

Marian HYLĄ

## PROCEDURY REGULACYJNE W SYSTEMIE AUTOMATYCZNEJ REGULACJI MOCY BIERNEJ W ZAKŁADZIE PRZEMYSŁOWYM

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę tworzenia algorytmów dla sterownika nadrzędnego w systemie automatycznej regulacji mocy biernej z wykorzystaniem silników. Oprócz podstawowego zadania, tzn. utrzymywania w punkcie zasilania zakładu zadanego współczynnika mocy  $\text{tg}\phi$ , algorytmy powinny optymalizować rozdział mocy zadanych do poszczególnych silników wg dodatkowych kryteriów z uwzględnieniem dodatkowych ograniczeń. Zamieszczono wyniki symulacji układu automatycznej regulacji mocy biernej wykorzystującej przedstawione algorytmy.

## CONTROL PROCEDURES FOR REACTIVE POWER CONTROL SYSTEM IN FACTORY

**Summary.** The paper presents the method of creating control algorithms for the central controller in reactive power automatic compensation system with synchronous motors usage. Despite the main task, which is to keep the power factor on the set level at the factory supplying point, algorithms should optimise the set reactive power distribution to the synchronous machines using extra criteria when taking into account additional limitations. The simulation results of the reactive power control system using the presented algorithms are given as well.

### 1. WPROWADZENIE

Wiele zakładów przemysłowych w Polsce ponosi dodatkowe opłaty za energię elektryczną związane ze zbyt dużym poborem mocy biernej indukcyjnej w dniach roboczych, oraz z oddawaniem mocy biernej indukcyjnej do sieci w dniach wolnych od pracy lub nocą przy małym obciążeniu mocą czynną. Przyczyną takiego stanu jest brak układów automatycznej regulacji wewnątrz zakładowych źródeł mocy biernej, w tym szczególnie pracujących w wielu zakładach w sposób ciągły silników synchronicznych dużej mocy.

Dzięki układowi automatycznej regulacji, wykorzystującemu zainstalowane już w zakładzie silniki synchroniczne i baterie kondensatorów można by niejednokrotnie uniknąć przekraczania dyrektywnego współczynnika mocy oraz oddawania mocy biernej do sieci.

Kryterium ekonomiczne wymusza minimalizację kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych układu kompensacji. W tym celu założono wykorzystanie jako regulowanych źródeł mocy biernej silników synchronicznych już pracujących w zakładzie i spełniających zadania napędowe, bez nakładów inwestycyjnych na nowe urządzenia. Pociąga to jednak za sobą ograniczenia, które muszą zostać uwzględnione w metodzie rozdziału mocy biernej zadanej dla poszczególnych źródeł związane z konfiguracją sieci wewnątrzzakładowej, oraz samych silników synchronicznych.

Koncepcja układu automatycznej regulacji mocy biernej [3] opiera się na centralnym (nadrzędnym) regulatorze mocy biernej podejmującym decyzje co do rozdziału zapotrzebowanej w danym kroku regulacji mocy biernej do poszczególnych lokalnych (podrzędnych) mikroprocesorowych regulatorów wykonawczych na podstawie pomiarów rzeczywistych mocy w punkcie zasilania zakładu. Regulacji podlega wartość średnia 15-minutowa współczynnika mocy  $\text{tg}\varphi$ .

Metoda rozdziału zapotrzebowanej mocy biernej do poszczególnych regulowanych źródeł mocy powinna zapewniać utrzymanie żadanego przez Zakład Energetyczny współczynnika mocy w punkcie zasilania zakładu. Ponadto powinna zapewniać minimalizację kosztów wytworzenia i przesyłu mocy biernej w zakładowej sieci energetycznej oraz pozwalać na wprowadzenie dodatkowych ograniczeń, np. związanych ze zmianami napięcia w kablach zasilających spowodowanych przesyłem mocy biernej.

## 2. ALGORYTM REGULACJI

Problem odpowiedniego rozdziału mocy biernej zadanej do poszczególnych sterowników lokalnych sprowadza się do minimalizacji funkcji

$$F(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \quad (1)$$

w przestrzeni  $n$ - wymiarowej. Dodatkowo przestrzeń ta ograniczona jest zależnością

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = Q, \quad (2)$$

oraz ograniczeniami:

$$\begin{aligned}
 Q_{1\min} &\leq Q_1 \leq Q_{1\max}, \\
 Q_{2\min} &\leq Q_2 \leq Q_{2\max}, \\
 &\vdots \\
 Q_{n\min} &\leq Q_n \leq Q_{n\max},
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

wynikającymi z obciążenia silników mocą czynną przy ustalonych wartościach ograniczeń:

$$\begin{aligned}
 I_{w1\min} &\leq I_{w1} \leq I_{w1\max}, \\
 I_{w2\min} &\leq I_{w2} \leq I_{w2\max}, \\
 &\vdots \\
 I_{wn\min} &\leq I_{wn} \leq I_{wn\max},
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

gdzie:  $Q_z$  – sumaryczna moc bierna zadana,

$Q_i$  – moc bierna  $i$ -tego silnika,

$I_{wi}$  – prąd wzbudzenia  $i$ -tego silnika.

Zmiana obciążenia silnika mocą czynną powoduje zmianę wartości ograniczeń minimalnej i maksymalnej mocy biernej, jaką dany silnik może wypracować. Jednocześnie w związku z nadrzędnością funkcji napędowych oraz możliwością zmian konfiguracji sieci zmienia się ilość silników dostępnych do potrzeb regulacji mocy biernej, a więc wymiar  $n$  przestrzeni, w której minimalizujemy funkcję (1).

Algorytm regulacji powinien pozwalać na proste uwzględnienie innych ograniczeń.

Z założenia algorytm sterowania powinien być prosty, o dużej szybkości obliczeń, aby można go było zastosować w prostych i tanich systemach mikroprocesorowych. Z tego względu standardowe podejście polegające na tworzeniu funkcji celu, wprowadzaniu ograniczeń za pomocą funkcji bariery, a następnie numeryczna optymalizacja względem każdej zmiennej nie spełnia stawianych wymogów.

Zastosowanie jako sterowników lokalnych mikroprocesorowych regulatorów mocy biernej silników synchronicznych typu RMB-01 [2] pozwala na inne podejście do przedstawionego problemu. Silnik synchroniczny z regulatorem RMB-01 pracuje w obszarze ograniczonym znamionowym i minimalnym prądem wzbudzenia, oraz znamionowym prądem stojana. Ograniczenia ustawiane są w taki sposób, aby zapewnić bezpieczną pracę silnika niezależnie od wartości mocy biernej zadanej i aktualnego obciążenia mocą czynną. Moc bierna zadana przesyłana jest ze sterownika centralnego łączem szeregowym. Sygnałem zwrotnym jest informacja o rzeczywistej mocy czynnej i biernej silnika, wejściu w którekolwiek ograniczenie, trybie pracy (dostępności dla potrzeb regulacji mocy biernej).

Przyjęto więc, że optymalizacja funkcji celu odbywać się będzie w przestrzeni bez ograniczeń związanych z wartościami minimalnymi i maksymalnymi mocy biernej każdego z silników. W zależności od znaku błędu regulacji oraz ewentualnej pracy silnika na odpowiednim

ograniczeniu algorytm powinien podjąć decyzję o uwzględnieniu lub nieuwzględnianiu danego silnika w aktualnym kroku regulacji.

Podstawowym algorytmem rozdziału mocy biernej zadanej do poszczególnych sterowników lokalnych jest równomierny podział zgodnie ze wzorem

$$Q_{zi} = \frac{Q_z}{n}. \quad (5)$$

Nie uwzględnia on jednak procedur optymalizacji dodatkowych parametrów.

Stworzono więc kilka algorytmów regulacji dla sterownika nadrzędnego zapewniających m.in.:

- minimalizację prądów stojanów silników i kabli zasilających,
- minimalizację strat mocy czynnej w kablach zasilających spowodowanych przesylem mocy biernej,
- minimalizację strat mocy czynnej w silnikach synchronicznych,
- ograniczanie zmian napięcia w kablach zasilających spowodowanych przesylem mocy biernej,

oraz algorytmy łączące kilka z powyższych [4,5].

Opracowane algorytmy uwzględniają również sterowanie bateriami kondensatorów i filtrów wyższych harmonicznych jako elementów składowych układu automatycznej regulacji mocy biernej.

Wszystkie algorytmy można opisać jedną z trzech poniższych funkcji.

Minimalizację funkcji przeprowadzono poprzez wyznaczenie pochodnych cząstkowych względem każdej zmiennej niezależnej, a po przyrównaniu ich do zera stosujemy metody wyznacznikowe Kramera do rozwiązania powstałego układu równań liniowych. Dla każdej z funkcji istnieje ograniczenie zgodnie z (2):

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = c. \quad (6)$$

Wybrane typy funkcji wraz z rozwiązaniami przedstawiono poniżej.

Funkcja typu 1:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n (a_i x_i^2 + c_i) \quad (7)$$

Rozwiązanie dla  $k$ -tej zmiennej:

$$x_k = c \frac{1}{a_k \sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i}} \quad (8)$$

Funkcja typu 2:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^n \sqrt{c_i^2 + x_i^2} \quad (9)$$

Rozwiązanie dla  $k$ -tej zmiennej:

$$x_k = c \frac{c_k}{\sum_{i=1}^n c_i} \quad (10)$$

Funkcja typu 3:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n (a_i x_i^2 + b_i x_i + c_i) \quad (11)$$

Rozwiązanie dla  $k$ -tej zmiennej:

$$x_k = \frac{c + \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{a_i} - b_k \sum_{i=1}^n \frac{1}{a_i} \right)}{a_k \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{a_i} \right)} \quad (12)$$

Oczywiście, aby w wyznaczonych punktach funkcje posiadały minimum, musi być spełniony warunek co do znaku drugich pochodnych.

Na rys.1. przedstawiono schemat blokowy algorytmu regulacji dla sterownika nadrzędnego z uwzględnieniem dodatkowych ograniczeń.

Poszczególne kroki procedury są następujące:

1. Pomiar mocy czynnej i biernej na wejściu lub wyjściu transformatora 110/6 kV. Obliczenie zapotrzebowanej zmiany mocy biernej wg wzoru:

$$\Delta Q_z = P \operatorname{tg} \varphi_z - Q \quad (13)$$

2. Oznaczenie wszystkich silników jako dostępnych do potrzeb regulacji mocy biernej.
3. Obliczenie sumarycznej mocy zapotrzebowanej, jaką musi wyprodukować  $n$  dostępnych silników wg wzoru:

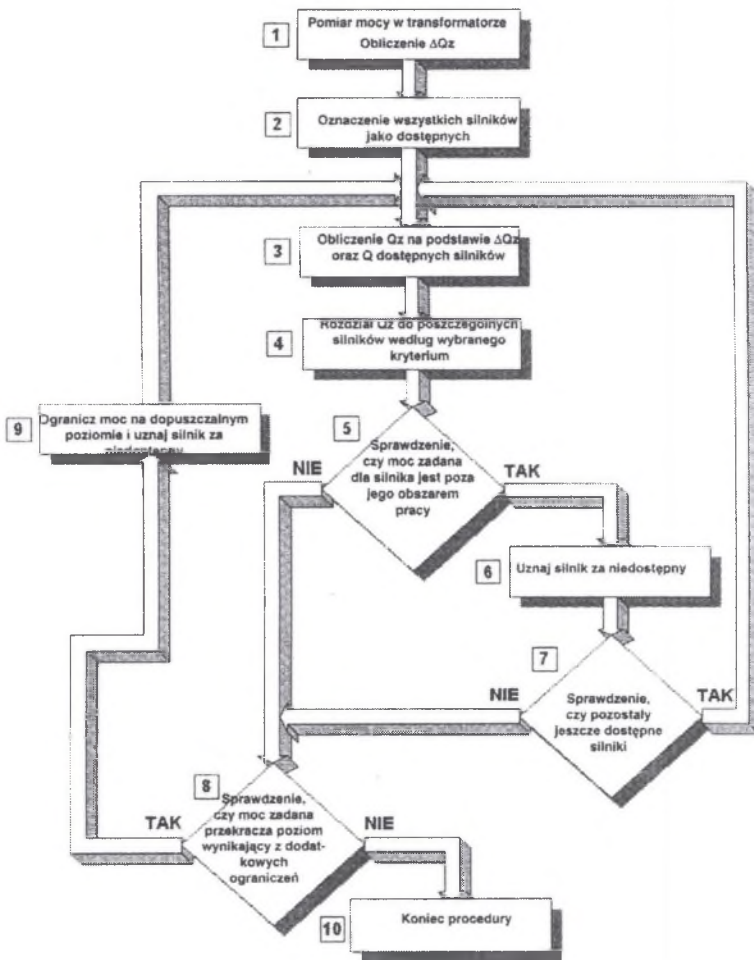
$$Q_z = \Delta Q_z + \sum_{i=1}^n Q_i \quad (14)$$

4. Rozdział zapotrzebowanej mocy biernej do poszczególnych silników wg wybranego kryterium.
5. Sprawdzenie dla każdego z  $n$  dostępnych silników, czy zadana moc nie wykracza poza jego obszar pracy przy aktualnym obciążeniu. Jeżeli dla  $k$ -tego silnika zachodzi:

$$I_{wk} = I_{w\min k} \text{ oraz } Q_{zk} > Q_k, \quad (15)$$

lub

$$I_{wk} = I_{nNk} \text{ oraz } Q_{zk} < Q_k \quad (16)$$



Rys.1. Schemat blokowy algorytmu regulacji sterownika nadrzędnego z uwzględnieniem dodatkowych ograniczeń

Fig.1. Block diagram of control procedure for the central controller with additional restrictions

następuje przejście do punktu 6. Jeżeli dla żadnego z dostępnych silników nie zostały spełnione warunki (15) i (16), następuje przejście do punktu 8.

6. Jeżeli dla  $k$ -tego silnika spełnione są warunki (15) lub (16), zostaje on uznany za niedostępny na potrzeby regulacji mocy biernej.
7. Sprawdzenie, czy pozostały jeszcze dostępne silniki. Jeżeli nie następuje przejście do punktu 8, w przeciwnym wypadku realizowany jest powrót do punktu 3 i ponowne obliczenie oraz rozdział zapotrzebowanej mocy biernej do dostępnych silników.
8. W punkcie 8 realizowane jest uwzględnienie dodatkowych ograniczeń. Zostanie ono omówione na przykładzie ograniczania zmian napięcia w kablach zasilających.

Przyjmując, że zmiana napięcia w  $k$ -tym kablu wynosi

$$\Delta U_{kk} = I_k (R_{kk} \cos \varphi_i + X_{kk} \sin \varphi_i) = \frac{R_{kk} P_k + X_{kk} Q_k}{3U}, \quad (17)$$

oraz zakładając dopuszczalny wzrost  $\Delta U_{\uparrow}$ , oraz spadek  $\Delta U_{\downarrow}$  napięcia można wyznaczyć minimalną i maksymalną wartość mocy biernej, jaką może wyprodukować dany silnik:

$$\frac{3U\Delta U_{\uparrow} + R_{kk} P_k}{X_{kk}} \leq Q_k \leq \frac{3U\Delta U_{\downarrow} - R_{kk} P_k}{X_{kk}}. \quad (18)$$

Po obliczeniu mocy biernych zadanych dla poszczególnych silników następuje sprawdzenie powyższego warunku. Jeżeli zostanie stwierdzone dla któregoś silnika przekroczenie podanych ograniczeń, odbywa się przejście do punktu 9, w przeciwnym wypadku następuje wyjście z procedury.

9. W punkcie 9 moc zadana do silnika, dla którego stwierdzono przekroczenie zależności (18), ograniczana jest do dopuszczalnej wartości, silnik zostaje uznany za niedostępny i realizowany jest powrót do punktu 3.

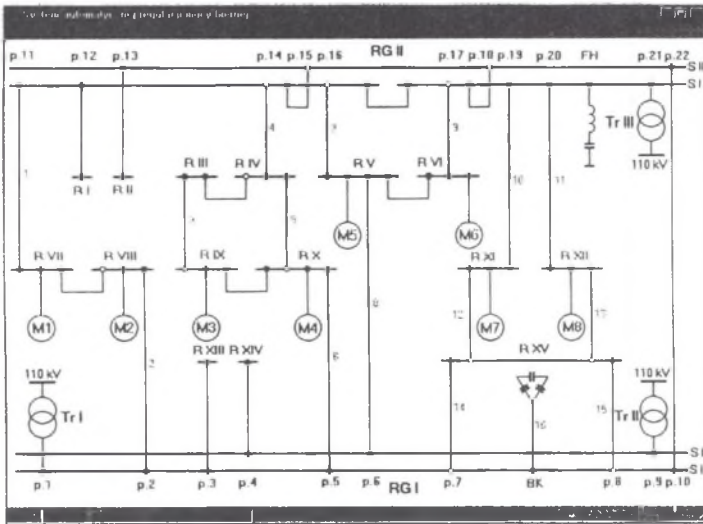
Należy zauważyć, że sterownik centralny nie musi znać aktualnej wartości prądu wzbudzenia ani obciążenia mocą czynną silnika. Wystarczającą informacją jest wartość mocy biernej oraz fakt przebywania na górnym lub dolnym ograniczeniu od prądu wzbudzenia uzyskiwane z regulatora RMB-01. Błąd regulacji, tzn. różnica między wartością mocy biernej zadanej i rzeczywistej, może powstać jedynie w momencie wejścia silnika w którekolwiek ograniczenie. Błąd ten zostanie zlikwidowany w następnym kroku regulacji poprzez inny rozdział mocy zadanej do pozostałych silników.

Dzięki powyższej procedurze unika się czasochłonnego optymalizowania funkcji  $n$ -zmiennych z  $2n$  ograniczeniami.

Przedstawiony algorytm rozdziału zapotrzebowanej mocy biernej do poszczególnych regulatorów lokalnych sprawdzono na drodze symulacji komputerowej.

### 3. WYNIKI SYMULACJI

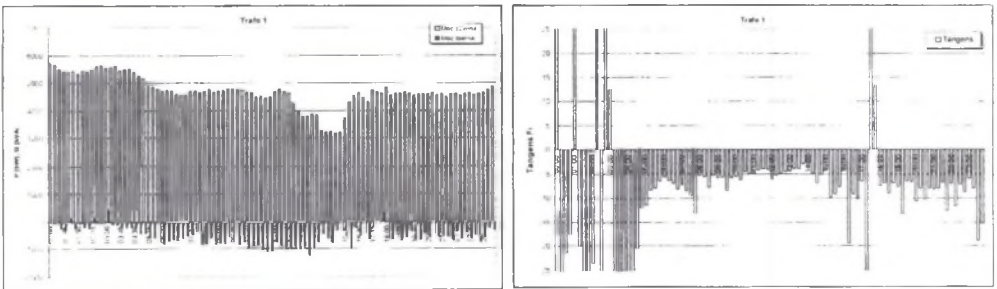
Obiektem symulacji była sieć 6 kV pewnego zakładu przemysłowego. Schemat sieci przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Obiekt symulacji – zakładowa sieć 6 kV

Fig.2. Object of simulation – industry internal 6 kV power network

Na rys.3 przedstawiono wyniki symulacji układu bez wykorzystywania procedur regulacji mocy biernej. Jako dane wejściowe reprezentujące zastępcze obciążenia Rozdzielni Oddziałowych oraz silników synchronicznych wykorzystano wyniki pomiarów przeprowadzone w pewnym zakładzie przemysłowym. Silniki pracują ze stałym prądem wzbudzenia w okolicy 80-90 % wartości znamionowej. Wszystkie sekcje baterii kondensatorów są załączone.



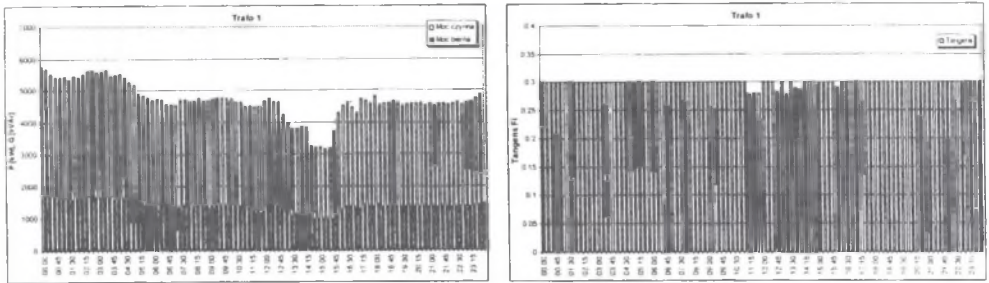
Rys.3. Przebiegi średnich 15-minutowych mocy czynnej i biernej oraz współczynnika mocy  $\text{tg}\phi$  bez procedur regulacji

Fig.3. Transient states of the power averaging in 15 minutes intervals and power factor without reactive power control procedures

Na rys.4. przedstawiono odpowiednie przebiegi z wykorzystaniem algorytmu kompensacji mocy biernej z minimalizacją strat mocy w kablach zasilających silniki oraz baterię kon -



densatorów dla zadanego  $tg\varphi=0,3$  oraz dopuszczalnych zmian napięcia  $\Delta U_{\%} = \pm 5\%$ . Wykorzystano 4 silniki synchroniczne oraz baterię kondensatorów zasilanych z transformatora Tr I.



Rys.4. Przebiegi średnich 15-minutowych mocy czynnej i biernej oraz współczynnika mocy  $tg\varphi$  z wykorzystaniem procedur regulacji

Fig.4. Transient states of the power averaging in 15 minutes intervals and power factor with reactive power control procedures

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawione podejście do problemu kompensacji mocy biernej wykorzystujące pracujące silniki synchroniczne o zmiennym obciążeniu z uwzględnieniem optymalizacji wg różnych kryteriów z dodatkowymi ograniczeniami pozwala na zaadoptowanie opracowanych algorytmów dla sterownika nadrzędnego w systemie automatycznej regulacji mocy biernej. Duża szybkość obliczeń oraz proste działania algebraiczne umożliwiają zastosowanie ich w prostych i tanich systemach mikroprocesorowych.

Układy automatycznej regulacji mocy biernej bazujące na przedstawionej koncepcji i algorytmach regulacji wdrożono w 2 zakładach przemysłowych.

#### LITERATURA

1. Praca zbiorowa: „Gospodarka mocą bierną w zakładach przemysłowych”. Zbiór referatów, Wrocław-Lubin 1984.
2. Orzechowski T.: Wielopoziomowy system sterowania silnikami synchronicznymi. Mat. II Konferencji Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE'95, Łódź 1995, ss. 465-470.
3. Hyla M., Latko A., Gierlotka K., Wolski A.: Koncepcja układu automatycznej regulacji mocy biernej w dużym zakładzie przemysłowym. Mat. III Konferencji Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE'97, Łódź 1997, ss. 229-234.

4. Hyla M.: Mikroprocesorowy regulator mocy biernej silników synchronicznych RMB-01. Mat. IX Symposium Podstawowe Problemy Energoelektroniki i Elektromechaniki PPEE'99, Wisła 1999, ss. 429-435.
5. Hyla M.: Algorytmy regulacji dla sterownika nadrzędnego w wielopoziomowym systemie automatycznej kompensacji mocy biernej, Mat. IV Konferencji Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE'99, Łódź 1999, ss. 255-260.
6. Hyla M.: Wielokryterialne sterowanie układem kompensacji mocy biernej w zakładzie przemysłowym, grant KBN nr 8 T10A 069 15, Gliwice 1999.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Piróg

Wpłynęło do Redakcji dnia 4 kwietnia 2000 r.

### Abstract

The paper presents the reactive power flow control system in large industrial plants in which periods of big reactive power consumption or large reactive power production appear at different time of a day or on different week - days.

The reactive power flow control system is based on the central superordinated reactive power controller, which co-operates with local specialised synchronous motors controllers. The central controller takes measurements of the real power values at the industry supplying points and makes decision how to distribute the required reactive power properly among local controllers.

The way of creating controlling algorithms for the central superordinated controller is described. Such algorithms ensure not only the main function of keeping the industry supplying points power factor on the set level but also minimisation of reactive power production and distribution in the internal 6 kV power network.

The algorithms allow easily imposing additional restrictions to control procedures. The general block diagram of the control procedure is shown in Fig.1.

Fig.2. Presents a simulation object which is the internal 6 kV industry power network. The paper is illustrated with exemplary simulation waveforms without control procedures (Fig.3.) and with use of the considered procedure (Fig.4.).

Reactive power flow control systems based on the described idea and algorithms of control were successfully applied to two big industrial plants.