

Leszek S. CZARNECKI

ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, LOUISIANA STATE UNIVERSITY, USA, 824 LOURAY DR. BATON ROUGE, LA 70808

Robocza, odbita i szkodliwa moc czynna**Prof. dr hab. Leszek S. CZARNECKI**

Pracował w Pol. Śląskiej do 1984, Kanadyjskiej Akademii Nauk (NRC, 1984-86), w WSI w Zielonej Górze (1987-1989). Aktualnie jest profesorem Uniwersytetu Stanowego Luizjany w USA. Jest twórcą Teorii Mocy Składowych Fizycznych Prądu (CPC-Power Theory). Jest autorem przeszło 300 artykułów, referatów i książek oraz 27 patentów. Uhonorowany stopniem Fellow IEEE (1996) oraz tytułem Alfredo M. Lopez Distinguished Professor (2007). Wykładał na uniwersytetach w Padwie, Mediolanie, Tokyo, na Tajwanie, w Chinach, Australii i Nowej Zelandii.



e-mail: lsczar@cox.net

Streszczenie

Moc czynna odbiorników generujących harmoniczne prądu bądź zasilanych napięciem odkształconym lub niesymetrycznym nie jest synonimem mocy użytecznej. Ma ona składniki zarówno użyteczne jak i szkodliwe. Rozliczenia energetyczne uwzględniające użyteczność i szkodliwość składników mocy czynnej mogą tworzyć motywacje ekonomiczne dla poprawy jakości zasilania i jakości użytkowania energii elektrycznej.

Słowa kluczowe: rozliczenia energetyczne, jakość energii, harmoniczne, asymetria, odbiorniki niezrównoważone.

Working, reflected and detrimental active power**Abstract**

The active power of harmonics generating loads or loads supplied with asymmetrical or distorted voltage is not a synonym to the useful power. It has both useful and detrimental components. Energy accounts that recognize the usefulness and harmfulness of these components could create economical incentives for both the supply quality and the loading quality improvement.

Keywords: energy accounts, power quality, harmonics, asymmetry, unbalanced loads.

1. Wstęp

Podstawowe pojęcia energetyczne służące do oceny stanu pracy systemów elektrycznych oraz rozliczeń energetycznych, w tym moc czynna P , zostały wprowadzone w ostatnich dekadach XIX wieku. Koncepcja mocy czynnej P była bardzo dobrze dostosowana zarówno do stanu rozwoju systemów energetycznych, w których dominowały sinusoidalne przebiegi prądu i napięcia, do technologii pomiarów jak i naszej znajomości zjawisk energetycznych w niemal całym wieku XX.

W ostatnich dekadach jesteśmy świadkami zmian w systemach energetycznych. Pojawienie się energoelektroniki, ułatwiającej szybkie sterowanie przepływem energii i dopasowanie jej do zmiennych potrzeb odbiorców, a także szybki wzrost liczby odbiorników elektronicznych oraz lamp wyładowczych, oznacza wzrost liczby odbiorników odkształcających przebiegi prądu i napięcia, a jednocześnie wrażliwych na te odkształcenia. Należy się też liczyć ze stopniowym pojawianiem się samochodów elektrycznych. Ładowanie baterii samochodów elektrycznych może prowadzić do wzrostu odkształceń oraz asymetrii przebiegów prądu i napięcia. Z drugiej strony, zasilanie systemu energetycznego z odnawialnych źródeł energii, takich jak wiatr czy światło słoneczne, wymaga zwykle stosowania przetworników energoelektrycznych, będących źródłami odkształceń napięcia po stronie zasilania. Dotyczy to także przetworników energoelektrycznych obsługujących magazyny energii, dopasowujące czasowe rozkłady dostępności energii odnawialnej i jej zapotrzebowania.

Rozprzestrzenianiu się źródeł odkształceń towarzyszy wzrost kosztów energii. Kopalne źródła energii są coraz trudniej dostępne, zapotrzebowanie na energię gwałtownie wzrasta, zaś koszty uzyskiwania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych są znacznie wyższe od kosztów jej uzyskiwania ze źródeł tradycyjnych, jak węgiel, ropa naftowa czy gaz.

Obserwując te trendy, można się obawiać pogarszania się jakości zasilania w systemach energetycznych oraz pogarszania się jakości odbioru energii, szczególnie niekorzystnego w warunkach wzrostu jej ceny. Odpowiedzią na te trendy, przy jednoczesnej potrzebie poprawy niezawodności zasilania coraz bardziej skomplikowanych systemów energetycznych, jest koncepcja tzw. Sieci Inteligentnych (Smart Grids).

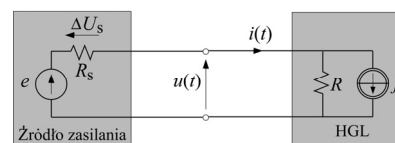
Prace nad rozwojem takich sieci są okazją dla rewizji podstaw rozliczeń energetycznych między dostawcą energii elektrycznej a jej użytkownikiem. Rozliczenia te powinny zawierać motywacje ekonomiczne racjonalizujące zarówno przesył jak i wykorzystanie energii elektrycznej, poprzez poprawę jakości zasilania i jakości odbioru energii.

Pewne możliwości stworzenia takich motywacji daje obserwacja, że moc czynna P w układach asymetrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądu i napięcia jest wielkością złożoną. Tylko pewne jej składniki są użyteczne, inne w różny sposób szkodliwe. Wtedy, gdy pojęcie mocy czynnej P zostało wprowadzone, nie było możliwości pomiarowych wyodrębniania tych składników. Technika cyfrowa umożliwia obecnie racjonalizację zarówno pomiarów jak i rozliczeń.

Przedmiotem artykułu jest analiza pojęcia mocy czynnej P w obwodach jedno- i trójfazowych pod kątem użyteczności różnych jej składników i stworzenia motywacji ekonomicznych dla racjonalizacji przesyłu i użytkowania energii elektrycznej poprzez poprawę jakości zasilania i jakości użytkowania energii elektrycznej.

2. Moc czynna odbiorników generujących harmoniczne

Złożoność obwodu często zaciemnia występujące w nim zjawiska. Aby się przed tym uchronić, wyznaczmy moce w możliwie najprostszym rezystancyjnym obwodzie, pokazanym na rys. 1.



Rys. 1. Obwód rezystancyjny z odbiornikiem generującym harmoniczne prądu
Fig. 1. Resistive circuit with harmonics generating load (HGL)

W obwodzie tym, źródło sinusoidalnego napięcia $e(t)$ o rezystancji wewnętrznej R_s zasilają rezystancyjny odbiornik, generujący wyższe harmoniczne, oznaczone łącznie symbolem $j(t)$. Przyjmijmy, że prąd ten nie ma składowej stałej. Prąd zasilania jest więc odkształcony i może być przedstawiony jako suma harmonicznych

$$i(t) = \sum_{n \in N} i_n = i_1 + i_h, \quad (1)$$

gdzie N jest zbiorem ich rzędów, $N = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$. W odpowiedzi na ten prąd, napięcie na zaciskach odbiornika jest odkształcone i może być przedstawione w postaci

$$u(t) = \sum_{n \in N} u_n = u_1 + u_h. \quad (2)$$

Moc czynna odbiornika jest sumą mocy czynnych indywidualnych harmonicznych, gdyż

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{r \in \mathbb{N}} u_r \sum_{s \in \mathbb{N}} i_s dt = \sum_{n \in \mathbb{N}} P_n = P_0 + P_1 + P_2 + \dots \quad (3)$$

Dla częstotliwości podstawowej, $n = 1$, odbiornik ma moc czynną

$$P_1 = U_1 I_1 > 0, \quad (4)$$

natomiast dla częstotliwości pozostałych harmonicznych, $n \neq 1$,

$$P_n = U_n I_n = (-R_s I_n) I_n = -R_s I_n^2, \quad (5)$$

moce czynne są ujemne. Oznaczając

$$\sum_{n \neq 1} P_n = P_0 + P_2 + P_3 + \dots \triangleq P_h < 0, \quad (6)$$

moc czynna odbiornika może być przedstawiona w postaci sumy mocy

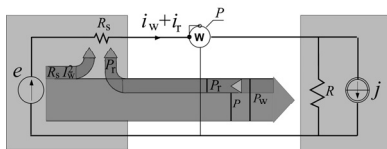
$$P = P_1 + P_h. \quad (7)$$

o zasadniczo różnym charakterze fizycznym. Pierwszy składnik, P_1 , określa prędkość przepływu energii do odbiornika i jest to moc harmonicznej podstawowej. Drugi składnik, P_h , określa prędkość przepływu energii z odbiornika do źródła, gdzie jest ona rozpraszana na rezystancji wewnętrznej R_s . Energię tę dostarcza harmoniczna podstawowa prądu i napięcia. Dlatego moc czynna harmonicznej podstawowej P_1 , jest większa od mocy czynnej odbiornika P . Część energii harmonicznej podstawowej jest przekształcona w odbiorniku w energię pozostałych harmonicznych, przepływając z odbiornika do źródła zasilającego.

Dostawca energii musi zasilac taki odbiornik z mocą harmonicznej podstawowej P_1 . Ponieważ jest to moc niezbędna dla pracy rozpatrywanego odbiornika, można ją nazwać **roboczą mocą czynną**, $P_w = P_1$, natomiast ujemną wartość mocy pozostałych harmonicznych, można nazwać **odbitym mocą czynną**, $P_r = P_h$. Moc czynna takiego obwodu może być wyrażona w postaci

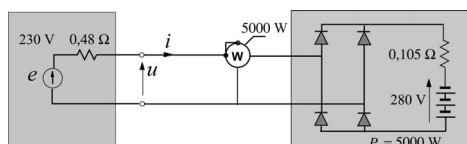
$$P = P_w - P_r. \quad (8)$$

Diagram przepływu energii pokazany jest na rys. 2.



Rys. 2. Diagram przepływu energii w obwodzie z odbiornikiem rezystancyjnym generującym harmoniczne
Fig. 2. Diagram of energy flow in a resistive system with harmonics generating load

Przykład liczbowy. Rysunek 3 pokazuje strukturę i parametry idealnego jednofazowego prostownika ładującego baterię akumulatorów. Przyjęto, że prostownik zasilany jest ze źródła napięcia sinusoidalnego o wartości skutecznej $E = 230$ V i ładuje baterię o napięciu $U = 280$ V z mocą $P = 5000$ W.



Rys. 3. Obwód z idealnym prostownikiem ładującym baterię akumulatorów
Fig. 3. Circuit with an ideal battery charger

Z analizy tego obwodu wynika, że zespolona wartość skuteczna harmonicznej podstawowej prądu i napięcia na zaciskach zasilania prostownika wynoszą odpowiednio $U_1 = 218,5$ V, $I_1 = 24,99$ A i mają tę samą fazę. Moc czynna tej harmonicznej, a więc moc robocza wynosi $P_1 = P_w = 5242$ W. Odbita moc czynna ma wartość $P_h = P_r = P_w - P = 242$ W. Tak więc, prostownik musi być zasilany z mocą większą o kilka procent od mocy czynnej P .

3. Moc czynna odbiorników nie zrównoważonych

Rozważmy obwód trójfazowy pokazany na rys. 4. z niezrównoważonym odbiornikiem rezystancyjnym zasilanym ze źródła sinusoidalnego i symetrycznego napięcia wewnętrznego e .

Ponieważ odbiornik jest niezrównoważony, wektor prądów przewodowych i jest sumą wektorów prądów kolejności zgodnej i przeciwnej i taką samą sumą jest wektor napięć u , mianowicie

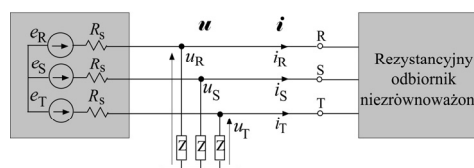
$$[i_R, i_S, i_T]^T \triangleq i = i^p + i^n, \quad [u_R, u_S, u_T]^T \triangleq u = u^p + u^n. \quad (9)$$

Oznaczmy symbolem

$$(x, y) \triangleq \frac{1}{T} \int_0^T x^T(t) y(t) dt, \quad (10)$$

iloczyn skalarny wektorów trójfazowych x, y . Wektory wielkości kolejności zgodnej i przeciwnej są wzajemnie ortogonalne [1], a więc ich iloczyn skalarny jest równy zero, a zatem moc czynna odbiornika jest sumą mocy czynnych obu składowych

$$P = (u, i) = (u^p, i^p) + (u^n, i^n) = P^p + P^n. \quad (11)$$



Rys. 4. Obwód trójfazowy z rezystancyjnym niezrównoważonym odbiornikiem
Fig. 4. Three-phase system with resistive unbalanced load

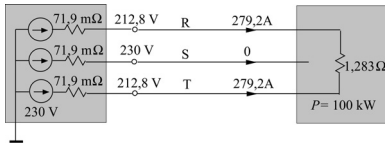
Moc czynna prądów i napięć kolejności zgodnej jest dodatnia, natomiast kolejności przeciwnej jest ujemna, gdyż

$$P^n \triangleq (u^n, i^n) = (-R_s i^n, i^n) = -R_s \|i^n\|^2 < 0. \quad (12)$$

Tak więc, moc czynna kolejności zgodnej jest większa od mocy czynnej P . Jest to moc niezbędna dla pracy odbiornika niezrównoważonego, jest jego mocą roboczą P_w . Część energii dostarczonej do odbiornika przez składowe kolejności zgodnej z mocą P_w jest przekształcona w odbiorniku w energię składowych kolejności przeciwnej, przepływającą z odbiornika do źródła zasilania, gdzie jest ona rozpraszana na jego rezystancji wewnętrznej. Moc składowych kolejności przeciwnej, z ujemnym znakiem, jest więc mocą odbitym P_r . Moc czynna takiego odbiornika, $P = P_w - P_r$. Przy obecnym sposobie rozliczeń, odbiorca płaci za energię czynną i jej dostawę, gdy w istocie dostawca musi dostarczać większą od energii czynnej, energię roboczą.

Przykład liczbowy. Parametry rezystancyjnego obwodu z sinusoidalnym i symetrycznym napięciem wewnętrznym o wartości skutecznej $E = 230$ V zostały dobrane tak, że moc czynna odbiornika zrównoważonego wynosi $P = 100$ kW, przy mocy strat w źródle $\Delta P_s = 5$ kW.

Obciążmy to samo źródło odbiornikiem pokazanym na rys. 5 o takiej samej mocy czynnej $P = 100$ kW.



Rys. 5. Trójfazowy obwód rezystancyjny z odbiornikiem niezrównoważonym
Fig. 5. Three-phase resistive system with unbalanced load

Przyjmując, że zespolona wartość skuteczna (crms) napięcia wewnętrznego źródła wynosi $E_R = 230e^{j0} V$, zespolone wartości skuteczne prądów liniowych są równe $I_R = -I_T = 279,2e^{j30^\circ} A$, zaś zespolone wartości skuteczne składowych symetrycznych tych prądów

$$\begin{bmatrix} I^p \\ I^n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1, & \alpha, & \alpha^* \\ 1, & \alpha^*, & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 161,2e^{j0^\circ} \\ 161,2e^{-j60^\circ} \end{bmatrix} A.$$

Ponieważ

$$U_R = E_R - R_S I_R = 212,8e^{j2,7^\circ} V, \\ U_T = E_T - R_S I_T = 212,8e^{j117,3^\circ} V,$$

zespolone wartości skuteczne składowych symetrycznych napięć zasilania są równe

$$\begin{bmatrix} U^p \\ U^n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1, & \alpha, & \alpha^* \\ 1, & \alpha^*, & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_R \\ U_S \\ U_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 218,4e^{j0^\circ} \\ 11,6e^{j120^\circ} \end{bmatrix} V.$$

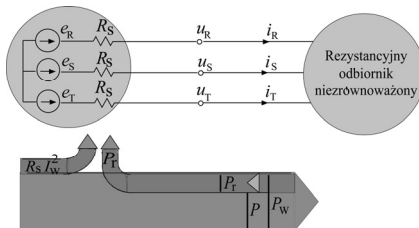
Moc robocza odbiornika ma więc wartość

$$P_w = P^p = (\mathbf{u}^p, \mathbf{i}^p) = 3U^p I^p = 105,6 \text{ kW},$$

zaś moc odbita

$$P_T = -P^n = -(\mathbf{u}^n, \mathbf{i}^n) = -3\text{Re}\{U^n I^{n*}\} = 5,6 \text{ kW}.$$

Diagram przepływu energii w obwodzie trójfazowym z rezystancyjnym odbiornikiem niezrównoważonym pokazany jest na rys. 6.



Rys. 6. Diagram przepływu energii w obwodzie rezystancyjnym z odbiornikiem niezrównoważonym
Fig. 6. Diagram of energy flow in a resistive system with unbalanced load

Zjawisko odbicia energii przez odbiorniki generujące harmoniczne oraz odbiorniki generujące prądy asymetryczne istnieje oczywiście we wszelkich obwodach, nie jest tylko to zjawisko tak widoczne jak w obwodach czysto rezystancyjnych. Obecność indukcyjności obraz ten zaciemnia.

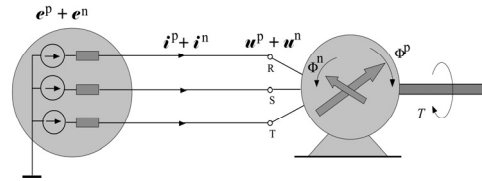
4. Moc czynna silnika indukcyjnego zasilanego asymetrycznie

Rys. 7 pokazuje schemat obwodu z silnikiem indukcyjnym i asymetrycznym sinusoidalnym napięciem źródłowym \mathbf{e} , rozłożonym [1] na wektory składowej kolejności zgodnej i przeciwnej \mathbf{e}^p oraz \mathbf{e}^n .

Moc czynna na zaciskach silnika może być wyrażona w postaci

$$P = (\mathbf{u}, \mathbf{i}) = (\mathbf{u}^p, \mathbf{i}^p) + (\mathbf{u}^n, \mathbf{i}^n) = P^p + P^n. \quad (13)$$

Wiadomo, że jedynie energia przenoszona przez prądy i napięcia kolejności zgodnej może być przekształcona, z pewnymi stratami, na energię mechaniczną na wale silnika. Prądy kolejności przeciwnej, tworząc pole magnetyczne wirujące w kierunku przeciwnym do kierunku obrotu, hamują silnik. Energia przenoszona przez tę składową jest całkowicie przekształcana na ciepło, podnosząc temperaturę silnika. Moc czynna składowej przeciwnej jest więc mocą szkodliwą P_d . Tylko moc czynna kolejności zgodnej jest mocą roboczą P_w .



Rys. 7. Silnik indukcyjny zasilany napięciem asymetrycznym
Fig. 7. Induction motor supplied with asymmetrical voltage

Wtedy gdy napięcie zasilania jest odkształcone, prądy wyższych harmonicznych tworzą pole magnetyczne wirujące w przeciwnym kierunku do kierunku obrotu wirnika lub wirujące z prędkością wielokrotnie większą od jego prędkości. Energia przenoszona przez wyższe harmoniczne nie jest przekształcana na energię mechaniczną. Moc czynna wyższych harmonicznych jest więc także mocą szkodliwą. Tylko moc czynna kolejności zgodnej harmonicznej podstawowej prądów i napięć jest mocą roboczą. Tak więc

$$P = P_w + P_d. \quad (14)$$

Moc robocza jest mniejsza od mocy czynnej. To samo dotyczy energii roboczej i energii czynnej, jednak odbiorca płaci za energię czynną nie za energię roboczą. Płaci za straty spowodowane niską jakością zasilania a także płaci za skracanie jego trwałości, spowodowane wzrostem temperatury.

5. Wnioski

Obecny sposób rozliczeń energetycznych, którego jądrem jest koszt energii czynnej, premiuje tę stronę układu 'dostawca-użytkownik' energii elektrycznej, która jest odpowiedzialna za obniżenie jakości zasilania bądź jakości użytkowania energii. Zmiana rozliczeń energetycznych tak, aby jego jądrem był koszt energii roboczej, tworzyłaby motywację ekonomiczną dla poprawy zarówno jakości zasilania jak i jakości użytkowania energii. Ze względu na przeszło stuletnią tradycję, oraz system norm i standardów, zmiana taka jest niezmiernie trudna. Jednak obecna świadomość konieczności głębokich zmian w systemach energetycznych mogą być przedmiotem debaty.

Zapewnienie jakości zasilania i jakości odbioru oparte jest obecnie na standardach lub umowach, których przekroczenie może powodować działania administracyjno-karne. Nawet w przypadku zmiany podstaw rozliczeń energetycznych i w konsekwencji, stworzenia ekonomicznych motywacji dla poprawiania jakości zasilania i odbioru, mogą one być niewystarczające aby tę jakość zapewnić. Działania administracyjno-karne wymuszające spełnienie standardów jakości zasilania i odbioru mogą być nadal niezbędne.

6. Literatura

[1] Czarniecki L.S.: Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, (2005).