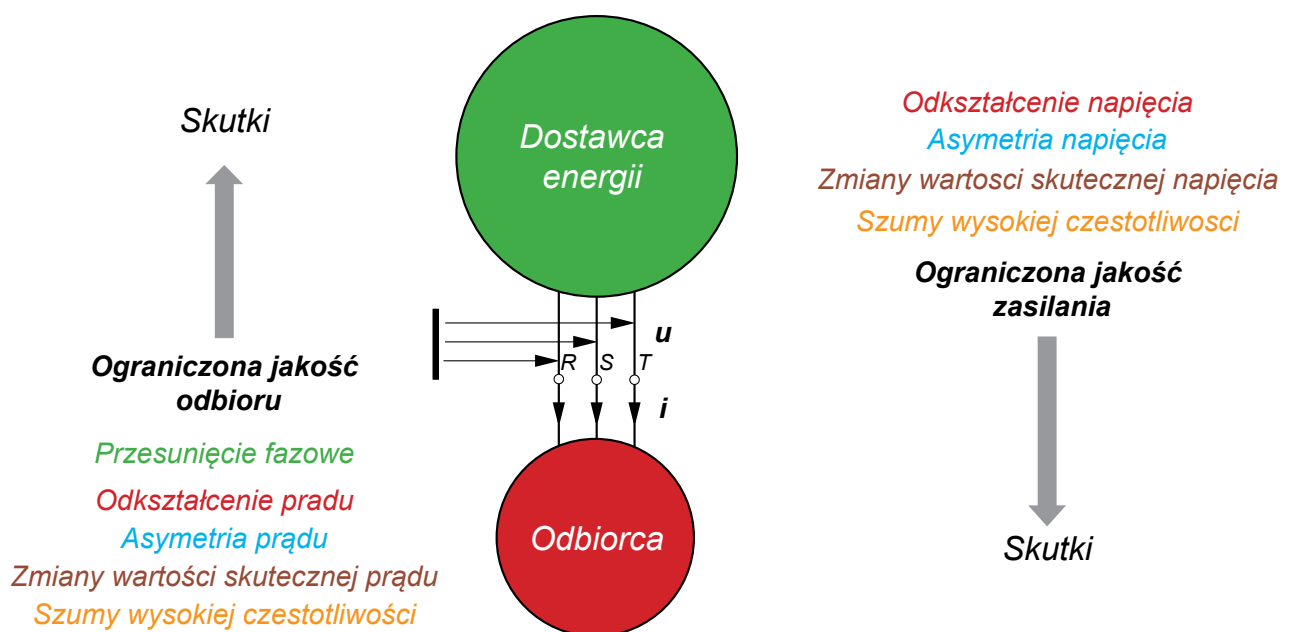
Prąd takiego kompensatora nie jest odpowiedzią na napięcie na jego zaciskach, lecz jest kształtowany przez przełączniki półprzewodnikowe, kluczowane z wysoką częstotliwością, tak aby prąd ten miał przebieg pożądanego prądu kompensującego. Kompensatory kluczujące nazywane są także [5, 6] "aktywnymi filtrami mocy" (ang. *Active Power Filters*). Nie są to jednak przyrządy aktywne, w znaczeniu **źródeł energii**, lecz pasywne, to jest odbiorniki energii. Ich działanie nie jest też oparte na procesie filtracji, lecz na **procesie kompensacji**.



Rys. 1. Struktura kompensatora kompensującego włączonego równolegle do odbiornika

Fig. 1. Structure of a switching compensator connected parallel to the load

Kompensatory kluczujące umożliwiają zresztą realizację zadań wychodzących daleko poza tradycyjne cele kompensacji [10, 11]. Mogą one poprawiać zarówno **jakość zasilania** (ang. *Supply Quality, SQ*) jak i **jakość obciążenia** (ang. *Loading Quality, LQ*). Zamiast tych dwóch pojęć, w powszechnym obiegu [17] jest pojęcie "jakości energii" (ang. *Power Quality, PQ*), dlatego poniżej wyjaśniony jest sens obu terminów, ilustrowany także na rysunku 2.



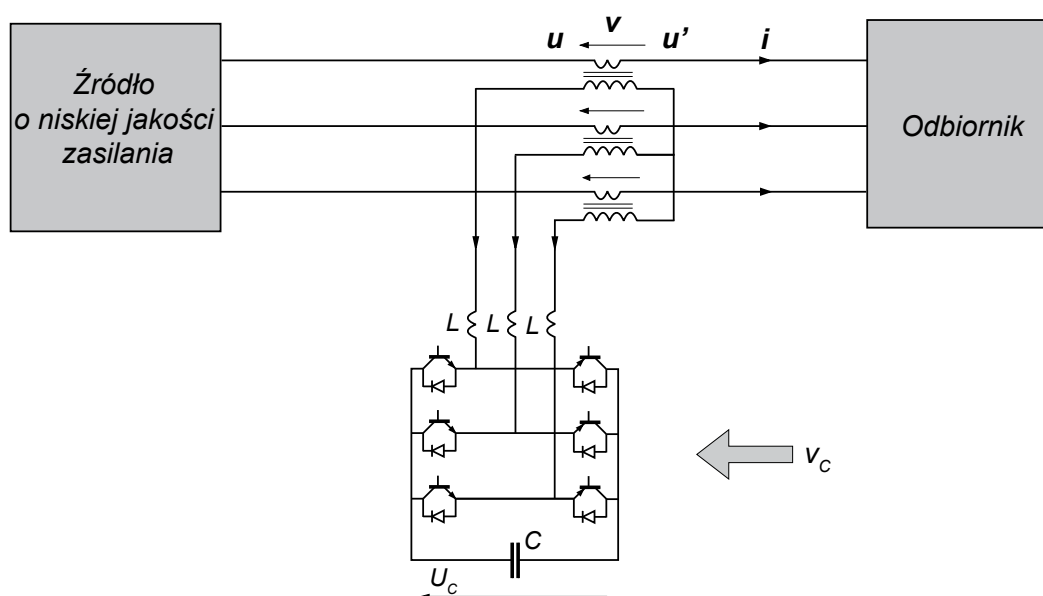
Rys. 2. Czynniki obniżające jakość zasilania i jakość obciążenia

Fig. 2. Agents that degrade the Supply Quality and the Loading Quality

Z punktu widzenia odbiorcy energii zasilanie jest idealne, jeśli napięcie zasilania jest sinusoidalne, symetryczne, o niezmienniej wartości skutecznej. Wartość ta nie powinna się też zmieniać z mocą obciążenia. Odchylenia od takiego zasilania można traktować jako obniżenie jego jakości. Na obniżenie jakości zasilania może wpływać asymetria napięcia zasilania, harmoniczne, wahania wartości skutecznej, chwilowe zapaści lub wzrost napięcia czy szumy wysokiej częstotliwości.

Z punktu widzenia dostawcy energii obciążenie jest idealne, jeśli odbiornik obciąża dostawcę energii prądem sinusoidalnym, symetrycznym, w fazie z napięciem zasilania i o niezmienniej wartości skutecznej. Odchylenia od takiego obciążenia można traktować jako obniżenie jakości obciążenia. Obniżenie jakości obciążenia może być związane z prądem biernym, asymetrią prądów liniowych i ich odkształceniem, czy dużą zmiennością wartości skutecznej prądu odbiornika lub szumami wysokiej częstotliwości.

Dopuszczalne odchylenia pewnych parametrów napięcia zasilania oraz pewnych parametrów prądu obciążenia regulowane są standardami. Wtedy gdy standardy te nie są spełnione, zarówno jakość zasilania jak i jakość obciążenia mogą być poprawiane kompensatorami kluczującymi. Jakość zasilania może poprawiać kompensator włączony szeregowo z odbiornikiem, jak jest to pokazane na rysunku 3, jakość odbioru może poprawiać kompensator włączony równolegle z odbiornikiem.



Rys. 3. Kompensator kluczujący włączony szeregowo

Fig. 3. Switching compensator connected in series

Kompensację kojarzy się często z optymalizacją pracy systemu rozdzielczego. To skojarzenie może być jednak mylące. Zagadnienie lokalizacji w systemie rozdzielczym określonej liczby kompensatorów mocy biernej i ich mocy jest istotnie zagadnieniem optymalizacyjnym. Jeśli kompensacja dotyczy także redukcji poziomu odkształcenia prądu i napięcia, to określenie ekonomicznych skutków odkształceń jest tak złożone, że celów kompensacji nie formułuje się w sensie optymalizacyjnym. To samo dotyczy redukcji asymetrii, zmienności wartości skutecznej prądów i napięć, czy krótkotrwałych zaburzeń ich wartości lub przebiegu. Cele kompensacji można w takich sytuacjach formułować raczej w sensie technicznym niż ekonomicznym. Na przykład, włączenie kompensatora na zaciskach odbiornika o szczególnie niskiej jakości może poprawić warunki pracy innych odbiorników oraz zmniejszyć straty energii. W odróżnieniu od kompensatorów pojemnościowych, których koszt jest proporcjonalny do kompensowanej mocy biernej, koszt kompensatorów kluczujących jest od tej mocy znacznie mniej zależny. Wynika to z faktu, że moc chwilowa  $p(t)$  odbiornika trójfazowego związana z jego mocą bierną  $Q$  jest stale równa zero. Koszt kompensatora związany jest głównie z wymaganą mocą łączeniową tranzystorów, a więc ich kosztem. Ponadto, kompensatory kluczujące mają naturalną zdolność adaptacyjną, mogą więc być wykorzystywane do granicy ich zdolności kompensacyjnych bez zmiany kosztu kompensatora.

Najbardziej odległa od optymalizacji jest sytuacja, w której dostawca energii wymusza na jej odbiorcy, nawet jako warunek dostawy energii, zainstalowanie kompensatora w punkcie przyłączenia. Jest tak dlatego, że zyski z kompensacji są głównie po stronie dostawcy energii, zaś koszt kompensatora po stronie odbiorcy. Jest to najbardziej widoczne w przypadku kompensacji prądu biernego, lecz dotyczy to także kompensacji prądu niezrównoważenia, czy harmonicznych prądu zasilania lub zmienności jego wartości skutecznej.

## 2. CELE KOMPENSACJI W SENSIE SKŁADOWYCH FIZYCZNYCH PRĄDU

Najniższą wartość skuteczną prądu potrzebną do zasilania odbiornika jednofazowego o mocy czynnej  $P$  ma prąd czynny zdefiniowany przez Fryzego [2]:

$$i_{aF}(t) \stackrel{\text{df}}{=} \frac{P}{\|u\|^2} u(t), \quad (1)$$

gdzie  $\|u\|$  oznacza wartość skuteczną napięcia zasilania:

$$\|u\| \stackrel{\text{df}}{=} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}. \quad (2)$$

Definicję prądu czynnego można rozszerzyć na układy trójfazowe, trójprzewodowe [9]:

$$\mathbf{i}_{aF}(t) \stackrel{\text{df}}{=} \frac{P}{\|\mathbf{u}\|^2} \mathbf{u}(t), \quad (3)$$

gdzie  $\|\mathbf{u}\|$  oznacza trójfazową wartość skuteczną napięcia zasilania

$$\|\mathbf{u}\| = \sqrt{\|u_R\|^2 + \|u_S\|^2 + \|u_T\|^2}, \quad (4)$$

zaś  $\mathbf{u}(t)$  jest wektorem trójfazowym napięć liniowych, mierzonych względem sztucznego zera systemu:

$$\mathbf{u}(t) \stackrel{\text{df}}{=} \begin{bmatrix} u_R(t) \\ u_S(t) \\ u_T(t) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

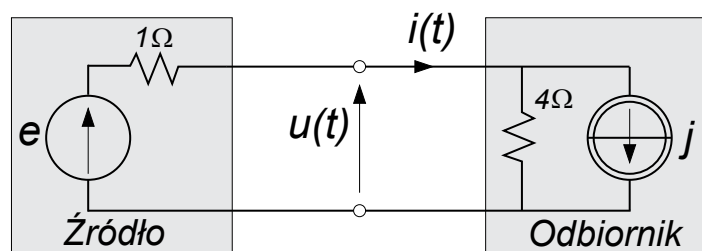
Jeśli pozostała część prądu odbiornika, czyli prąd bierny według definicji Fryzego:

$$\mathbf{i}_{bF}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_{aF}(t), \quad (6)$$

zostanie skompensowana kompensatorem kluczującym, to prąd zasilania będzie miał minimalną wartość skuteczną. Dlatego często przyjmuje się, że kompensator powinien kompensować prąd bierny wg. definicji Fryzego.

Zauważmy jednak, że prąd zasilania po takiej kompensacji jest proporcjonalny do napięcia zasilania  $\mathbf{u}(t)$ , to jest odtwarza wszystkie cechy tego napięcia, przede wszystkim takie, jak odkształcenie i asymetrię. Można więc postawić pytanie, czy jest to akceptowalne.

Przy takim celu kompensacji pojawia się też inny problem, ilustrowany poniżej pewną sytuacją w obwodzie jednofazowym, pokazanym na rysunku 4, w którym odbiornik zasilany napięciem sinusoidalnym  $e_1(t)$  o częstotliwości podstawowej, zasila odbiornik generujący harmoniczną prądu trzeciego rzędu  $j_3(t)$ .



Rys. 4 Obwód z odbiornikiem generującym trzecią harmoniczną.

Fig. 4 Circuit with a load that generates the third order harmonic.

Przyjmijmy, że napięcia zasilania ma przebieg:

$$e = e_1 = 100 \sqrt{2} \sin \omega_1 t \text{ V ,}$$

zaś prąd generowany w odbiorniku

$$j = j_3 = 50 \sqrt{2} \sin 3 \omega_1 t \text{ A .}$$

Z analizy obwodu wynika, że napięcie i prąd na zaciskach źródła mają wartość, odpowiednio

$$u = u_1 + u_3 = 80 \sqrt{2} \sin \omega_1 t - 40 \sqrt{2} \sin 3 \omega_1 t \text{ V ,}$$

$$i = i_1 + i_3 = 20 \sqrt{2} \sin \omega_1 t + 40 \sqrt{2} \sin 3 \omega_1 t \text{ A ,}$$

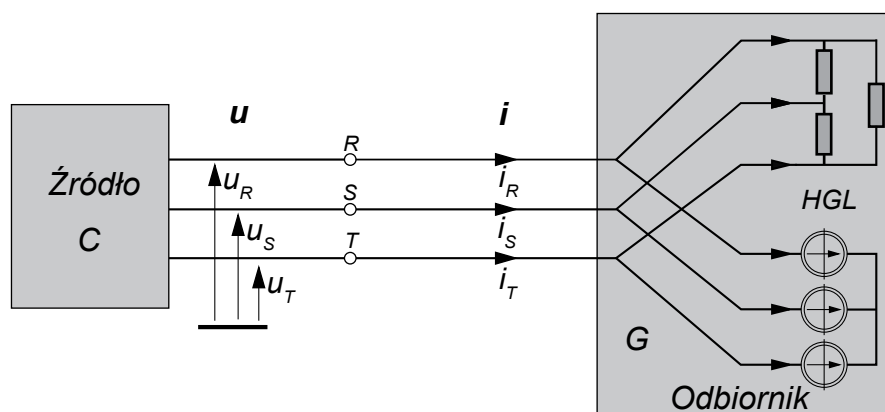
a zatem moc czynna odbiornika ma wartość równą zero, gdyż:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \sum_{n=1,3} U_n I_n \cos \varphi_n = 1600 - 1600 = 0 .$$

Ponieważ moc czynna na zaciskach odbiornika jest równa zero, zatem w prądzie zasilania istnieje wyłącznie prąd bierny Fryzego. Jego kompensacja prowadziłaby do redukcji prądu zasilania do wartości zerowej. Nie tego się jednak od kompensatora oczekuje. Powinien on kompensować jedynie trzecią harmoniczną prądu generowaną w odbiorniku  $j_3(t)$ , lecz nie jest to przecież prąd bierny Fryzego.

Aby więc rozkład prądu był przydatny do sterowania kompensatora kluczującego, powinien wyodrębnić składową prądu generowaną w nieliniowości odbiornika. Taką właściwość [9, 14] ma rozkład prądu w teorii mocy opartej na koncepcji składowych fizycznych prądu (ang. *Currents' Physical Components, CPC*).

Schemat zastępczy obwodu trójfazowego, trójprzewodowego, z odbiornikami generującymi harmoniczne prądu (ang. *Harmonics Generating Loads, HGL*) przedstawiony jest na rysunku 5.



Rys. 5. Obwód trójfazowy z odbiornikami generującymi harmoniczne, HGL

Fig. 5. A three-phase circuit with Harmonics Generating Loads, HGL

Zakładając, że napięcie zasilania jest niesinusoidalne, o harmonicznym rzędu  $n$  ze zbioru  $N$ , lecz symetryczne, moc czynna harmonicznego rzędu  $n$  ma postać:

$$P_n = U_n (I_{Rn} \cos \varphi_{Rn} + I_{Sn} \cos \varphi_{Sn} + I_{Tn} \cos \varphi_{Tn}) \stackrel{\text{df}}{=} U_n I_{an} , \quad (7)$$

gdzie:

$$I_{an} = I_{Rn} \cos \varphi_{Rn} + I_{Sn} \cos \varphi_{Sn} + I_{Tn} \cos \varphi_{Tn} , \quad (8)$$

jest uogólnioną, (może być ujemną), wartością skuteczną trójfazowego prądu czynnego harmonicznego rzędu  $n$ .

W zależności od znaku tego prądu, to jest znaku mocy czynnej harmonicznego  $P_n$ , zbiór harmonicznymi może być rozłożony na dwa rozłączne podzbiory:

$$\text{Gdy: } I_{an} \geq 0, \quad n \in N_C , \quad (9)$$

$$\text{Gdy: } I_{an} < 0, \quad n \in N_G . \quad (10)$$

W zależności od znaku mocy czynnej harmonicznego rzędu  $n$ ,  $P_n$ , przyjmuje się, że przyczyną przepływu energii jest harmoniczna napięcia źródła zasilania (indeks C) lub harmoniczna prądu generowana w nieliniowości odbiornika

(indeks  $G$ ). Rozkład rzędów  $n$  harmoniczych na takie podzbiory umożliwia rozkład napięć, prądów i mocy czynnej na dwa składniki

$$\mathbf{i} = \sum_{n \in N} \mathbf{i}_n = \mathbf{i}_C + \mathbf{i}_G, \quad \mathbf{u} = \sum_{n \in N} \mathbf{u}_n = \mathbf{u}_C - \mathbf{u}_G, \quad P = \sum_{n \in N} P_n = P_C - P_G, \quad (11)$$

zdefiniowane jak poniżej

$$\sum_{n \in N_C} \mathbf{i}_n \stackrel{\text{df}}{=} \mathbf{i}_C, \quad \sum_{n \in N_C} \mathbf{u}_n \stackrel{\text{df}}{=} \mathbf{u}_C, \quad \sum_{n \in N_C} P_n \stackrel{\text{df}}{=} P_C, \quad (12)$$

$$\sum_{n \in N_G} \mathbf{i}_n \stackrel{\text{df}}{=} \mathbf{i}_G, \quad \sum_{n \in N_G} \mathbf{u}_n \stackrel{\text{df}}{=} -\mathbf{u}_G, \quad \sum_{n \in N_G} P_n \stackrel{\text{df}}{=} -P_G. \quad (13)$$

Rozkład ten pozwala przedstawić prąd zasilania w postaci:

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_{aC} + \mathbf{i}_{bC}, \quad (14)$$

gdzie

$$\mathbf{i}_{aC} = \mathbf{i}_{aC}(t) \stackrel{\text{df}}{=} \frac{P_C}{\|\mathbf{u}_C\|^2} \mathbf{u}_C(t). \quad (15)$$

Pozostała część prądu zasilania, po odjęciu prądu czynnego  $\mathbf{i}_{aC}(t)$ :

$$\mathbf{i}_{bC}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_{aC}(t) = \mathbf{i}_{sC} + \mathbf{i}_{rC} + \mathbf{i}_{uC} + \mathbf{i}_G, \quad (16)$$

składa się z prądu rozrztu  $\mathbf{i}_{sC}(t)$ , prądu biernego  $\mathbf{i}_{rC}(t)$ , prądu niezrównoważenia  $\mathbf{i}_{uC}(t)$  oraz prądu generowanego w odbiorniku  $\mathbf{i}_G$ . Kompensacja tego prądu redukuje prąd zasilania do prądu czynnego według definicji CPC (15). Jest to prąd o minimalnej wartości skutecznej potrzebnej do zasilania odbiornika z mocą czynną. Biorąc pod uwagę, że

$$P \leq P_C, \quad \|\mathbf{u}_C\| \leq \|\mathbf{u}\|, \quad (17)$$

wartość skuteczna prądu po kompensacji prądu  $\mathbf{i}_{bC}(t)$  może być wyższa niż po kompensacji prądu  $\mathbf{i}_{bF}(t)$ , gdyż

$$\|\mathbf{i}_{aF}\| = \frac{P}{\|\mathbf{u}\|} \leq \frac{P_C}{\|\mathbf{u}_C\|} = \|\mathbf{i}_{aC}\|. \quad (18)$$

Zauważmy ponadto, że nawet po kompensacji, prąd zasilania odtwarza przebieg napięcia  $\mathbf{u}_C(t)$ , może więc nie być przebiegiem sinusoidalnym. Może to też dotyczyć symetrii czy różnych zaburzeń.

Jak było to dyskutowane w artykułach [15,16], energia do odbiorników generujących harmoniczne lub powodujących asymetrię prądową dostarczana jest przez harmoniczną podstawową napięcia kolejności dodatniej, zwanym dalej **napięciem roboczym**  $\mathbf{u}_w(t)$ , i w fazie z tym napięciem harmoniczną podstawową prądu  $\mathbf{i}_w(t)$ . Moc tych składowych określa **roboczą moc czynną** (ang. *working active power*)

$$P_w = \frac{1}{T} \int_0^T [\mathbf{u}_w(t)]^T \mathbf{i}_w(t) dt = \|\mathbf{u}_w\| \|\mathbf{i}_w\| = G_1 \|\mathbf{u}_w\|^2, \quad (19)$$

gdzie

$$\mathbf{i}_w(t) \stackrel{\text{df}}{=} \frac{P_w}{\|\mathbf{u}_w\|^2} \mathbf{u}_w(t) = G_1 \mathbf{u}_w(t), \quad (20)$$

jest **prądem roboczym** odbiornika. Pozostała część prądu zasilania:

$$\mathbf{i}_b(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_w(t), \quad (21)$$

składa się ze składowych prądu nie uczestniczących w przesyśle do odbiornika energii roboczej, które mogą być całkowicie kompensowane kompensatorem kluczującym. Napięcie  $\mathbf{u}_w(t)$  w wyrażeniach (19) i (20), jest harmoniczną podstawową napięcia zasilania kolejności dodatniej (zgodnej). Jeżeli napięcie zasilania jest odkształcone, to jego wyznaczenie wymaga analizy Fouriera, jednak nie pełnej, lecz ograniczonej tylko do harmonicznego podstawowej, to jest obliczenia zespolonych wartości skutecznych  $U_{R1}$ ,  $U_{S1}$ ,  $U_{T1}$  napięcia zasilania. Jeśli napięcie to jest ponadto asymetryczne, to trzeba jeszcze obliczyć zespoloną wartość skuteczną składowej symetrycznej kolejności dodatniej  $U^p_1$ . Znając tę wartość, napięcie robocze źródła można wyznaczyć z relacji:

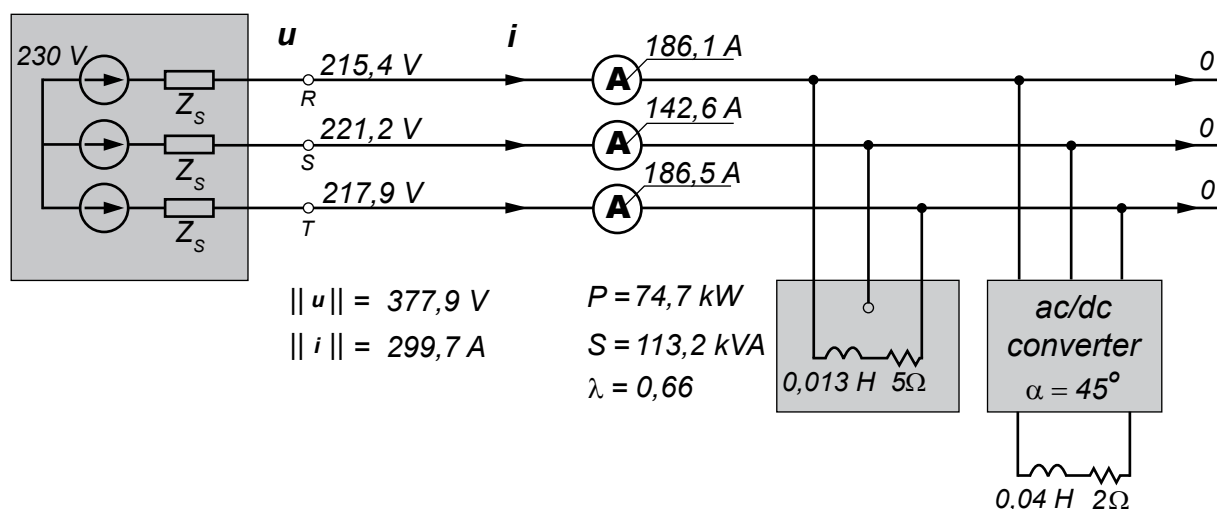
$$\mathbf{u}_w(t) = \begin{bmatrix} u_{Rw}(t) \\ u_{Sw}(t) \\ u_{Tw}(t) \end{bmatrix} = \sqrt{2} \operatorname{Re} \left[ \begin{bmatrix} U_1^p \\ \alpha^* U_1^p \\ \alpha U_1^p \end{bmatrix} e^{j\omega t} \right], \quad \alpha \stackrel{\text{df}}{=} 1e^{j2\pi/3}. \quad (22)$$

Sterowanie kompensatorem nie wymaga znajomości prądu roboczego jako wielkości ciągłej, lecz tylko znajomości jego wartości dyskretnych. Szczegóły cyfrowej obróbki sygnałów, niezbędnej dla sterowania kompensatorem, wychodzą jednak poza zakres tego artykułu.

Kompensacja prądu  $i_b(t)$ , określonego wyrażeniem (21), redukuje prąd zasilania do prądu roboczego, to jest do prądu sinusoidalnego i symetrycznego, o minimalnej wartości skutecznej:

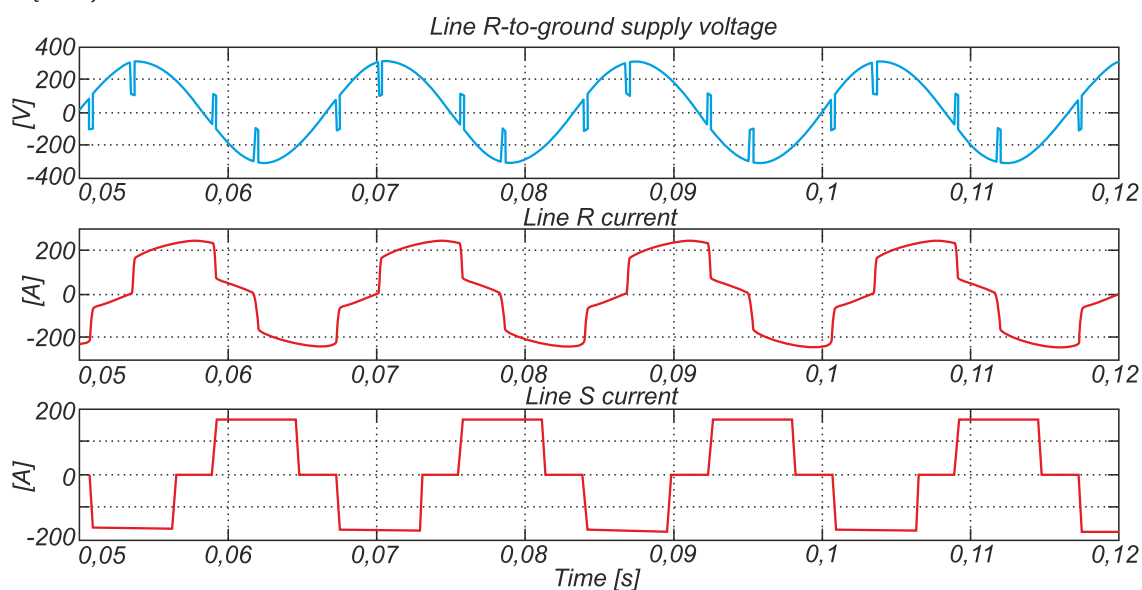
$$\|i_w\| = \frac{P_w}{\|u_w\|}. \quad (23)$$

**Przykład.** Odbiornik, pokazany na rysunku 6, złożony z prostownika sterowanego, pracującego z kątem zapłonu  $\alpha = 45^\circ$ , oraz jednofazowego odbiornika RL, zasilany jest ze źródła napięcia o mocy zwarciowej 1,5 MVA, stosunku reaktancji do rezystancji  $X_s/R_s = 3$  i napięciu sinusoidalnym o wartości skutecznej  $U = 230$  V.



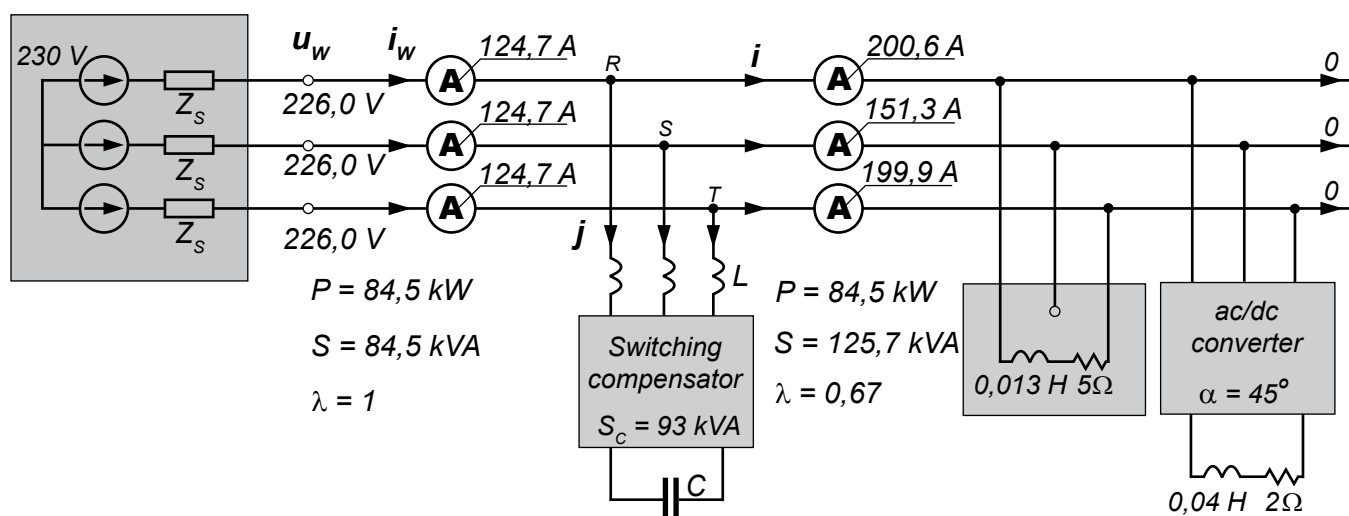
Rys. 6. Obwód trójfazowy z odbiornikiem niezrównoważonym i odbiornikiem generującym harmoniczne, HGL  
Fig. 6. A three-phase circuit with unbalanced load and Harmonics Generating Load, HGL

Przebiegi czasowe prądu zasilania w przewodach R i S oraz przebieg napięcia zasilania na zacisku R odbiornika pokazane są na rysunku 7.



Rys. 7. Przebiegi, od góry, napięcia na zacisku R oraz prądu linii R i linii S  
Fig. 7. Waveforms, from the top, of the voltage on terminal R, currents in line R and line S

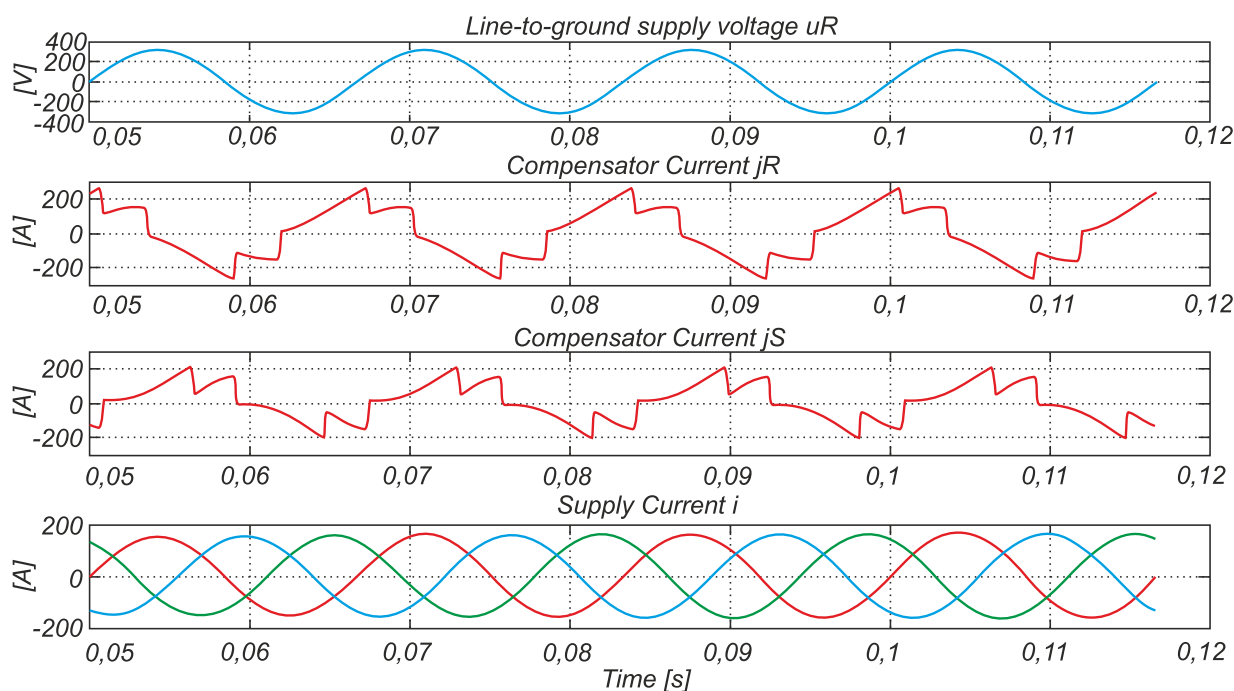
Obwód z kompensatorem kluczującym redukującym prąd zasilania do prądu roboczego  $i_w(t)$ , a także wyniki kompensacji pokazane są na rys. 8.



Rys. 8. Obwód z równolegle włączonym kompensatorem kluczującym

Fig. 8. System with parallel power electronics based switching compensator and compensation results

Przebiegi czasu prądu kompensatora w przewodach R i S; przebieg napięcia na zacisku R źródła oraz wszystkie trzy prądy zasilające w obwodzie z kompensatorem pokazane są na rysunku 9.



Rys. 9. Przebiegi, od góry, napięcia na zacisku R oraz prądu kompensatora w linii R i S oraz prądów zasilania po kompensacji

Fig. 9. Waveforms, from the top, of the voltage on terminal R and compensator currents in line R, line S and supply currents after compensation

### 3. KOMPENSACJA W SENSIE TEORII CHWILOWEJ MOCY BIERNEJ P-Q

Jedną z najbardziej rozpowszechnionych podstaw teoretycznych sterowania kompensatorów kluczujących dostarcza teoria chwilowej mocy biernej p-q (ang. *Instantaneous Reactive Power p-q Theory, IRP p-q Theory*). Według tej teorii, opracowanej przez Nabaego i Akagię [5, 6], liniowe napięcia i prądy zasilania obwodu trójfazowego przekształca się transformatą Clarke'a do wzajemnie ortogonalnych nowych współrzędnych  $\alpha$  i  $\beta$ . Jeśli obwód jest obwodem trójfazowym, trójprzewodowym, to przekształcenie Clarke'a upraszcza się do postaci:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2, & 0 \\ 1/\sqrt{2}, & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_R \\ u_S \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2, & 0 \\ 1/\sqrt{2}, & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \end{bmatrix}. \quad (24)$$

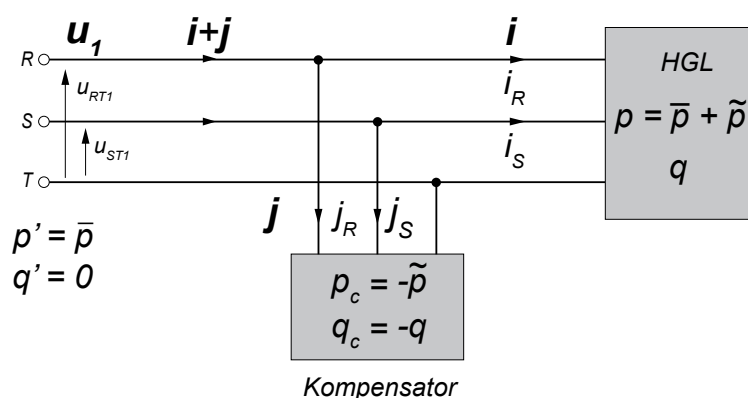
Napięcia i prądy określone we współrzędnych  $\alpha$  i  $\beta$  służą do zdefiniowania chwilowej mocy czynnej  $p$  oraz chwilowej mocy bierniej  $q$ , mianowicie:

$$\begin{aligned} p &= u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta \\ q &= u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha. \end{aligned} \quad (25)$$

Chwilowa moc czynna może być rozłożona, przez filtrację, na składową stałą i składową oscylacyjną, mianowicie

$$p = \bar{p} + \tilde{p}. \quad (26)$$

Według autorów teorii IRP p-q [5, 6], kompensator powinien kompensować chwilową moc bierną  $q$  oraz składową oscylacyjną  $\tilde{p}$  chwilowej mocy czynnej, to jest tak, aby po kompensacji chwilowa moc czynna źródła miała wartość stałą, równą  $\bar{p}$ . Ilustruje to rysunek 10.



Rys. 10. Strategia sterowania kompensatora wg teorii IRP p-q Theory

Fig. 10. Strategy of a compensator control based on the IRP p-q Theory

Ponieważ moce chwilowe urządzenia trójfazowego mogą być przedstawione w postaci:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{U}_C \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (27)$$

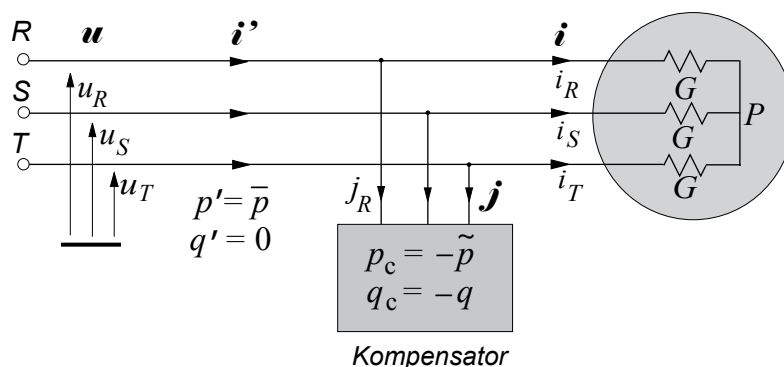
zatem prąd kompensatora  $j$  we współrzędnych  $\alpha$  i  $\beta$  może być obliczony z wartości mocy chwilowych kompensatora, mianowicie:

$$\mathbf{j} \stackrel{\text{df}}{=} \begin{bmatrix} j_\alpha \\ j_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\alpha & -u_\beta \\ u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -q \end{bmatrix} = \mathbf{U}_C^{-1} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -q \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Teoria IRP p-q, jako podstawa teoretyczna do sterowania kompensatorów kluczujących, jest bardzo pociągająca ze względu na prostotę obliczeniową [5, 6, 11]. Ciągi próbek napięcia i prądu, przekształcone transformatą Clarke'a, pozwalają momentalnie obliczyć obie moce chwilowe  $p$  i  $q$ . Odfiltrowanie z chwilowej mocy czynnej  $p$  składowej stałej  $\bar{p}$  dostarcza danych wystarczających do obliczenia prądu kompensatora  $j$ . Autorzy zapewniali też, że metoda ta umożliwia momentalną identyfikację właściwości energetycznych odbiornika i momentalną kompensację. Przyciągające było ponadto zapewnienie autorów tej teorii [5, 6], że można ją stosować we wszelkich warunkach, niezależnie od rodzaju odbiornika i warunków zasilania.

Możliwość momentalnej identyfikacji właściwości energetycznych odbiornika została niestety podważona w artykule [7]. Ponadto wyniki kompensacji opartej na IRP p-q wtedy, gdy zastosowana jest ona w warunkach odkształconego napięcia zasilania, są zaskakująco złe. Zostało to pokazane w artykule [12], w którym algorytmu tego użyto do sterowania kompensatora włączonego na zaciski idealnego rezystancyjnego i zrównoważonego odbiornika, to jest odbiornika o najwyższym możliwym współczynniku mocy, lecz w warunkach napięcia zasilania odkształconego harmoniczną piątego rzędu, (co pokazano na rysunku 11), wówczas:

$$u_{R1} = \sqrt{2} U_1 \cos \omega_1 t, \quad u_{R5} = \sqrt{2} U_5 \cos 5\omega_1 t.$$



Rys. 11. Idealny rezystancyjny odbiornik z kompensatorem

Fig. 11. Ideal resistive load with a compensator

Taki odbiornik nie wymaga oczywiście żadnej kompensacji, a jeśli już kompensator jest zainstalowany, należałoby oczekiwać, że jego prąd  $j$  jest zerowy. Okazuje się jednak, że algorytm sterowania oparty na teorii IRP p-q powoduje wytwarzanie różnego od zera prądu kompensującego. Na przykład prąd ten w linii R ma przebieg:

$$j_R = \frac{-2\sqrt{2}GU_1U_5\cos 6\omega_1t}{U_1^2+U_5^2+2U_1U_5\cos 6\omega_1t}(U_1\cos \omega_1t+U_5\cos 5\omega_1t). \quad (29)$$

Przyczyną tego jest błędna w teorii IRP p-q interpretacja zjawisk fizycznych w obwodach trójfazowych [13]. Mianowicie moc chwilowa zrównoważonego rezystancyjnego odbiornika trójfazowego nie musi mieć wartości stałej. Jest ona stała tylko wtedy, gdy napięcie zasilania jest sinusoidalne i symetryczne. Jeśli, na przykład jak w powyższym przypadku, napięcie ma harmoniczne 5. rzędu, to chwilowa moc czynna zrównoważonego, rezystancyjnego odbiornika trójfazowego ma przebieg:

$$p = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta = 3G(U_1^2 + U_5^2 + 2U_1U_5\cos 6\omega_1t). \quad (30)$$

Moc ta ma więc niezerową składową oscylacyjną:

$$\tilde{p} = 6GU_1U_5\cos 6\omega_1t. \quad (31)$$

Podobna sytuacja pojawia się przy asymetrii napięcia zasilania [13]. Jeżeli idealny odbiornik rezystancyjny, taki jak na rysunku 11, zasilany jest napięciem sinusoidalnym, lecz asymetrycznym, to jest o składowej dodatniej i składowej ujemnej, równych odpowiednio dla linii R

$$u_R^p = \sqrt{2}U^p\cos \omega_1t, \quad u_R^n = \sqrt{2}U^n\cos \omega_1t, \quad (32)$$

jak pokazano to w artykule [13], kompensator sterowany algorytmem opartym na teorii IRP p-q wytwarza w linii R prąd kompensujący

$$j_R = \frac{-2\sqrt{2}G(U^p+U^n)U^pU^n}{U^{p2}+U^{n2}+2U^pU^n\cos 2\omega_1t}\cos \omega_1t\cos 2\omega_1t. \quad (33)$$

Przyczyną tego jest oczekiwanie oparte na teorii, że po kompensacji chwilowa moc czynna ma mieć wartość stałą w sytuacji, gdy przy asymetrycznym napięciu zasilania chwilowa moc czynna zrównoważonego rezystancyjnego odbiornika trójfazowego ma przebieg

$$p = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta = 3G(U^{p2} + U^{n2} + 2U^pU^n\cos 2\omega_1t), \quad (34)$$

a więc ma niezerową składową oscylacyjną.

Ogólna przyczyna błędności teorii IRP p-q jako algorytmu sterowania kompensatorów kluczujących tkwi w tym, jak to pokazano w artykule [19], że moce chwilowe  $p$  i  $q$  są formami liniowymi iloczynów prądów i napięć, postaci  $F\{u_x, i_y\}$ . Cechy tych mocy mogą być kształtowane w równym stopniu przez prądy, jak również przez napięcia. Wartości tych mocy nie ujawniają jednak, co jest przyczyną tych cech: prąd czy napięcie. Kompensator równoległy może poprawnie modyfikować cechy prądu tylko wtedy, gdy niepożądane cechy tych mocy spowodowane są przebiegiem prądu, a nie przebiegiem napięcia. Tak właśnie może być wtedy, jak to pokazano w powyższych przykładach, gdy źródłem odkształcenia lub asymetrii jest napięcie zasilania.

#### 4. WNIOSKI

Kompensatory kluczujące są przyrządami energoelektronicznymi o wielkim potencjale z uwagi na możliwości poprawy jakości odbioru energii elektrycznej i jakości zasilania w systemach rozdzielczych [8]. Stopień wykorzystania tego potencjału zależy głównie od algorytmów ich sterowania. Kompensatory takie używane są najczęściej jako kompensatory włączone równolegle do odbiornika i w takiej konfiguracji pozwalają minimalizować wartość skuteczną prądu zasilania oraz zredukować zarówno odkształcenia, jak i asymetrię prądów zasilania, poprawiając w ten sposób jakość odbioru energii. Cele kompensacji i algorytmy sterowania są łatwe do zdefiniowania w oparciu o **Teorię składowych fizycznych prądu**. Cele te, sformułowane w oparciu o **Teorię chwilowej mocy biernej p-q**, nie są jasne i mogą prowadzić do błędnego sterowania kompensatora. Artykuł zwraca uwagę na to, że jeśli celem kompensacji jest zmniejszenie wartości skutecznej prądu zasilania do jej wartości minimalnej, czyli zmniejszenie go do prądu czynnego w sensie teorii mocy Fryzego lub w sensie teorii CPC, to prąd zasilania po kompensacji zachowuje odkształcenie i asymetrię napięcia źródłowego. Jeśli celem kompensacji jest uzyskanie symetrycznego i sinusoidalnego prądu zasilania o wartości skutecznej niezbędnej do zasilania odbiornika z roboczą mocą czynną, to wartość skuteczna tego prądu będzie większa od wartości skutecznej prądu czynnego. O tym, co w określonej sytuacji jest ważniejsze, powinien zdecydować inwestor kompensatora, a przynajmniej powinien być tej różnicy świadomy.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Ch.P. Steinmetz (1917), "Theory and calculation of electrical apparatus", *McGraw-Hill Book Comp.*, New York.
- [2] S. Fryze, (1931), "Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia", *Przegląd Elektrotechniczny*, z. 7, 193-203, z. 8, 225-234, 1931, (1932): z. 22, 673-676.
- [3] G. Klinger, (1979), "LC Kompensation und symmetrisierung für Mehrphasensysteme mit beliebigen Spannungsverlauf", *ETZ Archiv*, H.2, pp. 57-61.
- [4] E. Miller, (1982), "Reactive power control in electric systems", *John Wiley & Sons*, 1982.
- [5] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, (1984), "Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components", *IEEE Trans. IA*, 1984, IA-20, No. 3, pp. 625-630.
- [6] H. Akagi, A. Nabae, (1993), "The p-q theory in three-phase systems under nonsinusoidal conditions", *European Trans. on Electrical Power, ETEP*, 1993, Vol. 3, No. 1, pp. 27-31.
- [7] L.S. Czarnecki, (2004), "On some misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 19, No. 3, pp. 828-836.
- [8] L.S. Czarnecki, H.L. Ginn, (2005), "The effect of the design method on efficiency of resonant harmonic filters", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, pp. 286-291.
- [9] L.S. Czarnecki, (2005), "Moce w Obwodach Elektrycznych z Niesinusoidalnymi Przebiegami Prądów i Napięć", *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*.
- [10] H.L. Ginn, G. Chen, (2008), "Switching compensator control strategy based on CPC power theory", *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 84, No. 6, pp. 23-27.
- [11] L.F. Monteiro, J.L. Alfonso, J.G. Pinto, E.M. Watanabe, M. Aredes, H. Akagi, (2009), "Compensation algorithms based on the p-q and CPC theories for switching compensators in micro-grids", *Proc. of COBEP 09 Power Electronics Conference*, Brazilian DOI: 10.1109/COCEP.2009.5347593, pp. 32-40.
- [12] L.S. Czarnecki, (2009), "Effect of supply voltage harmonics on IRP-based switching compensator control", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 24, No. 2, pp. 483-488.
- [13] L.S. Czarnecki, (2010), "Effect of supply voltage asymmetry on IRP p-q - based switching compensator control", *IET Proc. on Power Electronics*, Vol. 3, No. 1, pp. 11-17.
- [14] L.S. Czarnecki, (2011), "Moce i kompensacja w obwodach z odkształconymi przebiegami prądu i napięcia, Część. 3 Składowe Fizyczne Prądu w obwodach z odbiornikami generującymi harmoniczne", *e-pismo on-line: Automatyka, Elektryka, Zakłócenia*, Vol. 1, No. 3, pp. 44-54, [www.epismo-aez.pl](http://www.epismo-aez.pl).
- [15] L.S. Czarnecki, (2011), "Moce i kompensacja w obwodach z odkształconymi przebiegami prądu i napięcia, Część. 5. Robocza, odbita i szkodliwa moc czynna", *e-pismo on-line: Automatyka, Elektryka, Zakłócenia*, Vol. 5, No. 5, pp. 100-108., [www.epismo-aez.pl](http://www.epismo-aez.pl).
- [16] L.S. Czarnecki, (1912), "Working, reflected and detrimental active powers", *IET on Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 6, No. 3, pp. 223-239.
- [17] L.S. Czarnecki, (2013) "Uwagi o terminie "jakość energii"", *e-pismo on-line: Automatyka, Elektryka, Zakłócenia*, No. 2, pp. 6-9, 2013, [www.epismo-aez.pl](http://www.epismo-aez.pl).
- [18] L.S. Czarnecki, (2014), "Moce i kompensacja w obwodach z odkształconymi przebiegami prądu i napięcia, Część. 6. Moce i kompensacja reaktancyjna w układach trójfazowych z przewodem neutralnym", *e-pismo on-line: Automatyka, Elektryka, Zakłócenia*, No. 1, pp. 48-58, [www.epismo-aez.pl](http://www.epismo-aez.pl).
- [19] L.S. Czarnecki, (2014), "Constraints of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory", (w druku), *IET Power Electronics*.