

Kompensacja mocy biernej w obiektach przemysłowych

Wstęp

Odbiorniki prądu przemiennego wykorzystywane powszechnie w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia oprócz mocy czynnej, potrzebują do swej pracy również moc bierną. Ogólnie przyjęło się, że urządzenia, które podczas pracy pobierają moc bierną indukcyjną nazywa się odbiornikami mocy biernej, natomiast urządzenia, które pobierają moc bierną pojemnościową określane są jako źródła mocy biernej. Przepływ mocy biernej w układach elektrycznych wiąże się między innymi ze zwiększeniem spadku napięcia, strat mocy czynnej w linii, kosztów inwestycyjnych, a także zmniejszeniem przepustowości sieci i zdolności wytwórczych generatorów. Dlatego prawidłowy dobór układów kompensacyjnych ma wielkie znaczenie zarówno ze względów prawnych (spełnienia wymogów dotyczących jakości energii elektrycznej) jak i ekonomicznych.

Wymagania przepisów i norm dotyczące mocy biernej

Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną [1] określa podstawowe wymagania stawiane układom zasilającym urządzenia pobierające moc bierną indukcyjną lub pojemnościową. Przez ponadumowny pobór energii biernej przez odbiorcę rozumie się ilość energii elektrycznej biernej odpowiadającą:

- 1) współczynnikowi mocy $\text{tg}\varphi$ wyższemu od umownego współczynnika i stanowiącą nadwyżkę energii biernej indukcyjnej ponad ilość odpowiadającą wartości współczynnika umownego (niedokompensowanie);
- 2) indukcyjnemu współczynnikowi mocy przy braku poboru energii elektrycznej czynnej;
- 3) pojemnościowemu współczynnikowi mocy zarówno przy poborze energii elektrycznej czynnej, jak i przy braku takiego poboru (przekompensowanie).

Rozliczeniami za pobór energii biernej są objęci odbiorcy zasilani z sieci średniego, wysokiego i najwyższego napięcia oraz w uzasadnionych przypadkach mogą być objęci także odbiorcy zasilani z sieci o napięciu znamionowym do 1 kV, o ile zostało to określone w warunkach przyłączenia lub w umowie o świadczenie usług dystrybucji energii elektrycznej. Wartość umownego współczynnika mocy przyjmuje się w wysokości $\text{tg}\varphi_0 = 0,4$ [1, 2, 3], chyba że indywidualna ekspertyza uzasadnia wprowadzenie niższej wartości współczynnika, przy zachowaniu warunku, że jego wartość nie może być niższa niż 0,2 [1].

Podstawowe rodzaje odbiorników mocy biernej

Większość urządzeń zasilanych napięciem przemiennym do poprawnej pracy potrzebuje energii biernej. Gwałtowny skok technologii spowodował zróżnicowanie odbiorników podłączanych do sieci, a charakter pobieranej mocy biernej w wielu przypadkach zmienił kierunek z indukcyjnego na pojemnościowy. Do podstawowych typów odbiorników energii biernej należą:

Silniki asynchroniczne - Na wartość mocy biernej silnika asynchronicznego ma wpływ stopień jego obciążenia (wraz ze wzrostem obciążenia rośnie wartość współczynnika mocy). Wynika to z faktu, że moc bierna strumienia rozproszenia jest proporcjonalna do kwadratu obciążenia silnika. Wartości współczynnika mocy zależą w dużej mierze od konstrukcji silnika (im większa szczelina tym większy strumień rozproszenia), jak również od prędkości znamionowej silnika (większa ilość par biegunów – większy prąd magnesujący).

Transformatory - Transformator pracując na biegu jałowym pobiera z sieci moc bierną potrzebną na magnesowanie rdzenia transformatora (reaktancja poprzeczna), której wielkość zależy od kwadratu napięcia zasilającego. Wraz ze wzrostem obciążenia transformatora rośnie wartość mocy biernej związanej z procesem przesyłu mocy w reaktancji podłużnej.

Źródła światła - Pobieranie mocy biernej przez źródła światła ściśle związane jest z ich charakterem pracy. Najniższą wartość współczynnika mocy (zblizoną do 0) posiadają temperaturowe źródła światła takie jak żarówki tradycyjne oraz halogenowe. Do źródeł

światła charakteryzujących się największym współczynnikiem mocy należą lampy LED ($\text{tg}\varphi$

= 3,3) oraz świetlówki kompaktowe ($\text{tg}\varphi = 1,23 \div 1,69$).

Odbiorniki nieliniowe – Układy nieliniowe (takie jak: układy prostownikowe, tranzystorowe układy mocy, wzmacniacze magnetyczne, tyrystorowe układy regulacyjne itp.) charakteryzują się relatywnie wysoką wartością współczynnika mocy, jednocześnie znacząco wpływają na odkształcanie krzywej napięcia w linii zasilającej. Skutkiem występowania wyższych harmonicznych prądu oraz mocy biernej są większe straty energii elektrycznej w linii zasilającej, a także pogorszenie jakości energii doprowadzanej do innych odbiorców.

Skutki obciążenia układu elektrycznego mocą bierną

Znaczny pobór mocy biernej negatywnie wpływa na pracę sieci elektroenergetycznej. Skutkiem przepływu energii biernej przez układ elektryczny jest [4]:

- **zwiększenie spadków napięcia** - Przesyłanie mocy czynnej oraz mocy biernej przez rezystancję i reaktancję elementów sieci i instalacji elektrycznych wiąże się z występowaniem na nich spadków napięć. W przypadku, gdy obciążenie ma charakter czynno-pojemnościowy, wówczas przepływ energii biernej pojemnościowej powoduje w punkcie przyłączenia odbiornika wzrost wartości napięcia, w stosunku do punktu zasilania.
- **zwiększenie strat mocy czynnej** – przesył energii biernej powoduje w elementach obwodów elektrycznych dodatkowe straty mocy czynnej, gdyż są one sumą strat mocy czynnej wynikającą z przepływu mocy czynnej oraz powstałych z przesyłu mocy biernej. Przy wartościach $\text{tg}\varphi$ powyżej 1 straty mocy wynikające z przesyłu mocy biernej w sieciach elektroenergetycznych są większe od strat powodowanych przepływem mocy czynnej.
- **zmniejszenie przepustowości linii** – Podstawowym parametrem charakteryzującym każde urządzenie elektryczne jest jego obciążalność prądowa. Przekroczenie wartości prądu dopuszczalnego w danym obwodzie elektrycznym może spowodować przegrzanie izolacji lub jej trwałe termiczne uszkodzenie. Wraz ze wzrostem wartości

współczynnika mocy $\text{tg}\varphi$ maleje moc przesyłana przez urządzenia elektroenergetyczne (wartość mocy czynnej przesyłanej przez sieć zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do zmiany wartości współczynnika mocy).

- ♦ **zmniejszenie zdolności wytwórczych generatorów** - Wraz ze wzrostem wartości współczynnika mocy wzrasta w generatorach oddziaływanie twornika, co powoduje obniżenie wytwarzanego napięcia. Zapobiega się temu zjawisku poprzez dowzbudzenie generatora, co powoduje dodatkowy przyrost temperatury w wirniku. W celu ograniczenia wartości temperatury generatora należy zmniejszyć wartość prądu czynnego przepływającego przez jego uzwojenia.
- ♦ **zwiększenie kosztów inwestycyjnych** - Urządzenia elektroenergetyczne na etapie projektowania dobiera się na założoną wartość mocy pozornej. Wzrost wartości współczynnika mocy, w trakcie pracy urządzenia, powoduje zwiększenie mocy pozornej, której dany element sieci nie jest w stanie przesłać. Konieczne jest wówczas instalowanie urządzeń o lepszych parametrach, co wiąże się z dodatkowymi kosztami.
- ♦ **inne skutki wywołane przepływem mocy biernej** – poza zmniejszeniem się sprawności całego układu elektroenergetycznego, wysoka wartość współczynnika mocy powoduje nieprawidłowości w pracy zabezpieczeń, polegające na powstawaniu trudności przy rozwieraniu styków wyłącznika podczas przepływu prądu o dużym przesunięciu fazowym w stosunku do napięcia.

Sposoby kompensacji mocy biernej

Wartość współczynnika mocy można zmieniać w sposób naturalny lub sztuczny. Naturalne sposoby poprawy współczynnika mocy mają związek z właściwym doбором urządzeń i ich prawidłową eksploatacją i polegają głównie na:

- ♦ zastąpieniu niedociążonych silników silnikami o mniejszej mocy znamionowej;
- ♦ wykorzystywaniu przełącznika „trójkąt-gwiazda”, podczas pracy maszyny poniżej 50% mocy znamionowej;
- ♦ unikaniu pracy silnika na biegu jałowym;
- ♦ zastępowaniu silników pierścieniowych silnikami zwartymi, a silników wolnoobrotowych silnikami szybkoobrotowymi;
- ♦ wymianie silników asynchronicznych na synchroniczne, które mogą pracować przy $\text{tg}\varphi = 0$ lub nawet pobierać (przy przewzbudzeniu) moc bierną pojemnościową;
- ♦ odpowiedniej konserwacji silników;
- ♦ poprawnym doborze mocy oraz planowaniu pracy transformatorów zgodnie z planowanym ich obciążeniem.

Sztuczna kompensacja polega na instalowaniu w układach elektrycznych dodatkowych urządzeń, które kompensują pobieraną przez odbiorniki moc bierną. W przypadku, gdy odbiorniki mają charakter indukcyjny, urządzeniami do kompensujących będą kondensatory lub kompensatory synchroniczne a dla odbiorników o charakterze pojemnościowym, urządzeniami kompensującymi będą baterie dławikowe. W zależności od złożoności sieci, w której należy zastosować układ kompensacyjny oraz od tego, jaki efekt chce się uzyskać wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje kompensacji mocy biernej:

- ♦ **kompensację centralną** - polegającą na zainstalowaniu urządzeń kompensujących bezpośrednio do szyn zbiorczych w głównej stacji zasilającej (najczęściej stacji transformatorowej). Zaletą kompensacji centralnej jest instalowanie urządzeń kompensujących w jednym pomieszczeniu, co ułatwia ich konserwację oraz ograniczenie mocy urządzenia kompensującego w porównaniu do innych metod, a w szczególności do kompensacji indywidualnej. Wadą takiego rozwiązania jest konieczność przesyłu mocy biernej przez linie łączące odbiorniki z rozdzielnicą, co powoduje większe koszty eksploatacyjne wynikające ze strat mocy czynnej przy przepływie energii biernej
- ♦ **kompensację grupową** - polegającą na zainstalowaniu urządzeń kompensujących w oddziałowych rozdzielnicach budynku. Zaletą takiej kompensacji jest nieobciążanie sieci zasilającej, rozdzielnic oddziałowych oraz transformatorów mocą bierną, a co za tym idzie ograniczenie na tych elementach straty mocy czynnej. Wadą kompensacji grupowej jest konieczność użycia większej liczby łączników, przyrządów pomiarowych, a także potrzeba zagospodarowania większej ilości miejsca na umieszczenie urządzeń kompensujących
- ♦ **kompensację indywidualną** - polegającą na przyłączaniu urządzenia kompensacyjnego bezpośrednio do danego odbiornika. Do podstawowych zalet takiego rozwiązania należą: wspólne zabezpieczenie układu kompensującego i odbiornika oraz brak potrzeby stosowania układów pomiarowych, sterujących oraz rozładowujących urządzenia kompensacyjne. Wadą kompensacji indywidualnej jest mniejszy stopień wykorzystania urządzeń kompensujących, niż przy innych sposobach kompensacji.

Metody wyznaczania mocy biernej

Ze względów technicznych pomiar mocy jest czynnością nie stwarzającą obecnie problemów. Nowoczesne analizatory do pomiaru prądu wykorzystują cewki Rogowskiego lub cęgi transformatorowe, które powinny cechować się małym błędem pomiarowym i kątowym. Te parametry determinują wyniki pomiarów oraz wartość końcową wyliczaną przez urządzenie. Przyrządy pomiarowe moc bierną mogą wyliczać wg różnych algorytmów. Najbardziej popularne obecnie algorytmy opisywane są w normie DIN 40110-2. Wg tej normy, moc bierna liczona jest z zależności:

$$Q_{tot,\Sigma} \approx \sqrt{Q_{1,\Sigma}^2 + D_{\Sigma}^2 + Q_u^2}$$

gdzie: Q_1 - Moc bierna dla przebiegów o częstotliwości 50Hz; D - Moc odkształcenia; Q_u - Asymetria mocy biernej.

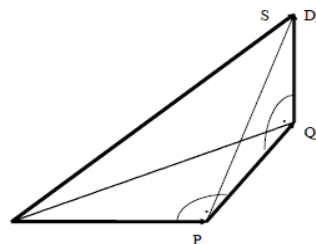
Drugą metodą opisującą algorytmy do wyliczania mocy biernej jest teoria Budeanu, która definiuje prąd (I) i napięcie (U) jako sumę poszczególnych harmonicznnych, a moc bierną opisuje równaniem:

$$Q = \sum_n U_n I_n \sin \Phi_n$$

w którym n to rząd wyższej harmonicznnej w napięciu i prądzie.

Wartość mocy biernej Q musi być uzupełniona o wartość mocy dystorsji (odkształcenia) D , która powoduje, że teoria Budeanu jest spójna.

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2$$



Trzecią metodą, która stosowana jest do wyliczania mocy biernej i określania jej charakteru, jest teoria prof. Fryzego. Na dzień dzisiejszy, mając na względzie ilość stosowanych urządzeń o poborze energii o charakterze nieliniowym, jedynie ta metoda umożliwia jednoznaczne określenie charakteru pojemnościowego lub indukcyjnego mocy biernej. Według tej metody prąd dzieli się na dwa składniki. Pierwszy składnik (i_a) jest prądem o tym samym kształcie i kącie fazowym jak napięcie (prąd rezystancyjny) - ma on amplitudę taką, że przemnożony przez wartość skuteczną napięcia (U) równy jest mocy czynnej. Wartość chwilową prądu i_a opisana jest zależnością:

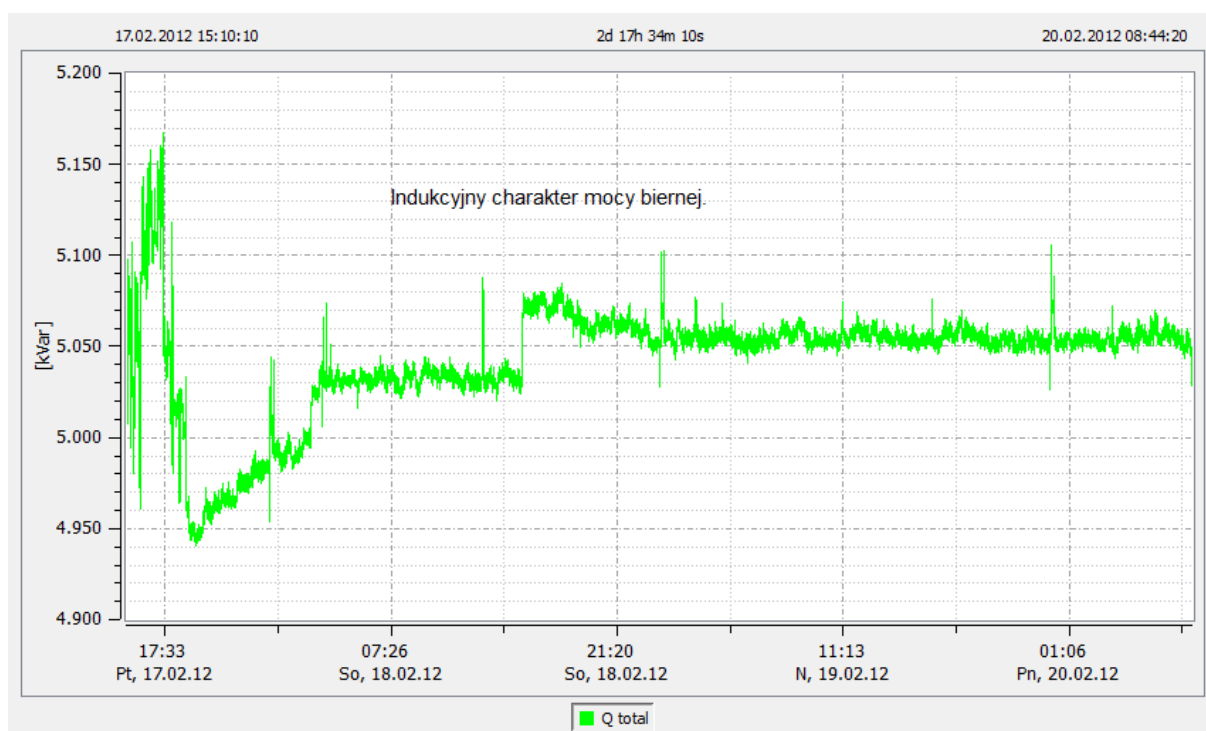
$$i_a = (P/U^2) * u$$

Drugi składnik prądu jest prądem szczątkowym (i_r). Wartość chwilową tego składnika opisuje równanie:

$$i_r = i - i_a$$

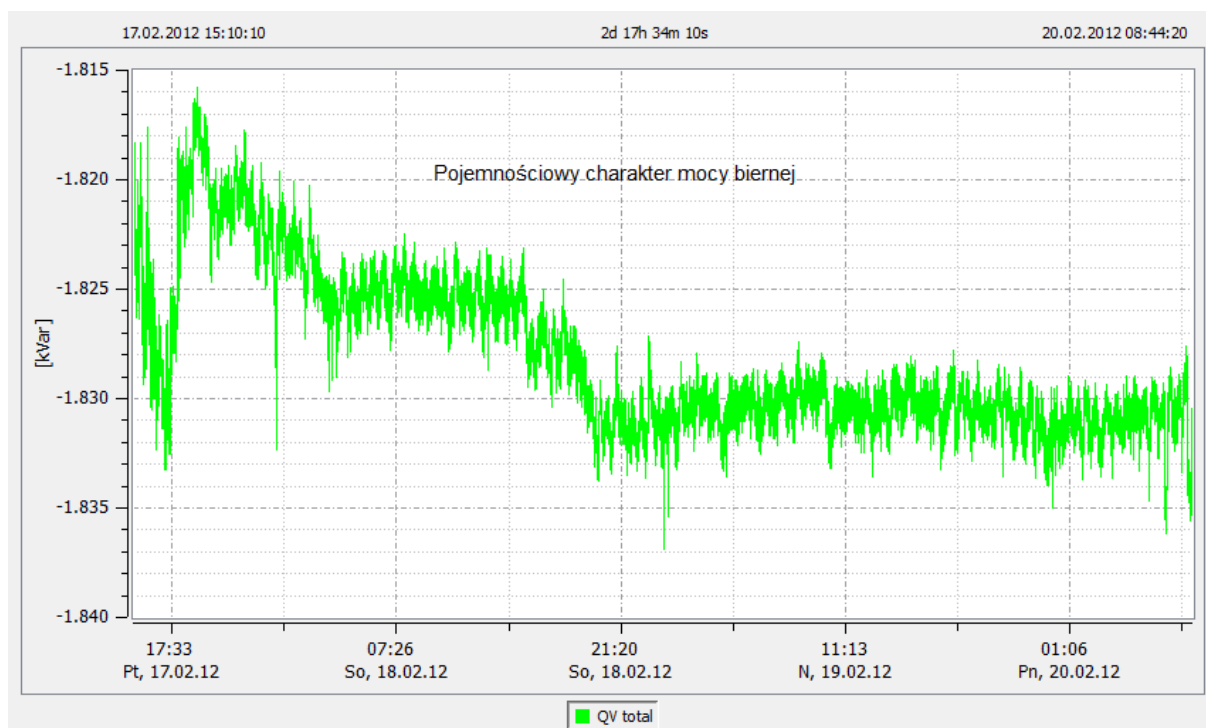
Analiza mocy biernej w wybranym zakładzie przemysłowym

Badania przeprowadzone zostały w zakładzie przemysłowym, charakteryzującym się szybko zmiennymi obciążeniami. Pomiary wykonane analizatorem PQ BOX 100 firmy a-eberle pokazują celowość stosowania przyrządów, które oferują całą gamę algorytmów pomiarowych. Właściwy ich dobór gwarantuje uzyskanie wyników pomiarowych spójnych z rzeczywistością. Wykresy przedstawione na rysunkach 1 i 2 wskazują jednoznacznie, że dla przebiegów mocno odkształconych (podczas badań zarejestrowano współczynniki odkształcenia THD na poziomie 5,3 % dla napięcia oraz 45 % dla prądu zasilającego), określenie charakteru mocy biernej oraz jej wartości jest możliwe tylko zgodnie z teorią prof. Fryzego. Jeżeli analizy dokona się wg teorii Budeanu, moc bierna pobierana przez urządzenia zainstalowane w analizowanych zakładzie przemysłowym będzie miała charakter indukcyjny (rys. 1).

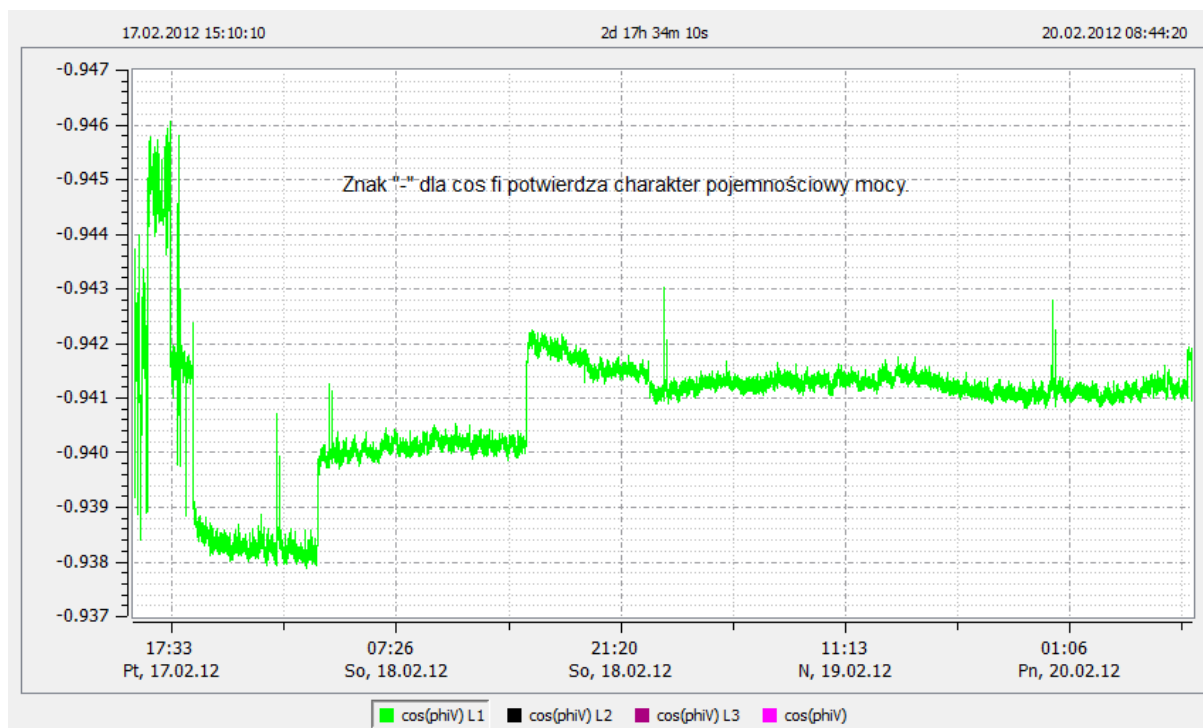


Rys. 1. Zarejestrowany przebieg zmian wartości mocy biernej wyznaczony wg teorii Budeanu

Jeżeli moc bierna w analizowanym układzie zostanie wyznaczona według teorii prof. Fryzego, wówczas charakter mocy biernej pobieranej przez zakład będzie pojemnościowy. Taki właśnie charakter miała moc bierna w rzeczywistości, co potwierdza między innymi zarejestrowana ujemna wartość $\cos \phi$ (rys. 3).



Rys. 2. Zarejestrowany przebieg zmian wartości mocy biernej wyznaczony wg teorii Fryzego



Rys. 3. Zarejestrowany przebieg zmian wartości współczynnika mocy $\cos \varphi$

Podsumowanie

Uwzględniając rzeczywistą sytuację w obiektach przemysłowych, związaną z coraz większym udziałem urządzeń o nieliniowym przebiegu prądu obciążenia oraz różnym charakterze mocy biernej, do tematu kompensacji mocy biernej należy podchodzić ze szczególną starannością. Niezbędne jest też posiadanie w tym zakresie znacznej wiedzy technicznej. Niespełnienie tych wymagań przy doborze układów kompensujących może spowodować efekt odwrotny do zamierzonego - układ może nie w pełni kompensować istniejącą moc bierną lub może wystąpić przekompensowanie, które w skutkach jest jeszcze gorsze niż niedokompensowanie. Zastosowanie do analizy mocy odpowiednich analizatorów gwarantuje uzyskanie rzetelnych wyników, a wraz z posiadaną przez osobę dokonującą analizy wiedzą techniczną w tym zakresie - prawidłowe dobranie układu do kompensacji mocy biernej.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 7 czerwca 2013 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Gospodarki w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną (Dz. U., poz. 1200)
- [2] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej (zatwierdzona decyzją Prezesa URE nr DRR-4321-29(5)/2013/MKo4 z dnia 10 września 2013r),
- [3] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z 2007 r., Nr 93, poz. 623)
- [4] Praca zbiorowa pod redakcją Kujszczyka Sz.: Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze Tom 2, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.