

# MOCE I KOMPENSACJA W OBWODACH Z ODKSZTAŁCONYMI ORAZ NIESYMETRYCZNYMI PRZEBIEGAMI PRĄDU I NAPIĘCIA

## Część 1. Przegląd problemów

prof. dr hab. inż. Leszek S. CZARNECKI, Fellow IEEE; Alfredo M. LOPEZ Distinguished Professor; Louisiana State University, USA, e-mail.lsczar@cox.net  
s. 58 – 65

### POWERS AND COMPENSATION IN CIRCUITS WITH NONSINUSOIDAL AND ASYMMETRICAL VOLTAGES AND CURRENTS

#### Part 1. Problems review

**Abstract:** An increase in the number and in power of nonlinear and periodically switched loads results in an increase in distortion of voltages and currents in distribution systems. Moreover, generators driven by renewable sources of energy are interfaced to power systems through power electronics inverters, which produce the voltage of sine waveform only approximately. The development of electrical equipment for such conditions and its maintenance have become more expensive, which is a challenge for electrical engineering community. This paper presents a history of studies on energy flow in the presence of the voltage and current distortion and compiles some misinterpretations related to definitions of power properties and interpretation of power phenomena in electrical systems.

**Keywords:** power definitions, harmonics, distortion, asymmetry

Wzrost liczby i mocy odbiorników nieliniowych lub/oraz okresowo przełączanych powoduje wzrost odkształceń przebiegów prądu i napięcia w systemach rozdzielczych. Ponadto, coraz liczniejsze generatory napędzane odnawialnymi źródłami energii wprowadzają do systemu energię elektryczną zwykle poprzez przekształtniki energoelektroniczne, które tylko w przybliżeniu dostarczają napięcie sinusoidalnych. Projektowanie aparatury elektrycznej pracującej w takich warunkach i nadzór nad nią staje się coraz poważniejszym wyzwaniem dla środowiska inżynierów elektryków. Niniejszy artykuł przedstawia historię badań nad przepływem energii w obecności odkształceń prądów i napięć oraz omawia szereg rozpowszechnionych błędów, dotyczących definicji mocy oraz interpretacji fizycznych zjawisk energetycznych.

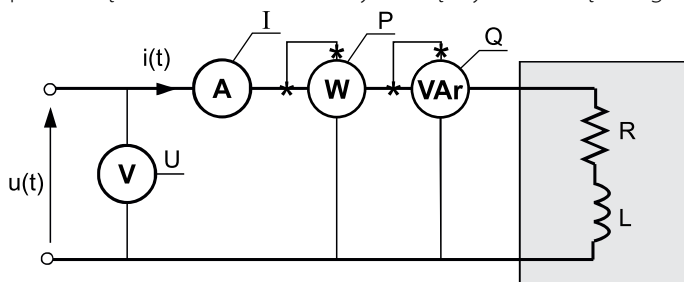
**Słowa kluczowe:** definicje mocy, harmoniczne, odkształcenia, asymetria

#### 1. PRZEGLĄD HISTORYCZNY

Przesył energii elektrycznej ze źródeł jej wytwarzania do odbiorników, gdzie jest ona przekształcana odpowiednio do potrzeb użytkownika, opisywany jest za pomocą wielkości energetycznych, zwanych mocami. W przypadku obwodów jednofazowych, z sinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia, są to moc czynna  $P$ , moc bierna  $Q$ , oraz moc pozorna  $S$ .

Całka mocy czynnej w czasie rozliczeniowym, na przykład w ciągu miesiąca, określa energię dostarczoną do odbiorcy i jest podstawą dla rozliczeń finansowych między dostawcą energii a jej odbiorcą. Moc pozorna jest wielkością energetyczną, której

znajomość jest niezbędna dla projektowania urządzeń przesyłowych, takich jak transformatory, linie przesyłowe czy wyłączniki. Moc bierna towarzyszy mocy czynnej wtedy, gdy odbiornik energii powoduje przesunięcie fazowe prądu względem napięcia.



Rys. 1. Przykład odbiornika liniowego RL z miernikami do pomiaru mocy czynnej, biernej i pozornej

Moce czynna, bierna i pozorna odbiornika w obwodach jednofazowych, takich jak obwód pokazany na rys.1, z sinusoidalnymi przebiegami prądu  $i(t)$  i napięcia  $u(t)$ , zostały zdefiniowane w drugiej połowie XIX wieku, jak następuje:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt = UI \cos \varphi, \quad (1) \quad Q = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t - \frac{T}{4}) dt = UI \sin \varphi, \quad (2) \quad S = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = UI, \quad (3)$$

gdzie symbole  $U$  oraz  $I$  oznaczają wartości skuteczne napięcia zasilania i prądu odbiornika, zaś  $\varphi$  jest kątem przesunięcia fazowego prądu względem napięcia. Moce odbiornika w takim obwodzie spełniają zależność:

$$P^2 + Q^2 = S^2. \quad (4)$$

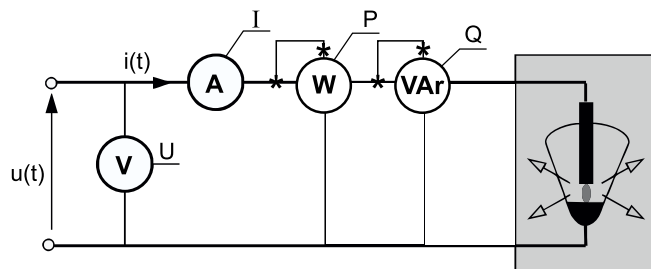
Zależność wiążącą wszystkie moce odbiornika nazywa się *równaniem mocy*.

Sposób włączenia watomierza do pomiaru mocy czynnej i wariomierza do pomiaru mocy biernej ilustruje rys. 1. Moc pozorną oblicza się jako iloczyn wskazań woltomierza oraz amperomierza, mierzących wartości skuteczne napięcia i prądu zasilania.

Urządzenia przesyłowe projektowane są ze względu na maksymalną moc pozorną, podczas gdy energia dostarczona do odbiorcy określona jest mocą czynną, zatem wtedy, gdy moc czynna jest niższa od mocy pozornej, potencjał przesyłowy tych urządzeń nie jest w pełni wykorzystany. Towarzyszy temu wzrost wartości skutecznej prądu zasilania, a więc i wzrost strat przesyłowych. Miarą stopnia wykorzystywania przez odbiornik potencjału przesyłowego jest stosunek mocy czynnej do mocy pozornej odbiornika. Stosunek ten nazywa się *współczynnikiem mocy*:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (5)$$

Współczynnik mocy jest równy jedności tylko wtedy, gdy odbiornik nie ma mocy biernej, a więc wtedy, gdy nie powoduje on przesunięcia fazowego prądu.



Rys. 2. Obwód z lampą łukową i miernikami do pomiaru mocy czynnej, biernej i pozornej

**Doświadczenie Steinmetza.** W 1892 roku, podczas eksperymentów z łukiem elektrycznym, Steinmetz zauważył [1], iż w obwodzie pokazanym na rys. 2, pomimo braku mocy biernej  $Q$ , moc pozorna lampy łukowej jest wyższa od mocy czynnej, a więc:

$$P^2 + Q^2 < S^2. \quad (6)$$

Oznacza to, że współczynnik mocy  $\lambda$  lampy łukowej jest niższy od jedności. Tak więc, odbiorniki w obwodach pokazanych na rys. 1 i 2 mają różne właściwości energetyczne. Różnice te spowodowane są niesinusoidalnym przebiegiem prądu w obwodzie z lampą łukową. Już w 1920 roku zauważono ponadto, że współczynnik mocy jest mniejszy od jedności także wtedy, gdy odbiornik trójfazowy nie jest odbiornikiem zrównoważonym, to jest wtedy, gdy ma różne impedancje fazowe. Warto zwrócić uwagę na to, że pomimo tej obserwacji, równanie mocy układów trójfazowych, nawet obecnie, nie uwzględnia wpływu niezrównoważenia odbiornika na współczynnik mocy.

Elementy nieliniowe, takie jak diody czy lampy wyładowcze, odkształcają przebiegi elektryczne. Podobnie odkształcają je szybkie przełączniki i stany przejściowe przy włączaniu i wyłączaniu elementów systemu oraz zaburzenia. Odbiorniki jednofazowe powodują ponadto asymetrię prądów i napięć w układach trójfazowych. Pomimo to, analiza i projektowanie systemów energetycznych przy założeniu, że przebiegi prądów i napięć są sinusoidalne, dają często wyniki akceptowalne. Niekiedy wyniki te są błędne i to w stopniu uniemożliwiającym poprawną pracę systemu. Aby wyniki te były poprawne, potrzebna jest znajomość zjawisk energetycznych układów z niesinusoidalnymi i niesymetrycznymi przebiegami prądów i napięć oraz możliwość matematycznego opisu takich układów.

**Teoria mocy.** Obserwacja Steinmetza zapoczątkowała jedną z najdłuższych i pełną kontrowersji debatę w elektrotechnice, mianowicie, dyskusję nad właściwościami energetycznymi obwodów z niesinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia oraz nad definicjami mocy. Opis tych właściwości i zbiór interpretacji zjawisk energetycznych określa się mianem **teorii mocy**. W ciągu przeszło sto lat trwających badań, pojawiło się wiele teorii mocy, wiele metod opisu właściwości energetycznych takich układów, wiele różnych wielkości energetycznych oraz, niestety, wiele błędnych interpretacji zjawisk energetycznych czy koncepcji. Wiele błędów jest w powszechnym obiegu. Nawet obecnie, przeszło sto lat po obserwacji Steinmetza, dyskusja ta nie jest zakończona. W środowisku elektrotechnicznym istnieje zauważalna niepewność, odnośnie do sposobu definiowania mocy i interpretacji zjawisk energetycznych w obwodach elektrycznych. Pogubili się nawet specjaliści od teorii mocy. Zwykły inżynier może być bezradny. Artykuł ten ma mu pomóc w zrozumieniu pewnych, sprzecznych niekiedy opinii i koncepcji teorii mocy.

**Teoria mocy Budeanu.** Pierwszy opis zjawisk energetycznych w obwodach z niesinusoidalnym napięciem zasilania zaproponował [2] w 1927 roku profesor politechniki w Bukareszcie, C. I. Budeanu. Jest to najbardziej rozpowszechniony w elektrotechnice opis, znany jako teoria mocy Budeanu.

Ponieważ moc bierna  $Q$  w obwodach z sinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia obliczana jest ze wzoru (2) i moc ta jest amplitudą składowej oscylującej mocy chwilowej, czyli prędkości przepływu energii między źródłem zasilania a odbiornikiem:

$$p(t) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dW(t)}{dt} = u(t) i(t) . \quad (7)$$

Prof. Budeanu zaproponował dla obwodów z przebiegami niesinusoidalnymi definicję mocy bierniej, jako:

$$Q_B \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n , \quad (8)$$

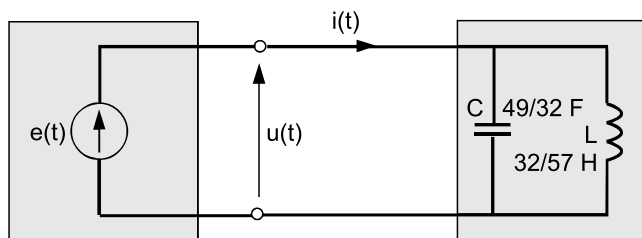
interpretując ją jako miarę oscylacji energii w warunkach niesinusoidalnych. Suma kwadratów mocy czynnej i mocy bierniej według definicji Budeanu w warunkach odkształceń przebiegów jest mniejsza od kwadratu mocy pozornej:

$$P^2 + Q_B^2 \leq S^2 , \quad (9)$$

dlatego różnicę:

$$D \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{S^2 - (P^2 + Q_B^2)} . \quad (10)$$

Budeanu nazwał **mocą odkształcenia**. Nazwa ta sugeruje, że pojawia się ona w wyniku odkształcenia prądu odbiornika względem napięcia zasilania. Te dwie moce są jednymi z najbardziej rozpowszechnionych wielkości w elektrotechnice prądów niesinusoidalnych. Niestety, dopiero po sześćdziesięciu latach, w roku 1987, zostało pokazane [4], że moc bierna wg definicji Budeanu nie ma nic wspólnego z oscylacją energii, zaś moc odkształcenia nie ma nic wspólnego z odkształceniem prądu względem napięcia. Wnioski te zostały zilustrowane wynikami analizy następujących obwodów.



Rys. 3. Obwód z zerową mocą bierną,  $Q_B$

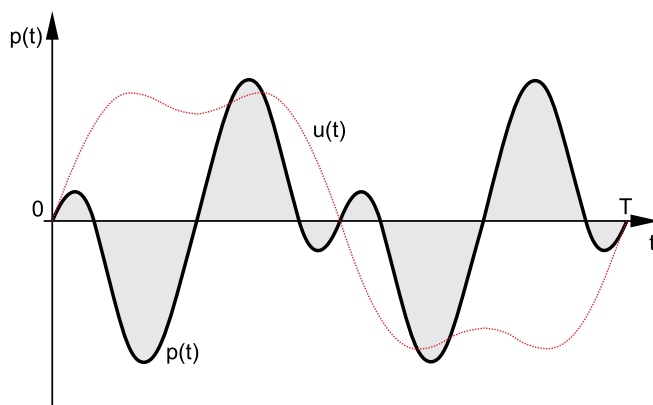
**Przykład 1.** Jeśli napięcie zasilania w obwodzie pokazanym na rys. 3 ma przebieg

$$u(t) = \sqrt{2}(100 \sin \omega_1 t + 25 \sin 3\omega_1 t) \text{ V} , \quad \omega_1 = 1 \text{ rad/s},$$

to prąd zasilania jest równy

$$i(t) = \sqrt{2} [25 \sin(\omega_1 t - 90^\circ) + 100 \sin(3\omega_1 t + 90^\circ)] \text{ A} .$$

Moc bierna, według definicji Budeanu, w tym obwodzie  $Q_B = 0$ . Moc chwilowa  $p(t) = u(t) i(t)$  ma przebieg, jak pokazano na rys. 4, a więc energia oscyluje między źródłem a odbiornikiem.



Rys. 4. Przebieg napięcia i mocy chwilowej w obwodzie na rys. 3

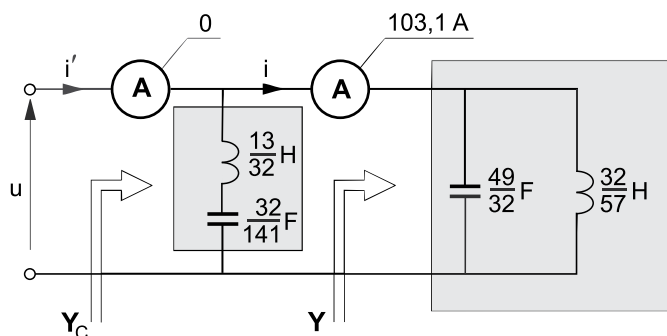
Tak więc, pomimo zerowej mocy bierniej  $Q_B$ , energia w rozpatrywanym obwodzie oscyluje między źródłem zasilania a odbiornikiem. Nie ma więc związku między tą mocą a oscylacją energii.

Możliwość redukcji prądu zasilania za pomocą kompensatora jest ważnym zagadnieniem praktycznym. Moc bierna  $Q$  w warunkach sinusoidalnych jest podstawową wielkością energetyczną, umożliwiającą projektowanie kompensatorów poprawiających współczynnik mocy. Mianowicie, kondensator o pojemności:

$$C = \frac{Q}{\omega_1 U^2} , \quad (11)$$

włączony na zaciskach odbiornika, zmniejsza wartość skuteczną prądu zasilania do najniższej wartości, poprawiając współczynnik mocy  $\lambda$  do jedności. Niestety, moc bierna według definicji Budeanu jest przy projektowaniu kompensatorów bezużyteczna.

**Przykład 2.** Pomimo że moc bierna odbiornika w obwodzie na rys. 3 jest równa zero, może on być całkowicie skompensowany kompensatorem reaktacyjnym, tak jak pokazano na rys. 5,



Rys. 5. Odbiornik skompensowany kompensatorem reaktacyjnym

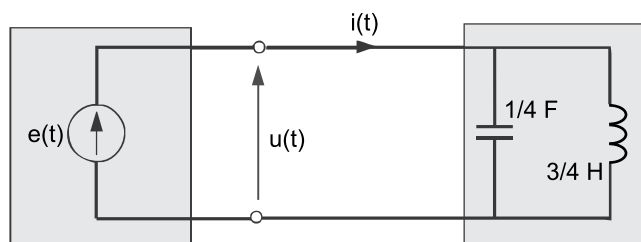
Kompensacja ta nie ma żadnego związku z mocą bierną  $Q_B$ , która przed i po kompensacji ma tę samą zerową wartość.

**Przykład 3.** Napięcie zasilania i prąd odbiornika w obwodzie przedstawionym na rys. 6, mają przebiegi:

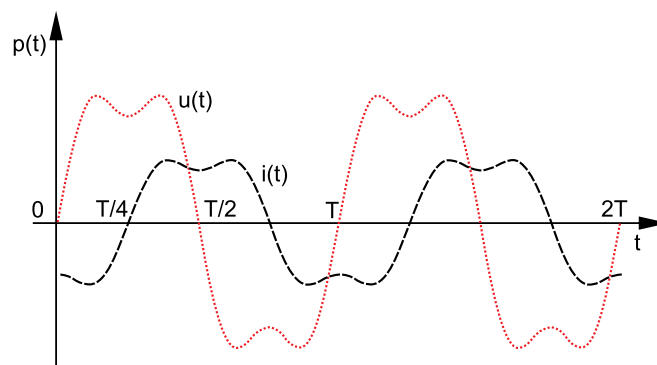
$$u(t) = \sqrt{2}(100\sin\omega_1 t + 30\sin 3\omega_1 t) \text{ V}, \quad \omega_1 = 1 \text{ rad/s},$$

$$i(t) = \sqrt{2}[50\sin(\omega_1 t - 90^\circ) + 15\sin(3\omega_1 t + 90^\circ)] \text{ A},$$

pokazane na rys. 7.



Rys. 6. Obwód z różną od zera mocą odkształcenia  $D$



Rys. 7. Przebieg napięcia i prądu w obwodzie na rys. 6

Moc bierna tego odbiornika jest równa  $Q_B = 4,55 \text{ kVar}$ , zaś moc pozorna  $S = 5,45 \text{ kVA}$ .

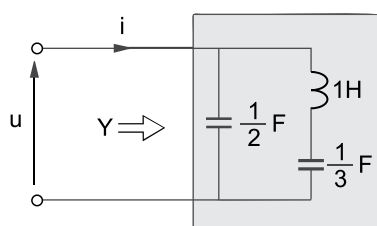
Zatem moc odkształcenia  $D = 3,0 \text{ kVA}$ , pomimo że prąd nie jest względem napięcia odkształcony.

**Przykład 4.** Napięcie zasilania i prąd odbiornika w obwodzie przedstawionym na rys. 8 mają przebiegi:

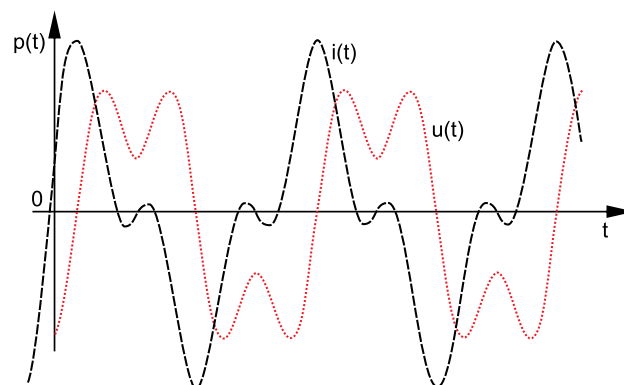
$$u(t) = \sqrt{2}(100\sin\omega_1 t + 50\sin 3\omega_1 t) \text{ V}, \quad \omega_1 = 1 \text{ rad/s},$$

$$i(t) = \sqrt{2}[100\sin(\omega_1 t + \frac{\pi}{2}) + 50\sin(3\omega_1 t + \frac{\pi}{2})] \text{ A},$$

pokazane na rys. 9.



Rys. 8. Obwód z zerową mocą odkształcenia  $D$

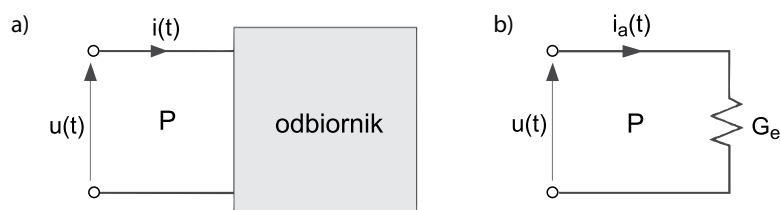


Rys. 9. Przebieg napięcia i prądu w obwodzie na rys. 8

Prąd odbiornika jest w tym obwodzie odkształcony względem napięcia zasilania, jednak moc pozorna jest równa mocy biernej wg definicji Budeanu,  $Q_B = S = 12,5 \text{ kVA}$ , zatem moc odkształcenia  $D$  jest równa zeru.

Tak więc, teoria mocy Budeanu sugeruje błędne interpretacje fizyczne zjawisk w obwodach z niesinusoidalnym napięciem zasilania. Moc bierna  $Q_B$  i moc odkształcenia  $D$  sugerują błędną interpretację zjawisk energetycznych w obwodach zasilanych napięciem niesinusoidalnym. Nie ma więc ona wartości poznawczych. Nie można też, za ich pomocą, oceniać możliwości poprawy współczynnika mocy, ani projektować kompensatorów. Nie ma więc ona wartości praktycznych. Niestety, jest ona rozpowszechniana w publikacjach, książkach i standardach.

**Teoria mocy Fryzego.** Odmiennej koncepcję teorii mocy zaproponował [3] w 1931 roku Stanisław Fryze, profesor Politechniki Lwowskiej. Punktem wyjścia tej teorii była obserwacja, że odbiornikiem o najlepszych właściwościach, z punktu widzenia jego zasilania, jest odbiornik czysto rezystancyjny, pokazany na rys. 10b.



Rys. 10. Odbiornik i równoważny ze względu na moc czynną (a), odbiornik rezystancyjny (b)

Odbiornik czysto rezystancyjny jest równoważny ze względu na moc czynną  $P$ , przy tym samym napięciu zasilania, odbiornikowi na rys. 10a, jeśli jego konduktancja ma wartość:

$$G_e = \frac{P}{\|u\|^2} \quad , \quad (12)$$

zwaną *konduktancją równoważną* odbiornika. Prąd takiego odbiornika ma taki sam przebieg jak napięcie zasilania:

$$i_a(t) = G_e u(t) \quad , \quad (13)$$

i jest on niezbędny, jeśli odbiornik zasilany napięciem  $u(t)$  ma moc czynną  $P$ . Prąd ten został nazwany *prądem czynnym*. Pozostała część prądu odbiornika:

$$i_{rF}(t) = i(t) - i_a(t) \quad , \quad (14)$$

jest bezużyteczna, czy wręcz szkodliwa, gdyż powiększa jedynie wartość skuteczną prądu zasilania. Został on nazwany *prądem biernym*. Oznacza to, że prąd odbiornika jednofazowego w teorii mocy Fryzego ma dwie składowe:

$$i(t) = i_a(t) + i_{rF}(t) \quad . \quad (15)$$

Wartości skuteczne tych składowych, oznaczone symbolem  $\|\cdot\|$ , spełniają zależność:

$$\|i\|^2 = \|i_a\|^2 + \|i_{rF}\|^2 \quad . \quad (16)$$

Mnożąc to równanie przez kwadrat wartości skutecznej napięcia zasilania, otrzymuje się równanie mocy Fryzego:

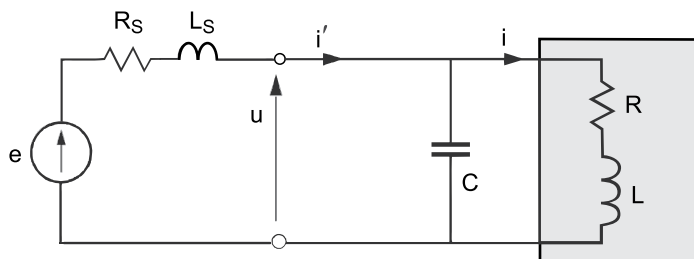
$$S^2 = P^2 + Q_F^2 \quad , \quad (17)$$

z mocą bierną zdefiniowaną jako:

$$Q_F = \|u\| \|i_{rF}\| \quad . \quad (18)$$

Wyodrębnienie przez Fryzego prądu czynnego było ważnym krokiem w badaniach nad teorią mocy. Niestety, teoria mocy Fryzego nie wyjaśnia związku między właściwościami odbiornika a jego prądem biernym, ani jak prąd ten może być kompensowany. Łatwo też zauważyć, że pomimo identycznej nazwy, moc bierna w teorii mocy Fryzego nie ma niczego wspólnego z mocą bierną w teorii mocy Budeanu. Są to dwie całkowicie różne wielkości energetyczne.

Teorie mocy według Budeanu i według Fryzego nie wyjaśniły zjawisk energetycznych w obwodach z niesinusoidalnym napięciem zasilania. Nie dostarczyły też podstaw konstrukcji kompensatorów reaktancyjnych, poprawiających współczynnik mocy.



Rys. 11. Schemat zastępczy obwodu z kompensatorem pojemnościowym

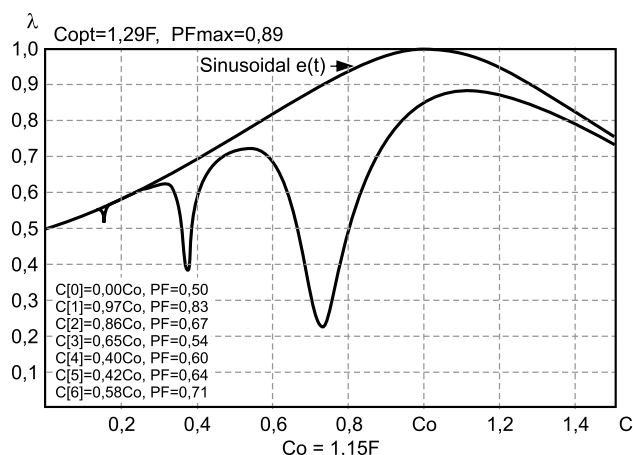
Obliczenie optymalnej pojemności kompensatora pojemnościowego,  $C_{opt}$ , odbiorników zasilanych napięciem niesinusoidalnym, włączonego jak na rys. 11, stało się możliwe dopiero w 1971 roku w na podstawie teorii mocy opracowanej przez Shepherd'a i Zakikhaniego, profesorów Uniwersytetu w Bradford. Według tej teorii:

$$C_{opt} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} n U_n I_n \sin \varphi_n}{\omega_1 \sum_{n=1}^{\infty} n^2 U_n^2} \quad (19)$$

Metoda ta wymagała jednak analizy harmonicznej prądu i napięcia. Warunek ten został usunięty w teorii mocy opracowanej w roku 1980 przez Kusters'a i Moora'a, naukowców Kanadyjskiej Akademii Nauk (NRC). Według tej teorii:

$$C_{opt} = - \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \frac{du}{dt} i dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{du}{dt} \right)^2 dt} \quad (20)$$

Obie te metody miały jednak dwie zasadnicze wady. Pozwalały obliczać pojemność optymalną jedynie przy sztywnym napięciu zasilania. Ponadto, kompensacja czysto pojemnościowa w obecności odkształceń napięcia może być bardzo nieskuteczną metodą poprawy współczynnika mocy. Może nawet współczynnik ten pogarszać. Ilustruje to rys. 12, na którym pokazana jest zmiana współczynnika mocy  $\lambda$  przy sinusoidalnym napięciu źródłowym  $e(t)$  (górną krzywą) oraz przy napięciu odkształconym (dolna krzywa) harmonicznymi rzędu  $n = 5, 7, 11$ , na poziomie  $E_5 = 3,0\%E_1$ ,  $E_7 = 1,5\%E_1$ ,  $E_{11} = 0,5\%E_1$ . Przyjęto, że moc zwarcziowa źródła wynosi 1 MVA i jest 28,6 razy większa od mocy czynnej odbiornika o współczynniku mocy  $\lambda = 0,5$ . Przyjęto też, że stosunek reaktancji do rezystancji źródła dla częstotliwości podstawowej  $X_{S1}/R_{S1} = 5$ . Są to dość typowe parametry systemu.

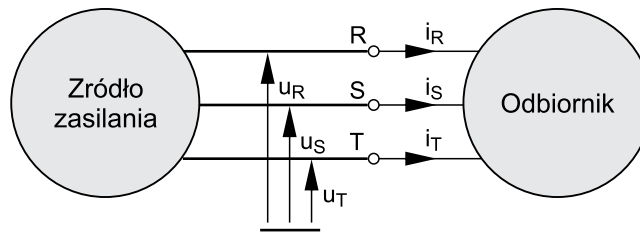


Rys. 12. Zależność współczynnika mocy  $\lambda$  od pojemności kompensującej dla  $X_{S1}/R_{S1} = 5$

Wykres na rys. 12 pokazuje, że kompensacja pojemnościowa w warunkach nieznacznego nawet odkształcenia napięcia zasilania może nie być skuteczną metodą poprawy współczynnika mocy. Potrzebne są do tego bardziej złożone kompensatory. Wyniki otrzymane przez Shepherd'a i Zakikhaniego oraz przez Kusters'a i Moore'a odnośnie do kompensacji czysto pojemnościowej nie rozwiązały zagadnienia poprawy współczynnika mocy w obwodach z odkształconym napięciem zasilania. Zagadnienie kompensacji reaktancyjnej obwodów pracujących w takich warunkach zostało rozwiązane [5, 8] w ramach teorii mocy składowych fizycznych prądu (ang. *Currents' Physical Components – CPC – Power Theory*), opracowanej przez autora tego artykułu w 1984 roku. Teoria ta zostanie omówiona w drugiej części tego cyklu artykułów.

## 2. MOCE W OBWODACH TRÓJFAZOWYCH ZASILANYCH TRÓJPRZEWODOWO

Badania nad właściwościami energetycznymi obwodów w warunkach niesinusoidalnych skupiały się w XX wieku głównie na obwodach jednofazowych. Jednak jako urządzenia jednofazowe budowane są zwykle tylko odbiorniki małej mocy. Energia elektryczna jest przesyłana i wykorzystywana głównie w obwodach trójfazowych zasilanych trójprzewodowo. Niestety, problemy z właściwościami energetycznymi obwodów trójfazowych zaczynają się jeszcze wcześniej niż obwodów jednofazowych; mianowicie, już przy sinusoidalnych przebiegach napięcia zasilania. Spowodowane to jest różnymi definicjami mocy pozornej  $S$ . Moc ta, w przypadku odbiorników zasilanych trójprzewodowo, tak jak to pokazano na rys. 13, jest definiowana na trzy sposoby.



Rys. 13. Obwód trójfazowy z odbiornikiem zasilanym trójprzewodowo

Moc pozorna:

$$S = U_R I_R + U_S I_S + U_T I_T = S_A, \quad (21)$$

nazywana jest niekiedy *arytmetyczną mocą pozorną*. Moc pozorna:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = S_G, \quad (22)$$

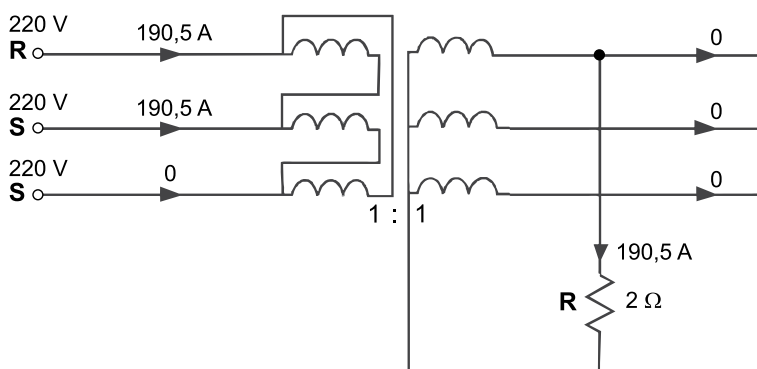
nazywana jest *geometryczną mocą pozorną*. Najmniej znana jest definicja:

$$S = \sqrt{U_R^2 + U_S^2 + U_T^2} \sqrt{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2} = S_B, \quad (23)$$

zaproponowana w 1922 przez F. Buchholza.

Jeśli napięcie zasilania jest symetryczne a odbiornik jest zrównoważony, te trzy powyższe definicje mocy pozornej  $S$  dają te same wartości. Jednak wtedy, gdy odbiornik nie jest zrównoważony, a więc prądy zasilania nie są symetryczne, te trzy definicje dają różne wartości mocy pozornej i współczynnika mocy.

**Przykład 5.** Rozważmy obwód trójfazowy, przedstawiony na rys. 14. z niezrównoważonym odbiornikiem rezystancyjnym, obciążającym tylko jedną fazę. Przyjmijmy, że transformator jest idealny, o przekładni 1:1, a napięcie zasilania jest sinusoidalne, symetryczne, o wartości skutecznej względem ziemi  $U = 220$  V.



Rys. 14. Przykład obwodu z odbiornikiem niezrównoważonym

Moc czynna w takim obwodzie ma wartość  $P = 72,6$  kW, moc bierna  $Q = 0$ , zaś moc pozorna,  $S$ , zależnie od wyboru jej definicji, ma wartości:

$$S_A = 83,8 \text{ kVA}, \quad S_G = 72,6 \text{ kVA}, \quad S_B = 102,7 \text{ kVA}.$$

Zatem, zależnie od wyboru definicji mocy pozornej, otrzymuje się w tym obwodzie trzy różne wartości współczynnika mocy,  $\lambda = P/S$ , mianowicie:

$$\lambda_A = 0,86, \quad \lambda_G = 1, \quad \lambda_B = 0,71.$$

Pytanie: *jaki jest więc współczynnik mocy w tym obwodzie?* jest pytaniem ważnym, szczególnie dla rozliczeń energetycznych. Odpowiedź na to pytanie wymaga oczywiście poprawnego wyboru definicji mocy pozornej  $S$ .

Analiza tych trzech definicji i wynikających z nich wartości współczynnika mocy  $\lambda$ , przeprowadzona ze względu na straty przesyłowe, jest przedstawiona w artykule [7]. Wynika z niej, że ze względu na te straty, obwód pokazany na rys. 14 jest równoważny obwodowi ze zrównoważonym odbiornikiem czynno-indukcyjnym o współczynniku mocy  $\lambda = 0,71$ . Jego moc pozorna  $S = 102,7$  kVA, a więc wtedy, gdy jest obliczona zgodnie z propozycją Buchholza.

Jeśli jednak moc pozorną oblicza się zgodnie z definicją Buchholza, tj.  $S = 102,7$  kVA, to w obwodzie na rys. 14, w którym moc czynna  $P = 72,6$  kW, a moc bierna  $Q = 0$ , powszechnie używane równanie mocy:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (24)$$

nie jest spełnione. Jest ono poprawne tylko przy wyborze geometrycznej definicji mocy pozornej, lecz taki wybór prowadzi do błędnej wartości współczynnika mocy. Dlatego opis właściwości energetycznych obwodów trójfazowych z niesinusoidalnym napięciem zasilania musi być poprzedzony znalezieniem poprawnego opisu tych właściwości i równania mocy w warunkach sinusoidalnych. Poprawne równanie mocy takich obwodów zostało znalezione [6,8] w ramach teorii mocy składowych fizycznych prądu (CPC).

### 3. PODSUMOWANIE

Niniejszy artykuł jedynie sygnalizuje istnienie rozpowszechnionych błędów odnośnie do definicji mocy, interpretacji zjawisk energetycznych oraz równań mocy. W obwodach jednofazowych błędy te pojawiają się dopiero wtedy, gdy przebiegi prądu i napięcia są odkształcone. W obwodach trójfazowych błędy te pojawiają się nawet przy sinusoidalnych przebiegach prądu i napięcia. Wystarczy, aby wielkości te nie były symetryczne. Poprawny opis zjawisk energetycznych w obwodach elektrycznych oraz podstawy kompensacji oparte na teorii mocy składowych fizycznych prądu zostaną przedstawione w następnych artykułach tego cyklu.

### BIBLIGRAFIA

- [1] Steinmetz Ch. P., (1892) Does the phase displacement occur in the current of electric arcs? (In German), ETZ, 587.
- [2] Budeanu C. I., (1927) Puissances reactives et fictives, Institut Romain de l'Energie, Bucharest.
- [3] Fryze S., (1931) Moc czynna, bierna i pozorna w obwodach z niesinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia. Przegląd Elektrotechniczny, z. 7, 193-203, z. 8, 225-234, (1932), z. 22, 673-676.
- [4] Czarnecki L. S., (1987) What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be abandoned, IEEE Trans. Instr. Meas., IM-36, No. 3, 834-837.
- [5] Czarnecki, L.S., (1984) Considerations on the reactive power in nonsinusoidal situations, IEEE Trans. Instr. Meas., IM-34 No. 3, 399-404.
- [6] Czarnecki L. S., (1988) Orthogonal decomposition of the current in a three-phase non-linear asymmetrical circuit with nonsinusoidal voltage, IEEE Trans. IM., IM-37, No. 1, 30-34.
- [7] Czarnecki L. S., (1999) Energy flow and power phenomena in electrical circuits: illusions and reality, Archiv fur Elektrotechnik, 82 No. 4, 10-15.
- [8] Czarnecki L. S. (2005) Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

otrzymano / received: 5.07.2010      przyjęto do publikacji / accepted: 15.08.2010

MIEJSCE  
NA  
REKLAMĘ