

Określanie strat powodowanych obciążeniem mocą bierną – metoda nie wykorzystująca pojęcia energetycznego równoważnika mocy biernej

Streszczenie. Osiągnięcie wysokiej efektywności energetycznej jest jednym z celów stawianym procesom i układom technicznym. Krajowe przepisy dotyczące tej problematyki wymieniają ograniczenie strat związanych z poborem energii biernej, jako jedno z przedsięwzięć poprawiających efektywność energetyczną. Wykorzystywane w krajowej praktyce metody szacowania strat powodowanych obciążeniem mocą bierną opierają się na pojęciu energetycznego równoważnika mocy biernej. W artykule w krytyczny sposób analizuje się koncepcję tego pojęcia, zwracając uwagę na jego złożoność i nieadekwatność, proponując inną praktyczną metodę określania zmian strat technicznych związanych z korektą obciążenia mocą bierną.

Abstract. High energy efficiency is one of the objectives of processes and technical systems. Polish regulations related to the above issue enumerate limitations of losses attributed to reactive power loads, as one of endeavours for improving of energy efficiency. Practical methods to estimate losses caused by reactive power loads used in Poland are based on the concept of the energy equivalent of reactive power. This article critically analyses the concept of this equivalent, pointing out its complications and inadequacy, and instead, proposes a different practical method for estimating the change in active power losses caused by the correction of the reactive power load. (*Estimating of power losses caused by reactive power loads – a method not based on the energy equivalent of reactive power*)

Słowa kluczowe: efektywność energetyczna, moc bierna, energetyczny równoważnik mocy biernej, szacowanie strat mocy
Keywords: energy efficiency, reactive power, energy equivalent of reactive power, power losses estimating

Wstęp

Obowiązująca ustawa o efektywności energetycznej [1] wymienia “ograniczenie strat związanych z poborem energii biernej” (art.19 ust.1 pkt 5 lit.a) jako przedsięwzięcie służące poprawie efektywności energetycznej. Podobny zapis znajdował się we wcześniejszej ustawie z 2011 r. Pomimo tak literalnego odniesienia do tego zadania w krajowych aktach prawnych, temat ten nie jest często podejmowany przez wykonawców audytów [2]. Przyczyna może tkwić m.in. w złożoności problematyki [3]; fakcie iż kompensacja (zwłaszcza grupowa) w większości ogranicza straty energii po stronie sieci dystrybucyjnej i przesyłowej, a nie u odbiorcy czy braku praktycznych metod szacowania ewentualnych oszczędności energii.

Wartości zmniejszenia strat związanych z ograniczeniem obciążenia mocą bierną można wyznaczyć na podstawie podstawowych praw elektrotechniki, lecz wymaga to dostępu do olbrzymiej liczby danych, opisujących stan pracy sieci elektroenergetycznej, co w praktyce może być kłopotliwe. Należy więc opierać się na metodach szacunkowych. Nieliczne publikacje krajowe dotyczące bezpośrednio tej problematyki np. [4], [5] wykorzystują koncepcję energetycznego równoważnika mocy biernej. Wielkość ta nie wydaje się jednak odpowiednia, co zostanie pokazane w dalszej części pracy.

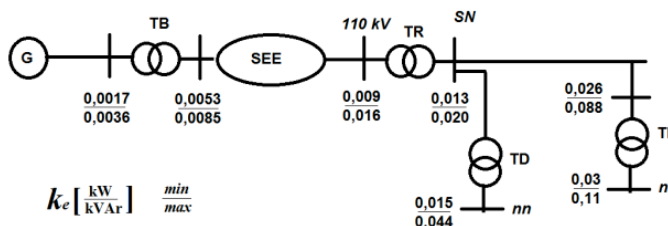
Energetyczny równoważnik mocy biernej – historia i definicje

Energetyczny równoważnik mocy biernej k_e , nazywany też “ekonomicznym równoważnikiem mocy biernej” miał być przydatny w określaniu zmian strat energii (mocy) czynnej w punktach sieci elektroenergetycznej, powodowanych zmianą obciążenia mocą bierną. Autorstwo pojęcia przypisuje się inżynierom radzieckim, którzy wprowadzili je w instrukcji eksploatacji transformatorów mocy z 1946 r. Oszacowane wartości tego współczynnika dla charakterystycznych punktów sieci SN i opublikowano w ZSRR w latach 50-tych XX w. [6], [7]. W nowszej publikacji [8] zaproponowano macierzową metodę określania równoważników k_e w węzłach sieci, wymagającą znajomości m.in. rezystancji gałęzi i napięć węzłowych.

Wartości równoważników k_e w pierwszej krajowej publikacji przedstawiono w [9], dane jednak dotyczyły układu wyidealizowanego o konkretnych parametrach i obciążeniach [10]. Mimo zwrócenia uwagi w artykule [10] z 1973 roku na problem nieaktualności wartości równoważników k_e , przez kolejnych ponad 30 lat krajowe poradniki i podręczniki w istocie odwoływały się do literatury radzieckiej z lat 50-tych XX w. (tab.1). W 2008 roku [11] podano nowe zakresy wartości k_e dla wybranych punktów sieci (rys.1), aczkolwiek jeszcze zdarzają się powołania na poprzednie wartości.

Tabela.1. Wartości energetycznego równoważnika mocy biernej k_e wg [9].

Napięcia sieci	Największe wartości k_e (przy obciążeniu szczytowym) [kW/kVAr]	Najmniejsze wartości k_e (przy obciążeniu minimalnym) [kW/kVAr]
Najwyższe	0,08	0,04
Wysokie	0,1	0,06
Średnie	0,12 – 0,15	0,08 – 0,1
Niskie	0,18 – 0,22	0,12 – 0,14



Rys.1. Nowe wartości równoważnika k_e wyznaczone dla sieci krajowych (z 2008 roku) [11]. G – generator, TB – transformator blokowy, TR – transformator rozdzielczy, TD – transformator dystrybucyjny, SEE – sieć 400 kV, 220 kV i 110 kV.

Z punktu widzenia problematyki efektywności energetycznej, wskaźnik taki jak k_e stanowiłby cenną pomoc przy wyznaczaniu oszczędności energii finalnej. Jego celem jest ilościowe oszacowanie jak zmieniają się straty mocy czynnej na drodze od źródła zasilania do wybranego węzła sieci na jednostkę zmiany mocy biernej [12]. Równoważnik k_e informuje więc o czułości strat mocy czynnej w danym węzle na zmiany mocy biernej, choć nie uwzględnia

aspektów związanych ze zmniejszeniem zdolności wytwórczej, przesyłowej lub przetwórczej urządzeń elektroenergetycznych na skutek wzrostu mocy pozornej w sieci oraz powiązanych z tym kosztów [13].

Istnieją dwie formalne definicje równoważnika k_e :

– pochodna strat mocy czynnej ΔP względem przesyłanej mocy bierniej Q (obciążenia biernego w danym punkcie sieci elektroenergetycznej):

$$(1) \quad k_{e1} = \frac{\partial \Delta P}{\partial Q}$$

– stosunek zmniejszenia strat mocy czynnej $\Delta(\Delta P)$ do mocy urządzenia kompensującego Q_k , które spowodowało to zmniejszenie:

$$(2) \quad k_{e2} = \frac{\Delta(\Delta P)}{Q_k} = \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{Q_k}$$

gdzie ΔP_1 i ΔP_2 to straty mocy czynnej w układzie odpowiednio przed i po kompensacji mocy bierniej.

Definicje te opierają się na koncepcji teorii mocy wg Fryzego i w ogólności nie są równoważne. Przyjmując upraszczające założenia, że moc bierna odbioru nie wpływa na parametry stanu pracy układu, w szczególności:

- pomijalna jest zmiana wartości napięcia zasilającego,
- zapotrzebowania na moc czynną i bierną są niezależne,
- rezystancja w układzie przesyłowym ma charakter liniowy, zgodnie z określeniem równoważnika według równania (1) otrzymuje się:

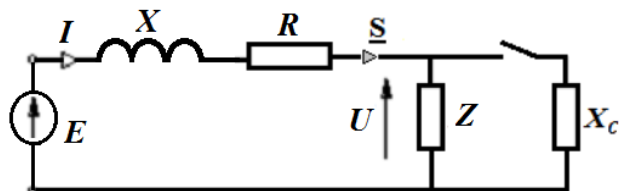
$$(3) \quad k_{e1} = \frac{\partial \left(R \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \right)}{\partial Q} = 2Q \frac{R}{U^2}$$

gdzie P i Q to moce odpowiednio czynna i bierna przepływające gałęzią o rezystancji R na napięciu U . Przyjmując te same założenia co poprzednio oraz mając na uwadze, że zmniejszenie strat mocy czynnej powodowanych przyłączeniem do węzła odbiorczego urządzenia kompensującego o mocy Q_k (rys.2):

$$(4) \quad \Delta(\Delta P) = \frac{Q_0^2}{U^2} R - \frac{(Q_0 - Q_k)^2}{U^2} R = Q_k (2Q_0 - Q_k) \frac{R}{U^2},$$

gdzie Q_0 oznacza moc bierną odbiornika (równą mocy bierniej dostarczanej przez układ przesyłowy przed kompensacją), zgodnie z interpretacją równoważnika określoną poprzez (2), otrzymujemy:

$$(5) \quad k_{e2} = \frac{R}{U^2} (2Q_0 - Q_k).$$



Rys. 2. Schemat zastępczy układu z odbiorem energii czynnej i bierniej (obciążenie od strony zasilania mocą $S = P + j(Q_0 - Q_k)$ z elementem kompensującym X_c o mocy Q_k).

Zważywszy, że moc bierna Q dostarczana układem zasilającym z rezystancją R , po uwzględnieniu kompensacji w węźle odbiorczym wynosi:

$$(6) \quad Q = Q_0 - Q_k,$$

gdzie Q_0 – zapotrzebowanie na moc bierną przez elementy odbioru, Q_k – moc bierna układu kompensacji, uzyskujemy relacje między dwoma określeniami równoważnika k_e :

$$(7) \quad k_{e1} = 2(Q_0 - Q_k) \frac{R}{U^2} = k_{e2} - Q_k \frac{R}{U^2}.$$

Zależności (5) i (3) są więc równoważne tylko wtedy, gdy rozważany element kompensujący ma pomijalnie małą moc ($Q_0 \gg Q_k$ bądź $Q_k \rightarrow 0$, co matematycznie upodabnia zależność (2) do definicji pochodnej (1)).

Moc bierna elementu kompensującego o reaktancji zastępczej X_c może być określona zależnością (rys. 2):

$$(8) \quad Q_k = \frac{U^2}{X_c}.$$

Wówczas (7) można zapisać w postaci:

$$(9) \quad k_{e1} = k_{e2} - \frac{R}{X_c}.$$

Należy podkreślić, że zgodnie z obiema definicjami ((1) i (2)), dokładne wartości równoważnika uzależnione są od aktualnego obciążenia mocą bierną, co czyni go wielkością która nie może charakteryzować w sposób absolutny punktów sieci. W sieciach rozgałęzionych wartość k_e w konkretnym węźle zależy ponadto nie tylko od obciążenia mocą bierną w tymże węźle, lecz również od obciążeń biernych wszystkich pozostałych węzłów.

Energetyczny równoważnik mocy bierniej – stosowanie Równoważnik wg (1)

Przykładowo, w analizach kosztów rocznych lub wskaźnika efektywności ekonomicznej inwestycji, rzeczywiste straty mocy czynnej powinny być powiększane o straty, związane z przepływem mocy bierniej. Predestynowanym tu wydaje się równoważnik k_e według (1). Obliczeniowe straty mocy czynnej (obciążeniowe i jałowe) wynoszą więc:

$$(10) \quad \Delta P_{obl} = \Delta P + k_e Q,$$

gdzie: ΔP – straty mocy czynnej powodowane obciążeniem czynnym odbioru; Q – użytkowana moc bierna odbioru.

Dla obliczeniowych strat obciążeniowych koszt strat mocy i energii czynnej jest równy:

$$(11) \quad K_{po} = (k_p + k_w \tau) \Delta P_{obl}$$

gdzie τ - roczny czas występowania strat maksymalnych, k_p – jednostkowy roczny koszt strat mocy czynnej, k_w – jednostkowy koszt strat energii czynnej.

Z kolei dla strat jałowych, roczny koszt strat mocy i energii czynnej wylicza się jako:

$$(12) \quad k_{pj} = (k_p + k_w 8760) \Delta P_j + (k_p + k_w T_q) k_e \Delta Q_j$$

gdzie: T_q – roczny czas użytkowania mocy maksymalnej bierniej w systemie elektroenergetycznym, ΔP_j , ΔQ_j - straty jałowe mocy odpowiednio czynnej i bierniej.

Należy jednak mieć na uwadze, że są to obliczenia szacunkowe, gdyż straty mocy czynnej związane ze stratami jałowymi mocy bierniej nie są stałe w ciągu roku, zaś dokładna wartość k_e zmienia się w ciągu doby.

Stosowanie w zadaniach praktycznych pojęcia równoważnika k_e ma w założeniu pomóc w obliczeniach ilościowych strat energii czynnej powodowanych przepływami mocy bierniej w sieci elektroenergetycznej. Przy czym, zastosowanie kompensacji zmienia rozpyły składowych biernych prądu i rozkład mocy bierniej w sieci elektroenergetycznej, co będzie miało wpływ na wartości k_e . Znając wartość k_e w węźle odbiorczym przed kompensacją:

$$(13) \quad k_e = 2Q_0 \frac{R}{U^2},$$

ograniczenie strat mocy czynnej, można na podstawie (4) wobec (8), obliczyć następująco:

$$(14) \quad \Delta(\Delta P) = Q_k \left(k_e - \frac{R}{X_c} \right).$$

Po uwzględnieniu strat mocy czynnej w elemencie kompensującym (poprzez współczynnik k) oraz wpływu poziomu napięcia (współczynnik α), ostatecznie:

$$(15) \quad \Delta(\Delta P) = Q_{kN} \alpha^2 \left(k_e - \frac{R}{X_c} - k \right),$$

gdzie:

$$(16) \quad \alpha = \frac{U}{U_N},$$

U – aktualna wartość napięcia w analizowanym punkcie sieci, U_N – wartość znamionowa napięcia zasilającego.

Równoważnik wg (2)

W doborze urządzenia kompensacyjnego istotny jest przyrost strat mocy czynnej na jednostkę przyrostu mocy biernej, więc formalne zastosowanie znajduje tu interpretacja równoważnika k_e wg (2). Rozważenie inwestycji jest zasadne, gdy:

$$(17) \quad k_{e2} - k_k > 0$$

gdzie k_k – jednostkowe zużycie energii czynnej przez urządzenie kompensujące, tj. pobór mocy czynnej (w W), potrzebnej do wytworzenia jednostki mocy biernej (1 VAR).

Znając wartość k_e wyznaczoną wg (2), obliczenie spodziewanego ograniczenia strat mocy czynnej $\Delta\Delta P$ w wyniku kompensacji, jest znacznie prostsze niż w przypadku określenia wg (1), mianowicie:

$$(18) \quad \Delta(\Delta P) = Q_{kN} \alpha^2 (k_{e2} - k),$$

gdzie Q_{kN} – moc znamionowa kompensatora.

Wobec powyższego, mając na względzie prawidłowe obliczenia, należy posiadać wiedzę o sposobie wyznaczenia wartości k_e , aby dobrać właściwą formułę na obliczenie oszczędności energetycznych.

Zmiany strat mocy czynnej a obciążenie mocą bierną

Zwiększenie obciążenia mocą bierną powoduje nieliniowy przyrost strat. Zakładając liniowość rezystancji toru zasilającego oraz praktyczną sztywność sieci, strata doprowadzanej mocy czynnej $\Delta(\Delta P_Q)^+$ powodowana zwiększeniem obciążenia o kolejną dyskretną jednostkę mocy biernej ΔQ , powiększa się o iloczyn straty powodowanej tylko jedną jednostką obciążenia mocą bierną oraz najbliższej liczby całkowitej nieparzystej większej od dwukrotności liczby jednostek obciążenia mocą biernej w punkcie odbioru [14]:

$$(19) \quad \begin{aligned} \Delta(\Delta P_Q)^+ &= R \left(\frac{n\Delta Q + \Delta Q}{U} \right)^2 - R \left(\frac{n\Delta Q}{U} \right)^2 = \\ &= R \left(\frac{\Delta Q}{U} \right)^2 (2n+1) = (2n+1) \frac{\Delta Q^2}{P_R} \end{aligned}$$

gdzie: ΔQ – jednostka obciążenia mocą bierną; n – liczba jednostek ΔQ w punkcie odbioru przed zwiększeniem tego obciążenia (n jest liczbą rzeczywistą dodatnią); R – rezystancja zastępcza toru zasilającego (rezystancja drogi mocy pozornej od źródła do odbioru), U – napięcie w punkcie odbioru, P_R – moc czynna jaka wydzieliliby się na rezystancji toru R , gdyby przyłożono do niej napięcie o wartości równej napięciu w punkcie odbioru U , tzn.:

$$(20) \quad P_R = \frac{U^2}{R},$$

Przy przytoczonych wyżej założeniach można przyjąć: $P_R = const$.

W sposób analogiczny można wyznaczyć zależność na ilościowe obniżenie się strat mocy czynnej na odcinku zasilającym $\Delta(\Delta P_Q)^-$ po ograniczeniu obciążenia mocą bierną Q o ΔQ z początkowego poziomu obciążenia $n\Delta Q$:

$$(21) \quad \Delta(\Delta P_Q)^- = (2n-1) \cdot \frac{\Delta Q^2}{P_R}$$

Zatem, zmiana wartości strat mocy czynnej na odcinku zasilającym powodowana jednostkową zmianą obciążenia mocą bierną tego samego rodzaju co obciążenie, odniesiona do jednostki tej mocy biernej wynosi odpowiednio, w przypadku:

– zwiększenia obciążenia biernego:

$$(22) \quad \frac{\Delta(\Delta P_Q)^+}{\Delta Q} = (2n+1) \cdot \frac{\Delta Q}{P_R},$$

– obniżenia obciążenia biernego:

$$(23) \quad \frac{\Delta(\Delta P_Q)^-}{\Delta Q} = (2n-1) \cdot \frac{\Delta Q}{P_R},$$

przy czym wynikowe wartości (22) są zawsze dodatnie i świadczy to o zwiększeniu strat, zaś dla (23) przy $n < 0,5$ (ΔQ jest ponad 2-krotnie większe obciążenia Q przed zmianą) wynik będzie ujemny, co również oznacza wzrost strat.

Powyższą informację powinna dostarczać wartość równoważnika k_{e1} według (1) [12]. Przy obciążeniu mocą bierną n -jednostkami ΔQ , ten równoważnik k_{e1} , opisany jest zależnościami:

$$(24) \quad k_e = \frac{\partial \Delta P}{\partial Q} = 2 |Q| \frac{R}{U^2} = 2 |n\Delta Q| \frac{R}{U^2} = \frac{2n |\Delta Q|}{P_R}.$$

Wzrost strat mocy czynnej na rezystancji R odcinka zasilającego, powodowany zwiększeniem obciążenia biernego o jednostkę ΔQ , zgodnie z (19) można uzależnić od równoważnika k_e wg (1) w sposób następujący:

$$(25) \quad \Delta(\Delta P_Q)^+ = \Delta Q \cdot k_e \left(1 + \frac{1}{2n} \right).$$

Analogicznie w przypadku obniżenia obciążenia o jednostkę mocy biernej:

$$(26) \quad \Delta(\Delta P_Q)^- = \Delta Q \cdot k_e \left(1 - \frac{1}{2n} \right).$$

Funkcja informująca o wzroście strat mocy czynnej od źródła do danego punktu sieci przypisywana bezpośrednio równoważnikowi k_e jest więc prawdziwa przy względnie małych zmianach mocy biernej wobec aktualnego obciążenia, tzn. gdy

$$(27) \quad n \gg 1 \quad \text{to} \quad \Delta(\Delta P_Q) \approx |\Delta Q| \cdot k_e,$$

przy czym należy pamiętać, że wielkość k_e nie jest stała – z definicji zależy od aktualnego obciążenia mocą bierną (24). Stosowana dotychczas w praktyce formuła (27) nadaje się więc do bardzo zgrubnych oszacowań.

Propozycja metody wyznaczania przyrostu strat

Praktyczniejszym i bardziej poprawnym w porównaniu z metodą energetycznego równoważnika mocy biernej

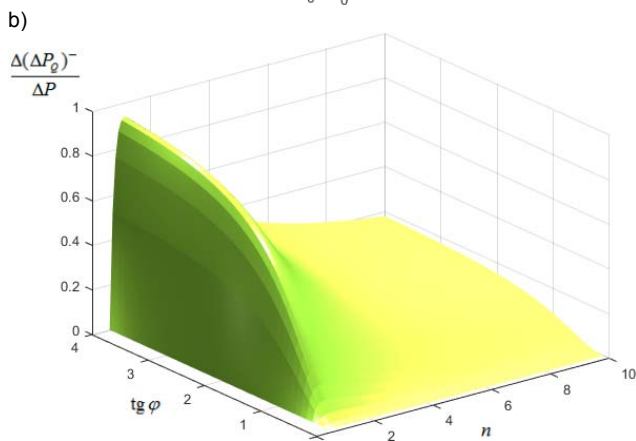
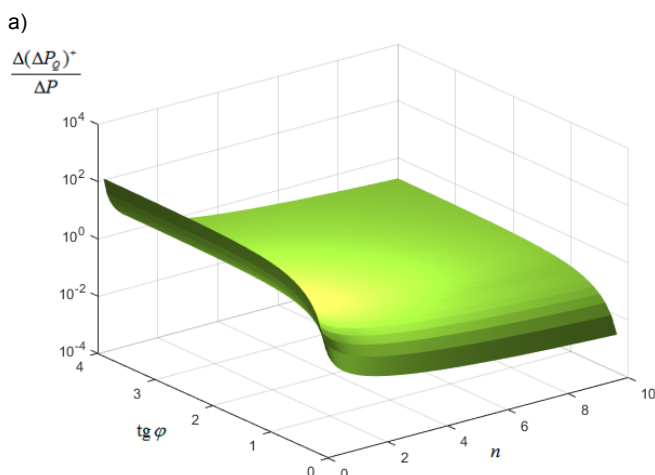
może być odniesienie strat $\Delta(\Delta P_Q)$ (19) do wielkości całkowitych strat mocy czynnej na analizowanym odcinku toru zasilającego ΔP , tj. powodowanych obiema formami dostarczanej mocy:

$$(28) \quad \Delta P = \Delta P_Q \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \varphi} \right)$$

gdzie ΔP_Q – straty mocy czynnej powodowane dostarczaniem mocy biernej, $\operatorname{tg} \varphi$ – stosunek obciążenia mocą bierną do mocy czynnej w punkcie odbioru.

Skoro: $\Delta P_Q = \frac{(n \cdot \Delta Q)^2}{P_R}$, więc na podstawie (22) i (23):

$$(29) \quad \frac{\Delta(\Delta P_Q)^+}{\Delta P} = \frac{2n+1}{n^2} \quad \text{oraz} \quad \frac{\Delta(\Delta P_Q)^-}{\Delta P} = \frac{2n-1}{n^2}$$



Rys. 3. Przebieg zmienności względnych zmian strat mocy czynnej powodowanych zwiększeniem (a) i zmniejszeniem (b) obciążenia mocą bierną, opisanych równaniami (30).

Wykorzystując (28), uzyskujemy praktyczne zależności na względną zmianę strat mocy powodowanych odpowiednio zwiększeniem lub zmniejszeniem obciążenia mocą bierną o ΔQ :

$$(30) \quad \frac{\Delta(\Delta P_Q)^+}{\Delta P} = \frac{2n+1}{n^2} \left(\frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi} \right)$$

$$\frac{\Delta(\Delta P_Q)^-}{\Delta P} = \frac{2n-1}{n^2} \left(\frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi} \right),$$

gdzie: $n = \left| \frac{Q}{\Delta Q} \right|$, przy czym $n > 0$ i jest liczbą rzeczywistą;

$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}$; P , Q – obciążenie mocą odpowiednio czynną

i bierną w analizowanym punkcie sieci przed zmianą obciążenia, ΔP – całkowite straty mocy czynnej na analizowanym odcinku toru zasilającego; ΔQ – ilościowa zmiana obciążenia mocą bierną w punkcie odbioru.

Straty wzrosną gdy:

$$- \frac{\Delta(\Delta P_Q)^+}{\Delta P} > 0 \quad (\text{spełnione dla każdego } n \text{ i } \operatorname{tg} \varphi),$$

$$- \frac{\Delta(\Delta P_Q)^-}{\Delta P} < 0 \quad (\text{spełnione dla } n < 0,5 \text{ tj. } \Delta Q > 2Q).$$

Przy czym dla każdego n i $\operatorname{tg} \varphi$: $\frac{\Delta(\Delta P_Q)^-}{\Delta P} \leq 1$ (rys. 3).

Przez zmianę obciążenia, o której mowa w sensie zwiększenia lub zmniejszenia, należy rozumieć moc bierną ΔQ tego samego charakteru (indukcyjną lub pojemnościową) co dotychczasowe obciążenie odbioru.

Przykład obliczeniowy

Na przyłączu budynku biurowego zarejestrowano obciążenie mocą bierną pojemnościową 23,4 kVAr przy jednoczesnym obciążeniu mocą czynną 355 kW. Zakładamy, że obiekt zasilany jest z sieci sztywnej. Załączenie w tym czasie dławika kompensującego o mocy 20 kVAr spowodowałoby ograniczenie łącznych strat mocy czynnej na odcinku zasilającym budynek o niespełna 0,5% obecnego poziomu strat, gdyż:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{23,4}{355} = 0,066$$

$$n = \frac{Q}{\Delta Q} = \frac{23,4}{20} = 1,17$$

$$\frac{\Delta(\Delta P_Q)^-}{\Delta P} [\%] = \frac{2n-1}{n^2} \left(\frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi} \right) 100\% = 0,425\%$$

Przyłączenie w tych samych warunkach dławika dostarczającego 40 kVAr spowodowałoby przekompensowanie, lecz z punktu widzenia procesu dostarczania energii, straty mocy czynnej spadłyby o niemal 0,22% obecnego poziomu strat (czyli abstrahując od kwestii napięciowych byłoby korzystne z punktu widzenia sprawności przesyłu), gdyż obciążenie odbioru wynosiłoby $|23,4 - 40| = 16,6$ kVAr ind:

$$n = \frac{Q}{\Delta Q} = \frac{23,4}{40} = 0,585$$

$$\frac{\Delta(\Delta P_Q)^-}{\Delta P} [\%] = \frac{2n-1}{n^2} \left(\frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi} \right) 100\% = 0,216\%$$

Pełne skompensowanie o wartość 23,4 kVAr spowodowałoby spadek strat mocy do ilości wynikającej tylko z obciążenia czynnego. W tym przypadku o ponad 0,4% obecnego poziomu strat:

$$n = \frac{Q}{\Delta Q} = 1$$

$$\frac{\Delta(\Delta P_Q)^-}{\Delta P} [\%] = 0,434\%$$

Jest to maksymalny w tym przypadku poziom względnego spadku strat, jaki byłby możliwy w wyniku działań ograniczających obciążenie mocą bierną.

Przyłączenie dławika dostarczającego moc 100 kVAr spowodowałoby wzrost strat o ponad 4,2%, gdyż:

$$n = 0,234$$

$$\frac{\Delta(\Delta P_Q)^-}{\Delta P} [\%] = \frac{2n-1}{n^2} \left(\frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{1+\operatorname{tg}^2 \varphi} \right) 100\% = -4,21\% < 0$$

Rezultat ten jest równoważny zwiększeniu obciążenia mocą pojemnościową o $|76,6 - 23,4| = 53,2$ kVAr poj., ponieważ rezultatem poprzedniego działania jest obciążenie $|23,4 - 100| = 76,6$ kVAr ind:

$$n = \frac{Q}{\Delta Q} = \frac{23,4}{53,2} = 0,44$$

$$\frac{\Delta(\Delta P_Q)^+}{\Delta P} [\%] = \frac{2n+1}{n^2} \left(\frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{1+\operatorname{tg}^2 \varphi} \right) 100\% = 4,21\%$$

W szacunkach nie uwzględniono dodatkowych strat mocy czynnej powstających w dołączanym dławiku.

Podsumowanie

Proponowana metoda wyznaczenia względnych zmian strat mocy czynnej powodowanych zmianą obciążenia mocą bierną wymaga znajomości danych jedynie o dotychczasowym obciążeniu mocą czynną i bierną, przy czym wystarczy znajomość współczynnika (tangensa) mocy i nie odwołuje się znajomości innych współczynników.

W celu wyznaczenia ilościowych zmian strat mocy czynnej powodowanych zmianą obciążenia mocą bierną, zgodnie z proponowaną metodą, potrzebna jest znajomość dotychczasowych strat tej mocy w układzie zasilającym, których wyznaczenie może odbyć się w wyniku pomiarów i wykonanego bilansu mocy, zaś do wyznaczenia względnych (procentowych) zmian strat mocy, znajomość tych wartości jest zbędna. Metoda może być stosowana w audytach efektywności energetycznej w celu określenia szacunku uzysku energetycznego działań z zakresu kompensacji mocy biernej.

Przedstawiona metoda dotyczy strat powstających w układzie zasilania na drodze energii elektrycznej do analizowanego punktu sieci i może być praktyczną alternatywą do metod opartych na pojęciu energetycznego równoważnika mocy biernej, którego stosowanie okazuje się problematyczne. Równoważnik ten bowiem:

- ma dwie różne i nierównoważne, w sensie formalnym, definicje obliczeniowe;
- nie jest wielkością charakteryzującą w sposób absolutny węzły sieci, ponieważ wartość (w obu definicjach) zależy od chwilowego obciążenia mocą bierną;
- pozwala na poprawne wyznaczenie przyrostu strat mocy czynnej powodowanych zwiększeniem mocy biernej o jej dowolną jednostkę ΔQ tylko przy znajomości jego aktualnej wartości oraz informacji o bieżącym obciążeniu mocą bierną, zgodnie z zależnościami (25) – (27);
- do celów praktycznych należy traktować jego wartość jedynie jako szacunkową, zwłaszcza dla małych obciążeń mocą bierną względem planowanego jej przyrostu;
- jego formuła nie uwzględnia zapotrzebowania na moc czynną przez układ kompensujący oraz wpływu zmian napięcia na moc kompensatora;

- nie ma obecnie wyznaczonych zakresów wartości dla krajowych sieci elektroenergetycznych, pracujących w różnych warunkach i konfiguracjach, zwłaszcza dla sieci przemysłowych;
 - wyznaczenie jego aktualnych wartości wymaga pracochłonnej i szerokiej akcji pomiarowej, obejmującej zróżnicowane, odpowiednio skategoryzowane konfiguracje sieci oraz właściwej analizy statystycznej;
 - możliwe częste i dynamiczne zmiany konfiguracji pracy sieci zwłaszcza w dobie Smart Grid-u, poddają w wątpliwość sens i praktyczność dokładnego wyznaczania takiego współczynnika, zaś nieaktualne wartości szacunkowe nie mogą być podstawą rzetelnych i dokładnych opracowań bądź ekspertyz inżynierskich, w tym audytów energetycznych.
- Częściową funkcjonalność pojęcia energetycznego równoważnika mocy biernej w zakresie wyznaczania zakresu zmiany strat energii na skutek korekty obciążenia mocą bierną może przejąć metoda proponowana w niniejszym artykule.

Autor:

dr inż. Sławomir Bielecki
e-mail: slawomir.bielecki@itc.pw.edu.pl
Instytut Techniki Ciepłej im. B. Stefanowskiego,
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa,
Politechnika Warszawska,
00-665 Warszawa, ul. Nowowiejska 21/25

LITERATURA

- [1] Ustawa z dnia 20 maja 2016r. o efektywności energetycznej. Dz.U. z 2016 r. poz. 831.
- [2] Bielecki S., Zaleski P., Fortuński B.: Wybrane problemy zarządzania energią. *Instytut i Wydawnictwo Texter*. Warszawa 2016.
- [3] Bielecki S.: Zagadnienia mocy biernej w użytkowaniu energii elektrycznej – zarys problemów. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, 2017, t.20, z.3, s.67-78.
- [4] Zajkowski K.: Analiza szacunkowa w audycie energetycznym rozliczająca działania zmniejszające przepływy mocy biernej w sieci energetycznej. *Logistyka* 6/2014, s. 11483-11492.
- [5] Maludziński B.: Audyt efektywności energetycznej dotyczący ograniczenia przepływów mocy biernej poprzez zastosowanie lokalnego układu do kompensacji mocy biernej w pompowni wody – analiza przypadku. *Gaz, woda i technika sanitarna* 4/2017, s.178-180.
- [6] Głazunow A.A.: *Elektriceskije sieti i sistiemy*. GEI, Moskwa-Leningrad, 1954.
- [7] Fiedorow A.A., Kuzniecowa P.W. (red.): *Sprawocznik elektryki przemysłowych przedsiębiorstw*. GEI, Moskwa-Leningrad, 1954.
- [8] Pirniak V.M. i in.: Calculation of economic equivalents of reactive power for the nodes of electric grid. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University* no.3, 2013, s.1-5.
- [9] Gosztowt W.: *Gospodarka elektroenergetyczna w przemyśle*. WNT. Warszawa 1971.
- [10] Szostek T.: Energetyczny równoważnik mocy biernej. *Energetyka* 7/1973 s. 229-234.
- [11] *Straty energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych*. Praca zbiorowa pod redakcją J. Kulczyckiego. KE PAN, PTPIREE. Poznań 2009.
- [12] Kujszczyk Sz. (red.) *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze*. Tom 1 i 2. OWPW. Warszawa 2004.
- [13] Filipowicz J., Kotarba J., Mejro Cz. (red.), Piłatowicz A.: *Sieci elektroenergetyczne*. PWN 1971.
- [14] Pruszyński R., Bielecki S.: Jak kształtują się opłaty za zużycie energii biernej według polskiego systemu rozliczeń? *Rynek Energii* 6(133), 2017, s.3-7.