ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978

Seria: ELEKTRYKA z. 61 Nr kol.553

Andrzej BOBOŃ

Zakład Maszyn Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

MOMENT ELEKTROMAGNETYCZNY TURBOGENERATORA PRZY SYMETRYCZNYM ZWARCIU UDAROWYM WYZNACZONY W OPARCIU O MODEL CIĄGŁY WIRNIKA Z BLOKIEM LITYM

Streszczenie. Wyznaczono przebieg momentu elektromagnetycznego turbogeneratora przy symetrycznym zwarciu udarowym, w oparciu o model generatora z blokiem litym w magneśnicy o stałych rozłożonych. Obliczono przykładowy przebieg momentu dla turbogeneratora 50 MW, na podstawie schematu zastępczego turbogeneratora z wirnikiem o stałych rozłożonych i stałych skupionych.

1. Wstęp

Podczas zwarcia udarowego turbogeneratora pojawia się przejściowy moment elektromagnetyczny, którego maksymalna wartość wielokrotnie przewyższa wartość znamionowego momentu maszyny.

Momenty udarowe są przyczyną znacznych naprężeń mechanicznych w różnych częściach konstrukcyjnych generatora, jak wał, sprzęgło łączące generator z turbiną, śruby mocujące stojan itp.

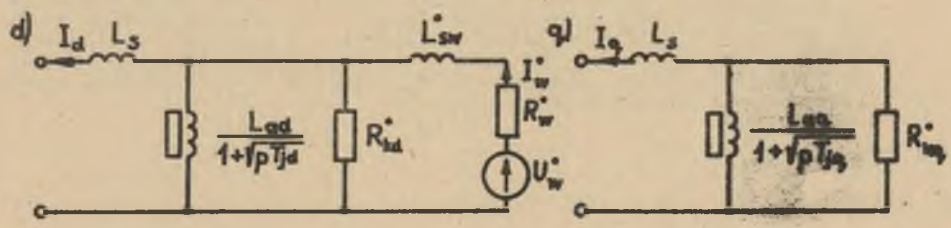
W literaturze znajdują się przybliżone metody obliczeń momentów przejściowych maszyny synchronicznej w stanie trójfazowego zwarcia symetrycznego, w oparciu o model maszyny z jednym obwodem elektrycznym w magneśnicy (maszyna prymitywna) lub z dwoma zastępczymi obwodami o parametrach skupionych w osiach d i q [5, 6, 7].

W pracach [1, 2, 3] podano nowy sposób analizy turbogeneratora, uwzględniający w wirniku blok lity o stałych rozłożonych. Otrzymany schemat zastępczy maszyny umożliwia bardziej dokładne obliczenie przebiegu momentu przejściowego turbogeneratora przy trójfazowym zwarciu symetrycznym. Symetryczne zwarcie udarowe występuje rzadziej od zwarć niesymetrycznych, jest jednak dla generatora przypadkiem najbardziej uciążliwym. Z tego powodu wyniki obliczeń przejściowego momentu przy symetrycznym zwarciu mają duże znaczenie praktyczne przy projektowaniu turbogeneratora.

2. Osiowe prądy zwarcia turbogeneratora

W pracy [2] podano wyrażenia określające przebiegi nieustalone prądów w osiach d i q w czasie symetrycznego zwarcia udarowego turbogeneratora przy biegu jałowym. Prądy te obliczono na podstawie schematu zastępczego turbogeneratora, w którym działanie bloku litego w magneśnicy uwzględnione jest przez operatorową indukcyjność oddziaływania twornika, zależną od pierwiastka operatora p.

Pokazane na rys. 1 schematy zastępcze turbogeneratora w osiach d i q uwzględniają ponadto działanie tłumiące prądów w klinach żłobkowych i zębach wirnika, tworzących pozorną klatkę tłumiącą reprezentowaną na schematach przez rezystancję klatki $R^{*}_{kd,q}$ [1, 3].



Rys. 1. Schemat zastępczy trubogeneratora w osiach d i q uwzględniający blok lity magneśnicy o stałych rozłożonych

Osiowe prądy zwarcia obliczono, przy stałej prędkości wirnika ω (tzn. zakłada się, że moment bezwładności $J \to \infty$), stałym napięciu wzbudzenia U_w oraz przy upraszczającym założeniu bardzo małej, ale niepomijalnej rezystancji twornika R. Zgodnie z pracą [2] wyrażenia na prądy symetrycznego zwarcia udarowego turbogeneratora, zapisane w jednostkach względnych, wynoszą:

$$I_{d(r)}(t) \approx I_{d(r)\,ust} + I_{d1(r)}(t) - I_{d2(r)}\, e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\omega - \omega_a)t +$$

$$+ I_{d3(r)}\, e^{-\frac{t}{T_a}} \sin(\omega - \omega_a)t, \qquad (1)$$

gdzie:

$$I_{d(r)\,ust} = \frac{\omega_{N(r)}}{\omega_{(r)}} \cdot \frac{U_{go(r)}}{X_{d(r)}} \qquad (2)$$

$$I_{d1(r)}(t) \approx \frac{\omega_{N(r)}}{\omega_{(r)}} \cdot \frac{U_{go(r)}}{X_{d(r)}} \left\{ \frac{\omega^2_{(r)}}{\omega^2_{(r)} + \varphi^4_{1d(r)}} \left[- K^{III}_{24(d)} \gamma_1(\varphi^2_{1d} t, \Theta_{1d}) + \right.\right.$$

$$\left.\left. + K^{III}_{34(d)} \gamma_2(\varphi^2_{1d} t, \Theta_{1d}) \right] - K^{III}_{44(d)} \gamma_1(\varphi^2_{2d} t, \Theta_{2d}) + K^{III}_{54(d)} \gamma_2(\varphi^2_{2d} t, \Theta_{2d}) \right\} \tag{3}$$

$$I_{d2(r)} \approx \frac{\omega_{N(r)}}{\omega_{(r)}} \cdot \frac{U_{go(r)}}{X_{d(r)}} \left[1 - K^{III}_{24(d)} \left(1 - \frac{\varphi^4_{1d(r)}}{\omega^2_{(r)} + \varphi^4_{1d(r)}}\right) - K^{III}_{44(d)} \right] \tag{4}$$

$$I_{d3(r)} \approx - \frac{\omega_{N(r)}}{\omega_{(r)}} \cdot \frac{U_{go(r)}}{X_{d(r)}} \cdot \frac{\omega_{(r)} \varphi^2_{1d(r)}}{\omega^2_{(r)} + \varphi^4_{1d(r)}} K^{III}_{24(d)} \tag{5}$$

$$I_{q(r)}(t) = I_{q1(r)}(t) - I_{q2(r)} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\omega - \omega_a)t + I_{q3(r)} e^{-\frac{t}{T_a}} \sin(\omega - \omega_a)t, \tag{6}$$

gdzie:

$$I_{q1(r)}(t) \approx \frac{\omega_{N(r)}}{\omega_{(r)}} \cdot \frac{U_{go(r)}}{X_{s(r)}} \cdot \frac{(1-\sigma_q)\varphi^2_{q(r)}}{\omega_{(r)}} \left[\gamma_1(\varphi^2_q t, \Theta_q) - \frac{a_q}{b_q} \gamma_2(\varphi^2_q t, \Theta_q) \right] \tag{7}$$

$$I_{q2(r)} \approx \frac{\omega_{N(r)}}{\omega_{(r)}} \cdot \frac{U_{go(r)}}{X_{s(r)}} \cdot \frac{(1 - \sigma_q) \varphi^2_{q(r)}}{\omega_{(r)}} \tag{8}$$

$$I_{q3(r)} \approx \frac{\omega_{N(r)}}{\omega_{(r)}} \cdot \frac{U_{go(r)}}{X_{s(r)}} \tag{9}$$

W powyższych wzorach oznaczono:

$U_{go(r)}$ – względna wartość napięcia generatora w stanie ustalonego biegu jałowego przed zwarciem,

T_a, ω_a – stała czasowa zanikania przebiegów i poprawka prędkości kątowej, uwzględniające wpływ rezystancji twornika [2],

γ_1, γ_2 - specjalne funkcje podane tabelarycznie lub w postaci wykresów [1],

$\varrho_{1d}e^{j\Theta_{1d}}$, $\varrho_{2d}e^{j\Theta_{2d}}$ - pierwiastki wielomianu licznika reaktancji operatorowej w osi d $X_d(p)$,

$\varrho_q e^{j\Theta_q} = a_q + jb_q$ - pierwiastki wielomianu licznika reaktancji operatorowej w osi q $X_q(p)$,

$\sigma_q = \frac{L_a}{L_q}$ - współczynnik rozproszenia,

$K^{III}_{24(d)}$, $K^{III}_{34(d)}$, $K^{III}_{44(d)}$, $K^{III}_{54(d)}$ - współczynniki szczegółowo określone w pracy [2].

Jako jednostki odniesienia przyjęto:

$$U_{odn} = \sqrt{2}\, U_N; \qquad I_{odn} = \sqrt{2}\, I_N; \qquad \omega_{odn} = \omega_N;$$

$$R_{odn} = X_{odn} = \frac{U_{odn}}{I_{odn}}; \qquad M_{odn} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p_b}{\omega_N} U_{odn} I_{odn}; \qquad \Psi_{odn} = \frac{U_{odn}}{\omega_N};$$

gdzie:

U_N, I_N - fazowe wartości skuteczne napięcia i prądu w warunkach znamionowych

3. Strumienie sprzężone w czasie symetrycznego zwarcia udarowego turbogeneratora

Strumienie sprzężone w czasie symetrycznego zwarcia udarowego można obliczyć w prosty sposób, opierając się na wyprowadzonych w pracy [2] zależnościach określających osiowe prądy zwarcia w postaci operatorowej, przy wykorzystaniu przekształcenia Laplace'a-Carsona. Traktuje się przy tym przebiegi przejściowe w czasie zwarcia jako wynik superpozycji przebiegów w stanie ustalonym, przy biegu jałowym przed zwarciem i przebiegów w stanie zakłóceniowym po zwarciu, symulowanym przez włączenie w schemat zastępczy generatora w osi q napięcia zaburzeniowego - $U_{qo}\,1(t)$.

Strumienie sprzężone z zastępczymi obwodami generatora w osi d i q są równe

$$\Psi_d(t) = \Psi_{do}(t) + \Psi_{dz}(t)$$

$$\Psi_q(t) = \Psi_{qo}(t) + \Psi_{qz}(t).$$

przy czym

$$\Psi_{do}(t) = \frac{U_{qo}}{\omega}$$

$$\Psi_{qo}(t) = 0$$

Składowe zakłóceniowe strumieni sprzężonych w postaci operatorowej

$$\Psi_{dz}(p) = -\frac{1}{\omega_N} I_d(p)\, X_d(p)$$

$$\Psi_{qz}(p) = -\frac{1}{\omega_N} I_q(p)\, X_q(p)$$

Wstawiając do powyższych zależności osiowe prądy zwarcia obliczone w pracy [2]

$$I_d(p) = U_{qo} \frac{\omega}{\omega_N} \cdot \frac{X_q(p)}{M_z(p)}$$

$$I_q(p) = U_{qo} \frac{p}{\omega_N} \cdot \frac{X_d(p)}{M_z(p)},$$

gdzie:

$$M_z(p) \approx \frac{1}{\omega_N^2} X_d(p)\, X_q(p) \left[p + \frac{1}{T_a} + j(\omega - \omega_a)\right] \left[p + \frac{1}{T_a} - j(\omega - \omega_a)\right],$$

otrzymuje się

$$\Psi_{dz}(p) = \frac{-\omega U_{qo}}{\left[p + \frac{1}{T_a} + j(\omega - \omega_a)\right]\left[p + \frac{1}{T_a} - j(\omega - \omega_a)\right]}$$

$$\Psi_{qz}(p) = \frac{-U_{qo}\, p}{\left[p + \frac{1}{T_a} + j(\omega - \omega_a)\right]\left[p + \frac{1}{T_a} - j(\omega - \omega_a)\right]}.$$

Czasowy przebieg składowych zakłóceniowych strumieni sprzężonych

$$\Psi_{dz}(t) = L^{-1}\left[\Psi_{dz}(p)\right] = -\frac{U_{go}}{\omega}\left[1 - e^{-\frac{t}{T_a}}\cos(\omega - \omega_a)t\right]$$

$$\Psi_{qz}(t) = L^{-1}\left[\Psi_{qz}(p)\right] = -\frac{U_{go}}{\omega-\omega_a}e^{-\frac{t}{T_a}}\sin(\omega - \omega_a)t.$$

Ostatecznie strumienie sprzężone w osiach d i q, przy zapisie w jednostkach względnych, w czasie symetrycznego zwarcia udarowego mają postać:

$$\Psi_{d(r)}(t) = \frac{U_{go(r)}}{\omega_{(r)}}e^{-\frac{t}{T_a}}\cos(\omega - \omega_a)t \tag{10}$$

$$\Psi_{q(r)}(t) = -\frac{U_{go(r)}}{\omega_{(r)}-\omega_{a(r)}}e^{-\frac{t}{T_a}}\sin(\omega - \omega_a)t. \tag{11}$$

Wyrażenia te podobne są do zależności określających przebieg strumieni sprzężonych, obliczonych na podstawie schematu zastępczego maszyny z obwodami magneśnicy o stałych skupionych. Wpływ przyjęcia bardziej ścisłego modelu trubogeneratora z blokiem litym o stałych rozłożonych tkwi w wielkościach $\frac{1}{T_a}$ oraz ω_a. Przy dużej prędkości obrotowej można przyjąć

$$\frac{1}{T_a} \approx R\,\omega_N\,\frac{1}{X_s}, \quad \omega_a \approx 0$$

i wtedy wyrażenia określające przebieg strumieni sprzężonych w osiach d i q nie różnią się od wzorów wyznaczonych na podstawie modelu turbogeneratora z wirnikiem o stałych skupionych.

4. Przebieg momentu elektromagnetycznego turbogeneratora w czasie symetrycznego zwarcia udarowego

Moment elektromagnetyczny działający w kierunku wirowania wirnika w jednostkach względnych wyznacza się na podstawie równania

$$M_{(r)} = \Psi_{q(r)}\,I_{d(r)} - \Psi_{d(r)}\,I_{q(r)} \tag{12}$$

Wstawiając zależności na osiowe prądy zwarcia (1), (6) i osiowe strumienie sprzężone (10), (11), po przekształceniach otrzymuje się

$$M_{(r)} = -\frac{U_{go(r)}}{\omega_{(r)} - \omega_{a(r)}} \left(I_{d(r)\,ust} + I_{d1(r)}(t)\right) e^{-\frac{t}{T_a}} \sin(\omega - \omega_a)\, t +$$

$$- \frac{U_{go(r)}}{\omega_{(r)}} I_{q1(r)}(t)\, e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\omega - \omega_a)\, t +$$

$$+ \frac{1}{2} \left(\frac{U_{go(r)}}{\omega_{(r)} - \omega_{a(r)}} I_{d2(r)} - \frac{U_{go(r)}}{\omega_{(r)}} I_{q3(r)}\right) e^{-\frac{2t}{T_a}} \sin 2(\omega - \omega_a)t +$$

$$+ \frac{1}{2} \left(\frac{U_{go(r)}}{\omega_{(r)} - \omega_{a(r)}} I_{d3(r)} + \frac{U_{go(r)}}{\omega_{(r)}} I_{q2(r)}\right) e^{-\frac{2t}{T_a}} \cos 2(\omega - \omega_a)t +$$

$$- \frac{1}{2} \left(\frac{U_{go(r)}}{\omega_{(r)} - \omega_{a(r)}} I_{d3(r)} - \frac{U_{go(r)}}{\omega_{(r)}} I_{q2(r)}\right) e^{-\frac{2t}{T_a}}, \qquad (13)$$

gdzie prądy: $I_{d(r)\,ust}$, $I_{d1(r)}(t)$, $I_{d2(r)}$, $I_{d3(r)}$, $I_{q1(r)}(t)$, $I_{q2(r)}$, $I_{q3(r)}$ określone są wzorami (2), (3), (4), (5), (7), (8), (9).

Biorąc pod uwagę nierówność $\omega_a \ll \omega$, w przebiegu momentu elektromagnetycznego można wyróżnić:

- składowe periodyczne o częstotliwości podstawowej, zanikające w skomplikowany sposób zależny od funkcji γ i funkcji wykładniczej $e^{-\frac{t}{T_a}}$
- składowe periodyczne o częstotliwości podwójnej zanikające ze stałą czasową $\frac{T_a}{2}$,
- składową aperiodyczną zanikającą ze stałą czasową $\frac{T_a}{2}$.

Z wyrażenia (13) wynika, że w stanie ustalonego symetrycznego zwarcia moment generatora jest równy zeru. Jest to konsekwencją przyjęcia bardzo małej lecz niepomijalnej rezystancji twornika, wpływającej tylko na tłumienie przebiegów przejściowych. W rzeczywistości osiowe strumienie sprzężone są w stanie ustalonym symetrycznego zwarcia różne od zera, wytwarzając wspólnie z ustalonym prądem zwarcia pewien niewielki moment ustalony.

Wynika to z równań generatora zapisanych w jednostkach względnych dla stanu ustalonego symetrycznego zwarcia

$$U_{d(r)} = 0 = -\omega_{(r)} \Psi_{q(r)} - I_{d(r)\ ust} R_{(r)}$$

$$U_{q(r)} = 0 = \omega_{(r)} \Psi_{d(r)} - I_{q(r)\ ust} R_{(r)},$$

stąd

$$\Psi_{d(r)} = \frac{R_{(r)}}{\omega_{(r)}} I_{q(r)\ ust}$$

$$\Psi_{q(r)} = -\frac{R_{(r)}}{\omega_{(r)}} I_{d(r)\ ust}$$

Podstawiając powyższe zależności do równania (12) otrzymuje się ustalony moment elektromagnetyczny generatora w stanie symetrycznego zwarcia

$$M_{(r)\ ust} = -\frac{R_{(r)}}{\omega_{(r)}} (I^2_{d(r)\ ust} + I^2_{q(r)\ ust}), \tag{14}$$

gdzie ustalone osiowe prądy zwarcia określają związki

$$I_{d(r)\ ust} = U_{qo(r)} \omega_{(r)} \frac{X_{q(r)}}{\omega^2_{(r)} X_{d(r)} X_{q(r)} + R^2_{(r)}} \approx \frac{U_{qo(r)}}{\omega_{(r)} X_{d(r)}}$$

$$I_{q(r)\ ust} = U_{qo(r)} \frac{R_{(r)}}{\omega^2_{(r)} X_{d(r)} X_{q(r)} + R^2_{(r)}} \approx 0.$$

Ujemna wartość momentu ustalonego oznacza, że działa on w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania wirnika.

5. Przykład obliczeniowy

Na podstawie równania (13) obliczono przykładowy przebieg momentu elektromagnetycznego w czasie symetrycznego zwarcia udarowego dla turbogeneratora typu TW - 50 o danych znamionowych: S_N = 62,5 MVA; U_N = 10,5 kV I_N = 3440 A; $\cos\varphi_N$ = 0,8; p_b = 1. Parametry elektromagnetyczne turboge-

neratora w osi wzdłużnej [8]: $X_{d(r)} = 1,76$; $X_{s(r)} = 0,146$; $T_{kd} = 0,794$ s; $T_w = 9,562$ s; $\sqrt{T_{jd}} = 0,409\ \sqrt{s}$; $R = 0,0097\Omega$ /fazę; $R_w = 0,254\Omega$; $\sigma_w = 0,039$; $\sigma_s = 0,083$.

Potrzebne do obliczeń parametry generatora w osi q wyznaczono przy założeniu, że charakterystyka modułowo-fazowa reaktancji operatorowej generatora w osi q (bez reaktancji rozproszenia X_s) pokrywa się z charakterystyką modułowo-fazową operatorowej reaktancji wewnętrznej generatora w osi d. Wewnętrzna reaktancja operatorowa $X_{id}(p)$ określona jest jako reaktancja widziana w schemacie zastępczym osi d generatora od strony twornika przy przerwanym obwodzie wzbudzenia bez reaktancji rozproszenia twornika. Na podstawie tego założenia można napisać

$$X_d \approx X_q$$

$$T_{kd} \approx T_{kq}$$

$$\sqrt{T_{jd}} \approx \sqrt{T_{jq}}$$

Obliczenia wykonano dla przypadku $U_{qo(r)} = 1$, $\omega_{(r)} = 1$. Obowiązują wtedy przybliżone związki

$$\frac{1}{T_a} \approx \omega_N \frac{R}{X_s} = 314\ \frac{0,0097}{0,257} = 11,8514\ s^{-1}$$

$$\omega_s \approx 0$$

Na podstawie szczegółowych wzorów podanych w pracach [1, 2] obliczono

$$\varphi_{1d}^2 = 48,134\ s^{-1}; \quad \Theta_{1d} = 87^o\ 58';$$

$$\varphi_{2d}^2 = 0,8462\ s^{-1}; \quad \Theta_{2d} = 89^o\ 22';$$

$$\varphi_q^2 = 15,174\ s^{-1}; \quad \Theta_q = 86^o\ 12';$$

$$K_{24(d)}^{III} = -3,29; \quad K_{34(d)}^{III} = 0,1; \quad K_{44(d)}^{III} = -7,76; \quad K_{54(d)}^{III} = 0,233.$$

Po wstawieniu wszystkich danych do wzorów (2), (3), (4), (5) i (7), (8), (9) oraz do równania (13) otrzymuje się po wykonaniu obliczeń moment jako funkcję czasu

$$M_{(r)} = -\left[I_{d1(r)}(t) + 0{,}568\right]e^{-11{,}8514\,t}\sin\omega t +$$

$$- I_{q1(r)}(t)\,e^{-11{,}8514\,t}\cos\omega t +$$

$$- 0{,}0235\,e^{-23{,}7028\,t}\sin 2\omega t +$$

$$+ 0{,}2915\,e^{-23{,}7028\,t}\cos 2\omega t +$$

$$+ 0{,}0121\,e^{-23{,}7028\,t}$$

gdzie:

$$I_{d1(r)}(t) = 0{,}568\left\{0{,}9771\left[3{,}29\,\gamma_1\,(48{,}134\,t,\ 87^\circ\,58') + \right.\right.$$

$$\left. + 0{,}1\,\gamma_2\,(48{,}134\,t,\ 87^\circ\,58')\right] + 7{,}76\,\gamma_1\,(0{,}8462\,t,\ 89^\circ\,22') +$$

$$\left. + 0{,}233\,\gamma_2\,(0{,}8462\,t,\ 89^\circ\,22')\right\}$$

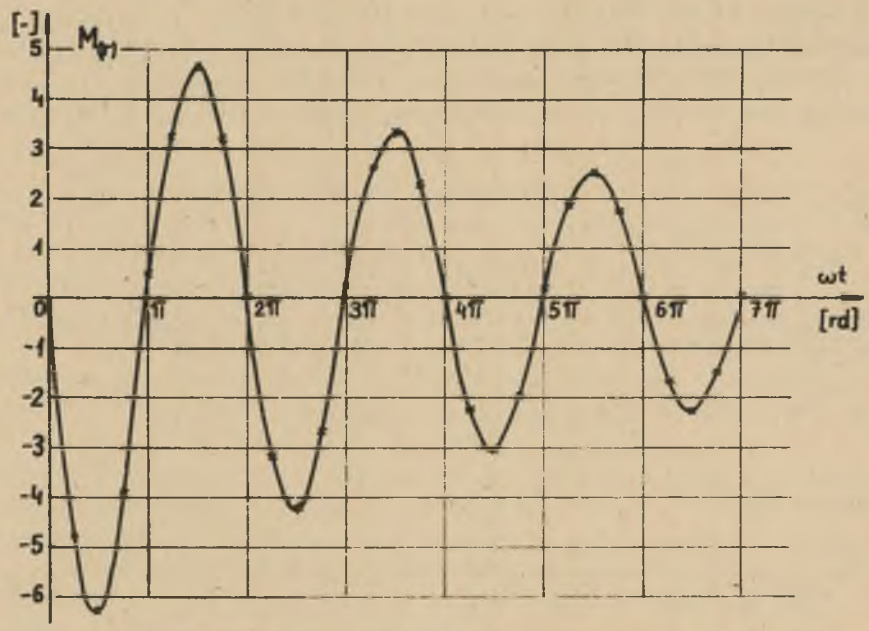
$$I_{q1(r)}(t) = 0{,}3035\left[\gamma_1(15{,}174\,t,\ 86^\circ\,12') - 0{,}0663\,\gamma_2(15{,}174\,t,\ 86^\circ\,12')\right]$$

Z zależności (14) obliczono ustalony moment przy zwarciu

$$M_{(r)\,ust} = -\frac{0{,}0055}{1}\,0{,}568^2 = -0{,}0018.$$

Na rys. 2 pokazano początkowy przebieg momentu elektromagnetycznego przy symetrycznym zwarciu udarowym. Po upływie około $\frac{1}{4}$ okresu moment osiąga swoją maksymalną wartość równą

$$M_{(r)\,max} = 6{,}3$$



Rys. 2. Początkowy przebieg momentu elektromagnetycznego przy symetrycznym zwarciu udarowym

W celu oceny wpływu przyjęcia bardziej dokładnego modelu turbogeneratora na przebieg momentu w czasie zwarcia, obliczono przebieg tego momentu w pierwszym półokresie na podstawie schematu zastępczego generatora z jednym zastępczym obwodem tłumiącym w magnesnicy. Moment elektromagnetyczny w czasie symetrycznego zwarcia udarowego opisany jest wtedy równaniem [np. [5]]:

$$M_{(r)} = -\frac{U^2_{go(r)}}{\omega^2_{(r)}} e^{-\frac{t}{T_a}} \left[\frac{1}{X_{d(r)}} + \left(\frac{1}{X'_{d(r)}} - \frac{1}{X_{d(r)}}\right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{1}{X''_{d(r)}} - \frac{1}{X'_{d(r)}}\right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \sin\omega t +$$

$$+ \frac{U^2_{go(r)}}{2\omega^2_{(r)}} \left(\frac{1}{X''_{q(r)}} - \frac{1}{X''_{q(r)}}\right) e^{\frac{-2t}{T_a}} \sin 2\omega t \qquad (15)$$

W przypadku symetrii podprzejściowej znika składowa o częstotliwości podwójnej i moment opisany jest funkcją sinusoidalną zanikającą wykładniczo. Parametry elektromagnetyczne w osi wzdłużnej, oszacowane dla turbogeneratora typu TW-50 o danych znamionowych wymienionych wyżej, wynoszą [4]:

$$X_{d(r)} = 1{,}76; \quad X'_{d(r)} = 0{,}278; \quad X''_{d(r)} = 0{,}155; \quad T'_{do} = 12\ s; \quad T''_{do} = 0{,}3\ s;$$

$$T'_d = 1{,}89\ s; \quad T''_d = 0{,}16\ s.$$

Po wstawieniu danych do równania (15) i uwzględnieniu, że

$$\frac{1}{T_a} \approx \omega_N \frac{R}{X_s} = 11{,}85\ s^{-1}$$

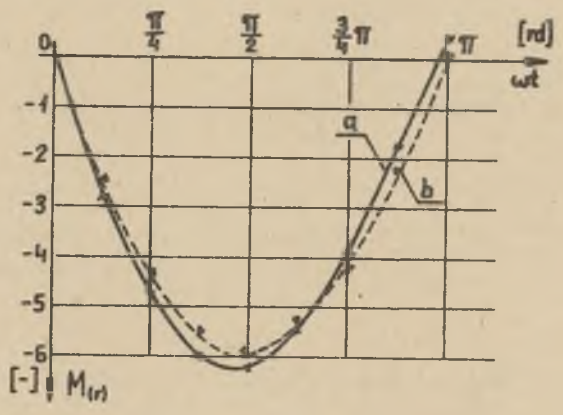
otrzymuje się:

$$M_{(r)} = -\left[0{,}57 + 3{,}03\, e^{-0{,}53\,t} + 2{,}85\, e^{-6{,}25\,t}\right] e^{-11{,}85\,t} \sin\omega t$$

W tym wypadku maksymalny moment jest równy

$$M_{(r)\,max} = 6{,}0$$

Na rys. 3 pokazano przebiegi momentu przy zwarciu dla generatora z blokiem litym o stałych rozłożonych (krzywa a) i dla generatora z jednym zastępczym obwodem tłumiącym w magnesnicy (krzywa b).



Rys. 3. Przebieg momentu przy symetrycznym zwarciu udarowym w pierwszym półokresie dla

a) generatora z blokiem litym o stałych rozłożonych, b) generatora z jednym zastępczym obwodem tłumiącym w magnesnicy

Z porównania obu krzywych wynika, że wartości momentu obliczone na podstawie schematu zastępczego uwzględniającego blok lity o stałych rozłożonych są większe niż wartości momentu obliczone metodą klasyczną.

6. Uwagi końcowe

Przejściowy moment elektromagnetyczny przy symetrycznym zwarciu udarowym może być dość prosto obliczony w oparciu o model turbogeneratora z blokiem litym o stałych rozłożonych, szczegółowo opisanym w pracach [1, 2, 3], przy założeniu bardzo małej, lecz nie pomijalnej, rezystancji twornika.

Czasowy przebieg momentu zawiera dominujące składowe periodyczne o częstotliwości podstawowej, zanikające w sposób zależny od funkcji γ_1, γ_2 i funkcji wykładniczej $e^{-\frac{t}{T_a}}$ oraz składowe o częstotliwości podwójnej i składową aperiodyczną zanikające wykładniczo.

Przykładowe obliczenia przebiegu momentu elektromagnetycznego przy zwarciu turbogeneratora przeprowadzono na podstawie modelu turbogeneratora z wirnikiem o stałych rozłożonych i stałych skupionych. Różnice liczbowe wyznaczonych wartości momentów udarowych nie są jednak duże i bardziej wiarygodne porównanie uzyskanych wyników można przeprowadzić dopiero na podstawie pomiarów rzeczywistego turbogeneratora.

LITERATURA

[1] Paszek W., Janson Z., Rozewicz Z.: Transmitancje i funkcje przejścia turbogeneratora z litym wirnikiem. "Arch. Elektrot." t. XXV, z. 4, 1976.

[2] Paszek W., Janson Z., Rozewicz Z.: Podstawowe stany nieustalone turbogeneratora z litym wirnikiem. "Arch. Elektrot." t. XXV, z. 4, 1976.

[3] Paszek W., Janson Z., Rozewicz Z.: Metoda wyznaczania parametrów elektromagnetycznych maszyny synchronicznej z litym blokiem magneśnicy. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Elektryka z. 47, 1975.

[4] Rozewicz Z.: Analiza wpływu bloku litego magneśnicy na pospieszne odwzbudzanie i własności elektromagnetyczne turbogeneratorów. Praca doktorska Pol. Śl. 1974.

[5] Praca zbiorowa: Uszkodzenia maszyn elektrycznych. WNT, Warszawa 1967.

[6] Nadolski R.: Momenty turbogeneratora dużej mocy występujące przy trójfazowym zwarciu udarowym. "Arch. Elektrot." t. XXV, z. 4, 1976.

[7] Postnikow I.M.: Obobszczennaja teoria i perechodnyje processy elektriczeskich maszin. Wysszaja szkoła, Moskwa, 1975.

[8] Paszek W., Janson Z., Rozewicz Z.: Pomiarowe wyznaczenie parametrów elektromagnetycznych turbogeneratora z litym wirnikiem. "Arch. Elektrot." t. XXVI, z. 99 - 1/1977.

Przyjęto do druku w lipcu 1977 r.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ ТУРБОГЕНЕРАТОРА С МАССИВНЫМ РОТОРОМ ПРИ ВНЕЗАПНОМ ТРЕХФАЗНОМ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Р е з ю м е

Определена кривая электромагнитного момента турбогенератора при внезапном коротком замыкании на основании модели генератора с массивным ротором с распределенными постоянными. Рассчитана примерная кривая момента для турбогенератора 50 Мвт.

ELECTROMAGNETIC TORQUE OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR WITH SOLID ROTOR AT SYMMETRICAL SUDDEN SHORT-CIRCUIT

S u m m a r y

The relationship describing elektromagnetic torque of the synchronous generator with the solid rotor at symmetrical sudden short - circuit is presented. The transient electromagnetic torque of the synchronous generator 50 MW was calculated under consideration of distributed as well as of lumped constants of solid rotor in the equivalent circuit.