ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994

Seria: ELEKTRYKA z. 138 Nr kol. 1245

Jerzy KUDŁA, Wojciech BURLIKOWSKI, Roman KROK

ANALIZA WPŁYWU TYPU MODELU MATEMATYCZNEGO GENERATORA SYNCHRONICZNEGO NA DOKŁADNOŚĆ ODWZOROWANIA JEGO WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono modele matematyczne generatora synchronicznego, umożliwiające uwzględnienie oddziaływania obwodów tłumiących wirnika na własności maszyny. Wykorzystując nieliniową oraz zlinearyzowaną postać równań maszyny, przeanalizowano wpływ typu modelu na dokładność odwzorowania właściwości generatora tak w dziedzinie czasu, jak i w dziedzinie modalnej oraz częstotliwościowej.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SYNCHRONOUS MACHINE MATHEMATICAL MODEL TYPE ON THE ACCURACY OF REPRESENTATION OF MACHINE DYNAMIC PROPERTIES

Summary. The paper presents mathematical models of a synchronous generator, which enable consideration of the influence of rotor damper circuits on the machine properties. Using nonlinear and linearized form of the generator equations, the influence of the machine model type on the accuracy of representation of the machine performance both in time and in modal and frequency domains has been analysed.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Резюме. В статье представлены математические модели синхронного генератора позволяющие учитывать влияние демпфирующих обмоток ротора на характеристики машины. При помощи линейных и нелинейных математических моделей проведена оценка точности определения временных, модульных и частотных характеристик синхронного генератора.

1. WSTĘP

Własności dynamiczne generatora synchronicznego pracującego w systemie elektroenergetycznym analizowane są, w zależności od rodzaju zakłócenia, na podstawie pełnego, nieliniowego układu równań stanu bądź też jego postaci zlinearyzowanej wokół ustalonego punktu pracy [6].

Badania przy wykorzystaniu pierwszej z tych metod, wymagające przeprowadzenia symulacji komputerowych w dziedzinie czasu, dokonywane są najczęściej w celu:

- wyznaczenia wartości maksymalnych (udarowych) przebiegów czasowych prądów, napięć oraz momentu elektromagnetycznego podczas trwania stanu nieustalonego (dla doboru aparatury zabezpieczeniowej oraz obliczeń wytrzmałościowych wału oraz czół uzwojeń),
- określenia synchronicznej stabilności dynamicznej (stabilność pierwszego wychylenia magneśnicy),
- wyznaczenia błędu spowodowanego pominięciem napięć transformacji w obwodach stojana podczas badań krótkookresowej stabilności dynamicznej oraz badań kolejnych kołysań magneśnicy.

Model zlineryzowany jest stosowany zarówno do przeprowadzania symulacji procesów dynamicznych w dziedzinie czasu, jak i do analizy rozkładu wartości własnych oraz wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych przydatnych do określenia:

- stabilności małosygnałowej rozbudowanych systemów elektroenergetycznych,
- parametrów oraz nastaw w układach regulacji współpracujących z generatorem (regulator napięcia, stabilizator systemowy).

W obydwu przypadkach dokładność otrzymanych wyników badań symulacyjnych jest zależna od poprawnego odwzorowania w modelu matematycznym generatora wpływu prądów wirowych indukowanych w litych elementach beczki wirnika, klinach przewodzących oraz w klatce tłumiącej w czasie trwania stanu nieustalonego. Obwodowe modele matematyczne maszyny uwzględniają wpływ tego zjawiska na procesy dynamiczne poprzez wprowadzenie dodatkowych, zastępczych obwodów tłumiących w osiach d i q schematu zastępczego generatora. Ich liczba jak i parametry, wraz z parametrami obwodu wzbudzenia, wyznaczane są na podstawie wybranych transmitancji widmowych maszyny lub wybranych przebiegów czasowych, otrzymanych w wyniku pomiarów, przy wykorzystaniu odpowiednich algorytmów optymalizacyjnych [2], [3], [4], [5].

W artykule przeprowadzono analizę wpływu liczby zastępczych obwodów tłumiących wirnika na dokładność odwzorowania wybranych procesów dynamicznych. Analizę dokładności odwzorowania procesów dynamicznych przeprowadzono porównując :

- przebiegi czasowe kąta obciążenia δ,
- rozkład wartości własnych związanych z ruchem magneśnicy,
- charakterystyki częstotliwościowe momentu tłumiącego i synchronizującego wyznaczone przy uwzględnieniu różnej liczby zastępczych obwodów tłumiących.

2. MODELE MATEMATYCZNE GENERATORA SYNCHRONICZNEGO O SKOŃCZONEJ LICZBIE OBWODÓW TŁUMIĄCYCH W WIRNIKU

W celu przeprowadzenia badań sformułowano model matematyczny generatora synchronicznego, zawierający n_d, n_q zastępczych obwodów tłumiących odpowiednio w osiach d,q maszyny, uwzględniający dodatkowe sprzężenia obwodu wzbudzenia z obwodami tłumiącymi w osi d poprzez strumienie rozproszenia [1]. W zależności od liczby obwodów odpowiedni typ modelu określony jest parą liczb $(1+n_d, n_q)$, która dodatkowo uwzględnia istnienie obwodu wzbudzenia w osi d. Równania tego modelu zostały następnie zlinearyzowane przy pominięciu napięć transformacji w uzwojeniach stojana, co z kolei umożliwiło wykorzystanie ich do badań małosygnałowych maszyny pracującej w systemie elektroenergetycznym.

2.1. Model matematyczny generatora opisany nieliniowym układem równań stanu

Przy formułowaniu modelu jako zmienne stanu układu elektromagnetycznego generatora przyjęto strumienie magnetyczne sprzężone z obwodami stojana i wirnika. Równania modelu, zapisane w jednostkach względnych (z wyjątkiem czasu t i kąta δ), przyjmują postać :

- równań różniczkowych dla obwodów stojana i wirnika

$$\begin{bmatrix} U_{Gd} \\ U_{Gq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{Gd}L_{Gd}^{-1} & \Omega_{Gq} \\ \Omega_{Gd} & R_{Gq}L_{Gq}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{Gd} \\ \Psi_{Gq} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_N} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{Gd} \\ \Psi_{Gq} \end{bmatrix}, \tag{1}$$

– równań różniczkowych ruchu mechanicznego wirnika

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_j}(M_m - M_e), \quad \frac{d\delta}{dt} = \omega_N(\omega - 1), \quad M_e = \Psi_q(-I_d) - \Psi_d(-I_q). \tag{2}$$

Występujące w równaniach (1) i (2) macierze oraz wektory mają postać:

$$U_{Gd} = \begin{bmatrix} U_d \\ U_{rd} \end{bmatrix}, \quad U_{Gq} = \begin{bmatrix} U_q \\ U_{rq} \end{bmatrix}, \quad \Psi_{Gd} = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_{rd} \end{bmatrix}, \quad \Psi_{Gq} = \begin{bmatrix} \Psi_q \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix},$$

$$R_{Gd} = \mathrm{diag}\{R, R_{rd}\}, \qquad R_{Gq} = \mathrm{diag}\{R, R_{rq}\},$$

$$L_{Gd} = \begin{bmatrix} L_d & L_{srd} \\ L_{srd}^T & L_{rd} \end{bmatrix}, \qquad L_{Gq} = \begin{bmatrix} L_q & L_{srq} \\ L_{srq}^T & L_{rq} \end{bmatrix},$$

$$\Omega_{Gd} = \begin{bmatrix} \omega & 0 \\ 0^T & 0 \end{bmatrix}, \qquad \Omega_{Gq} = \begin{bmatrix} -\omega & 0 \\ 0^T & 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$U_{rd} = \left[u_f^*, \ 0.....0\right]^T, \qquad \Psi_{rd} = \left[\Psi_f^*, \ \Psi_{D1}^* \ldots \Psi_{Di}^* \ldots \Psi_{Dn_d}^*\right]^T,$$

$$U_{rq} = \left[0, \ 0.....0\right]^T, \qquad \Psi_{rq} = \left[\Psi_{Q1}^* \ldots \Psi_{Qi}^* \ldots \Psi_{Qn_q}^*\right]^T,$$

$$R_{rd} = \mathrm{diag}\left\{R_f^*, \ R_{D1}^* \ldots R_{Di}^* \ldots R_{Dn_d}^*\right\}, \qquad R_{rq} = \mathrm{diag}\left\{R_{Q1}^* \ldots R_{Qi}^* \ldots R_{Qn_q}^*\right\}.$$

Elementy macierzy L_{Gd}, L_{Gq} - indukcyjności własne i wzajemne obwodów maszyny wynoszą:

– dla osi d

$$L_d = L_{ad} + L_\sigma, \qquad L_{ff}^* = L_{ad} + L_{\sigma f}^* + \sum_{k=1}^{n_d} L_{\sigma f k}^*,$$

$$L_{DiDi}^* = L_{ad} + L_{\sigma Di}^* + \sum_{k=1}^{i} L_{\sigma f k}^*, \tag{4}$$

$$L_{df}^* = L_{fd}^* = L_{dDi}^* = L_{Did}^* = L_{ad}, \ L_{fDi}^* = L_{Dif}^* = L_{DiDi}^* - L_{\sigma Di}^*,$$

$$L_{DiDj}^* = L_{DjDi}^* = L_{DjDj}^* - L_{\sigma Dj}^* \ (j < i),$$

– dla osi q

$$L_q = L_{aq} + L_\sigma, \qquad L_{QiQi}^* = L_{aq} + L_{\sigma Qi}^*,$$

$$L_{qQi}^* = L_{Qiq}^* = L_{aq}, \qquad L_{QiQj}^* = L_{QjQi}^* = L_{aq}. \tag{5}$$

2.2. Model matematyczny generatora opisany zlinearyzowanywym układem równań stanu przy pominięciu napięć transformacji w obwodach stojana

Przy konstrukcji modelu jako zmienne stanu układu elektromagnetycznego generatora przyjęto strumienie magnetyczne sprzężone z obwodami wirnika. Równania modelu zapisane w jednostkach wzgędnych (z wyjątkiem czasu t i kąta $\Delta\delta$) przyjmują postać :

- równań algebraicznych dla obwodów stojana

$$\begin{bmatrix}\Delta U_d\\ \Delta U_q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & -L_{srq}L_{rq}^{-1}\\ L_{srd}L_{rd}^{-1} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\Psi_{rd}\\ \Delta\Psi_{rq}\end{bmatrix}+$$
$$+\begin{bmatrix}R & -(L_q-L_{srq}L_{rq}^{-1}L_{srq}^{T})\\ (L_d-L_{srd}L_{rd}^{-1}L_{srd}^{T}) & R\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-\Delta I_d\\ -\Delta I_q\end{bmatrix}, \tag{6}$$

- równań różniczkowych dla obwodów wirnika

$$\begin{bmatrix}\Delta U_{rd}\\ \Delta U_{rq}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R_{rd}L_{rd}^{-1} & 0\\ 0 & R_{rq}L_{rq}^{-1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\Psi_{rd}\\ \Delta\Psi_{rq}\end{bmatrix}+\frac{1}{\omega_N}\cdot\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\Delta\Psi_{rd}\\ \Delta\Psi_{rq}\end{bmatrix}+$$
$$+\begin{bmatrix}-R_{rd}L_{rd}^{-1}L_{srd}^{T} & 0\\ 0 & -R_{rq}L_{rq}^{-1}L_{srq}^{T}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-\Delta I_d\\ -\Delta I_q\end{bmatrix}, \tag{7}$$

- równań ruchu mechanicznego

$$\frac{d\Delta\omega}{dt}=\frac{1}{T_j}(\Delta M_m-\Delta M_e)\,,\qquad \frac{d\Delta\delta}{dt}=\omega_N\,\Delta\omega, \tag{8}$$

$$\Delta M_e=(-I_{d0})\Delta\Psi_q-(-I_{q0})\Delta\Psi_d+\Psi_{q0}(-\Delta I_d)-\Psi_{d0}(-\Delta I_q),$$

$$\Delta\Psi_d=(L_d-L_{srd}L_{rd}^{-1}L_{srd}^{T})(-\Delta I_d)+L_{srd}L_{rd}^{-1}\Delta\Psi_{rd}\,, \tag{9}$$

$$\Delta\Psi_q=(L_q-L_{srq}L_{rq}^{-1}L_{srq}^{T})(-\Delta I_q)+L_{srq}L_{rq}^{-1}\Delta\Psi_{rq}\,.$$

Wielkości występujące w równaniach (6)÷(9) z operatorem Δ stanowią przyrosty odpowiednich zmiennych zdefiniowanych w rozdziale 2.1.

Oznaczenia:

$U_d, U_q, I_d, I_q, \Psi_d, \Psi_q$ - napięcia, prądy, strumienie skojarzone z obwodami stojana w osi d, q,

$U_f^*, \Psi_f^*, \Psi_{Di}^*, \Psi_{Qi}^*$ - napięcie, strumień skojarzony z obwodem wzbudzenia, strumienie skojarzone z obwodami tłumiącymi,

M_e, M_m - moment elektromagnetyczny i mechaniczny,

$R, R_f^*, R_{Di}^*, R_{Qi}^*$ - rezystancja stojana, wzbudzenia, obwodu tłumiącego w osi d,q,

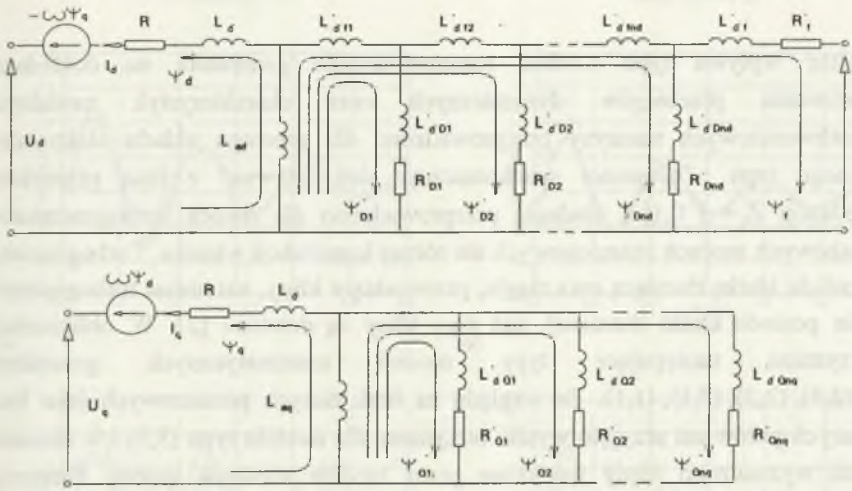
L_{ad}, L_{aq}, L_σ - indukcyjność oddziaływania twornika w osi d i q, indukcyjność rozproszenia stojana,

$L_{\sigma f}^*, L_{\sigma Di}^*, L_{\sigma Qi}^*, L_{\sigma fk}^*$ - indukcyjność rozproszenia wzbudzenia, obwodu tłumiącego w osi d i q, indukcyjność rozproszenia różnicowego,

$\omega, \delta, \omega_N, T_j$ - prędkość kątowa wirnika, kąt obciążenia, pulsacja znamionowa sieci, elektromechaniczna stała czasowa,

Δ - operator oznaczający wielkość przyrostową w zlinearyzowanym modelu matematycznym generatora.

Występujące w równaniach generatora strumienie magnetyczne skojarzone z obwodami stojana oraz wirnika jak również parametry występujące w macierzach rezystancji i indukcyjności zostały odwzorowane na schematach zastępczych przedstawionych na rys.1.



Rys.1. Schematy zastępcze maszyny synchronicznej w osiach d, q
Fig. 1. Synchronous machine equivalent circuits in d, q axes

2.3. Określenie typu modelu matematycznego generatora synchronicznego

W praktyce liczby zastępczych obwodów tłumiących n_d , n_q w osiach d,q wirnika mieszczą się w granicach $n_d \in (0,2)$, $n_q \in (0,3)$, co ogranicza zakres możliwych typów modeli matematycznych generatora do zbioru $\{(1,0) \div (3,3)\}$. Wybór właściwego typu modelu ma szczególnie istotny wpływ na analizę dużych sytemów elekroenergetycznych, decyduje bowiem o rozmiarze rozwiązywanych układów równań, a tym samym o czasie obliczeń oraz wymaganej pojemności pamięci operacyjnej [2],[6].

Zastosowanie określonego typu oraz rodzaju (nieliniowy, zlinearyzowany) modelu matematycznego dla wybranego generatora w systemie zależy między innymi od następujących czynników:

- rodzaju analizowanego zakłócenia,
- umiejscowienia tego generatora względem miejsca wystąpienia zakłócenia,
- wymaganej dokładności odwzorowania towarzyszących mu przebiegów dynamicznych,
- konstrukcji wirnika generatora oraz jego mocy.

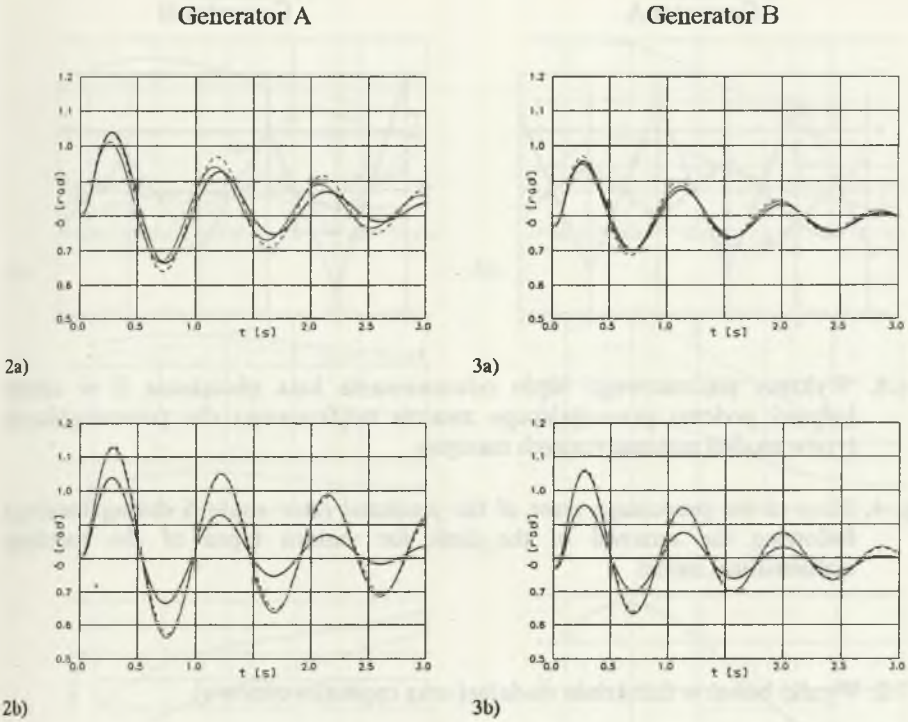
3. METODYKA ORAZ WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Analizę wpływu typu modelu matematycznego generatora na dokładność odwzorowania przebiegów dynamicznych oraz charakterystyk modalnych i częstotliwościowych maszyny przeprowadzono dla prostego układu elektroenergetycznego typu "generator synchroniczny- sieć sztywna" z linią przesyłową o impedancji $Z_L = j\ 0{,}1[-]$. Badania przeprowadzono dla dwóch turbogeneratorów o jednakowych mocach znamionowych ale różnej konstrukcji wirnika. Turbogenerator "A" posiada klatkę tłumiącą oraz ciągłe, przewodzące kliny, natomiast turbogenerator "B" nie posiada klatki tłumiącej, zaś jego kliny są dzielone [2]. W obliczeniach wykorzystano następujące typy modeli matematycznych generatora: (3,3), (2,3), (2,2), (2,1), (1,1). Ze względu na brak danych pomiarowych jako bazę do dalszych porównań przyjęto wyniki otrzymane dla modelu typu (3,3) i w stosunku do nich wyznaczono błędy wnoszone przez modele niższych typów. Parametry elektromagnetyczne generatorów dla różnej liczby uwzględnianych obwodów tłumiących zaczerpnięto z prac [2],[3], gdzie zostały one wyznaczone na podstawie pomiarów charakterystyk częstotliwościowych metodą SSFR. Dla przypadku $n_q = 1$ parametry w osi q generatora otrzymano wykorzystując parametry dla $n_q = 2$ przez formalne pominięcie obwodu tłumiącego o mniejszej stałej czasowej.

3.1. Wyniki symulacji w dziedzinie czasu

Badania w dziedzinie czasu przeprowadzono wykorzystując pełny, nieliniowy układ równań stanu maszyny, opisany zależnościami (1), (2). Wyniki obliczeń w postaci wykresów przebiegów czasowych kąta obciążenia δ podczas przemijającego zwarcia trójfazowego (czas trwania zwarcia $t_z = 0{,}1$ s) przedstawiono na rys. 2 i 3. Wyniki te odpowiadają znamionowemu obciążeniu generatora przed zakłóceniem.

Na podstawie otrzymanych przebiegów wyznaczono procentowe błędy odwzorowania kąta obciążenia δ w czasie kolejnych kołysań, wprowadzane przez modele niższego typu badanych generatorów (rys.4).

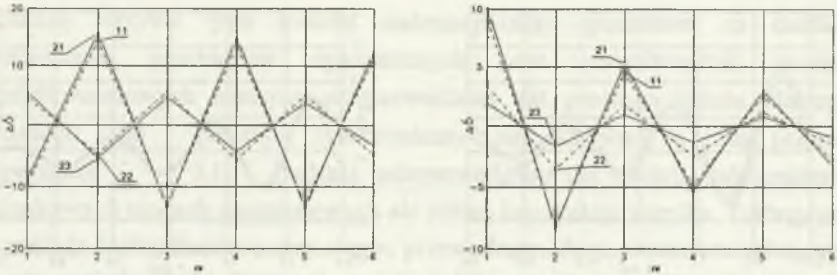


Rys. 2,3. Przebiegi czasowe kąta obciążenia δ generatorów podczas przemijającego zwarcia trójfazowego

Fig. 2,3. Time plots of the rotor angle δ of the generators during a 3-phase fault at the terminals

a) —— model (3,3) —— model (2,3) ····· model (2,2)
b) —— model (3,3) —— model (2,1) ····· model (1,1)

Generator A Generator B



Rys.4. Wykresy procentowego błędu odwzorowania kąta obciążenia δ w czasie kołysań podczas przemijajacego zwarcia trójfazowego dla poszczególnych typów modeli matematycznych maszyny

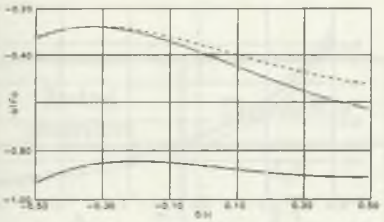
Fig. 4. Plots of the procentage error of the predicted rotor angle δ during huntings following the removal of the fault for various types of the machine mathematical model

3.2. Wyniki badań w dziedzinie modalnej oraz częstotliwościowej

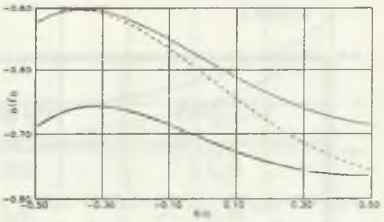
W badaniach tych wykorzystano zlinearyzowany model matematyczny generatora, opisany równaniami (6)÷(8). Ich rezultaty przedstawione w postaci wykresów rozkładu części rzeczywistej i urojonej dominującej (związanej z ruchem wirnika) wartości własnej układu $\lambda_h = \alpha_h + j\omega_h$ przedstawiono na rys. 5 i 6, natomiast charakterystyki częstotliwościowe współczynników momentu tłumiącego i synchronizyjącego przedstawiono na rys. 7 i 8 .

Na tej podstawie wyznaczono maksymalne błędy procentowe wprowadzane przez modele niższych typów dla wszystkich wyznaczonych charakterystyk.Zostały one zamieszczone w tabelach 1 i 2.

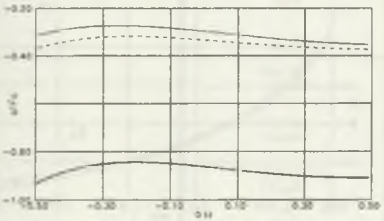
Generator A Generator B



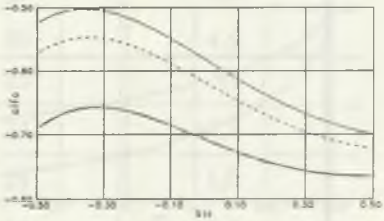
5a)



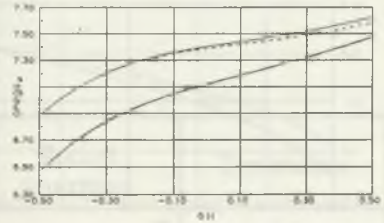
6a)



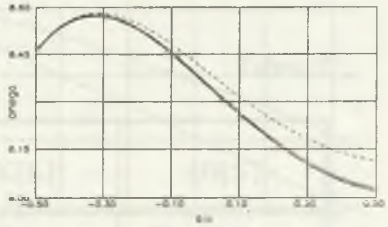
5b)



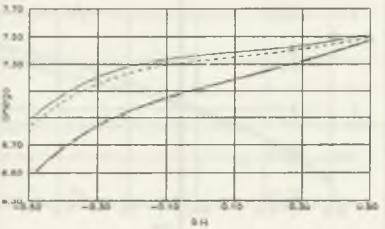
6b)



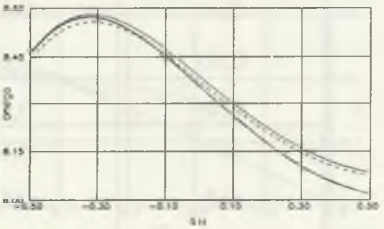
5c)



6c)



5d)

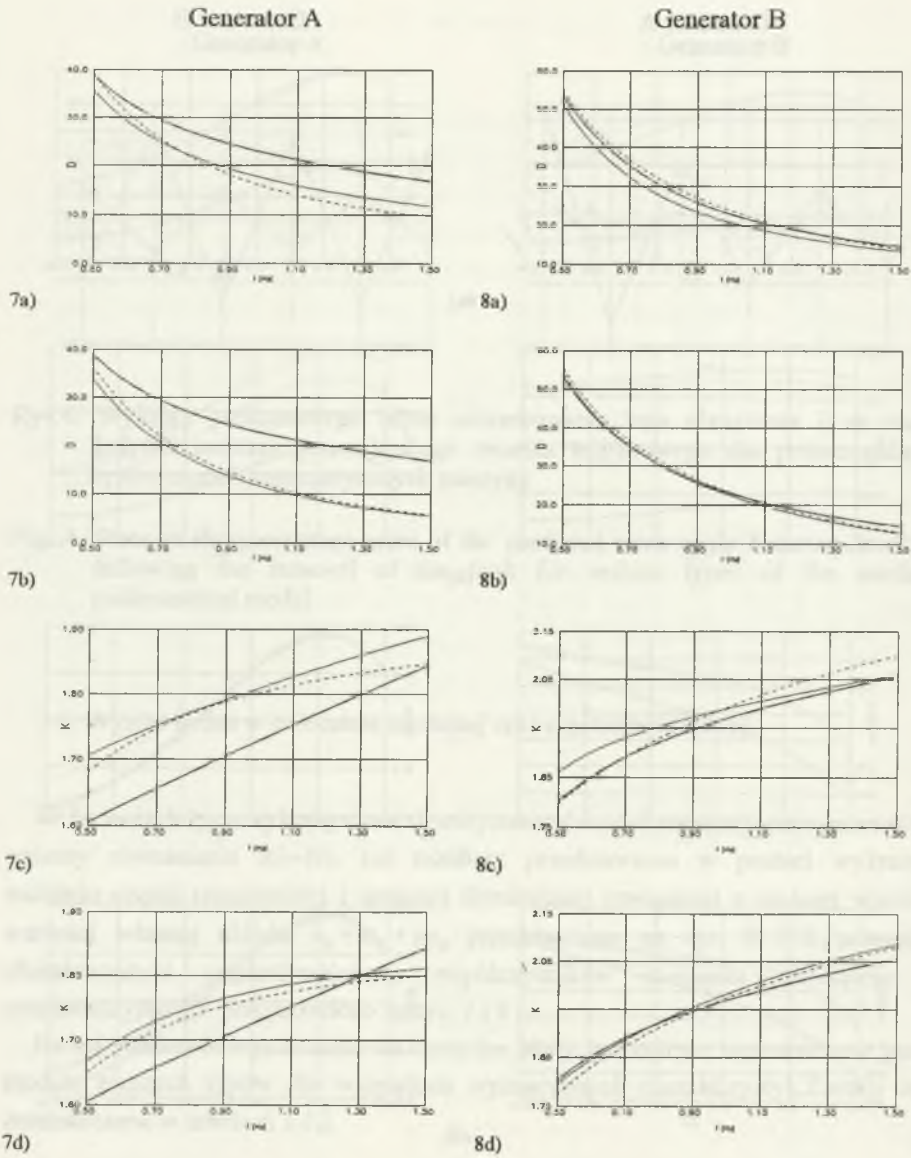


6d)

Rys.5,6. Wykresy zależności części rzeczywistej α_h i urojonej ω_h dominującej wartości własnej od mocy biernej maszyny przy znamionowej mocy czynnej

Fig. 5,6. Plots of the real α_h and the imaginary ω_h part of the dominant eigenvalue versus machine reactive power for the rated real power output

a,c) —— model (3,3) —— model (2,3) ····· model (2,2)
b,d) —— model (3,3) —— model (2,1) —— model (1,1)



Rys.7,8. Charakterystyki częstotliwościowe współczynnika momentu tłumiącego D i synchronizującego K

Fig.7,8. Frequency characterictics of the coefficient of the damping D and synchronizing K torques

a,c) —— model (3,3) —— model (2,3) ····· model (2,2)

b,d) —— model (3,3) —— model (2,1) ····· model (1,1)

Tabela 1

Rodzaj generatora	Typ modelu	$\Delta\alpha_h$ [%]	$\Delta\omega_h$ [%]
A	2,3	66	6,0
	2,2	62	6,0
	2,1	65	6,0
	1,1	59	4,5
B	2,3	25	~0
	2,2	24	1,3
	2,1	25	1,0
	1,1	18	0,8

Tabela 2

Rodzaj generatora	Typ modelu	ΔK[%]	ΔD[%]
A	2,3	7,0	27,0
	2,2	5,0	36,5
	2,1	4,0	60,0
	1,1	3,0	56,0
B	2,3	3,5	9,0
	2,2	2,0	5,0
	2,1	1,5	12,0
	1,1	1,5	9,0

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych (przy wykorzystaniu dwóch przedstawionych w artykule modeli matematycznych) badań tak w dziedzinie czasu, jak i w dziedzinie modalnej oraz częstotliwościowej można sformułować natępujące wnioski :

- maszyny o bardziej złożonej budowie wirnika (wyposażone w klatkę tłumiącą) powinny być modelowane za pomocą modeli wyższych typów {(2,2)÷(3,3)} ze względu na znaczne błędy odwzorowania wartości momentu tłumiącego D, jakie wnoszą w ich przypadku modele niższego typu, co potwierdzają też otrzymane przebiegi czasowe,
- formalne powiększenie typu (rzędu) modelu nie powoduje automatycznej poprawy dokładności otrzmanych wyników (wskazują na to zwłaszcza badania w dziedzinie modalnej i częstotliwościowej, obejmujące szerszy zakres możliwych stanów pracy niż jest to możliwe przy symulacjach czasowych),
- w badaniach stabilności pierwszego wychylenia wirnika zadowalającą dokładność uzyskuje się przy użyciu modeli niższego typu {(2,1),(1,1)}, dają one bowiem nieco zawyżone wartości pierwszego maksimum kąta mocy obciążenia podczas kołysań,
- badania stabilności lokalnej wymagają stosowania modeli wyższych typów ze względu na to, iż stosowanie generatorów wyposażonych w szybkie układy regulacji wzbudzenia powoduje zbliżanie się do granicy stabilności, a zatem istnieje konieczność dokładniejszego określenia czasowego przebiegu kąta obciążenia δ [2], [7],
- ocena częstotliwości kołysań rozbudowanych systemów elektroenergetycznych jest możliwa przy wykorzystaniu modeli niższego typu (pozwala na to niewielki wpływ typu modelu na wartość części urojonej ω_h dominującej wartości własnej).

Szczególnie istotny wpływ na badania stabilności ma niewielka zależność częstotliwości kołysań tak od typu modelu matematycznego {(1,1)÷(3,3)}, jak i jego rodzaju (nieliniowy, zlinearyzowany). Pozwala to ograniczyć zakres częstotliwości, w którym dokładnie aproksymowane są charakterystyki operatorowe maszyny i otrzymać w ten sposób bardziej wiarygodne parametry dla poszczególnych typów jej modeli w istotnym ze względu na stabilność przedziale (0,05÷5 Hz) [3]. Wówczas jednak modele te wykazują duże błędy obliczeń dla udarowych prądów i momentów zwarciowych. Analiza elektrodynamicznych stanów nieustalonych wymaga dokładniejszej aproksymacji charakterystyk maszyny w szerszym przedziale częstotliwości niż w przypadku badań stabilności (10÷100 Hz) [3].

LITERATURA

[1] Canay I.M.: Identifikation und Ermittlung der Parameter von Synchronmaschinen; Brown Boveri Mitt., 6/7-84, pp. 299-304.

[2] 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.

[3] Dandeno P.L., Poray A.T.: Development of detailed turbogenerator equivalent circuits from standstill frequency response measurements; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-100, No 4, April 1981, pp. 1646-1655.

[4] Dandeno P.L., Kundur P., Poray A.T., Zein El-Din H.M.: Adaptation and validation of turbo-generator model parameters through on line frequency response measurements; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-100, No 4, April 1981, pp. 1656-1664.

[5] Kamwa I., Viarouge P., Dickinson E.J.; Identification of generalised models of synchronous machines from time-domain tests; IEE Proceedings-C, Vol. 138, No 6, November 1991, pp. 485-498.

[6] Krause P.C.; Analysis of Electric Machinery, McGraw-Hill Inc., New York, 1986.

[7] Kundur P., Dandeno P.L.: Implementation of advanced generator models into power systems stability programes; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-102, No 7, July 1983, pp. 2047-2054.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ernest Mendrela

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 marca 1994

Abstract

This paper presents an improved mathematical model of a synchronous generator, both in the form of nonlinear and linearized machine equations. The model approximates damping properties of the solid rotor surface, teeth, slot wedges and damper winding (if present) by a finite number of equivalent damping circuits n_d, n_q, respectively, in the d, q axes.

It is used for studies of the influence of the number of rotor damping circuits ($n_d \in (0, 2)$, $n_q \in (0, 3)$) on the dynamic behaviour of a generator in the power system ("synchronous machine - infinite bus"). The investigations are performed for two turboalternators of similar ratings but different rotor construction. The particular attention is paid to the accuracy of representation of the properties associated with huntings both in time domain (the rotor angle δ magnitudes) and in modal and frequency domain (distribution of the rotor motion eigenvalue, characteristics of coefficients of the damping and the synchronizing torques).

The general conclusion drawn from the analysis suggests that the accuracy of representation of the damping properties for various types of the model strongly depends on the construction of the rotor. The huntings frequency can be, however, obtained even with low-order models at satisfactory level of accuracy.