

# STRATEGIE STEROWANIA KOMPENSATORÓW KLUCZUJĄCYCH MOCY BIERNEJ, HARMONICZNYCH I ASYMETRII PRĄDU

**Leszek S. Czarnecki, IEEE Life Fellow, Louisiana State University, USA**

*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 redukować, kompensując jednocześnie prąd bierny i symetryzując prądy zasilania. W niniejszym artykule omówione są różne cele kompensacji oraz różne algorytmy sterowania kompensatorów kluczujących, oparte głównie na Teorii Składowych Fizycznych Prądu (ang.: Currents' Physical Components, CPC). W artykule omówiono także algorytm sterowania opartej na Teorii Chwilowej Mocy Biernej  $p-q$  (ang. Instantaneous Reactive Power  $p-q$  Theory, IRP  $p-q$ ).*

## **Control Strategies of Switching Compensator of the Reactive Power, Harmonics and Current Asymmetry**

*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 discussed as well.*

### **1. WSTĘP**

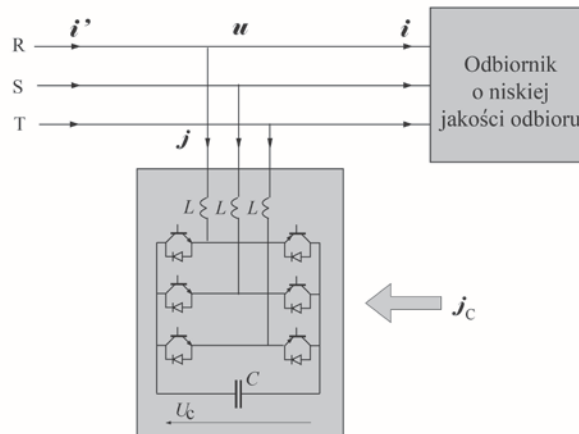
Tradycyjnym celem kompensacji w układach rozdzielczych była moc bierna. Jej redukcja pozwalała poprawić współczynnik mocy i zredukować różne niekorzystne skutki przesunięcia fazowego prądu odbiornika względem napięcia zasilania; przesunięcia powodującego pojawienie się w systemie mocy biernej. Służyły do tego i często służą i obecnie kompensatory reaktancyjne, chociaż możliwa jest także kompensacja mocy biernej niedowzbudzonymi 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, 7].

Wzrost odkształceń przebiegów prądu i napięcia, którego przyczyną jest wzrost w systemach rozdzielczych liczby i mocy odbiorników nieliniowych, takich jak lampy wyładowcze, piece mikrofalowe, sprzęt elektroniczny oraz urządzenia energoelektroniczne, jest nowym wyzwaniem dla kompensacji. Redukcji mocy biernej musi często towarzyszyć redukcja harmonicznych.

Tradycyjnymi urządzeniami umożliwiającymi redukcję harmonicznych prądu generowanych przez odbiorniki nieliniowe są filtry rezonansowe. Niestety, ich skuteczność gwałtownie się obniża w obecności harmonicznych w napięciu zasilania. Już przy, dopuszczalnym normami, poziomie odkształcenia napięcia ich skuteczność może spaść do zera, a nawet mogą one powodować [4] wzrost odkształceń. Jest to spowodowane rezonansami filtru z indukcyjnością systemu rozdzielczego.

Rezonanse takie nie mogą się pojawić jeśli filtr rezonansowy zastąpi się kompensatorem klucującym (ang.: switching compensator). Jego struktura pokazana jest na Rys. 1. Prąd takiego kompensatora nie jest odpowiedzią na napięcie na zaciskach kompensatora, lecz jest kształtowany przez przełączniki półprzewodnikowe, kluczowane z wysoką częstotliwością, często wielu kHz, tak aby prąd ten miał przebieg pożądanego prądu kompensującego. Kompensatory klucujące nazywane są także "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.

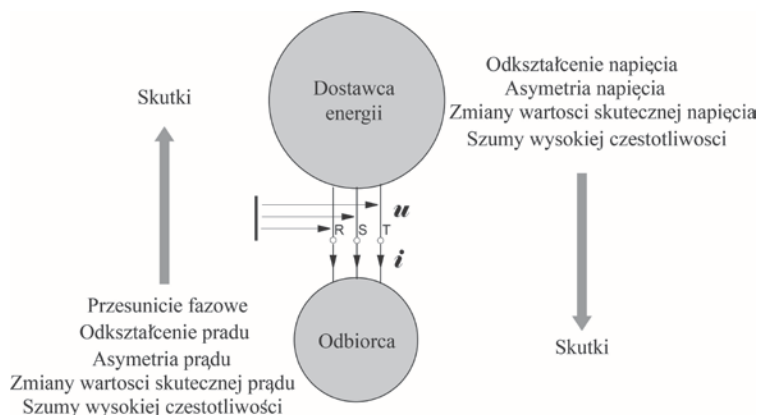


Rys. 1. Struktura kompensatora kompensującego włączonego równolegle do odbiornika.  
Structure of a switching compensator connected in parallel to the load.

Kompensatory klucujące umożliwiają zresztą realizację zadań wychodzących daleko poza tradycyjne cele kompensacji. 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 jest pojęcie "jakości energii" (ang.: Power Quality, PQ), dlatego poniżej wyjaśniony jest sens obu terminów.

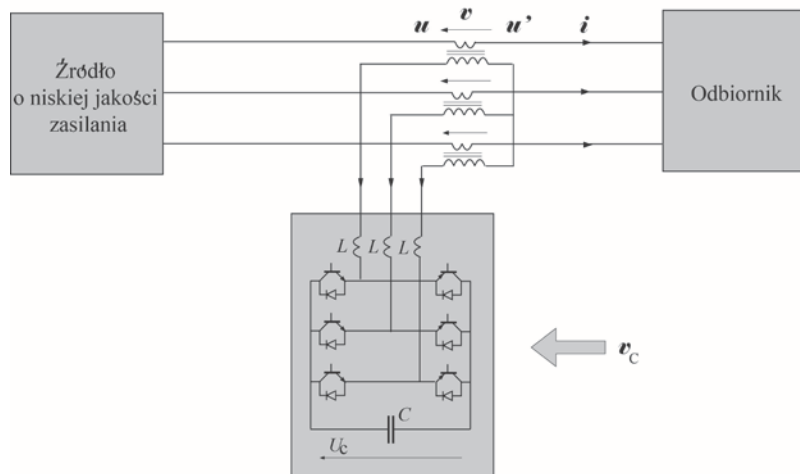
Z punktu widzenia odbiorcy energii zasilanie jest idealne, jeśli napięcie zasilania jest sinusoidalne, symetryczne, o niezmienniej wartości skutecznej. Wartość ta nie powinna się też zmieniać z mocą obciążenia. Odchylenia od takiego zasilania można traktować jako obniżenie jego jakości. Na obniżenie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



Rys. 2. Czynniki redukujące jakość zasilania i jakość obciążenia.  
Agents that degrade the Supply Quality and the Loading Quality.

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 Rys. 3, jakość odbioru może poprawiać kompensator włączony równoległe z odbiornikiem.



Rys. 3. Kompensator kluczujący włączony szeregowo.  
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 czy 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 mocą łączeniową tranzystorów. Ponadto, kompensatory kluczujące mają naturalną zdolność adaptacyjną, mogą więc być wykorzystywane do granicy ich zdolności kompensacyjnych bez zmiany kosztu kompensacji.

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 niezerównoważenia, 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 [5].

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

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 [6]:

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

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:

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

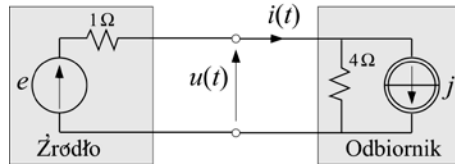
Jeśli pozostała część prądu odbiornika, czyli prąd bierny według definicji Fryzego,

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

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, takie przede wszystkim, 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 Rys. 4, w którym odbiornik zasilany napięciem sinusoidalnym o częstotliwości podstawowej  $e_1(t)$ , zasila odbiornik generujący harmoniczną prądu trzeciego rzędu  $j_3(t)$ .



Rys. 4. Obwód z odbiornikiem generującym trzecią harmoniczną.  
Circuits 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

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

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

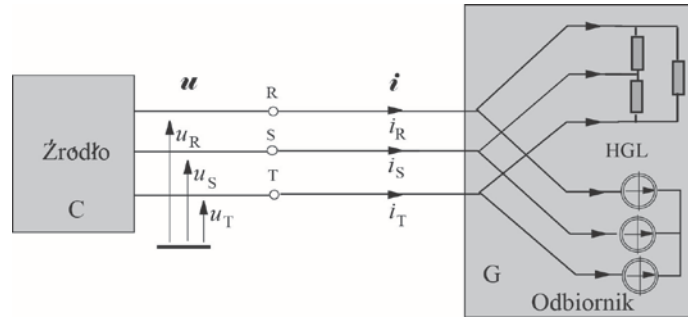
a zatem moc czynna odbiornika ma wartość równą zero, gdyż

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

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.

Tak więc, aby rozkład prądu był przydatny do sterowania kompensatora kluczującego, rozkład ten winien wyodrębnić składową prądu generowaną w nieliniowości odbiornika. Taką właściwość ma rozkład prądu w teorii mocy opartej na koncepcji Składowych Fizycznych Prądu (ang.: Currents' Physical Components, CPC) [6].

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



Rys. 5. Obwód trójfazowy z odbiornikami generującymi harmoniczne, HGL.  
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  $n$  jest równa

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

gdzie

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

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 harmonicznym  $N$  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  $n$  harmonicznym 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 rozrzutu  $\mathbf{i}_{sC}(t)$ , 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 artykule [9], 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 z składowych prądu nie uczestniczących w przesyle do odbiornika energii roboczej i które mogą być całkowicie kompensowane kompensatorem kluczującym. Redukuje on prąd zasilania do prądu roboczego, to jest do prądu sinusoidalnego i symetrycznego, o minimalnej wartości skutecznej:

$$\|\mathbf{i}_w\| = \frac{P_w}{\|\mathbf{u}_w\|}. \quad (22)$$

### 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 Nabae i Akagi'ego [10, 11], 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:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3/2} & 0 \\ 1/\sqrt{2} & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_R \\ u_S \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3/2} & 0 \\ 1/\sqrt{2} & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_R \\ i_S \end{bmatrix}. \quad (23)$$

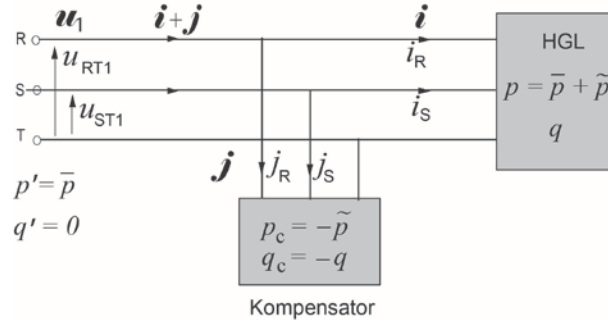
Napięcia i prądy określone we współrzędnych  $\alpha$  i  $\beta$  służą do zdefiniowania chwilowej mocy czynnej  $p$  oraz chwilowej mocy biernej  $q$ , mianowicie:

$$\begin{aligned} p &= u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta \\ q &= u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha. \end{aligned} \quad (24)$$

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

$$p = \bar{p} + \tilde{p}. \quad (25)$$

Według autorów teorii IRP p-q [10, 11], 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 Rys. 6.



Rys. 6. Strategia sterowania kompensatora wg. IRP p-q Theory.  
Strategy of a compensator control based on the IRP p-q Theory.

Ponieważ moce chwilowe urządzenia trójfazowego mogą być przedstawione w postaci

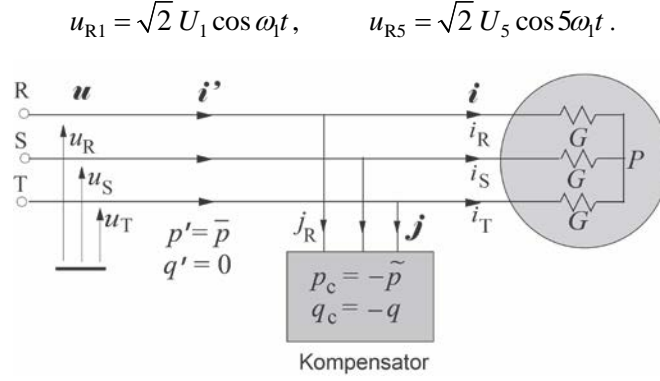
$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = U_C \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (26)$$

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

$$\mathbf{j} \stackrel{df}{=} \begin{bmatrix} j_\alpha \\ j_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\alpha & -u_\beta \\ u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -q \end{bmatrix} = U_C^{-1} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -q \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Teoria IRP p-q, jako podstawa teoretyczna do sterowania kompensatorów kluczujących, jest bardzo pociągająca ze względu na prostotę obliczeniową [12]. 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  $\mathbf{j}$ . Przyciągające było ponadto zapewnienia autorów tej Teorii [10, 11], że można ją stosować we wszelkich warunkach, niezależnie od rodzaju odbiornika i warunków zasilania.

Niestety, wyniki kompensacji opartej na IRP p-q wtedy, gdy zastosowana jest ona w warunkach odkształconego napięcia zasilania, dają zaskakująco złe wyniki. Zostało to pokazane w artykule [14] w którym algorytm ten użyto do sterowania kompensatora włączonego na zaciskach idealnego rezystancyjnego i zrównoważonego odbiornika, to jest odbiornika o najwyższym możliwym współczynniku mocy, lecz w warunkach napięcia zasilania odkształconego harmoniczną piątą rzędu, pokazanym na Rys. 7, to jest



Rys. 7. Idealny rezystancyjny odbiornik z kompensatorem.  
Ideal resistive load with a compensator.

Taki odbiornik nie wymaga oczywiście żadnej kompensacji, a jeśli już kompensator jest zainstalowany, należałoby oczekiwać, że jego prąd  $\mathbf{j}$  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

$$j_R = \frac{-2\sqrt{2} G U_1 U_5 \cos 6\omega_1 t}{U_1^2 + U_5^2 + 2U_1 U_5 \cos 6\omega_1 t} (U_1 \cos \omega_1 t + U_5 \cos 5\omega_1 t). \quad (28)$$

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 harmoniczną 5-tego rzędu, to chwilowa moc czynna zrównoważonego, rezystancyjnego odbiornika trójfazowego ma przebieg:

$$p = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta = 3G(U_1^2 + U_5^2 + 2U_1 U_5 \cos 6\omega_1 t). \quad (29)$$

Tak więc moc ta ma niezerową składową oscylacyjną

$$\tilde{p} = 6G U_1 U_5 \cos 6\omega_1 t. \quad (30)$$

Podobna sytuacja pojawia się przy asymetrii napięcia zasilania. Jeżeli idealny odbiornik rezystancyjny, taki jak na Rys. 7, zasilany jest napięciem sinusoidalnym, lecz asymetrycznym, to jest o składowej dodatniej i składowej ujemnej, równych odpowiednio dla linii R

$$u_R^p = \sqrt{2} U^p \cos \omega_1 t, \quad u_R^n = \sqrt{2} U^n \cos \omega_1 t \quad (31)$$

to jak pokazano to w artykule [15], kompensator sterowany algorytmem opartym na Teorii IRP p-q wytwarza w linii R prąd kompensujący

$$j_R = \frac{-2\sqrt{2} G (U^p + U^n) U^p U^n}{U^{p2} + U^{n2} + 2U^p U^n \cos 2\omega_1 t} \cos \omega_1 t \cos 2\omega_1 t. \quad (32)$$

Przyczyną tego jest oczekiwanie oparte na tej 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

$$p = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta = 3G(U^{p2} + U^{n2} + 2U^p U^n \cos 2\omega_1 t) \quad (33)$$

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 [16], że moce chwilowe  $p$  i  $q$  są formami liniowymi iloczynów prądów i napięć, postaci  $\mathcal{F}\{u_x i_y\}$ . Cechy tych mocy mogą być kształtowane w równym stopniu przez prądy jak i 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 odnośnie możliwości poprawy jakości odbioru energii elektrycznej i jakości zasilania w systemach rozdzielczych [8]. Wykorzystanie tego potencjału zależy głównie od algorytmów ich sterowania. Kompensatory takie używane są przede wszystkim jako kompensatory włączone równolegle do odbiornika i w takiej konfiguracji pozwalają minimalizować wartość skuteczną prądu zasilania oraz redukować 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, formułowane w oparciu o Teorię Chwilowej Mocy Biernej p-q, nie są jasne i mogą prowadzić do błędnego sterowania kompensatora.

#### LITERATURA

- [1] Ch.P. Steinmetz (1917), Theory and calculation of electrical apparatus, *McGraw-Hill Book Comp.*, New York.
- [2] G. Klinger, (1979), "LC Kompensation und symmetrierung fur Mehrphasensysteme mit beliebigen Spannungsverlauf", *ETZ Archiv*, H.2, pp. 57-61.
- [3] E. Miller, (1982), Reactive power control in electric systems, *John Willey & Sons*, 1982.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] L.S. Czarnecki, (2005), Moce w Obwodach Elektrycznych z Niesinusoidalnymi Przebiegami Prądów i Napięć, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*.
- [7] D. Mayer, P. Kropik, (2005), "New approach to symmetrization of three-phase networks", *Intl. Journ. of Electrical Engineering*, Vol. 56, No. 5-6, pp. 156-161.
- [8] H.L. Ginn, G. Chen, (2008), "Switching compensator control strategy based on CPC power theory", *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 84, No. 6, pp. 23-27.
- [9] L.S. Czarnecki, (1912), "Working, reflected and detrimental active powers," *IET on Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 6, No. 3, pp. 223-239.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] L.F. Monteiro, J.L. Alfonso, J.G. Pinto J, (2009), Watanabe E.M., Aredes M., Akagi H.: '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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] L.S. Czarnecki, (2014), "Constraints of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory", (w druku), *IET Power Electronics*.