

ANTONI BOGUCKI, EDWARD LAWERA
Katedra Sieci i Układów
Elektroenergetycznych

STABILNOŚĆ PRACY ODBIORÓW PRZEMYSŁOWYCH ZASILANYCH
Z SIECI SZTYWNEJ PRZY ZASTOSOWANIU BATERII KONDESATORÓW
DO KOMPENSACJI RÓWNOLEGŁEJ MOCY BIERNEJ

Streszczenie. W artykule przeprowadzono analizę wpływu kompensacji równoległej mocy biernej, prowadzonej przy pomocy baterii kondensatorów, na stabilność pracy odbiorów przemysłowych zasilanych z sieci sztywnej. Analizę przeprowadzono dla różnych stopni kompensacji, z uwzględnieniem wpływu wielkości impedancji sieci zasilającej. W oparciu o naturalne charakterystyki napięciowe mocy biernej wyznaczone dla systemu krajowego, określono wartości względnych wypadkowych efektów regulacyjnych i napięć krytycznych.

W s t ę p

Zapewnienie wysokiego współczynnika mocy pobieranej przez odbiorców energii elektrycznej jest ściśle związane ze stosowaniem kompensacji równoległej mocy biernej w węzłach odbiorczych systemu elektroenergetycznego, bądź bezpośrednio u odbiorców energii elektrycznej. Dążenie do utrzymania jak najwyższego współczynnika mocy odbieranej podyktowane jest idącym za tym ograniczeniem mocy biernej indukcyjnej wytwarzanej w elektrowniach, i przesyłanej w systemie elektroenergetycznym.

Ograniczenie mocy biernej indukcyjnej produkowanej przez generatory i przesyłanej w systemie jest korzystne zarówno ze względów technicznych jak i ekonomicznych pozwala bowiem:

- 1) zmniejszyć gabaryty produkowanych generatorów w miarę wzrostu ich znamionowych współczynników mocy,
- 2) zmniejszyć spadki napięcia i straty mocy powstające w urządzeniach, przez które następuje przesył energii elektrycznej bez potrzeby zmiany ich parametrów,
- 3) zwiększyć przesyłaną moc czynną w systemie przy zachowaniu dopuszczalnych spadków napięcia.

Znaczenie powyższych względów wzrasta w związku z postępującym dynamicznie rozwojem systemu energetycznego, charakteryzującym się powstawaniem, na drodze łączenia, wielkich systemów, wzrostem mocy produkowanej przez jednostki wytwórcze i jej koncentracją oraz zwiększaniem drogi przesyłu energii elektrycznej.

Urządzeniami najpowszechniej stosowanymi do kompensacji równoległej mocy biernej w węzłach odbiorczych systemu energetycznego lub bezpośrednio u odbiorców są baterie kondensatorów. Stosowanie kompensacji mocy biernej indukcyjnej w węzłach odbiorczych posiada istotny wpływ na stabilność pracy odbiorców energetycznych. Istnienie tego wpływu zostało potwierdzone przez praktykę eksploatacyjną w ciągu ostatnich lat. Okazało się, że stosowanie baterii kondensatorów statycznych do kompensacji równoległej mocy biernej wpływa niekorzystnie na stabilność pracy odbiorów przemysłowych.

W artykule podjęto próbę przeprowadzenia teoretycznej analizy zagadnienia oraz podano charakteryzujące je dane ilościowe uzyskane z przeprowadzonej analizy. Analizę stabilności pracy odbiorów przemysłowych zasilanych z sieci sztywnej z punktu widzenia wpływu na nią kompensacji równoległej mocy biernej realizowanej przy pomocy baterii kondensatorów, przeprowadzono w oparciu o kryterium $\frac{dQ}{dU} < 0$. Warunek ten jak wykazano w artykule stanowi najbardziej ostre kryterium stabilności pracy odbiorów przemysłowych. Analizę przeprowadzono przy założeniu stałej częstotliwości w systemie i stałej mocy czynnej pobieranej przez rozpatrywany odbiór. Należy zaznaczyć, że otrzymane wyniki analizy teoretycznej w znacznej mierze pokrywają się z obserwacjami praktycznymi i wynikami prób pomiarowych.

Wpływ kompensacji równoległej mocy biernej na stabilność pracy przemysłowych odbiorców energii elektrycznej wynika z faktu zmiany napięciowej charakterystyki statycznej mocy biernej odbieranej $Q_0 = Q_0(U)$, wywoływanej przez urządzenia stosowane do kompensacji. Ogólnie rzecz biorąc wpływ ten będzie zależny zarówno od stopnia kompensacji, czyli różnicy między naturalnym współczynnikiem mocy a współczynnikiem mocy po kom-

pensacji, jak i od rodzaju stosowanych urządzeń kompensacyjnych. W przeprowadzonej analizie wykorzystano napięciowe charakterystyki statyczne mocy biernej wyznaczone dla odbiorów przemysłowych w krajowym systemie elektroenergetycznym [1, 2, 4] co podnosi jej praktyczne znaczenie.

1. Stabilność odbioru energii elektrycznej przez odbiory przemysłowe

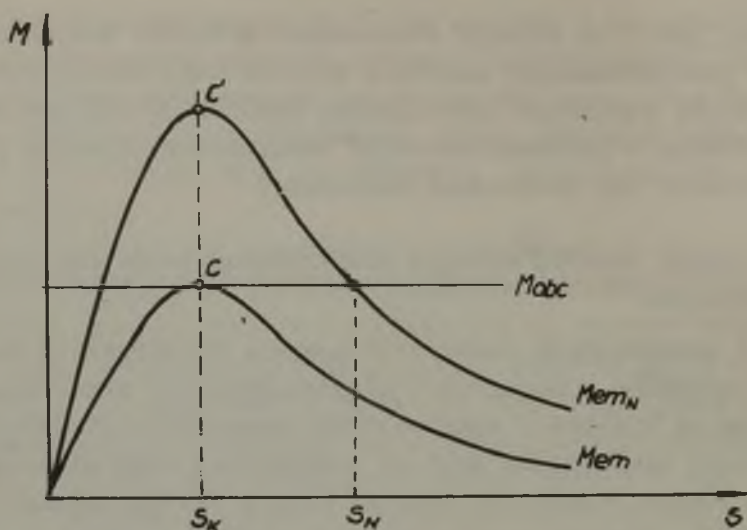
Wartości podstawowych parametrów energii elektrycznej dostarczonej odbiorcom - napięcia i częstotliwości - mogą ulegać odchyleniom od wielkości znamionowych. Zachowanie stałości częstotliwości uzależnione jest od sumarycznej mocy zainstalowanej w systemie, wielkości rezerwy mocy i układu regulacji częstotliwości. Dlatego wraz z rozwojem systemu następuje zmniejszenie wahań częstotliwości. Wahania napięcia u odbiorcy zależne są od oporności elementów układu przemysłowego, fluktuacji mocy własnej oraz mocy pobieranej przez sąsiednich odbiorców i dlatego ich eliminacja w normalnych warunkach eksploatacyjnych jest dużo trudniejsza.

W związku z powyższym należy jako czynnik decydujący o stabilności pracy odbiorców energii elektrycznej rozważyć przede wszystkim odchylenia napięcia. Odbiory przemysłowe w przeważającej części składają się z odbiorników silnikowych, wśród których największy procent stanowią silniki asynchroniczne. W konsekwencji one też decydują o przebiegu charakterystyk odbiorów przemysłowych i właściwości ich pracy przy zmianach napięcia są dla nas szczególnie interesujące.

1.1. Stabilność pracy silników asynchronicznych

Znanym kryterium równowagi pracy silnika asynchronicznego jest warunek $\frac{dM}{ds} > 0$, gdzie M oznacza różnicę między momentem elektromagnetycznym silnika, a momentem obciążenia.

W przypadku stałego momentu obciążenia graniczny punkt stabilności pracy silnika odpowiada punktowi "C" na charakterystyce momentu elektromagnetycznego silnika (rys. 1), którego współrzędne stanowią poślizg krytyczny i maksymalny moment.



Rys. 1. Charakterystyki momentów oraz punkty pracy silnika asynchronicznego przy zmianie napięcia zasilającego

Dla praktycznie występujących momentów obciążenia o współczynniku k z relacji 7 zawartym w przedziale od 0 do 2 przesunięcie granicznego punktu stabilności pracy silnika, badanej wg kryterium $\frac{dM}{ds} > 0$, względem punktu "C" jest nieznaozne [5].

Punkt "C" możemy więc przyjąć za punkt graniczny stabilności nie popełniając większego błędu. Graniczny punkt stabilności pracy może zostać osiągnięty bądź przez wzrost momentu obciążenia, bądź też przez zmniejszenie momentu elektromagnetycznego silnika. Zmniejszenie momentu elektromagnetycznego jest najczęściej spowodowane obniżeniem napięcia zasilającego silnik. Ten właśnie przypadek jest dla nas od strony eksploatacyjnej najbardziej interesujący. Kryterium $\frac{dM}{ds} > 0$ może być co prawda zastosowane przy badaniu wpływu kompensacji mocy biernej na stabilność pracy odbiorów przemysłowych ale jest ono bardzo niewygodne i małooperatywne.

Znacznie wygodniejszym kryterium badania stabilności jest warunek $\frac{dQ}{dU} < 0$. W kryterium tym Q - oznacza różnicę moocy biernej produkowanej i pobieranej w węźle odbiorczym. Przed wyjaśnieniem istoty tego kryterium, w zastosowaniu do badania stabilności pracy silników asynchronicznych należy przeanaliz-

zować zależność mocy biernej Q_B pobieranej przez silnik asynchroniczny, od napięcia. Moc bierna pobierana przez silnik asynchroniczny składa się z mocy biernej magnesowania - Q_μ oraz mocy biernej rozproszenia - Q_R :

$$Q_B = Q_\mu + Q_R \quad (1)$$

Moc bierną magnesowania określa relacja:

$$Q_\mu = \frac{3U_f^2}{X_\mu} \quad (2)$$

gdzie:

U_f - napięcie fazowe zasilające silnik,

X_μ - reaktancja magnesowania.

Jeżeli moc tę odniesiemy do mocy biernej magnesowania pobieranej przez silnik przy napięciu znamionowym, odnosząc jednocześnie napięcie do napięcia znamionowego otrzymamy:

$$q = u^2 \quad (3)$$

Przy uwzględnieniu nasycenia, moc bierna magnesowania będzie silnie zależna od napięcia niż to wynika z relacji 3.

Moc bierną rozproszenia silnika asynchronicznego można wyznaczyć z relacji

$$Q_R = \frac{3 \cdot U_f^2}{X_Z \left[\left(\frac{s_k}{s} \right)^2 + 1 \right]} \quad (4)$$

gdzie:

X_Z - reaktancja zastępcza silnika,

s - poślizg,

s_k - poślizg krytyczny.

Jak wynika z wyrażenia 4 moc rozproszenia dla danego silnika zależy od wielkości napięcia zasilającego i poślizgu. Reżim

pracy silnika tworzą: wielkość napięcia zasilającego oraz wielkość i charakter momentu obciążenia.

Elektromagnetyczny moment obrotowy rozwijany przez silnik przy stałym napięciu można wyrazić przy pomocy relacji:

$$M_{em} = M_{max} \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (5)$$

gdzie:

M_{max} - moment maksymalny rozwijany przy danej wartości napięcia.

Uwzględniając natomiast zmianę napięcia:

$$M_{em} = M_{maxN} \left(\frac{U}{U_N}\right)^2 \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (6)$$

gdzie:

M_{maxN} - moment maksymalny rozwijany przez silnik przy napięciu znamionowym,

U - napięcie zasilające silnik,

U_N - napięcie znamionowe silnika.

Przy określonej wartości napięcia zasilającego punkt przecięcia charakterystyk momentu elektromagnetycznego i momentu obciążenia wyznacza wartość poślizgu z jakim silnik pracuje.

Ogólne równanie momentu obciążenia w funkcji obrotów podaje relacja 7:

$$M_{obc} = M_{obcp} + (M_{obcN} - M_{obcp}) \left(\frac{n}{n_1}\right)^k \quad (7)$$

W relacji tej:

M_{obcp} - początkowa wartość momentu obciążenia przy obrotach $n = 0$,

M_{obcN} - znamionowa wartość momentu obciążenia,

n - obroty silnika,

n_1 - wartość synchroniczna obrotów.

Wyrażając moment obciążenia w funkcji poślizgu przez przekształcenie relacji 7 otrzymamy:

$$M_{obc} = M_{obcp} + (M_{obcN} - M_{obcp}) (1-s)^k \quad (8)$$

W przypadku kiedy $k = 0$ mamy do czynienia ze stałym momentem obciążenia - $M = \text{const}$. Rozwiązując zagadnienie dla tego przypadku otrzymamy:

$$\frac{s_k}{s} = \frac{M_{\max N}}{M} \left(\frac{U}{U_N}\right)^2 \pm \sqrt{\left(\frac{M_{\max N}}{M}\right)^2 \left(\frac{U}{U_N}\right)^4 - 1} \quad (9)$$

Znak (+) przed pierwiastkiem odnosi się do niestabilnej części charakterystyki. Wstawiając wyrażenie 9 do relacji 4 po przekształceniach otrzymamy wyrażenie na moc bierną rozproszenia pobieraną przez silnik asynchroniczny obciążony momentem stałym.

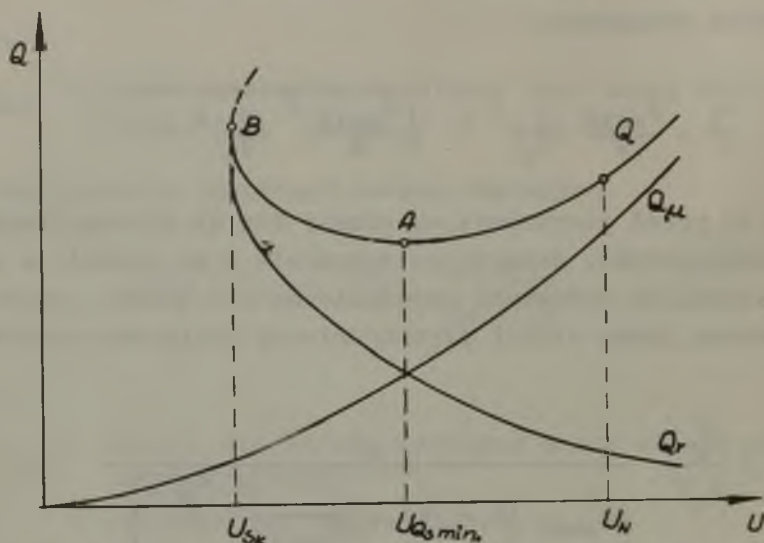
$$q_r = \frac{U_N^4}{X_Z U^2} \frac{M^2}{2M_{\max N}^2 \left[1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{M}{M_{\max N}}\right)^2 \left(\frac{U}{U_N}\right)^4} \right]} \quad (10)$$

Moc bierną rozproszenia odniesioną do mocy rozproszenia pobieranej przy napięciu znamionowym można wyznaczyć z relacji 11, w której wartość napięcia została odniesiona do napięcia znamionowego.

$$q_r = \frac{1}{u^2} \frac{1 + \sqrt{\left(\frac{M}{M_{\max N}}\right)^2}}{1 \pm \sqrt{\left(\frac{M}{M_{\max N}}\right)^2} \frac{1}{u^4}} \quad (11)$$

W sposób analogiczny można określić moc bierną rozproszenia dla silnika obciążonego momentem o charakterystyce zależnej od poślizgu.

Z relacji 3 i 11 wynika, że zależności mocy magnesowanie i rozproszenia pobieranych przez silnik asynchroniczny, od napięcia mają przeciwny charakter. Przebieg obydwu mocy składowych i mocy biernej sumarycznej pobieranej przez silnik asynchroniczny podano na rysunku 2.



Rys. 2. Zależność mocy biernej pobieranej przez silnik asynchroniczny od napięcia zasilającego

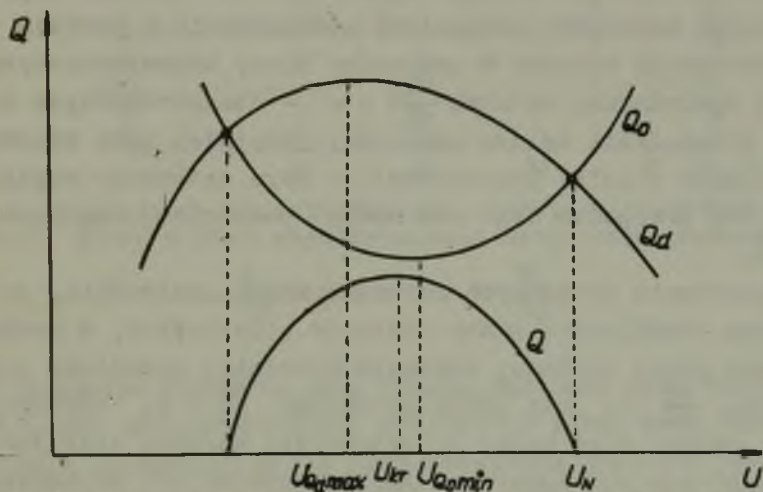
Jak już wspomniano graniczne warunki pracy silnika z uwagi na kryterium $\frac{dM}{ds} > 0$ odpowiadają punktowi C na charakterystyce momentu silnika, wykreślonej dla takiej wartości napięcia, dla której moment obciążenia jest równy maksymalnej wartości momentu elektroenergetycznego silnika - rys. 1.

Z analizy charakterystyk podanych na rysunkach 4 i 3 wynika, że określony wyżej punkt C na charakterystyce momentu dla którego $\frac{dM}{ds} = 0$ odpowiada punktowi B na charakterystyce pobieranej mocy biernej przez silnik; dla punktu tego $\frac{dQ_s}{dU} = \infty$.

Widzimy, że silnik zanim znajdzie się w punkcie pracy B, dla którego $\frac{dQ_s}{dU} = \infty$ (czyli $\frac{dM}{ds} = 0$) musi przejść przez punkt A charakterystyki $Q_s = Q_s(U)$, w którym $dQ_s/dU = 0$. Jeżeli

przy danej wartości napięcia zasilającego silnik asynchroniczny obciążony momentem o stałej wartości znajdzie się w stanie pracy odpowiadającym punktowi A na jego charakterystyce $Q_s = Q_s(U)$, to dalsze obniżenie napięcia prowadzi do wzrostu poboru mocy biernej przez silnik. Wzrost pobieranej mocy biernej zwiększa spadek napięcia w sieci zasilającej silnik, a tym samym przyczynia się do dalszego obniżenia napięcia na jego zaciskach.

Współzależność mocy biernej i napięcia w węzle odbiorczym określa charakterystyka zapasu mocy biernej, powstająca przez odjęcie charakterystyki mocy biernej pobieranej w węzle (np. przez silnik asynchroniczny) od charakterystyki mocy biernej dosyłanej (p. pkt. 1.2). Poglądowy przebieg powyższych charakterystyk podano na rysunku 3. Z analizy charakterystyk podanych na rysunku 3 wynika, że maksimum charakterystyki $Q = Q(U)$



Rys. 3. Poglądowy przebieg charakterystyk $Q_0 = Q_0(U)$; $Q_d = Q_d(U)$; $Q = Q(U)$

musi między maksimum charakterystyki $Q_d = Q_d(U)$ a minimum charakterystyki $Q_s = Q_s(U)$, czyli w zależności od przebiegu charakterystyk musi być spełniony jeden z warunków:

$$U_{\max} < U_{kr} < U_{\min} \quad (12)$$

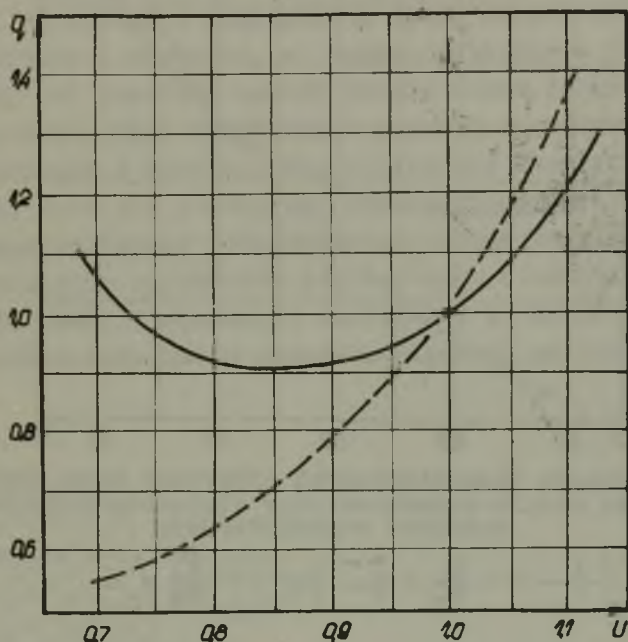
$$U_{\max} \geq U_{kr} \geq U_{\min} \quad (13)$$

Przy obniżaniu napięcia, zasilającego odbiór silnikowy, za początek utraty stabilności pracy tego odbioru, należy uznać wartość napięcia po przekroczeniu, której dalszemu obniżeniu napięcia towarzyszy pogłębienie się deficytu mocy biernej w węzle. Tą wartością napięcia jest U_{kr} , przy którym $\frac{dQ}{dU} = 0$. Zgodnie z relacjami 12 i 13 wartość napięcia krytycznego zostanie zawsze osiągnięta wcześniej niż punkt B na charakterystyce $Q_s = Q_s(U)$ (por. rys. 2) i odpowiadający mu punkt C na charakterystyce momentu silnika (por. rys. 1). Wartość napięcia krytycznego zostałaby osiągnięta jednocześnie z punktem C na charakterystyce momentu w przypadku kiedy charakterystyka $Q_d = Q_d(U)$ spełniałaby warunek $\frac{dQ_d}{dU} = \infty$ - charakterystyka byłaby prostą prostopadłą do osi napięcia. Przypadek taki odpowiadałby zasilaniu silnika bezpośrednio z szyn sztywnego napięcia, jednak dla przypadku tego nie można posługiwać się kryterium $\frac{dQ}{dU} < 0$.

Na podstawie powyższych rozważań można stwierdzić, że punkt graniczny stabilności pracy odbiorów silnikowych, w realnych warunkach pracy systemu, zostanie wcześniej ujawniony przez kryterium $\frac{dQ}{dU} < 0$ niż przez kryterium $\frac{dM}{dS} > 0$. Kryterium $\frac{dQ}{dU} < 0$ należy więc uznać za ostrzejszy warunek stabilności pracy odbiorów silnikowych asynchronicznych niż kryterium $\frac{dM}{dS} > 0$.

Na rysunkach 4 i 5 podano napięciowe charakterystyki statyczne pobieranej mocy biernej przez silniki asynchroniczne obciążone momentem o wartości stałej oraz momentem typu wentylatorowego otrzymane na drodze pomiarowej. Charakterystyki otrzymane na drodze pomiarowej potwierdzają słuszność przeprowadzonych rozważań teoretycznych. Z porównania charakterystyk

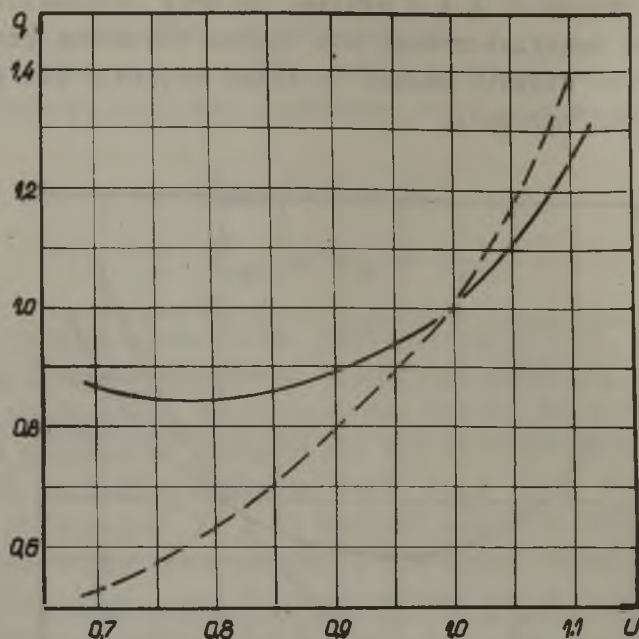
podanych na rysunkach 4 i 5 wynika, że przy obciążeniu silnika momentem typu wentylatorowego moc bierna pobierana przez silnik w mniejszym stopniu zależy od zmian napięcia niż przy momencie o stałej wartości.



Rys. 4. Napięciowe charakterystyki statyczne mocy biernej pobieranej przez silnik asynchroniczny obciążony momentem stałym

$$- - - - - \frac{M}{M_N} = \frac{1}{2} \quad \text{—————} \frac{M}{M_N} = 1$$

W przypadku kiedy tą samą siecią zasilana jest większa liczba silników asynchronicznych zwiększony pobór mocy biernej i utknięcie jednych silników przy obniżeniu napięcia, może w konsekwencji spowodować, poprzez dalsze obniżenie napięcia, utknięcie następnych silników. Proces zachwiania stabilności pracy silników asynchronicznych może wówczas przybrać charakter lawinowy.



Rys. 5. Napięciowe charakterystyki statyczne mocy biernej pobieranej przez silnik asynchroniczny obciążony momentem o charakterze wentylatorowym

$$\text{---} \quad \frac{M}{M_N} = \frac{1}{2}, \quad \text{—} \quad \frac{M}{M_N} = 1$$

1.2. Napięciowe charakterystyki statyczne mocy biernej dosyłanej do węzła odbiorczego systemu

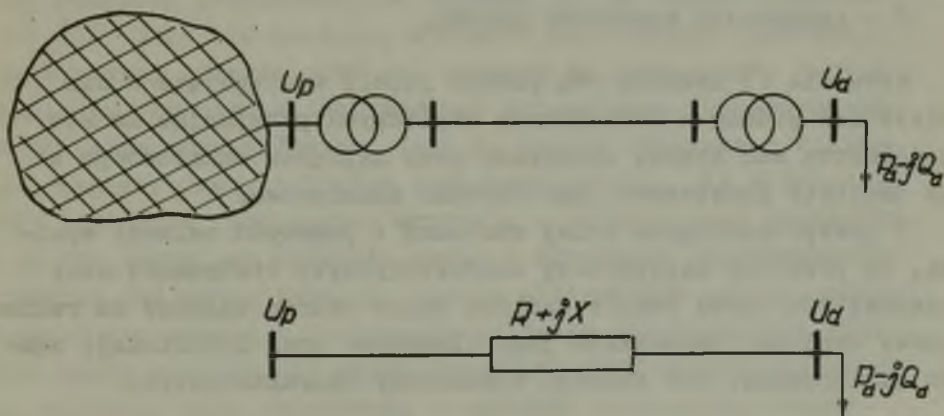
Moc bierna dostarczona do danego węzła systemu zmienia się zgodnie z napięciową charakterystyką statyczną mocy biernej dosyłanej obowiązującą dla tego węzła, której poglądowy przebieg podano na rys. 3. Napięciową charakterystykę statyczną mocy biernej dosyłanej dla danego węzła odbiorczego $Q_d = Q_d(U)$ – wyznaczamy przy założeniu stałej częstotliwości w systemie i stałej mocy czynnej dostarczonej do węzła.

Układ między szynami sieci sztywnej a rozpatrywanym węzłem odbiorczym możemy drogą przekształceń sieciowych doprowadzić do układu promieniowego. Jako szyny sieci sztywnej możemy bardzo często przyjmować węzły sieci systemowej, z których za po-

mocą sieci rozdzielczej zasilane są odbiory o mocy małej w stosunku do sumarycznej mocy węzła. W przypadku tym zmiany obciążenia mocą bierną węzłów odbiorczych nie mają praktycznie wpływu na poziom napięcia w węźle sieci systemowej.

Wyznaczanie charakterystyki $Q_d = Q_d(U)$ na drodze analitycznej jest korzystne w przypadkach kiedy sieć między punktem stałego napięcia w systemie, a węzłem odbiorczym jest siecią promieniową, lub jeżeli w sposób prosty można ją do takiej sieci przekształcić. Przy wyznaczaniu podanej charakterystyki dla węzłów układów o bardziej skomplikowanej konfiguracji najkorzystniej jest się posługiwać analizatorami prądu zmiennego.

Schemat zastępczy promieniowego układu przesyłowego można, przy pominięciu parametrów poprzecznych elementów układu, sprowadzić do jednej impedancji zastępczej Z . Rozpatrzmy dla przykładu promieniowy układ przesyłowy podany na rysunku 6.



Rys. 6. Rozpatrywany układ przesyłowy i jego schemat zastępczy

Dla podanego układu wychodząc z równania określającego napięcie na jego początku:

$$U_p^2 = \left(U_d + \frac{P_d R + Q_d X}{U_d} \right)^2 + \left(\frac{P_d X - Q_d R}{U_d} \right)^2 \quad (14)$$

można po przekształceniach otrzymać relację opisującą charakterystykę $Q_d = Q_d(U)$.

$$Q_d = -AU_d^2 + \sqrt{-BU_d^4 + CU_d^2 - D} \quad (15)$$

W relacji tej:

$$A = \frac{X}{Z^2}$$

$$B = \frac{R^2}{Z}$$

$$C = \frac{U_p^2 - 2P_d R}{Z^2}$$

$$D = P_d^2$$

gdzie:

R - rezystancja wypadkowa układu przesyłowego,

X - rezystancja wypadkowa układu przesyłowego,

Z - impedancja wypadkowa układu.

Równanie 15 zachowa swą postać jeżeli występujące w nim wielkości podamy w jednostkach względnych przyjmując za moc podstawową moc bierną odbieraną przy napięciu znamionowym a za napięcie podstawowe jego wartość znamionową.

Z przeprowadzonych wyżej rozważań i podanych relacji wynika, że przebieg napięciowej charakterystyki statycznej mocy biernej dosyłanej będzie ogólnie rzecz biorąc zależny od reżimu pracy systemu, parametrów jego elementów oraz lokalizacji węzła odbiorczego, dla którego wyznaczamy charakterystykę.

1.3. Napięciowe charakterystyki statyczne mocy biernej pobieranej przez zakłady przemysłowe

Napięciowa charakterystyka mocy biernej odbieranej - $Q_o = Q_o(U)$ - podaje zależność mocy biernej pobieranej przez dany odbiór od napięcia przy założeniu, że spełnione są warunki:

$$f_{zn} = \text{constans}$$

$$Q_{zn} = \text{constans}$$

W związku z istniejącym wpływem kompensacji mocy biernej u odbiorcy, na przebieg jego charakterystyki $Q_o = Q_o(U)$, rozróżnia się tzw. charakterystykę naturalną otrzymaną bez uwzględnienia udziału mocy biernej wytwarzanej przez urządzenia kompensacyjne.

W zakładach przemysłowych, największy wpływ na przebieg wypadkowej charakterystyki $Q_o = Q_o(U)$ mają silniki asynchroniczne. Wpływ ten wynika zarówno z ilościowego udziału silników asynchronicznych w obciążeniu zakładów przemysłowych jak i jakościowego przebiegu ich charakterystyk $Q_s = Q_s(U)$. Charakterystyki $Q_o = Q_o(U)$ zakładów przemysłowych mają przeważnie podobny przebieg jak charakterystyki silników asynchronicznych.

Jak wykazały przeprowadzone badania [1, 4] charakterystyka $Q_o = Q_o(U)$ jest tym bardziej stroma w swej części stabilnej i tym bardziej odległe jest jej minimum od znamionowej wartości napięcia, im niższa jest wartość naturalnego współczynnika mocy zakładów przemysłowych. Jest to ściśle związane z wielkością i reżimem pracy silników asynchronicznych, dla których gabaryty i stopień obciążenia decydują o udziale mocy magnesowania, a tym samym jak wykazano wyżej o stromości charakterystyki. Biorąc pod uwagę fakt, że udział odbiorników pobierających wyłącznie moc czynną w obciążeniu zakładów przemysłowych jest prawie stały widzimy, że reżim pracy silników asynchronicznych i ich wielkość będą decydowały o wartości naturalnego współczynnika mocy zakładów przemysłowych.

Badania przeprowadzone w krajowym systemie energetycznym pozwoliły na wyznaczenie równań opisujących charakterystyki $Q_o = Q_o(U)$ dla zakładów przemysłowych w zależności od ich naturalnego współczynnika mocy [1, 4]. Równania charakterystyk naturalnych w zakresie zmian napięcia od 0,9 do 1,1 U_{zn} odnie-

sione do napięcia znamionowego i mocy biernej odbieranej przy tym napięciu mają postać:

$$q_0 = au^2 + bu + c \quad (16)$$

Przy rozpatrywaniu zagadnienia stabilności pracy odbiorów przemysłowych wg kryterium $\frac{dq}{du} < 0$ konieczna jest znajomość przebiegu charakterystyki $Q_0 = Q_0(U)$ w szerszym zakresie zmian napięcia. Przeprowadzone dla szeregu charakterystyk sprawdzenie, przy pomocy metody najmniejszych kwadratów wykazało, że charakterystyki $Q_0 = Q_0(U)$ dla zakresu zmian napięcia od 0,7 do 1,1 U_{zn} można również opisać przy pomocy wielomianu, drugiego stopnia. Dokonana analiza wykazała również, że przy wykorzystaniu równań opisujących charakterystyki w zakresie od 0,9 U_{zn} , do określania charakterystyk w rozszerzonym zakresie zmian napięcia wartości dyspersji wzrastają. Wzrost ten jednak nie jest tak duży by nie pozwalał na wykorzystanie równań charakterystyk obowiązujących w zakresie zmian napięcia od 0,9 do 1,1 U_{zn} dla zakresu od 0,7 do 1,1 U_{zn} .

Napięciową charakterystykę statyczną mocy biernej określają dwie wielkości: U_{min} - napięcie przy którym osiąga ona minimum oraz α_{ou} - współczynnik nachylenia charakterystyki wyznaczony dla warunków znamionowych. Wielkości te można wyznaczyć z relacji:

$$U_{min} = - \frac{b}{2a} \quad (17)$$

$$\alpha_{ou} = \frac{\partial Q_0}{\partial U} \frac{U_{zn}}{Q_{ozn}} \quad (18)$$

1.4. Równanie charakterystyki zapasu mocy biernej

Podobny przebieg charakterystyk mocy biernej pobieranej przez odbiory przemysłowe i silniki asynchroniczne stwarza możliwość analogicznego badania stabilności ich pracy. Do badania stabilności pracy odbiorów przemysłowych możemy zastosować więc kryterium $\frac{dq}{du} < 0$.

Równanie charakterystyki wypadkowej $Q = Q(U)$ otrzymane z relacji 15 i 16 ma postać

$$q = - (A+a) u^2 + \sqrt{- Bu^4 + Cu^2 - D + bu - c} \quad (19)$$

2. Wpływ baterii kondensatorów statycznych stosowanych do kompensacji równoległej mocy biernej u odbiorców na stabilność ich pracy

Zastosowanie kryterium $\frac{dQ}{dU} < 0$ jest szczególnie korzystne przy analizie wpływu kompensacji równoległej mocy biernej na stabilność pracy odbioru. Umożliwia to z jednej strony opracowanie nieskomplikowanej metodyki rozwiązania zagadnienia z drugiej natomiast wykorzystanie wyznaczonych dużym nakładem pracy typowych, średnich charakterystyk statycznych odbiorów dla systemu krajowego [1, 4].

Wpływ kompensacji równoległej mocy biernej na stabilność pracy będzie najostrej występował u odbiorów znacznie oddalonych od sieci systemowej najwyższego napięcia, z uwagi na warunki napięciowe i stosowanie nieregulowanych baterii kondensatorów.

2.1. Zmiana charakterystyki $Q_0 = Q_0(U)$ wywołana kompensacją mocy biernej

Urządzenia stosowane do kompensacji równoległej mocy biernej w węzłach odbiorczych posiadają swe własne napięciowe charakterystyki statyczne mocy biernej, $- Q_k = Q_k(U)$. W konsekwencji włączenia do pracy u odbiorcy urządzeń kompensacyjnych ulegnie zmianie przebieg charakterystyki $Q_0 = Q_0(U)$.

Równanie określające charakterystykę $Q_0 = Q_0(U)$ po zastosowaniu kompensacji odniesione do napięcia znamionowego i mocy biernej odbieranej po kompensacji przy napięciu znamionowym będzie miało postać:

$$q'_0 = \frac{q_0 \operatorname{tg} \varphi - q_k (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi')}{\operatorname{tg} \varphi'} \quad (20)$$

gdzie:

- q'_0 - moc bierna odbierana po zastosowaniu kompensacji odniesiona do mocy biernej odbieranej po kompensacji przy napięciu znamionowym,
- q_0 - moc bierna odbierana przed kompensacją odniesiona do mocy biernej odbieranej w warunkach znamionowych przed kompensacją,
- q_k - moc bierna odbierana przez urządzenie kompensacyjne odniesiona do mocy biernej tego urządzenia w warunkach znamionowych,
- ϕ, ϕ' - kąty przesunięcia fazowego odpowiadające współczynnikom mocy odbieranej; $\cos \phi$ - przed kompensacją, $\cos \phi'$ - po kompensacji.

Równanie to zostało wyprowadzone przy założeniu niezmienności mocy czynnej pobieranej przez odbiór w wyniku stosowania kompensacji. Względny współczynnik nachylenia charakterystyki $Q_0 = Q_0(U)$ można wyznaczyć z równania:

$$\alpha_{ou} = \frac{\alpha_{ou} \operatorname{tg} \phi - \alpha_k (\operatorname{tg} \phi - \operatorname{tg} \phi')}{\operatorname{tg} \phi'} \quad (21)$$

gdzie:

- α'_{ou} - współczynnik nachylenia charakterystyki $Q_0 = Q_0(U)$,
- α_{ou} - współczynnik nachylenia charakterystyki $Q_0 = Q_0(U)$,
- α_k - współczynnik nachylenia charakterystyki $Q_u = Q_u(U)$ urządzenia kompensującego,
- ϕ, ϕ' - kąty przesunięcia odpowiadające współczynnikom mocy przed i po kompensacji.

Równanie charakterystyki $Q_k = Q_k(U)$ dla baterii kondensatorów odniesione do napięcia znamionowego i mocy znamionowej baterii ma postać:

$$q_k = u^2 \quad (22)$$

Podstawiając do równania 20 wartości q_0 i q_k z relacji 16 i 22 otrzymamy równanie charakterystyki $Q'_0 = Q'_0(U)$ przy kompensacji za pomocą kondensatorów statycznych

$$q'_0 = a' u^2 + b' u + c \quad (23)$$

gdzie:

$$a' = \frac{\text{tg}\varphi}{\text{tg}\varphi'} (a - 1) + 1$$

$$b' = \frac{\text{tg}\varphi}{\text{tg}\varphi'} b$$

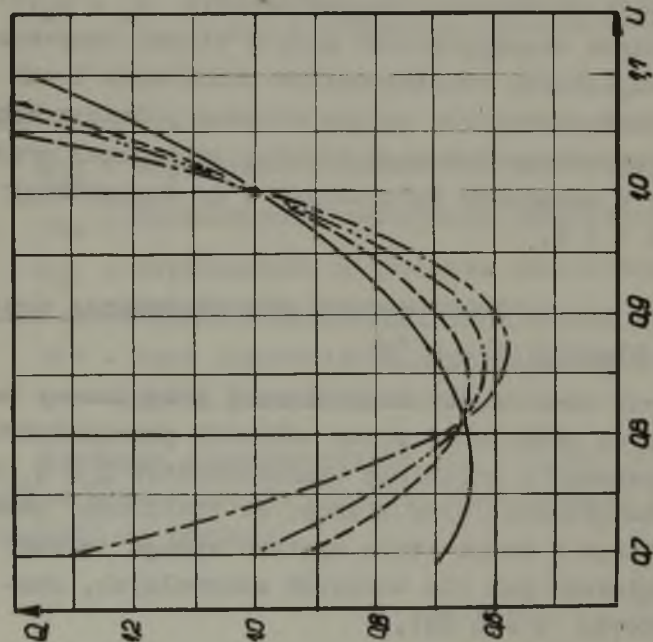
$$c' = \frac{\text{tg}\varphi}{\text{tg}\varphi'} c$$

Z przeprowadzonej analizy wynika, że kompensacja mocy biernej u odbiorców zmienia dość znacznie napięciowe charakterystyki mocy odbieranej. Zmianie ulegają zarówno wielkości względnych współczynników nachylenia charakterystyk jak i wielkości napięć U min.

Obliczone z relacji 23 równania charakterystyk $Q'_0 = Q'_0(U)$ dla różnych naturalnych współczynników mocy i stopni kompensacji oraz wartości względnych współczynników nachylenia i napięć przy których charakterystyka osiąga minimum podano w tabeli 1. Przebiegi charakterystyk mocy biernej odbieranej przez zakłady przemysłowe w warunkach naturalnych i po kompensacji podano na rysunkach 7 i 8.

2.2. Charakterystyki zapasu mocy biernej przy stosowaniu kompensacji mocy biernej $Q' = Q'(U)$

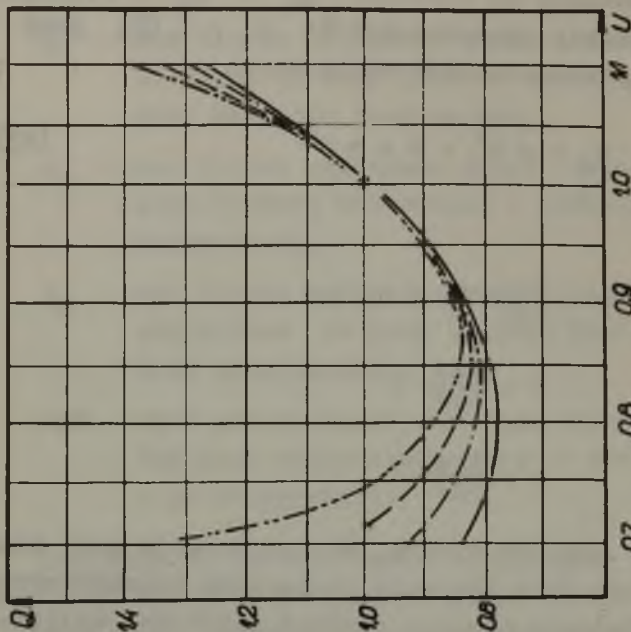
O wpływie kompensacji równoległej mocy biernej przy pomocy baterii kondensatorów na stabilność pracy odbiorów przemysłowych możemy ogólnie wnioskować z przebiegu charakterystyk $Q'_0 = Q'_0(U)$. Określenie wpływu kompensacji mocy biernej na stabilność pracy odbioru zlokalizowanego w danym węźle systemu wymaga jednak wyznaczenia, analogicznie jak dla warunków naturalnych, charakterystyki wypadkowej $Q' = Q'(U)$.



Rys. 7. Przebieg charakterystyk $Q_0 = Q_0(U)$ dla odbiorów przemysłowych przed i po kompensacji za pomocą kondensatorów statycznych

Charakterystyki:

- naturalna przy $\cos \varphi = 0,6$
- - - po kompensacji do $\cos \varphi = 0,85$
- · - po kompensacji do $\cos \varphi = 0,9$
- - - po kompensacji do $\cos \varphi = 0,95$



Rys. 8. Przebieg charakterystyk $Q_0 = Q_0(U)$ dla odbiorów przemysłowych przed i po kompensacji za pomocą kondensatorów statycznych

Charakterystyki:

- naturalna przy $\cos \varphi = 0,85$
- - - po kompensacji do $\cos \varphi = 0,9$
- · - po kompensacji do $\cos \varphi = 0,93$
- - - po kompensacji do $\cos \varphi = 0,95$

Tablica 1

Zestawienie napięciowych charakterystyk statycznych pobieranej mocy biernej przez zakłady przemysłowe w warunkach naturalnych i po kompensacji mocy biernej przy pomocy baterii kondensatorów w zakresie zmian napięcia od 0,7 do 1,1 U_{zn}

Lp.	$\cos\varphi'$	Równanie charakterystyk $Q_o = Q_d(U)$	U_{min}	a_{ou}
1 ^{x)}	0,85	$Q_o = 5,9 U^2 - 9,5 U + 4,6$	0,805	2,30
2	0,90	$Q_o = 7,27 U^2 - 12,15 U + 5,88$	0,836	2,34
3	0,93	$Q_o = 8,68 U^2 - 14,89 U + 7,21$	0,858	2,47
4	0,95	$Q_o = 10,24 U^2 - 17,91 U + 8,67$	0,874	2,57
5	0,8	$Q_o = 6,15 U^2 - 9,8 U + 4,65$	0,797	2,50
6	0,85	$Q_o = 7,24 U^2 - 11,87 U + 5,63$	0,820	2,61
7	0,90	$Q_o = 8,98 U^2 - 15,18 U + 7,20$	0,845	2,77
8	0,93	$Q_o = 10,78 U^2 - 18,61 U + 8,83$	0,863	2,95
9	0,95	$Q_o = 12,76 U^2 - 22,37 U + 10,67$	0,876	3,15
10 ^{x)}	0,7	$Q_o = 6,61 U^2 - 10,38 U + 4,77$	0,785	2,84
11	0,85	$Q_o = 9,68 U^2 - 16,06 U + 7,38$	0,829	3,30
12	0,90	$Q_o = 12,82 U^2 - 21,87 U + 10,05$	0,853	3,77
13	0,93	$Q_o = 15,49 U^2 - 26,81 U + 12,32$	0,864	4,17
14	0,95	$Q_o = 18,42 U^2 - 32,23 U + 14,81$	0,875	4,61
15 ^{x)}	0,6	$Q_o = 6,9 U^2 - 10,7 U + 4,8$	0,775	3,10
16	0,85	$Q_o = 13,7 U^2 - 23,03 U + 10,33$	0,840	4,37
17	0,90	$Q_o = 17,24 U^2 - 29,45 U + 13,21$	0,854	5,03
18	0,93	$Q_o = 20,91 U^2 - 36,11 U + 16,20$	0,863	5,71
19	0,95	$Q_o = 24,94 U^2 - 43,41 U + 19,47$	0,870	6,47

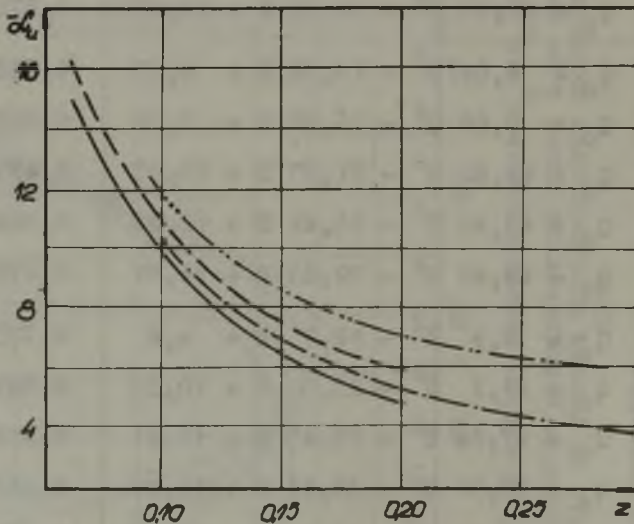
x) - charakterystyki naturalne

Równanie charakterystyki $Q' = Q'(U)$ dla odbiorów zasilanych z sieci sztywnej stosujących baterie kondensatorów do kompensacji równoległej mocy biernej możemy wyznaczyć z relacji 15 i 23.

$$q = - \left(A+a + \frac{tg\varphi}{tg\varphi} - 1 \right) u^2 + \sqrt{-Bu^4 + Cu^2 - D} + bu - c \quad (24)$$

W równaniu 24 zarówno Q_d jak i Q'_0 zostały odniesione do mocy odbieranej w warunkach znamionowych przed kompensacją.

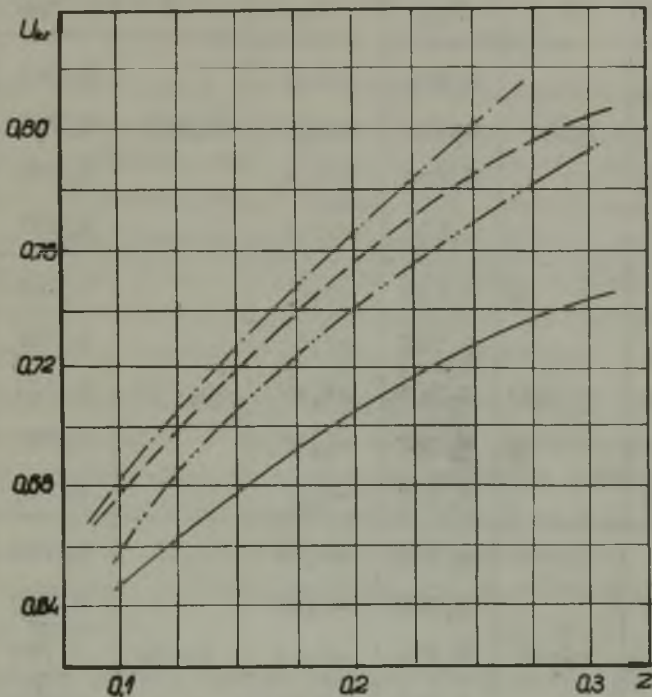
Korzystając z równań 19 i 24 przeprowadzono analizę przebiegu charakterystyk wypadkowych dla warunków naturalnych i po kompensacji mocy biernej dla odbioru zasilanego z sieci sztywnej, przy pomocy układu promieniowego o napięciu 110 kV i zmiennej impedancji wypadkowej. Analizę przeprowadzono dla różnych naturalnych współczynników mocy odbiorów i różnych stopni kompensacji. Wielkości napięć krytycznych oraz względnych współczynników nachylenia wypadkowych charakterystyk naturalnych i po kompensacji, uzyskane z analizy, podano w tabelicy 2.



Rys. 9. Zależności $\alpha_u = \alpha_u(Z)$ dla charakterystyk naturalnych i po kompensacji

Charakterystyki: - - - - - naturalna przy $\cos\varphi = 0,85$, ——— po kompensacji od $\cos\varphi = 0,85$ do $\cos\varphi = 0,95$, - · - · - naturalna przy $\cos\varphi = 0,6$, - · - · - po kompensacji od $\cos\varphi = 0,6$ do $\cos\varphi = 0,95$

Zależności wielkości napięć krytycznych i względnych współczynników nachylenia charakterystyk $Q' = Q'(U)$ dla różnych naturalnych współczynników mocy i stopni kompensacji zilustrowano wykresami podanymi na rysunkach 9 i 10.



Rys. 10. Zależności $U_{kr} = U_{kr}(z)$ dla charakterystyk naturalnych i po kompensacji

Charakterystyki: ——— naturalna przy $\cos \varphi = 0,6$, - - - - - po kompensacji od $\cos \varphi = 0,6$ do $\cos \varphi' = 0,95$, - · - · - naturalna przy $\cos \varphi = 0,85$, - · - · - po kompensacji od $\cos \varphi' = 0,85$ do $\cos \varphi' = 0,95$

3. Wnioski

1. Kompensacja mocy biernej u odbiorców przemysłowych, za pomocą kondensatorów statycznych, powoduje zmianę przebiegu ich napięciowej charakterystyki statycznej mocy biernej.

Tablica 2

Wielkości napięć krytycznych i względnych współczynników nachylenia charakterystyk $Q = Q(U)$ naturalnych i po kompensacji za pomocą baterii kondensatorów

Lp.	$\cos \varphi'$	Z	u_{kr}	α_u	Z	u_{kr}	α_u
1 ^{x)}	0,85		0,616	-16,1		0,745	-5,7
2	0,90	0,067	0,625	-15,6	0,208	0,760	-5,3
3	0,93		0,629	-15,4		0,770	-5,0
4	0,95		0,632	-15,2		0,777	-4,8
5 ^{x)}	0,8		0,698	-7,8		0,748	-5,4
6	0,85		0,707	-7,4		0,760	-5,1
7	0,90	1,153	0,717	-7,1	0,237	0,773	-4,8
8	0,93		0,724	-6,9		0,781	-4,6
9	0,95		0,729	-6,7		0,788	-4,3
10 ^{x)}	0,7		0,706	-7,21		0,750	-5,23
11	0,85		0,729	-6,42		0,780	-4,44
12	0,90	1,182	0,738	-6,15	0,282	0,789	-4,18
13	0,93		0,743	-5,98		0,796	-4,00
14	0,95		0,756	-5,79		0,801	-3,87
15	0,60		0,647	-11,9		0,748	-5,2
16	0,85		0,667	-10,83		0,789	-4,1
17	0,90	0,102	0,668	-10,68	0,316	0,797	-3,9
18	0,93		0,671	-10,55		0,803	-3,8
19	0,95		0,677	-10,39		0,807	-3,7

x) - wartości dla charakterystyk naturalnych

W wyniku kompensacji minima charakterystyk przesuwają się w kierunku napięcia znamionowego. Wzrost wartości U_{\min} jest tym większy dla danego stopnia kompensacji im niższy jest naturalny współczynnik mocy odbioru.

Kompensacja powoduje również wzrost względnych współczynników nachylenia charakterystyk; wzrost ten jest tym większy im niższy jest naturalny współczynnik mocy odbioru.

2. Warunki stabilności pracy odbiorów przemysłowych zasilanych z sieci sztywnej ulegają pogorszeniu przy kompensacji za pomocą baterii kondensatorów. Wartości względnych współczynników nachylenia charakterystyk zapasu mocy biernej maleją w miarę wzrostu stopnia kompensacji, natomiast napięcia krytyczne wzrastają przesuwając się w kierunku napięcia znamionowego.

Wzrost wartości napięć krytycznych postępuje wyraźnie w miarę zwiększenia się impedancji układu przesyłowego.

3. Otrzymane wyniki analizy potwierdzają wyniki prób pomiarowych przeprowadzonych w systemie ZSRR [8] oraz są zgodne z poczynionymi obserwacjami w trakcie wykonywania pomiarów napięciowych charakterystyk statycznych mocy biernej, pobieranej przez odbiory w krajowym systemie energetycznym.

Badania pomiarowe podanego zagadnienia są aktualnie przygotowane przez autorów.

4. W artykule podano wyniki analizy stabilności pracy odbiorów przeprowadzonej bez uwzględnienia wpływu przekładni transformatorów pracujących w węźle odbiorczym. Uwzględnienie wpływu przekładni, jak wynika z ogólnej analizy zagadnienia, wpłynie na zwiększenie wartości napięć krytycznych, a tym samym na pogorszenie warunków stabilności.

Rękopis złożono w redakcji w styczniu 1968 r.

LITERATURA

- [1] Bogucki A, Wójcik M.: "Równania naturalnych statycznych charakterystyk napięciowych mocy biernej pobieranej przez typowe grupy odbiorów". Energetyka 2/1962 r.
- [2] Bogucki A, Lawera E.: "Wstępna analiza wpływu kompensacji równoległej mocy biernej na stabilność pracy odbiorów energetycznych" Sympozjum Kom. Energet. PAN W-wa 18-20. 11.1966 r.
- [3] Bubenko J., Johannsson: "Steady - state voltage load characteristics - Swedish state Power Board. Stockholm.
- [4] Jasicki, F. Szymik, Bogucki A., Saferna J.: "Praca układów elektroenergetycznych" WNT Warszawa 1965 r.
- [5] Kamiński A.: "Równowaga współpracy układów elektroenergetycznych" PWT Warszawa.
- [6] Kończykowski S.: "Podstawy stateczności elektromechanicznej układów elektroenergetycznych" PWN Warszawa 1966 r.
- [7] Markowicz I.: "Reżimy energetycznych systemów" Gosenergoizdat 1963 r.
- [8] Matygina S.: "Wpływ sposobów kompensacji relatywnej mocy na stateczność ustojczystości naporu" Elektryczestwo Nr 11 1959 r.
- [9] Sokołow W.: "Ustojczystość pracy asynchronicznych dwigateli przy znacznych wznieszeniach przeciwnych i paralelnych statycznych kondensatorach", Elektryczestwo Stancji 1961 r. Nr 6.
- [10] Szostek T.: "Skuteczność regulacji napięcia w układach elektroenergetycznych" Konferencja pomocniczych pracowników nauki Warszawa 1959 r.
- [11] Wienikow W.: "Elektromechaniczne przejściowe procesy w elektrycznych systemach". Gostenergoizdat 1958 r.

УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТОКОПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПИТАЕМЫХ ОТ ЖЕСТКОЙ СЕТИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ БАТАРЕИ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Р е з ю м е

В статье проведено анализ влияния параллельной компенсации реактивной мощности, проводимой посредством батареи конденсаторов, на устойчивость работы промышленных токопотребителей, питаемых от жесткой сети. Анализ проведено для различных ступеней компенсации, с учетом влияния размера импеданса питающей сети. На основании естественных характеристик напряжения реактивной мощности, определённые для системы в стране, приведены величины относительных результирующих эффектов и критических напряжений.

STABILITY OF COMMERCIAL LOAD FED FROM INFINITE INERTIA SYSTEM USING PARALLEL BANKS OF POWER FACTOR CORRECTION CAPACITORS

S u m m a r y

The article contains analysis of influence of parallel banks of power factor correction capacitors on stability of commercial load fed from infinite inertia system. The analysis is done for different reactive power compensation rates taking into consideration the influence of feed system impedances. The relative resultant control indicators and critical voltage values are obtained on the base of reactive power natural voltage characteristics of Polish Grid.