

Andrzej BOBOŃ, Jerzy KUDŁA, Aleksander ŻYWIEC
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej

RODZAJE MODELI MATEMATYCZNYCH GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH STOSOWANYCH W ANALIZIE STANÓW DYNAMICZNYCH SYSTEMÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH*

Streszczenie. Przedstawiono modele matematyczne generatorów synchronicznych zalecane do stosowania w programach komputerowych przeznaczonych do badań stanów dynamicznych systemów elektroenergetycznych. Modele te są zgodne z zaleceniami komitetu IEEE i zapewniają wystarczającą dokładność odwzorowania stanów zakłóceńowych zagrażających stabilności systemu. Opisano metody wyznaczania parametrów elektromagnetycznych rozważanych modeli.

SYNCHRONOUS GENERATOR MATHEMATICAL MODELS USED IN TRANSIENT PROCESS STUDIES OF ELECTRICAL POWER SYSTEM

Summary. Mathematical models of the synchronous generators recommended to use in computer programs for transient process computations as well as local and dynamic stability studies of the electrical power systems are presented. These models are appropriate and sufficient for simulation investigations of the power system stability, according to IEEE Standards. Methods of determining the electromagnetic parameters of the considered models are described.

1. WPROWADZENIE

Doświadczenia zebrane w toku badań symulacyjnych stabilności systemów elektroenergetycznych (SEE) wskazują na duży wpływ rodzaju wykorzystywanych modeli

* Pracę zrealizowano w ramach projektu badawczego nr 8 T10A 01011, finansowanego w 1997 r. przez KBN.

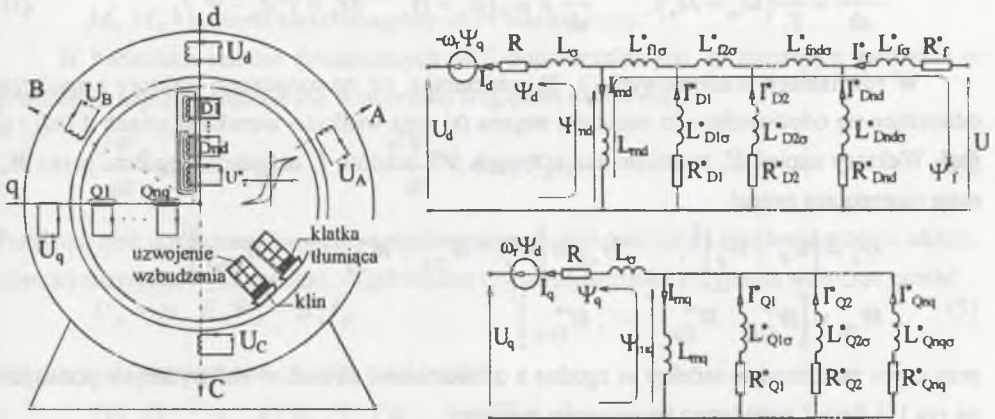
matematycznych generatorów synchronicznych na dokładność otrzymywanych wyników. Zagadnienie poprawnego modelowania generatorów synchronicznych nabiera ostrości wraz ze wzrostem mocy generatorów instalowanych w systemie i zmniejszaniem się zapasu ich stabilności.

W krajowych programach komputerowych, użytkowanych w badaniach stabilności SEE (np. w PSE-SA), stosowane są klasyczne modele generatorów synchronicznych, wyrażone za pomocą zbioru standardowych parametrów elektromagnetycznych wyznaczanych pomiarowo lub dostarczanych przez wytwórcę maszyn. Dokładność takich modeli jest niewystarczająca szczególnie w badaniach stabilności lokalnej, zwłaszcza dla generatorów wyposażonych w silne obwody tłumiące.

W artykule przedstawiono modele matematyczne generatorów synchronicznych, klasyczne oraz wyższych rzędów, które powinny być zaimplementowane w programach komputerowych przeznaczonych do badań stanów dynamicznych SEE, w tym badań stabilności lokalnej i dynamicznej. Modele te są zgodne z zaleceniami komitetu IEEE [1] i odpowiadają aktualnemu poziomowi osiągnięć naukowo-badawczych w zakresie modelowania generatorów. Podstawową przeszkodą w szybkim zastosowaniu modeli wyższych rzędów jest jednak nieznanie ich parametrów elektromagnetycznych dla krajowych generatorów. Dlatego też w artykule zwrócono uwagę na metody wyznaczania tych parametrów.

2. OGÓLNY MODEL MATEMATYCZNY GENERATORA SYNCHRONICZNEGO WYRAŻONY PRZEZ PARAMETRY GAŁĘZIOWE TYPU R-L

Trudności modelowania generatorów synchronicznych wynikają z jednej strony z budowy ich wirników, w których lite elementy przewodzące (beczka, kliny zębokowe, klatka tłumiąca) stanowią obwody o parametrach rozłożonych dla prądów wirowych w nich płynących, zaś z drugiej strony - z nieliniowości charakterystyk magnesowania rdzeni ferromagnetycznych przewodzących strumień magnetyczny. Najdokładniejszym modelem matematycznym maszyny synchronicznej jest tzw. „model polowy” utworzony na podstawie wyników analizy pola elektromagnetycznego w maszynie. Jest to jednak model zbyt skomplikowany, aby mógł być przydatny w badaniach symulacyjnych wielomaszynowych systemów elektroenergetycznych. Stosowane obecnie tzw. „modele obwodowe” maszyny synchronicznej są więc przybliżeniem „modelu polowego” o różnym stopniu dokładności.



Rys. 1. Model fizyczny i schematy zastępcze maszyny synchronicznej w osiach d i q
 Fig. 1. The physical model and equivalent circuits of a synchronous machine in d and q axes

Modele takie formułuje się dla modelu fizycznego maszyny przedstawionego na rys. 1, w którym trójfazowe uzwojenie twornika zastąpiono zastępczym uzwojeniem dwufazowym w osiach d i q, a obwody prądów wirowych w litych elementach wirnika odwzorowano za pomocą n_d i n_q zwartych zastępczych obwodów tłumiących odpowiednio w osiach d i q. Para liczb $(1 + n_d, n_q)$ określa typ modelu matematycznego maszyny synchronicznej. W artykule przyjęto uważać za klasyczne modele matematyczne generatora modele do typu (2,2) włącznie, natomiast pozostałe modele traktować jako modele wyższych rzędów. Rozważanemu modelowi fizycznemu odpowiadają schematy zastępcze maszyny w osiach d i q przedstawione na rys. 1. Indukcyjności różnicowe $L'_{fi\sigma}$ ($i=1,2,\dots,n_d$) w schemacie w osi d związane są ze strumieniami magnetycznymi sprzęgającymi uzwojenie wzbudzenia z poszczególnymi obwodami tłumiącymi wirnika.

Ogólne równania generatora synchronicznego (w jednostkach względnych) mają następującą postać:

$$\begin{bmatrix} U_s \\ U_{rd} \\ U_{rq} \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_N} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} K_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_{rd} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_s \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{srd} & L_{srq} \\ L'_{srd} & L_{rdrd} & 0 \\ L'_{srq} & 0 & L_{rqrq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_s \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{T_J}(M_m - M_e), \quad \frac{d\delta}{dt} = \omega_N(\omega_r - 1), \quad M_e = \Psi_d I_q - \Psi_q I_d. \quad (3)$$

W równaniach macierzowych (1, 2) indeksami s, rd, rq oznaczono wektory i macierze odnoszące się odpowiednio do wielkości stojana (s) oraz wielkości wirnika w osiach d (rd) i q (rq). Wektory napięć U , strumieni skojarzonych Ψ i prądów I , oznaczone ogólnie przez W , mają następującą postać

$$W_s = [W_d \mid W_q]^T, \quad W_{rd} = [W_f^* \mid W_{D1}^* \mid W_{D2}^* \mid \dots \mid W_{Dnd}^*]^T, \\ W_{rq} = [W_{Q1}^* \mid W_{Q2}^* \mid \dots \mid W_{Qnq}^*]^T$$

przy czym zastosowane indeksy są zgodne z oznaczeniami obwodów elektrycznych podanych na rys. 1. Literą T oznaczono transpozycję macierzy.

Poniżej przedstawiono strukturę macierzy występujących w równaniach (1), (2):

$$K_s = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad R_s = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}, \quad L_{ss} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}, \\ R_{rd} = \text{diag}\{R_f^* \mid R_{D1}^* \mid R_{D2}^* \mid \dots \mid R_{Dnd}^*\}, \quad R_{rq} = \text{diag}\{R_{Q1}^* \mid R_{Q2}^* \mid \dots \mid R_{Qnq}^*\}, \\ L_{srd} = \begin{bmatrix} L_{md} & L_{md} & L_{md} & \dots & L_{md} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad L_{srq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ L_{mq} & L_{mq} & \dots & L_{mq} \end{bmatrix}, \\ L_{rdrd} = \begin{bmatrix} L_{md} + L_{f\sigma}^* + \sum_{i=1}^{nd} L_{f\sigma}^* & L_{md} + L_{f1\sigma}^* & L_{md} + \sum_{i=1}^2 L_{f\sigma}^* & \dots & L_{md} + \sum_{i=1}^{nd} L_{f\sigma}^* \\ L_{md} + L_{f1\sigma}^* & L_{md} + L_{D1\sigma}^* + L_{f1\sigma}^* & L_{md} + L_{f1\sigma}^* & \dots & L_{md} + L_{f1\sigma}^* \\ L_{md} + \sum_{i=1}^2 L_{f\sigma}^* & L_{md} + L_{f1\sigma}^* & L_{md} + L_{D2\sigma}^* + \sum_{i=1}^2 L_{f\sigma}^* & \dots & L_{md} + \sum_{i=1}^2 L_{f\sigma}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{md} + \sum_{i=1}^{nd} L_{f\sigma}^* & L_{md} + L_{f1\sigma}^* & L_{md} + \sum_{i=1}^2 L_{f\sigma}^* & \dots & L_{md} + L_{Dnd\sigma}^* + \sum_{i=1}^{nd} L_{f\sigma}^* \end{bmatrix}, \\ L_{rqrq} = \begin{bmatrix} L_{mq} + L_{Q1\sigma}^* & L_{mq} & \dots & L_{mq} \\ L_{mq} & L_{mq} + L_{Q2\sigma}^* & \dots & L_{mq} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{mq} & L_{mq} & \dots & L_{mq} + L_{Qnq\sigma}^* \end{bmatrix}.$$

Elementami powyższych macierzy są rezystancje i indukcyjności schematów zastępczych maszyny, przedstawionych na rys. 1. Pozostałe wielkości oznaczają:

- ω_r - względna prędkość kątowna wirowania wirnika,
- δ - kąt obciążenia generatora,
- ω_N - znamionowa prędkość kątowna synchroniczna,

3. KLASYCZNE MODELE MATEMATYCZNE GENERATORA SYNCHRONICZNEGO WYRAŻONE PRZEZ PARAMETRY STANDARDOWE

Dla modelu fizycznego generatora synchronicznego zawierającego do dwóch obwodów elektrycznych w wirniku w każdej osi (łącznie z uzwojeniem wzbudzenia) powszechnie stosowane są modele matematyczne wyrażone za pomocą standardowych parametrów elektromagnetycznych (reaktancji i stałych czasowych dla stanu ustalonego, przejściowego i podprzejściowego). Parametry dla takich modeli są stosunkowo łatwo dostępne, ponieważ mogą być zmierzone za pomocą klasycznych metod pomiarowych, lub mogą być udostępnione przez wytwórców maszyn.

Klasyczne modele matematyczne generatora synchronicznego formułowane są przy pominięciu

- napięć transformacji w tworniku,
- indukcyjności różnicowych w osi podłużnej d.

Jako zmienne stanu przyjmuje się umowne napięcia (siły elektromotoryczne) w osiach d i q zależne od strumieni skojarzonych maszyny. Dla modelu uwzględniającego jeden obwód tłumiący w osi d i dwa obwody tłumiące w osi q (typ (2,2)) równania maszyny mają następującą postać:

- równania algebraiczne stojana

$$\begin{aligned} U_d &= e_d'' + X_q'' I_q - R I_d, \\ U_q &= e_q'' - X_d'' I_d - R I_q, \end{aligned} \quad (7)$$

- równania różniczkowe wirnika

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_d'' \\ e_q'' \\ e_d' \\ e_q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & M_{13} & 0 \\ 0 & M_{22} & 0 & M_{24} \\ M_{31} & 0 & M_{33} & 0 \\ 0 & M_{42} & 0 & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d'' \\ e_q'' \\ e_d' \\ e_q' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & N_{12} \\ N_{21} & 0 \\ 0 & N_{32} \\ N_{41} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_{21} \\ 0 \\ B_{41} \end{bmatrix} u_f', \quad (8)$$

- równania ruchu mechanicznego

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{T_J} (M_m - M_e), \quad \frac{d\delta}{dt} = \omega_N (\omega_r - 1),$$

$$M_e = e_q'' I_q + e_d'' I_d - (X_d'' - X_q'') I_d I_q. \quad (9)$$

Wyrażenia określające elementy macierzy występujących w równaniu (8) zamieszczono w tabelicy 2.

Tabelica 2

Elementy macierzy występujących w równaniu (8)

$M_{11} = -\frac{l}{T_{qo}''} \left[1 - \frac{T_{qo}'' (X_q'' - X_{\sigma}) (X_q - X_q')}{T_{qo}' (X_q' - X_{\sigma}) (X_q' - X_{\sigma})} \right]$	$M_{13} = \frac{l}{T_{qo}''} \left[\frac{(X_q' - X_{\sigma})}{(X_q'' - X_{\sigma})} \frac{T_{qo}'' (X_q - X_{\sigma})}{T_{qo}' (X_q' - X_{\sigma})} \right]$	
$M_{22} = -\frac{l}{T_{do}''} \left[1 - \frac{T_{do}'' (X_d'' - X_{\sigma}) (X_d - X_d')}{T_{do}' (X_d' - X_{\sigma}) (X_d' - X_{\sigma})} \right]$	$M_{24} = \frac{l}{T_{do}''} \left[\frac{(X_d' - X_{\sigma})}{(X_d'' - X_{\sigma})} \frac{T_{do}'' (X_d - X_{\sigma})}{T_{do}' (X_d' - X_{\sigma})} \right]$	
$M_{31} = \frac{l (X_q'' - X_{\sigma}) (X_q - X_q')}{T_{qo}' (X_q' - X_{\sigma}) (X_q' - X_{\sigma})}$	$M_{33} = -\frac{l (X_q - X_{\sigma})}{T_{qo}' (X_q' - X_{\sigma})}$	$M_{42} = \frac{l (X_d'' - X_{\sigma}) (X_d - X_d')}{T_{do}' (X_d' - X_{\sigma}) (X_d' - X_{\sigma})}$
$M_{44} = -\frac{l (X_d - X_{\sigma})}{T_{do}' (X_d' - X_{\sigma})}$	$N_{12} = -\frac{l}{T_{qo}''} \left[(X_q' - X_q'') + \frac{T_{qo}''}{T_{qo}'} (X_q - X_q') \left(\frac{(X_q'' - X_{\sigma})^2}{(X_q' - X_{\sigma})} \right) \right]$	
$N_{21} = \frac{l}{T_{do}''} \left[(X_d' - X_d'') + \frac{T_{do}''}{T_{do}'} (X_d - X_d') \left(\frac{(X_d'' - X_{\sigma})^2}{(X_d' - X_{\sigma})} \right) \right]$		$N_{32} = -\frac{l}{T_{qo}''} (X_q - X_q') \left(\frac{X_q'' - X_{\sigma}}{X_q' - X_{\sigma}} \right)^2$
$N_{41} = \frac{l}{T_{do}''} (X_d - X_d') \left(\frac{X_d'' - X_{\sigma}}{X_d' - X_{\sigma}} \right)^2$	$B_{21} = B_{41} = \frac{X_{ad}}{R_f} \frac{l}{T_{do}''} \frac{(X_d'' - X_{\sigma})}{(X_d' - X_{\sigma})}$	

Tabelica 3

Rodzaje klasycznych modeli matematycznych generatorów stosowanych w badaniach SEE

Obwody elektr. w wirniku	Typ modelu	Zmienne stanu
Brak obwodów elektr. w wirniku	(0,0)	ω, δ
uzw. wzbudzenia	(1,0)	ω, δ, e_d
uzw. wzbudzenia 1 obwód tłum. w osi q	(1,1)	ω, δ, e_q, e_d
uzw. wzbudzenia 1 obwód tłum. w osi d 1 obwód tłum. w osi q	(2,1)	$\omega, \delta, e_q, e_d, e_q'', e_d''$
uzw. wzbudzenia 1 obwód tłum. w osi d 2 obwody tłum. w osi q	(2,2)	$\omega, \delta, e_q, e_d, e_q'', e_d'', e_q''', e_d'''$

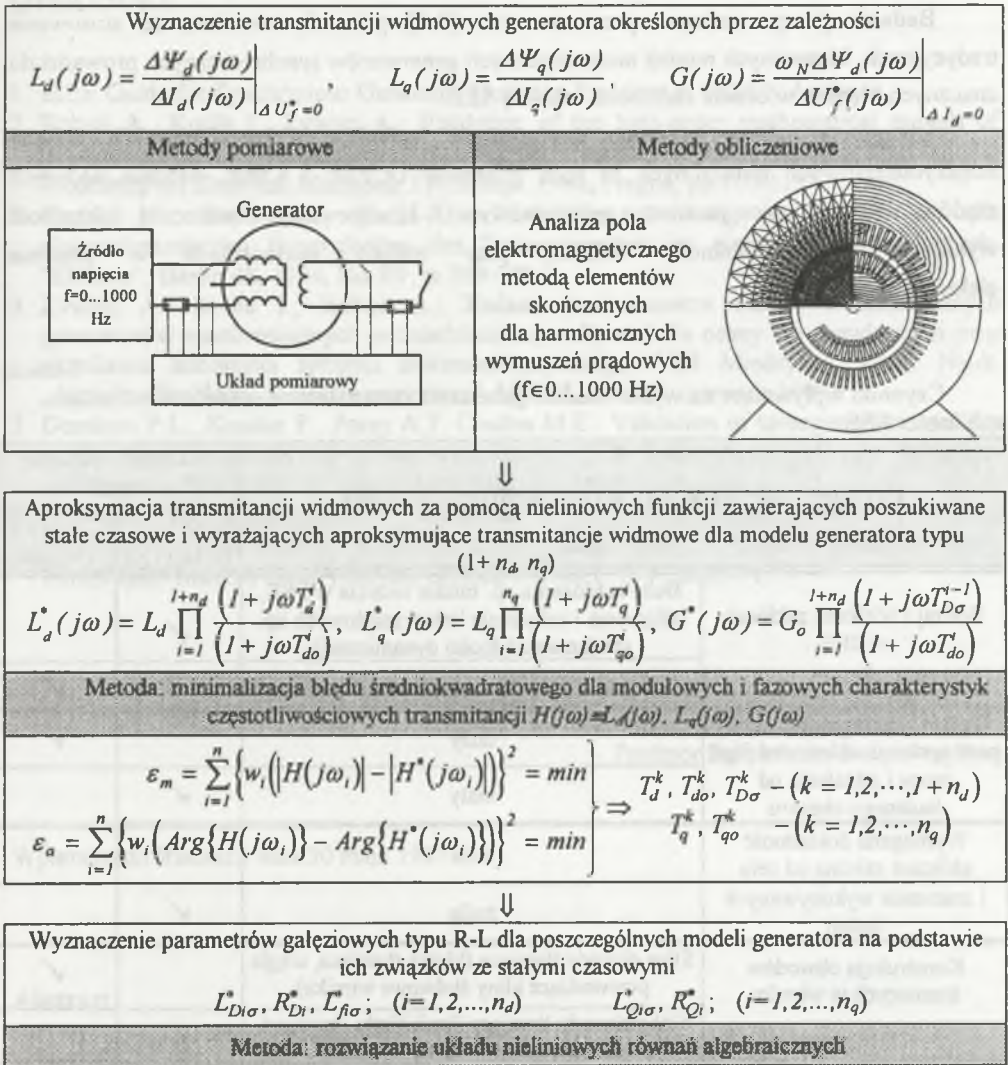
Jako zmienne stanu w powyższych modelach przyjmując się umowne napięcia (siły elektromotoryczne) w osiach d i q zależne od strumieni skojarzonych maszyny. W tabelicy 3 podano charakterystyczne cechy klasycznych modeli matematycznych generatorów synchronicznych stosowanych w badaniach systemów elektroenergetycznych.

4. METODY WYZNACZANIA PARAMETRÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH MODELI MATEMATYCZNYCH GENERATORA SYNCHRONICZNEGO

Wykorzystanie modeli matematycznych generatorów synchronicznych, opisanych w punkcie 2, możliwe jest pod warunkiem znajomości ich parametrów elektromagnetycznych. Dla generatorów pracujących w krajowym systemie elektroenergetycznym na ogół znany jest podstawowy zestaw parametrów elektromagnetycznych, obejmujący reaktancje i stałe czasowe dla stanu ustalonego, przejściowego i podprzejściowego. Parametry te uzyskiwane są drogą pomiarową lub są udostępniane przez wytwórców maszyn i najczęściej dotyczą osi wzdłużnej d maszyny. Jeśli parametry w osi poprzecznej q nie są znane, to muszą być szacowane. Przy wykorzystaniu związku między parametrami standardowymi (reaktancjami i stałymi czasowymi) i parametrami gałęziowymi typu R-L mogą być oszacowane parametry schematów zastępczych generatora przedstawionych na rys. 1, jednak tylko dla klasycznych modeli matematycznych, a więc co najwyżej typu (2,2). W celu wyznaczenia parametrów elektromagnetycznych modeli matematycznych generatorów synchronicznych wyższych rzędów stosowana jest metoda częstotliwościowa, polegająca na aproksymowaniu transmitancji widmowych maszyny. Transmitancje te mogą być zmierzone na rzeczywistej maszynie [6], lub mogą być obliczone na podstawie wyników analizy pola elektromagnetycznego w części aktywnej maszyny, wykorzystując jej dane konstrukcyjne i projektowe. Metodę obliczania transmitancji widmowych generatora przy wykorzystaniu metody elementów skończonych przedstawiono w pracy [3]. Na rys.2 przedstawiono podstawowe etapy metody częstotliwościowej wyznaczenia parametrów elektromagnetycznych generatorów synchronicznych dla modeli matematycznych typu $(1+ n_d, n_q)$. Problemom aproksymacji transmitancji widmowych i identyfikacji parametrów elektromagnetycznych modeli matematycznych poświęcona jest obszerna literatura techniczna, m.in. [3, 5, 6].

5. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawione modele matematyczne generatorów synchronicznych znajdują zastosowanie w programach komputerowych służących do badań stanów dynamicznych SEE, w tym stabilności dynamicznej i lokalnej. W tablicy 4 przedstawiono najważniejsze czynniki wpływające na wybór modelu generatora, oraz - zależne od nich - zalecane modele w badaniach stabilności SEE.



Rys. 2. Metodyka wyznaczania parametrów elektromagnetycznych modeli matematycznych generatorów synchronicznych

Fig. 2. Procedure of determination of the synchronous generator mathematical model electromagnetic parameters

Badania przeprowadzone przez autorów [2,4] pokazały również, że stosowanie tradycyjnych, klasycznych modeli matematycznych generatorów synchronicznych prowadzi do znacznych błędów w ocenie stabilności lokalnej SEE.

Uwaga ta nabiera istotnego znaczenia w badaniach słabo tłumionych kotłosań międzyobszarowych połączonych ze sobą systemów UCPTe i KSEE. Modele wyższych rzędów, wykorzystujące parametry gałęziowe typu R-L, zapewniają dostateczną dokładność wyników badań stabilności lokalnej przy małych zakłóceniach w systemie elektroenergetycznym.

Tablica 4

Czynniki wpływające na wybór modelu generatora oraz zalecane modele w badaniach stabilności SEE

Czynniki wpływające na wybór modelu generatora		Zalecane modele generatora	
		(2,2), (2,1), (1,1)	(2,3), (3,3) i wyższe
Rodzaj i wielkość zakłóceń w SEE	Duże zakłócenia np. bliskie zwarcia w SEE, odłączenia i załączenia linii przesyłowych itp. (badania stabilności dynamicznej)	✓	
	Małe zakłócenia (badania stabilności lokalnej)		✓
Wpływ generatora na stabilność systemu, zależny od jego mocy i oddalenia od badanego obszaru	duży		✓
	mały	✓	
Wymagana dokładność obliczeń zależna od celu i znaczenia wykonywanych badań	duża		✓
	mała	✓	
Konstrukcja obwodów tłumiących w wirniku	Silne obwody tłumiące (klatka tłumiąca, ciągłe przewodzące kliny żłobkowe wirnika)		✓
	Słabe obwody tłumiące (brak klatki tłumiącej, dzielone kliny żłobkowe wirnika)	✓	

Wprowadzenie opisanych modeli do programów komputerowych i ich wykorzystywanie jest możliwe dopiero po utworzeniu bazy danych dla generatorów pracujących w krajowym systemie elektroenergetycznym, zawierającej zestawy ich parametrów elektromagnetycznych.

LITERATURA

1. IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices in Stability Analyses.
2. 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.
3. Paszek W., Boboń A., Kudła J.: Wirbelstromauswirkung im Läufer auf die elektrodynamischen Eigenschaften des Turbogenerators im einfachen Verbundbetrieb. "Elektrie", Berlin 48, 1994, No.8/9, ss.319-323.
4. Żywiec A., Kudła J., Boboń A.: Badania porównawcze modeli matematycznych generatorów synchronicznych w dziedzinie częstotliwości dla oceny ich przydatności przy określaniu stabilności systemu elektroenergetycznego, VIII Międzynar. Konf. Nauk. „Aktualne Problemy w elektroenergetyce” APE'97, Gdańsk, czerwiec 1997.
5. 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.
6. Grabowski A., Mściwojewski E., Racznas W.: Częstotliwościowa metoda identyfikacji parametrów generatorów synchronicznych dużej mocy, XXXI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Gliwice-Ustroń 1995 r., ss.85-91.

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

Wpłynęło do Redakcji dnia 30 maja 1997 r.

Abstract

Mathematical models of the synchronous generators recommended to use in computer programs for transient process studies of the power systems are presented. General mathematical model of the synchronous generator containing n_d and n_q equivalent damper circuits in d and q axes of the rotor, respectively (so-called $(1+n_d, n_q)$ type model) is described (Eqs. 1-3). Equations (5, 6) obtained at assumption of negligible small transformer voltages in the armature, determine a set of the synchronous generator mathematical models recommended to use in dynamic process studies of the power systems (Table 1). The classical models of a synchronous generator expressed by the standard parameters, namely: steady-state, transient and subtransient reactances and time constants, respectively are generally applied in the computer programs. The classical models are described in section 3. In the next section, the frequency method of determining high-order mathematical model parameters is presented.

The method is based on approximation of the generator spectral transmittances. Main factors determining choice of the generator model, as well as the models suitable for transient process investigations of power systems are listed in the table 4.

Model	Approximation of generator spectral transmittance	Approximation of generator transfer function	Approximation of generator output
1. Model with constant field flux	Yes	Yes	Yes
2. Model with constant field flux and constant rotor speed	Yes	Yes	Yes
3. Model with constant field flux and constant rotor speed and constant field current	Yes	Yes	Yes
4. Model with constant field flux and constant rotor speed and constant field current and constant field winding inductance	Yes	Yes	Yes
5. Model with constant field flux and constant rotor speed and constant field current and constant field winding inductance and constant field winding resistance	Yes	Yes	Yes
6. Model with constant field flux and constant rotor speed and constant field current and constant field winding inductance and constant field winding resistance and constant field winding capacitance	Yes	Yes	Yes
7. Model with constant field flux and constant rotor speed and constant field current and constant field winding inductance and constant field winding resistance and constant field winding capacitance and constant field winding inductance	Yes	Yes	Yes
8. Model with constant field flux and constant rotor speed and constant field current and constant field winding inductance and constant field winding resistance and constant field winding capacitance and constant field winding inductance and constant field winding resistance and constant field winding capacitance and constant field winding inductance	Yes	Yes	Yes

The table shows the suitability of various generator models for different types of transient process investigations. The models are ranked from 1 to 8, with 1 being the simplest and 8 being the most complex. The 'Yes' entries indicate that the model is suitable for the corresponding type of investigation.