

Aleksander ŻYWIEC, Jerzy KUDŁA, Andrzej BOBOŃ

Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

OCENA PRZYDATNOŚCI MODELI MATEMATYCZNYCH GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH W BADANIACH STABILNOŚCI LOKALNEJ SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych generatorów synchronicznych w dziedzinie częstotliwości umożliwiające ocenę przydatności różnych modeli matematycznych generatora w badaniach stabilności lokalnej systemu elektroenergetycznego. W badaniach uwzględniono klasyczne oraz wyższego rzędu modele matematyczne generatora synchronicznego. Badania porównawcze przeprowadzono dla generatorów dużej mocy, różniących się konstrukcją obwodów tłumiących w wirniku.

VALIDATION OF MATHEMATICAL MODELS IN INVESTIGATIONS OF THE LOCAL POWER SYSTEM STABILITY

Summary. Results of the computational power system investigations in the frequency domain which demonstrate suitability of various synchronous generator mathematical models for determination of the local power system stability are presented. Classical and high-order synchronous generator mathematical models are taken into account in investigations. Comparison of different types of the models are performed for the large power generators which differ in the construction of damper circuits in the rotor.

1. UWAGI WSTĘPNE

Stabilność systemu elektroenergetycznego przy różnych zakłóceniach jest zwykle określana na podstawie wyników odpowiednich badań symulacyjnych. W tym celu wykorzystywane są rozbudowane programy komputerowe, w których poszczególne elementy składowe systemu elektroenergetycznego są odwzorowywane, z określoną dokładnością, za

pomocą ich modeli matematycznych. Szczególnie istotny wpływ na pracę systemu elektroenergetycznego mają generatory synchroniczne, zainstalowane w węzłach wytwórczych. Z tego powodu dokładność wyników badań symulacyjnych systemu elektroenergetycznego jest w znacznym stopniu uwarunkowana dokładnością modeli matematycznych generatorów synchronicznych, zaimplementowanych w programie symulacji komputerowej.

Coraz częściej do programów symulacyjnych, stosowanych w badaniach stanów dynamicznych dużych systemów elektroenergetycznych, wprowadza się bardziej rozbudowane modele matematyczne generatorów synchronicznych (modele wyższych rzędów), które w dokładniejszy sposób odwzorowują zjawiska elektromagnetyczne występujące głównie w obwodach wirnika [1], [2], [9]. Prowadzi to do powiększenia liczby równań opisujących stan systemu elektroenergetycznego i do konieczności zastosowania przy ich rozwiązywaniu specjalnych metod, rozbudowanych programów komputerowych i sprzętu komputerowego o znacznej mocy obliczeniowej. Uzasadnione jest zatem prowadzenie badań, umożliwiających ocenę przydatności modeli matematycznych wyższych rzędów generatorów synchronicznych w badaniach stabilności systemów elektroenergetycznych. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki takich badań porównawczych w dziedzinie częstotliwości, przydatnych do określenia stabilności systemu elektroenergetycznego przy małych zakłóceniach (stabilności lokalnej). W badaniach uwzględniono klasyczne i wyższego rzędu modele matematyczne dwóch generatorów synchronicznych dużej mocy, różniących się konstrukcją obwodów tłumiących w wirniku.

2. MODEL MATEMATYCZNY I TRANSMITANCJE WIDMOWE GENERATORA SYNCHRONICZNEGO

Przy badaniu stabilności lokalnej systemu elektroenergetycznego można się posługiwać równaniami stanu elektrodynamicznego generatora, zlinearyzowanymi wokół ustalonego punktu pracy. Linearyzacja równań modelu matematycznego generatora synchronicznego pozwala na prowadzenie badań jego właściwości dynamicznych w dziedzinie częstotliwości bądź w dziedzinie modalnej, na podstawie odpowiednich transmitancji widmowych bądź transmitancji operatorowych.

W badaniach stanów elektrodynamicznych generatora, prowadzonych w dziedzinie częstotliwości, przyjmuje się zlinearyzowane równania generatora, które przy pominięciu napięć transformacji w uzwojeniu twornika, oraz przejściu do wielkości względnych, przyjmują następującą postać

$$\Delta U(j\omega) = Z(j\omega) \Delta I(j\omega) + G_f(j\omega) \Delta U_f^*(j\omega), \quad (1)$$

$$j\omega \Delta \omega_r(j\omega) = \frac{1}{T_J} (\Delta M_m(j\omega) - \Delta M_e(j\omega)), \quad (2)$$

$$j\omega \Delta \delta(j\omega) = \Delta \omega_r(j\omega), \quad (3)$$

$$\Delta M_e(j\omega) = G_{MI}(j\omega) \Delta I(j\omega) + I_{q0} G(j\omega) \Delta U_f^*(j\omega) \quad (4)$$

gdzie:

$$\Delta U(j\omega) = \begin{bmatrix} \Delta U_d(j\omega) \\ \Delta U_q(j\omega) \end{bmatrix}, \quad \Delta I(j\omega) = \begin{bmatrix} \Delta I_d(j\omega) \\ \Delta I_q(j\omega) \end{bmatrix},$$

$$G_f(j\omega) = \begin{bmatrix} 0 \\ G(j\omega) \end{bmatrix}, \quad Z(j\omega) = \begin{bmatrix} -R & L_q(j\omega) \\ -L_d(j\omega) & -R \end{bmatrix},$$

$$G_{MI}(j\omega) = \left[(-\Psi_{q0} - I_{q0} L_d(j\omega)) \quad \Psi_{d0} + I_{d0} L_q(j\omega) \right],$$

$\Delta U_d(j\omega)$, $\Delta U_q(j\omega)$, $\Delta I_d(j\omega)$, $\Delta I_q(j\omega)$ - przyrosty napięcia i prądu twornika w osiach d i q,

$\Delta U_f^*(j\omega)$ - przyrost napięcia wzbudzenia sprowadzonego na stronę twornika,

$\Delta M_e(j\omega)$, $\Delta M_m(j\omega)$ - przyrost momentu elektromagnetycznego i momentu mechanicznego,

$\Delta \omega_r(j\omega)$, $\Delta \delta(j\omega)$ - przyrost prędkości kątovej wirnika i kąta obciążenia,

Ψ_{d0} , Ψ_{q0} , I_{d0} , I_{q0} - strumienie skojarzone i prądy twornika w osiach d i q w stanie ustalonym,

ω_r , ω - prędkość kątovej wirnika i pulsacja (częstotliwość),

$L_d(j\omega)$, $L_q(j\omega)$, $G(j\omega)$ - transmitancje widmowe generatora synchronicznego,

R - rezystancja twornika,

T_J - stała czasowa elektromechaniczna.

Właściwości dynamiczne generatora podczas kołysań elektromechanicznych określa jego moment elektromagnetyczny wyrażony za pomocą współczynnika momentu synchronizującego $K(\omega)$ i współczynnika momentu tłumiącego $D(\omega)$ przy stałym napięciu wzbudzenia

$$\Delta M_e(j\omega) = (K(\omega) + j\omega D(\omega)) \Delta \delta(j\omega). \quad (5)$$

Dla generatora pracującego równolegle z siecią sztywną poprzez linię przesyłową o stałej impedancji Z_L , współczynniki $K(\omega)$ i $D(\omega)$ wyrażone są przez zależności (6) przy założeniu stałej wartości napięcia wzbudzenia ($\Delta U_f^* = 0$) i momentu mechanicznego ($\Delta M_m = 0$)

$$K(\omega) = \operatorname{Re}\{G_{M\delta}(j\omega)\} \quad D(\omega) = \operatorname{Im}\left\{\frac{1}{\omega} G_{M\delta}(j\omega)\right\} \quad (6)$$

gdzie:

$$G_{M\delta}(j\omega) = \frac{\Delta M_e(j\omega)}{\Delta \delta(j\omega)} = G_{MI}(j\omega)(Z(j\omega) + Z_L)^{-1} U_s, \quad (7)$$

przy czym

$$\Delta U_s(j\omega) = \begin{bmatrix} U_{qso} \\ -U_{dso} \end{bmatrix} \quad Z_L = \begin{bmatrix} -R_L & L_L \\ -L_L & -R_L \end{bmatrix},$$

U_{dso} , U_{qso} - składowe napięcia sieci sztywnej w osi d i q,

R_L , L_L - rezystancja i indukcyjność linii przesyłowej.

Linearyzacja równań modelu matematycznego generatora synchronicznego pozwala na prowadzenie badań jego właściwości dynamicznych w dziedzinie częstotliwości bądź w dziedzinie modalnej na podstawie odpowiednich transmitancji widmowych bądź transmitancji operatorowych.

Prowadząc badania w dziedzinie częstotliwości wykorzystuje się podstawowe transmitancje widmowe generatora synchronicznego zdefiniowane następującymi zależnościami

$$L_d(j\omega) = \frac{\Delta \Psi_d(j\omega)}{\Delta I_d(j\omega)} \Big|_{\Delta U_f^* = 0}, \quad L_q(j\omega) = \frac{\Delta \Psi_q(j\omega)}{\Delta I_q(j\omega)},$$

$$G(j\omega) = \frac{\omega_N \Delta \Psi_d(j\omega)}{\Delta U_f^*(j\omega)} \Big|_{\Delta I_d = 0} \quad (8)$$

Podstawowe transmitancje widmowe można wyrazić za pomocą parametrów gałęziowych (typu R-L) schematów zastępczych, bądź za pomocą odpowiednich stałych czasowych generatora. Wprowadzenie odpowiednich stałych czasowych pozwala na przekształcenie równań określających transmitancje widmowe do następującej postaci

$$L_d(j\omega) = L_d \prod_{i=1}^{1+n_d} \frac{(1 + j\omega T_d^i)}{(1 + j\omega T_{do}^i)}, \quad L_q(j\omega) = L_q \prod_{i=1}^{n_q} \frac{(1 + j\omega T_q^i)}{(1 + j\omega T_{qo}^i)},$$

$$G(j\omega) = G_o \prod_{i=1}^{1+n_d} \frac{(1 + j\omega T_{D\sigma}^{i-1})}{(1 + j\omega T_{do}^i)}, \quad (9)$$

przy czym L_d , L_q , G_o , T_d^i , T_{do}^i , T_q^i , T_{qo}^i , $T_{D\sigma}^{i-1}$ to parametry elektromagnetyczne transmitancji widmowych generatora synchronicznego.

W powyższych zależnościach uwzględniono model matematyczny generatora, zawierający odpowiednio n_d oraz n_q zastępczych obwodów tłumiących w osiach d i q,

określony jako model typu $(1 + n_d, n_q)$ [3], [5], [9]. Klasyczne modele generatora synchronicznego zawierają co najwyżej jeden zastępczy obwód tłumiący w osi d i dwa obwody tłumiące w osi q. Modele wyższych rzędów ($n_d \geq 2$, $n_q \geq 3$) dokładniej odwzorowują oddziaływanie prądów wirowych indukowanych w przewodzących elementach wirnika (w odkuwce, w klatce tłumiącej, w klinach przewodzących), oraz fakt niejednakowego sprzężenia magnetycznego uzwojenia wzbudzenia z pozostałymi obwodami wirnika.

Z przedstawionych równań generatora dla wymuszeń harmonicznyc widać, że o jego właściwościach dynamicznych przy małych zakłóceniach decydują jego transmitancje widmowe oraz współczynniki momentu synchronizującego i momentu tłumiącego. Zatem porównanie charakterystyk częstotliwościowych odpowiednich transmitancji widmowych oraz współczynników momentu synchronizującego i momentu tłumiącego, dla różnych modeli matematycznych generatora, pozwala na dokonanie oceny dokładności odwzorowania zjawisk elektromagnetycznych w maszynie przez jej różne modele matematyczne.

3. BADANIA PORÓWNAWCZE MODELI MATEMATYCZNYCH GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH W DZIEDZINIE CZĘSTOTLIWOŚCI

Dla generatorów synchronicznych pracujących w krajowym systemie elektroenergetycznym nie są znane parametry elektromagnetyczne modeli matematycznych wyższych rzędów. Dlatego do badań wybrano generatory: „ROCKPORT” (722 MV·A, 26 kV, 60 Hz, $\cos\varphi_N=0.85$) oraz „NANTICOKE” (589 MV·A, 22 kV, 60 Hz, $\cos\varphi_N=0.85$), różniące się konstrukcją wirnika, dla których kompletny zestaw parametrów elektromagnetycznych jest opublikowany w literaturze [6], [7], [8] (tablica 1).

Na rys. 1 i 2 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe transmitancji widmowych oraz współczynników momentu synchronizującego i tłumiącego dla generatorów „ROCKPORT” oraz „NANTICOKE”, wyznaczone przy uwzględnieniu ich modelu matematycznego typu (5,5), przyjętego dalej jako model odniesienia. Odpowiadające sobie charakterystyki częstotliwościowe obydwu generatorów mają zbliżony kształt, ale różnią się dość znacznie wartością modułu i argumentu dla określonych wartości pulsacji ω .

Dla obydwu generatorów wyznaczono podobne charakterystyki częstotliwościowe, przy uwzględnieniu różnych typów modelu matematycznego: (1,1), (2,2), (3,3). Przy porównaniu charakterystyk korzystnie jest posłużyć się procentowymi odchyłkami danej wielkości względem wielkości odniesienia zgodnie z relacją

$$\Delta W_{\%} = \frac{\hat{W}_{odn} - \hat{W}_m}{\hat{W}_{odn}} 100\%, \quad (10)$$

w której \hat{W}_{odn} - wielkość odniesienia

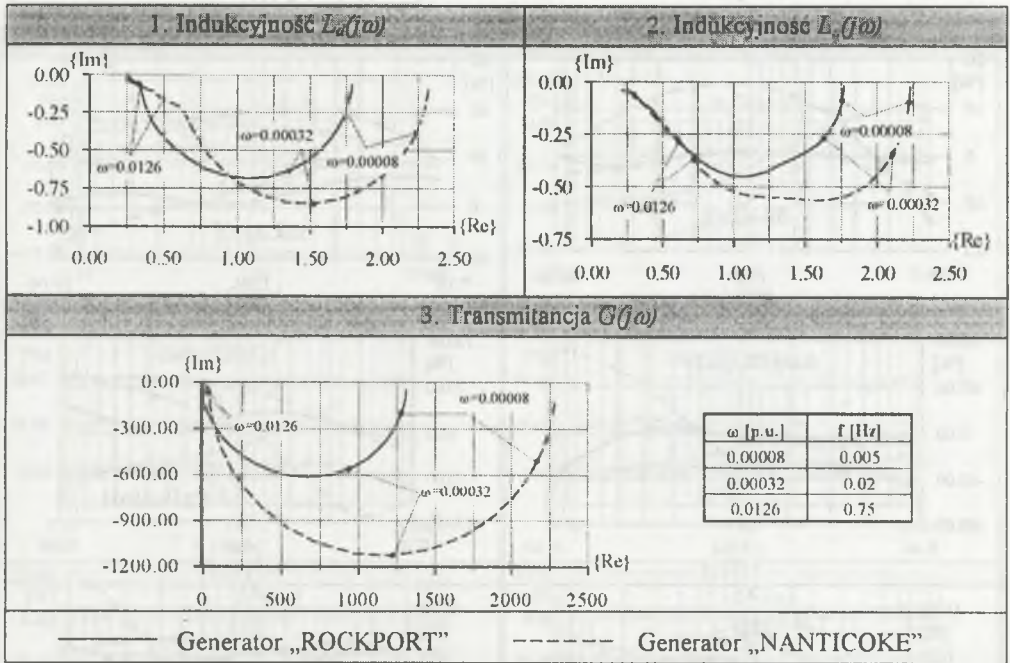
\hat{W}_m - wielkość obliczona na podstawie rozpatrywanego modelu.

Na rys.3 i 4 przedstawiono rezultaty wykonanych badań, przy czym przyjęto, że modelem odniesienia jest model typu (5,5).

Tablica 1

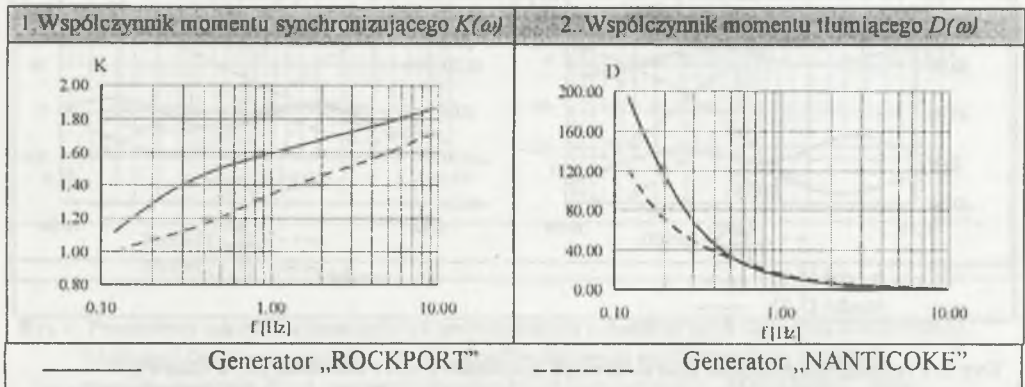
Dane znamionowe i parametry transmitancji widmowych turbogeneratorów „ROCKPORT” i „NANTICOKE” (parametry w jednostkach względnych)

GENERATOR „ROCKPORT”					GENERATOR „NANTICOKE”				
Dane znamionowe					Dane znamionowe				
$S_N=722 \text{ MV}\cdot\text{A}$		$U_N=26 \text{ kV}$		$I_N=27.77 \text{ kA}$	$S_N=589 \text{ MV}\cdot\text{A}$		$U_N=22 \text{ kV}$		$I_N=15.46 \text{ kA}$
$f_N=60 \text{ Hz}$		$\cos\varphi_N=0.85$			$f_N=60 \text{ Hz}$		$\cos\varphi_N=0.85$		
Parametry transmitancji widmowych					Parametry transmitancji widmowych				
Para- metr	Model (1.1)	Model (2.2)	Model (3.3)	Model (5,5)	Para- metr	Model (1,1)	Model (2.2)	Model (3,3)	Model (5,5)
L_d	1.79	1.79	1.79	1.79	L_d	2.324	2.324	2.324	2.324
L_σ	1.77	1.77	1.77	1.77	L_σ	2.229	2.229	2.229	2.229
G_0	1311.48	1311.48	1311.48	1311.5	G_0	2289.36	2289.36	2289.36	2289.36
T_d^1	220.19	295.892	400.252	1262.1	T_d^1	194.01	584.132	676.459	850.11
T_{do}^1	1392.46	1581.07	1824.39	2336.3	T_{do}^1	2313.94	3182.97	3140.05	2994.82
T_d^2	∞	5.3683	237.322	326.70	T_d^2	∞	6.38215	18.597	68.61
T_{do}^2	∞	6.8709	277.493	924.51	T_{do}^2	∞	6.487	28.95	105.18
T_d^3	∞	∞	4.6528	10.184	T_d^3	∞	∞	3.31	7.615
T_{do}^3	∞	∞	6.5603	12.48	T_{do}^3	∞	∞	3.345	10.33
T_d^4	∞	∞	∞	2.7066	T_d^4	∞	∞	∞	1.123
T_{do}^4	∞	∞	∞	2.9088	T_{do}^4	∞	∞	∞	1.417
T_d^5	∞	∞	∞	0.2374	T_d^5	∞	∞	∞	0.06
T_{do}^5	∞	∞	∞	0.2740	T_{do}^5	∞	∞	∞	0.0792
$T_{D\sigma}^1$	∞	0.008	310.29	1287.3	$T_{D\sigma}^1$	∞	2.4279	23.923	103.03
$T_{D\sigma}^2$	∞	∞	0.00606	7.0439	$T_{D\sigma}^2$	∞	∞	1,272	57.34
$T_{D\sigma}^3$	∞	∞	∞	0.0316	$T_{D\sigma}^3$	∞	∞	∞	0.6635
$T_{D\sigma}^4$	∞	∞	∞	0.0312	$T_{D\sigma}^4$	∞	∞	∞	0.00113
T_q^1	108.02	119.193	779.871	1732.4	T_q^1	113.934	114.497	338.446	815.43
$T_{q\sigma}^1$	369.2	374.65	1306.64	2181.0	$T_{q\sigma}^1$	339.38	370.879	769.5	1254.25
T_q^2	∞	6.8926	57.5926	190.53	T_q^2	∞	5.225	31.9754	84.936
$T_{q\sigma}^2$	∞	13.53	125.273	358.81	$T_{q\sigma}^2$	∞	13.11	70.788	188.87
T_q^3	∞	∞	3.2565	39.199	T_q^3	∞	∞	2.0945	10.556
$T_{q\sigma}^3$	∞	∞	5.8545	64.927	$T_{q\sigma}^3$	∞	∞	3.6013	17.34
T_q^4	∞	∞	∞	4.5232	T_q^4	∞	∞	∞	1.278
$T_{q\sigma}^4$	∞	∞	∞	6.5443	$T_{q\sigma}^4$	∞	∞	∞	1.8322
T_q^5	∞	∞	∞	0.3432	T_q^5	∞	∞	∞	0.0622
$T_{q\sigma}^5$	∞	∞	∞	0.4563	$T_{q\sigma}^5$	∞	∞	∞	0.08897



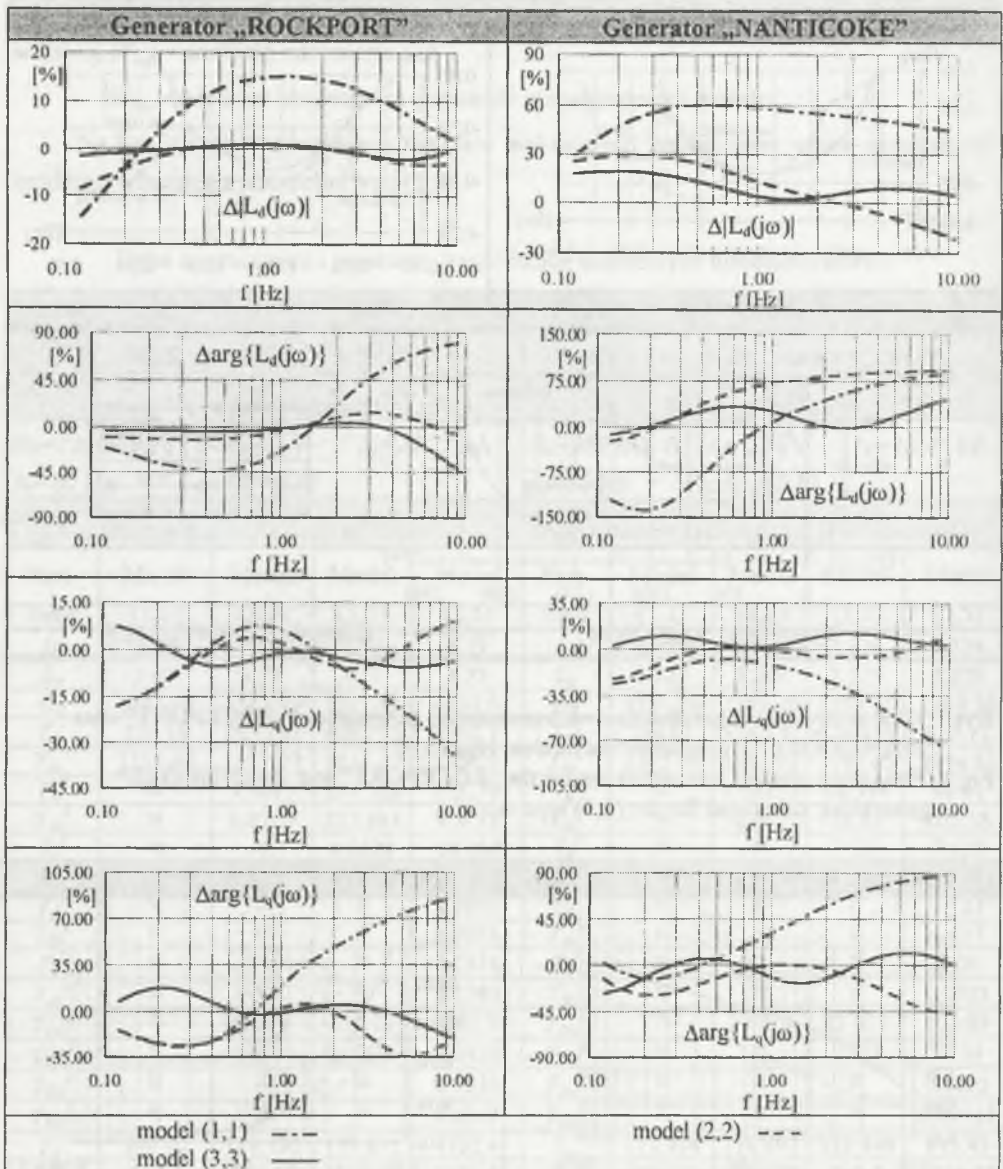
Rys. 1. Charakterystyki częstotliwościowe transmitancji generatorów „ROCKPORT” oraz „NANTICOKE” wyznaczone dla modelu typu (5,5)

Fig. 1. Frequency plots of transmittances for the „ROCKPORT” and „NANTICOKE” generators, calculated for the (5,5) type model



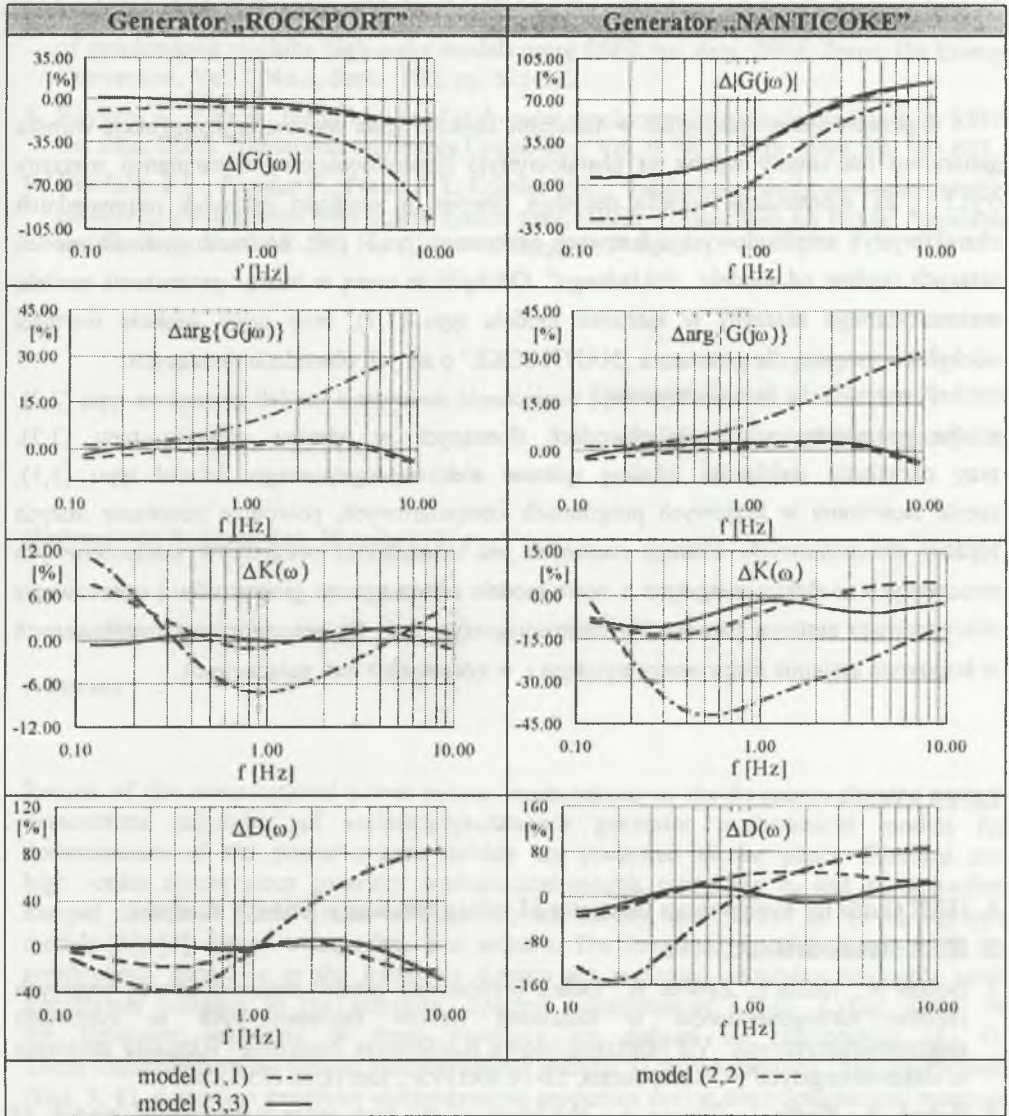
Rys. 2. Charakterystyki częstotliwościowe współczynników momentu synchronizującego i momentu tłumiącego generatorów „ROCKPORT” oraz „NANTICOKE” wyznaczone dla modelu typu (5,5)

Fig. 2. Frequency plots of electromagnetic stiffness and damping coefficient for the „ROCKPORT” and „NANTICOKE” generators, calculated for the (5,5) type model



Rys.3. Procentowe odchyłki charakterystyk amplitudowych i charakterystyk fazowych indukcyjności widmowych generatorów „ROCKPORT” i „NANTICOKE” dla różnych typów modeli od odpowiednich charakterystyk odniesienia, wyznaczonych na podstawie modelu „dokładnego” typu (5,5).

Fig.3. Percentage errors of magnitude and phase characteristics of spectral inductances of „ROCKPORT” and „NANTICOKE” generators, calculated for several types of models and for the model of (5,5) type as the reference model



Rys. 4. Procentowe odchyłki charakterystyk amplitudowych i charakterystyk fazowych transmitancji widmowej $G(j\omega)$ oraz charakterystyk częstotliwościowych współczynników momentu synchronizującego $K(\omega)$ i momentu tłumiącego $D(\omega)$ generatorów „ROCKPORT” oraz „NANTICOKE” dla różnych typów modeli od odpowiednich charakterystyk odniesienia, wyznaczonych na podstawie modelu „dokładnego” typu (5,5)

Fig. 4. Percentage errors of magnitude and phase characteristics of the $G(j\omega)$ spectral transmittance and of frequency characteristics of electromagnetic stiffness $K(\omega)$ and damping coefficients $D(\omega)$ of „ROCKPORT” and „NANTICOKE” generators, calculated for several types of models and for the model of (5,5) type as the reference model

4. UWAGI KOŃCOWE

Z przeprowadzonych badań w dziedzinie częstotliwości wynika, że konstrukcja wirnika generatora ma istotny wpływ na charakterystyki częstotliwościowe transmitancji maszyny (rys.1 i 2). Konstrukcja wirnika decyduje również o wielkości odchyłek odpowiednich charakterystyk amplitudowych i fazowych generatora (rys.3 i 4), wyznaczonych dla modeli niższych rzędów od modelu „dokładnego”. Odchyłki te rosną w miarę upraszczania modelu matematycznego maszyny w kierunku modelu typu (1,1), przy czym większe wartości odchyłek występują dla generatora „NANTICOKE” o silnych obwodach tłumiących.

Przedstawione badania wykazują konieczność stosowania modeli generatora typu (2,2), a dla generatora o silnych obwodach tłumiących w wirniku, również typu (3,3), przy określaniu stabilności lokalnej systemu elektroenergetycznego. Model typu (1,1), często stosowany w krajowych programach komputerowych, powoduje powstanie dużych błędów obliczeniowych. Dlatego niezbędne jest uzupełnienie programów komputerowych stosowanych w elektroenergetyce o nowe modele matematyczne generatorów i opracowanie wiarygodnego zestawu parametrów elektromagnetycznych dla generatorów zainstalowanych w krajowym systemie elektroenergetycznym i w systemach z nim połączonych.

LITERATURA

1. IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices in Stability Analyses.
2. IEEE Standards Board, 1991.
3. Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: Ocena przydatności modeli matematycznych wyższych rzędów turbogeneratorów w badaniach stanów zakłóceń w systemach elektroenergetycznych. VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa “Aktualne problemy w elektroenergetyce”, Gdańsk-Jurata, 12-14.06.1995r., tom II, ss.135-142.
4. Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: Validation of the high-order mathematical models of turbogenerators in investigations of dynamic performances of power systems. International Workshop on Electrical Machines, 11-12 Sept. 1996, Prague, pp.110-119.
5. J. Kudła, W. Burlikowski, R. Krok: Analiza wpływu typu modelu matematycznego generatora synchronicznego na dokładność odwzorowania jego własności dynamicznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej “Elektryka”, z. 138, Gliwice 1994, s. 63-78.
6. Atarod V., Dandeno P. L., Iravani M. R.: Impact of synchronous machine constants and models on the analysis of torsional dynamics, IEEE Transaction on Power Systems, Vol.7, No 4, November 1992, pp. 1456-1462.

7. Kamwa I., Viarouge P., Dickinson J.: A frequency-domain maximum likelihood estimation of synchronous machine high-order models using SSFR test data. IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol.7, No.3, Sept. 1992, pp. 525-532.
8. Keyhani A., Tsai H.: Identification of high-order synchronous generator models from SSFR test data, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 9, No 3, Sept. 1994, pp. 593-603.
9. Dandeno P.L., Kundur P., Poray A.T. Coutles M.E.: Validation of turbogenerator stability models by comparisons with power system tests, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-100, No 4, April 1981, pp 1637-1645.

Recenzent: Dr hab. inż. Roman Nadolski
Profesor Politechniki Świętokrzyskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 30 maja 1997 r.

Abstract

Results of the computational power system investigations in the frequency domain which demonstrate suitability of various synchronous generator mathematical models for determination of the power system stability are presented in the paper. Classical and high-order synchronous generator mathematical models containing n_d and n_q equivalent damper circuits in d and q axes of the rotor, respectively, and marked as $(1+n_d, n_q)$ type models [3], [5], [9] are taken into account. The linearized equation set (1-4) of the synchronous generator in the frequency domain are presented, assuming negligible small transformer voltages in the armature. Spectral transmittances $L_d(j\omega)$, $L_q(j\omega)$, $G(j\omega)$ of the generator appearing in these equations are defined by relationships (8, 9). These transmittances, as well as electromagnetic stiffness $K(\omega)$ and damping $D(\omega)$ coefficients (Eqs. 5, 6), determine generator electrodynamic properties during electromechanical huntings in the power system. The numerical investigations are performed for „ROCKPORT” and „NANTICOKE” generators with different construction of the rotor damper circuits. Electromagnetic parameters of these generators (table 1) are published in the literature [6], [7], [8]. Comparison of the frequency plots of spectral transmittances and electromagnetic stiffness and damping coefficients for both generators and the model of (5,5) type as the reference model is shown in Figs. 1 and 2. The frequency plots of percentage error values between the magnitude and phase characteristics of spectral transmittances, and $K(\omega)$ and $D(\omega)$ coefficients are presented in Figs. 3 and 4. They are calculated for several types of the generator mathematical models and the model of (5,5) type as the reference model. Necessity of use of the (2,2) type models of synchronous generators with weak damper

circuits in the rotor for the study of the power system local stability arises from the presented results of numerical computations. However, such models are not sufficient for generators with strong damper circuits in the rotor, and high-order mathematical models, for example (3,3) type models must be used then.