

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.

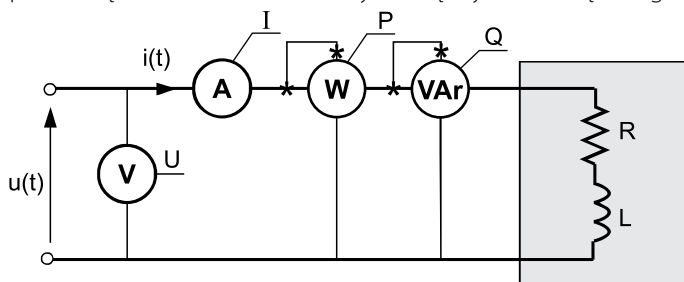
Słowa kluczowe: definicje mocy, harmoniczne, odkształcenia, asymetria

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

Moc 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:

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

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

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

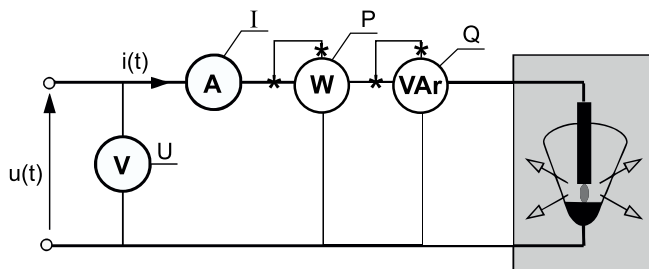
Zależność wiążącą wszystkie moce odbiornika nazywa się *równaniem mocy*.

Sposób włączenia watomierza do pomiaru mocy czynnej i waromierza 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. Miara 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 λ 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 biernej, jako:

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

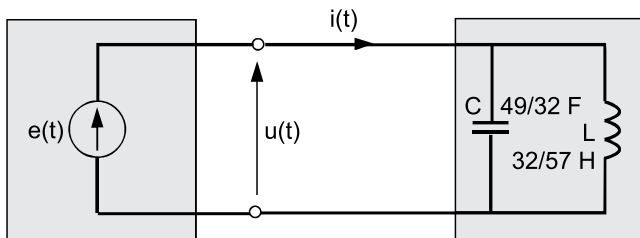
interpretując ją jako miarę oscylacji energii w warunkach niesinusoidalnych. Suma kwadratów mocy czynnej i mocy biernej według definicji Budeanu w warunkach odkształceń przebiegów jest mniejsza od kwadratu mocy pozornej:

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

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

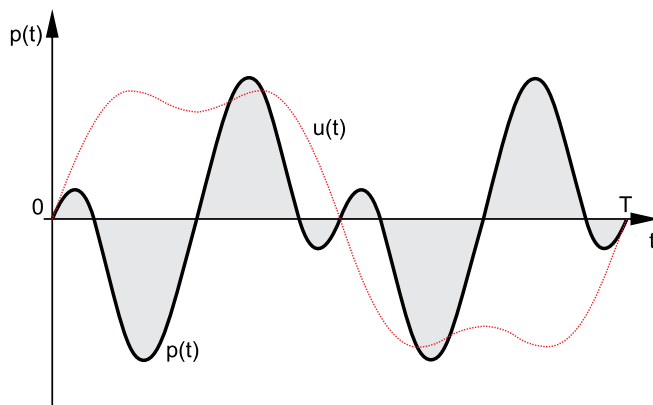
Przykład 1. Jeśli napięcie zasilania w obwodzie pokazanym na rys. 3 ma przebieg

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

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 biernej 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:

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