

# O ZJAWISKACH FIZYCZNYCH DECYDUJĄCYCH O SKUTECZNOŚCI PRZESYŁU ENERGII W SYSTEMACH ENERGETYCZNYCH

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

*Skuteczność przesyłu energii w systemach energetycznych zależy od pewnej liczby zjawisk fizycznych towarzyszących temu przesyłowi. Ich obecność nie jest w środowisku elektrotechnicznym w pełni uświadamiana lub są one błędnie interpretowane. Wtedy, gdy napięcia i prądy w systemie energetycznym są sinusoidalne i symetryczne, wówczas przyczyny zmniejszania skuteczności przesyłu energii są względnie dobrze znane i kojarzone są one z obecnością mocy biernej. Nie jest już tak wtedy, gdy napięcia i prądy są odkształcone lub/i niesymetryczne. Tych zjawisk jest wówczas więcej. Większość z nich została zidentyfikowana w ramach teorii mocy opartej na koncepcji Składowych Fizycznych Prądów (ang.: Currents' Physical Components (CPC)). Niniejszy artykuł zjawiska te opisuje i omawia.*

## On Physical Phenomena that Determine the Effectiveness of the Energy Transfer in Electrical Systems

*The effectiveness of the energy transfer in electrical power systems depends on a number of physical phenomena. Their presence is not in the electrical engineering community well recognized, however, or they are wrongly interpreted. As long voltages and currents are sinusoidal and symmetrical, a reduction in the energy transfer effectiveness is associated usually with a presence of the reactive power. However, when the voltages and currents are/or distorted and asymmetrical, then there are much more phenomena that can contribute to this effectiveness decline. Majority of them were identified in the frame of the Currents' Physical Components (CPC)-based power theory. This paper describes and explains these phenomena.*

### 1. WSTĘP

Skuteczność przesyłu energii ze źródła zasilania do odbiornika określana jest zwykle wartością współczynnika mocy  $\lambda$ , który definiowany jest jako stosunek mocy czynnej  $P$  do mocy pozornej  $S$  na zaciskach odbiornika. W systemach z sinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia oraz symetrią prądów i napięć fazowych, jedyną przyczyną zmniejszenia się skuteczności przesyłu energii może być obecność mocy biernej  $Q$ . Powszechnie uważa się, że pojawia się ona w wyniku oscylacji energii między źródłem zasilania a odbiornikiem mającym zdolność gromadzenia energii w polach magnetycznych bądź elektrycznych. Jakkolwiek jest to, jak pokazano w [7], interpretacja błędna, jej błędność nie ma wpływu na projektowanie i pracę kompensatorów mocy biernej, poprawiających skuteczność przesyłu energii.

Prądy i napięcia w systemach transmisyjnych, są zwykle, z dużą dokładnością, sinusoidalne i symetryczne. Natomiast w systemach dystrybucyjnych, w miarę zbliżania się do odbiorników, coraz częściej nieliniowych i niestacjonarnych, a często jednofazowych, odkształcenie prądów i napięć oraz ich asymetria może wzrastać. Pojawiają się wtedy w systemie nowe zjawiska obniżające skuteczność przesyłu energii. Zostały one ujawnione [1 - 6], dopiero w trakcie rozwoju teorii mocy Składowych Fizycznych Prądów (ang. Currents' Physical Components – CPC). Dlatego środowisko elektrotechniczne nie jest raczej świadome istnienia tych zjawisk. Niniejszy artykuł ma temu środowisku przybliżyć ich naturę. Ma to znaczenie nie tylko poznawcze, lecz i praktyczne. Poprawa skuteczności przepływu energii, a więc poprawa współczynnika mocy w obecności odkształceń przebiegów prądu i napięcia oraz ich asymetrii, przy pomocy kompensatorów, wymaga zrozumienia natury zjawisk, które tę skuteczność obniżają.

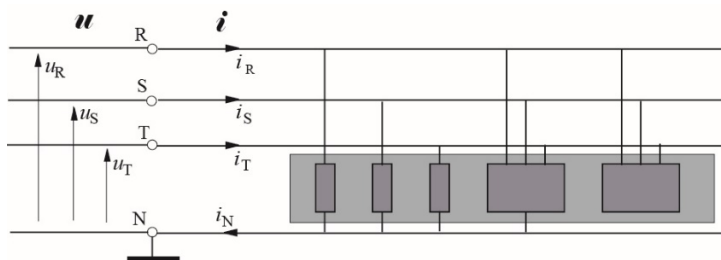
### 2. SKŁADOWE FIZYCZNE PRĄDU

Prąd zasilania  $i$  odbiornika trójfazowego z przewodem zerowym, pokazanego na Rys. 1, będący w istocie wektorem trójfazowym prądów liniowych  $i_R(t)$ ,  $i_S(t)$  oraz  $i_T(t)$ , może być [4, 9, 10] w systemach z niesinusoidalnym i niesymetrycznym napięciem zasilania rozłożony na osiem składowych, mianowicie

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_{Iw} + \mathbf{i}_{Cd} + \mathbf{i}_{Cs} + \mathbf{i}_{Cr} + \mathbf{i}_{Cu}^p + \mathbf{i}_{Cu}^n + \mathbf{i}_{Cu}^z + \mathbf{i}_G \quad (1)$$

Jakkolwiek składowe tego rozkładu są jedynie składowymi prądu odbiornika, będą one dalej nazywane, dla zwięzłości, „**prądami**”. Cechą szczególną rozkładu (1) jest to, że jego składowe są stowarzyszone z odrębnymi zjawiskami fizycznymi. Dlatego prądy te nazywa się „**Składowymi Fizycznymi Prądami**” liniowych  $i_R(t)$ ,  $i_S(t)$  oraz  $i_T(t)$

odbiornika. Nazwa ta może być jednak myląca, gdyż prądy te jako obiekty fizyczne nie istnieją. Są jedynie wynikiem pewnego rozkładu matematycznego prądu zasilania, a rozkładów takich może być nieskończenie wiele. Prądy te są więc jedynie obiektami matematycznymi. Istnienie tych prądów zostało ujawnione w szeregu prac [1, 2, 3, 5, 6, 9], w których można znaleźć także ich definicje.



Rys. 1. Odbiornik trójfazowy w obwodzie z przewodem zerowym.

Wśród prądów rozkładu (1) jedynie prąd  $\mathbf{i}_{1w}$ , zwany „**prądem roboczym**” (eng. **working current**) [5] jest prądem użytecznym, w tym sensie, że jest to jedyna Składowa Fizyczna Prądów odbiornika przenosząca energię ze źródła zasilania do odbiornika w sposób trwały i jest to energia użyteczna. Pozostałe prądy energii do odbiornika w sposób trwały i użyteczny nie dostarczają, a jedynie powiększają trójfazową wartość skuteczną prądu zasilania  $\|\mathbf{i}\|$

$$\|\mathbf{i}\| = \sqrt{\|\mathbf{i}_{1w}\|^2 + \|\mathbf{i}_{Cd}\|^2 + \|\mathbf{i}_{Cs}\|^2 + \|\mathbf{i}_{Cr}\|^2 + \|\mathbf{i}_{Cu}^p\|^2 + \|\mathbf{i}_{Cu}^n\|^2 + \|\mathbf{i}_{Cu}^z\|^2 + \|\mathbf{i}_G\|^2} \quad (2)$$

powodując obniżenie skuteczności dostawy energii, to jest obniżenie wartości współczynnika mocy  $\lambda$  i wzrost strat energii na rezystancji źródła zasilającego. Wyrażenie (2) jest wynikiem pewnej szczególnej cechy Składowych Fizycznych Prądów, mianowicie, są one do siebie wzajemnie ortogonalne, to znaczy, iloczyn skalarny wszystkich prądów,  $\mathbf{x}(t)$ ,  $\mathbf{y}(t)$ , w tym rozkładzie

$$(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{x}(t) \mathbf{y}(t) dt \quad (3)$$

jest równy zeru.

Znajomość zjawisk, bądź cech systemu powodujących pojawienie się w nim poszczególnych Składowych Fizycznych pozwala zrozumieć przyczyny obniżania się skuteczności przesyłu energii w obecności odkształceń i asymetrii prądu i napięcia. Znajomość ta jest także niezbędna dla rozwoju metod poprawy tej skuteczności. Celem niniejszego artykułu jest wyjaśnienie tych zjawisk, ale bez nadmiernego używania metod matematycznych, które pierwotnie były niezbędne do ich ujawnienia.

### 3. ROBOCZY I SZKODLIWY PRĄD CZYNNY

W obwodach jedno- i trójfazowych z sinusoidalnymi i symetrycznymi przebiegami prądu i napięcia, energia w sposób trwały przepływa wyłącznie od źródła zasilania do odbiornika. Przymiotnik „**trwały**” użyty jest tu w tym znaczeniu, że w jednym okresie  $T$  zmienności prądu i napięcia, energia dostarczona do odbiornika ma wartość niezerową i dodatnią.

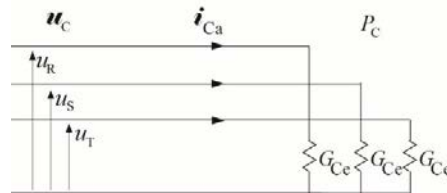
Moc czynna indywidualnych harmonicznych  $P_n$ , mierzona na zaciskach odbiornika, może mieć wartość dodatnią lub ujemną. Jeśli dla pewnego rzędu  $n$  harmonicznej moc  $P_n$  ma wartość dodatnią, to taka harmoniczna prądu i napięcia przenosi energię w sposób trwały do odbiornika. Zbiór rzędów  $n$  takich harmonicznych oznaczmy symbolem  $N_C$ , całkowitą moc czynną tych harmonicznych oznaczmy symbolem  $P_C$ , a trójfazową wartość skuteczną tych harmonicznych oznaczmy symbolem  $\|\mathbf{u}_C\|$ . Moc czynna  $P_n$  pozostałych harmonicznych jest ujemna, co oznacza, że przenoszą one energię w sposób trwały z odbiornika do źródła, gdzie jest ona rozpraszana na rezystancji wewnętrznej źródła zasilającego. Zbiór rzędów takich harmonicznych można oznaczyć symbolem  $N_G$ .

Ze względu na moc czynną  $P_C$ , przy trójfazowej wartości skutecznej napięcia  $\|\mathbf{u}_C\|$ , rozpatrywany odbiornik jest równoważny zrównoważonemu odbiornikowi rezystancyjnemu, pokazanemu na Rys. 2, o konduktancji  $G_{Ce}$ , równej

$$G_{Ce} = \frac{P_C}{\|\mathbf{u}_C\|^2} \quad (4)$$

który obciąża źródło zasilania prądem, zwanym „*prądem czynnym*”

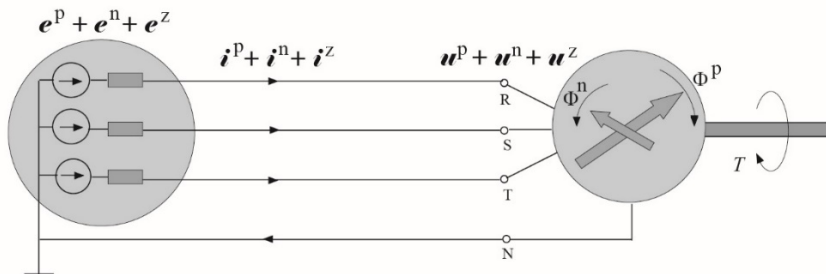
$$\mathbf{i}_{Ca}(t) = G_{Ce} \mathbf{u}_C(t). \quad (5)$$



Rys. 2. Rezystancyjny obwód równoważny ze względu na moc czynną  $P_C$ .

W systemach energetycznych w przybliżeniu 2/3 odbiorników to silniki, wśród których dominują silniki indukcyjne. W silnikach takich, energia na wał przenoszona jest wyłącznie przez składową symetryczną kolejności dodatniej harmonicznej podstawowej prądu czynnego (5). Jest to *prąd roboczy*  $\mathbf{i}_{Iw}$ .

Składowe kolejności ujemnej oraz zerowej harmonicznej podstawowej prądu czynnego  $\mathbf{i}_{Ca}$  energii na wał nie przenoszą, gdyż nie tworzą w stojanie silnika pola magnetycznego wirującego zgodnie z kierunkiem obrotów wirnika. Energia przenoszona przez te składowe  $W_D$ , jest rozpraszana w silniku, podwyższając jedynie jego temperaturę, a więc redukując jego żywotność. Podobnie, niemal całkowicie rozpraszana jest energia przenoszona przez wyższe harmoniczne prądu i napięcia zasilania. Harmoniczne rzędu  $n = 3k-1$ , ( $k = 1,2,3..$ ) tworzą strumień magnetyczny wirujący w kierunku przeciwnym do obrotu silnika. Harmoniczne rzędu  $n = 3k+1$  tworzą strumień magnetyczny wirujący w kierunku obrotów, lecz o prędkości kątowej  $\omega = (n-1)\omega_1$ , to jest wielokrotnie wyższej od tych obrotów, co oznacza, że dla takich wirujących strumieni magnetycznych silnik zachowuje się stale jak w stanie startu. Harmoniczne rzędu  $n = 3k$  wirującego pola magnetycznego nie tworzą. Kierunek wirowania pól magnetycznych harmonicznej podstawowej w stojanie silnika indukcyjnego ilustruje Rys. 3.



Rys. 3. Kierunki wirowania pól magnetycznych w silniku indukcyjnym.

Składowa prądu czynnego  $\mathbf{i}_{Ca}$  przenosząca energię  $W_D$ , jakkolwiek jest prądem czynnym, jest prądem szkodliwym. Składową tę oznaczamy symbolem  $\mathbf{i}_{Cd}$  i nazywamy „*szkodliwym prądem czynnym*” (ang. *detrimental active current*). Tak więc, prąd czynny ma dwie składowe, roboczą i szkodliwą, mianowicie

$$\mathbf{i}_{Ca}(t) = \mathbf{i}_{Iw}(t) + \mathbf{i}_{Cd}(t). \quad (6)$$

Są one wzajemnie ortogonalne, zatem ich trójfazowe wartości skuteczne spełniają relację

$$\|\mathbf{i}_{Ca}\|^2 = \|\mathbf{i}_{Iw}\|^2 + \|\mathbf{i}_{Cd}\|^2. \quad (7)$$

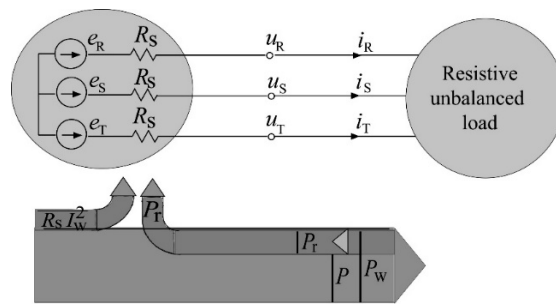
Rozumowanie powyższe nie jest jednak prawdziwe w przypadku odbiorników stacjonarnych, nie przenoszących energii poprzez wirujące pole magnetyczne. Odbiorniki takie zasilane są jednak obecnie coraz częściej poprzez różne przekształtniki energoelektroniczne. Odkształcenie napięcia lub jego asymetria oddziałują zwykle szkodliwie na ich pracę. Dlatego można przyjąć, jakkolwiek jest to tylko przybliżenie, że prąd  $\mathbf{i}_{Cd}$  jest prądem szkodliwym także w przypadku odbiorników energoelektronicznych.

#### 4. PRĄD GENEROWANY

Suma harmonicznych prądu odbiornika, dla których moc czynna  $P_n$  jest ujemna, jest „*prądem generowanym*”,  $\mathbf{i}_G$ . Prąd ten pojawia się wskutek nieliniowości odbiornika lub/ oraz wtedy, gdy parametry odbiornika zmieniają się

okresowo, z okresem zmienności napięcia zasilania  $T$ . W niezrównoważonych układach trójfazowych pojawia się w prądzie odbiornika składowa kolejności ujemnej, a wtedy, gdy odbiornik zasilany jest linią z przewodem zerowym, również składowa prądu kolejności zerowej. Składowe te przenoszą energię z odbiornika do źródła zasilania, gdzie jest ona rozpraszana na rezystancji źródła. Prądy te **generuje** niezrównoważenie odbiornika, jego nieliniowość i okresowa zmienność parametrów, co uzasadnia jego nazwę.

Zjawisko to najłatwiej jest sobie wyobrazić wtedy, gdy napięcie źródłowe  $e$  jest sinusoidalne i symetryczne. Niezrównoważenie oraz nieliniowość lub okresowa zmienność parametrów odbiornika powoduje wtedy odkształcenie i asymetrię prądów liniowych. Spadek napięcia na impedancji wewnętrznej źródła zasilania powoduje odkształcenie i asymetrię napięcia na zaciskach odbiornika. Z pomiarów zespolonych wartości skutecznych harmonicznych prądu i napięcia na zaciskach odbiornika oraz wartości ich składowych symetrycznych można obliczyć moce czynne harmonicznych i ich składowych symetrycznych. Wszystkie te moce, za wyjątkiem mocy czynnej składowej symetrycznej kolejności dodatniej harmonicznej podstawowej, muszą być ujemne. Tylko ona bierze udział w przenoszeniu energii w sposób trwały ze źródła zasilania do odbiornika. Wszystkie pozostałe składowe przenoszą energię w przeciwnym kierunku, do źródła. Ilustruje to Rys. 4, dla obwodu z niezrównoważonym odbiornikiem czysto rezystancyjnym.



Rys. 4. Diagram mocy roboczej i odbitej w obwodzie trójfazowym.

Ponieważ napięcie źródłowe  $e$  jest sinusoidalne i symetryczne, zatem energia jest dostarczana ze źródła zasilania do odbiornika wyłącznie poprzez składową kolejności dodatniej harmonicznej podstawowej prądu zasilania. Musi być ona większa od energii przekształcanej w odbiorniku na inne formy energii, z mocą czynną  $P$ , o energię  $W_d$  przenoszoną przez szkodliwy prąd czynny  $i_{cd}$  z powrotem do źródła zasilania, gdzie jest ona rozpraszana na rezystancji źródła. Oznacza to, że moc czynna składowej kolejności dodatniej harmonicznej podstawowej prądu zasilania  $P_1^P = P_w$  musi być większa od mocy czynnej odbiornika  $P$ .

## 5. PRĄD ROZRZUTU

Teoria mocy oparta o koncepcję CPC ujawniła [1, 2] istnienie w prądzie odbiornika składowej związanej ze zmiennością konduktancji odbiornika  $G_n$  z częstotliwością harmonicznych. Składową prądu stowarzyszoną z tym zjawiskiem  $i_{Cs}$  nazwano [1, 2] „**prądem rozrzutu**” (ang. **scattered current**), ponieważ wartości konduktancji  $G_n$  są rozrzucone wokół konduktancji równoważnej  $G_{Ce}$ . Podobnie jak prąd czynny  $i_{Ca}$ , prąd ten nie istnieje jako obiekt fizyczny, lecz jedynie jako obiekt matematyczny. Wyjaśnijmy jego sens.

Moc czynna harmonicznej  $n$ -tego rzędu prądu odbiornika ma wartość

$$P_n = G_n \| \mathbf{u}_n \|^2 \quad (8)$$

tymczasem przyjęcie, że energia przenoszona jest w sposób trwały wyłącznie przez prąd czynny  $i_{Ca}$ , jest równoważne przyjęciu, że moc czynna harmonicznej  $n$ -tego rzędu prądu czynnego odbiornika ma inną wartość, mianowicie

$$P_{an} = G_{Ce} \| \mathbf{u}_n \|^2. \quad (9)$$

Różnica między tymi dwiema mocami wynosi

$$P_n - P_{an} = (G_n - G_{Ce}) \| \mathbf{u}_n \|^2. \quad (10)$$

Sumując tę różnicę dla wszystkich harmonicznych o rzędach  $n$  ze zbioru  $N_C$ , otrzymujemy

$$\sum_{n \in N_C} (P_n - P_{an}) = \sum_{n \in N_C} (G_n - G_{Ce}) \|\mathbf{u}_n\|^2 = 0 \quad (11)$$

ponieważ

$$\sum_{n \in N_C} P_n = P_C, \quad \sum_{n \in N_C} P_{an} = \sum_{n \in N_C} G_{Ce} \|\mathbf{u}_n\|^2 = G_{Ce} \|\mathbf{u}_C\|^2 = P_C \quad (12)$$

co oznacza, że prąd rozrzutu nie przenosi ze źródła zasilania do odbiornika, w sposób trwały, żadnej energii. Jest tak, ponieważ wartości konduktancji  $G_n$  są rozrzucone wokół konduktancji równoważnej  $G_{Ce}$ . Dla pewnych harmonicznych różnica mocy (10) jest dodatnia, dla innych ujemna. Tak więc, jeśli z prądu odbiornika wyodrębni się prąd czynny  $\mathbf{i}_{Ca}$ , to musi w tym prądzie być i prąd rozrzutu  $\mathbf{i}_{Cs}$ . Nie przenosi on energii do odbiornika, lecz podwyższa trójfazową wartość skuteczną prądu zasilania  $\|\mathbf{i}\|$ .

## 6. PRĄD BIERNY

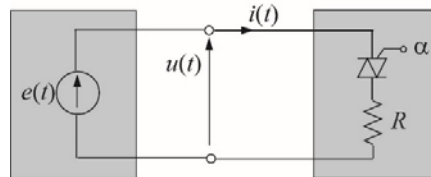
Harmoniczne prądy mogą być przesunięte fazowo względem harmonicznych napięcia zasilania. Pojawia się wtedy w prądzie odbiornika „prąd bierny”  $\mathbf{i}_{Cr}$ . Przyczyną tego przesunięcia mogą być elementy reaktancyjne LC w odbiorniku, lub zmieniające się okresowo, z okresem zmienności napięcia  $T$ , parametry odbiornika, w szczególności, odbiorników z przełącznikami. W pewnych sytuacjach, pojawieniu się prądu biernego towarzyszą oscylacje energii między źródłami zasilania a odbiornikiem. Tak jest, na przykład, w obwodach jednofazowych z odbiornikami liniowymi. Nie jest już jednak tak w obwodach trójfazowych. Można to sprawdzić obliczając moc chwilową  $p(t)$  prądu biernego w zrównoważonym układzie trójfazowym z sinusoidalnym i symetrycznym napięciem zasilania. Moc chwilowa jest prędkością przepływu energii  $W$  pomiędzy źródłem zasilania a odbiornikiem, mianowicie

$$\begin{aligned} p(t) &= \frac{dW}{dt} = u_R(t)i_{Rr}(t) + u_S(t)i_{Sr}(t) + u_T(t)i_{Tr}(t) = \\ &= \mathbf{u}^T \mathbf{i}_r = \sqrt{2}U \begin{bmatrix} \cos \omega t \\ \cos(\omega t - 120^\circ) \\ \cos(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix}^T \sqrt{2}I_r \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \equiv 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Oznacza to, że nie ma w obwodzie żadnego przepływu energii związanej z istnieniem prądu biernego. To samo dotyczy oczywiście każdej harmonicznej napięcia i prądu, a zatem, niezależnie od tego, czy napięcie zasilania odbiornika jest sinusoidalne czy nie, obecności prądu biernego nie towarzyszy żaden przepływ energii.

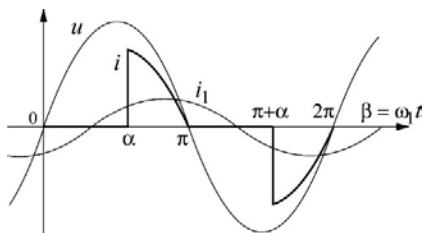
Należy tu zwrócić uwagę na to, że iloczyn prądu i napięcia indywidualnych faz nie jest stale równy zeru, co mogłoby sugerować istnienie przepływu energii. Jest to jednak wniosek błędny, gdyż taki iloczyn nie jest mocą chwilową. Jest on zależny od punktu odniesienia napięcia, który może być dowolny. W szczególności, jeśli pewien zacisk odbiornika przyjmiemy jako taki punkt odniesienia, to napięcie na nim jest stale równe zeru, a zatem stale równy zeru jest także iloczyn napięcia i prądu na takim zacisku. Taki iloczyn nie jest mocą chwilową.

Obecność elementów reaktancyjnych LC w odbiorniku nie jest niezbędna dla istnienia w jego prądzie prądu biernego. Może on się pojawiać także w prądzie odbiorników czysto rezystancyjnych, to jest odbiorników nie mających zdolności akumulacji energii w polach elektrycznych lub magnetycznych. Przykład takiego obwodu pokazany jest na Rys. 5, w którym prąd kontrolowany jest kątem zapłonu  $\alpha$  szeregowo włączonego TRIACa.



Rys. 5. Obwód z odbiornikiem rezystancyjnym i TRIAC-iem kontrolującym prąd obwodu.

Przebieg prądu odbiornika przy sinusoidalnym napięciu źródłowym w tym obwodzie pokazany jest na rys. 6. Ponieważ prąd nie może w żadnej chwili być przeciwnego znaku niż napięcie, moc chwilowa na zaciskach odbiornika nie może być ujemna. Zatem nie może być oscylacji energii między źródłem zasilania a odbiornikiem.



Rys. 6. Przebieg napięcia i prądu w obwodzie z TRIAC-iem.

Pomimo braku takich oscylacji energii, składowa podstawowa prądu  $i_1(t)$  może być przesunięta fazowo względem napięcia zasilania. Tak więc, prąd odbiornika czysto rezystancyjnego może mieć składową bierną  $i_r(t)$ . Przyjmując, na przykład, że napięcie zasilania ma przebieg

$$u(t) = 220 \sqrt{2} \sin \omega_1 t \text{ V}$$

rezystancja odbiornika wynosi  $R = 1 \Omega$ , zaś kąt zapłonu TRIACa  $\alpha = 135^\circ$ , otrzymamy harmoniczną podstawową prądu zasilania

$$i_1(t) = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega_1 t - \varphi_1) = 40.32 \sqrt{2} \sin(\omega_1 t - 60.28^\circ) \text{ A}$$

i jest to prąd bierny odbiornika  $i_r(t)$ . Zatem taki, czysto rezystancyjny odbiornik, ma moc bierną

$$Q = Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1 = 220 \times 40.32 \times \sin(60.28^\circ) = 7.70 \text{ kvar} .$$

Podobnie jest ze sterowanymi przekształtnikami prądu przemiennego na prąd stały, zwanymi niekiedy prostownikami sterowanymi, budowanymi zwykle jako urządzenia trójfazowe, często wielkiej mocy. Jakkolwiek urządzenia takie mają zwykle w swej strukturze induktry, są to w zasadzie urządzenia rezystancyjne. Napięcie wyjściowe takich przekształtników zmieniane jest zmianą kąta zapłonu tyrystorów, co przesuwa fazowo prąd zasilania przekształtnika względem jego napięcia. Przesunięcie to wprowadza prąd bierny do prądu zasilania przekształtnika i obciąża źródło zasilania mocą bierną.

## 7. PRĄD NIEZRÓWNOWAŻENIA

Wtedy, gdy odbiornik trójfazowy jest zrównoważony, to znaczy wtedy, gdy jego impedancje fazowe są wzajemnie równe, jego prąd zasilania ma wyłącznie składowe fizyczne omówione powyżej, to znaczy jego prąd, zwany „**prądem odbiornika zrównoważonego**” (ang. **balanced load current**)  $\mathbf{i}_b$ , ma wyłącznie nie więcej niż pięć składowych fizycznych, mianowicie

$$\mathbf{i} = \mathbf{i}_b = \mathbf{i}_{lw} + \mathbf{i}_{Cd} + \mathbf{i}_{Cs} + \mathbf{i}_{Cr} + \mathbf{i}_G . \quad (14)$$

Jeśli odbiornik nie jest zrównoważony, to w jego prądzie pojawia się „**prąd niezrównoważenia**” (ang. **unbalanced current**)

$$\mathbf{i}_{Cu} = \mathbf{i} - \mathbf{i}_b . \quad (15)$$

Prąd ten nie uczestniczy w trwałym przesyłaniu energii ze źródła zasilania do odbiornika, a jedynie powiększa trójfazową wartość skuteczną prądu zasilania. Jest to składowa fizyczna prądu, jakkolwiek nie jest rzeczą oczywistą, czy niezrównoważenie odbiornika można określać jako zjawisko, czy tylko jako pewną cechę odbiornika.

Prąd niezrównoważenia może być rozłożony na składową symetryczną kolejności dodatniej, ujemnej oraz składową kolejności zerowej, mianowicie

$$\mathbf{i}_{Cu} = \mathbf{i}_{Cu}^p + \mathbf{i}_{Cu}^n + \mathbf{i}_{Cu}^z \quad (16)$$

które są do siebie, jako prądy różnej kolejności, ortogonalne, zatem

$$\|\mathbf{i}_{Cu}\| = \sqrt{\|\mathbf{i}_{Cu}^p\|^2 + \|\mathbf{i}_{Cu}^n\|^2 + \|\mathbf{i}_{Cu}^z\|^2} . \quad (17)$$

Należy tu zwrócić uwagę na to, że w obwodach bez przewodu zerowego prąd odbiornika nie może mieć składowej kolejności zerowej. Ponadto, prąd niezrównoważenia musi mieć kolejność przeciwną do kolejności napięcia źródłowego. Tak więc, w obwodach trójprzewodowych z sinusoidalnym napięciem zasilania

$$\mathbf{i}_{Cu}^z \equiv 0, \quad \mathbf{i}_{Cu}^p \equiv 0, \quad \mathbf{i}_{Cu} \equiv \mathbf{i}_{Cu}^n. \quad (18)$$

Jeśli napięcie źródłowe  $e$  jest odkształcone harmonicznymi kolejno ujemnej, w szczególności, 5-tą harmoniczną, to w prądzie odbiornika może pojawić się składowa prądu niezrównoważenia kolejności dodatniej  $\mathbf{i}_{Cu}^p$  tej harmonicznnej.

## 8. PODSUMOWANIE

Artykuł niniejszy omawia zjawiska fizyczne wpływające na skuteczność przesyłu energii w systemach energetycznych z odkształconym i niesymetrycznym napięciem zasilania, ujawnione w ramach teorii mocy Składowych Fizycznych Prądów. Artykuł skupia się raczej na fizycznej stronie tych zjawisk, niż na ich opisie matematycznym, dostępnym w innych artykułach dotyczących tej teorii. Pominęto również opis matematycznej zależności składowych fizycznych od parametrów odbiornika, niezbędnych dopiero przy syntezie kompensatorów, a mniej istotnych przy interpretacji fizycznej zjawisk energetycznych.

Artykuł pokazuje, że pięć, i tylko pięć zjawisk fizycznych decyduje o wartości prądu odbiorników trójfazowych z niesinusoidalnym napięciem zasilania. Są to:

1. Trwały przepływ energii ze źródła zasilania do odbiornika,
2. Trwały przepływ energii z odbiornika do źródła zasilania, spowodowany generacją harmonicznnych w odbiorniku,
3. Przesunięcie fazowe harmonicznnych prądu względem harmonicznnych napięcia,
4. Zmiana konduktancji odbiornika ze zmianą częstotliwości,
5. Asymetria prądów liniowych, spowodowana niezrównoważeniem odbiornika.

Trzeba się jednak zastrzec, że pojęcie „zjawisko fizyczne” nie jest całkowicie jasne. Co jest, a co nie jest zjawiskiem fizycznym, może być przedmiotem subiektywnych opinii.

## LITERATURA

- [1] L.S. Czarnecki, „Składowe ortogonalne prądu odbiorników liniowych” *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej ELEKTRYKA*, No. 86, pp. 5-17, Gliwice, 1983.
- [2] L.S. Czarnecki, “Considerations on the reactive power in nonsinusoidal situations”, *IEEE Trans. on Instr. and Measurements*, Vol. IM-34, No. 3, pp. 399-404, 1984.
- [3] L.S. Czarnecki, T. Świetlicki, “Powers in nonsinusoidal networks, their analysis, interpretation and measurement”, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurements*, Vol. IM-39, No. 2, 340-344, 1990.
- [4] L.S. Czarnecki, “Currents Physical Components (CPC) concept: a fundamental of the power theory”, *Przeegląd Elektrotechniczny*, R. 84, No. 6, pp. 28-37, 2008.
- [5] L.S. Czarnecki, “Working, reflected and detrimental active powers,” *IET on Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 6, No. 3, pp. 223-239, 2012.
- [6] L.S. Czarnecki, P.H. Haley, “Power properties of four-wire systems with nonsinusoidal symmetrical voltage”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 31, No. 2, pp. 513-521, 2016.
- [7] L.S. Czarnecki, “Moce i kompensacja w obwodach z odkształconymi i niesymetrycznymi przebiegami prądów i napięć. Część 11. Krytyczne uwagi do normy DIN 40100; domniemany wpływ oscylacji energii na współczynnik mocy oraz krytyczna weryfikacja sensu fizycznego mocy biernej”, *On-line Journal: Automatyka, Elektryka, Zakłócenia*, 2016, [www.elektro-innowacje.pl](http://www.elektro-innowacje.pl).
- [8] L.S. Czarnecki, “Moce i kompensacja w obwodach z odkształconymi i niesymetrycznymi przebiegami prądów i napięć. Część 10, Historia rozwoju teorii mocy Składowych Fizycznych Prądów (CPC)”, *On-line Journal: Automatyka, Elektryka, Zakłócenia*, 2017, [www.elektro-innowacje.pl](http://www.elektro-innowacje.pl).
- [9] P.D. Bhattarai, L.S. Czarnecki, “Currents’ Physical Components (CPC) of the supply current of unbalanced LTI loads at asymmetrical and nonsinusoidal voltage”, *Przeegląd Elektrotechniczny*, R. 93, No. 9, pp. 30-35, 2017.
- [10] L.S. Czarnecki, “Currents’ Physical Components (CPC) – based power theory. A Review, Part I: Power properties of electrical circuits and systems”, *Przeegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, Nr. 95, pp. 1-11, Nr. 10/2019.