



Sławomir BIELECKI*

Zagadnienia mocy biernej w użytkowaniu energii elektrycznej – zarys problemów

STRESZCZENIE: Moc bierna jest wielkością energetyczną charakterystyczną dla elektrotechniki i występuje w obwodach prądu przemiennego. Jest to w istocie pojęcie techniczne, wykorzystywane do opisu zjawisk odnoszących się do problematyki racjonalnego gospodarowania energią. Do pojęcia mocy i energii biernej odwołują się krajowe dokumenty i akty prawne, również wysokiego rzędu. Ogólnie regulowane są tam kwestie dotyczące problemów technicznych, w tym efektywności energetycznej oraz rozliczeń finansowych. Referat identyfikuje i porusza istotniejsze zagadnienia związane z aktualną problematyką mocy biernej w ramach obecnych i spodziewanych wyzwań, jakie stoją przed energetyką, również w kontekście popularyzacji rozwiązań proefektywnościowych i prosumenckich, ze wzrastającym udziałem generacji rozproszonej. Analizując i przedstawiając zakres problematyki mocy biernej, począwszy od zasygnalizowania problemów definicyjnych, wyszczególnienia krajowych aktów prawnych, poprzez analizę kwestii związanej z poprawą efektywności energetycznej do kwestii rozliczeń finansowych za energię bierną, odniesiono się do aktualnych wyzwań wynikających z nowych trendów w użytkowaniu energii. Z przedstawionego przeglądu zagadnień wyłania się obraz wymagający uporządkowania, monitorowania i dalszej analizy omawianych problemów. Dotyczy to działań nie tylko na poziomie krajowym, warto również zaangażować odpowiednie gremia międzynarodowe.

SŁOWA KLUCZOWE: moc bierna, użytkowanie energii elektrycznej, teoria mocy, prawo energetyczne, opłaty za energię, efektywność energetyczna, generacja rozproszona

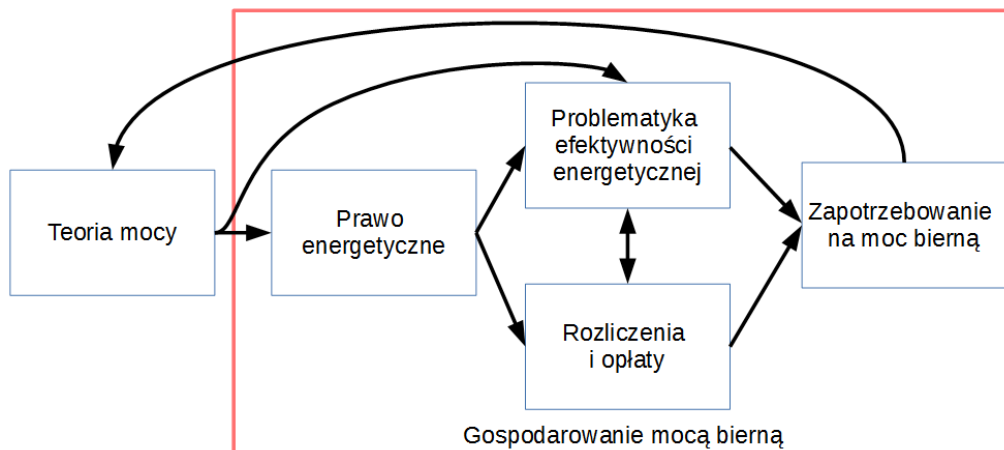
* Dr inż., Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Instytut Techniki Ciepłej im. B. Stefanowskiego, Warszawa; e-mail: slawomir.bielecki@itc.pw.edu.pl

Wprowadzenie

Moc bierna jest kategorią charakterystyczną dla elektrotechniki obwodów prądu przemiennego. Jako wielkość energetyczna nie ma formalnego odpowiednika w innych gałęziach fizyki technicznej. Scałkowana w czasie moc bierna to tzw. energia bierna, która w sensie fizycznym nie ma istoty energii. W celu utrzymania pożądanej jakości i niezawodności dostaw energii elektrycznej, powinna być na bieżąco bilansowana, podobnie jak moc i energia czynna. Gospodarka mocą bierną jest więc elementem problematyki racjonalnego wykorzystywania surowców i użytkowania energii.

Problematyka mocy biernej jest złożona i zaczyna się od kwestii różnorodności definicyjnej w ramach teorii mocy. Do pojęcia mocy biernej odwołują się krajowe akty prawne i dotyczą ramowego normowania kwestii zarówno technicznych, jak i ekonomicznych. Problematyka techniczna dotyczy stabilnego funkcjonowania systemu z uwzględnieniem problemu efektywności energetycznej procesów. Zapotrzebowanie na moc i energię bierną wynika z użytkowania urządzeń z elementami reaktancyjnymi, również w warunkach pogorszonej jakości napięcia, naturalne zapotrzebowanie wykazują ponadto elementy sieci i układów przesyłowych. Zmiany w technice i preferencjach użytkowania energii tworzą nowe zadania i problemy, początkowo rozwiązywane na gruncie teoretycznym. Teoria dostarcza modele, badając i rozwijając problematykę efektywnego wykorzystania energii. Elementem wymuszającym efektywność energetyczną zasobów i oddziałującym na ich zapotrzebowanie są kwestie ekonomiczne, stąd powiązanie z tematem opłat (rys. 1).

Warto podkreślić, że wszystkie kategorie (rys. 1) podlegają ewolucji w toku rozwoju elektrotechniki. To wszystko oddziałuje na zmiany w sposobie gospodarowania mocą bierną. W ar-



Rys. 1. Diagram wzajemnych oddziaływań komponentów w ramach problematyki użytkowania mocy i energii biernej.

Fig. 1. Component interaction diagram for reactive power problems

tykule odnosząc się do zasygnalizowanych kwestii, przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące rozwijającej się problematyki użytkowania mocy biernej z uwzględnieniem uwarunkowań krajowych.

1. Problem pojęcia mocy biernej

Pojęcie mocy biernej jest w istocie, opisywaną matematycznie, kategorią techniczną bez klarownej interpretacji fizycznej. Moc bierna Q jest traktowana jako dopełnienie mocy czynnej P do wielkości mocy pozornej S . Powszechnie traktuje się moc bierną jako pewnego rodzaju liczbowe odwzorowanie nieoptymalności wykorzystywania możliwości energetycznych źródła, wynikające ze zmieniających się właściwości elementów obwodu (Piotrowski 2003).

Sprawa formalnego określania mocy biernej dodatkowo komplikuje się przy przebiegach odkształconych prądu lub napięcia. Pojęcie mocy biernej w takich warunkach jest odmiennie definiowane pod względem matematycznym, zależnie od koncepcji teorii mocy. Do najpopularniejszych koncepcji w literaturze przedmiotu teorii mocy obwodów elektrycznych, autorsko definiujących moc bierną należą koncepcje: Budeanu, Fryzego, Emanuela, Kimbarka, Kustersa-Moore'a, Shepherdza-Zakikhaniego, Shanona i Czarneckiego (Składowych Fizycznych Prądu, CPC), Chwilowej Mocy Biernej (IRPpq, Akagi-Watanabe), Illovići oraz Zachowawcza Teoria Mocy (CPT). Powstają również pewne modyfikacje i odmiany opracowanych koncepcji. Przegląd koncepcji teorii mocy opartych zarówno na dziedzinie częstotliwości jak i czasu zawarto m.in. w (Czarnecki 2005; Emanuel 2010).

Przykładowo międzynarodowy standard IEEE (IEEE Std. 1459) do 2010 roku powoływał się na koncepcję Budeanu, mimo że próby konstrukcji układów mierzących wielkości według tej koncepcji nie przynosiły spodziewanych efektów (Czarnecki 2005). W nowszym standardzie pojawiła się informacja o błędności koncepcji Budeanu. Mimo to, powstają prace rzucające nowe światło na podejście według Budeanu (Jeltsema 2015). Wobec olbrzymiej liczby prac i publikacji dyskusyjnych i analizujących koncepcje, zaproponowane zostało wyodrębnienie, tzw. meta-teorii mocy obwodów elektrycznych (Czarnecki 2013).

Niemal każda z koncepcji teorii mocy, pomimo wad wskazywanych w innych pracach dyskusyjnych, znajduje zastosowania w rozwiązywaniu szczególnych problemów technicznych. Opracowane koncepcje są bowiem poprawne pod względem formalizmu matematycznego, choć definiują odmiennie obiekty. Rozważanie różnych koncepcji teorii mocy dostarcza określonych modeli, wyjaśniających szczególne fizyczne własności przesyłania energii, pozwalając na poprawę warunków pracy sieci (Willems 2010). Koncyliacyjnie zwrócono uwagę (Willems 2010), że istotny jest efekt praktyczny, a koncepcje teorii mocy są komplementarne i nie muszą być wzajemnie przeciwstawne.

Kwestie definicyjne pojęcia mocy biernej są domeną elektrotechniki teoretycznej. W elektroenergetyce stale operuje się pojęciem mocy biernej, pomijając dyskusję dotyczącą koncepcji

teorii mocy. A priori zakłada się ortogonalność składowej biernej prądu (powiązanej z mocą bierną) w stosunku do składowej czynnej prądu (będącej nośnikiem mocy czynnej) lub w przybliżeniu traktuje się przebiegi w układach przesyłowych jako nieodkształcone, bądź rozważa się moc bierną dla harmonicznej podstawowej.

2. Moc bierna w przepisach krajowych

Pojęcie mocy biernej pojawiło się w treści ustawy Prawo energetyczne w kontekście opłat za energię. Zgodnie z treścią tejże ustawy (art. 46 ust. 4 pkt 9) za ponadumowny pobór energii biernej mogą być naliczane opłaty, o kształcie ustalonym w odpowiednim Rozporządzeniu ministra do spraw energii. Ustawa o efektywności energetycznej z 2016 r. literalnie wylicza „ograniczenie strat związanych z poborem energii biernej” jako rodzaj przedsięwzięcia służącego poprawie efektywności energetycznej (art. 19 ust. 1 pkt 5 lit. a). W poprzedniej ustawie o efektywności energetycznej z 2011 r. sformułowanie brzmiało „ograniczenie przepływów mocy biernej”.

Do „ograniczania przepływów mocy biernej” odwołano się w rozporządzeniu audytowym (§ 5 ust. 2). Rozporządzenie taryfowe z kolei nakazuje przedsiębiorstwom dystrybucyjnym określenie w taryfie opłat za „ponadumowny” pobór energii biernej (§ 5 ust. 3 pkt 4). Definicja ponadumownego poboru energii biernej wraz ze szczegółowymi zasadami wyliczania opłaty, określa § 45 wspomnianego rozporządzenia.

Rozporządzenie systemowe wprowadzając pojęcie obszaru bilansowania nakazuje operatorowi uwzględnianie bilansowania wytwarzania i zapotrzebowania mocy zarówno czynnej, jak i biernej (§ 23 ust. 3 pkt 1). Rozporządzenie to również narzuca standardy w zakresie utrzymania parametrów napięcia zasilającego odbiorców w ściśle określonych granicach, zwalniając z tego wymagania w przypadku, gdy odbiorca użytkuje moc bierną przy współczynniku $\text{tg}\varphi$ (stosunek mocy biernej do czynnej) nie większym niż 0,4 (§ 38 ust. 1 pkt 6 oraz ust. 3 pkt 6). Zgodnie z zapisami rozporządzenia systemowego, wymagany stopień skompensowania mocy biernej powinien być określony we wnioskach o określenie warunków przyłączenia dla wytwórców oraz samych warunkach przyłączenia (§ 7–8). Rozporządzenie to również obliguje operatorów systemów do tworzenia procedur m.in. w zakresie załączania układów do kompensacji mocy biernej (§ 35 ust. 2 pkt 5). Wspomniane rozporządzenie (załącznik 1) wymaga od jednostek wytwórczych o mocy powyżej 50 MW możliwości współpracy z nadrzędnymi układami regulacji napięcia i mocy biernej. W kwestii klas dokładności układów pomiarowo-rozliczeniowych, zapisy zawarte w tymże załączniku dopuszczają, w zależności od kategorii urządzeń, nawet kilkukrotnie gorsze klasy pomiarów energii biernej w porównaniu z pomiarami energii czynnej (sekcja I, pkt. 5.4 i sekcja II pkt 2) oraz nie wymagają prowadzenia transmisji danych o pobieranej energii biernej.

3. Moc bierna jako element problematyki efektywności energetycznej

Powszechne rozumienie zjawiska mocy biernej, jako wielkości proporcjonalnej do składowej powiększającej wartość skuteczną prądu zasilającego i przez to powodującej zwiększenie strat dostarczania energii elektrycznej na przewodach, skłoniło polskiego ustawodawcę do umieszczenia w ustawie o efektywności energetycznej zapisu odwołującego się do energii biernej. W wydanym na podstawie delegacji przytoczonej ustawy, Obwieszczeniu Ministra Gospodarki z 21 grudnia 2012 r., wymieniono jako przedsięwzięcie służące poprawie efektywności energetycznej ograniczenie strat „związanych z poborem energii biernej...” (ust. 7 pkt 1 Załącznika). Należy podkreślić, że przedmiotem oszczędności jest energia elektryczna czynna, zaoszczędzona w wyniku działań ograniczających pobór energii biernej, a przepisy obligują do przeprowadzenia odpowiednich pomiarów i analiz.

Mimo literalnego wymienienia tego problemu w aktach prawnych wysokiej rangi, realizacja przedsięwzięcia z tego zakresu nie spotkała się z szerszym zainteresowaniem. Z upublicznionych przez Urząd Regulacji Energetyki, 894 Kart Audytu Efektywności Energetycznej zgłoszonych w latach 2013–2015, jedynie 4 (tj. 0,45% zgłoszonych) w tytule przedsięwzięcia odnosiły się do ograniczenia strat związanych z poborem energii (mocy) biernej (Bielecki i in. 2016). Do przyczyn takiego stanu rzeczy można zaliczyć:

- ◆ trudności metodyczne w wykonaniu rzetelnego audytu z zakresu takich przedsięwzięć;
- ◆ niską świadomość problemu zbędnego poboru energii biernej;
- ◆ niewielki potencjał oszczędności energetycznych po stronie odbiorcy i brak motywacji (ewentualne oszczędności powstaną na etapie dystrybucji i przesyłu).

W światowej literaturze zwraca się uwagę, że odpowiednie gospodarowanie mocą bierną może podnieść sprawność procesu dostarczania energii (Heger i in. 2012) i ograniczyć zużycie energii pierwotnej (Hofman i in. 2012), lecz problematyka mocy biernej zazwyczaj nie jest wprost rozważana w temacie efektywności energetycznej. Prace z tego zakresu mieszczą się w nurcie problemu optymalizacji rozprywu mocy.

W krajowym piśmiennictwie naukowo-technicznym nieliczne publikacje poruszają stricte tematykę mocy biernej w kontekście poprawy efektywności energetycznej. Właściwą publikacją dotyczącą metodologii audytu efektywności energetycznej odnośnie kompensacji mocy biernej można jest (Zajkowski 2014). Przedstawiono tam dwie metody predestynowane audytom. Pierwsza, będąca bezpośrednią aplikacją podstawowych praw elektrotechniki, wymaga dużej ilości dokładnych danych, druga zaś jest szacunkowa i oparta na koncepcji energetycznego równoważnika mocy biernej k_e . Należy jednak zauważyć, iż odnośnie do koncepcji energetycznego równoważnika mocy biernej k_e , w literaturze zachodniej nie spotyka się prac opierających się na tym pojęciu. Od czasu publikacji (Szostek 1973) w krajowej literaturze naukowo-technicznej brakuje prac analizujących bardziej szczegółowo problematykę praktycznego stosowania tej wielkości. Podawane powszechnie w poradnikach i podręcznikach wartości k_e w istocie opierają

się na źródłach radzieckich z połowy XX w. Skorygowane wartości równoważników k_e w wybranych punktach sieci elektroenergetycznej podane w nowszej publikacji (Kulczycki red. 2009) nie są rezultatem szerokich badań.

Wobec powyższego, a także z uwagi na własności równoważnika k_e (np. z definicji – zależność od aktualnego obciążenia punktu mocą bierną), proponowana metoda uproszczona oparta na równoważnikach k_e (Zajkowski 2014) nie może być podstawą rzetelnego audytu energetycznego, gdyż pozwala jedynie na bardzo niedokładne oszacowanie oszczędności energetycznych.

W monografii (Bielecki i in. 2016) przedstawiono dwie nowe propozycje metod szacowania strat energii powodowanych użytkowaniem mocy biernej. Pierwsza metoda opiera się na wartości mocy zwarciowej w analizowanym punkcie sieci i szacuje potencjalnie największy poziom strat mocy czynnej powodowanych przesyłem mocy biernej przez sieć elektroenergetyczną. Druga metoda opiera się na wartości spadku napięcia analizowanego liniowego ciągu zasilającego, również określając możliwie największą wartość strat mocy czynnej od przepływu mocy biernej. Metody te pozwalają na wyznaczenie potencjalnie górnego oszacowania wielkości strat energii i mogą być zastosowane w audytach energetycznych przede wszystkim w celu detekcji istotności problemu.

Nie są powszechne również publikacje szczegółowo opisujące przypadki uzyskania oszczędności energetycznych wskutek działań ograniczających obciążenia mocą bierną. (Fryc i in. 2012) przedstawia przypadek zmniejszenia strat przesyłu na kablach zasilających podrozdzielnie 6 kV po zastosowaniu nadążnej kompensacji mocy biernej w zakładzie wydobywczym. Praca (Heller i Zebrowski 2014), która w tytule odwołuje się do pojęcia efektywności energetycznej, w istocie skupia się na sprawie ograniczenia opłat za pobór energii biernej, podkreślając konieczność indywidualnego podejścia do zagadnienia. Opis rezultatu audytu efektywności energetycznej dotyczącego ograniczenia poboru mocy biernej zamieszczono w (Małudziński 2017). Prezentowane tam obliczenia oszczędności energii finalnej wskutek zastosowania systemu kompensacji mocy biernej w układzie napędowym przepompowni wody oparto na koncepcji energetycznego równoważnika mocy biernej k_e , przy czym jego wartość została zaczerpnięta z pozycji odwołującej się do źródeł z sprzed lat siedemdziesiątych XX w. Wobec przytoczonych wyżej uwag, wyznaczone w ten sposób oszczędności są, podobnie jak metoda, dyskusyjne.

4. Problem rozliczeń za energię bierną

Przy obecnym podejściu do przedstawionego wyżej problemu, praktycznie jedyną motywacją do ograniczania poboru energii biernej przez instalowanie u odbiorców układów kompensacji są opłaty za ponadumowny pobór energii biernej. Zgodnie z rozporządzeniem taryfowym takimi opłatami w Polsce mogą zostać obarczeni praktycznie wszyscy odbiorcy, również zasilani napięciem poniżej 1 kV, jeżeli tak zostało określone w umowie z dystrybutorem, umowie kompleksowej lub w warunkach przyłączenia (§ 45 ust. 1–2). Opłaty za energię bierną induk-

cyjną naliczane zgodnie z rozporządzeniem taryfowym (§ 45 ust. 6–8) nie są proporcjonalne do pobranej energii biernej (Bielecki 2013). Ten dość szczególny sposób wyznaczania opłaty jest charakterystyczny dla polskiego systemu.

W innych krajach obowiązują znacznie prostsze systemy wyznaczenia opłaty (ENTSO-E 2016), przy czym w każdym kraju obowiązują całkowicie odmienne zasady rozliczeń. Usystematyzowanie i przegląd zróżnicowania systemów naliczania opłat za energię bierną w krajach europejskich przedstawiono w (Bielecki 2015a). Kryteria zróżnicowania dotyczą w szczególności: określania stawek, liczby i wysokości progów poboru, różnicowania opłat w zależności od charakteru mocy biernej, sposobu różnicowania odbiorców oraz okresów poboru. Organizacje jak ENTSO-E, UCTE czy Eurelectric, których jednym z celów jest ujednoczenie reguł i standardów na potrzeby wspólnego rynku energii nie podjęły właściwych starań w kwestii unifikacji opłat za energię bierną.

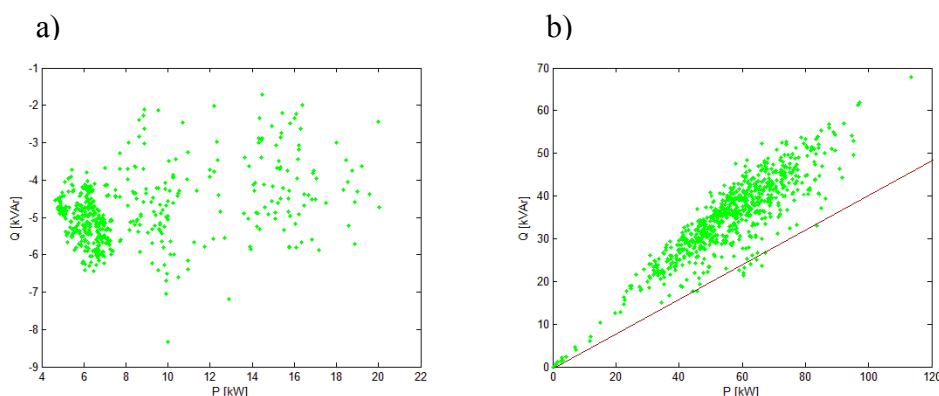
Gospodarowanie mocą bierną jest częścią procesu bilansowania systemu określonego w ustawie Prawo Energetyczne, jako „działalność gospodarcza”. Racjonalne jej prowadzenie na zasadach konkurencyjnych wymaga jednak zbudowania ekonomicznie uzasadnionych reguł i kryteriów ustalania opłat za energię bierną (Bielecki i Skoczkowski 2015). System opłat powinien uwzględniać faktyczne skutki przesyłu energii biernej oraz znaczenie mocy biernej w funkcjonowaniu sieci elektroenergetycznej. Przegląd proponowanych koncepcji rozliczeń za użytkowanie mocy biernej zawarto w (Bielecki 2015b). Podejście rynkowe do energetyki oraz jej ewolucja w kierunku rozwoju nowych uczestników i technologii stwarza nowe możliwości funkcjonowania rynku mocy (energii) biernej.

5. Zapotrzebowanie na moc bierną

W użytkowaniu mocy biernej udział biorą nie tylko odbiory końcowe, ale również elementy wykorzystywane w energetyce zawodowej. Do celów szacunkowych przyjmuje się, że energia bierna pobierana z sieci krajowej SN przez odbiorców stanowi 0,395 ilości energii czynnej sprzedanej odbiorcom z sieci SN (Kulczycki red. 2009). Coraz powszechniejsze stosowanie urządzeń z elementami reaktancyjnymi, elektronicznymi i energoelektronicznymi wpływać będzie na zmiany zapotrzebowania na moc bierną w sieciach dystrybucyjnych.

Na rysunku 2 przedstawiono wykresy rozrzutu zmierzonych wartości obciążeń mocą czynną i bierną różnych odbiorców, jeden jest użytkownikiem mocy biernej pojemnościowej, drugi – indukcyjnej. Coraz bardziej zauważalnym problemem jest wzrost zapotrzebowania na moc bierną pojemnościową w budynkach biurowych, zwłaszcza przy mniejszych obciążeniach (rys. 2a). Przyczyną może być pozostawianie biurowego sprzętu teleinformatycznego w trybie *stand-by* poza godzinami pracy. Pojemnościowy charakter odbioru może stwarzać zagrożenie przyrostu napięcia w punkcie przyłączenia do sieci i przekroczenia dopuszczalnych wartości napięć.

Problem wzrostu napięcia w sieci może również być powodowany odwróceniem kierunku przepływu energii, co jest już możliwe w sieciach dystrybucyjnych z generacją rozproszoną (Mokrzycki red. 2013). Środkiem zaradczym jest mechanizm regulacji napięcia w miejscu przyłączenia jednostki poprzez oddawanie dodatkowej mocy biernej.



Rys. 2. Wykres rozrzutu pomiarów mocy czynnej P i biernej Q w punkcie zasilania odbiorów: budynku biurowego (a) i gospodarstwa ogrodniczego (b). Wartość ujemna Q świadczy o obciążeniu pojemnościowym, dodatnia – indukcyjnym. Linia prosta na rysunku b odpowiada relacji przy współczynniku mocy $tg\varphi = 0,4$

Fig. 2. Scatter diagram of the measured values of active P and reactive power Q for an office building (a) and a horticultural farm (b) point of supply. The negative values of Q represents a capacitive load, the positive – inductive load. The straight line in Figure b corresponds to the relation with the power factor $tg = 0.4$

Naturalną zdolność do regulacji dostarczanej mocy biernej mają jednostki z generatorami synchronicznymi (zależnie od wykresu kołowego generatora), spotykane m.in. w jednostkach kogeneracyjnych (CHP, biogazownie), elektrowniach wodnych oraz turbinach wiatrowych. Zdolności te wykazują także turbiny wiatrowe z generatorami indukcyjnymi dwustronnie zasilanymi. Pomoc w kompensowaniu mocy biernej na rzecz sieci mogą również świadczyć falowniki instalacji fotowoltaicznych. Zgodnie z przepisami wprowadzonymi w Niemczech, operator sieci może zażądać zmiany współczynnika mocy w punkcie przyłączenia z udziałem falownika fotowoltaicznego i falownik musi pomagać w powrocie do stabilnej pracy sieci w warunkach zakłóceń poprzez oddawanie mocy biernej (Marona 2014).

Korzyści ze sterowania zasobami mocy biernej źródeł generacji rozproszonej w ramach struktury *smart grid* omówiono w (Calderaro i in. 2013). Problematyka opracowania strategii i algorytmów zarządzania mocą bierną w sieciach dystrybucyjnych z wysokim udziałem jednostek generacji rozproszonej jest rozwijana w światowych publikacjach, np. (Casavola i in. 2017), gdzie porównano podejścia o charakterze scentralizowanym oraz rozproszonym przy konstrukcji optymalizujących algorytmów sterujących. (Abessi i in. 2015) proponuje algorytm dla sieci inteligentnej, umożliwiający wykorzystanie również instalacji końcowych odbiorców w celu dostarczania do sieci mocy biernej.

Poprawę możliwości skutecznego bilansowania mocy biernej na obszarze sieci z udziałem rozproszonych źródeł odnawialnych można uzyskać odpowiednio integrując układy magazynowania energii z kompensatorami mocy biernej, np. układy STATCOM (Enslin 2010). Rozwój elektromobility również może przynieść dodatkowe narzędzia. Pojawiły się koncepcje i pierwsze publikacje analizujące możliwości zastosowania układów ładowania pojazdów elektrycznych w celach kompensacji mocy biernej sieci elektroenergetycznej (Bielecki 2016).

Posumowanie

Współczesna problematyka mocy biernej jest wieloaspektowa. Nerozwieszony pozostaje problem dokładnej definicji. Brak konsensusu w kwestii koncepcji teorii mocy nie stanowił jednak przeszkody w zaaplikowaniu pojęcia mocy biernej do kategorii z zakresu prawa gospodarczego. W powszechnym rozumieniu przesył mocy biernej pogarsza efektywność energetyczną, stąd należałoby wymuszać na użytkownikach ograniczanie jej poboru, a każdy kto użytkuje moc bierną, powinien partycypować w jej kosztach. Sprawa przejrzystego i jednolitego systemu rozliczeń również nie jest uporządkowana, co przejawia się zróżnicowaniem krajowych systemów opłat, wynikającym raczej z uwarunkowań historycznych niż aktualnych potrzeb energetyki. Regulacja mocy biernej jest narzędziem utrzymania stabilności napięciowej systemu, a rozwój nowych form i technologii (np. *smart grid*, generacja rozproszona, pojazdy elektryczne) stwarza nowe możliwości w zakresie optymalnego bilansowania zasobów mocy biernej. Moc bierna użytkowana jest w dwóch antagonistycznych charakterach: indukcyjnym lub pojemnościowym, więc każdy użytkownik energii biernej może być traktowany jako jej naturalny prosument.

W kontekście problemu racjonalnego gospodarowania zasobami energetycznymi odnośnie do mocy i energii biernej istnieje potrzeba:

- ◆ uporządkowania aparatu pojęciowego i modeli opisujących problem mocy biernej;
- ◆ monitorowania zjawisk przyczyniających się do zwiększenia zapotrzebowania na moc bierną oraz określenie zasięgu i zakresu związanych z tym problemów;
- ◆ wyznaczenia i uzasadnienia celów działań technicznych poprawiających gospodarowanie zasobami mocy biernej;
- ◆ opracowania i wdrożenia mechanizmów przejrzystych rozliczeń finansowych za użytkownika mocy biernej, jako środka motywującego osiągnięcie postulowanych celów;
- ◆ promowania nowoczesnych i efektywnych środków technicznych, sprzyjających optymalizacji gospodarowania mocą bierną.

Obecnie w Polsce potencjał generacji rozproszonej w zakresie zarządzania mocą bierną praktycznie nie jest wykorzystywany. Po awarii systemu w 2006 roku, odstąpiono od wspomaganie bilansowania mocy biernej sieci przesyłowej przez zasoby sieci dystrybucyjnych, instalując źródła tej mocy w sieci przesyłowej. Rozwój inteligentnych technologii może sprzyjać zmianie podejścia do tegoż problemu.

Zidentyfikowane problemy składające się na zagadnienie użytkowania mocy biernej sprawiają wrażenie zaniedbywanych nie tylko w kraju, lecz również na poziomie międzynarodowym. Zauważa się potrzebę opracowania rozwiązań w zakresie efektywnej koordynacji uczestników szerokiego rynku energii, umożliwiając zarządzanie i regulację istniejącymi oraz planowanymi zasobami mocy biernej wraz z systemem sprawiedliwych rozliczeń. Problem bilansowania mocy biernej ma wszak charakter lokalny, lecz charakter fizyki zjawisk jest globalny, więc wypracowanie odpowiednich reguł powinno odbywać się z zaangażowaniem międzynarodowych gremiów, mając przy okazji na uwadze tworzenie zintegrowanego i konkurencyjnego rynku energii.

Literatura

- ABESSI i in. 2015 – ABESSI, A., VAHIDINASAB, V. i GHAZIZADEH, M. 2015. Centralized Support Distributed Voltage Control by Using End-Users as Reactive Power Support. *IEEE Trans. on Smart Grid*. vol. PP, iss. 99, s. 1–10.
- BIELECKI, S. i SKOCZKOWSKI, T. 2015. Potrzeba zmian rozliczeń za moc bierną. *Rynek Energii* 4(119), s. 21–26.
- BIELECKI, S. 2013. Opłaty za pobór mocy biernej. Czy są słuszne? *Elektro.info* 12, s. 23–25.
- BIELECKI, S. 2015a. Problematyka rozliczeń za użytkowanie mocy biernej. *Energetyka* 11(737), s. 702–705.
- BIELECKI, S. 2015b. Przegląd metod rozliczeń za moc bierną. *Przegląd Elektrotechniczny* 9, s. 61–64.
- BIELECKI i in. 2016 – BIELECKI, S., ZALESKI, P. i FORTUŃSKI, B. 2016. *Wybrane problemy zarządzania energetyką*. Warszawa: Instytut i Wydawnictwo TEXTER.
- BIELECKI, S. 2016. Pojazdy elektryczne jako mobilne źródła mocy biernej. *Przegląd Elektrotechniczny* 11, s. 262–267.
- CALDERARO i in. 2013 – CALDERARO, V., GALDI, V., LAMBERTI, F. i PICCOLO, A. 2013. Coordinated local reactive power control in smart distribution grids for voltage regulation using sensitivity method to maximize active power. *Journal of Electrical Systems* 9–4, s. 481–493.
- CASAVOLA i in. 2017 – CASAVOLA, A., TEDESCO, F. i VIZZA, M. 2017. Command Governor Strategies for the Online Management of Reactive Power in Smart Grids with Distributed Generation. *IEEE Trans. on Automation Science and Engineering*, vol. 14, no. 2, April 2017, s. 449–460.
- CZARNECKI, L.S. 2005. *Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć*. OWPW, Warszawa.
- CZARNECKI, L.S. 2013. Meta-theory of electric powers and present state of power theory of circuits with periodic voltage and currents. *Przegląd Elektrotechniczny* 6, s. 26–31.
- EMANUEL, A.E. 2010. *Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow*. Wiley-IEEE Press.
- ENSLIN, J. 2010. *Dynamic reactive Power and Energy Storage for Integrating Intermittent Renewable Energy*. IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN 2010, s. 1–4.
- ENTSO-E, 2016. *Overview of Transmission Tariffs in Europe. Synthesis 2016*. Jun. 2016.
- FRYC i in. 2012 – FRYC, E., KOCHEL, Z., KRAKOWIAK, J. i ZIARNO, R. 2012. Możliwości poprawy efektywności wykorzystania energii elektrycznej czynnej i biernej. *Elektroenergetyka – Współczesność i Rozwój* Nr 1–2(11–12), s. 78–95.
- HEGER i in. 2012 – HEGER, Ch., SEN, P. i MORRONI, A. 2012. Power Factor Correction – A Fresh Look Into Today's Electrical Systems. *53rd IAS/PCA Cement Industry Technical Conference, IEEE* 14–17 May.

- HERLENDER, K. i ŻEBROWSKI, M. 2014. Kompensacja mocy biernej jako jeden z elementów poprawy efektywności energetycznej. *Elektro. info* 12, s. 25–27.
- HOFMANN i in. 2012 – HOFMANN, W., SCHLABBACH, J. i JUST, W. 2012. *Reactive Power Compensation. A practical Guide*. John Wiley & Sons.
- JELTSEMA, D., 2015. Budeanu's Concept of Reactive and Distortion Power Revisited. *IEEE XII International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation ISNCC 2015*, Łagów, Poland, s. 1–6.
- KULCZYCKI, J. red. 2009. *Straty energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych*. PTPiREE, KE PAN, Poznań.
- MALUDZIŃSKI, B. 2017. 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, s. 178–180.
- MARONA, M., 2014. Integracja instalacji fotowoltaicznych z sieciami przesyłowymi. *Wiadomości Elektrotechniczne* 4, s. 54–59.
- MOKRZYCKI, E. red. 2011. *Rozproszone zasoby energii w systemie elektroenergetycznym*. Kraków: Wydawnictwo IGSMiE PAN.
- Obwieszczenie Ministra Gospodarki z 21 grudnia 2012 r. w sprawie szczegółowego wykazu przedsięwzięć służących poprawie efektywności energetycznej. M.P. z 2013 r., poz. 15
- PIOTROWSKI, T. 2003. Moc bierna – sens fizyczny a pomiar. *PAK* nr 1, s. 37–40.
- Rozporządzenie audytowe – Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 10 sierpnia 2012 r. w sprawie szczegółowego zakresu i sposobu sporządzania audytu efektywności energetycznej, wzoru karty audytu efektywności energetycznej oraz metod obliczania oszczędności energii. Dz.U. z 2012, poz. 962.
- Rozporządzenie systemowe – Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, Dz.U. Nr 93, poz. 623 z późn. zm.
- Rozporządzenie taryfowe – Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 sierpnia 2011 r. w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną, Dz.U. z 2013 r., poz. 1200.
- SZOSTEK, T. 1973. Energetyczny równoważnik mocy biernej. *Energetyka* 7, s. 229–234.
- Ustawa o efektywności energetycznej – Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej. Dz.U. z 2016 r., poz. 831.
- Ustawa Prawo energetyczne – Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne. Dz.U. nr 54 z 1997, poz. 348 z późn. zm.
- WILLEMS, J.J. 2010. Reflections on Power Theories for Poly-Phase Nonsinusoidal Voltages and Currents. *Przegląd Elektrotechniczny* 6, s. 11–21.
- ZAJKOWSKI, K. 2014. Analiza szacunkowa w audycie energetycznym rozliczająca działania zmniejszające przepływy mocy biernej w sieci energetycznej. *Logistyka* 6, s. 11483–11492.

Sławomir BIELECKI

Reactive power in the use of electricity – an outline of problems

Abstract

Reactive power is one of energy categories, characteristic of electrical engineering and occurs in alternating current circuits. Essentially, it is a technical concept used to describe phenomena related to rational energy management. The concepts of reactive power and energy appear in national acts and legal documents. It is also there that one finds generally governed issues on technical problems, energy efficiency and financial settlements. The paper identifies and discusses more important reactive-power-related issues in the context of the current and expected challenges for evolving the power sector towards pro-efficiency and prosumer solutions and with an increasing share of the distributed generation. The analysis of contemporary issues of reactive power was conducted, starting with the problems of defining, presentation of the national legislation, consideration of the energy efficiency context and the issue of financial settlements for reactive energy ending. Additionally, the current challenges related to new trends in energy use have been presented. In light of the article, it is shown that the analysis of the issues needs to be arranged, monitored and continued. This applies not only to the national level, but it is worth involving relevant international bodies as well.

KEYWORDS: reactive power, electric power use, power theory, energy law, fees for energy use, energy efficiency, distributed generation