

Zasady rozliczeń za pobór a skutki ekonomiczne przesyłania

Autorzy: Waldemar Szpyra, Aleksander Kot, Wiesław Nowak, Rafał Tarko - AGH w Krakowie, Jacek Słowik – Manstel Bednarczyk Słowik, Wiącek Sp. J.

(„Energia Elektryczna” - listopad 2012)

Moc i energia bierna oraz kwestia sposobu rozliczania za pobór tych wielkości jest od wielu lat sprawą bardzo dyskusyjną. Powstało wiele artykułów i referatów, przedstawianych na różnych konferencjach, o tematyce związanej z mocą bierną lub analizujących obecny sposób rozliczeń za pobór energii biernej [1] - [3], [5] - [8]. Problemy ze sposobem rozliczania za pobór mocy i energii biernej wynikają w dużej mierze z niezakończonych dyskusji na temat opisu właściwości energetycznych obwodów i prawidłowego uwzględnienia w nim składowych mocy pozornej.

Istnieje wiele teorii mocy biernej (Illović'ego, Budeanu, Fryzego Shepherda-Zakikhaniego Kustersa i Moore'a, Czarneckiego). Żadna z nich nie opisuje w pełni właściwości energetycznych nieliniowych i niesymetrycznych wielofazowych obwodów elektrycznych.

W większości spośród teorii mocy moc bierna jest określana jako moc oscylująca między elementami indukcyjnymi lub pojemnościowymi odbiorników a źródłem lub innymi odbiornikami. W obwodach jednofazowych z przebiegami sinusoidalnymi moc bierną można określić jako miarę oscylacji mocy chwilowej. Natomiast w nieliniowych obwodach wielofazowych moc bierną najlepiej interpretować jako skutek przesunięcia fazowego składowych harmonicznych prądu i napięcia³.

Moc czynną, bierną i pozorną, pobieraną przez jednofazowy odbiornik zasilany napięciem sinusoidalnym, wyraża się zależnościami:

- moc czynna:

$$P = U_f I_f \cos \varphi, \quad (1)$$

- moc bierna:

$$Q = U_f I_f \sin \varphi, \quad (2)$$

- moc pozorna:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3)$$

w których:

U_f - wartość skuteczna napięcia fazowego

I_f - wartość skuteczna prądu fazowego

φ - kąt pomiędzy wektorem napięcia i prądu

W przypadku trójfazowych odbiorników liniowych zasilanych napięciem sinusoidalnym można wyróżnić trzy definicje mocy pozornej:

- „arytmetyczną”:

$$S_A = U_a I_a + U_b I_b + U_c I_c \quad (4)$$

- „geometryczną”:

$$S_G = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5)$$

- „Buchholza”:

$$S_B = |\mathbf{U}||\mathbf{I}| = \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + U_c^2} \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2} \quad (6)$$

w których:

$U_a U_b U_c$ - odpowiednio wartości skuteczne napięć faz a, b, c

$I_a I_b I_c$ - odpowiednio wartości skuteczne prądów płynących w fazach a, b, c

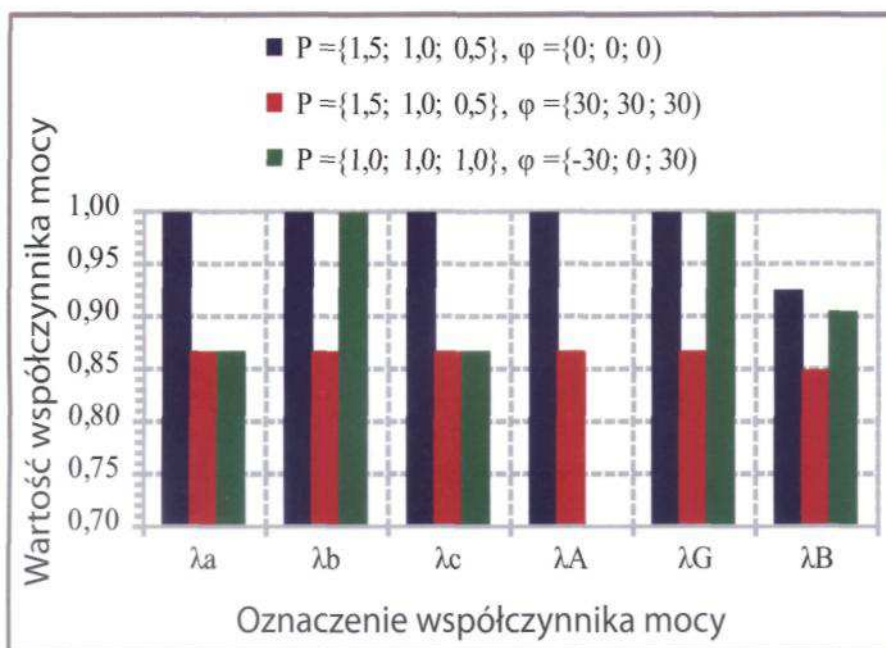
P, Q - moc czynna i bierna wyliczone odpowiednio jako suma mocy czynnych i biernych poszczególnych faz

Moc pozorna odbiornika asymetrycznego lub zasilanego asymetrycznym napięciem, obliczona ze wzorów (4) - (6), będzie różna. Jedynie w przypadku symetrycznego i zasilanego napięciem symetrycznym odbiornika obliczone moce pozorne dają ten sam wynik.

Iloraz mocy czynnej przez moc pozorną jest nazywany współczynnikiem mocy:

$$\lambda \stackrel{def}{=} \frac{P}{S} \quad (7)$$

Współczynnik ten jest powszechnie utożsamiany z cosinusem kąta pomiędzy prądem a napięciem. Jest to słuszne jedynie w przypadku zasilanych napięciem sinusoidalnym liniowych odbiorników jednofazowych oraz symetrycznych odbiorników trójfazowych ($\lambda = \cos\varphi$)



Rys. 1. Wartości współczynnika mocy w zależności od przyjętej definicji mocy pozornej przy różnych przypadkach asymetrii.

Gdy odbiornik jest nieliniowy lub asymetryczny, wartość współczynnika mocy należy wyznaczać z zależności (7), podstawiając moc pozorną „Buchholza”. Jeśli do wzoru podstawimy moc pozorną „arytmetyczną” lub „geometryczną”, wartość współczynnika mocy będzie inna. Ilustruje to rysunek 1.

Na rysunku 1 przyjęto następujące znaczenia:

- $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ - odpowiednio współczynniki mocy faz a, b, c
- $\lambda_A, \lambda_G, \lambda_B$ - odpowiednio trójfazowy współczynnik mocy na podstawie mocy arytmetycznej, geometrycznej i Buchholza
- $P = \{1,5; 1,0; 0,5\}$; $\varphi = \{30^\circ; 30^\circ; 30^\circ\}$ - odpowiednio moce czynne i kąty fazowe odbiorów zasilanych z faz a, b, c .

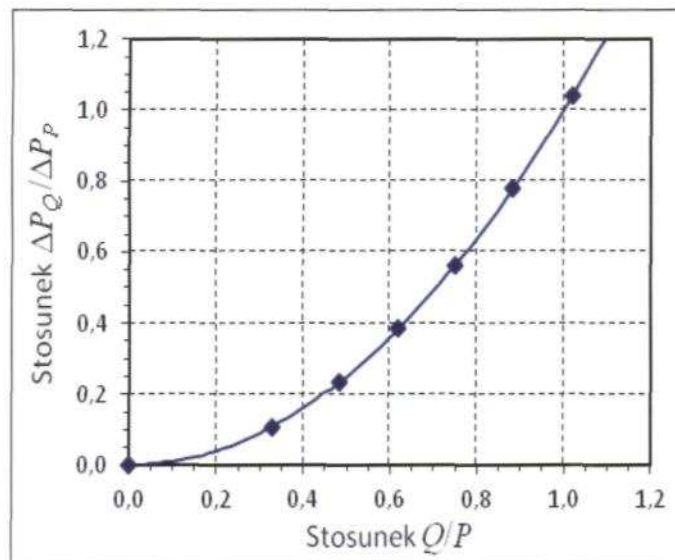
Z rysunku 1 wynika, że w przypadku asymetrii obciążenia wartość współczynnika mocy będzie mniejsza od 1, nawet w przypadku zasilania odbioru czysto rezystancyjnego. Powszechnie stosowana geometryczna definicja mocy pozornej nie odzwierciedla tego faktu.

Negatywne skutki energii biernej w systemie elektroenergetycznym

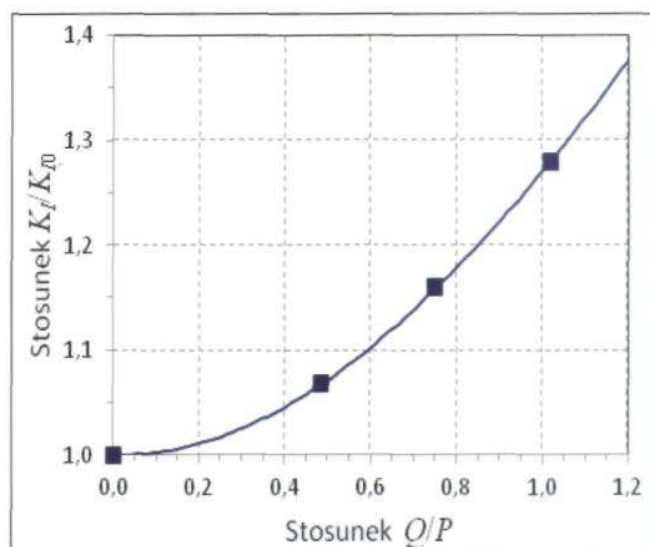
Wytwarzanie i przesyłanie energii biernej powoduje negatywne skutki w systemie elektroenergetycznym. Z punktu widzenia dystrybucji energii, najbardziej istotne znaczenie ma wzrost strat mocy i energii w elementach sieci.

W następnej kolejności można wymienić problemy z regulacją napięcia oraz wzrost nakładów inwestycyjnych na rozbudowę sieci.

Rysunek 2 przedstawia zależność stosunku strat mocy czynnej, wywołanych przez przesyłanie mocy biernej ΔP_Q , do strat mocy czynnej ΔP_P , wywołanych przesyłaniem mocy czynnej, a rysunek 3 - zależność wzrostu nakładów inwestycyjnych na budowę infrastruktury przesyłowej i dystrybucyjnej w zależności od stosunku mocy biernej do mocy czynnej P/Q . Z wykresu na rysunku 2 wynika, że przy stosunku $P/Q = 1$ obie składowe straty są takie same, natomiast nakłady inwestycyjne o ok. 27 proc. niższe niż nakłady przy braku przesyłania mocy biernej (rysunek 3).



Rys. 2. Wzrost strat mocy czynnej w funkcji stosunku Q/P : ΔP_Q - straty mocy czynnej spowodowane przepływem mocy biernej; ΔP_P - straty mocy czynnej spowodowane przepływem mocy czynnej.



Rys. 3. Wzrost nakładów inwestycyjnych w funkcji stosunku Q/P : K_f – nakłady inwestycyjne przy $Q/P \neq 0$; K_0 – nakłady inwestycyjne przy $Q/P = 0$.

Opłaty za pobór energii biernej a koszty jej przesyłania

Obowiązujący w Polsce system rozliczeń za usługi dystrybucyjne w zakresie poboru mocy biernej budzi wiele uzasadnionych zastrzeżeń, czego wyrazem są m.in. publikacje^{2,7,8}.

Najbardziej istotne zastrzeżenia to:

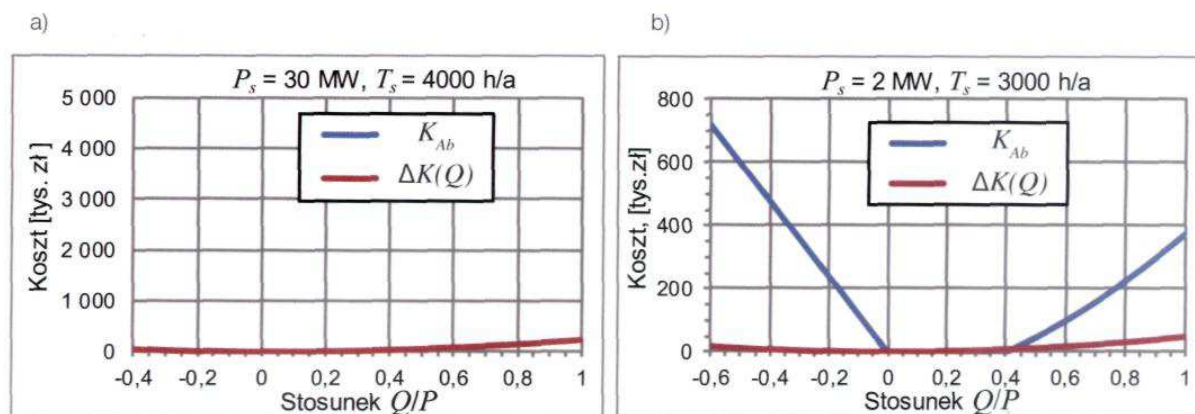
- Naliczanie opłaty za pobór energii biernej na podstawie $\text{tg}\phi$ liczonego jako stosunek pobranej w okresie rozliczeniowym energii biernej do pobranej w tym okresie energii czynnej. Wielkość ta nie odzwierciedla wpływu poboru mocy biernej zarówno na koszty strat w sieci, jak i wymiarowanie urządzeń, a tym samym na nakłady inwestycyjne na budowę infrastruktury sieciowej
- Rozliczenia dotyczą odbiorców zasilanych z sieci średniego i wysokiego napięcia, a odbiorcy zasilani z sieci niskiego napięcia, użytkownicy odbiorniki o charakterze indukcyjnym, są rozliczani za energię bierną tylko wówczas, gdy zostało to określone w technicznych warunkach przyłączenia, w umowie o świadczenie usług dystrybucji lub umowie kompleksowej. Pozostałych odbiorców rozliczenia nie obowiązują.

Obecne zasady są często postrzegane jako środek dyscyplinujący odbiorców w zakresie ograniczania poboru mocy biernej o charakterze indukcyjnym lub oddawania tej mocy do sieci (przekompensowanie), niezależnie od lokalnego bilansu mocy biernej w sieci zasilającej danego odbiorcę. Wysokość naliczanych opłat jest często wielokrotnie większa od kosztów wywołanych przesyłaniem mocy biernej do tych odbiorców.

Ilustrują to następujące przykłady:

1. Odbiorca zasilany z linii napowietrznej 110 kV o długości 40 km. Obliczenia wykonano przy założeniu poboru mocy w zakresie od $P_s = 5 - 70$ MW przy czasie użytkowania mocy szczytowej $T_s = 4000$ h/a (czas trwania strat maksymalnych $\tau = 2550$ h/a). Zakładając, że stosunek pobieranej mocy biernej do czynnej zmienia się w zakresie $-0,6 \leq Q/P \leq 1,0$ obliczono koszty strat mocy i energii w linii zasilającej odbiorcę, spowodowane przesyłaniem energii biernej oraz wysokość opłaty za przekroczenie ilości pobieranej energii biernej ponad wartość wynikającą z umownej wartości współczynnika $0 \leq \text{tg} \varphi_0 \leq 0,4$. Do obliczeń przyjęto stawki opłat według taryfy A21 jednego z operatorów sieci dystrybucyjnej obowiązujące w 2012 r.

2. Odbiorca zasilany z linii 15 kV z przewodami AFL 6-70 mm² o długości 10 km. Obliczenia wykonano przy założeniu poboru mocy w zakresie od $P_s = 2 - 5$ MW przy czasie użytkowania mocy szczytowej $T_s = 3000$ h/a (czas trwania strat maksymalnych $\tau = 1685$ h/a). Wykonano analogiczne obliczenia jak w przykładzie 1, przyjmując stawki opłat według taryfy B21 tego samego operatora.

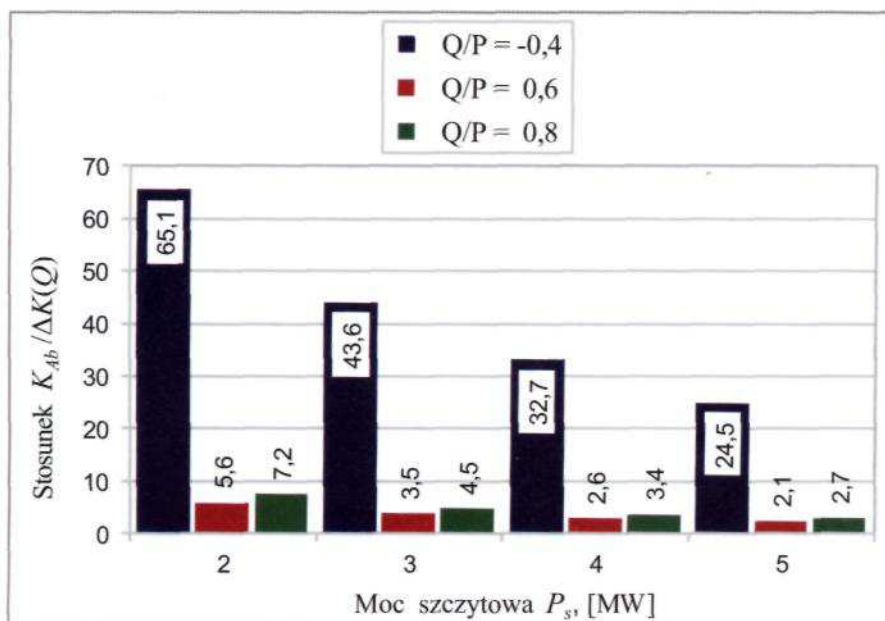


Rys. 4. Zależność opłaty za pobór energii biernej K_{Ab} oraz rzeczywistych kosztów dodatkowych strat mocy i energii czynnej wywołanych przesyłaniem mocy biernej $\Delta K(Q)$ od stosunku mocy biernej do czynnej: a) odbiorcy zasilanego linią 110 kV, b) odbiorcy zasilanego linią 15 kV.

Wyniki obliczeń (po jednym z analizowanych stanów dla każdego z przykładów) pokazano na rysunkach 4a i 4b jako zależności wysokości opłaty za pobór energii biernej K_{Ab} oraz rzeczywistych kosztów dodatkowych strat mocy i energii czynnej $\Delta K(Q)$, spowodowanych przesyłaniem mocy biernej, od stosunku Q/P .

Z wykresów na rysunku 4 wynika, że opłaty za niedotrzymanie wartości umownego współczynnika $\text{tg} \varphi$ są niewspółmiernie wysokie w stosunku do rzeczywistych kosztów dodatkowych strat wywołanych przesyłaniem energii biernej. Z kolei na rysunku 5 pokazano zależność stosunku opłaty za pobór energii biernej ponad wartość wynikającą z umownej wartości $\text{tg} \varphi_0$ do kosztów dodatkowych strat spowodowanych przesyłaniem tej mocy $K_{Ab}/\Delta K(Q)$ przy różnej mocy szczytowej P_s i różnych wartościach stosunku Q/P .

Z rysunku 5 wynika, że dysproporcja pomiędzy wysokością naliczanych opłat, a kosztami spowodowanymi przez przesyłanie mocy biernej zależy od obciążenia. Przy czym szczególnie duża jest w przypadku przekompensowania.



Rys. 5. Zależność stosunku $K_{Ab}/\Delta K(Q)$ przy przekroczeniu umownej wartości współczynnika $\text{tg}\varphi$ od pobieranej mocy szczytowej oraz stosunku Q/P .

Podsumowanie

Obowiązujące zasady rozliczeń w zakresie energii biernej nie uwzględniają lokalnego charakteru zjawisk związanych z mocą bierną. Opłaty za energię bierną są naliczane niezależnie od lokalnego bilansu mocy biernej oraz stanu obciążenia systemu elektroenergetycznego. W niektórych obszarach występują nadwyżki mocy biernej, a mimo to w stacjach WN/SN operatorzy sieci instalują baterie kondensatorów i restrykcyjnie rozliczają odbiorców za przekroczenia poboru energii biernej. W innych obszarach wskazane byłoby zachęcanie odbiorców do załączania w określonych sytuacjach posiadanych przez nich urządzeń do kompensacji mocy biernej w celu poprawy bilansu mocy biernej, a odbiorcom nalicza się kary za przekompensowanie.

Przedstawione w artykule przykłady potwierdzają niewspółmierność naliczanych opłat w stosunku do rzeczywistych kosztów dodatkowych, spowodowanych przesyłaniem mocy biernej. Należy zauważyć, iż wielkość mocy oraz długość linii zostały celowo dobrane tak, żeby uwidocznił się wpływ przesyłania mocy biernej na straty mocy i energii. W obliczeniach pominięto trudne do oszacowania koszty związane z wpływem mocy biernej na poziom napięcia oraz dodatkowe nakłady na infrastrukturę sieciową.

Możliwości pomiarowe, które pojawią się wraz z wdrożeniem technologii smart metering, uzasadniają podjęcie dyskusji na temat zmiany zasad rozliczeń za usługi dystrybucji. Zmiany te mogłyby np. polegać na wprowadzeniu rozliczeń w oparciu o umowną moc pozorną pomnożoną przez składnik stały stawki sieciowej oraz całki z mocy pozornej pomnożonej przez składnik zmienny stawki sieciowej. Stawki te mogłyby być określone analogicznie jak dotychczas tylko na podstawie mocy pozornej oraz całki z mocy pozornej. Zastosowanie tego rozwiązania pozwoliłoby objąć opłatami wszystkich odbiorców, przy czym byłiby oni zainteresowani ograniczeniem poboru mocy pozornej. Rozliczenia za energię czynną powinny odbywać się, tak jak dotychczas, na podstawie ilości pobranej energii.

Literatura

1. *AIEE Special Joint Committee: „Power factor in polyphase circuits”, AIEE Trans., vol.39, 1920, pp. 1449-1520.*
2. Ciura Sz., Opłaty dystrybucyjne związane z poborem mocy biernej przez odbiorców, „Energia Elektryczna” 2011 nr 2.
3. Czarnecki L S., Moce i kompensacja w obwodach z okresowymi przebiegami prądu i napięcia, Część 3, Właściwości energetyczne liniowych obwodów jednofazowych, Jakość i użytkowanie energii elektrycznej, 1998, t. 4, z.1, s. 29-40.
4. *Emanuel A.E.: „The Buchholz-Goodhue apparent power definition: The practical approach for nonsinusoidal and unbalanced systems” IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, April 1998, pp. 1693-1698.*
5. Fryze S., Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia, „Przegląd Elektrotechniczny” 1931 nr 7, str. 193-203; nr 8 str. 225-234; 1932 nr 22 s. 673-676.
6. *Kusters N.L, Moore W.J.M.: "On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. 99, 1980, pp. 1845-1854.*
7. Nowak W., Szpyra W., Bąchorek W., Kot A., Tarko R., Zasady rozliczeń za usługi dystrybucyjne wg P, Ac i $\text{tg}\phi$ czy wg VA i VAh, V Konferencja: „Straty energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych”. Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, Kołobrzeg, 17-18 maja 2011 r. str. 06-1 - 06-6.
8. Szczerba Z., Czy liczniki kvarh powinny być stosowane, „Acta Energetica” 2009 nr 2 s. 85-87.