

WŁADYSŁAW PASZEK

Katedra Maszyn Elektrycznych

PRZYBLIŻONA ANALIZA GENERATORA SYNCHRONICZNEGO
JAKO OBIEKTU REGULACJI

Streszczenie. Analiza elektromagnetycznych nieustalonych przebiegów generatora opiera się na transformacji Parka-Goriewa i na schemacie zastępczym obwodów maszyny w osi d , q , o .

Ruch mechaniczny turboszespołu jest opisany równaniem momentów obrotowych. W przybliżonej analizie generatora jako obiektu regulacji przyjmuje się szereg założeń upraszczających. Rozpatrzono przypadek pracy samotnej generatora przy obciążeniu czynno-indukcyjnym i czynno-pojemnościowym oraz przypadek współpracy z siecią sztywną przy małych wychyleniach kąta mocy od wartości ustalonej i przy dużych zmianach kąta mocy.

1. Schemat zastępczy maszyny synchronicznej

Ogólna analiza przebiegów nieustalonych maszyny synchronicznej jest skomplikowana. Uproszczenie analizy otrzymuje się przy założeniu symetrii elektrycznej obwodów twornika. Dwuosiowa symetria elektryczna i magnetyczna budowy magnetycy sugeruje zastosowanie dwuosiowej teorii maszyny synchronicznej do analizy jej pracy. W teorii tej symetryczny trójfazowy układ uzwojeń twornika a , b , c , wirujący względem magnetycy zastępujemy nieruchomym dwuosiowym układem uzwojeń d , q i układem zerowym o (który może wystąpić tylko w układzie czteroprzewodowym). Przy wprowadzeniu dwuosiowego modelu maszyny synchronicznej wielkości fazowe trójfazowego twornika W_a, W_b, W_c jak np. napięcia $U_{a,b,c}$ prądy $I_{a,b,c}$ liniczoowe $\Psi_{a,b,c}$ transformuje się przy pomocy transformacji Parka do wielkości osiowych W_d, W_q, W_o zwią-

zanych z twornikiem zastępczym maszyny synchronicznej, nieruchomym względem magneśnicy

$$\begin{aligned}
 W_d &= \frac{2}{3} \sum_{k=a,b,c} W_k \cos v_k, \\
 W_q &= \frac{-2}{3} \sum_{k=a,b,c} W_k \sin v_k, \\
 W_o &= \frac{1}{3} \sum_{k=a,b,c} W_k,
 \end{aligned} \tag{1a}$$

gdzie:

v_k - kąt elektryczny zawarty między osią fazy k , a osią podłużną magneśnicy.

Przy stałej prędkości kątowej $\omega = \frac{dv_k}{dt}$ mamy

$$v_k(t) = v_{ok} + \omega t,$$

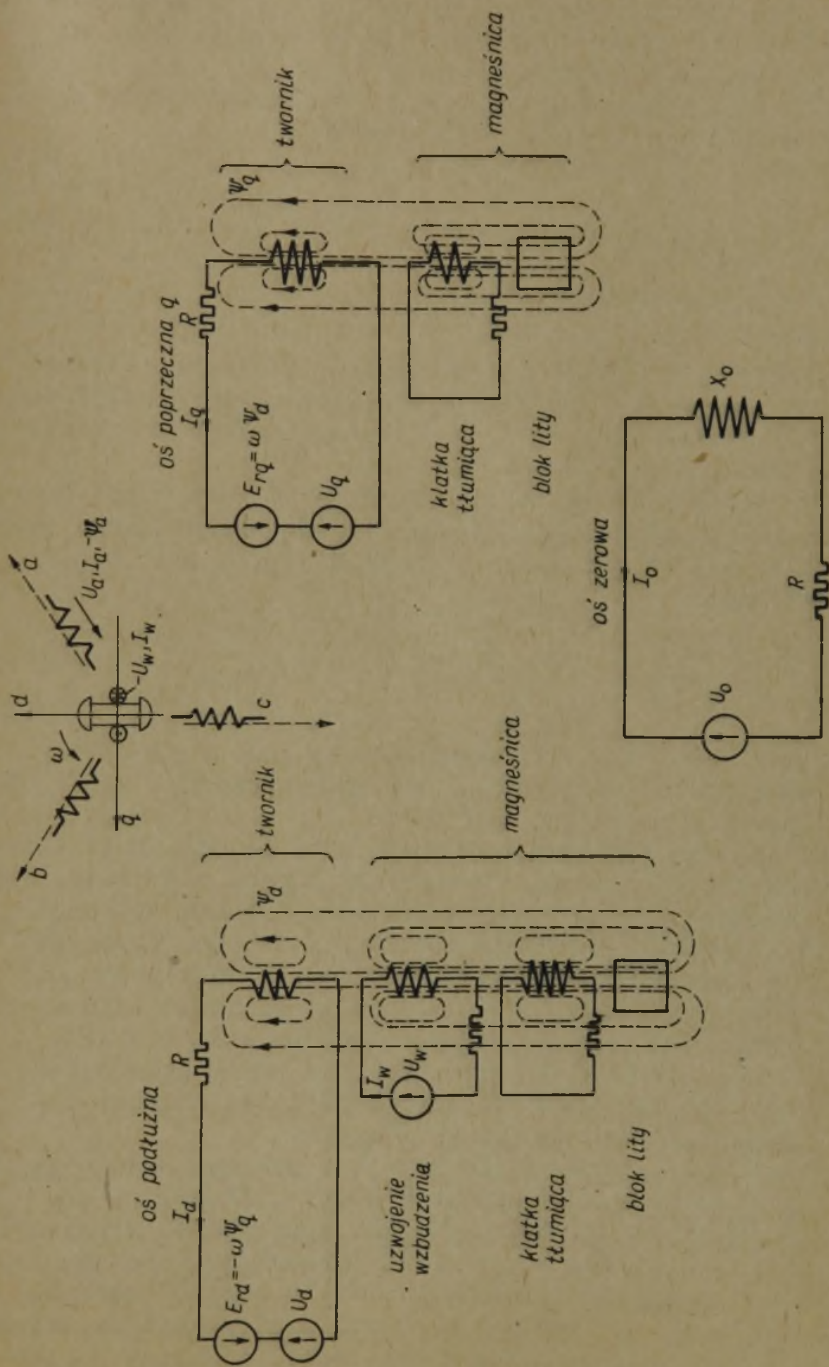
przy czym

$$v_{oa} = v_o,$$

$$v_{ob} = v_o + \frac{4\pi}{3},$$

$$v_{oc} = v_o + \frac{2\pi}{3}.$$

Na rys.1 zaznaczono na uzwojeniach twornika, względem których wiruje magneśnica strzałki kierunku napięcia, prądu i liniozwojów fazy a . Zaleta przejścia na nieruchomy układ osiowy twornika polega na możliwości analizy skomplikowanych przebiegów nieustalonych maszyny wirującej na podstawie schematów zastępczych o stałych parametrach przy rozdzielaniu schematu zastępczego generatora dla obwodów elektrycznych ułożonych w osi podłużnej d , poprzecznej q i zerowej o (rys.1). W przypadku ustalonego obciążenia sy-



Rys.1. Schemat zastępczy maszyny synchronicznej w osi $d, q, 0$

metrycznego, osiowe prądy twornika I_d, I_q są prądami stałymi; składowa zerowa oczywiście nie występuje. Jest to przypadek obciążenia wyrównanego.

Przejście z wielkości osiowych na wielkości fazowe jest proste, wynika z przekształcenia równań (1a)

$$W_k = W_d \cos \psi_k - W_q \sin \psi_k + W_0 \quad (1b)$$

$$k=a,b,c$$

Jeśli składowa zerowa nie występuje, wielkości osiowe W_d i W_q można uważać za składowe osiowe wektora uogólnionego \hat{W} . Wartości fazowe W_k są rzutami wektora uogólnionego na osie faz $k = a, b, c$.

Wektor uogólniony W można przedstawić jako kompleksor na płaszczyźnie zespolonej $\hat{W} = W_d + j W_q$ magneśnicy, przyporządkując osi d oś liczb rzeczywistych, a osi q oś liczb urojonych

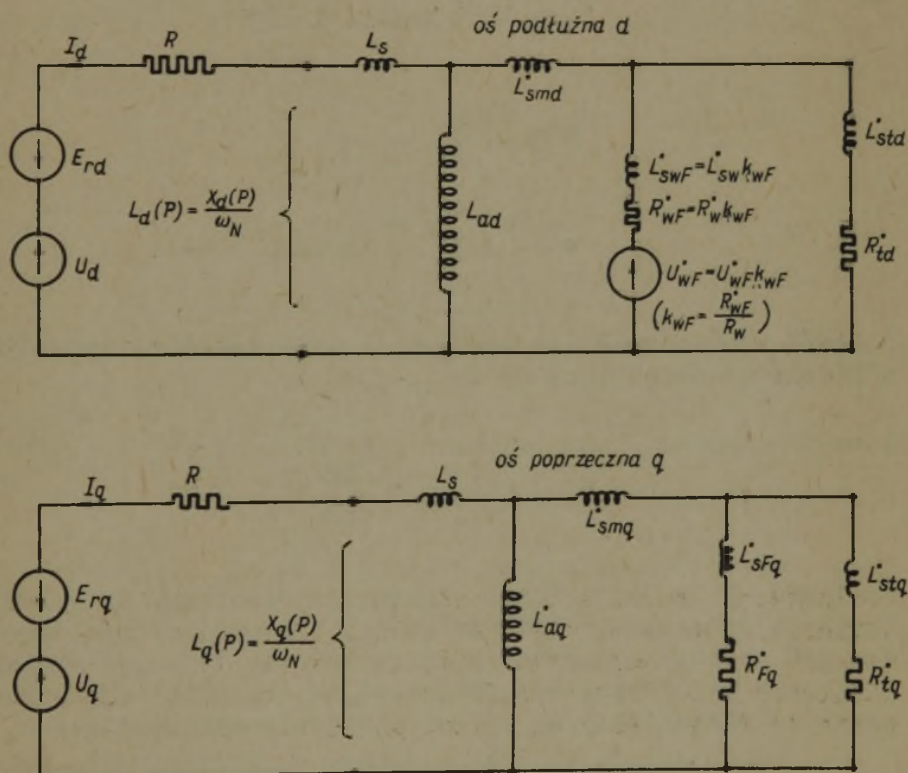
$$\hat{W} = W_d + j W_q \quad (1c)$$

Schemat zastępczy dla składowej zerowej jest najprostszy, przedstawia bowiem szeregowy układ indukcyjności L_0 i oporności czynnej jednej fazy twornika.

Przyjmuje się idealizujące założenie, że uzwojenia twornika są rozłożone sinusoidalnie wzdłuż obwodu twornika. Przy takim uzwojeniu prąd zerowej kolejności faz nie wytwarza strumienia przenikającego do magneśnicy i w konsekwencji obwody magneśnicy nie figurują w schemacie zastępczym dla osi 0. Uzwojenie twornika o rozłożeniu sinusoidalnym wytwarza przepływ o kształcie sinusoidalnym wzdłuż obwodu twornika. Liniozwoje ψ_k są wytworzone przez podstawową harmoniczną strumienia. W rzeczywistości ten schemat zastępczy jest tylko pewnym przybliżeniem.

O wiele bardziej skomplikowany jest schemat zastępczy sprzężonych obwodów elektrycznych w osi podłużnej i poprzecznej. W przypadku dwóch obwodów sprzężonych otrzymujemy schemat zastępczy znany z teorii transformatora dwuuzwojeniowego. W przypadku trzech, lub wielu obwodów sprzężonych sporządzenie dokładnego schematu zastępczego następuje z trudnością. Przy upraszczającym założeniu, że każdy z obwodów magneśnicy sprzęga się idealnie ze wspólnym strumieniem

głównym magniesnicy i swoim własnym strumieniem rozproszenia, otrzymuje się uproszczony schemat zastępczy, podobnie jak w transformatorze trój- lub wielouzwojeniowym. Skomplikowanie schematu zastępczego jest spowodowane przez blok litwy magniesnicy, w którym powstają obwody elektryczne prądów wirowych sprzężone magnetycznie z uzwojeniem wzbudzenia i ewentualnej klatki tkumiacej. Analiza wpływu bloku litwego magniesnicy prowadzi do schematu zastępczego, na którym blok litwy reprezentowany jest przez nieskończoną liczbę obwodów prądów wirowych. Oczywiście taki schemat zastępczy jest mało przydatny do praktycznych obliczeń przebiegów nieustalonych generatora. Zachodzi konieczność wprowadzenia uproszczenia schematu kosztem jego dokładności.



Rys.2a. Uproszczony schemat zastępczy w osi d,q

Rys.2a przedstawia taki uproszczony schemat zastępczy dla sprzężonych obwodów w osi podłużnej i poprzecznej generatora. Po sprowadzeniu wszystkich parametrów obwodów magnetycznej na stronę twornika oznaczamy je w układzie jednostek względnych, przyjmując zwykle jako wartości odniesienia dla napięcia i prądu dane znamionowe uzwojenia jednej fazy twornika generatora (wartości maksymalne) dla mocy znamionowej moc pozorną generatora, zaś dla pulsacji (prędkości kątowej mierzonej elektryczną miarą łukową) znamionową pulsację generatora

$$I_{\text{odn}} = I_{N \text{ max}} = I_N \sqrt{2},$$

$$U_{\text{odn}} = U_{N \text{ max}} = U_N \sqrt{2},$$

$$\omega_{\text{odn}} = \omega_N,$$

$$P_{\text{odn}} = S_N = \frac{3}{2} I_N \text{ max } U_N \text{ max}$$

Wartość odniesienia dla impedancji jest ilorazem wartości odniesienia napięcia i prądu.

$$R_{\text{odn}} = X_{\text{odn}} = \frac{U_{\text{odn}}}{I_{\text{odn}}},$$

Wielkość W w jednostkach względnych oznaczamy symbolem \underline{W} . Wartości odniesienia dla wielkości, występujących w sprowadzonych obwodach magnetycznej są oczywiście te same. Ponieważ nie znamy współczynników sprowadzających, przeliczamy raczej wartości odniesienia na stronę uzwojenia wzbudzenia.

$$I_{w \text{ odn}} = I_{wji} \frac{X_{ad}}{X_{ad}}$$

$$U_{w \text{ odn}} = \frac{I_{\text{odn}} \cdot U_{\text{odn}}}{I_{w \text{ odn}}} \frac{3}{2} = 3 \frac{U_N I_N}{X_{ad} I_{wji}},$$

$$R_{w \text{ odn}} = \frac{U_{w \text{ odn}}}{I_{w \text{ odn}}},$$

przy czym I_{wji} - idealny prąd wzbudzenia przy znamionowym biegu jałowym maszyny synchronicznej o nienasyconym obwodzie magnetycznym (przy biegu jałowym i przy napięciu oraz częstotliwości znamionowej).

Moment maszyny synchronicznej w jednostkach względnych odnosimy do momentu przy znamionowej mocy pozornej i przy $\cos \varphi = 1$

$$M_{\text{odn}} = \frac{S_N P_b}{\omega_N},$$

przy czym

P_b - liczba par biegunów magnesu.

Uproszczenie schematu zastępczego polega na uwzględnieniu w nim tylko dwóch zastępczych obwodów prądów wirowych o dużej f o małej stałej czasowej.

Równania napięć fazowych twornika przy przyjętej kierunku

$$U_k = \frac{d\psi_k}{dt} - I_k R, \quad (k = a, b, c) \quad (2a)$$

gdzie:

R - symetryczna oporność czynna uzwojenia fazy twornika, można przekształcić, zgodnie z równaniem (1a), w układ równań osiowych napięć twornika

$$U_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q - I_d R \quad (2b)$$

$$U_q \approx \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d - I_q R \quad (2b)$$

$$U_o = \frac{d\psi_o}{dt} - I_o R$$

Równania napięć obwodów magneśnicy nie wymagają przekształcenia. Np. dla obwodu wzbudzenia otrzymamy

$$U_w = \frac{d\psi_w}{dt} + I_w R_w,$$

gdzie

R_w - oporność czynna uzwojenia wzbudzenia.

Obwody twornika i magneśnicy na schemacie zastępczym są przedstawione analogicznie jak obwody transformatora wielo-uzwojeniowego. Strony pierwotna w osi podłużnej, bądź poprzecznej przewodzi prąd osiowy twornika I_d , bądź I_q wytworzony przez przekształcone, zgodnie z równaniem (1a), napięcie twornika U_d , bądź U_q i napięcie rotacji $E_{rd} = -\omega\psi_q$ bądź $E_{rq} = \omega\psi_d$. Napięcie rotacji występuje w schemacie zastępczym jako konsekwencja unieruchomienia układu twornika względem magneśnicy przy transformacji Parka. Przy zerowej prędkości kątowej magneśnicy ($\omega = 0$) znika w schemacie zastępczym napięcie rotacji.

Po stronie wtórnej obwód uzwojenia wzbudzenia jest zasilany napięciem wzbudzenia U_w , pozostałe obwody magneśnicy nie są zasilane. Gałąź L_{sF} , R_F bądź L_{sFh} i R_{Fh} reprezentuje na schemacie zastępczym sprowadzoną indukcyjność rozproszenia i oporność czynną podstawowej strugi prądów wirowych bloku litego o dużej stałej czasowej, bądź strugi prądów wirowych bloku litego o małej stałej czasowej. (Sprowadzone wartości oznaczono kropką).

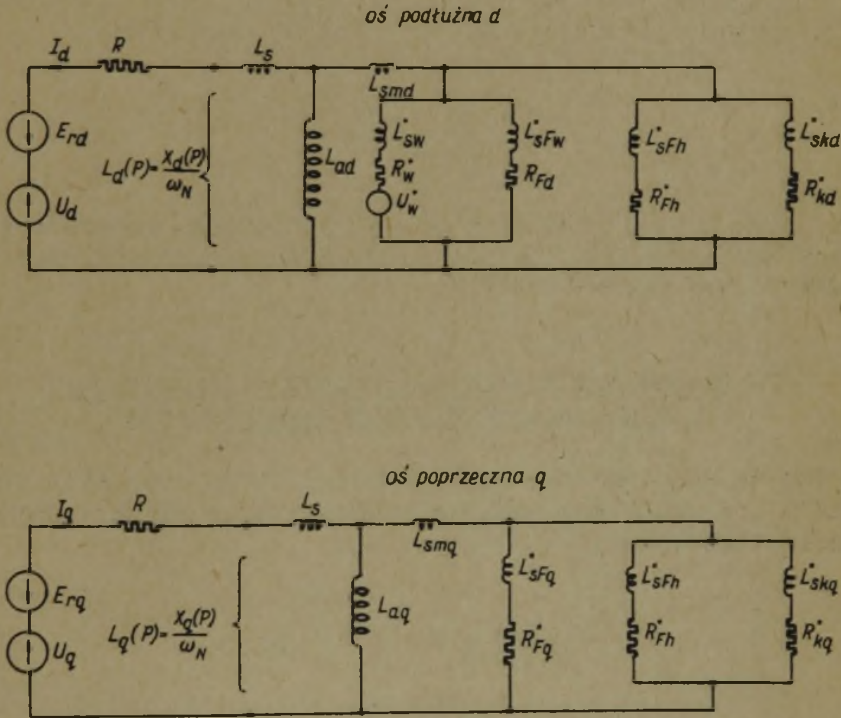
Gałąź L_{sk} i R_k reprezentuje analogiczne parametry klatki tłumiącej.

Jeżeli założymy, że w przybliżeniu zachodzi proporcja

$$\frac{L_{sF}}{R_F} \approx \frac{L_{sW}}{R_w} = T_{sWF} \quad \text{oraz} \quad \frac{L_{sFh}}{R_{Fh}} \approx \frac{L_{skh}}{R_k} = T_{st(d,q)}$$

można przeprowadzić transfigurację obu par gałęzi magnesnicy i otrzymamy schemat zastępczy o dwóch równoważnych obwodach magnesnicy zaznaczonych na rys.2b. Na rys.2a jest uwidocznione zastępcze napięcie wzbudzenia U_w oraz zastępcza oporność R_w . Napięcie magnesnicy generatora E_m jest proporcjonalne do strumienia, wytworzonego przez prąd magnesujący I_{ad} płynący w indukcyjności L_{ad}

$$E_m = \omega N L_{ad} I_{ad}$$



Rys.2b. Uproszczony schemat zastępczy w przypadku podobieństwa elektromagnetycznego obwodów magnesnicy

Przy biegu jałowym generatora

$$\underline{\omega} E_m = \underline{U}_q = \underline{U}_{\max}$$

$$\underline{I}_{ad} = \underline{I}_w$$

Indukcyjność oddziaływania L_{ad} jest wartością stałą przy nienasyconym obwodzie magnetycznym. Nasycenie powoduje zmniejszenie tej indukcyjności L_{ad} . Przy nasyceniu indukcyjność L_{ad} jest funkcją monotonicznie malejącą prądu I_{ad} .

W przypadku maszyny synchronicznej chętniej operujemy, reaktancjami, aniżeli indukcyjnościami. Definiujemy

$$X = \omega_N L,$$

przy czym ω_N - znamionowa pulsacja napięcia generatora, równa znamionowej prędkości kątowej magneśnicy, wyrażonej w elektrycznej mierze łukowej.

2. Podstawowe parametry maszyny synchronicznej o nienasyconym obwodzie magnetycznym

Impedancja operatorowa liczona od strony zacisków twornika w osi podłużnej bądź poprzecznej przy nienasyconym obwodzie magnetycznym

$$Z_d(p) = R + \frac{p}{\omega_N} X_d(p) \tag{3}$$

$$Z_q(p) = R + \frac{p}{\omega_N} X_q(p)$$

Reaktancje operatorowe $X_d(p)$, bądź $X_q(p)$ można obliczyć znając elementy schematu zastępczego w odnośnych osiach. Reaktancję operatorową możemy przedstawić w postaci iloczynu

czynników pierwiastkowych. W przypadku dwóch obwodów zastępczych magnetyczny

$$X_d(p) = \frac{(1+pT'_d)(1+pT''_d)}{(1+pT'_{d0})(1+pT''_{d0})} X_d \quad (4)$$

$$X_q(p) = X_q \frac{(1+pT'_q)(1+pT''_q)}{(1+pT'_{q0})(1+pT''_{q0})}$$

przy czym $X_{d,q}$ oraz $T_{d,q}$; $T'_{d,qc}$; $T'_{d,q}$; $T''_{d,q0}$ - parametry reaktancji operatorowej w odnośnej osi.
Reaktancje:

$$X_d = \lim_{p \rightarrow 0} X_d(p) = X_s + X_{ad}$$

$$X_q = \lim_{p \rightarrow 0} X_q(p) = X_s + X_{aq}$$

oznaczają reaktancję synchroniczną w odnośnych osiach. Stałe czasowe figurujące w czynnikach pierwiastkowych reaktancji operatorowej są funkcjami elementów schematu zastępczego generatora w odnośnej osi.

T'_{d0} ; T'_{q0} bądź T'_d ; T'_q - stała czasowa przebiegów przejściowych w odnośnej osi przy otwartym, bądź zwartym uzwojeniu twornika,

T''_{d0} ; T''_{q0} bądź T''_d ; T''_q - stała czasowa przebiegów podprzejściowych w odnośnej osi przy otwartym, bądź przy zwartym uzwojeniu twornika.

Reaktancję podprzejściową w odnośnych osiach definiujemy jako wartość graniczną reaktancji operatorowej dla $p \rightarrow \infty$

$$X'_{d,q} = \lim_{p \rightarrow \infty} X_{d,q}(p) = X_{d,q} \frac{T'_{d,q} T_{d,q}''}{T'_{d,q0} T''_{d,q0}}$$

Korzystając z twierdzeń o wartościach granicznych w rachunku operatorowym otrzymuje się początkową wartość reaktancji generatora w czasie przebiegu nieustalonego

$$X_{d,q}(t=0) = X_{d,q}''$$

oraz ustaloną wartość reaktancji (przy statycznym stanie ustalonym osiowego prądu twornika)

$$X_{d,q}(t=\infty) = X_{d,q}'$$

Wprowadzimy umowną reaktancję przejściową maszyny synchronicznej w osi podłużnej

$$X_d' = X_d \frac{T_d'}{T_{do}}, \quad (5a)$$

i w osi poprzecznej

$$X_q' = X_q \frac{T_q'}{T_{qo}}. \quad (5b)$$

W schematach zastępczych reprezentujących generator są czynne wielkości niezależne o narzuconej zmienności lub o stałości w czasie oraz wielkości zależne. Wielkościami niezależnymi mogą być np. napięcie twornika pochodzące z szyn sieci energetycznej, do której jest przyłączany twornik generatora, napięcie wzbudzenia U_w oraz prędkość kątowna magnesnicy ω mierzona elektryczną miarą kątową. Pozostałe wielkości np. prądy w poszczególnych elementach schematu magnesnicy są wielkościami zależnymi. Przy układaniu równań jest wygodnie uważać osiowe prądy twornika I_d , I_q , I_0 napięcie wzbudzenia U_w oraz prędkość kątową ω wirowania jako wielkości narzucone.

Przy nienasyconym obwodzie magnetycznym i przy zerowych warunkach początkowych

$$\omega_N \psi_d(p) = - I_d(p) X_d(p) + U_w(p) G(p),$$

$$\omega_N \psi_q(p) = - I_q(p) X_q(p), \quad (6)$$

$$\omega_N \psi_o(p) = - I_o(p) X_o,$$

przy czym

$$G(p) = \frac{U_{N \max}}{U_{wji}} \frac{1+p T_{std}}{(1+pT'_{do})(1+pT''_{do})},$$

gdzie

$$T_{std} = \frac{L_{std}}{R_{td}},$$

$$U_{wji} = I_{wji} R_w.$$

Prąd w obwodzie uzwojenia wzbudzenia

$$I_w(p) = H(p) \frac{U_w(p)}{R_w} + G'(p) I_d(p), \quad (7)$$

przy czym

$$H(p) = k_{wF} \frac{1+p T'_{tdo}}{(1+p T_{do})(1+pT''_{do})} + \frac{(1-k_{wF})}{1+p T_{swF}},$$

gdzie

$$T_{tdo} = \frac{L_{td}}{R_{td}} = \frac{L_{std} + L_{smd} + L_{ad}}{R_{td}} - \text{stała czasowa magneśnicy}$$

przy otwartym obwodzie twornika i przy otwartym zastępczym obwodzie "wF" na rys.2b.

$$k_{wF} = \frac{R_{wF}^*}{R_w^*} - \text{współczynnik zmniejszenia oporności zastępczego}$$

czego obwodu wzbudzenia na skutek podstawowej strugi prądów wirowych magneśnicy.

Wykorzystując zasadę wzajemności między sprowadzonym obwodem wzbudzenia a obwodem twornika można wykazać, że zawsze obowiązuje

$$G'(p) = \frac{3}{2} \frac{p}{\omega_N} G(p).$$

Reaktancje operatorowe $X_d(p)$, $X_q(p)$, transmitancja $G(p)$, $H(p)$, zawierają podstawowe parametry maszyny synchronicznej. Znajomość tych parametrów obok oporności R , jest konieczna do analizy elektromagnetycznego stanu nieustalonego maszyny synchronicznej. Jeśli nie interesuje nas pobór prądu ze źródła napięcia wzbudzenia znajomość transmitancji $H(p)$ jest zbyteczna. Podstawowe parametry można wyznaczyć na podstawie pomiaru. Można je wyznaczyć na podstawie oscylogramów odpowiednio dobranych stanów nieustalonych przy wirującej magneśnicy, bądź mogą być wyznaczone z charakterystyk modułowo-fazowych reaktancji operatorowych i transmitancji maszyny synchronicznej zdjętych przy maszynie nieruchomej. Na podstawie równania napięć poszczególnych obwodów schematu zastępczego można z równań (6) i (7) wyeliminować liniozwoje $\Psi(p)$ i uzyskać operatorowe relacje między napięciem i prądem twornika, a napięciem wzbudzenia. Dodatkowy związek między napięciem i prądem twornika otrzymujemy z warunków zasilania bądź impedancji zewnętrznej twornika. W przypadku współpracy z inną maszyną synchroniczną, bądź z systemem elektroenergetycznym, uwzględnienie warunków zasilania prowadzi do równań określających elektromagnetyczny i elektromechaniczny stan nieustalony współpracującej maszyny bądź systemu elektroenergetycznego. W ten sposób są jednoznacznie określone

przebiegi maszyny synchronicznej przy narzuconej prędkości wirowania i narzuconym napięciu wzbudzenia. Przy nienasyconym obwodzie magnetycznym maszyny pracującej samotnie i obciążonej symetryczną impedancją zewnętrzną przy stałej prędkości wirowania równania są liniowe. Można je najprościej rozwiązać rachunkiem operatorowym. Przy zmiennej prędkości wirowania jest konieczna znajomość przebiegu prędkości, bądź są potrzebne dodatkowe równania określające stan pracy maszyny. Może to być równanie momentów obrotowych układu wirującego przy narzuconym momencie obrotowym turbiny. W najogólniejszym przypadku napięcie wzbudzenia nie jest narzucone, lecz jest określone przez równanie układu regulacji napięcia, a w równaniu momentów moment obrotowy turbiny wynika z równania układu regulacji prędkości wirowania (układu regulacji częstotliwości). Przy zmiennej prędkości obrotowej komplikuje się analiza stanów nieustalonych z uwagi na nieliniowość równań (2b) spowodowaną iloczynem prędkości kątovej $\omega(t)$ i liniozwojów $\psi(t)$, przy której nie można stosować rachunku operatorowego. W szczególnych przypadkach jest możliwa linearyzacja równań np. przy małych periodycznych wahaniach prędkości wirowania względem średniej prędkości przy tętniącym momencie napędowym, bądź tętniącym momencie obciążenia maszyny synchronicznej.

W przypadku stałej prędkości wirowania i zerowych warunkach początkowych równ. 2b można przedstawić w postaci kompleksorowej

$$\hat{U}(p) = (p + j\omega)\hat{\psi}(p) - \hat{I}(p)$$

Stosując transformację Parka do prądów i napięć fazowych impedancji zewnętrznej otrzymamy transformację impedancji zewnętrznej generatora do postaci osiowej.

W przypadku impedancji czynno-indukcyjnej otrzymamy

$$\hat{U}_z(p) = (p + j\omega)\hat{\psi}_z(p) - \hat{I}(p)R_z \quad (9)$$

przy czym

$$\hat{\psi}_z = L_z \hat{I}$$

Symetryczną indukcyjność i oporność sieci zewnętrznej można na mocy równania (7) i (9) wciągnąć do schematu zastępczego generatora, łącząc je w szereg z indukcyjnością rozproszenia L_s i opornością czynną twornika R . Indukcyjność zewnętrzna partycypuje w wytwarzaniu napięcia transformacji $p\psi_z(p)$ i napięcia rotacji $j\omega\psi_z(p)$.

W przypadku pojemnościowej impedancji zewnętrznej

$$\hat{I}(p) = (p+j\omega) C \hat{U}_z(p) \quad (10)$$

Pojemność partycypuje w wytworzeniu prądu związanego z rotacją magnesnicy $j\omega C \hat{U}(p)$ i prądu związanego z czasową zmianą napięcia osiowego $pC\hat{U}(p)$.

3. Równanie momentów obrotowych

Równanie momentów obrotowych zespołu generator-turbina można przedstawić w postaci

$$\frac{T}{\omega} \frac{M}{N} \frac{d^2 \nu_k}{dt^2} + M_{em} = \frac{M_t}{t} - \frac{M_s}{s} \quad (11)$$

M_{em} - moment elektromagnetyczny generatora

M_t - wewnętrzny moment mechaniczny turbiny

M_s - moment strat mechanicznych.

Moment strat mechanicznych jest funkcją prędkości obrotowej $\frac{d\nu_k}{dt}$. Przy małych odchyłkach od prędkości znamionowej można przedstawić moment strat równaniem liniowym

$$\frac{M_s}{s} = \frac{M_{s0}}{s_0} + D \left(\frac{d\nu_k}{dt} - \omega_M \right) \quad (12)$$

Stała D charakteryzuje mechaniczne własności tłumiące turbozespołu. Podstawowym parametrem mechanicznym turbozespołu jest jego mechaniczna stała czasowa T_M , która jest określona przez moment bezwładności mas wirujących

$$T_M = 2H = \frac{I \omega_N^2}{S_N P_b}$$

przy czym

I - moment bezwładności.

Pod działaniem stałego momentu przyspieszającego na wale równego $\frac{S_N P_b}{\omega_N}$ masy wirujące osiągają znamionową prędkość obrotową po czasie T_M . Połowa stałej rozruchowej wyznacza stałą inercji mechanicznej H , która jest równa stosunkowi energii kinetycznej zmagazynowanej w masach wirujących przy znamionowej prędkości, do znamionowej mocy pozornej generatora.

Moment elektromagnetyczny generatora można otrzymać z bilansu mocy oddawanej

$$\begin{aligned} \underline{P} &= \sum_{k=a,b,c} \underline{U}_k \underline{I}_k = \underline{U}_d \underline{I}_d + \underline{U}_q \underline{I}_q + 2 \underline{U}_o \underline{I}_o = \\ &= M \frac{d\psi_k}{\omega_N dt} - \underline{P}_a - \underline{P}_m - \underline{P}_o \end{aligned}$$

$$M = \psi_d \underline{I}_q - \psi_q \underline{I}_d \quad (14)$$

Moc strat w tworniku obliczona przy pominięciu strat w żelazie i strat od składowej zerowej

$$\underline{P}_a = R(\underline{I}_d^2 + \underline{I}_q^2) \quad (15a)$$

Dostarczona z obwodu twornika moc strat w magneśnicy i moc związana ze zmianą energii pola magnetycznego maszyny

$$\Delta P_m = \frac{d\psi_d}{dt} I_d + \frac{d\psi_q}{dt} I_q \quad (15b)$$

Moc składowej zerowej (wydzielona w obwodzie twornika)

$$P_o = 2 I_o U_o \quad (15c)$$

4. Podstawowe zagadnienia regulacyjne generatorów synchronicznych

Ogólna analiza stanów nieustalonych generatora na podstawie równań (5) do (14) jest skomplikowana. W przypadku nieliniowych równań analiza stanów nieustalonych jest możliwa tylko w odniesieniu do konkretnych parametrów maszyny, układu regulacji napięcia i prędkości wirowania oraz parametrów systemu elektroenergetycznego. Równanie można rozwiązać analitycznie metodą "krok po kroku" lub można się posłużyć maszynami matematycznymi (analogowymi bądź cyfrowymi) bądź specjalnymi modelami analogowymi przystosowanymi do rozwiązań nieliniowości występujących w analizie stanu nieustalonych maszyn synchronicznych.

Zagadnienia regulacyjne maszyny synchronicznej będące przedmiotem analizy można podzielić na trzy grupy.

Do pierwszej grupy wchodzi zagadnienia stanów nieustalonych przy stałej prędkości wirowania, przy których równania określające stan nieustalony generatora o nienasyconym obwodzie magnetycznym są liniowe. Jeżeli prędkość wirowania zmienia się powoli w porównaniu z prędkością elektromagnetycznych przebiegów nieustalonych można przyjmować w analizie przebiegów tę prędkość jako stałą w określonych odcinkach czasu.

Do drugiej grupy wchodzi zagadnienia współpracy z sztywnym systemem elektroenergetycznym przy takich zmianach kąta mocy i prędkości wirowania, przy których jest możliwa linearyzacja równań.

Do trzeciej grupy wchodzi zagadnienia współpracy z systemem elektroenergetycznym przy zmiennej prędkości wirowania, przy której równania określające są nieliniowe i nierozwiązalne analitycznie w ogólnej postaci.

W przybliżonej analizie generatora jako obiektu regulacji przyjmuje się szereg założeń upraszczających.

1. Założenie zastępczego generatora o nienasyconym obwodzie magnetycznym z magneśnicą o jednym tylko elektrycznym zastępczym obwodzie wzbudzenia, który jest obwodem wypadkowym obwodów magneśnicy osi podłużnej o stałej czasowej równej stałej czasowej przebiegów przejściowych generatora oryginalnego

$$X_d(p) = X_d = \frac{1+pT'_d}{1+pT'_{do}}, \quad (16)$$

$$X_q(p) = X_q,$$

$$G(p) = \frac{U_{N \max}}{U_{wji}} \frac{1}{1+pT'_{do}}.$$

Elementy uproszczonego schematu zastępczego są określone przez stałe czasowe T'_{do} , T'_d i reaktancję synchroniczną. Składowe podprzejściowe w przebiegach napięcia i prądu nie występują. Wpływ obwodów tłumiących na moment maszyny synchronicznej, generatora przy pracy równoległej z siecią sztywną przy ewentualnych zmianach kąta mocy aproksymujemy w równaniu momentów przez odpowiednie powiększenie stałej tłumienia D .

2. W warunkach obciążenia symetrycznego przy pracy samotnej bądź równoległej i biegu synchronicznym, bądź biegu zbliżonym do synchronicznego pomija się napięcie transformacji $\frac{d\psi}{dt}$ w obwodzie twornika jako małe w porównaniu z napięciem rotacji $\omega\psi$. Przy pominięciu napięć transformacji w obwodach twornika nie występują składowe aperiodyczne prądów fazowych generatora i odpowiadająca im składowa periodyczna prądu magneśnicy przy zmianach czynno-indukcyjnej impedancji zewnętrznej, oraz nie występuje moment asynchroniczny maszyny synchronicznej przy poślizgach magneśnicy. Moment asynchroniczny można uwzględnić w sposób przybliżony przez odpowiednie powiększenie momentu tłumienia turbozespołu.

Można posłużyć się uproszczonym równaniem napięć i liniozwojów twornika

$$\begin{aligned}U_d &= -\omega \psi_q - R I_d, \\U_q &= \omega \psi_d - R I_q, \\ \omega_N \psi_d &= E_m - I_d X_d, \\ \omega_N \psi_q &= -I_q X_q, \\ E_m &= I_{wr}^* X_{ad}.\end{aligned}\tag{17a}$$

Równania (17) można przedstawić w postaci kompleksorowej

$$\hat{U} = U_d + j U_q = \omega \hat{E}_m - j \omega I_d (X_d - X_q) - \hat{I} (R + j \omega X_q),$$

bądź

$$\hat{U} = \hat{E}_q - j \omega I_d (X_d' - X_q) - \hat{I} (R + j \omega X_q),\tag{17b}$$

przy czym

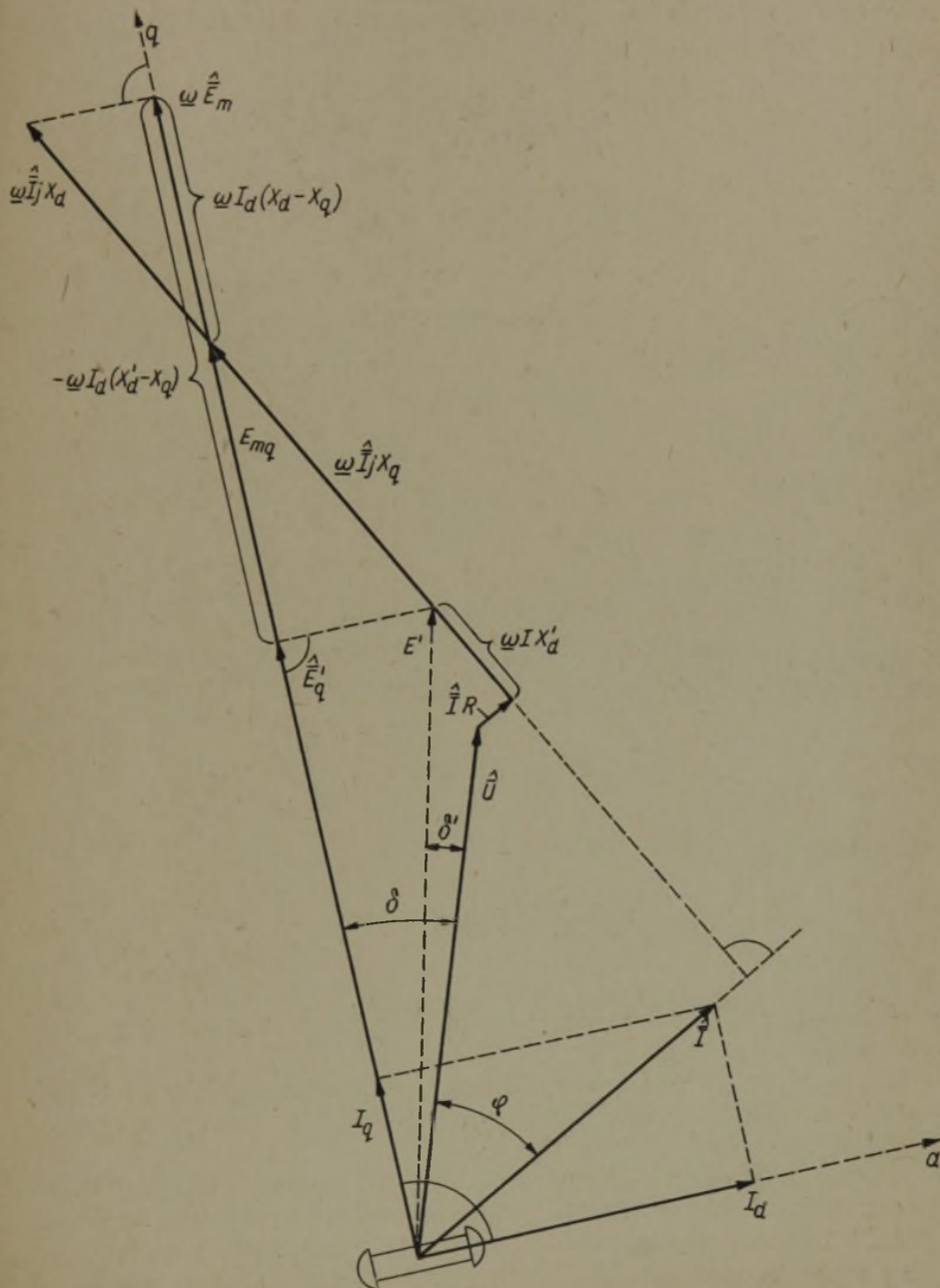
$$\hat{E}_m = j E_m \quad \text{oraz} \quad \hat{E}_q' = j E_q',$$

które znajdują reprezentację na wykresie wektorowym maszyny synchronicznej (rys.3).

Kąt mocy σ jest zawarty między wektorem napięcia U a wektorem napięcia E_m bądź E_q' , (patrz: wykres wektorowy maszyny synchronicznej - rys.3).

Równanie napięć zastępczego obwodu wzbudzenia "wr" jest równaniem podstawowym generatora, ponieważ określa wraz z wykresem wektorowym przebiegi napięć i prądu generatora w stanie nieustalonym

$$\frac{d\psi_{wr}^*}{dt} + I_{wr}^* R_{wr}^* = U_{wr}^*\tag{18a}$$



Rys.3. Wykres wektorowy maszyny synchronicznej

przy czym

$$\omega_N \psi_{wr}^* - I_{wr}^* X_{wr}^* - I_d X_{ad} = \frac{X_{wr}^*}{X_{ad}^*} E_q^*,$$

$$X_{wr}^* = X_{swr}^* + X_{ad} + X_{smd}^*,$$

gdzie

$$E_q^* = E_m - I_d (X_d - X_d'),$$

$$R_{wr}^* = R_w^* \cdot k_{wr},$$

$$U_{wr}^* = U_w^* k_{wr}',$$

$$X_d' = X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_{wr}^*}.$$

Prąd w obwodzie wzbudzenia można przedstawić jako sumę dwóch prądów składowych

$$I_w = I_{w1} + I_{w2}, \quad (18b)$$

przy czym

$$I_{w1} = I_{wr} k_{wr}.$$

Składnik I_{w2} można obliczyć z równania

$$T_{swr} \frac{dI_{w2}}{dt} = \frac{U_w}{R_w} (1 - k_{wr}') - I_{w2}.$$

Obliczony w ten sposób przebieg prądu wzbudzenia jest przebiegiem przybliżonym. Aproksymujące parametry k_{wr} oraz T_{swr} można wyznaczyć pomiarowo z charakterystyk dynamicznych generatora oryginalnego

$$k_{wr} = \frac{3}{2} \left(\frac{U_{N \max}}{I_{wji}} \right)^2 \frac{1}{R_w \omega_N T'_{do} (X_d - X'_d)}$$

Wykorzystując równanie (18b) można wyznaczyć stałą czasową T_{swr} oscylografując prąd wzbudzenia i napięcie twornika generatora przy biegu jałowym przy skokowej zmianie napięcia wzbudzenia. Jeśli generatora oryginalny nie posiada obwodów tłumiących zachodzi

$$k_{wr} = k_{wrF} \quad \text{oraz} \quad T_{swr} = T_{swrF}$$

Z uwagi na proporcjonalność liniozwojów ψ_{wr} zastępczego obwodu wzbudzenia i napięcia E_q można przedstawić równanie napięć obwodu wzbudzenia jako równanie określające wartości napięcia magnesnicy E_m i napięcia E'_q na wykresie wektorowym

$$T'_{do} \frac{d E'_q}{dt_U} + E_m = E_w, \quad (18c)$$

przy czym

$$E_w = \frac{U_{N \max}}{R_w I_{wji}} U_w$$

Warunek początkowy jest określony przez ciągłość przebiegu napięcia E'_q proporcjonalnego do liniozwojów ψ_{wr} .

Elektromagnetyczny moment obrotowy generatora

$$\underline{M}_{em} = \psi'_d \underline{I}_q - \psi'_q \underline{I}_d = \underline{E}_m \underline{I}_q + (\underline{X}_d - \underline{X}_q) \underline{I}_d \underline{I}_q \quad (19a)$$

przy pomijalnie małej oporności czynnej twornika wynosi

$$\begin{aligned} \underline{M}_{em} &= \frac{\underline{E}_m \underline{U}}{\underline{X}_d} \sin \delta' + \frac{1}{2} \underline{U}^2 \frac{\underline{X}_d - \underline{X}_q}{\underline{X}_d \underline{X}_q} \sin 2\delta' = \\ &= \frac{\underline{E}'_q \underline{U}}{\underline{X}'_d} \sin \delta' + \frac{1}{2} \underline{U}^2 \frac{\underline{X}_d - \underline{X}_q}{\underline{X}_d \underline{X}_q} \sin 2\delta'. \quad (19b) \end{aligned}$$

3. W przypadku symetrycznych pojemności w obwodzie zewnętrznym przy pracy samotnej generatora można pominąć prąd związany z czasową zmianą osiowego napięcia twornika i uwzględnić tylko prąd związany z rotacją magneśnicy. Przy takim uproszczeniu nie wystąpią w rozwiązaniu przebiegów niestabilnych składowe prądów i napięć fazowych wysokiej częstotliwości nałożone na przebiegi o częstotliwości podstawowej. Przy takim założeniu odejmujemy zewnętrzną reaktancję pojemnościową $\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\underline{\omega}} \underline{X}_C$ od reaktancji indukcyjnej maszyny synchronicznej.

4. Przy biegu synchronicznym generatora w przypadku zmian kąta mocy w czasie przebiegu regulacji można pominąć wpływ tej zmiany kąta mocy na napięcie rotacji mając na uwadze, że zmiany prędkości są znikome w porównaniu ze średnią prędkością wirowania magneśnicy.

Rozpatrzmy własności regulacyjne maszyny synchronicznej w trzech szczególnych przypadkach pracy odpowiadających przytoczonym wyżej trzem grupom zagadnień stanów niestabilnych. Posłużymy się przy tym analizą przybliżoną wykorzystując założenia upraszczające 1...4.

5. Praca samotna generatora

W szczególnym przypadku pracy samotnej generatora, o stałej prędkości wirowania przy obciążeniu stałą impedancją odbiornika ($\hat{Z}_o = R_o + j X_o$) o charakterze czynno-indukcyjnym ($X_{oc} = \omega X_o$), bądź czynno-pojemnościowym ($X_o = -\frac{X_{co}}{\omega}$) otrzymamy na podstawie równania (18b) i wykresu wektorowego transmitancję generatora

$$\frac{U(p)}{E_w(p)} = \frac{K_{ug}}{1+pT'_z}, \quad (20)$$

przy czym

$$K_{ug} = \frac{\sqrt{(R_o^2 + X_{oc}^2)(R_z^2 + X_{qz}^2)}}{R_z^2 + X_{dz}\omega X_{qz}\omega},$$

$$T'_z = T'_{do} \frac{R_z^2 + X'_{dz}\omega X_{qz}}{R_z^2 + X_{dz}\omega X_{qz}\omega},$$

$$R_z = R + R_o.$$

W przypadku indukcyjnej reaktancji zewnętrznej

$$X_{dz}\omega = \omega X'_d - \omega X_{1o},$$

$$X'_{dz}\omega = \omega X_d - \omega X_{1o},$$

$$X_{qz}\omega = \omega X_q + \omega X_{1o}.$$

W przypadku pojemnościowej reaktancji zewnętrznej

$$X_{dz} \omega = \underline{\omega} X_d - \frac{1}{\underline{\omega}} X_{co},$$

$$X'_{dz} \omega = \underline{\omega} X'_d - \frac{1}{\underline{\omega}} X_{co},$$

$$X_{qz} \omega = \underline{\omega} X_q - \frac{1}{\underline{\omega}} X_{co}.$$

Statyczne wzmocnienie napięcia K_{ug} i stała czasowa generatora T'_z zależy od warunków obciążenia.

5.1. Praca samotna generatora przy obciążeniu czynno-indukcyjnym

W przypadku skokowego obciążenia indukcyjną reaktancję X_o przy częstotliwości znamionowej generatora i przy stałym napięciu wzbudzenia na biegu jałowym, otrzymamy na mocy równania (18b) i wykresu wektorowego

$$E'_q(t) = E'_{qo} - E'_q (1 - e^{-\frac{t}{T'_z}}),$$

$$E'_q = E_{wo} \frac{T'_{do} - T'_z}{T'_{do}} = E_{wo} \frac{X_d - X'_d}{X_d + X_o},$$

$$T'_z = T'_{do} \frac{X'_d + X_o}{X_d + X_o}.$$

Uwzględnivszy, że przy biegu jałowym generatora $E'_{qo} = E_{wo} = U_o$ otrzymamy napięcie twornika

$$U(t) = \frac{E'_q(t) X_o}{X'_d + X_o} = U_o \left[1 - \frac{X'_d}{X'_d + X_o} - \frac{X_d - X'_d}{X_d + X_o} \left(1 - e^{-\frac{t}{T'_z}} \right) \right].$$

Prąd twornika

$$I(t) = I_d(t) = \frac{E_q(t)}{X'_d + X_o}$$

Prąd wzbudzenia

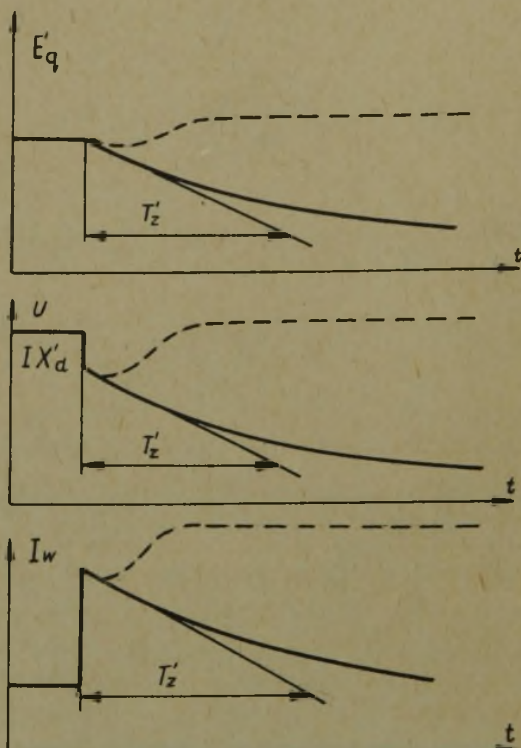
$$\begin{aligned} I_w(t) &= k_{wr} \frac{E_m}{U_{Nm}} = \\ &= \frac{U_{wji}}{U_{N \max}} k_{wr} \cdot \left[E'_q(t) + (X_d - X'_d) I_d(t) \right] = \\ &= k_{wr} \frac{I_{wji}}{U_{N \max}} \frac{X_d + X_o}{X'_d + X_o} E'_q(t). \end{aligned}$$

Napięcie generatora w momencie przyłączenia reaktancji obciążenia maleje skokowo o spadek napięcia na reaktancji przejściowej $\Delta U' = U_o \frac{X_d}{X'_d + X_o}$, po czym w dalszym ciągu maleje wykładniczo do wartości ustalonej ze stałą czasową T'_z (rys.4a). W obwodzie magneśnicy powstaje prąd wyrównawczy, który powiększa w sposób skokowy prąd wzbudzenia po czym zanika wykładniczo ze stałą czasową T'_z . Prąd wyrównawczy magneśnicy utrzymuje stałość liniozwojów Ψ'_{wr} zastępczego obwodu wzbudzenia w pierwszej chwili zaburzenia.

Przy funkcjonującym układzie regulacji narastające napięcie wzbudzenia generatora powoduje wpieryw zatrzymanie procesu zanikania prądu wyrównawczego magneśnicy, po czym powiększenie prądu wzbudzenia odpowiednio do zregulowanego poziomu napięcia twornika. Na rys.4a zaznaczono linią przerywaną przebiegi regulacyjne.

Im mniejsza jest reaktancja przejściowa generatora, tym mniejsza wypada początkowa zmiana napięcia twornika. Minimalne napięcie twornika wystąpi po upływie czasu, w przeciągu którego wyrównawczy prąd magneśnicy zmaleje do minimum w czasie trwania procesu regulacji. W przypadku regulatora wykazującego dużą inercję narastania wzbudzenia na skutek bez-

właściwości poszczególnych członów regulatora, otrzymuje się korzystne przebiegi regulacyjne w przypadku generatora o możliwie dużej stałej czasowej T'_{do} .



Rys.4a. Przebiegi napięć i prądów generatora przy skokowym obciążeniu reaktancją indukcyjną przy stałym napięciu wzbudzenia (linie ciągłe) bądź przy regulowanym napięciu twornika (linie przeryw.)

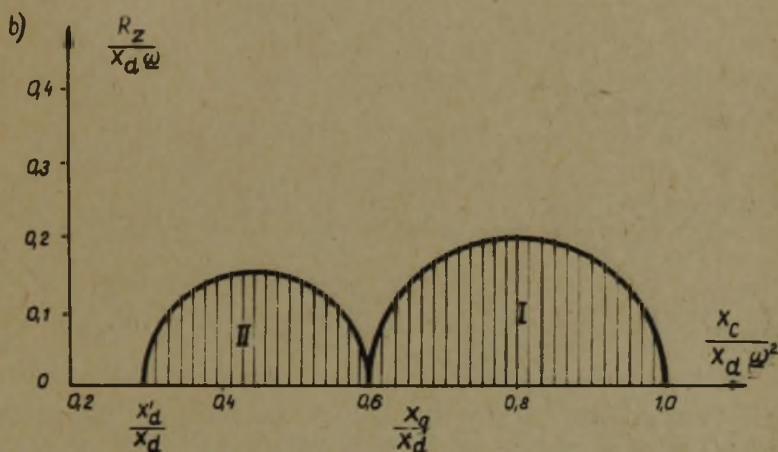
5.2. Praca samotna przy obciążeniu czynno-pojemnościowym

Przy pojemnościowej reaktancji zewnętrznej generator synchroniczny może być obiektem niestabilnym. Z dyskusji transmitancji generatora (równanie 20) można wyznaczyć obszar niestabilności generatora, który jest określony układem dwóch równań $T'_z = 0$, czemu odpowiada

$$R_z^2 + (\underline{\omega} X'_d - \frac{X_{co}}{\underline{\omega}})(\underline{\omega} X_q - \frac{X_{co}}{\underline{\omega}}) = 0, \quad (21a)$$

oraz $T'_z = \infty$, czemu odpowiada

$$R_z^2 + (\underline{\omega} X_d - \frac{X_{co}}{\underline{\omega}})(X_q - \frac{X_{co}}{\underline{\omega}}) = 0. \quad (21b)$$



Rys.4b. Obszar niestabilności generatora przy pojemnościowej reaktancji zewnętrznej (przy pracy samotnej)

Obszar niestabilności I i II zakreskowany na rys.4b zamknięty jest dwoma okręgami o średnicy

$$\frac{X_d - X_q}{X_d} \quad \text{oraz} \quad \frac{X_q - X'_d}{X_d}$$

Jeśli punkt o współrzędnych $\frac{X_{co}}{X_d \omega^2}$ i $\frac{R_z}{X_d \omega}$ określający stan obciążenia generatora mieści się w obszarze zakreskowanym, następuje utrata stabilności generatora na skutek pojemnościowego samowzbudzenia napięcia twornika. Wykażemy na przykładzie uproszczonego regulatora napięcia o zastępczej transmitancji

$$\frac{K_r}{1+pT_r}$$

że regulator ten może ustabilizować pracę generatora w obszarze I.

Przeanalizujemy w tym celu miejsca zerowe wielomianu charakterystycznego zamkniętego układu regulacji

$$W_2(p) = (1+p T'_z)(1+p T_r) + K_{ug} K_r \quad (21c)$$

Po wstawieniu K_{ug} , T'_z z równania (20) do (21c) i po uporządkowaniu otrzymamy

$$W_2(p) = p^2 T_r T'_{do} (X_{dz\omega} X_{qz\omega} + R_z^2) + p \left[T'_{do} (X'_{dz\omega} X_{qz\omega} + R_z^2) + T_r (X_{dz\omega}^2 + R_z^2) \right] + (X_{dz\omega}^2 + R_z^2) + K_r \sqrt{(X_{qz\omega}^2 + R_z^2)(R_o^2 + X_o^2)}. \quad (21d)$$

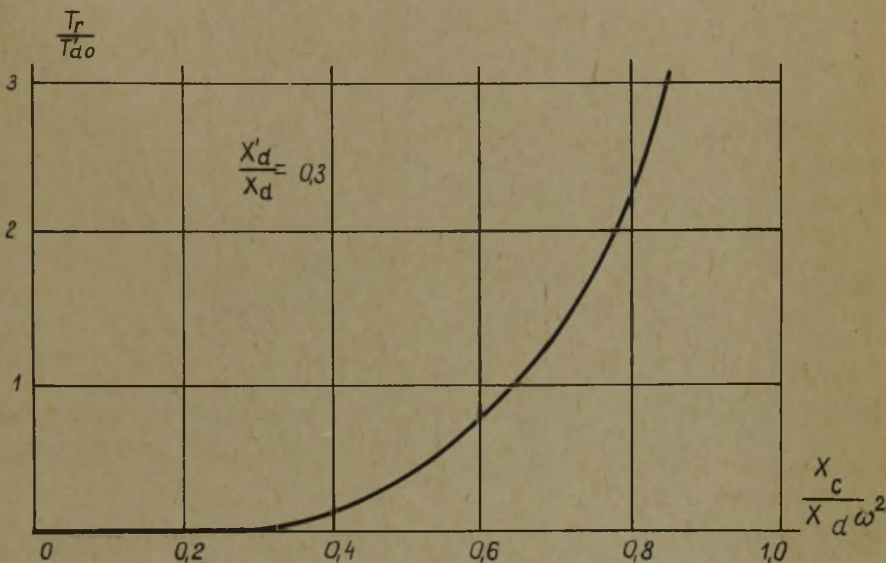
Warunek stabilności sprowadza się do dodatnich współczynników wielomianu. W obszarze II współczynnik przy p^2 jest ujemny powodując zawsze niestabilność, natomiast w obszarze I jest on dodatni. Wyraz wolny można uczynić dodatnim przy dostatecznie dużym statycznym wzmocnieniu regulatora K_r . Warunek stabilności w obszarze I jest określony przez dodatni znak współczynnika przy p . Warunek ten określa maksymalną wartość zastępczej stałej czasowej regulatora T_r .

$$\frac{T_r}{T'_{do}} < \frac{X'_{dz\omega} X_{qz\omega} + R_z^2}{X_{dz\omega} X_{qz\omega} + R_z^2} = \frac{T'_z}{T'_{do}}.$$

Przy pominięciu oporności czynnej

$$\frac{T_r}{T'_{do}} < \frac{X'_d - \frac{1}{\omega} X_{co}}{X_d - \frac{1}{\omega} X_{co}}. \quad (21e)$$

Rys.4c przedstawia wykres $\frac{T_z}{T_{do}}$, jako wartości granicznej $\frac{T_r}{T_{do}}$.
 Nowoczesne regulatory wykazują wystarczająco szybkie działanie, by zapewnić stabilność w obszarze I.

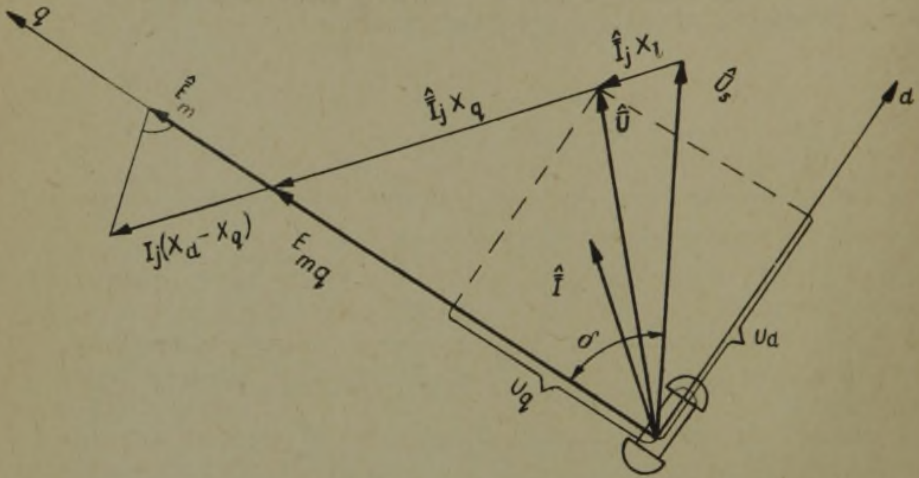


Rys.4c. Zastępcza stała czasowa regulatora na granicy stabilności układu przy pracy generatora w obszarze I

6. Praca równoległa z siecią sztywną przy małych zmianach kąta mocy

Jako przykład należącej do drugiej grupy zagadnień stanów nieustalonych rozpatrzmy bardziej skomplikowany przypadek regulacji generatora przy jego współpracy z siecią sztywną poprzez indukcyjną reaktancję przesyłową X_l przy pomijalnie małej oporności czynnej obwodu twornika. Rys.5 przedstawia wykres wektorowy, na którym zaznaczono napięcie generatora U , na które oddziałuje regulator, napięcie magnesnicy E_m i napięcie sieci U_s . Kąt mocy σ oznacza kąt zawarty między wektorem napięcia sieci, a wektorem napięcia magnesnicy. Na podstawie wykresu wektorowego

$$\begin{aligned}
 U_d &= -\omega X_l I_q + U_s \sin \sigma \\
 U_q &= \omega X_l I_d + U_s \cos \sigma
 \end{aligned}
 \tag{22a}$$



Rys.5. Wykres wektorowy maszyny synchronicznej współpracującej z siecią sztywną poprzez reaktancję przesyłową

Następujący układ pięciu równań określa stan elektromagnetyczny i stan elektromechaniczny generatora

$$U_d = -\omega \psi_q = I_q X_q \omega$$

$$U_q = \omega \psi_d = \omega (E_m - X_d I_d)$$

$$E_w = E_m + T'_{do} \frac{d E'_q}{dt} \quad (23a)$$

$$E'_q = E_m - I_d (X_d - X'_d)$$

$$T_m \omega_N \frac{d^2 \delta}{dt^2} = M_t - E_{in} I_q + (X_d - X_q) I_d I_q - M_{so} - D(\omega - \omega_N)$$

W równaniu momentów, które jest przekształceniem równania 11 uwzględniono, że wektor napięcia sieci sztywnej wiruje ze stałą prędkością kątową ω_0 .
Obowiązuje przeto

$$\frac{d^2 u_k}{dt^2} = \frac{d^2 \sigma}{dt^2}$$

Elektromagnetyczny moment obrotowy obliczony na podstawie wykresu wektorowego (przy pominięciu napięcia transformacji w obwodzie twornika) jest jednoznacznie funkcją kąta mocy. Nie uwzględnia momentu asynchronicznego rozwijanego przez magnesnicę, który jest funkcją poślizgu (pochodnej kąta mocy). Moment asynchroniczny uwzględniamy w przybliżeniu powiększając odpowiednio moment tłumienia D turbozespołu.

Szóste równanie określa napięcie na zaciskach twornika generatora podlegającego regulacji w przypadku wyposażenia generatora w regulator napięcia

$$U^2 = U_d^2 + U_q^2$$

Ponieważ na skutek działania regulatora napięcia zmiany prądu wzbudzenia powodują zmiany kąta mocy, rozpatrzmy własności regulacyjne generatora przy założeniu małych zmian kąta mocy $\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma$, oraz odpowiednio małych zmian napięcia $U = U_0 + \Delta U$ i prądu $I = I_0 + \Delta I$. W wyniku linearyzacji równań różniczkowych otrzymuje się równania przyrostów. Przy założeniu znamionowej prędkości kątowej $\omega_0 = \omega_N$

$$\Delta U_d(p) = -X_L \Delta I_q(p) + \Delta\sigma(p) U_{s0} \cos \sigma'_0,$$

$$\Delta U_q(p) = X_L \Delta I_d(p) - \Delta\sigma(p) U_{s0} \sin \sigma'_0,$$

$$\Delta U_d(p) = \Delta I_q(p) X_q,$$

(22b)

$$\Delta U_q(p) = \Delta E_m(p) - \Delta I_d(p) X_d,$$

$$\Delta E_w(p) = \Delta E_m(p) + T'_{d0} p \Delta E'_q(p),$$

$$\Delta E'_q(p) = \Delta E_m(p) - (X_d - X'_d) \Delta I_d(p),$$

$$\left(\frac{T}{\omega} \frac{M}{N} p^2 + \underline{D} p\right) \Delta \sigma'(p) = \Delta \underline{M}_t(p) - \underline{\Psi}_{do} \Delta \underline{I}_q(p) - \underline{I}_{qo} \Delta \underline{\Psi}_d(p) + \\ + \underline{\Psi}_{qo} \Delta \underline{I}_d(p) + \underline{I}_{do} \Delta \underline{\Psi}_d(p),$$

$$\Delta U(p) = \frac{U_{do}}{U_o} \Delta U_d(p) + \frac{U_{qo}}{U_o} \Delta U_q(p).$$

Traktując $\Delta \underline{M}_t$ i $\Delta \underline{E}_w$ jako zmienne niezależne, a zmienne ΔU , $\Delta \underline{E}'_q$ jako zmienne zależne otrzymamy w wyniku eliminacji pozostałych zmiennych $\Delta \underline{I}_d$, $\Delta \underline{I}_q$, ΔU_d , ΔU_q ostateczne równania

$$\left(\frac{T}{\omega} \frac{M}{N} p^2 + \underline{D} p\right) \Delta \sigma'(p) = \Delta \underline{M}_t(p) - K_2 \Delta \underline{E}'_q(p) - K_1 \Delta \sigma'(p), \quad (24)$$

$$\Delta \underline{E}'_q(p) = \Delta \underline{E}_w(p) \cdot \frac{K_3}{1+pT_z} - \Delta \sigma'(p) \frac{K_4}{1+pT'_z},$$

$$\Delta U(p) = \Delta \sigma'(p) K_5 + \underline{E}'_q(p) K_6,$$

przy czym

$$K_1 = \frac{E_{mqo} U_{so} \cos \sigma'_o}{X_1 + X_d} + \frac{U_{do} U_{so} \sin \sigma'_o}{X_d + X_1} \left(1 - \frac{X'_d}{X_q}\right),$$

$$E_{mqo} = U_{qo} + X_q I_{do},$$

$$K_2 = \frac{U_{so} \sin \sigma'_o}{X'_d + X_1},$$

$$K_3 = \frac{X'_d + X_1}{X_d + X_1},$$

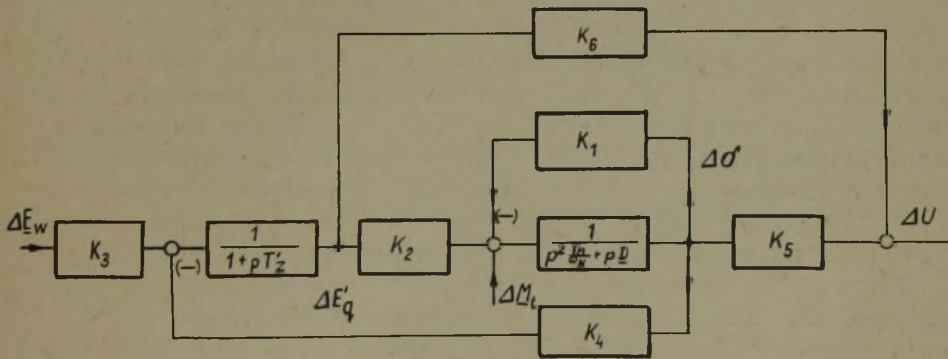
$$K_4 = \frac{X_d - X'_d}{X_d + X_1} U_{so} \sin \sigma'_o,$$

$$K_5 = \frac{U_{do}}{U_o} U_{so} \frac{X_d}{X_1 + X_q} \cos \sigma'_o - \frac{U_{qo}}{U_o} U_{so} \frac{X'_d}{X'_d + X_1} \sin \sigma'_o,$$

$$K_6 = \frac{U_{do}}{U_o} \frac{X_1}{X'_d + X_1},$$

$$T'_{dz} = T'_{do} \frac{X'_d + X_1}{X_d + X_1}.$$

Rys.6 przedstawia schemat strukturalny generatora w układzie przesyłowym, który po uzupełnieniu go schematem strukturalnym regulatora jest przedmiotem analizy procesów regula-



Rys.6. Schemat strukturalny generatora w układzie przesyłowym

cyjnych. Z analizy wypadkowej transmitancji generatora wraz z układem przesyłowym wynika, że bez regulacji napięcia układ jest niestabilny jeśli wyraz wolny mianownika transmitancji $(K_1 - K_2 K_4 \leq 0)$ jest równy bądź mniejszy od zera.

Po kilku przekształceniach

$$K_1 - K_2 K_4 = \frac{d}{d\sigma_0} \left[\frac{E_{m0} U s_0}{X_d + X_l} \sin \sigma_0 + \frac{U^2 s_0}{2} \frac{X_d - X_q}{(X_d + X_l)(X_q + X_l)} \sin 2\sigma_0 \right]$$

Jest to wyrażenie na moc synchronizującą maszyny synchronicznej proporcjonalną do pochodnej mocy oddawanej względem kąta mocy przy stałym napięciu magnesnicy i napięciu sieci sztywnej (por. równ. 19b). W przypadku generatora z magnesnicą cylindryczną warunek utraty stabilności statycznej odpowiada kątowi mocy $\sigma_0 > 90^\circ$. Dzięki uzależnieniu napięcia wzbudzenia od kąta mocy układ regulacji napięcia może przesuwać granicę stabilności statycznej w stronę większych kątów mocy.

7. Praca maszyny synchronicznej przy dużych zmianach kąta mocy

Przypadek regulacji generatora przy dużych zmianach kąta mocy należy do trzeciej grupy zagadnień przebiegów nieustalonych. Przypadek ten jest nierozwiązalny analitycznie w postaci ogólnej. Można go rozwiązać przy konkretnych danych generatora i systemu metodą "krok po kroku" w oparciu o wykres wektorowy maszyny synchronicznej, równanie (18) oraz równania momentu (19). Szczególnie przydatne przy rozwiązywaniu takich zagadnień regulacyjnych są maszyny analogowe, bądź cyfrowe maszyny liczące. Dobrą orientację o regulacyjnych własnościach maszyny synchronicznej współpracującej z siecią sztywną uzyskuje się z wykresu Blondela, który przedstawia hodograf wektora prądu twornika przy zmianie kąta mocy przy stałym napięciu twornika $U = \text{const}$, bądź przy stałym napięciu sieci sztywnej w układzie przesyłowym $U_s = \text{const}$ jeśli formalnie włączymy czynno-indukcyjną impedancję zewnętrzną do impedancji generatora i przy stałym zastępczym prądzie wzbudzenia $I_w \sim E_m = \text{const}$, bądź przy stałych liniozwojach zastępczego obwodu wzbudzenia $\psi_{wr} \sim E'_q = \text{const}$.

Miejsce geometryczne wektora prądu przy $E_m = \text{const}$ łatwo znaleźć na podstawie wykresu wektorowego

$$\hat{i} = \frac{\hat{E}_{mq} - \hat{U}}{Z_q}, \quad (25a)$$

przy czym

$$\hat{U} = U e^{j\omega t}$$

$$\hat{Z}_q = R + j X_q = j Z_q e^{-j\varphi},$$

gdzie

$$\varphi = \arctg \frac{R}{X_q}$$

Z drugiej strony

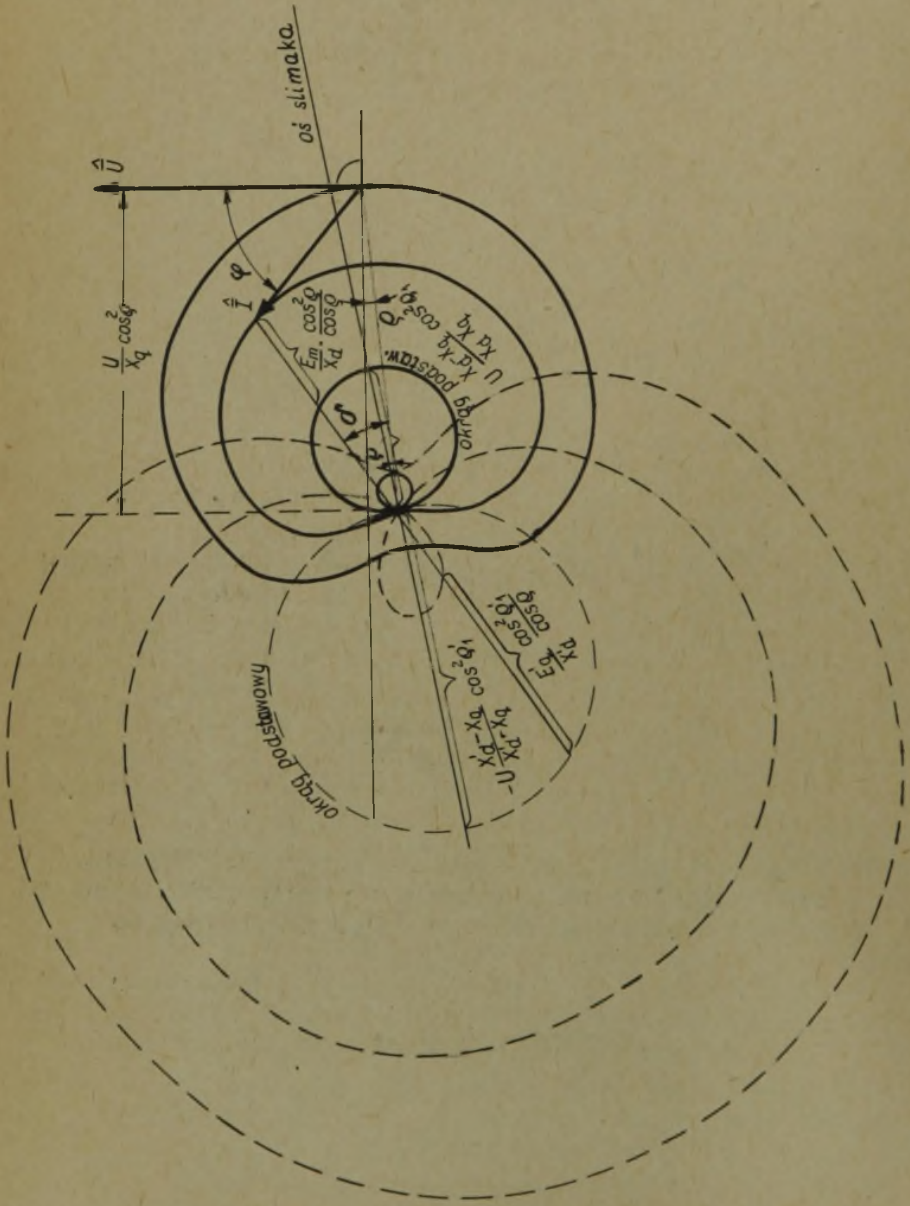
$$\begin{aligned} \frac{E_m}{Z_q} &= \frac{1}{Z_q} \cdot (U_q + I_q R + I_d X_q) = \\ &= U \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cos^2 \varphi_1 \cos(\sigma - \varphi) + \frac{E_m}{X_d} \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos \varphi}, \end{aligned} \quad (25b)$$

gdzie

$$\varphi_1 = \arctg = \frac{R}{\sqrt{X_d X_q}}.$$

Rys.7a (linie ciągłe) przedstawia miejsce geometryczne wektora prądu wykreślone na podstawie równania (25b). Jest to ślimak Pascala o środku 0, którego okrąg podstawowy ma średnicę

$$U \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \cos^2 \varphi_1.$$



Rys. 7a. Wykres Blondela maszyny synchronicznej przy niepomijalnej oporności czynnej twornika

Uwzględniając, że budowa wykresu wektorowego przy E'_q jest analogiczna jak przy $E_m = \text{const}$ (analogia polega na zastąpieniu wektora E_m wektorem E'_q , oraz reaktancję X_d przez X'_d) otrzymuje się hodograf wektora prądu przy $E'_q = \text{const}$ przedstawiony na rys.7b linią przerywaną

$$\frac{E_{mq}}{Z_q} = U \frac{X'_d - X_q}{X'_d X_q} \cos^2 \varphi'_1 \cos(\sigma - \varphi) + \frac{E'_q}{X'_d} \frac{\cos^2 \varphi'_1}{\cos \varphi}, \quad (25b)$$

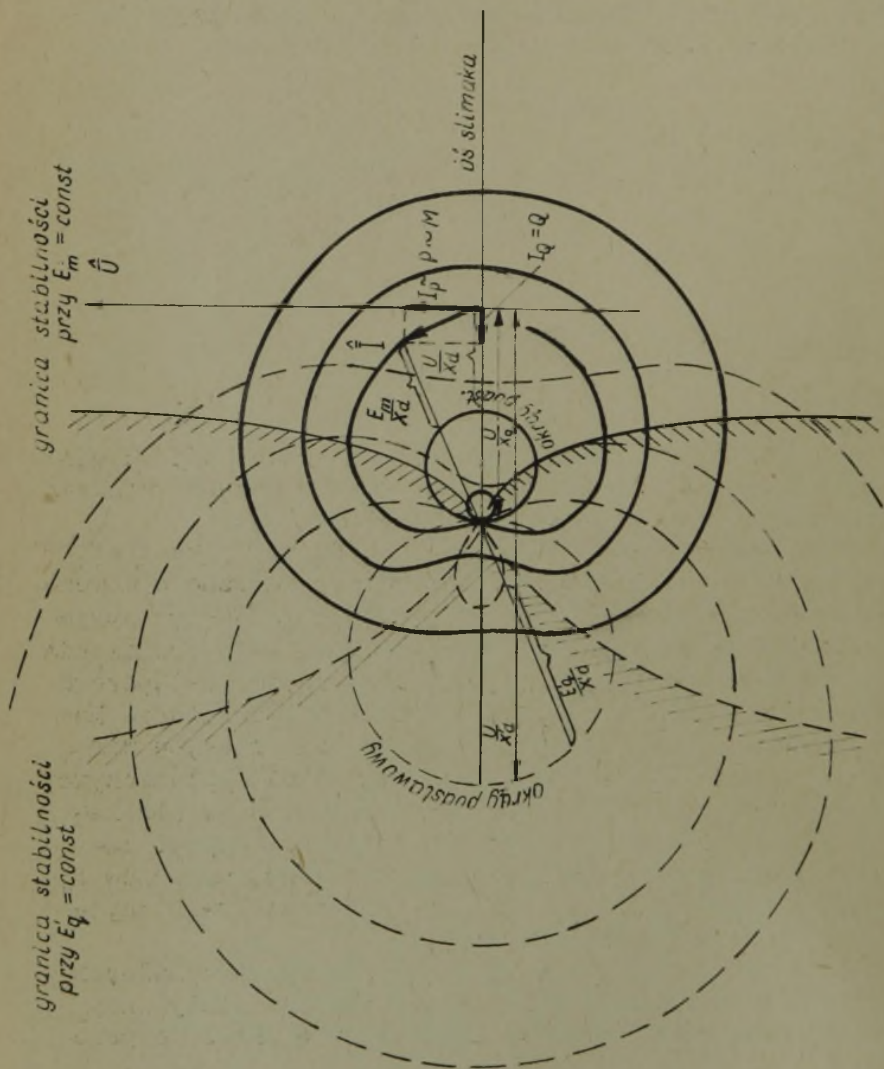
gdzie

$$\varphi'_1 = \text{arc tg} \frac{R}{\sqrt{X'_d X_q}}.$$

Hodograf prądu przedstawia jednocześnie zależność składowej czynnej i biernej prądu twornika od kąta mocy do których są proporcjonalne moc czynna i bierna generatora.

Przy pominięciu oporności czynnej obwodu twornika ($\varphi = \varphi_1 = \varphi'_1 = 0$) wykres Blondela oddaje równocześnie zależność momentu obrotowego od kąta mocy (rys.7b), wiążąc na jednym wykresie kąt mocy, prąd twornika z uwzględnieniem kąta obciążenia zastępczy prąd wzbudzenia $I_{wr} \sim E_m$, liniozwoje zastępczego obwodu wzbudzenia ($\psi_{wr} \sim E'_q$), moce i moment generatora. Mając przygotowaną siatkę hodografów prądu przy stałych wartościach E_m oraz E'_q , można dla każdego punktu płaszczyzny określić powyższe wielkości reprezentujące stan elektromagnetyczny generatora. W powiązaniu z równaniem napięć zastępczego obwodu wzbudzenia i równaniem bilansu momentów wykres Blondela może służyć do analizy przebiegów regulacyjnych przy dużych zmianach kąta mocy.

Na rys.7b zaznaczono krzywe łączące punkty maksymalnych momentów, które wyznaczają granicę stabilności statycznej przy sztywnym napięciu twornika bądź sieci w układzie przesyłowym.



Rys. 7b. Wykres Blondela maszyny synchronicznej przy pomijalnie małej oporności czynnej twornika

Na podstawie wykresu Blondela można łatwo wypisać związek między mocą oddawaną, a granicznym kątem mocy σ'_q przy utracie statycznej stabilności

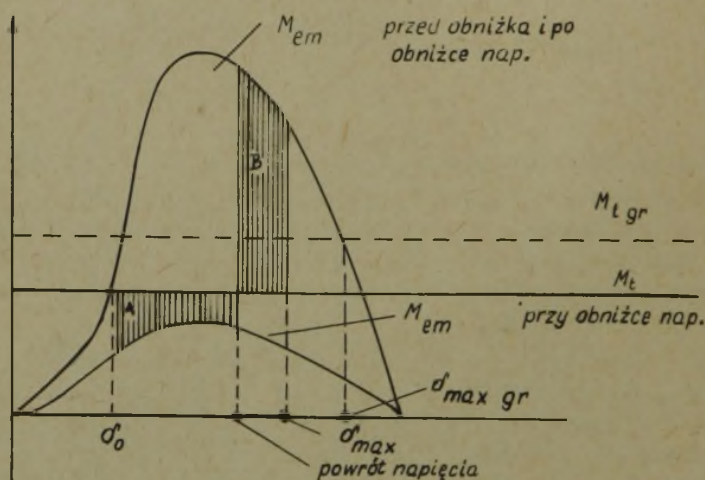
$$(\mathbf{P}_{\max})_{E_m = \text{const}} = \underline{U}^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \frac{\sin^3 \sigma'}{\cos \sigma'} \quad (26a)$$

$$(\mathbf{P}_{\max})_{E'_q = \text{const}} = \underline{U}^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \frac{\sin^3 \sigma'}{\cos \sigma'} \quad (26b)$$

W szczególnym przypadku magneśnicy cylindrycznej ($X_d = X_q$), okrąg podstawowy ślimaka Pascala przy $E_m = \text{const}$ jest zdegenerowany do punktu i wykres Blondela przedstawia gromadę okręgów koncentrycznych. Przy $E'_q = \text{const}$ wykres Blondela przedstawia w dalszym ciągu gromadę ślimaków Pascala, ponieważ zachodzi $X'_d < X'_q$.

Granica stabilności statycznej przy $E_m = \text{const}$ (granica naturalnej stabilności statycznej) występuje w przypadku generatora o stałym prądzie wzbudzenia, współpracującego z siecią sztywną. Granica stabilności statycznej przy $E'_q = \text{const}$ występuje w przypadku generatora o nadprzewodzącym zastępczym obwodzie wzbudzenia, który utrzymuje stałość liniozwojów Ψ'_{wr} zastępczego obwodu wzbudzenia. Wykres Blondela przy $E'_q = \text{const}$ jest zbliżony do charakterystyki prądowej generatora o stałym napięciu wzbudzenia w stanie przejściowym, ponieważ w początkowym czasokresie zaburzenia pracy równoległej, silnie indukcyjny obwód wzbudzenia magneśnicy podtrzymuje stałość liniozwojów zastępczego obwodu wzbudzenia. W stanie ustalonym obowiązuje w tym przypadku charakterystyka prądowa przy stałym prądzie wzbudzenia. Jeśli obwód wzbudzenia generatora jest zasilany ze wzbudnicy z szeregowym uzwojeniem wzbudzenia dostrojonym do granicy samowzbudzenia (ze wzbudnicy rototrolowej o krytycznym prądowym sprzężeniu zwrotnym) wewnętrzne napięcie wzbudnicy kompensuje spadek napięcia na oporności czynnej obwodu wzbudzenia, na skutek czego obwód wzbudzenia nabiera trwałych własności obwodu nadprzewodzącego utrzymującego stałość liniozwojów Ψ'_{wr} nie tylko w stanie przejściowym lecz również w stanie ustalonym bez ingerencji regulatora napięcia.

Można ocenić granicę stabilności dynamicznej generatora przy stałych liniozwojach wzbudzenia ($\psi_{wr} \sim E_q = \text{const}$) w czasie pierwszego półokresu kołysania kąta mocy i przy stałym momencie turbiny przyjmując konkretny przypadek zaburzenia pracy równoległej. Rozpatrzmy przypadek skokowej, przejściowej obniżki napięcia sieci sztywnej, powstałej na skutek przejściowego zwarcia w systemie elektroenergetycznym.



Rys.7c. Wykorzystanie charakterystyki katowej momentu do analizy stabilności dynamicznej generatora

Rys.7c przedstawia charakterystykę kątową momentu elektromagnetycznego generatora przy $E'_q = \text{const}$, którą można wykreślić na podstawie wykresu Blondela bądź na podstawie równania 19b. Przed obniżką napięcia sieci sztywnej moment turbiny jest równy momentowi elektromagnetycznemu generatora, którego charakterystykę kątową zaznaczono na rysunku.

Na rys.7c zaznaczono początkowy kąt mocy δ_0 . Po ustąpieniu zwarcia obowiązuje ponownie pierwotna charakterystyka kątowa. Przy obniżce napięcia sieci występuje nadmiar momentu turbiny ponad moment elektromagnetyczny powodując przyspieszenie magnesu. Przy pominięciu momentu tłumiącego $D \frac{d\delta}{dt}$ w równaniu 12 ruch magnesu jest opisany równaniem

$$T_M \frac{1}{N} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = M_t - M_{em} \quad (27a)$$

Początkowy ruch magnesńicy jest przyspieszony ($\frac{d^2\sigma}{dt^2} > 0$), po zrównaniu momentu turbiny i momentu elektromagnetycznego następuje ruch opóźniony ($\frac{d^2\sigma}{dt^2} < 0$). Ruch powrotny magnesńicy ($\frac{d\sigma}{dt} < 0$) jest konieczny dla zachowania stabilności. Całka równania określa maksymalny kąt wychylenia magnesńicy

$$\frac{T}{N} \frac{M}{\left(\frac{d\sigma}{dt}\right)_{\sigma_{max}}} = \int_{\sigma_0}^{\sigma_{max}} (M_t - M_{em}) d\sigma = 0 \quad (27b)$$

Równanie 27 b określa tzw. prawo równych powierzchni przy uproszczonej analizie stabilności dynamicznej ($A = B$ na rys.7c). Jeśli maksymalny kąt mocy przyjmuje wartość graniczną σ_{max} , przy którym zachodzi jeszcze równość powierzchni A i B (w punkcie przecięcia charakterystyki momentu turbiny i charakterystyki momentu elektromagnetycznego na rys.7c) maszyna pracuje na granicy stabilności dynamicznej. Zakłada się przy tym, że moment tłumienia $D \frac{d\sigma}{dt}$, pominięty przy wyznaczeniu σ_{max} spowoduje wytłumienie kołysań kąta mocy, a układ regulacji napięcia spowoduje utrzymanie napięcia E'_q nie mniejszego, niż na początku zaburzenia. Obliczenie granicy stabilności dynamicznej jest oczywiście bardziej skomplikowane, jeśli uwzględni się działania układu regulacji napięcia (który wpływa na ψ_{wr}) i układu regulacji prędkości turbiny (który wpływa na M_t) oraz uwzględni się moment tłumiący w czasie kołysań kąta mocy. Przy analizie stabilności dynamicznej turbogeneratorów z litą magnesńicą nie można pominąć prądu wyrównawczego w obwodzie poprzecznym magnesńicy. Prąd wyrównawczy w obwodzie poprzecznym magnesńicy podobnie jak w zastępczym obwodzie wzbudzenia utrzymuje w przybliżeniu stałość strumienia sprzężonego z obwodami poprzecznymi w początkowym czasokresie zaburzenia pracy równoległej. Można w przybliżeniu uwzględnić stałość liniozwojów magnesńicy w początkowym czasokresie szybkich zmian kąta mocy przyjmując na wykresie wektorowym (rys.3) stałość modułu wektora E' . Ruch magnesńicy względem wektora napięcia sieci powoduje zmianę kąta σ' zawartego między wektorem napięcia

sieci i wektorem E . Na wykresie Blondela stałości E' odpowiada miejsce geometryczne prądów, które otrzymuje się przyjmując formalnie $X_q = X'_q = X'_d$.

Rękopis złożono w redakcji w marcu 1963 r.

LITERATURA

- [1] B. A d k i n s: The General theory of electrical machines Chapman Hall, London 1957.
- [2] C. C o n c o r d i a: Synchronous Machines, Chapman Hall, London 1951.
- [3] A. A. G o r i e w: Pierechodnyje procesy sinchronnoj masziny. Gosenergoizdat Moskwa 1950.
- [4] W. G. H e f f r o n, R. A. P h i l l i p s: Effect of a modern amplidyne voltage regulator on underexcited operation of large turbine generators. AIEE Trans. 1952.
- [5] T. L a i b l e: Die Theorie der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb. Springer-Verlag, Berlin 1952.
- [6] A. K a m i ń s k i: Równowaga współpracy układów elektroenergetycznych Warszawa PWT 1956.
- [7] E. W. K i m b a r k: Power system stability. Chapman Hall, London 1956.
- [8] E. J. K a z o w s k i: Pierechodnyje procesy elektryczeskich maszin Gosenergoizdat. Moskwa 1962.
- [9] P. J. N o w a c k i, Z. S k o c z y ń s k i: Zwarcia w wysokonapięciowych układach elektroenergetycznych. PWT Warszawa 1954.
- [10] W. P a s z ę k: Podstawowe parametry elektromagnetyczne maszyny synchronicznej i metody ich pomiaru. Archiwum Elektrotechniki 3/62.
- [11] W. P a s z e k: Wpływ regulacji napięcia na równowagę współpracy generatorów synchronicznych. Zesz. Nauk. Pol. Śl. 6/1962.

ПРИБЛИЗИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА
КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВКИ

В статье проведен анализ динамики синхронного генератора. Анализ переходных электромагнитных процессов основан на трансформации Парка-Горева, на основании которой были сделаны замещающие схемы цепей в осях d, q, o .

Механическое движение турбоагрегата описано уравнением вращающего момента. Был рассмотрен случай отдельной работы генератора, а также случай совместной работы с жесткой сетью при малых и больших изменениях угла мощности.

L'ANALYSE APPROXIMATIVE DU GÉNÉRATEUR SYNCHROME,
TRAITÉ COMME L'OBJET DE LA RÉGULATION

On a analysé la dynamique du générateur synchrone. On a basé l'analyse des phénomènes transitoires électromagnétiques sur la transformation Park-Goriev, selon laquelle on a fait les schémas remplaçant des circuits sur les axes d, q, o . Le mouvement mécanique du turbo-alternateur a été décrit par une formule des moments de rotation. On a discuté les principes simplifiants. On a considéré le cas du travail séparé d'un alternateur, et aussi le cas du travail en commun avec le réseau rigide aux petites et aux grandes variations de l'angle de phase de la puissance.