

EDWARD LAWERA

Katedra Elektroenergetyki

MOŻLIWOŚCI PRAKTYCZNEGO OKREŚLANIA WPŁYWU
KOMPENSACJI RÓWNOLEGLEJ MOCY BIERNEJ NA
STABILNOŚĆ PRACY ENERGETYCZNYCH ODBIORÓW
PRZEMYSŁOWYCH

Streszczenie. W artykule opisano zakres i wyniki badań wpływu kompensacji równoległej mocy biernej na stabilność pracy energetycznych odbiorów przemysłowych. Badania te prowadzono w Zakładzie Eksploatacji i Automatyzacji Układów Elektroenergetycznych Politechniki Śląskiej w latach 1965-1968. W artykule szczególnie nacisk położono na możliwości praktycznego określania wpływu kompensacji na stabilność pracy odbiorów.

Wstęp

W latach 1965-1968 w Zakładzie Eksploatacji i Automatyzacji Układów Elektroenergetycznych Politechniki Śląskiej prowadzono badania nad wpływem kompensacji równoległej mocy biernej na stabilność pracy energetycznych odbiorów przemysłowych [2], [3], [4]. W badaniach tych posługiwano się kryterium $\frac{dQ}{dU} < 0$, w którym Q oznacza różnicę mocy odbieranej i dosyłanej (produkowanej) w węźle odbiorczym, U natomiast napięcie w tym węźle.

Do kompensacji równoległej mocy biernej w węzłach odbiorczych stosowane są najczęściej baterie kondensatorów; pomocniczo w tym celu wykorzystywane są również przewzbudzone silniki synchroniczne.

Dlatego właśnie analizowano wpływ, jaki na stabilność pracy odbiorów wywiera kompensacja prowadzona przy pomocy tych urządzeń. Jako czynnik bezpośrednio powodujący naruszenie stabilności pracy odbioru rozpatrywano zmianę wartości napięcia w węźle odbiorczym.

Przeprowadzone badania pozwoliły na:

- opracowanie metodyki określania wpływu kompensacji równoległej mocy biernej na stabilność pracy odbiorów energetycznych, łącznie z opracowaniem odpowiednich programów dla rozwiązywania tego zagadnienia przy pomocy maszyn cyfrowych. Słuszność opracowanej metodyki została potwierdzona podczas prób pomiarowych na układach zamodelowanych oraz w systemie rzeczywistym;
- przeprowadzenie analizy ilościowej podanego zagadnienia w odniesieniu do statystycznie typowych warunków pracy odbiorów przemysłowych w krajowym systemie energetycznym;
- ustalenie wpływu uwzględnianych parametrów określających stan pracy systemu i parametrów jego elementów na dokładność otrzymywanych wyników.

1. Równania napięciowych charakterystyk zapasu mocy biernej

Warunki stabilności statycznej pracy odbioru energetycznego zasilanego z danego węzła określa charakterystyka zapasu mocy biernej $Q = Q(U)$, wyznaczona dla tego węzła. Charakterystyka ta stanowi różnicę napięciowych charakterystyk mocy biernej docyłanej i odbieranej w tym węźle.

Napięcie, przy którym charakterystyka $Q = Q(U)$ osiąga maksimum, nazywa się napięciem krytycznym U_{kr} i stanowi punkt graniczny stabilności pracy węzła.

Współczynnik nachylenia charakterystyki $Q = Q(U)$

$$k_w \cong - \frac{\partial Q}{\partial U} \quad (1)$$

stanowi wypadkowy efekt regulacyjny węzła odbiorczego względem mocy biernej.

Charakterystykę $Q = Q(U)$ dla warunków naturalnych pracy odbioru, tzn. bez kompensacji równoległej mocy biernej, określa równanie [4]:

$$\underline{Q} = - (\underline{C}\underline{U}^2 + \underline{D}\underline{U} + \underline{F}) + \sqrt{-\underline{C}\underline{U}^4 + \underline{H}\underline{U}^2 - 1} \quad (2)$$

w którym:

$$\underline{C} = \frac{1}{k_2^2 \underline{Z} \sqrt{p^2 + 1}} + a$$

$$\underline{D} = b$$

$$\underline{F} = c$$

$$\underline{G} = \frac{p^2}{k_2^4 \underline{Z}^2 (p^2 + 1)}$$

$$\underline{H} = \frac{1}{k_2^2 \underline{Z}} \left(\frac{U_s^2}{\underline{Z}} - \frac{2p}{\sqrt{p^2 + 1}} \right)$$

$$p = \frac{R}{X}$$

(3)

gdzie:

U - napięcie w węźle odbiorczym

- U_s - napięcie w węźle sieci systemowej, z którego zasilany jest węzeł odbiorczy
- $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ - impedancja wypadkowa układu przesyłowego, zasilającego węzeł odbiorczy
- k_2 - współczynnik charakteryzujący rzeczywistą przekładnię transformatora w węźle odbiorczym; sposób wyznaczania tego współczynnika podano we wcześniejszych publikacjach [3], [4]
- a, b, c - współczynniki naturalnych napięciowych charakterystyk statycznych mocy biernej, pobieranej przez typowe odbiory w krajowym systemie energetycznym
- $$Q_0 = aU^2 + bU + c \quad [1]$$

Równanie (2) określa charakterystykę $Q = Q(U)$ w jednostkach względnych (wielkości podkreślone) przy czym za wielkości podstawowe przyjęto napięcie znamionowe i moc czynną odbieraną w węźle odbiorczym przy tym napięciu. W przypadku prowadzenia w węźle odbiorczym kompensacji równoległej mocy biernej przy pomocy baterii kondensatorów charakterystykę $Q = Q(U)$ węzła określa również równanie (2) z tym, że zmienia się współczynnik C tego równania.

W tym przypadku określa go relacja [4]:

$$C = \frac{1}{k_2^2 \underline{Z} \sqrt{p^2 + 1}} + a - (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi') \quad (4)$$

w której:

φ - kąt odpowiadający naturalnemu współczynnikowi mocy $\cos \varphi$ przed kompensacją

φ' - kąt odpowiadający współczynnikowi mocy $\cos \varphi'$ po kompensacji.

Przy wykorzystaniu do kompensacji równoległej mocy biernej w węźle odbiorczym przewzbudzonych silników synchronicznych, w równaniu (2) określającym charakterystykę $Q = Q(U)$ zmianie ulegają współczynniki C, D, F , określane w tym przypadku relacjami [4]:

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{1}{k_2^2 \underline{z} \sqrt{P^2 + 1}} + a - d (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi') \\ D &= b - e (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi') \\ F &= c - f (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi') \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

w których:

d, e, f - współczynniki równań napięciowych charakterystyk statycznych mocy biernej pobieranej przez silniki synchroniczne

$\underline{Q}_s = d\underline{U}^2 + e\underline{U} + f$ określonych na drodze aproksymacji charakterystyk pomierzonych [4].

2. Zakres i wyniki przeprowadzonych badań

Na podstawie równań charakterystyk $Q = Q(U)$ określonych relacjami (2, 3, 4 i 5) przeprowadzono, przy zastosowaniu maszyny cyfrowej, obszerną analizę przebiegu tych charakterystyk w zależności od warunków pracy odbioru, stopnia i rodzaju kompensacji oraz parametrów układu przesyłowego, zasilającego węzeł odbiorczy.

Przy pomocy maszyny cyfrowej wyznaczono również wartości współczynników nachylenia charakterystyk $Q = Q(U)$ określonych relacją:

$$k_w = 2 CU + D + \frac{2GU^3 - HU}{\sqrt{GU^4 + HU^2 - 1}} \quad (6)$$

oraz napięć krytycznych. Napięcia krytyczne wyznaczano metodą tworzenia ciągu przedziałów zstępujących o odpowiednich własnościach dla zakresu zmian napięcia, w którym określano charakterystyki $Q = Q(U)$.

Ilościowe wyniki przeprowadzonej analizy odnoszą się do statystycznie typowych warunków pracy odbiorów w krajowym systemie energetycznym. Wynika to z faktu wykorzystania w niej równań napięciowych charakterystyk statycznych mocy biernej pobieranej przez odbiory przemysłowe wyznaczonych dla systemu krajowego [1].

Analizę ilościową wpływu kompensacji mocy biernej na stabilność pracy odbiorów przemysłowych przeprowadzono dla następujących wartości parametrów występujących w relacjach (2,3, 4,5):

$$\cos \varphi = 0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85$$

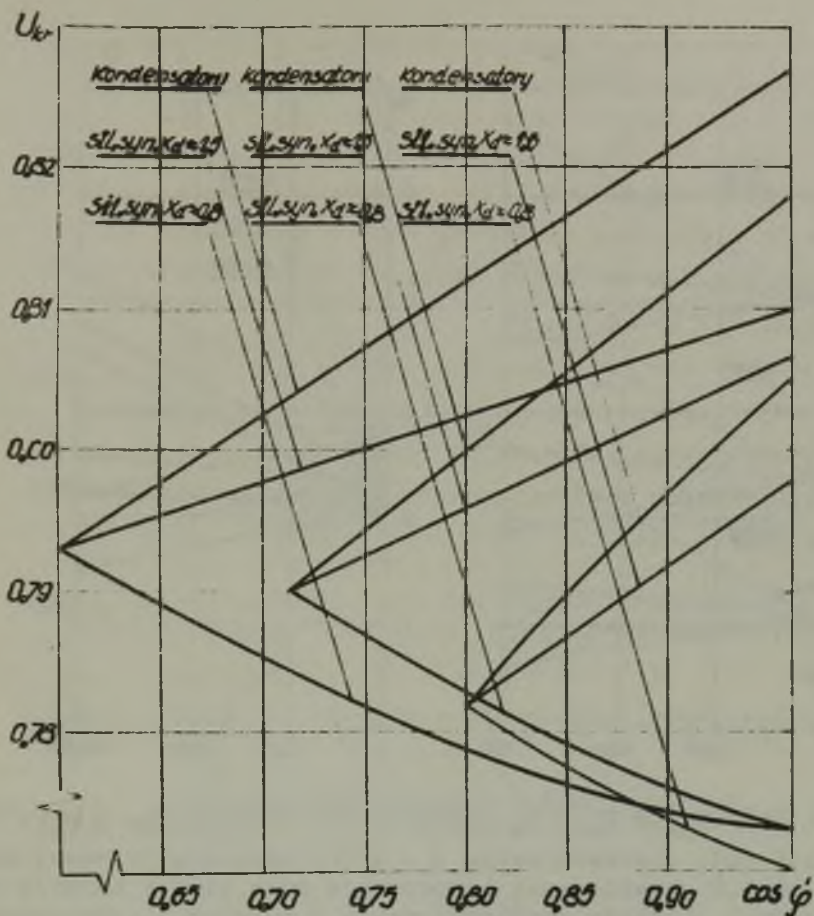
$$\cos \varphi' = 0,85; 0,90; 0,93; 0,96$$

$$\underline{Z} = 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$$

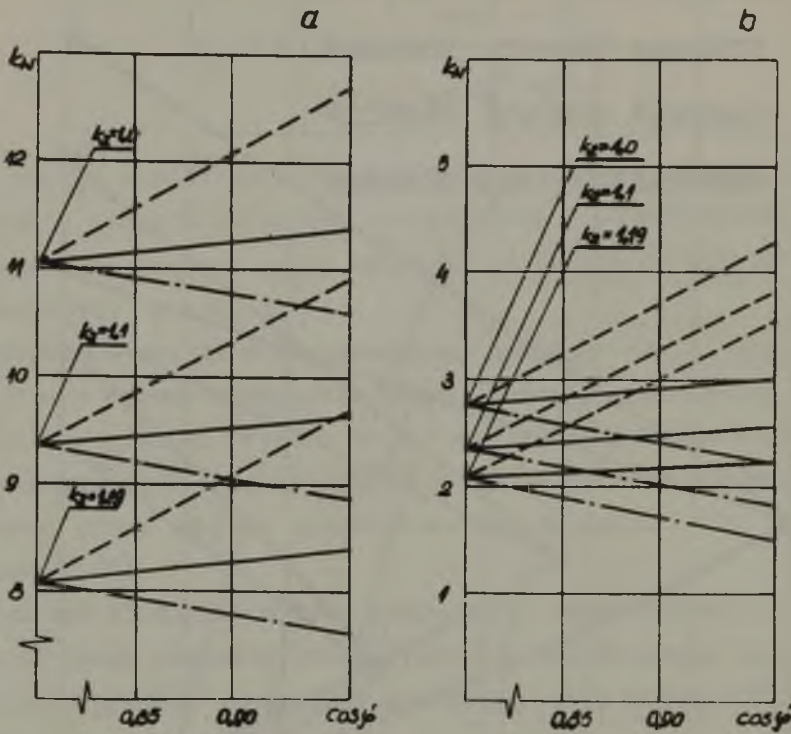
$$p = 0,1; 0,2; 0,5$$

$$k_2 = 1,0; 1,1; 1,19$$

Przy badaniu wpływu kompensacji prowadzonej za pomocą przewzbudzonych silników synchronicznych, rozpatrywano silniki o wartości impedancji synchronicznej $\underline{X}_d \approx 0,8$ i 1,5 pracujące przy znamionowym prądzie wzbudzenia i znamionowym obciążeniu mocą czynną.

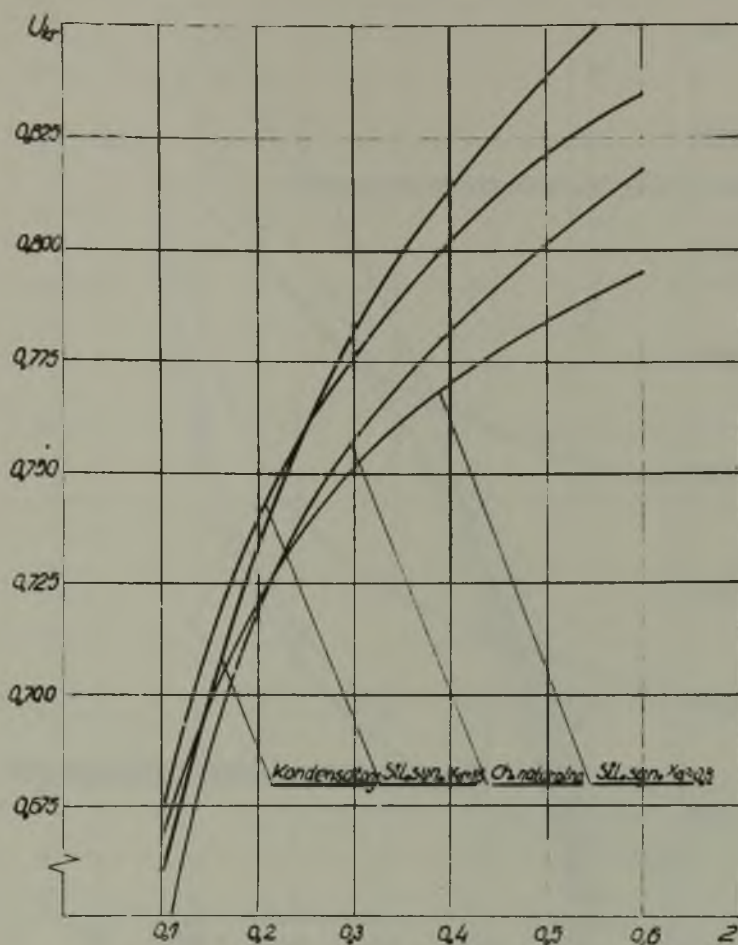


Rys. 1. Zależności $U_{kr} = U_{kr} (\cos \varphi')$ przy $Z = 0,3$ $k_2 = 1,19$ dla odbiorów przemysłowych o $\cos \varphi = 0,6: 0,7: 0,8$, prowadzących kompensację równoległą mocy biernej, przy pomocy bakterii kondensatorów i silników synchronicznych o różnych \underline{I}_d , pracujących przy $\underline{P} = 1,0$ i $\underline{I}_w = 1,0$

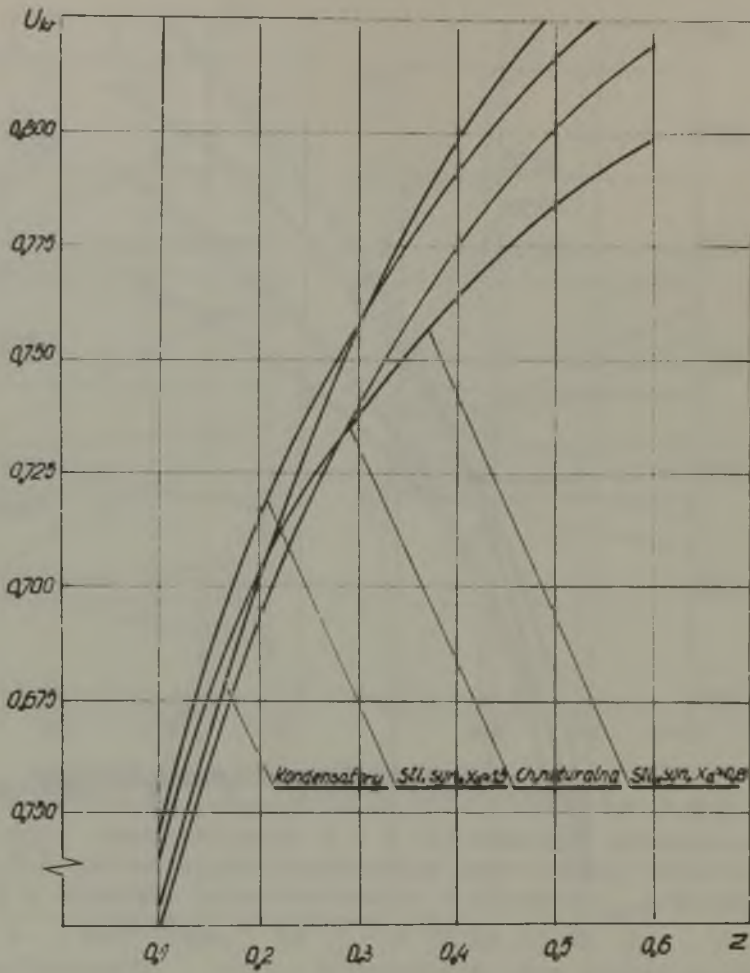


Rys. 2. Zależności $k_v = k_v (\cos \varphi')$, dla różnych k_2 , $Z = 0,1$ (a) i $Z = 0,5$ (b), charakterystyk $Q = Q(U)$ odbiorów przemysłowych o $\cos \varphi = 0,8$ prowadzących kompensację przy pomocy baterii kondensatorów i silników synchronicznych o różnych X_d , pracujących przy $I_w = 1,0$ i $P = 1,0$

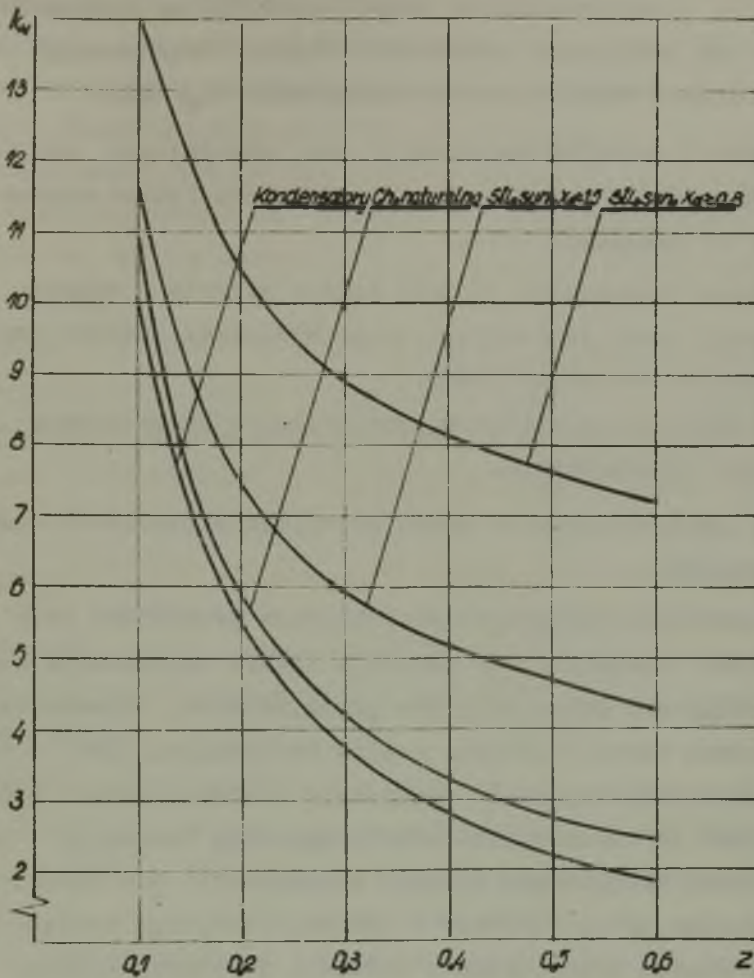
Oznaczenie krzywych: - - - - - kompensacja przy pomocy baterii kondensatorów ——— kompensacja przy pomocy sil.syn. o $X_d \approx 1,5$, - · - · - - kompensacja przy pomocy siln.syn. o $X_d \approx 0,8$



Rys. 3. Zależności $U_{kr} = U_{kr}(Z)$, przy $k_2 = 1,0$, dla odbiorów przemysłowych w warunkach naturalnych - $\cos \varphi = 0,7$ oraz po kompensacji, do $\cos \varphi' = 0,96$, za pomocą bakterii kondensatorów i silników synchronicznych o różnych X_d , pracujących przy $P = 1,0$ i $I_w = 1,0$



Rys. 4. Zależności $U_{kr} = U_{kr}(z)$, przy $k_2 = 1,0$ dla odbiorów przemysłowych w warunkach naturalnych - $\cos \varphi = 0,8$ oraz po kompensacji do $\cos \varphi' = 0,96$, za pomocą baterii kondensatorów i silników synchronicznych o różnych X_d , pracujących przy $\underline{P} = 1,0$ i $\underline{I}_w = 1,0$



Rys. 5. Zależności $k_v = k_v(Z)$, przy $k_2 = 1,0$ charakterystyk $Q = Q(U)$ odbiorów przemysłowych dla warunków naturalnych $\cos \varphi = 0,96$, za pomocą bakterii kondensatorów i silników synchronicznych o różnych X_d , pracujących przy $P = 1,0$ i $I_v = 1,0$

Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na wykonanie wykresów [4] podających zależności między wartościami napięć krytycznych i współczynników nachylenia k_w od:

- stopnia i rodzaju kompensacji oraz naturalnego $\cos \varphi$ dla danej wartości impedancji Z ; przykłady takich wykresów podano na rysunkach 1 i 2,
- wartości impedancji Z dla danego stopnia i rodzaju kompensacji oraz naturalnego $\cos \varphi$, przykłady takich wykresów podano na rysunkach 3,4,5.

Podana forma wykresów umożliwia ich bezpośrednie praktyczne wykorzystanie.

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają sformułować następujące wnioski:

- a) kompensacja równoległa mocy biernej prowadzona przy pomocy baterii kondensatorów powoduje zawsze pogorszenie warunków stabilności pracy odbiorów przemysłowych. Objawem tego jest zarówno wzrost wartości napięć krytycznych, jak i zmniejszenie współczynników nachylenia charakterystyk $Q = Q(U)$. Obydwa te niekorzystne efekty wykazują tendencję wzrostu w miarę zwiększania stopnia kompensacji. Dla rozpatrywanych warunków pracy odbiorów w systemie krajowym wzrost wartości napięć krytycznych w stosunku do charakterystyk naturalnych dochodził do 6%, a obniżenie współczynników k_w do 30% wartości współczynników charakterystyk naturalnych. Wartości napięć krytycznych w najbardziej niekorzystnych z badanych warunków osiągają wartość $0,9 U_N$, a nawet nieznacznie ją przekraczają;
- b) wpływ kompensacji równoległej mocy biernej, prowadzonej przy pomocy przewzbudzonych silników synchronicznych, na stabilność pracy energetycznych odbiorców przemysłowych

jest zależny nie tylko od warunków pracy odbioru i sieci zasilającej, ale także od reżimu pracy i wartości reaktancji synchronicznej silników. Najbardziej istotny wpływ na przebieg charakterystyk silników synchronicznych jako urządzeń kompensacyjnych ma wartość ich reaktancji synchronicznych. Charakterystyki te, z punktu widzenia stabilności pracy odbiorów, są tym korzystniejsze im mniejsza jest wartość \underline{X}_d silników.

Silniki synchroniczne stosowane jako urządzenia kompensacyjne, powodują zawsze wzrost współczynników nachylenia charakterystyk zapasu mocy biernej, co stanowi efekt korzystny z punktu widzenia stabilności pracy węzłów. Wzrost współczynników k_w jest tym większy im mniejsza jest wartość \underline{X}_d silników; postępuje on również w miarę zwiększenia stopnia kompensacji. Wzrost ten w rozpatrywanych warunkach dochodzi do 13% wartości współczynników charakterystyk naturalnych przy kompensacji za pomocą silników o $\underline{X}_d \approx 1,5$ i do 85% jeżeli $\underline{X}_d \approx 0,8$.

Wartości napięć krytycznych osiągnane przy kompensacji za pomocą silników synchronicznych zależą również od wartości \underline{X}_d silników. Kompensacja prowadzona przy pomocy silników o $\underline{X}_d \approx 1,5$ prowadzi do wzrostu wartości U_{kr} w stosunku do charakterystyki naturalnej; wzrost ten nie przekracza jednak 2% U_N . Przy kompensacji za pomocą silników o $\underline{X}_d \approx 0,8$ następuje obniżenie wartości U_{kr} , które maksymalnie wynosi 2,5% U_N .

Można więc stwierdzić, że z punktu widzenia stabilności pracy węzłów odbiorczych, silniki synchroniczne, przewzbudzone są korzystniejszymi urządzeniami kompensacyjnymi niż baterie kondensatorów.

- c) zagrożenie stabilności pracy węzła odbiorczego wzrasta wraz ze wzrostem wartości impedancji przesyłowego układu zasilającego. Wartość impedancji Z jest czynnikiem decydującym o wartości napięcia krytycznego i o ilościowym wpływie na tę wartość kompensacji mocy biernej;
- d) zmiana wartości $p = \frac{R}{X}$ od 0,1 do 0,5 nie wpływa praktycznie na wartości napięć krytycznych i współczynników k_w . Różnice wartości U_{kr} wywołane zmianą p w podanym zakresie nie przekraczają 0,001 U_N , a różnice wartości k_w są mniejsze od 2%;
- e) wpływ kompensacji mocy biernej na kształtowanie się wartości napięć krytycznych i stabilność pracy typowych odbiorów przemysłowych w krajowym systemie energetycznym nie jest ilościowo tak znaczny by stanowił zjawisko alarmujące. Nie mniej przy niekorzystnych warunkach pracy odbiorów i sieci zasilającej węzeł odbiorczy wpływ ten może stanowić poważny problem.

3. Wnioski odnośnie sposobu praktycznego określania stabilności pracy odbiorów przemysłowych

Na podstawie przeprowadzonych badań i otrzymanych wyników można podać następujące wnioski dotyczące sposobu praktycznego określania stabilności pracy odbiorów przemysłowych i wpływu na nią kompensacji równoległej mocy biernej:

- a) wartości napięć krytycznych i współczynników k_w można określić, dla charakterystyk $Q = Q(U)$ typowych odbiorów przemysłowych w systemie krajowym w warunkach naturalnych oraz przy kompensacji za pomocą baterii kondensatorów lub silników synchronicznych o $X_d \approx 0,8$ i 1,5 pracujących przy znamionowym wzbudzeniu i obciążeniu mocą czynną, bez-

pośrednio z opracowanych wykresów [4]. Przykłady opracowanych wykresów podano na rysunkach 1,2,3,4,5.

- b) dla określenia U_{kr} i k_w na podstawie podanych wykresów konieczna jest znajomość następujących wielkości: $\cos\varphi$, $\cos\varphi'$, k_2 , p , \underline{Z} . Ustalenie wartości $\cos\varphi$, $\cos\varphi'$, k_2 nie następuje większych trudności.

Dokładne określenie wartości stosunku $p = \frac{R}{X}$ nie jest konieczne [p. wniosek d w pkt. 2] można przyjmować ją w granicach 0,1 do 0,5. Wielkość impedancji \underline{Z} dla danego węzła odbiorczego możemy wyznaczyć w sposób przybliżony, ale wystarczająco dokładny, znając moc zwarciovą w tym węźle. Wartość impedancji w jednostkach względnych w odniesieniu do odbieranej w węźle mocy czynnej i napięcia znamionowego określa relacja:

$$\underline{Z} = \frac{k \cdot P_o}{S_{zw}} \quad (7)$$

gdzie:

P_o - moc czynna odbierana w węźle

S_{zw} - moc zwarciovą, początkową, symetryczną w węźle $k = 1,1$

- c) dla określenia stabilności pracy odbiorów odbiegających znacznie od odbiorów typowych (posiadających inne równania napięciowych charakterystyk statycznych pobieranej mocy biernej) można wykorzystać opracowaną metodykę łącznie z programami na maszynie cyfrowe [4]
- d) uwagi z punktu c są również aktualne przy analizowaniu innych warunków pracy odbioru, czy też przy stosowaniu do kompensacji równoległej mocy biernej przewzbudzonych silników synchronicznych o parametrach różnych od podanych w pkt. 2.

LITERATURA

- [1] Bogucki A., Wójcik M.: Równania naturalnych statycznych charakterystyk napięciowych mocy biernej pobieranej przez typowe grupy odbiorów Energetyka 2/1962.
- [2] Bogucki A., Lawera E.: Wstępna analiza wpływu kompensacji równoległej mocy biernej na stabilność pracy odbiorów energetycznych. Materiały Sympozjum Komitetu Energetyki PAN i Katedr Elektroenergetycznych Politechniki Śląskiej odbytego w Jabłonnie 18 i 19.XI.1966. W-wa 1967.
- [3] Bogucki A., Lawera E.: Stabilność pracy odbiorów przemysłowych zasilanych z sieci sztywnej przy stosowaniu baterii kondensatorów do kompensacji równoległej mocy biernej Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Elektryka z. 24 1969 r.
- [4] Lawera E.: Badanie wpływu równoległej kompensacji mocy biernej na stabilność pracy energetycznych odbiorów przemysłowych. Dysertacja doktorska. Politechnika łąska 1968 r.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРАКТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ
КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИЕМНИКОВ

Р е з ю м е

В статье описан объём и результаты исследований над влиянием параллельной компенсации реактивной мощности на устойчивость работы энергетических приёмников. Исследования были проведены в 1965-1968 гг в Институте Эксплуатации и Автоматизации Энергетических Систем Силезского Политехнического Института. В статье особое внимание обращено на возможность практического определения влияния компенсации на устойчивость работы приёмников.

POSSIBILITIES OF PRACTICAL STATING OF INFLUENCE
OF REACTIVE POWER PARALLEL COMPENSATION ON STABILITY
OF COMMERCIAL RECEIVERS

S u m m a r y

The range and the research results of influence of reactive power parallel compensation on the stability of commercial receivers are described in the article.

The research was carried out in the Exploitation and Automation Department of Power Systems of Politechnika Śląska during the years 1965-1968.

The possibilities of practical stating of influence of the compensation on the stability of commercial receivers were specially emphasized in the article.