

Automatyczna kompensacja mocy biernej z systemem monitorowania kopalnianej sieci 6 kV

W artykule przedstawiono koncepcję, realizację oraz efekty działania centralnego układu automatycznej kompensacji mocy biernej kopalnianej sieci elektroenergetycznej 6 kV. Jako sterowane kompensatory mocy biernej wykorzystane zostały silniki synchroniczne układów napędowych pracujących w zakładzie oraz baterie kondensatorów i filtry wyższych harmonicznym. Omówiono system łączności, a także zaprezentowano system monitorowania stanu sieci wewnątrzzakładowej.

słowa kluczowe: kompensacja mocy biernej, automatyczna regulacja, monitorowanie

1. WSTĘP

Celem kompensacji mocy biernej jest odciążenie sieci od przepływu prądów biernych, do czego dąży się poprzez eliminację przesunięcia fazowego pomiędzy podstawowymi harmonicznymi prądu i napięcia oraz eliminację wyższych harmonicznym prądów odbiornika niezależnie od kształtu napięcia zasilającego. W takich warunkach uzyskuje się minimalizację prądu oraz mocy pozornej źródła dla określonej mocy czynnej odbiornika [4, 6, 7].

W przemysłowych sieciach energetycznych stosuje się kompensację częściową polegającą na kompensacji podstawowej harmonicznym prądu i napięcia w celu utrzymania wartości współczynnika mocy w dopuszczalnych granicach, a co za tym idzie – ograniczenia strat mocy czynnej i spadków napięcia w liniach zasilających.

Przy kompensacji częściowej jako źródła mocy biernej wykorzystuje się baterie kondensatorów, pasywne filtry wyższych harmonicznym oraz kompensatory synchroniczne, zarówno w postaci nieobciążonych maszyn synchronicznych, jak i obciążonych silników lub generatorów synchronicznych [1, 6, 7].

Niedotrzymanie odpowiednich parametrów technicznych energii pobieranej przez odbiorców w punktach przyłączenia do sieci powoduje naliczanie dodatkowych opłat przez dostawców energii elektrycznej. Aby ograniczyć koszty zakupu energii elek-

trycznej, należy odpowiednio kompensować moc bierną pobieraną z sieci energetycznej w każdym z punktów zasilania zakładu.

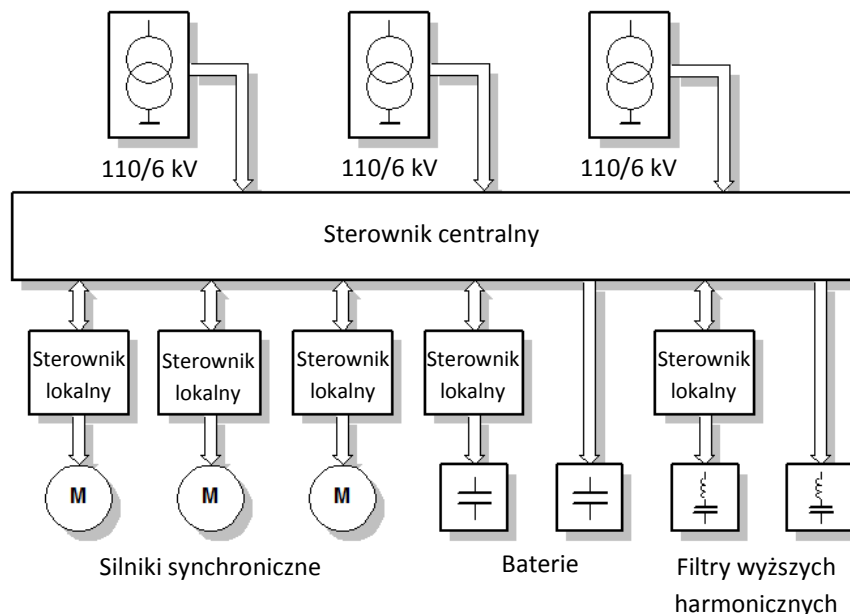
Przy zmiennych obciążeniach mocą czynną i bierną wynikających z cyklu produkcyjnego zakładu rozwiązaniem jest automatyczny, nadążny system kompensacji mocy biernej, pozwalający na niezależną kompensację każdego z przyłączy i wykorzystujący do tego celu dostępne w wewnątrzzakładowej sieci energetycznej źródła mocy biernej [2].

2. KONCEPCJA UKŁADU

Z przeprowadzonych analiz w kilkunastu kopalniach, zarówno węgla kamiennego, jak i rud miedzi, wynika, że zazwyczaj moc zainstalowana urządzeń kompensacyjnych jest wystarczająca do utrzymania wartości współczynnika mocy w dopuszczalnym zakresie we wszystkich okresach rozliczeniowych, a indywidualne możliwości regulacyjne poszczególnych urządzeń kompensacyjnych, przede wszystkim pracujących w sposób ciągły silników synchronicznych [1], są wystarczające do dostosowania ich mocy do aktualnych potrzeb. W razie potrzeby możliwe jest zastosowanie dodatkowych baterii kondensatorów bądź filtrów wyższych harmonicznym montowanych w układach zasilania tyrystorowych maszyn wyciągowych.

W celu optymalnego wykorzystania do potrzeb kompensacji dostępnych w sieci zakładowej źródeł mocy biernej opracowano system automatycznej

kompensacji mocy biernej o strukturze przedstawionej na rys. 1.



Rys. 1. Struktura systemu automatycznej kompensacji mocy biernej (opr. wł. na podst. [2])

Sterownik centralny realizuje pomiary wartości chwilowych mocy czynnej i biernej w punktach zasilania zakładu, identyfikuje aktualną konfigurację sieci wewnątrzzakładowej oraz decyduje o rozdziale aktualnie zapotrzebowanej mocy biernej do poszczególnych regulowanych źródeł mocy biernej dostępnych w zakładowej sieci elektroenergetycznej. Dzięki znajomości konfiguracji połączeń w każdym punkcie odbioru (transformatory 110/6 kV) kompensacja przebiega niezależnie [2].

Zadaniem sterownika lokalnego jest wypracowanie w kompensatorze zadanej mocy biernej z uwzględnieniem ograniczeń eksploatacyjnych urządzenia oraz przesłanie do sterownika centralnego informacji o aktualnym stanie pracy kompensatora.

Algorytm regulacji sterownika centralnego na podstawie pomiarów w punkcie zasilania zakładu wyznacza aktualne zapotrzebowanie na zmianę mocy biernej transformatora zasilającego zgodnie z równaniem [3]

$$\Delta Q_z = P \cdot \operatorname{tg} \phi_z - Q, \quad (1)$$

gdzie:

ΔQ_z – wymagana zmiana mocy biernej w danym kroku regulacji,

P, Q – aktualna wartość chwilowa mocy czynnej i biernej w punkcie zasilania,

$\operatorname{tg} \phi_z$ – zadany współczynnik mocy w punkcie zasilania zakładu.

W kolejnym etapie wyznaczana jest sumaryczna moc bierna Q_z , jaką musi wyprodukować n dostępnych kompensatorów wg zależności [3]

$$Q_z = \Delta Q_z + \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (2)$$

gdzie Q_i – aktualna moc bierna i -tego kompensatora, a następnie realizowany jest rozdział zapotrzebowanej mocy biernej do poszczególnych silników wg wybranego kryterium.

Najprostszym kryterium rozdziału mocy biernej jest równomierny podział zgodnie z zależnością [3]

$$Q_{zi} = \frac{Q_z}{n}, \quad (3)$$

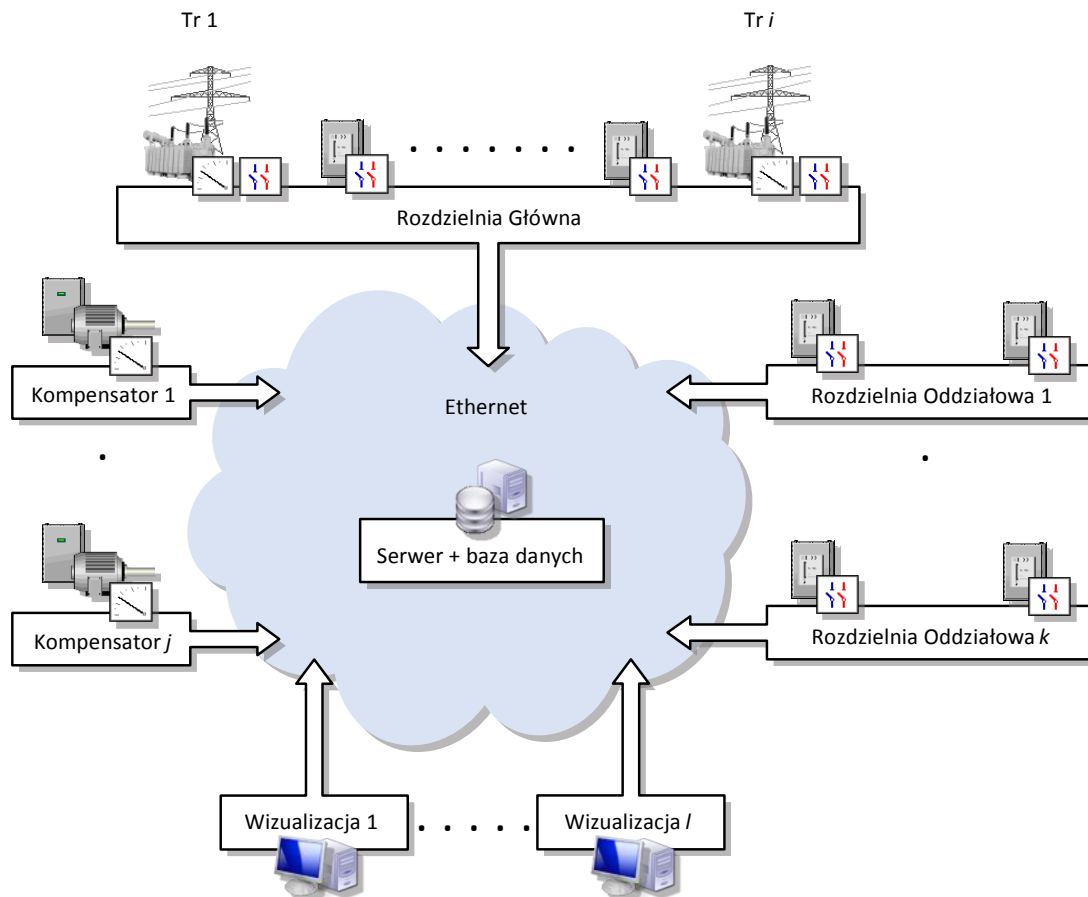
gdzie Q_{zi} – moc bierna zadana i -tego kompensatora.

Sterowanie wybranymi kompensatorami może być powiązane ze stanem pracy innych urządzeń, np. przełączanie filtrów wyższych harmonicznych może być uzależnione od stanu pracy maszyn wyciągowych [3]. Po przeprowadzeniu rozdziału mocy następuje kontrola ograniczeń związanych z dopuszczalnymi wartościami mocy biernej wynikającymi z ograniczeń prądu wzbudzenia silników synchronicznych, dyskretnymi wartościami mocy i czasem rozładowania baterii kondensatorów, koniecznością załączenia filtrów wyższych harmonicznych itp.

W razie konieczności moc zadana takiego kompensatora ograniczana jest do wartości dopuszczalnej, a kompensator wykluczany jest z dalszej procedury rozdziału mocy biernej. Po wyłączeniu kompensatora następuje korekta zapotrzebowanej zmiany mocy biernej pozostałych kompensatorów i ponowny rozdział mocy biernej między pozostałe dostępne kompensatory. Procedura powtarzana jest do czasu, aż dla

żadnego z dostępnych kompensatorów nie będzie konieczności ograniczania zadanej mocy biernej lub do chwili stwierdzenia braku dostępnych kompensatorów.

Po wyznaczeniu mocy biernej każdego z kompensatorów następuje przesłanie danych do elementu wykonawczego i ponowna realizacja algorytmu regulacyjnego [3].



Rys. 2. System łączności centralnego układu automatycznej kompensacji mocy biernej [opr. wł.]

3. SYSTEM ŁĄCZNOŚCI

Na rys. 2. przedstawiono system łączności układu automatycznej kompensacji mocy biernej. Sercem systemu jest oprogramowanie sterownika centralnego zaimplementowane w aplikacji serwera współpracującego z bazą danych.

Pełna automatyka pracy układu kompensacji wymaga działania systemu niezależnie od aktualnej konfiguracji sieci wewnątrzzakładowej, umiejscowienia, dostępności i możliwości regulacyjnych poszczególnych elementów wykonawczych. W tym celu konieczne jest zastosowanie systemu łączności pomiędzy wszystkimi elementami wpływającymi na pracę systemu kompensacji. Transmisja danych może

być zrealizowana z wykorzystaniem sieci RS-485, łączności radiowej lub lokalnej sieci Ethernet. Zastosowane rozwiązanie pozwala na praktycznie dowolną konfigurację i rozbudowę systemu.

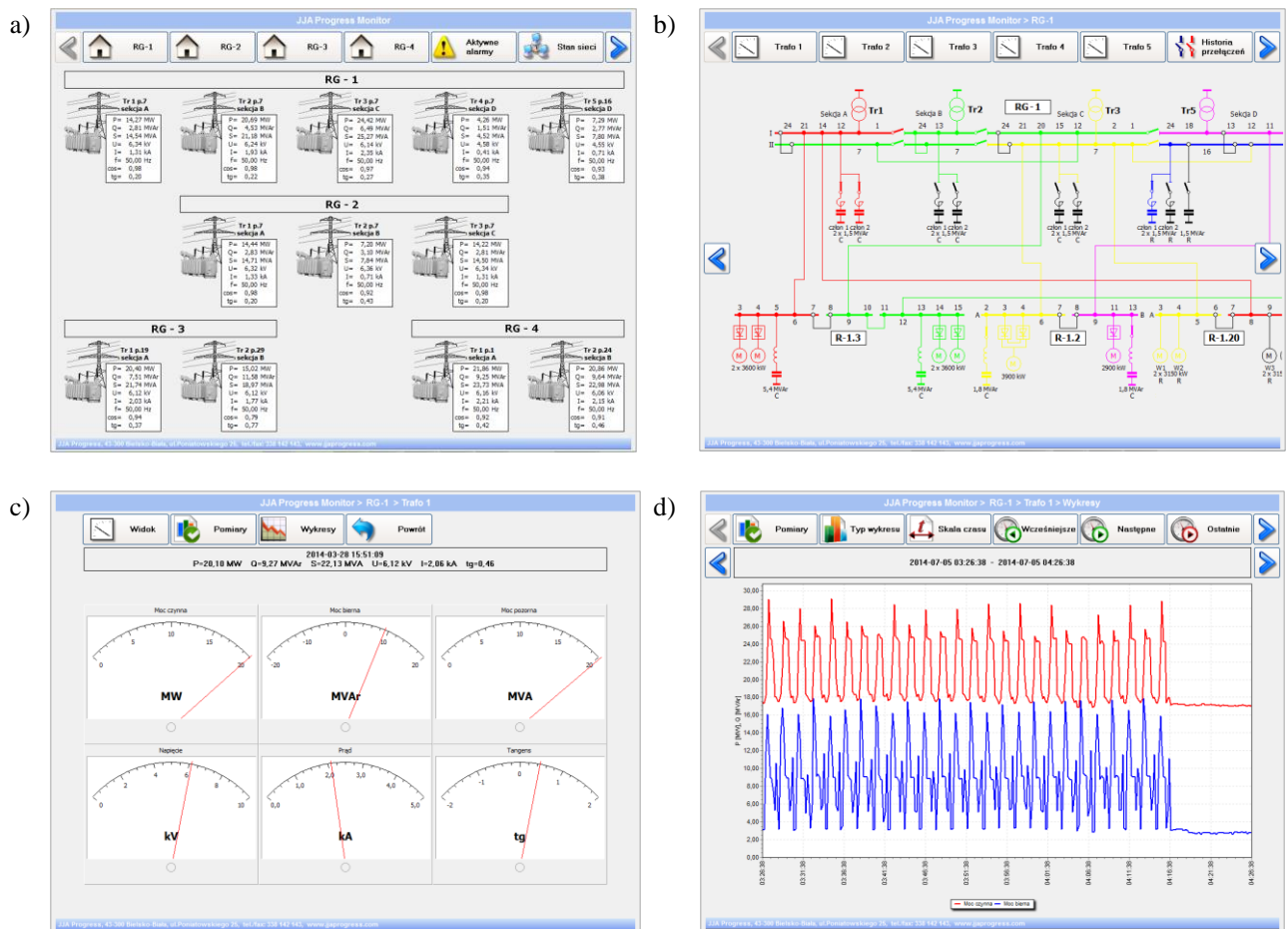
4. MONITOROWANIE SYSTEMU

W celu umożliwienia monitorowania stanu sieci elektroenergetycznej zakładu oraz pracy systemu automatycznej kompensacji mocy biernej opracowano dedykowane oprogramowanie pozwalające na odczyt aktualnych wartości pomiarowych wybranych punktów sieci wewnątrzzakładowej, wizualizację konfiguracji sieci, archiwizację i analizę danych po-

miarowych, zmian konfiguracji sieci i stanu elementów wykonawczych systemu kompensacji oraz konfigurację parametrów systemu kompensacji. Oprogramowanie współpracuje z centralnym serwerem systemu oraz bazą danych.

Oprogramowanie wizualizacyjne może być zainstalowane na dowolnym komputerze PC lub panelu dotykowym wbudowanym np. w szafę sterowniczą z aktywnym połączeniem do serwera.

Na rys. 3. przedstawiono przykładowe informacje dostępne w trybie panelu dotykowego.



Rys. 3. Monitorowanie systemu kompensacji mocy biernej: a) pomiary w punktach zasilania zakładu, b) konfiguracja sieci wewnątrzzakładowej, c) pomiary chwilowe, d) przebiegi czasowe wartości pomiarowych [opr. wł.]

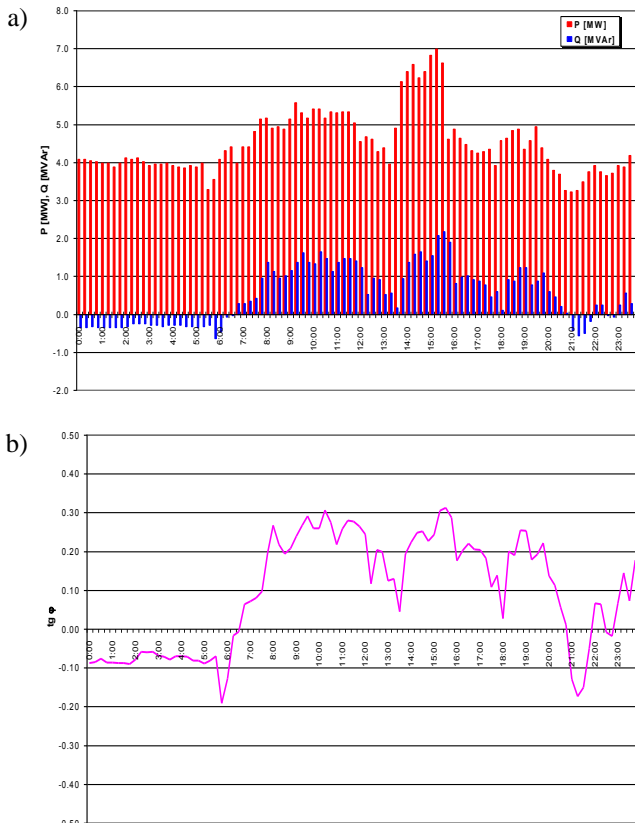
W celu poprawy gospodarki mocą bierną wdrożono system automatycznej kompensacji zgodny z koncepcją przedstawioną na rys. 1. Działanie systemu zweryfikowano, wykonując ponowne pomiary w punktach zasilania zakładu.

Na rys. 6. i 7. przedstawiono wyniki pomiarów po wdrożeniu systemu automatycznej kompensacji. Jako

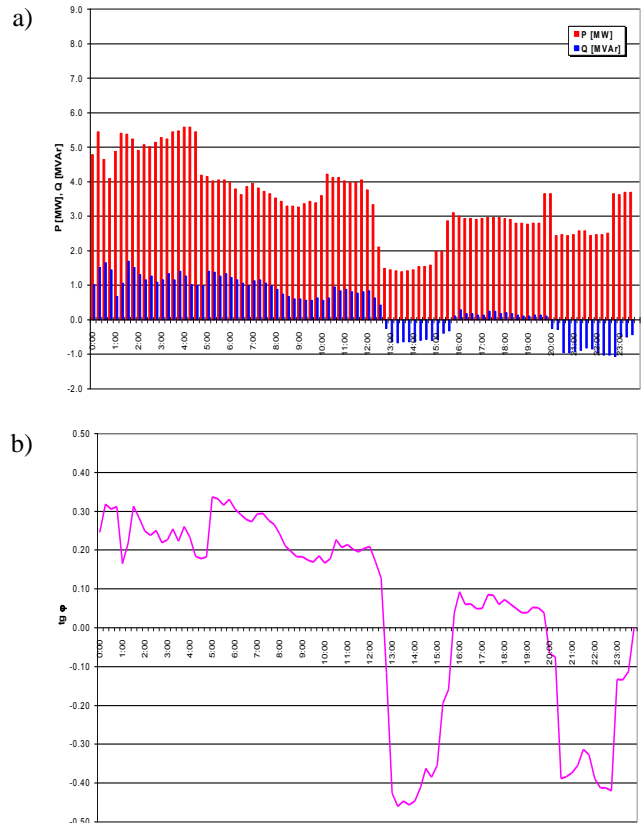
5. EFEKTY DZIAŁANIA

Na rys. 4. i 5. przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych w jednym z punktów zasilania pewnej kopalni węgla kamiennego przed wdrożeniem systemu automatycznej kompensacji mocy biernej w dniu roboczym oraz w dniu wolnym od pracy. Można zauważyć zarówno przekroczenie dopuszczalnego współczynnika mocy $tg\phi$, zgodnie z zawartą z dostawcą energii umową mieszczącego się w przedziale 0,2-0,4, jak i okresy oddawania mocy biernej do sieci. Niedokompensowanie, ale też przekompensowanie systemu wiąże się z koniecznością ponoszenia dodatkowych opłat za moc bierną, egzekwowanych przez zakład energetyczny.

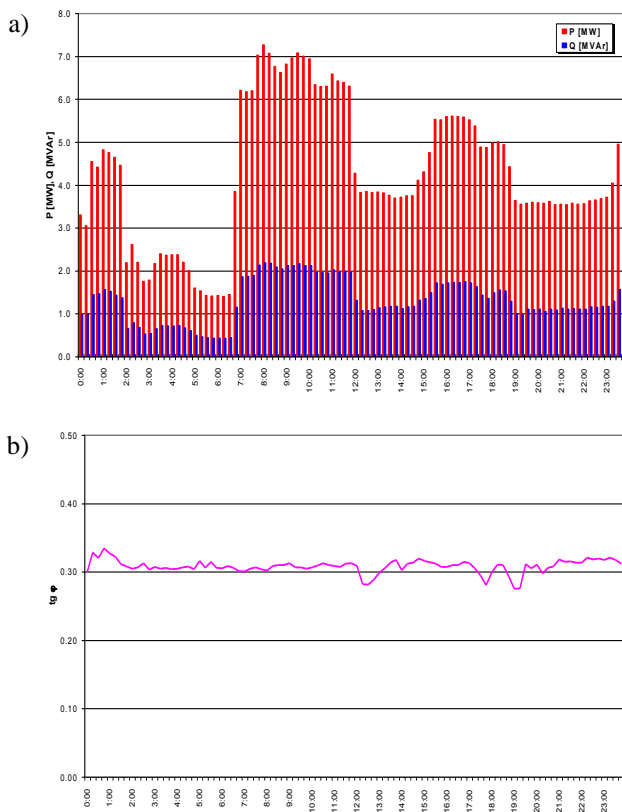
kompensatory wykorzystane zostały silniki synchroniczne napędu wentylatorów przewietrzania dołu kopalni oraz silniki przetwornic Leonarda maszyn wyciągowych wyposażone w lokalne regulatory mocy biernej współpracujące z centralnym sterownikiem systemu.



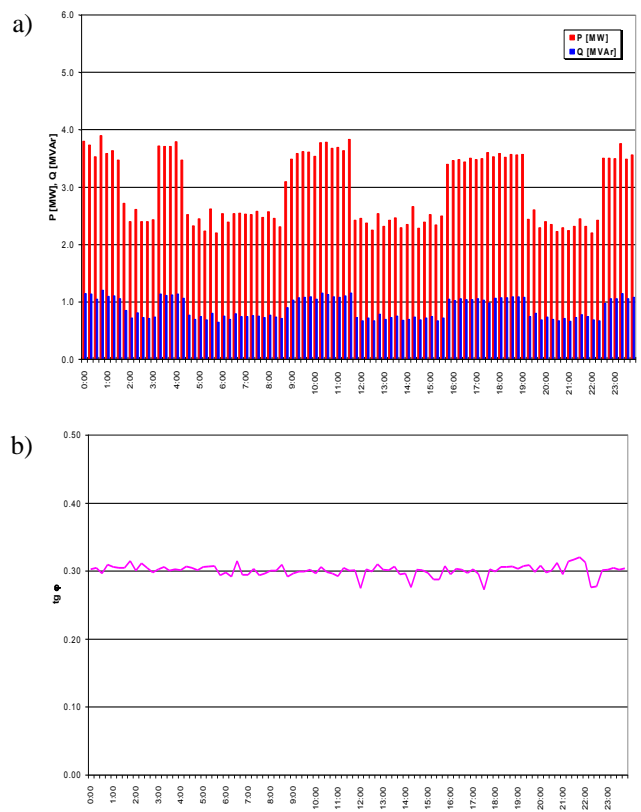
Rys. 4. Średnie 15-minutowe bez układu kompensacji w dniu roboczym: a) moc czynna i bierna, b) współczynnik mocy $\text{tg } \varphi$ [opr. wł.]



Rys. 5. Średnie 15-minutowe bez układu kompensacji w dniu wolnym od pracy: a) moc czynna i bierna, b) współczynnik mocy $\text{tg } \varphi$ [opr. wł.]



Rys. 6. Średnie 15-minutowe z układem automatycznej kompensacji w dniu roboczym: a) moc czynna i bierna, b) współczynnik mocy $\text{tg } \varphi$ [opr. wł.]



Rys. 7. Średnie 15-minutowe z układem automatycznej kompensacji w dniu wolnym od pracy: a) moc czynna i bierna, b) współczynnik mocy $\text{tg } \varphi$ [opr. wł.]

6. PODSUMOWANIE

Specyfiką zakładów górniczych jest praca wielu napędów z silnikami synchronicznymi w sposób ciągły, niezależnie od cyklu produkcyjnego kopalni. Do grupy tej należą przede wszystkim wentylatory przewietrzania dołu kopalni i napędy przetwornic układów Leonarda maszyn wyciągowych generujące znaczne ilości mocy biernej.

Próby kompensacji mocy biernej realizowane przez obsługę urządzeń często są niewystarczające do zapewnienia pożądanego współczynnika mocy w punkcie zasilania zakładu. Rozwiązaniem jest automatyczny układ kompensacji mocy biernej reagujący nadążnie na zmiany obciążenia mocą czynną i bierną przepływającą przez transformatory zasilające 110/6 kV, przełączenia wewnątrz zakładowej sieci elektroenergetycznej oraz na zmiany dostępności i zakresu regulacji urządzeń kompensacyjnych wynikających z cyklu produkcyjnego zakładu.

Opracowany przez firmę JJA Progress z udziałem naukowców Politechniki Śląskiej centralny system automatycznej kompensacji mocy biernej umożliwia pełne wykorzystanie możliwości regulacyjnych urządzeń kompensacyjnych, dzięki czemu możliwe jest wyeliminowanie lub znaczne obniżenie dodatkowych

opłat za ponadnormatywny pobór energii biernej. Kilkanaście wdrożeń w kopalniach węgla kamiennego i rud miedzi pozwala na sformułowanie stwierdzenia o efektywności zaproponowanego rozwiązania i krótkim okresie zwrotu nakładów poniesionych na realizację inwestycji.

Literatura

1. Glinka T.: *Generatory synchroniczne jako kompensatory mocy biernej i filtry wyższych harmonicznych.* „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, 2013, nr 1, BOBRME KOMEL Katowice.
2. Hyla M., Latko A., Gierlotka K., Wolski A.: *Koncepcja układu automatycznej regulacji mocy biernej w dużym zakładzie przemysłowym.* W: Materiały Konferencji „Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE'97”, Łódź 1997.
3. Hyla M.: *Algorytmy regulacji dla sterownika nadrzędnego w wielopoziomowym systemie automatycznej kompensacji mocy biernej.* W: Materiały IV Konferencji „Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE'99”, Łódź 1999.
4. Nowak J., Kosobudzki B.: *Moc obiektów elektroenergetycznych.* „Prace naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej”, 2010, nr 30.
5. Plamitzer A.: *Maszyny elektryczne*, WNT, Warszawa 1986.
6. *Gospodarka mocą bierną w zakładach przemysłowych*, Wrocław-Lubin 1984.
7. Strzelecki R., Supronowicz H.: *Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.