ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Seria: ELEKTRYKA z. 51

Nr kol. 457

Władysław Paszek Zakład Maszyn Elektrycznych Politechniki Śląski j

Zdzisław Janson, Zysmunt Rozewicz ZPBE "Energopomiar"

PRZEBIEGI NIEUSTALONE PRZY REZYSTANCYJNYM ODWZBUDZANIU TURBOGENERATORA Z LITYM WIRNIKIEM

Streszczenie. Podstawę analizy stanów przejściowych stanowi schemat zastępczy maszyny synchronicznej. Konsekwencją zwykle stosowanego schematu przybliżonego, z dwoma obwodami wirnika złożonymi ze stałych skupionych, są funkcje wykładnicze w przebiegach nieustalonych podczas rezystancyjnego odwzbudzania turbogeneratora. Większą adekwatność otrzymuje się przy użyciu schematu zastępczego uwzględniającego stałe ózłożone bloku litego wirnika. Przebiegi nie ustalone podczas pospiesznego odwzbudzania są w tym przypadku opisane nowymi funkcjami nie wykładniczymi. Obliczone przebiegi nieustalone przy odwzbudzaniu rezystancyjnym turbogeneratora 50 MW porównano z przebiegami rejestrowanymi. Dobrą zbieżność wyników obliczonych i rejestrowanych otrzymano przy wyzyskaniu zaproponowanego schematu zastępczego maszyny z uwzględ-

1. Wstep

Wszystkie turbogeneratory 120 MW oraz większość generatorów mniejszej mocy w kraju wyposażona jest w rezystancyjny układ pospiesznego odwzbudzania przedstawiony schematycznie na rys. 1. W chwili zadziałania wyłącznika odwzbudzenia wskutek impulsu z zabezpieczeń lub sterownika następuje

nieniem stałych rozłożonych bloku litego.



Rys. 1. Układ rezystancyjnego pospiesznego odwzbudzania

zamknięcie styku 4 a następnie otwarcie styku 3. W ten sposób w obwód wzbudzenia zostaje wtrącona rezystancja R_g i jednocześnie odłączone źródło napięcia wzbudzenia.

2. Analiza układu rezystancyjnego pospiesznego odwzbudzania przy przyjęciu schematu zastępczego generatora o dwóch obwodach zastępczych o stałych skupionych w magneśnicy

Na rys. 2 przedstawiono schemat zastępczy maszyny synchronicznej, przy czym liniami przerywanymi zaznaczono stan wyjściowy, w którym blok lity magneśnicy reprezentowany jest przez dwie gałęzie: $L_{\rm sF}$ i $R_{\rm k}$ oraz $L_{\rm sPh}$ i $R_{\rm Ph}$, odpowiadające indukcyjności rozproszenia i rezystancji podstawo-





Rys. 2. Schemat zastępczy maszyny synchronicznej z zastępczymi obwodami o stałych skupionych w wirniku d) w osi wzdłużnej d g) w osi poprzecznej q

wej strugi prądów wirowych oraz przypowierzchniowej strugi prądów wirowych [1]. Jeśli założyć podobieństwo elektromagnetyczne gałęzi wzbudzenia i gałęzi podstawowej strugi prądów wirowych oraz gałęzi klatki tłumiącej i gałęzi przypowierzchniowej strugi prądów wirowych, tzn. przyjąć, że

$$\frac{L_{sw}}{R_w} \lesssim \frac{L_{sF}}{R_F} \quad \text{orag} \quad \frac{L_{sFh}}{R_{Fh}} \lesssim \frac{L_{sk}}{R_k}$$

dotychczasowy schemat zastępczy zostaje przekształcony w schemat, na którym magneśnica reprezentowana jest przez dwa obwody zastępcze (linie ciągłe na rys. 2).

Dla tego schematu zastępczego reaktancje względnie transmitancje operatorowe dla osi wzdłużnej oblicza się w oparciu o podstawowe równania Parka oraz znając elementy schematu zastępczego w odpowiednich osiach [1]:

$$\mathbf{X}_{d}(\mathbf{p}) = \left[\frac{-\omega_{\mathbf{N}} \eta_{d}^{*}(\mathbf{p})}{\mathbf{I}_{d}(\mathbf{p})}\right]_{\mathbf{U}_{\mathbf{w}}(\mathbf{p})=\mathbf{0}} = \mathbf{X}_{d} \frac{(1 + \mathbf{p}\mathbf{T}_{d}^{*})(1 + \mathbf{p}\mathbf{T}_{d}^{*})}{1 + \mathbf{p}\mathbf{T}_{d0}^{*}(1 + \mathbf{p}\mathbf{T}_{d0}^{*})} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{d}(\mathbf{p})}$$

$$G(p) = \frac{R_{w}^{*}}{I_{ad}} \frac{\omega_{W} \psi_{d}(p)}{U_{w}(p)} \Big|_{I_{d}}(p) = 0 = \frac{1 + pT_{std}}{(1 + pT_{do}^{*})(1 + pT_{do}^{*})}$$

$$H(p) = R_{w} \begin{bmatrix} I_{w}(p) \\ U_{w}(p) \end{bmatrix}_{I_{d}}(p) = 0 = \frac{1 + pT_{td}}{(1 + pT_{do}')(1 + pT_{do}')}$$

$$\mathbf{I}(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\mathbf{w}}(\mathbf{p}) \\ \mathbf{I}_{\mathbf{d}}(\mathbf{p}) \end{bmatrix}_{\mathbf{U}_{\mathbf{w}}}(\mathbf{p}) = \mathbf{0} = \frac{\mathbf{p}}{\omega_{\mathbf{N}}} \frac{\mathbf{X}_{\mathbf{ad}}}{\mathbf{R}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{ad}}} \mathbf{G}(\mathbf{p}),$$

gdzie:

T_{do}, T_d - stała czasowa przebiegów przejściowych w osi d przy otwartym bądź zwartym uzwojeniu twornika,

T_{do}, T_d - stała czasowa przebiegów podprzejściowych w osi d przy otwartym bądź zwartym uzwojeniu twornika,

zaś pozostałe stałe czasowe określone są następującymi równaniami:

$$T_{std} = \frac{L_{std}}{R_{td}}; \quad T_{td} = \frac{L_{td}}{R_{td}} = \frac{L_{std} + L_{ad}}{R_{td}}$$

a reaktancja synchronicsna:

$$X_d = \omega_N L_d = X_s + X_{ad}$$

Przy analizie rezystancyjnego pospiesznego odwsbudzania przekształcenie schematu przedstawione na rys. 2 prowadzi do znacznych błędów. Wskutek wtrącenia w obwód uzwojenia wzbudzenia dodatkowej oporności R w jednej z czterech równoległych gałęzi, zamiast stosunku R zachodzi Przestaje więc istnieć podobieństwo elektromagnetyczne gałęzi L R + R i L R w schemacie zastępczym.

Przeprowadzenie analizy wymagałoby przyjęcia trzech obwodów zastępczych magneśnicy. Jednakże w tym przypadku liczniki i mianowniki ułamków przedstawiających transmitancje $X_d(p)$, G(p) i H(p) są wielomianami trzeciego stopnia.



Rys. 3. Schemat zastępczy maszyny synchronicznej w osi d z dwoma obwodami o stałych skupionych w wirniku d. Obliczenia rezystancyjnego pospiesznego odwzbudzania kiego schematu zastępczego jest utrudnione. Kosztem dokładności obliczeń zrezygnowano z przyjęcia trzech zastępczych obwodów magneśnicy Zastąpiono je [2] dwoma obwodami: obwodem wzbudzenia "w" i obwodem tłumiącym "t", tak sprzężonymi, aby dawały zbliżone stałe czasowe przebiegów przejściowych przy rezystancji dodatkowej zawar-

Wyznaczenie elementów te-

tej w określonym przedziale zmienności (rys. 3).

Przy rezystancyjnym pospiesznym odwzbudzaniu reaktancja operatorowa w osi d

$$\mathbf{X}_{dg}(\mathbf{p}) = \mathbf{X}_{d} \frac{1 + \mathbf{p}(\mathbf{T}'_{W}\mathbf{k}_{g} + \mathbf{T}'_{td}) + \mathbf{p}^{2}\mathbf{T}'_{W}\mathbf{k}_{g}\mathbf{T}'_{td}\mathbf{G}'_{tW}}{1 + \mathbf{p}(\mathbf{T}_{W}\mathbf{k}_{g} + \mathbf{T}_{td}) + \mathbf{p}^{2}\mathbf{T}_{W}\mathbf{k}_{g}\mathbf{T}'_{td}\mathbf{G}'_{tW}} = \mathbf{X}_{d} \frac{(1 + \mathbf{p}\mathbf{T}'_{g})(1 + \mathbf{p}\mathbf{T}'_{g})}{(1 + \mathbf{p}\mathbf{T}'_{g})(1 + \mathbf{p}\mathbf{T}'_{g})}$$

gdzie:

$$V_w = \frac{L_w}{R_w}$$
; $L_w^* = L_{ad} + L_{smd}^* + L_{sw}^*$; $k_g = \frac{R_w}{R_w + R_g}$

 G_{tw}, G_{tw} - ogólny współczymnik rozproszenia między obwodem uzw jenia wzbudzenia i obwodem tłumiącym odpowiednio przy otwartym lub przy zwartym idealnie (bezrezystancyjnie) tworniku R=0, T_w, T_{td} - stałe czasowe obwodu wzbudzenia i obwodu tłumiącego przy zwartym idealnie (bezrezystancyjnie) tworniku

$$T'_{w} = T_{w} (1 - \frac{L_{ad}^{2}}{L_{d}L_{w}}), \quad T'_{td} = T_{td} (1 - \frac{L_{ad}^{2}}{L_{d}L_{td}})$$

Stałe czasowe przebiegów przejściowych i podprzejściowych w czasie pospiesznego odwzbudzania przy otwartym i zwartym tworniku T'go, T'g, T'g dla dowolnego kg otrzymuje się z obliczenia pierwiastków mianownika reaktancji względnie admitancji operatorowej. Dla uzyskania danych potrzebnych do obliczeń, niezbędna jest zatem znajomość stałej czasowej T'go. Konieczne jest więc wykonanie próbnego pomiaru odwzbudzania przy znanej rezystancji gaszącej, co z góry narzuca relatywną zbieżność wyników przy zbliżonych wartościach R'g i jednocześnie ogranicza zakres stosowania me-

tody. Przebiegi czasowe prądów i napięć przy odwzbudzaniu rezystancyjnym [6] określono jako odwrotne transformaty wyrażeń operatorowych, które otrzymano stosując zasadę superpozycji stanu ustalonego przed odwzbudzaniem oraz stanu zakłóceniowego, będącego wynikiem włączenia w obwód wzbudzenia napięcia - toto 1(t).

Przy odwzbudzaniu rezystancyjnym ze stanu biegu jałowego:

$$\begin{split} I_{w}(t) &= I_{wo} \bigg[\frac{T_{go}' - T_{td}}{T_{go}' - T_{go}'} \exp\left(-\frac{t}{T_{go}'}\right) + \frac{T_{td} - T_{go}'}{T_{go}' - T_{go}''} \exp\left(-\frac{t}{T_{go}}\right) \bigg] \\ (t) &\approx U_{q}(t) = U_{qo} \bigg[\frac{T_{go}' - T_{gtd}}{T_{go}' - T_{go}''} \exp\left(-\frac{t}{T_{go}'}\right) + \frac{T_{std} - T_{go}''}{T_{go}' - T_{go}''} \exp\left(-\frac{t}{T_{go}''}\right) \bigg] \end{split}$$

gdzie:

I____ - ustalony prąd wzbudzenia przed odwzbudzaniem,

 U_{qo} - ustalone napięcie twornika w osi q przed odwzbudzaniem $U_{qo} = U_{po}$ gdyż $U_{do} \approx 0$.

Przy odwzbudzaniu rezystancyjnym w stanie ustalonego zwarcia symetrycznego przy założeniu, że rezystancja twornika R = 0:

$$I_{w}(t) = I_{wo} \left[\frac{T_{g}' - T_{td}'}{T_{g}' - T_{g}''} \exp(-\frac{t}{T_{g}'}) + \frac{T_{td}' - T_{g}''}{T_{g}' - T_{g}''} \exp(-\frac{t}{T_{g}'}) \right]$$

$$I(t) \approx I_{d}(t) = I_{do} \left[\frac{T'_{g} - T_{atd}}{T'_{g} - T''_{g}} \exp\left(-\frac{t}{T'_{g}}\right) + \frac{T_{atd} - T''_{g}}{T'_{g} - T''_{g}} \exp\left(-\frac{t}{T''_{g}}\right) \right]$$

gdzie:

Ido - prąd w stanie ustalonym poprzedzającym proces odwzbudzania.

3. <u>Analiza układu rezystancyjnego pospiesznego</u> odwzbudzania przy przyjęciu schematu zastępczego turbogeneratora uwzględniającego blok lity wirnika o stałych rozłożonych

W wyniku rozwiązania cząstkowych równań różniczkowych opisujących wnikanie strumienia magnetycznego do rdzenia otrzymano zależność na operatorową reluktancję bloku litego zastąpionego równoważnym prostopadłościanem [3], [4], [6] o wymiarach a, b, l_j, rezystywności g_j , przenikalności magnetycznej μ_j .

$$R_{j}(p) = \sqrt{\frac{p}{\rho_{j} \mu_{j}}} \frac{l_{j}}{2(a+b)}$$

Reluktancja R_m(p) dla strumienia jest szeregowym połączeniem reluktancji części pakietowanej o przekroju S., szczeliny o długości l i bloku litego

$$R_{m}(p) = \frac{L_{\delta}}{S_{f}H_{\delta}} (1 + \sqrt{pT_{jd}}),$$

gdzie:

$$T_{jd} = \frac{l_{j}^{2} s_{f}^{2} \mu_{0}^{2}}{4(a+b)^{2} \mu_{j} g_{j} l_{\delta}^{2}} - stala czasowa bloku litego.$$

Wzór ten podaje związki ilościowe pomiędzy parametrami bloku litego 0 przekroju prostokątnym a danymi konstrukcyjnymi. Praktycznie parametry ma szyny wyznaczane są na drodze pomiarowej 5, a założenie przekroju prostokątnego służy tylko do obliczeń modelu.

Operatorowa indukcyjność oddziaływania twornika o zastępczej liczbie zwojów z

 $L_{ad}(p) = \frac{z^2}{R_m(p)} = L_{ad} \frac{1}{1 + 1}$



Rys. 4. Schemat sastępczy turbogeneratora s uwzględnieniem bloku litego o stałych rosłeżonych d) w osi wzdłużnej q) w osi poprzecznej

Uzależnienie indukcyjności oddziaływania twornika od pierwiastka operatora różniczkowania jest podstawą do analitycznego uwzględnienia tłumiącego oddziaływania prądów wirowych w bloku litym na przebiegi pospiesznego odwzbudzania.

Schemat zastępczy turbogeneratora, w którym uwzględniono blok lity o stałych rozłożonych [3], [5], [6] przedstawiony jest na rys. 4. Na schemacie tym gałąź zawierająca R_{kd} reprezentuje rezystancję zastępczą obwodu tłumiącego. Zastępczy obwód tłumiący, który ujmuje wpływ zębów i klinów wirnika, posiada małą indukcyjność rozproszenia. Przy analizie podstawowych stanów nieustalonych można ją pominąć.

Przyjęcie takiego schematu zastępczego prowadzi w konsekwencji do transmitancji operatorowych generatora, będących funkcjami ułamkowymi wymiernymi, których liczniki i mianowniki są wielomianami czwartego lub niższego stopnia ze względu na \sqrt{p} . Wobec tego mianownik transmitancji posiada dwie pary pierwiastków zespolonych sprzężonych $Z_1 \simeq \beta_2 = \beta_2 e^{\pm 1/2}$

$$X_{d}(p) = \frac{1}{Y_{d}(p)} = X_{d} \frac{T_{w}T_{kd}\delta_{w}\delta_{s}p^{2} + \sqrt{T_{jd}}T_{w}\delta_{w}\delta_{s}p^{3/2} + (T_{w}\delta + T_{kd}\delta_{s})p + \sqrt{T_{jd}}\delta_{s}p^{1/2} + 1}{T_{w}T_{kd}\delta_{w}p^{2} + \sqrt{T_{jd}}T_{w}\delta_{w}p^{3/2} + (T_{w} + T_{kd})p + \sqrt{T_{jd}}p^{1/2} + 1}$$

$$G(p) = \frac{1}{T_{w}T_{kd}\delta_{w}p^{2} + \sqrt{T_{jd}}T_{w}\delta_{w}p^{3/2} + (T_{w} + T_{kd})p + \sqrt{T_{jd}}p^{1/2} + 1}$$

$$H(p) = \frac{pT_{kd} + \sqrt{pT_{jd}} + 1}{T_w T_{kd} \delta_w p^2 + \sqrt{T_{jd}} T_w \delta_w p^{3/2} + (T_w + T_{kd})p + \sqrt{T_{jd}} p^{1/2} + 1}$$

gdzie:

$$T_{w} = \frac{L_{w}}{R_{w}} = \frac{L_{ad} + L_{sw}}{R_{w}^{*}}; \quad T_{kd} = \frac{L_{ad}}{R_{kd}}$$

$$S_{s} = \frac{L_{s}}{L_{d}} = \frac{L_{s}}{L_{ad} + L_{s}}; \quad S_{w} = \frac{L_{sw}}{L_{w}}; \quad S = S_{w} + S_{s} - S_{w}S_{s}$$

Odwrotne transformaty transmitancji operatorowych, a zatem i przebiegi czasowe pospiesznego odwzbudzania zawierają funkcje

$$\begin{aligned} & \gamma_1(g_{1;2}^2 t, \theta_{1,2}) = e^{g_{1;2}^2 t\cos 2\theta_{1;2}} \cos(g_{1;2}^2 t \sin 2\theta_{1;2}) - \\ & - \frac{2}{\sqrt{\pi}} v(g_{1;2} \sqrt{t}, \frac{\pi}{2} - \theta_{1;2}) \end{aligned}$$





$$(\gamma_{1,2}^{2}t, \theta_{1,2}) = -e^{(\gamma_{1,2}^{2}t\cos 2\theta_{1,2})} \sin((\gamma_{1,2}^{2}t\sin 2\theta_{1,2}) +$$

$$+\frac{2}{\sqrt{\pi}} v(g_{1;2}\sqrt{t}, \frac{\pi}{2} - \theta_{1;2})$$

przy czym funkcje $U(q Vt, \Theta)$ i $V(q Vt, \Theta)$ są zdefiniowane następująco

$$U(g\sqrt{t}, \Theta) + JV(g\sqrt{t}, \Theta) = e^{-Z^2} \int_{\Omega} e^{x^2} dx,$$

gdzie Z = g t e^{j 0}.

Funkcje $\sqrt[7]{}$ zawierają argumenty przyporządkowane odpowiednio pierwiastkom \mathbb{Z}_1 bądź \mathbb{Z}_2 , co zaznaczono umownie symbolami 1 i 2 przy γ i \mathbb{O} . Funkcje $\sqrt[7]{}_1(\varsigma^2 t, \mathfrak{O})$ i $\sqrt[7]{}_2(\varsigma^2 t, \mathfrak{O})$ przedstawiono na rys.5 i 6. Dla $\mathbb{O} = 90^\circ$ funkcja $\sqrt[7]{}_1(\varsigma^2 t, \mathfrak{I}/2)$ jest funkcją wykładniczą.

Poniewaź przebiegi przejściowe określone są funkcjami czasowymi związanymi z pierwiastkami mianownika bądź licznika reaktancji operatorowej można dla łatwiejszej orientacji oznaczyć je dodatkowym indeksem. Pierwiastki mianownika reaktancji operatorowej:

$$\frac{z_{1do}}{z_{1do}} = \frac{f_{1do}}{f_{1do}}, \quad \frac{z_{2do}}{z_{2do}} = \frac{f_{1do}}{f_{2do}}$$

są odpowiednikami odwrotności stałych czasowych T'_{do} i w przypadku rozważania maszyny z dwoma obwodami o stałych skupionych w magneśnicy, a pierwiastki licznika reaktancji operatorowej:

$$\underline{\mathbb{Z}}_{1a} = \mathcal{G}_{1a} e^{\pm j \theta_{1a}}, \quad \underline{\mathbb{Z}}_{2a} = \mathcal{G}_{2a} e^{\pm j \theta_{2a}}$$

odpowiednikami odwrotności stałych czasowych T i Td.

Przy odwzbudzaniu rezystancyjnym w szereg z uzwojeniem wzbudzenia zostaje włączona rezystancja gasząca R_g. Powoduje to zmniejszenie stałej czasowej do wartości

$$T_{wg} = T_w k_g = T_w \frac{R_w}{R_w + R_g}$$

Przebiegi nieustalone przy rezystancyjnym odwzbudzaniu...

i odpowiednią zmianę pierwiastków mianownika i licznika transmitancji:

$$\underline{\underline{z}}_{1go} = \hat{\gamma}_{1go} e^{\pm j \theta_{1go}}, \quad \underline{\underline{z}}_{2go} = \hat{\gamma}_{2go} e^{\pm j \theta_{2go}}$$
$$\underline{\underline{z}}_{1g} = \hat{\gamma}_{1g} e^{\pm j \theta_{1g}}, \quad \underline{\underline{z}}_{2g} = \hat{\gamma}_{2g} e^{\pm j \theta_{2g}}$$

jako odpowiedniki T_{go} i Tg'oras Tg i Tg.

4

Odwzbudzenie rezystancyjne z biegu jałowego

Przed rozpoczęciem odwzbudzania z biegu jałowego generatora osiowe ustalone napięcie twornika

$$U_{qo} = \omega \psi_{do} = \frac{U_{wo}}{R_{w}} X_{ad} \frac{\omega}{\omega_{w}}$$

$$U_{do} = 0$$

Przebieg zakłóceniowy wynikający z włączenia w obwód magneśnicy napięcia $-U_{wo} \frac{1}{k_{p}} 1(t)$ jest wyznaczony równaniem operatorowym¹

$$U_{qz}(p) = -G(p) \frac{U_{wo}}{k_g} \frac{X_{ad}}{K_w + R_g} \frac{\omega}{\omega_w}$$

Wykorzystując zasadę superpozycji wypadkowe napięcie twornika w osi q:

$$\mathbf{U}_{\mathbf{q}}(\mathbf{p}) = \mathbf{U}_{\mathbf{q}\mathbf{o}} \left[1 - \mathbf{G}(\mathbf{p}) \right]$$

Przebieg czasowy napięcia twornika w osi q:

$$\begin{split} \mathbf{U}_{q}(t) &= \mathbf{U}_{qo} \Big[\mathbf{K}_{24(q)}^{II} \, \mathbf{I}_{1}(\boldsymbol{\varsigma}_{1go}^{2} t, \, \boldsymbol{\theta}_{1go}) - \mathbf{K}_{34(q)}^{II} \, \mathbf{I}_{2}(\boldsymbol{\varsigma}_{1go}^{2} t, \, \boldsymbol{\theta}_{1go}) + \\ &+ \mathbf{K}_{44(q)}^{II} \, \mathbf{I}_{1}(\boldsymbol{\varsigma}_{2go}^{2} t, \, \boldsymbol{\theta}_{2go}) - \mathbf{K}_{54(q)}^{II} \, \mathbf{I}_{2}(\boldsymbol{\varsigma}_{2go}^{2} t, \, \boldsymbol{\theta}_{2go}) \Big] \end{split}$$

¹⁾Wszystkie funkcje operatorowe w niniejszym artykule są funkcjami, w których zastosowano przekształcenia Laplace'a-Carsona.

Tablica 1a

Dokładne wartości współczynników K w równaniach określających przebiegi napięcia bądź prądu twornika podczas odwzbudzenia w stanie biegu jałowego i zwarcia generatora

$K_{24}^{II, IV}$ (q), (d)	$-g_{2}^{2} \frac{(g_{1}^{2} - g_{2}^{2}) - 4a_{1}(a_{1} - a_{2})}{(g_{1}^{2} - g_{2}^{2})^{2} + 4(a_{1} - a_{2})(a_{1}g_{2}^{2} - a_{2}g_{1}^{2})}$
$k_{34}^{II, IV}$ (q), (d)	$\frac{g_2^2}{b_1} \frac{2(b_1^2 - a_1^2)(a_1 - a_2) + a_1(g_1^2 - g_2^2)}{(g_1^2 - g_2^2)^2 + 4(a_1 - a_2)(a_1g_2^2 - a_2g_1^2)}$
xII, IV 44(q), (d)	$S_{1}^{2} \frac{(S_{1}^{2} - S_{2}^{2}) - 4a_{2}(a_{1} - a_{2})}{(S_{1}^{2} - S_{2}^{2})^{2} + 4(a_{1} - a_{2})(a_{1}S_{2}^{2} - a_{2}S_{1}^{2})}$
XII, IV 54(q), (d)	$= \frac{g_1^2}{b_2} \frac{2(b_2^2 - a_2^2)(a_1 - a_2) + a_2(g_1^2 - g_2^2)}{(g_1^2 - g_2^2)^2 + 4(a_1 - a_2)(a_1g_2^2 - a_2g_1^2)}$

gdzie:

Do obliczeń współczynników $\mathbf{r}_{(q)}^{II}$ należy przyjąć \mathcal{G}_{1do} , θ_{1do} , \mathcal{G}_{2do} , θ_{2do} a w przypadku odwzbudzenia rezystancyjnego \mathcal{G}_{1go} , θ_{1go} , \mathcal{G}_{2go} , θ_{2go} Do obliczeń współczynników $\mathbf{r}_{(d)}^{IV}$ należy przyjąć \mathcal{G}_{1d} , θ_{1d} , \mathcal{G}_{2d} , θ_{2d} a w przypadku odwzbudzenia rezystancyjnego \mathcal{G}_{1g} , θ_{1g} , \mathcal{G}_{2g} , θ_{2g} .

Tablica 1 Dokładne wartości współczynników K w równaniach określających przebiegi prądu wzbudzenia w czasie odwzbudzenia w stanie biegu jałowego i ustalonego zwarcia wymetrycznego	$P_{24}^{\text{II}} P_{2}^{2} \frac{(\pi_{g} \beta_{1}^{2} - 1)(\beta_{1}^{2} - \beta_{2}^{2}) - 2(\pi_{14} \beta_{1}^{2} - 2a_{1})(a_{1} - a_{2})}{(p_{1}^{2} - p_{2}^{2})^{2} + 4(a_{1} - a_{2})(a_{1} \beta_{2}^{2} - a_{2} \beta_{1}^{2})}$	$\begin{array}{c c} II \\ \begin{array}{c} & & \\$	$S_{11}^{2} \left\{ \begin{array}{l} S_{1}^{2} & \frac{(1 - T_{a} \beta_{2}^{2})(\beta_{1}^{2} - \beta_{2}^{2}) + 2(N_{14} \beta_{2}^{2} - 2a_{2})(a_{1} - a_{2})}{(\beta_{1}^{2} - \beta_{2}^{2})^{2} + 4(a_{1} - a_{2})(a_{1} \beta_{2}^{2} - a_{2} \beta_{1}^{2})} \end{array} \right\}$	$\sum_{541\text{ w}} \frac{p_1^2}{b_2} - 2T_a g_2^2 (a_2 g_1^2 - a_1 g_2^2) + (T_a a_2 g_1^2 + V_{\overline{T}_{3d}} g_2^2 - a_2) (g_1^2 - g_2^2) - 2(V_{\overline{T}_{3d}} a_2 g_2^2 + b_2^2 - a_2^2) (a_1 - a_2) (a_2 g_1^2 - a_2) (a_1 g_2^2 - a_2) (a_1 g_2^2 - a_2) (a_1 g_2^2 - a_2) (a_1 g_2^2 - a_2) (a_2 g_1^2) (a_1 g_2^2 - a_2) (a_2 g_1^2) (a_1 g_2^2 - a_2) (a_2 g_1^2) (a_1 g_2^2 - a_2) (a_2 g_1^2 - a_2) (a_1 g_2^2 - a_2) (a_2 g_1^2 - a_2) (a_2 g_1^2 - a_2) (a_1 g_2^2 - a_2) (a_2 g_1^2 - a_2) (a_2 g_1^2 - a_2) (a_1 g_2^2 - a_2) (a_1 g_2^2 - a_2) (a_1 g_2^2 - a_2) (a_2 g_1^2 - a_2) (a_1 g_2^2 - a_2) (a_1 g_$	$ I = g_1 \cos \theta, b_1 = g_1 \sin \theta, a_2 = g_2 \cos \theta_2, b_2 = g_2 \sin \theta_2 $ o biliczeń współczynników ^{II} należy przyjąć g ₁ do, 9 ₁ do, 9 ₂ do, 9 ₂ do, 9 ₂ do, a w przypadku ow zbudzenia re cascyjnego g ₁ go, 0 ₁ go, 9 ₂ go, 0 ₂ do, 1 ₀ g ₂ do, 9 ₂ do, 9 ₂ do, 1 ₀ go, 0 m zbudzenia rezys o bliczeń współcz nników $K_{\rm IV}^{\rm IV}$ należy przyłąć g _{1d} , 9 _{1d} , g _{2d} , 0 ₂ d, a przypad u odwzbudzenia rezys i obliczeń współcz nników $K_{\rm IV}^{\rm IV}$ należy przyłąć g _{1d} , 9 _{1d} , g _{2d} , 0 _{2d} , a przypad u odwzbudzenia rezys i o bliczeń współcz nników $K_{\rm IV}^{\rm IV}$ należy przyłąć g _{1d} , 9 _{1d} , g _{2d} , 0 _{2d} , a przypad u odwzbudzenia rezys
	K ^{II}	K ^{II} X34	R ^{II} 44	K ^{II}	B1 = B00 B00 Cyin

Tablica 1c

Ozna- czenie	Indeks	Oznaczenie ^K 24 indeks	Osna- csenie K34 in- deks	Oznaczenie ^K 44 indeks	Oznaczenie ^K 54 indeks
TT	(q)	$-\frac{\rho_{2go}^2}{\rho_{1go}^2}$	0 ^{x)}	1 + $\frac{\varphi_{2g_0}^2}{\varphi_{1g_0}^2}$	- ctg02go
	(w)	Tkd 92go	0 ^{x)} .	1 - Tkd P2go	0 ^{x)}
IA	(a)	$-\frac{g_{2g}^2}{g_{1g}^2 - g_{2g}^2}$	0 ^x)	$1 + \frac{9_{2g}^2}{9_{1g}^2 - 9_{2g}^2}$	- ctg0 _{2g}
	(=)	$\frac{\varphi_2^2(\mathbf{r}_{kd} \mathbf{G}_{g} \varphi_1^2 - 1)}{\varphi_{1g}^2 - \varphi_{2g}^2}$	0 x)	$1 = \frac{g_2^2(\mathbf{T}_{kd} \delta_s g_1^2 - 1)}{g_{1g}^2 - g_{2g}^2}$	0 ^{x)}

Przybliżone wartości współczynników K w równaniach określających przebiegi nieustalone podczas pospiesznego odwzbudzania

x) Bardzo małe w porównaniu z innymi współczynnikami.

Ponieważ $U_d(t) \ll U_q(t)$ sachodzi $U(t) \approx U_q(t)$. Wartości dokładne i przybliżone współczynników [6] podane są w tablicach 1a, b, c.

Przebieg prądu wzbudzenia obliczony również przy wykorzystaniu zasady superpozycji

$$I_w(p) = I_{wo} \left[1 - H(p) \right]$$

w postaci csasowej

$$\begin{split} \mathbf{I}_{w}(t) &= \mathbf{I}_{wo} \Big[\mathbf{K}_{24}^{II}_{(w)} \tilde{\chi}_{1}(\hat{\gamma}_{1go}^{2}t, \theta_{1go}) - \mathbf{K}_{34}^{II}_{(w)} \tilde{\chi}_{2}(\hat{\gamma}_{1go}^{2}t, \theta_{1go}) + \\ &+ \mathbf{K}_{44}^{II}_{(q)} \tilde{\chi}_{1}(\hat{\gamma}_{2go}^{2}t, \theta_{2go}) - \mathbf{K}_{54}^{II}_{(w)} \tilde{\chi}_{2}(\hat{\gamma}_{2go}^{2}t, \theta_{2go}) \Big] \end{split}$$

Odwzbudzanie ze stanu ustalonego zwarcia symetrycznego

Przebieg odwzbudzania ze stanu ustalonego zwarcia symetrycznego także można przedstawić przez nałożenie na początkowy stan ustalony przebiegu zakłóceniowego, wynikającego z włączenia w obwód magneśnicy napięcia

$$-U_{wo} \frac{1}{k_{g}} 1$$
 (t)

Prąd twornika w osi d

$$I_{d}(p) = I_{do} - \frac{X_{ad}}{R_{w} + R_{g}} \frac{G(p)}{X_{d}(p)} \frac{U_{wo}}{K_{g}} = I_{do} \left[1 - \frac{G(p)}{X_{d}(p)} \right]$$

przy sałożeniu R = 0; I_q(p) = 0. Przebieg czasowy prądu twornika

$$\begin{split} \mathbf{I}(t) &= \mathbf{I}_{d}(t) = \mathbf{I}_{do} \Big[\mathbf{K}_{24(d)}^{IV} \tilde{\eta}_{1}(\hat{p}_{1g}^{2}t, \theta_{1g}) - \mathbf{K}_{54(d)}^{IV} \tilde{\eta}_{2}(\hat{\eta}_{2g}^{2}t, \theta_{1g}) \\ &+ \mathbf{K}_{44(d)}^{IV} \tilde{\eta}_{2g}(\hat{p}_{2g}^{2}t, \theta_{2g}) - \mathbf{K}_{54(d)}^{IV} \tilde{\eta}_{2}(\hat{p}_{2g}^{2}t, \theta_{2g}) \Big] \end{split}$$

Wypadkowy prąd wzbudzenia

$$I_{w}(p) = I_{wo} - \frac{U_{wo}}{k_{g}} \frac{1}{R_{w} + R_{g}} \cdot Y_{ww}(p) = I_{wo} \left[1 - Y_{ww}(p) \right],$$

gdzie Y_{ww}(p) zdefiniowano

$$X_{WW}(p) = R_{W}^{*} \begin{bmatrix} I_{W}(p) \\ \hline U_{W}(p) \end{bmatrix} / U_{Q}(p) = 0 \\ U_{Q}(p) = 0 \\ R = 0 \end{pmatrix} =$$

$$= \frac{pT_{kd}G_{s} + G_{s}\sqrt{pT_{jd}} + 1}{T_{w}T_{kd}G_{w}G_{s}p^{2} + \sqrt{T_{jd}}T_{w}G_{w}G_{s}p^{3/2} + (T_{w}G + T_{kd}G_{s})p + G_{s}\sqrt{pT_{jd}} + 1}$$

Przebieg czasowy prądu wzbudzenia

$$\begin{split} \mathbf{I}_{w}(t) &= \mathbf{I}_{wo} \left[\mathbf{K}_{24}^{IV}(\mathbf{w}) \, \tilde{\mathbf{y}}_{1}(\tilde{p}_{1g}^{2} t, \, \Theta_{1g}) - \mathbf{K}_{34}^{IV}(\mathbf{w}) \, \tilde{\mathbf{y}}_{2}(\tilde{p}_{1g}^{2} t, \, \Theta_{1g}) + \right. \\ &+ \mathbf{K}_{44}^{IV}(\mathbf{w}) \, \tilde{\mathbf{y}}_{1}(\tilde{p}_{2g}^{2} t, \, \Theta_{2g}) - \mathbf{K}_{54}^{IV}(\mathbf{w}) \, \tilde{\mathbf{y}}_{2}(\tilde{p}_{2g}^{2} t, \, \Theta_{2g}) \right] \end{split}$$

4. Porównanie wyników pomiarów i obliczeń

Wykonano pomiary odwzbudzania generatora T1-50-2 50 MW ze stanu biegu jałowego i ustalonego symetrycznego zwarcia przy tóżnych rezystancjach gaszących.

Parametry generatora określające elementy schematu zastępczego z rys.2 wyznaczono z pomiarów zaniku prądu w uzwojeniach podczas postoju generatora 3. Wyznaczone z pomiarów parametry zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2

x _d	бв	б _w	√ ^T jd•	r _w x)	Tkd
-	-	-	s ^{1/2}	8	S
1,76	0,083	0,039	0,409	9,562	0,794

Parametry elektromagnetyczne generatora

x) Przy rezystancji uzwojenia wzbudzenia 0,254 cm.

Tablica 3

9 ² 1go	Θ _{1go}	9 ² 2go	02go	P ² _{1g}	0 _{1g}	P2g	0 _{2g}	Rg	kg
s ⁻¹	-	s ⁻¹		s ⁻¹	_	s ⁻¹		om	-
51,1	88° 43'	0,480	81° 59'	61,1	88° 37'	4,88	88° 15'	1,6	0,137
59,6	88° 59'	0,588	81° 05'	67,9	88° 50'	6,22	87° 55'	2,38	0,098
80,8	89° 21'	0,767	79° 43'	86,9	89° 14'	8,59	87° 23'	4,20	0,058

Pierwiastki mianowników transmitancji

Dla oceny adekwatności przyjętego schematu zastępczego zmierzone i obliczone przebiegi napięcia bądź prądu twornika przy odwzbudzeniu i różnych rezystancjach gaszących przedstawiono na rysunkach 7-12.

W tablicy 3 zestawiono potrzebne do obliczeń przebiegów wartości modułów i kątów, zespolonych pierwiastków mianowników transmitancji.









Rys. 9. Pospieszne odwzbudzanie z biegu jeżowego (k_g = 0,058)







Rys. 11. Pospieszne odwzbudzanie s symetrycznego zwarcia ustalonego (kg = 0,098)



5. Wnioski

Obliczanie przebiegów pospiesznego odwsbudzania przy przyjęciu schematu zastępczego z dwoma obwodami o stałych skupionych w magneśnicy powoduje konieczność wykonania próbnych pomiarów odwzbudzania. Ogranicza to zakres stosowania metody. Nadto zbieżność przebiegów obliczonych z "arejestrowanymi zależy od warunków wykonywania pomiaru próbnego (im bardziej zbliżone wartości rezystancji gaszącej przy pomiarze próbnym i założonej w obliczeniach - tym lepsza zbieżność). Z tego powodu zrezygnowano z zamieszczenia w artykule przeliczeń przebiegów, których zbieżność z krzywymi rejestrowanymi jest fakultatywna.

Proponowana metoda analizy przebiegów pospiesznego odwzbudzania przy zastosowaniu schematu zastępczego generatora uwzględniającego blok lity o stałych rozłożonych umożliwia uzyskanie dobrze zbieżnych przebiegów rzeczywistych i obliczeniowych, niezależnie od wartości rezystancji w obwodzie wzbudzenia. Parametry występujące w schemacie zastępczym mogą być wyznaczone dla danego generatora z pomiaru zaniku prądu podczas postoju maszyny [5]. Proponowana metoda znajduje zastosowanie nie tylko przy obliczaniu przebiegów pospiesznego odwzbudzania lecz również przy analizie innych przebiegów, których znajomość jest ważna dla techniki zabezpieczeniowej, jak np. przebiegi zwarciowe, przebiegi przy pracy asynchronicznej itp.

LITERATURA

- [1] Paszek W. Podstawowe parametry elektromagnetyczne maszyny synchronicznej i metody ich pomiaru. Archiwum Elektrotechniki z. 3 1962.
- [2] Paszek W., Walichiewicz J. Pospieszne odwzbudzanie turbogeneratora przy pomocy oporności gaszącej. Zesz.Nauk. Pol. Śl. Elektryka z. 19, 1964.
- [3] Paszek W., Janson Z., Rozewicz Z. Wpływ litej magneśnicy na własności elektromagnetyczne maszyn synchronicznych. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Elektryka z. 42 1974.
- [4] Paszek W., Janson Z., Rozewicz Z. Wpływ bloku litego wirnika na parametry elektromagnetyczne turbogeneratora (referat) Sympozjum Elektrodynamiki Transformatorów i Maszyn Elektrycznych. 1974. Politechnika Łódzka i Instytut Elektrotechniki.
- [5] Paszek W., Janson Z., Rozewicz Z. Metoda wyznaczania parametrów elektromagnetycznych maszyny synchronicznej z litym blokiem magneśnicy. Zesz.Nauk. Pol. Śl. Elektryka z. 47 1975.
- [6] Rozewicz Z. Analiza wpływu bloku litego magneśni y na pospieszne odwzbudzanie turbogeneratorów. Praca doktorska. Politechnika Sląska 1974

Przyjęto do druku w lipcu 1975 r.

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССИ ПРИ РЕЗИСТАНЛИОННЫМ РАЗВОЗБУЖДЕНИИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА С МАССИВНЫМ РОТОРОМ

Резюме

В основу анализа переходных процессов турбогенератора положена схема замещения синхронной машины. При обычно применяемой схеме с двумя контурами с постоянными сосредоточенными в роторе получаем показательные функции, описывающие переходные процессы при резистанционным развозбуждении турбогенератора. Большее соответствие результатов можно получить, применяя схему замещения синхронной машины, учитывающую массивный ротор с постоянными распределенными.

Переходные процессы при резистанционным развозбуждении описаны в данном случае новыми функциями - не показательными. Рассчитанные переходные процессы при резистанционным развозбуждении турбогенератора 50 МВт сравнены с измеренными. Путем применения предлагаемой схемы замещения синхронной машины с учетом постоянных распределенных массивного блока получена хорошая сходимость рассчитанных и измеренных результатов. TRANSIENTS AT RESISTANCE FIELD SUPPRESSION OF TURBOGENERATOR WITH SOLID ROTOR

Summary

The basis for the transient analysis constitutes the equivalent circuit of the synchronous machine.

The results of usually applied approximative equivalent circuit with two rotor circuits composed of lumped constants are exponential functions in electromagnetic transients during resistance field suppression of the generator.

Better adequacy is obtained when equivalent circuit of the machine is used under consideration of distributed constants of solid rotor. The transients during resistance field suppression are described in this case by the new time functions which are not exponential ones.

The calculated transients at resistance field suppression of 50 MW turboalternator have been compared with results recorded.A good correspondency of the recorded and calculated points is obtained, when the proposed equivalent circuit of the machine was used under consideration of distributed constants in the solid rotor.