

7.8.9. Praca równoległa prądnic synchronicznych

7.8.9.1. Wiadomości ogólne

Prądnice synchroniczne pracujące równolegle, to znaczy prądnice których uzwojenia twornika dołączone do wspólnych szyn zbiorczych są ze sobą związane wspólną bramą twornika. Zmiany parametrów odpowiadających dwóm pozostałym bramom jednej z prądnic (zmiana napięcia i prądu wzbudzenia, zmiana momentu obrotowego i prędkości kątowej) powodują zmiany parametrów bramy twornika nie tylko tej prądnicy, ale także prądnicy drugiej. Jest to przypadek ogólny pracy równoległej prądnic. Rozważanie takiego przypadku pracy równoległej wymaga rozwiązywania skomplikowanego układu równań dla stanów nieustalonych.

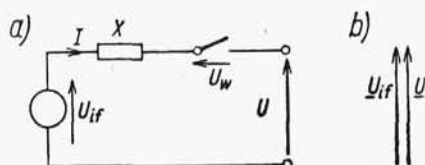
Znacznie prostszym przypadkiem jest praca równoległa prądnicy synchronicznej z siecią sztywną. Sieć sztywna (sieć o niezmienniej wartości napięcia skutecznego i niezmienniej częstotliwości oraz o wartości impedancji równej zero) może być w rozważaniach zastąpiona przez prądnicę o nieskończenie wielkiej mocy. W takim przypadku, niezależnie od zmian parametrów na bramie wzbudzenia i na bramie wału rozpatrywanej prądnicy, na zaciskach jej twornika jest napięcie o stałej wartości skutecznej i stałej częstotliwości. Zamiast rozpatrywać stany nieustalone można w takim przypadku rozpatrywać stany quasi-stacjonarne.

7.8.9.2. Synchronizacja

Obwód złożony z prądnicy synchronicznej i z sieci sztywnej przedstawiono na rys. 7.25. Łącznik między prądnicą i siecią powinien być zamknięty w chwili, kiedy potencjały obu jego biegunów są jednakowe. Wtedy po zamknięciu łącznika przez uzwojenie prądnicy nie płynie prąd, napięcie indukowane na reaktancji synchronicznej X jest równe zero, więc napięcie indukowane w prądnicy od strumienia wzbudzenia jest równe napięciu sieci, czyli $U_{if} = U$ (rys. 7.25b). W ogólnym przypadku napięcia te mogą mieć różne amplitudy i częstotliwości, a ponadto mogą być przesunięte względem siebie o kąt ϑ .

Dla układu trójfazowego warunki uzyskania jednakowych potencjałów na obu biegunach łącznika wynikają z następujących równań:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{2} U_{if} \sin(2\pi f_2 t + \vartheta) - \sqrt{2} U \sin(2\pi f_1 t) &= 0 \\ \sqrt{2} U_{if} \sin(2\pi f_2 t + \vartheta - \varepsilon) - \sqrt{2} U \sin(2\pi f_1 t - \varepsilon) &= 0 \\ \sqrt{2} U_{if} \sin(2\pi f_2 t + \vartheta + \varepsilon) - \sqrt{2} U \sin(2\pi f_1 t + \varepsilon) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.190)$$



Rys. 7.25. Prądnica i sieć sztywna: a) układ połączeń; b) wykres wektorowy dla stanu idealnego zsynchronizowania

Dla uzyskania jednakowych potencjałów na obu biegunach łącznika muszą więc być spełnione warunki:

(1) Wartości skuteczne napięcia indukowanego w prądnicy i napięcia sieci muszą być sobie równe, czyli

$$U_{if} = U$$

(2) Częstotliwości tych napięć muszą być sobie równe, czyli

$$f_1 = f_2$$

(3) Napięcie indukowane w prądnicy dołączanej i napięcie sieci muszą być ze sobą w fazie, czyli

$$\vartheta = 0$$

(4) Kolejność następstwa faz napięcia sieci i prądnicy dołączanej musi być taka sama.

W ogólnym przypadku na biegunach jednej fazy łącznika występuje napięcie

$$u_w = \sqrt{2} U_{if} \sin(2\pi f_2 t + \vartheta) - \sqrt{2} U \sin(2\pi f_1 t) \quad (7.191)$$

Przy $f_1 = f_2$, $\vartheta = 0$ oraz $U_{if} \neq U$, napięcie

$$u_w = \sqrt{2} U_w \sin(2\pi f t) \quad (7.192)$$

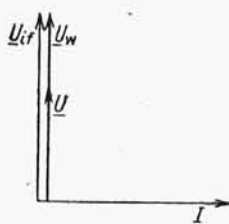
gdzie

$$U_w = U_{if} - U \quad (7.193)$$

Na rysunku 7.26 przedstawiono wykres napięć ilustrujący powyższy przypadek przy $U_{if} > U$. Pod wpływem napięcia U_w na reaktancji synchronicznej X w uzwojeniu twornika płynie prąd

$$\underline{I} = -j \frac{U_w}{X} \quad (7.194)$$

opóźniony względem napięcia indukowanego \underline{U}_{if} o kąt $\pi/2$. Prądnica jest obciążona tylko prądem biernym indukcyjnym (oddaje moc bierną indukcyjną do sieci). Prądnica jest przewzbudzona. Przy $U_{if} < U$ prąd I miałby charakter bierny pojemnościowy (zwrot wektora tego prądu byłby przeciwny do zwrotu wektora prądu na rys. 7.26), prądnica oddawałaby do sieci moc bierną pojemnościową (pobierałaby z sieci moc bierną indukcyjną). Prądnica byłaby niedowzbudzona. W obydwu przypadkach moc



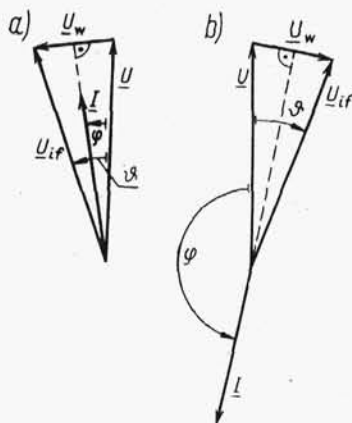
Rys. 7.26. Wykres wektorowy prądnicy synchronicznej przeciwzbudzonej, obciążonej tylko mocą bierną

czynna, a więc i moment prądniczy jest równa zero. Dołączenie prądniczy do sieci przy pewnej (niezbyt wielkiej) różnicy skutecznych wartości napięć prądniczy i sieci, a przy spełnionych innych warunkach synchronizacji, nie jest groźne.

Przy $U_{if} = U$, $\vartheta = 0$, przy właściwej kolejności faz oraz przy $f_1 \neq f_2$ napięcie na łączniku na podstawie wzoru (7.191) wynosi

$$u_w = 2\sqrt{2} U \sin\left(2\pi \frac{f_2 - f_1}{2} t\right) \cos\left(2\pi \frac{f_2 + f_1}{2} t\right)$$

Amplituda tego napięcia jest dwukrotnie większa od amplitudy napięcia indukowanego w prądniczy. Ponadto w takim przypadku występuje także składowa czynna prądu, odpowiadająca płynącej między prądnicą i siecią mocy czynnej o zmiennym kierunku (odpowiadająca powstawaniu momentu o zmiennym kierunku). Powstanie momentu obrotowego uniemożliwia wirowanie prądniczy dołączonej do sieci z prędkością różną od prędkości synchronicznej. W stanie przejściowym powstają jednak wtedy momenty i duże prądy. Na skutek tego dołączenie do sieci prądniczy mającej częstotliwość różną od częstotliwości sieci (prędkość różną od prędkości synchronicznej) jest niedopuszczalne. W praktyce niemożliwe jest idealne zrównanie tych częstotliwości, konieczne jest jednak doprowadzenie prędkości wirnika prądniczy do prędkości bardzo zbliżonej do prędkości synchronicznej. Przy prędkości wirnika bardzo bliskiej prędkości synchronicznej bardzo wolno zmienia się wartość kąta ϑ . Łącznik powinien być zamknięty w chwili, kiedy wartość kąta ϑ jest mała, jak na rys. 7.27. Prąd płynący przez uzwojenia twornika prądniczy wyznaczony jest wzo-



Rys. 7.27. Wykres wektorowy dla przypadku dołączenia prądniczy do sieci z napięciem o różnych przesunięciach fazowych

rem (7.194). Prąd ten zawiera składową czynną, czemu odpowiada moc czynna płynąca między prądnicą i siecią oraz moment elektromagnetyczny. W przypadku, kiedy wektor napięcia indukowanego w prądniczy U_{if} wyprzedza wektor napięcia sieci U (rys. 7.27a) jest $\cos \varphi > 0$, moc elektryczna odprowadzana od prądniczy do sieci jest dodatnia, moment elektromagnetyczny jest ujemny, wirnik prądniczy jest hamowany aż do stanu, kiedy wektor U_{if} pokryje się z wektorem U . Jeśli natomiast

wektor \underline{U}_{if} opóźnia się względem wektora \underline{U} (rys. 7.27b), to $\cos \varphi < 0$, moc elektryczna odprowadzana od prądnicy jest ujemna, moment elektromagnetyczny jest dodatni, a wirnik prądnicy jest przyspieszany aż do chwili, gdy wektor \underline{U}_{if} pokryje się z wektorem \underline{U} .

Zamknięcie łącznika przy kącie ϑ dość różnym od zera powoduje powstanie udarowego prądu czynnego i udarowego momentu elektromagnetycznego, co jest bardzo niebezpieczne, ponieważ może spowodować powstanie niebezpiecznych kołysań generatora, uszkodzenie fundamentów i wału.

Kolejność czynności wykonywanych przy dołączaniu prądnicy do sieci jest następująca:

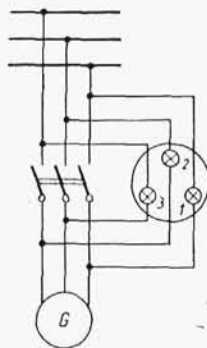
(1) Uruchamia się silnik napędzający prądnicę i doprowadza się go do prędkości równej w przybliżeniu prędkości znamionowej prądnicy.

(2) Wzbudza się prądnicę tak, aby jej napięcie indukowane było równe w przybliżeniu napięciu sieci.

(3) Sprawdza się kolejność następstwa faz i równość częstotliwości napięcia prądnicy i napięcia sieci.

(4) Zamyka się łącznik w chwili, kiedy częstotliwości są prawie równe, a kąt pomiędzy wektorami napięcia prądnicy i napięcia sieci jest prawie równy zeru.

Sprawdzenie kolejności faz, równości częstotliwości i wskazania chwili, w której $\vartheta \approx 0$ wykonuje się za pomocą odpowiednich układów synchronizacyjnych. Schemat połączeń najprostszego układu synchronizacyjnego, tzw. synchronoskopu lampowego o świetle wirującym pokazano na rys. 7.28. Żarówka 1 jest dołączona do



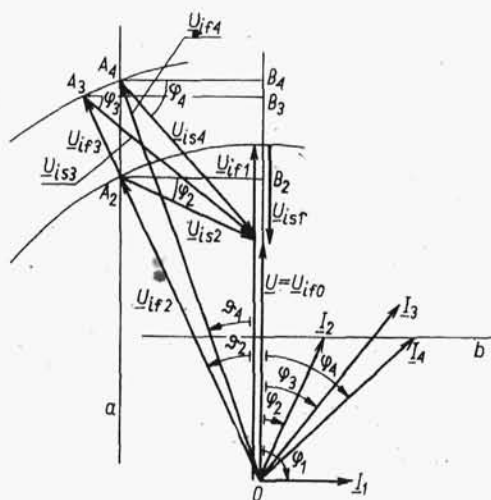
Rys. 7.28. Schemat połączeń synchronoskopu lampowego o świetle wirującym

zacisków tego samego noża łącznika zarówno po stronie prądnicy, jak i po stronie sieci. Połączenia żarówek 2 i 3 są odpowiednio skrzyżowane. Przy właściwej kolejności faz żarówki zapalają się i gasną kolejno tworząc „światło wirujące”. Przy niewłaściwej kolejności faz żarówki zapalają się i gasną jednocześnie. Kolejność faz można zmienić albo przez zmianę kierunku wirowania prądnicy (niemożliwe w turbogeneratorze), albo przez skrzyżowanie dwu przewodów łączących łącznik z prąd-

nicą albo łącznik z siecią. W chwili, kiedy $\vartheta \approx 0$ wszystkie żarówki świecą jednakowo jasno. Obecnie w elektrowniach stosuje się synchronizację automatyczną albo pół-automatyczną.

7.8.9.3. Regulacja mocy maszyny synchronicznej współpracującej z siecią sztywną

Regulacja mocy przepływającej przez maszynę synchroniczną, współpracującą z siecią sztywną zostanie omówiona w sposób uproszczony. Przyjmuje się mianowicie quasi-stacjonarny przebieg zjawisk oraz pomija się straty w prądnicie. Ilustracją takiej regulacji mocy jest rysunek 7.29. W stanie idealnego biegu jałowego, jaki



Rys. 7.29. Ilustracja regulacji mocy prądnicy synchronicznej

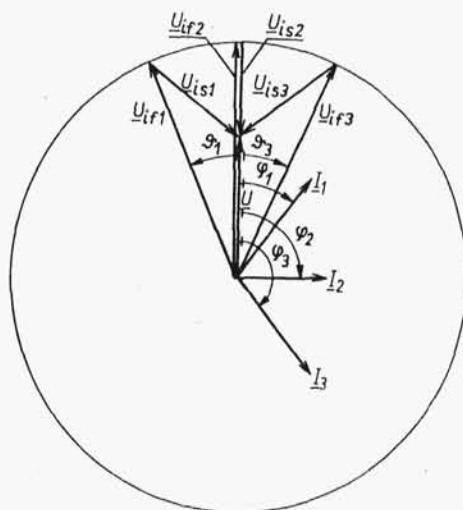
istnieje po dokonaniu idealnego zsynchronizowania prądnicy z siecią, napięcie indukowane w prądnicie U_{if0} jest równe napięciu sieci U , kąt obciążenia prądnicy $\vartheta = 0$, prąd prądnicy $I = 0$, moment elektromagnetyczny prądnicy M_e jest równy zero i równy mu moment M silnika napędzającego prądnicę (np. turbiny parowej) jest równy zero. Zwiększa się prąd wzbudzenia prądnicy bez zmiany momentu napędowego M na skutek czego w prądnicie indukuje się napięcie $U_{if1} > U_{if0} = U$, płynie prąd I_1 , pojawia się napięcie indukowane U_{is1} na reaktancji synchronicznej X , zamykające wykres wektorowy napięć. Kąt obciążenia prądnicy w dalszym ciągu jest równy $\vartheta_1 = 0$, prąd prądnicy I_1 jest opóźniony względem napięcia o $\pi/2$. Jest to prąd bierny indukcyjny. Prądnica jest przewzbudzona i oddaje do sieci moc bierną indukcyjną. Składowa czynna prądu prądnicy jest równa zero, moc czynna prądnicy jest równa zero. Moment elektromagnetyczny prądnicy jest równy zero, w dalszym ciągu zachodzi równowaga momentów $M_e = M = 0$. W tym stanie zwiększa się moment napędowy M (np. przez zwiększenie dopływu pary w turbinie parowej). Chwilowo jest $M > M_e$, wirnik prądnicy zwiększa prędkość kątową,

wartość napięcia indukowanego pozostaje (w przybliżeniu) nie zmieniona. Następuje odchylenie wektora \underline{U}_{if} od wektora \underline{U} aż do stanu, kiedy (przy pominięciu zjawiska kołysań) nastąpi równowaga momentów $M = M_e$. Wielkości odpowiadające nowemu stanowi ustalonemu są oznaczone na rys. 7.29 indeksem 2. Odcinek $\overline{A_2 B_2} = U_{is2} \cos \varphi_2 = XI_2 \cos \varphi_2$ jest miarą prądu czynnego $I_2 \cos \varphi_2$, mocy czynnej i momentu elektromagnetycznego. W wyniku zwiększenia momentu napędowego kąt φ zmniejszył się. Dla zwiększenia oddawanej przez prądnicę mocy biernej indukcyjnej zwiększa się prąd wzbudzenia przy niezmienionej wartości momentu napędowego. Z powodu dużego momentu inercji J wirnika prędkość kątowa zmienia się bardzo wolno i chwilowo można ją uważać za niezmienioną. Wielkości odpowiadające temu stanowi są oznaczone na rys. 7.29 indeksem 3. W tym stanie moment elektromagnetyczny (hamujący) $M_{e3} = cA_3 B_3$ jest większy od niezmienionego momentu napędowego $M_3 = M_2 = cA_2 B_2$. Prędkość kątowa wirnika zmniejsza się, kąt obciążenia prądnicy zmniejsza się, aż przy osiągnięciu przez ten kąt wartości ϑ_4 moment elektromagnetyczny $M_{e4} = cA_4 B_4$ zrówna się z niezmienionym momentem napędowym $M_4 = cA_4 B_4 = M_2 = cA_2 B_2$. Prąd ma w tym stanie wartość I_4 , a kąt fazowy wartość φ_4 .

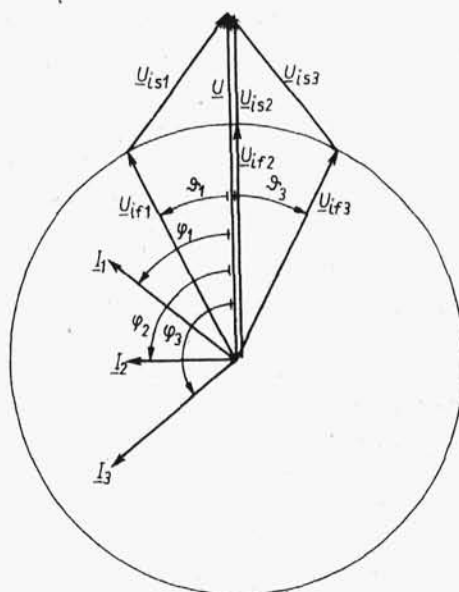
Przy zmianach prądu wzbudzenia a przy stałej wartości momentu napędowego w stanach quasi-stacjonarnych koniec wektora \underline{U}_{if} ślizga się po prostej a oddalonej od wektora \underline{U} o odcinek \overline{AB} , będący miarą stałej wartości momentu napędowego, momentu elektromagnetycznego i mocy czynnej, a koniec wektora prądu twornika \underline{I} ślizga się po prostej b wyznaczającej stałą wartość prądu czynnego $I \cos \varphi$. Przez odpowiednią zmianę prądu wzbudzenia i momentu napędowego można doprowadzić obciążenie prądnicy do stanu znamionowego, w którym jest $I = I_N$ oraz $\cos \varphi = \cos \varphi_N$.

Ze względu na skłonność maszyny synchronicznej do kołysań, zmian prądu wzbudzenia i momentu napędowego należy dokonywać, stosując niewielkie przyrosty.

Rysunek 7.30 jest ilustracją współpracy maszyny synchronicznej przewzbudzonej z siecią sztywną przy stałym prądzie wzbudzenia i przy zmieniającym momencie. Danemu stanowi ustalonemu prądnicy przewzbudzonej, obciążonej mocą czynną i bierną odpowiadają parametry oznaczone na rys. 7.30 indeksami 1. W miarę zmniejszania momentu napędowego kąt ϑ maleje. Przy $\vartheta = 0$ i w przybliżeniu $M = 0$ (na rys. 7.30 indeksy 2) prądnica oddaje tylko moc bierną indukcyjną (jest przewzbudzona), a jej moc czynna jest równa zero. Po zmianie charakteru momentu zewnętrznego (zamiana momentu napędzającego na moment hamujący) następuje dalsze opóźnienie wirnika, kąt ϑ zmienia znak, wektor prądu czynnego zmienia zwrot, przepływ mocy czynnej zmienia kierunek, maszyna synchroniczna znajduje się w stanie pracy silnikowej (na rys. 7.30 indeksy 3). Zwrot wektora prądu biernego pozostaje niezmieniony, maszyna synchroniczna jest w dalszym ciągu przewzbudzona, oddając do sieci moc bierną indukcyjną i pobierając z sieci moc czynną.

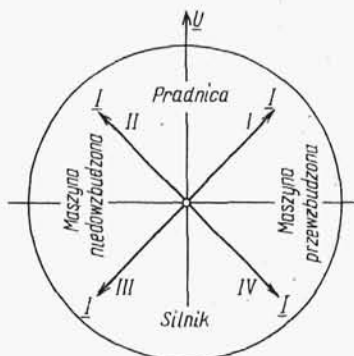


Rys. 7.30. Ilustracja pracy maszyny synchronicznej przewzbudzonej przy zmiennym momencie



Rys. 7.31. Ilustracja pracy maszyny synchronicznej niedowzbudzonej przy zmiennym momencie

Rysunek 7.31 jest ilustracją współpracy maszyny synchronicznej niedowzbudzonej z siecią sztywną przy stałym wzbudzeniu i przy zmieniającym momencie.

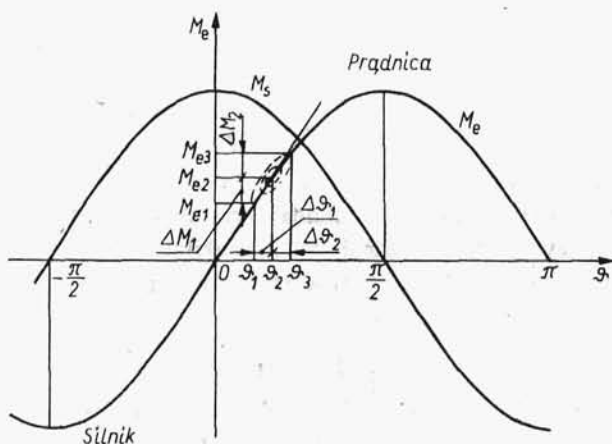


Rys. 7.32. Różne stany pracy maszyny synchronicznej

W zależności od charakteru momentu zewnętrznego (napędzający albo hamujący) oraz od wartości prądu wzbudzenia maszyna synchroniczna może pracować jak prądnicą albo jak silnik przewzbudzony albo niedowzbudzony (rys. 7.32).

7.8.9.4. Moment synchronizujący

Moment elektromagnetyczny M_e maszyny synchronicznej z biegunami utajonymi jest określony wzorem (7.189), a jego przebieg, zgodnie z rys. 7.21, pokazano na rys. 7.33. W stanie ustalonym $M_e = M$, tzn. moment elektromagnetyczny jest równy momentowi napędowemu M silnika napędzającego. W danym punkcie pracy w stanie ustalonym jest moment $M_1 = M_{e1}$ przy kącie obciążenia ϑ_1 . Po skokowym zwiększeniu momentu napędowego do wartości M_2 , moment napędowy staje się większy od hamującego (elektromagnetycznego) o $\Delta M_1 = M_2 - M_1$, co powoduje



Rys. 7.33. Moment synchronizujący właściwy maszyny synchronicznej z biegunami utajonymi

przyspieszenie ruchu wirnika i zwiększenie kąta obciążenia ϑ . Przy wzroście kąta obciążenia o $\Delta\vartheta_1 = \vartheta_2 - \vartheta_1$ do wartości ϑ_2 następuje równość momentów $M_2 = M_{e2}$ przy prędkości wirnika ω większej od prędkości synchronicznej ω_s . Na skutek inercji wirnik nie zatrzyma się w położeniu odpowiadającym kątowi ϑ_2 , lecz o $\Delta\vartheta_2 = \vartheta_3 - \vartheta_2$ dalej. Powoduje to powstanie w prądnicy dodatkowego momentu hamującego $\Delta M_2 = M_3 - M_2 = M_{e3} - M_{e2}$. W tym stanie następuje zrównanie prędkości $\omega = \omega_s$ ale przy momencie hamującym prądnicy M_{e3} większym od momentu napędowego M_2 . Następuje opóźnienie ruchu wirnika, który przechodzi kolejno przez punkt (ϑ_2, M_{e2}) i przy braku tłumienia dochodzi do punktu (ϑ_1, M_{e1}) , po czym cykl powtarza się. Gdyby zależność $M_e = f(\vartheta)$ miała przebieg prostoliniowy, byłoby $\Delta M_1 = \Delta M_2$ oraz $\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta_2$. Na skutek tłumienia, spowodowanego momentem od prądów w obwodach zamkniętych wirnika, tarcie o medium chłodzące i tarcie w łożyskach, kolejne odchylenia są coraz mniejsze i następuje nowy stan ustalony w punkcie (ϑ_2, M_{e2}) .

Przy odchyleniu się wirnika ze stanu równowagi o kąt $\Delta\vartheta$ pojawia się nadmiar (albo niedomiar) momentu ΔM_e , czyli przy odchyleniu się wirnika o jednostkę kąta pojawia się jednostkowy moment $\Delta M_e / \Delta\vartheta$. W granicy prowadzi to do pojęcia *momentu synchronizującego właściwego*

$$M_s = \frac{dM_e}{d\vartheta} \quad (7.195)$$

oraz do pojęcia *mocy synchronizującej właściwej*

$$P_s = \frac{dP_e}{d\vartheta} \quad (7.196)$$

W maszynie synchronicznej z biegunami utajonymi, zgodnie ze wzorami (7.189)

$$M_s = 3 \frac{1}{2\pi n} \frac{U_{if} U}{X_d} \cos \vartheta \quad (7.197)$$

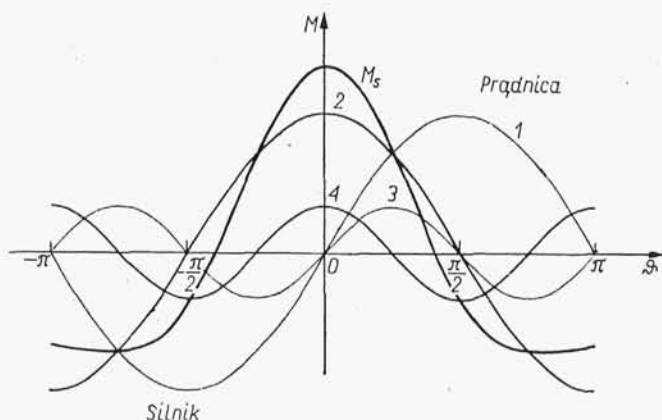
$$P_s = 3 \frac{U_{if} U}{X_d} \cos \vartheta \quad (7.198)$$

Przebieg tego momentu przedstawiono na rys. 7.33. Przy $-\pi/2 < \vartheta < \pi/2$ jest $M_s > 0$ i praca maszyny synchronicznej jest stabilna. Przy $\vartheta > \pi/2$ albo $\vartheta < -\pi/2$ jest $M_s < 0$ i praca maszyny synchronicznej jest niestabilna.

Zgodnie ze wzorami (7.184) i (7.185) w maszynie synchronicznej z biegunami wydajnymi

$$M_s = 3 \frac{1}{2\pi n} \left[\frac{U_{if} U}{X_d} \cos \vartheta + U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\vartheta \right] \quad (7.199)$$

$$P_s = 3 \left[\frac{U_{if} U}{X_d} \cos \vartheta + U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\vartheta \right] \quad (7.200)$$



Rys. 7.34. Moment synchronizujący właściwy M_s maszyny synchronicznej z biegunami wydatnymi

1 – moment elektromagnetyczny od wzbudzenia, 2 – moment synchronizujący właściwy od wzbudzenia, 3 – moment elektromagnetyczny reluktancyjny, 4 – moment synchronizujący reluktancyjny

Przebieg momentu synchronizującego właściwego w funkcji kąta obciążenia oraz przebiegi jego momentów składowych przedstawiono na rys. 7.34.

7.8.9.5. Przeciężalność statyczna

Moment elektromagnetyczny znamionowy maszyny synchronicznej z biegunami utajonymi

$$M_{eN} = 3 \frac{1}{2\pi n} \frac{U_{ifN} U_N}{X_d} \sin \vartheta_N \quad (7.201)$$

a moment elektromagnetyczny krytyczny (maksymalny) przy wzbudzeniu znamionowym

$$M_{ekN} = 3 \frac{1}{2\pi n} \frac{U_{ifN} U_N}{X_d} \quad (7.202)$$

Przeciężalność statyczna, zwana także *przeciężalnością momentem*, czyli stosunek momentu krytycznego przy wzbudzeniu znamionowym do momentu znamionowego, wynosi

$$u = \frac{M_{ekN}}{M_{eN}} = \frac{1}{\sin \vartheta_N} \quad (7.203)$$

Moment znamionowy może być wyrażony także jako $M_{eN} = P_N / \omega_N$, czyli

$$M_{eN} = 3 \frac{1}{2\pi n} U_N I_N \cos \varphi_N \quad (7.204)$$

więc przeciężalność statyczna

$$u = \frac{U_{ifN}}{X_d I_N \cos \varphi_N} \quad (7.205)$$

Ponieważ

$$\frac{U_{ifN}}{X_d} = I_{zN}$$

przy czym I_{zN} – prąd zwarcia przy wzbudzeniu znamionowym, zatem przeciążalność statyczna

$$u = \frac{I_{zN}}{I_N \cos \varphi_N} \quad (7.206)$$

Charakterystyka zwarcia ustalonego symetrycznego ma przebieg prostoliniowy, więc

$$\frac{I_{zN}}{I_N} = \frac{I_{fN}}{I_{fzN}}$$

a na tej podstawie

$$u = \frac{I_{fN}}{I_{fzN} \cos \varphi_N} \quad (7.207)$$

Ze wzoru (7.207) i wzoru (7.179) określającego stosunek zwarcia otrzymuje się wyrażenie na przeciążalność statyczną w postaci

$$u = K_z \frac{I_{fN}}{I_{f0N} \cos \varphi_N} \quad (7.208)$$

Przeciążalność statyczna jest odwrotnie proporcjonalna do znamionowego współczynnika mocy. Im mniejszy jest $\cos \varphi_N$ (przy przewzbudzeniu), tym większe jest U_{ifN} , a więc tym większy jest moment krytyczny i tym większa przeciążalność. Przeciążalność jest proporcjonalna do stosunku zwarcia K_z . Stosunek zwarcia zwiększa się ze wzrostem szczeliny między stojanem a wirnikiem, ponieważ wtedy zmniejsza się rozmagnesowujący wpływ reakcji twornika. Ponadto, stosunek zwarcia zwiększa się ze wzrostem indukcji w szczelinie, czyli ze wzrostem przepływu wzbudzenia, ponieważ wtedy także zmniejsza się rozmagnesowujący wpływ reakcji twornika.

Dla uzyskania dużej przeciążalności statycznej maszyny synchroniczne powinny mieć dużą szczelinę między stojanem a wirnikiem i duży przepływ wzbudzenia. Taka maszyna jest jednak duża i droga. Dlatego dla bardzo dużych turbogeneratorów, w celu uzyskania możliwie dużych mocy znamionowych przy granicznych wymiarach, dopuszcza się małą wartość stosunku zwarcia, np. $K_z = 0,35$. Dla zachowania stabilności pracy takie turbogeneratory wyposaża się w szybko działające regulatory wzbudzenia, które szybko zwiększają wartość prądu wzbudzenia przy wystąpieniu zakłóceń (np. przy spadku napięcia na zaciskach, albo przy kłótsaniach).

7.8.9.6. Wykres obciążalności turbogenerators

Wykres obciążalności turbogenerators określa dopuszczalne wartości parametrów turbogenerators przy jego długotrwałym ustalonym obciążeniu. Warunkami ograniczającymi obciążenie turbogenerators są:

(1) Nieprzekroczenie dopuszczalnej temperatury uzwojenia wzbudzenia, czyli nieprzekroczenie wartości znamionowej prądu wzbudzenia I_{fN} .

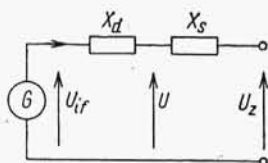
(2) Nieprzekroczenie dopuszczalnej temperatury uzwojenia twornika, czyli nieprzekroczenie wartości znamionowej prądu twornika I_N .

(3) Nieprzekroczenie momentu dopuszczalnego turbiny M_t , albo mocy dopuszczalnej turbiny P_t . W wartościach względnych jest $M_t = P_t$. (Często moc dopuszczalna turbiny jest większa od mocy znamionowej generatora, czyli turbina może być trwale obciążana powyżej swojej mocy znamionowej).

(4) Zachowanie stabilności czyli graniczna wartość kąta obciążenia turbogeneratora $\vartheta < \pi/2$.

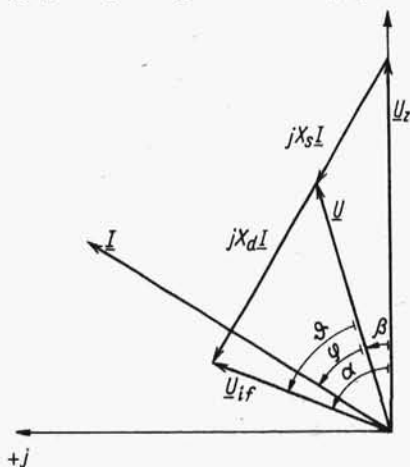
(5) Nieprzekroczenie dopuszczalnych temperatur skrajnych elementów turbogeneratora (skrajnych pakietów stojana i płyt dociskowych rdzenia stojana). Temperatury wyższe od dopuszczalnych mogą się pojawić zwłaszcza przy pracy generatora ze zmniejszonym wzbudzeniem.

Przy omawianiu wykresu obciążalności będą stosowane wartości względne bez zaznaczania tego w indeksach poszczególnych wielkości



Rys. 7.35. Schemat zastępczy turbogeneratora współpracującego z siecią

Na rysunku 7.35 przedstawiono schemat zastępczy układu turbogeneratora współpracującego z siecią, a na rys. 7.36 – uproszczony wykres wektorowy tego układu przy niedowzbudzeniu turbogeneratora. Niedowzbudzony turbogenerator o napięciu indukowanym U_{if} , reaktancji synchronicznej nienasyconej X_d , mający na zaciskach napięcie U jest dołączony odcinkiem linii o reaktancji sieci X_s do systemu energetycznego w punkcie o napięciu sztywnym U_z . Taki układ może być



Rys. 7.36. Wykres wektorowy układu turbogeneratora niedowzbudzonego i sieci

także rozpatrywany jak układ turbogeneratorsa o reaktancji $X_d + X_s$ współpracującego z siecią sztywną o napięciu U_z .

Moc pozorną (oddaną) na zaciskach turbogeneratorsa po odniesieniu wektorów \underline{U} oraz \underline{U}_{if} do kierunku wektora \underline{U}_z można wyznaczyć ze wzoru

$$\underline{S} = P + jQ = \underline{U}I^* \quad (7.209)$$

przy czym prąd turbogeneratorsa

$$\underline{I} = \frac{U_{if} e^{j\alpha} - U e^{j\beta}}{jX_d} \quad (7.210)$$

prąd sprzężony

$$\underline{I}^* = \frac{U_{if} e^{-j\alpha} - U e^{-j\beta}}{-jX_d} \quad (7.211)$$

a napięcie na zaciskach

$$\underline{U} = U e^{j\beta} \quad (7.212)$$

Na podstawie wzorów (7.209), (7.211) i (7.212) moc pozorną (oddaną) na zaciskach turbogeneratorsa

$$\underline{S} = \frac{U U_{if}}{X_d} e^{j(\beta - \alpha + \frac{\pi}{2})} - j \frac{U^2}{X_d} \quad (7.213)$$

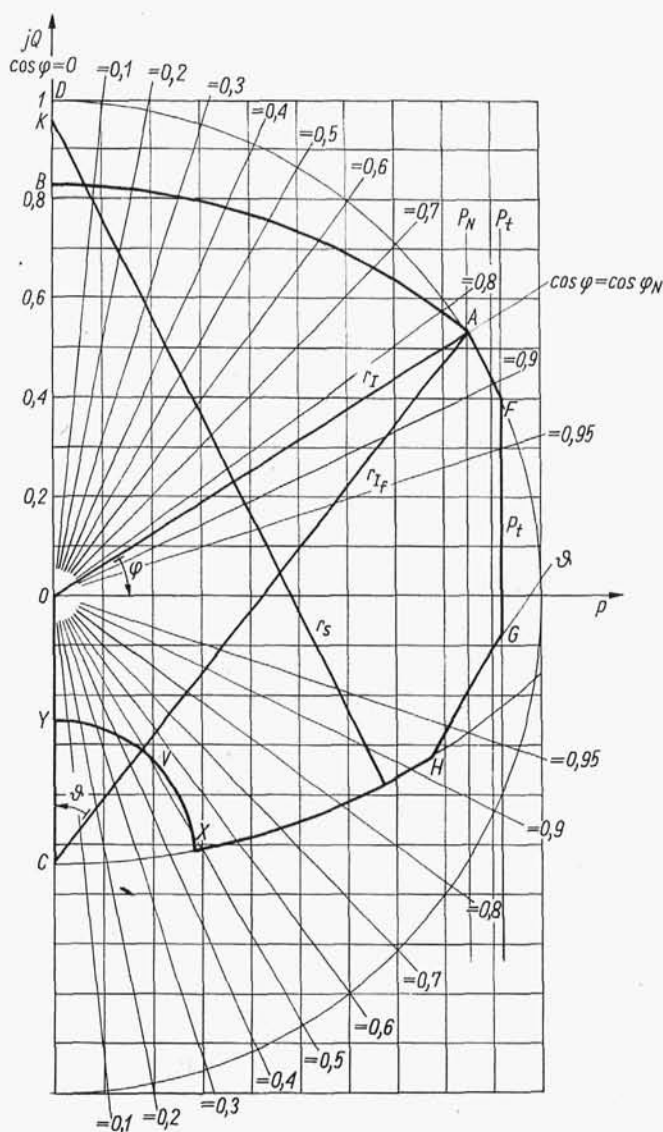
Równanie (7.213) jest równaniem okręgu (rys. 7.37) w układzie osi P, jQ , którego środek C jest względem początku układu współrzędnych O przesunięty o odcinek $\overline{OC} = U^2/X_d$ a promień $r_{If} = UU_{if}/X_d$. Odcinkiem tego okręgu jest łuk BA . Wartość względna napięcia nienasyconego U_{if} jest równa wartości względnej prądu wzbudzenia I_f , a wartość względna napięcia znamionowego U_{ifN} jest równa wartości względnej prądu wzbudzenia znamionowego I_{fN} . Przy napięciu znamionowym na zaciskach turbogeneratorsa $U = 1$ promień tego okręgu, zwanego *okręgiem wzbudzenia*, wynosi $r_{If} = I_f/X_d$. Sprężony prąd turbogeneratorsa można wyrazić następująco:

$$\underline{I}^* = I e^{-j(\beta + \varphi)} \quad (7.214)$$

Ze wzorów (7.214), (7.212) i (7.209) otrzymuje się

$$\underline{S} = P + jQ = UI e^{-j\varphi} \quad (7.215)$$

Jest to równanie okręgu, zwanego *okręgiem prądu twornika*. Środek tego okręgu leży w początku układu osi O , a jego promień równa się $r_I = UI$. Przy napięciu znamionowym $U = 1$ i prądzie twornika znamionowym $I = 1$ ten promień $r_I = 1$. Na rysunku 7.37 łuk AD jest częścią tego okręgu, stanowiącego ograniczenie pracy turbogeneratorsa ze względu na prąd twornika, czyli ze względu na nagrzewanie się uzwojeń twornika. Punkt A , będący punktem przecięcia łuku AD okręgu prądu



Rys. 7.37. Wykres obciążalności turbogenerators

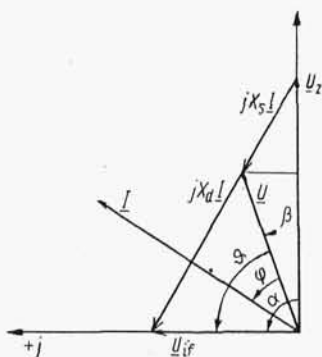
twornika z łukiem AB okręgu wzbudzenia jest punktem obciążenia znamionowego turbogenerators. Przy przyjęciu mocy pozornej znamionowej S_N za jednostkę mocy jest $P_N = \cos \varphi_N$.

Ograniczeniem pracy turbogenerators ze względu na moc (moment) turbiny jest prosta P_t .

Granicznym stanem pracy stabilnej turbogenerators jest jego praca przy kącie między napięciem U_z w punkcie sztywnym sieci i napięciem wzbudzenia U_{if}

równym $\alpha = \pi/2$, jak na rys. 7.38, na podstawie którego

$$U_{if} = U \frac{X_d + X_s}{X_s} \sin \beta \quad (7.216)$$



Rys. 7.38. Wykres wektorowy turbogenerators niedowzbudzonego pracujacego na granicy stabilnosci

Na podstawie wzoru (7.216) i (7.213) po wyzniesianiu zaleznosci $\sin \beta = \frac{e^{j\beta} - e^{-j\beta}}{2j}$ oraz $j = e^{j\frac{\pi}{2}}$ oraz po przyjeciu $\alpha = \pi/2$ otrzymuje sie wyrazienie na moc pozorna na zaciskach turbogenerators

$$\underline{S} = P + jQ = U^2 \frac{X_d + X_s}{2X_d X_s} e^{(2\beta - \frac{\pi}{2})} + jU^2 \left(\frac{X_d + X_s}{2X_d X_s} - \frac{1}{X_d} \right) \quad (7.217)$$

Jest to rownanie okregu stanowiacego ograniczenie zakresu pracy turbogenerators ze wzgledu na stabilnosc. Srodek K tego okregu jest wzgledem poczatku ukkladu wspolrzędnych O przesunięty w gore na osi jQ o odcinek

$$\overline{OK} = U^2 \left(\frac{X_d + X_s}{2X_d X_s} - \frac{1}{X_d} \right)$$

a promien okregu

$$r_s = U^2 \frac{X_d + X_s}{2X_d X_s}$$

Okrag ten przecina os urojona ponizej poczatku ukkladu wspolrzędnych O w punkcie C, będaćym srodkiem okregu ograniczajacego zakres pracy turbogenerators ze wzgledu na prad wzbudzenia.

Przy wzroscie wspolczynnika mocy w zakresie obciazen indukcyjnych, a tym bardziej przy pracy turbogenerators w zakresie obciazen pojemnosciovych (turbogenerators niedowzbudzony) wzrasta wartosc skladowej osiowej indukcji strumienia rozproszonego, przechodzacego przez skrajne elementy stojana (pakiety, plyty dociskowe) i turbogenerators. Ten strumien rozpraszony jest suma strumienia rozproszonego stojana i wirnika. Skladowa osiowa indukcji tego strumienia rozproszonego wywoluje prady plynace w skrajnych elementach turbogenerators, powodujace nadmierne nagrzewanie tych elementow. Linia ograniczajaca obciazenie turbogenerators ze wzgledu na nagrzewanie sie skrajnych elementow jest trudna do

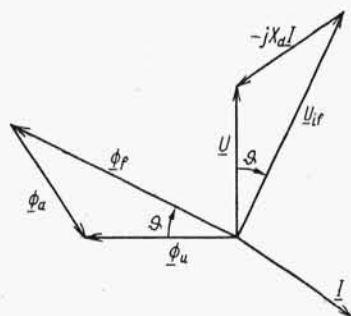
analitycznego ujęcia i wykreślenia jej na rysunku. Zwykle graniczne punkty obciążenia dopuszczalnego ze względu na nagrzewanie się skrajnych elementów wyznacza się eksperymentalnie. Połączenie tych punktów daje krzywą (na rys. 7.37 jest to krzywa 9) ograniczającą obciążalność turbogeneratora ze względu na nagrzewanie się skrajnych elementów.

Wzbudnicami turbogeneratorów niezbyt wielkich mocy są często prądnice prądu stałego bocznikowe, mające ograniczoną minimalną wartość napięcia ze względu na stabilność swojej pracy. Można przyjąć, że minimalny prąd wzbudnicy, powodujący minimalną stabilną wartość jej napięcia, powstającą na stałej rezystancji uzwojenia wzbudzenia turbogeneratora jest równy połowie prądu wzbudzenia turbogeneratora I_{f0N} , przy którym indukuje się napięcie $U_{if} = U_N$. Jeśli prąd twornika $I = 0$, to promień okręgu prądu twornika $r_I = 0$, punkt A pokrywa się z punktem O . Wtedy promień okręgu wzbudzenia $r_{If} = \overline{OC}$. Wtedy także zachodzi równość napięć $U = U_{if}$. Stąd wynika, że $\overline{OC} = I_{f0N}$. Z punktu C zatacza się łuk XVY promieniem $r = \overline{CY} = \overline{OC}/2$. Ten łuk oznacza ograniczenie pracy turbogeneratora ze względu na stabilność wzbudnicy.

Zakres dopuszczalnych obciążeń turbogeneratora jest ograniczony krzywą BAFGHXVY.

7.8.10. Silnik synchroniczny

Na rysunku 7.39 dany jest uproszczony wykres wektorowy silnika synchronicznego z biegunami utajonymi w stanie nienasyconym. Strumień Φ_u oznacza strumień odpowiadający napięciu U na zaciskach maszyny, czyli strumień wzbudzenia prąd-



Rys. 7.39. Wykres wektorowy silnika synchronicznego

nicy o bardzo dużej mocy, tj. prądnicy zastępującej sieć sztywną. Trójkąt strumieni jest podobny do trójkąta napięć, więc zgodnie ze wzorem (7.189) wyrażenie na moment elektromagnetyczny wytworzony w silniku może być napisane w postaci

$$\bullet \quad M_e = c\Phi_f \Phi_u \sin \vartheta \quad (7.218)$$

W pierwszej chwili rozruchu wirnik jest nieruchomy. Gdyby dla dokonania rozruchu silnika synchronicznego zasilić jego uzwojenie prądem wzbudzenia i dołączyć uzwojenie twornika do napięcia sieci, powstałby nieruchomy strumień Φ_f oraz wirujący strumień Φ_u . Kąt ϑ zmieniałby wartość od 0 do 2π , moment M_e zmie-

niałby znak i działałby na przemian w różnych kierunkach, wirnik silnika nie zostałby wprowadzony w ruch obrotowy. Strumień Φ_f może być wzniecony dopiero wtedy, kiedy wirnik wiruje prawie synchronicznie.

Rozróżnia się dwa sposoby rozruchu silnika synchronicznego: *rozruch synchroniczny i asynchroniczny*. Przy rozruchu synchronicznym silnik synchroniczny, podobnie jak prądnica synchroniczna, jest napędzany pomocniczym silnikiem. Po doprowadzeniu do prędkości prawie synchronicznej dokonuje się synchronizacji silnika z siecią, jak synchronizację prądnicy synchronicznej, po czym silnik pomocniczy może być odłączony. Przy istnieniu momentu hamującego maszyna synchroniczna wchodzi w zakres pracy silnikowej. Wadą tego sposobu jest konieczność stosowania silnika pomocniczego z regulowaną prędkością obrotową (w pobliżu prędkości synchronicznej). Dlatego rozruch synchroniczny silnika synchronicznego nie jest stosowany.

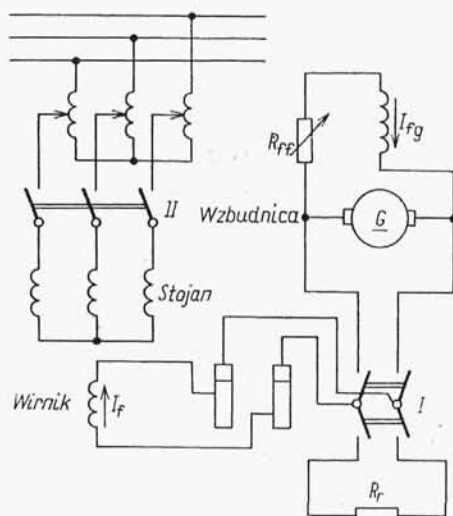
Przy rozruchu asynchronicznym zjawiska przebiegają jak w silniku indukcyjnym klatkowym. Silnik synchroniczny ma w wirniku zamknięte obwody – klatkę rozruchową albo lite nabiegunniki. Po dołączeniu uzwojenia twornika do sieci powstaje strumień wirujący stojana, dzięki czemu silnik synchroniczny, pracujący jak silnik indukcyjny, dochodzi do prędkości prawie synchronicznej. Wtedy uzwojenie wzbudzające dołącza się do źródła prądu stałego (wzbudnicy), pojawia się strumień Φ_f , powstaje moment elektromagnetyczny określony wzorem (7.218), którego znak zmienia się z bardzo małą częstotliwością i przy odpowiednim położeniu wirnika silnik „wpada w synchronizm” i po zaniknięciu kołysań wiruje dalej synchronicznie.

Na początku rozruchu strumień twornika wiruje względem uzwojenia wzbudzającego z dużą prędkością. Gdyby uzwojenie wzbudzające było otwarte, indukowałoby się w nim napięcie o niebezpiecznie dużej wartości (niebezpieczeństwo dla izolacji i obsługi).

Uzwojenie wzbudzające jest uzwojeniem jednofazowym. Jeśli uzwojenie to jest zwarte, to płynie w nim prąd jednofazowy niedopuszczający do powstania przepięć i wywołujący strumień oscylujący. Taki strumień rozkłada się na dwa strumienie wirujące względem wirnika z prędkością synchroniczną w kierunkach przeciwnych. Moment od strumienia wznieconego przez prąd indukowany w uzwojeniu wzbudzającym i wirującego w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania wirnika, przeszkadza rozruchowi, więc wartość prądu indukowanego w uzwojeniu wirnika musi być ograniczona. Dlatego na czas rozruchu zwiera się uzwojenie wzbudzające przez opornik o rezystancji 5 ÷ 10-krotnie większej od rezystancji uzwojenia wzbudzającego.

Na rysunku 7.40 przedstawiono schemat połączeń układu do rozruchu asynchronicznego silnika synchronicznego. Dla zmniejszenia prądu rozruchowego stojana stosuje się czasem, jak na rys. 7.40, zasilanie stojana silnika synchronicznego przez autotransformator o zmiennej przekładni. Początkowy prąd rozruchowy jest proporcjonalny do napięcia, a moment początkowy do kwadratu napięcia. Uzwojenie wirnika zwiera się (przez ustawienie łącznika I w odpowiedniej pozycji) przez

rezystancję R_r i do uzwojenia twornika doprowadza się napięcia (przez zamknięcie łącznika II). Po uzyskaniu ustalonej prędkości asynchronicznej (jest to prędkość prawie synchroniczna) uzwojenie wzbudzące dołącza się do obwodu wzbudnicy. Silnik synchroniczny wpada w synchronizm i dalej wiruje synchronicznie. Przez regulację rezystancji R_{rf} uzyskuje się odpowiednią wartość prądu wzbudzenia I_{fg} , napięcia wzbudnicy oraz prądu wzbudzenia silnika I_f .



Rys. 7.40. Schemat połączeń układu do rozruchu asynchronicznego silnika synchronicznego

Można także stosować *rozruch częstotliwościowy* silnika synchronicznego. Polega on na tym, że uzwojenia twornika wzbudzonego silnika synchronicznego zasilają się ze źródła napięcia o częstotliwości regulowanej od zera do częstotliwości znamionowej i o odpowiednio regulowanej wartości napięcia. Skomplikowany rozruch silnika synchronicznego i jego wysoka cena są jego wadami, powodującymi, że stosuje się te silniki tylko o odpowiednio dużej mocy znamionowej (np. powyżej kilkunastu kilowatów). Najczęściej silniki synchroniczne są budowane jako maszyny z biegunami wydutnymi.

Zaletami silnika synchronicznego są:

- (1) Możliwość pracy w zakresie przewzbudzenia, dzięki czemu silnik synchroniczny może być źródłem mocy biernej indukcyjnej, oddawanej do sieci.
- (2) Prostoliniowa zależność momentu silnika synchronicznego od napięcia sieci, dzięki czemu moment silnika synchronicznego mniej zależy od wahań napięcia w sieci, niż moment silnika indukcyjnego, który jest proporcjonalny do kwadratu napięcia sieci.
- (3) Duża szczelina, co daje dużą mechaniczną pewność pracy.
- (4) W niektórych napędach – sztywność charakterystyki mechanicznej, tzn. prędkość kątowna (obrotowa) niezależna od wartości momentu hamującego.

Regulację prędkości kątovej silnika synchronicznego można uzyskać przez zasilanie go ze źródła o regulowanej częstotliwości i odpowiednio regulowanej wartości napięcia.

7.8.11. Kompensator synchroniczny

Kompensator synchroniczny jest to współpracująca z siecią maszyna synchroniczna z momentem na wale równym zeru. W takim stanie pracy moc czynna płynąca z sieci do maszyny jest równa stratom powstającym w maszynie. Pomijając te straty, można w przybliżeniu przyjąć, że moc czynna elektryczna kompensatora jest równa zeru.

Większość odbiorników w systemie energetycznym ma charakter indukcyjny (transformatory, silniki indukcyjne, piece indukcyjne itp.). Stąd zachodzi potrzeba dostarczania mocy indukcyjnej do systemu energetycznego obciążonego. Nieobciążone linie elektryczne wysokiego napięcia są odbiornikami pojemnościowymi, ponieważ płynie przez nie prąd ładowania linii. W takim stanie pracy do systemu energetycznego dostarczana jest moc pojemnościowa (pobierana jest z systemu moc indukcyjna). Przepływ prądu indukcyjnego przez linię powoduje powstawanie w niej spadków napięć, a przepływ prądu pojemnościowego może spowodować wzrost napięcia. Przez oddziaływanie na spadki napięć w sieciach można regulować rozpyły mocy w systemie energetycznym.

Kompensator synchroniczny przewzbudzony dostarcza do systemu energetycznego moc bierną indukcyjną, a niedowzbudzony dostarcza do systemu moc bierną pojemnościową. Kompensator synchroniczny powinien być dołączony do systemu energetycznego możliwie blisko dużych odbiorników (dużych zakładów przemysłowych).

Przez zastosowanie kompensatora synchronicznego uzyskuje się:

- zmniejszenie wahań napięcia w sieci;
- możliwość regulacji rozpyłu mocy;
- lepsze wykorzystanie sieci, prądnic, transformatorów i urządzeń rozdzielczych, które odciążone od mocy biernej mogą wytworzyć, przetworzyć albo przesłać większą moc czynną.

Zwiększenie prądu wzbudzenia I_f kompensatora przewzbudzonego powoduje zwiększenie prądu biernego (indukcyjnego) twornika, czyli zwiększenie mocy indukcyjnej oddawanej do sieci. Przy odpowiednim zmniejszeniu prądu wzbudzenia I_f prąd twornika $I \approx 0$. Dalsze zmniejszenie prądu wzbudzenia powoduje przejście kompensatora w stan niedowzbudzenia. Wtedy prąd twornika staje się prądem pojemnościowym. Zmniejszanie prądu wzbudzenia w tym stanie powoduje wzrost prądu pojemnościowego twornika i wzrost mocy pojemnościowej oddawanej do sieci.

Kompensator pracuje przy kącie obciążenia $\vartheta \approx 0$. W tym stanie pracy, zgodnie z wykresem wektorowym pokazanym na rys. 7.30, prąd twornika przy napięciu znamionowym

$$\underline{I} = -j \frac{U_{if} - U_N}{X_d}$$

Przy przerwaniu wzbudzenia prąd twornika

$$\underline{I}_p = j \frac{U_N}{X_d}$$

a moc pozorna

$$S_p = m U_N I_p = m \frac{U_N^2}{X_d}$$

Moc pozorna znamionowa

$$S_N = m U_N I_N$$

Stosunek mocy pozornej przy przerwaniu wzbudzenia do mocy pozornej znamionowej

$$\gamma = \frac{S_p}{S_N} = \frac{U_N}{X_d I_N} \quad (7.219)$$

Kompensator pracuje przy $\vartheta \approx 0$, więc jego moment synchronizujący jest duży, a przeciążalność momentem w tym stanie pracy nie stanowi istotnego problemu. Dlatego kompensatory mają zwykle małą szczelinę, czyli dużą reaktancję synchroniczną. Zwykle względna wartość reaktancji synchronicznej kompensatorów $X_{d\text{rel}} = 1,5 \div 2,3$. Wzór (7.219) można przedstawić w postaci

$$\gamma = \frac{1}{X_{d\text{rel}}} \quad (7.220)$$

Wtedy $\gamma \approx 0,45 \div 0,67$.

Dla uzyskania możliwie dużej wartości współczynnika γ , niekiedy trzeba zmienić kierunek prądu wzbudzenia kompensatora. W celu zapobieżenia wypadnięciu kompensatora z synchronizmu w takim stanie pracy, buduje się zwykle kompensatory jako maszyny z biegunami wydawnymi.

Kompensatory są wyposażone w automatyczne regulatory wzbudzenia, dzięki czemu napięcie na zaciskach (w punkcie sieci, do którego jest dołączony kompensator) ma wartość stałą, a regulator automatycznie zmienia wartość (i charakter) mocy biernej dostarczanej do sieci.

7.9. STAN NIEUSTALONY SYMETRYCZNY PRĄDNIICY

7.9.1. Wiadomości ogólne

Równania równowagi maszyny synchronicznej z jednym uzwojeniem wzbudzającym w osi podłużnej, z jednym obwodem tłumienia w osi podłużnej, z jednym obwodem tłumienia w osi poprzecznej i z trzema obwodami fazowymi twornika (czyli odpowiednio z trzema obwodami twornika w osiach $d, q, 0$) tworzą układ 7 równań różniczkowych nieliniowych z 14 niewiadomymi. Są to układy równań (7.127) albo (7.123), albo (7.100), albo (7.70). Dodatkowe 7 równań wyznaczające 7 niewiadomych można