Seria: ELEKTRYKA z. 176

Jan KAPINOS¹⁾

MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU WZBUDZENIA GENERATORA SYNCHRONICZNEGO ZE WZBUDNICĄ BEZSZCZOTKOWĄ

Streszczenie: W artykule przedstawiono model matematyczny układu wzbudzenia generatora synchronicznego ze wzbudnicą bezszczotkową i wyniki jego badań symulacyjnych. Uzyskane wyniki badań pozwalają określić własności regulacyjne układu wzbudzenia przy przyjętym modelu matematycznym generatora synchronicznego, wzbudnicy bezszczotkowej oraz strukturze i parametrach regulatora napięcia.

MATHEMATICAL MODEL OF EXCITATION SYSTEM OF SYNCHRONOUS GENERATOR WITH BRUSHLESS EXCITER

Summary. The paper presents the mathematical model and results of the simulation investigations of the excitation system of a synchronous generator with brushless exciter. The investigation results enable to determine control properties of the excitation system at the assumed mathematical model of a synchronous generator, brushless exciter as well as voltage regulator structure and parameters.

Key words: synchronous generator, excitation source, mathematical models

1. WPROWADZENIE

Zainstalowane w krajowym systemie elektroenergetycznym generatory synchroniczne dużej mocy są wyposażone w źródła wzbudzenia typu elektromaszynowego badź bezwzbudnicowe statyczne układy wzbudzenia. Znaczne powiększenie zapotrzebowanej mocy wzbudzenia w odniesieniu do generatorów dużej mocy o bezpośrednim chłodzeniu uzwojeń powoduje, że stosowane w tych generatorach elektromaszynowe źródła wzbudzenia są rozwiazaniami konstrukcyjnymi na bazie pradnicy synchronicznej o podwyższonej czestotliwości (f = 200+500Hz). Schemat strukturalny układu wzbudzenia generatora synchronicznego bedacego przedmiotem analizy przedstawiono na rys. 1. Układ wzbudzenia stanowi synchroniczna wzbudnica bezszczotkowa wytwarzająca prąd wzbudzenia generatora synchronicznego i regulator napiecia. Synchroniczna wzbudnica bezszczotkowa jest elektromaszynowym źródłem wzbudzenia zawierającym trójfazową prądnicę synchroniczną o budowie odwróconej oraz wirujący układ prostowniczy, który zwykle wykonany jest jako trójfazowy mostek diodowy. W skład regulatora napięcia wchodzi człon porównawczy w postaci węzła sumacyjnego oraz człon wykonawczy o określonej transmitancji przejścia. Podstawowym zadaniem regulatora napięcia generatora synchronicznego jest utrzymanie w danym stanie pracy wymaganej wartości napiecia na zaciskach uzwojenia twornika generatora. W wyniku zmiany napiecia wyjściowego regulatora napiecia następuje zmiana prądu wzbudzenia w uzwojeniu wzbudzenia wzbudnicy. W konsekwencji zmiany amperozwojów wzbudzenia wzbudnicy otrzymuje się odpowiednią zmianę prądu wzbudzenia generatora synchronicznego i wymaganą wartość napięcia na jego zaciskach. Regulator napięcia wytwarza zatem sygnał sterujący napięciem wzbudzenia wzbudnicy w zależności od sygnału wejściowego, którym jest błąd regulacji, tj. różnica napięcia na zaciskach generatora i wielkości zadanej napiecja (rys. 1). Układ wzbudzenia generatora synchronicznego winien przede wszystkim zapewniać odpowiednia jakość regulacji napiecia generatora oraz możliwość uzyskania szybkiego

¹⁾ Dr inż, Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych, Politechnika Śląska. Gliwice ul. Akademicka 10a. tel: 237-14-47, e-mail: j kap@kmiue.elektr.polsl.gliwice.pl

narastania napięcia wzbudzenia generatora. Własności te zależą od rodzaju źródła wzbudzenia generatora oraz struktury i parametrów regulatora napięcia.



Rys. 1. Schemat strukturalny układu wzbudzenia generatora synchronicznego

Fig. 1. Structural diagram of synchronous generator excitation system

Ocenę własności regulacyjnych układu wzbudzenia generatora synchronicznego można przeprowadzić w oparciu o następujące przebiegi regulacyjne [4]:

- przebiegi czasowe napięcia twornika generatora w stanie jałowym przy skokowej zmianie napięcia zadanego,
- przebiegi czasowe napięcia twornika generatora w stanie obciążenia przy skokowym zrzucie mocy biernej indukcyjnej, w statycznym ustalonym stanie początkowym.

Wyniki badań symulacyjnych układu wzbudzenia generatora synchronicznego ze wzbudnicą bezszczotkową przedstawione w artykule zostały uzyskane w oparciu o opracowany model matematyczny układu i przy wykorzystaniu programu Matlab-Simulink.

2. MODEL MATEMATYCZNY GENERATORA SYNCHRONICZNEGO

Formułując równania opisujące model matematyczny generatora synchronicznego we współrzędnych osiowych d-q-0 przyjęto standardowe założenia [1],[4]. Jednocześnie zamieszczone równania dotyczą modelu generatora typu (2,1).

Przyjmując prądy osiowe l_d, l_q jako zmienne stanu otrzymuje się układ równań stanu generatora synchronicznego o postaci napięciowo-prądowej [4]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{DG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{DG} \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} U_{DG} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{DG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{DG} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Omega_{QG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{QG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{QG} \end{bmatrix} \right\}$$
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{QG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{QG} \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} U_{QG} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{QG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{QG} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Omega_{DG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{DG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{DG} \end{bmatrix} \right\}$$

(1)

gdzie:

- macierze napięć:

$$\begin{bmatrix} U_{DG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{d} \\ U_{f}^{*} \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad \begin{bmatrix} U_{QG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{q} \\ 0 \end{bmatrix},$$

macierze prądów:
$$\begin{bmatrix} I_{DG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{d} \\ I_{f1}^{*} \\ I_{d1}^{*} \end{bmatrix}, \qquad \begin{bmatrix} I_{QG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{q} \\ I_{q1}^{*} \end{bmatrix},$$

- macierze rezystancji:

$$[\mathbf{R}_{\mathrm{DG}}] = \begin{bmatrix} -\mathbf{R} & 0 & 0\\ 0 & \mathbf{R}_{\mathrm{f}}^{*} & 0\\ 0 & 0 & \mathbf{R}_{\mathrm{d}1}^{*} \end{bmatrix} , \quad [\mathbf{R}_{\mathrm{QG}}] = \begin{bmatrix} -\mathbf{R} & 0\\ 0 & \mathbf{R}_{\mathrm{q}1}^{*} \end{bmatrix} ,$$

- macierze indukcyjności:

$$\begin{bmatrix} -(L_{\sigma} + L_{ad}) & L_{ad} & L_{ad} \\ -L_{ad} & L_{\sigma f}^{*} + L_{\sigma m d}^{*} + L_{ad} & L_{\sigma m d}^{*} + L_{ad} \\ -L_{ad} & L_{\sigma m d}^{*} + L_{ad} & L_{d1}^{*} + L_{\sigma m d}^{*} + L_{ad} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} L_{QD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(L_{\sigma} + L_{aq}) & L_{aq} \\ -L_{aq} & L_{\sigma q 1}^{*} + L_{aq} \end{bmatrix},$$

- macierze prędkości kątowej wirnika:

$$[\Omega_{\rm DG}] = \begin{bmatrix} \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \qquad [\Omega_{\rm QG}] = \begin{bmatrix} -\omega & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

przy czym:

Ĩ	$U_d, U_q; I_d, I_q$	 napięcia i prądy osiowe uzwojenia twornika,
	$U_f^{\bullet}, I_f^{\bullet}$	- napięcie i prąd uzwojenia wzbudzenia,
	$I_{d1}^{\bullet}, I_{q1}^{\bullet}$	- prądy w zastępczych obwodach tłumiących w osi d i q magneśnicy,
	$R, R_{f}^{\bullet}, R_{d1}^{\bullet}, R_{q1}^{\bullet}$	 rezystancje: fazy uzwojenia twornika, uzwojenia wzbudzenia, zastępczych obwodów tłumiących w osi d i q magneśnicy,
	Lad, Laq	 indukcyjności oddziaływania twornika w osi d i q,
	$L_{\sigma},L_{of}^{\bullet},L_{omd}^{\bullet},L_{od1}^{\bullet},L_{oq1}^{\bullet}$	 indukcyjności rozproszeń: uzwojenia twornika, uzwojenia wzbudzenia, obwodów magneśnicy w osi d, zastępczych obwodów tłumiących w osi d i q,
	ω	 kątowa prędkość elektryczna wirnika.

Kropką oznaczono poszczególne parametry generatora sprowadzone na stronę uzwojenia twornika.

3. MODEL MATEMATYCZNY REGULATORA NAPIĘCIA

W przypadku układu wzbudzenia generatora synchronicznego z elektromaszynowym źródłem wzbudzenia można przyjąć postać ogólną transmitancji przejścia $K_R(s)$ regulatora napięcia jako:

$$K_R(s) = K_R \frac{(1 + sT_1)(1 + sT_2)}{(1 + sT_3)(1 + sT_4)}$$
(2)

gdzie:

 K_R - wzmocnienie regulatora, $T_1 \div T_4$ - stałe czasowe regulatora. Dla opracowania modelu matematycznego układu wzbudzenia generatora synchronicznego przydatną formą opisu regulatora napięcia są równania stanu i równanie wyjścia. Zastępując tor główny regulatora napięcia kaskadowym połączeniem dwóch członów o jednym wejściu i wyjściu, z których każdy posiada jedną zmienną stanu, otrzymuje się w rezultacie opis regulatora za pomocą równań stanu z dwiema zmiennymi pomocniczymi $X_1(t)$ i $X_2(t)$ oraz równaniem wyjścia:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_3} & 0 \\ \frac{1}{T_4} \left(1 - \frac{T_2}{T_4} \right) & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_R}{T_3} \left(1 - \frac{T_1}{T_3} \right) \\ \frac{K_R}{T_4} \frac{T_1}{T_3} \left(1 - \frac{T_2}{T_4} \right) \end{bmatrix} e(t),$$
$$U_w(t) = X_2(t) + \frac{T_2}{T_4} \left\{ X_1(t) + K_R \frac{T_1}{T_3} \right\} e(t).$$

4. MODEL MATEMATYCZNY WZBUDNICY BEZSZCZOTKOWEJ

Model matematyczny synchronicznej wzbudnicy bezszczotkowej przy zamodelowaniu jej mostka diodowego jako układu o stałej strukturze przedstawiono w pracy [2]. Dla celów zagadnień analizowanych w artykule pominięto wpływ zjawisk zachodzących w prostowniku diodowym wywołanych procesem komutacji zaworów na procesy elektromagnetyczne we wzbudnicy, co pozwoliło na znaczące uproszczenie modelu matematycznego układu wzbudzenia generatora. Synchroniczną wzbudnicę bezszczotkową przedstawiono jako zastępcze źródło napięciowe z siłą elektromotoryczną U_0 i zastępczą rezystancją R_{κ} , przy czym:

$$U_0 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_a$$

$$R_K = \frac{3 X_z}{\pi},$$

$$X_z = \frac{X_{dw}^* + X_{qw}^*}{2}$$

gdzie:

U. - napięcie uzwojenia twornika wzbudnicy synchronicznej,

X^{*}_{dw}, X^{*}_{aw} - reaktancja podprzejściowa w osi d i q wzbudnicy synchronicznej.

5. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU WZBUDZENIA

Model matematyczny układu wzbudzenia generatora synchronicznego ze wzbudnicą bezszczotkową jako źródłem wzbudzenia jest wynikiem opracowania modelu całego układu maszyn i regulatora napięcia, przy wykorzystaniu równań stanu (1) opisujących model matematyczny generatora synchronicznego, równań stanu (2) regulatora napięcia, zastępczego uproszczonego modelu wzbudnicy bezszczotkowej oraz równań generatora w stanie obciążenia.

Pełny układ równań modelu układu wzbudzenia generatora synchronicznego ze wzbudnicą bezszczotkową ma postać:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}[\mathbf{I}] = [\mathsf{T}][\mathsf{U}] - [\mathsf{R}][\mathsf{I}] - [\Omega][\mathsf{L}][\mathsf{I}]]$$

(3)

(4)

gdzie:

przy czym:

- macierze napięć:

$$\begin{split} \boldsymbol{U}_{\mathrm{D}} &= \left[\begin{array}{cc} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{U}_{\mathrm{O}} \,\boldsymbol{\zeta}_{\mathrm{f}} \, \frac{1}{\boldsymbol{U}_{\mathrm{N}}} \, \boldsymbol{0} \right]^{\mathrm{T}}, \\ \boldsymbol{U}_{\mathrm{Q}} &= \left[\boldsymbol{0} \quad \boldsymbol{0} \right]^{\mathrm{T}}, \end{split}$$

- macierze prądów:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\mathbf{D}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\mathbf{DG}} \end{bmatrix}, \qquad \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\mathbf{Q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\mathbf{QG}} \end{bmatrix},$$

- macierze rezystancji:

$$R_{D} = \text{diag}\left[-\left(R + R_{obc}\right) \quad R_{f}^{*} + R_{K}\xi_{f}^{2} \frac{1}{Z_{odn}} \quad R_{dl}^{*}\right],$$

$$R_{Q} = \text{diag}\left[-\left(R + R_{obc}\right) \quad R_{ql}^{*}\right]$$

- macierze indukcyjności:

$$\begin{split} L_{D} = \begin{bmatrix} -(L_{\sigma} + L_{ad} + L_{obc}) & L_{ad} & L_{ad} \\ & -L_{ad} & L_{off}^* + L_{omd}^* + L_{ad} & L_{omd}^* + L_{ad} \\ & -L_{ad} & L_{omd}^* + L_{ad} & L_{odd}^* + L_{ad}^* \\ & L_{Q} = \begin{bmatrix} -(L_{\sigma} + L_{aq} + L_{obc}) & L_{aq} \\ & -L_{aq} & L_{oq1}^* + L_{aq} \end{bmatrix}, \end{split}$$

- macierze prędkości kątowej wirnika:

$$\left[\Omega_{\mathrm{D}}\right] = \left[\Omega_{\mathrm{DG}}\right], \qquad \qquad \left[\Omega_{\mathrm{Q}}\right] = \left[\Omega_{\mathrm{QG}}\right],$$

ξ_f – współczynnik sprowadzenia,

U_N, Z_{odn} – napięcie znamionowe i impedancja odniesienia generatora synchronicznego.

6. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Równania (4) modelu matematycznego układu wzbudzenia generatora synchronicznego ze wzbudnicą bezszczotkową wykorzystano do opracowania symulacyjnego programu komputerowego układu na bazie programu Matlab-Simulink. Badania przeprowadzono dla generatora synchronicznego typu TWW 200 o mocy znamionowej $P_N = 200 \text{ MW}$.

Parametry elektromagnetyczne tego generatora przyjęto jak w [1], natomiast parametry wzbudnicy bezszczotkowej jak w [2].

Wybrane wyniki badań symulacyjnych układu wzbudzenia generatora synchronicznego ze wzbudnicą bezszczotkową przedstawiono na rys. 2+4. Porównanie otrzymanych przebiegów symulacyjnych pozwala ocenić wpływ doboru parametrów regulatora napięcia, przyjętego modelu matematycznego generatora i wzbudnicy bezszczotkowej na jakość regulacji napiecja generatora.



Rys. 2. Przebieg napięcia osiowego U_q twornika (a) i prądu wzbudzenia I_t generatora (b) w funkcji czasu, w stanie jałowym po skokowej zmianie napięcia zadanego; parametry regulatora napięcia: K_R = 2; T₁ = 0,1 s; T₂ = 0; T₃ = T₄ = 0,2 s





Rys.3. Przebieg czasowy napięcia fazowego U_a (a) i prądu wzbudzenia generatora I_f (b) po skokowym wzroście indukcyjnej reaktancji obciążenia; parametry regulatora napięcia: K_R = 3; T₁ = 0,1 s; T₂ = 0; T₃ = T₄ = 0,2 s
 Fig.3. Waveforms of armature voltage U_a (a) and generator excitation current I_f (b), at the jump of the load inductive reactance in steady state; voltage regulator parameters: K_R = 3; T₁ = 0,1 s; T₂ = 0; T₃ = T₄ = 0,2 s



Rys.4. Przebieg czasowy napięcia fazowego U_a (a) i prądu wzbudzenia generatora I_f (b), po skokowym wzroście indukcyjnej reaktancji obciążenia; parametry regulatora napięcia: K_R = 6: T₁ = 0,1 s; T₂ = 0; T₃ = T₄ = 0,2 s

Fig.4. Waveforms of armature voltage U₀ (a) and generator excitation current I_f (b), at the jump of the load inductive reactance in steady state; voltage regulator parameters: K_R = 6; T₁ = 0,1 s: T₂ = 0; T₃ = T₄ = 0,2 s

7. PODSUMOWANIE

Przedstawiony model matematyczny układu wzbudzenia generatora synchronicznego ze wzbudnica bezszczotkowa jest przydatny do badań własności regulacyjnych układu. Wyniki badań symulacyjnych pozwalaja ocenić wpływ rozwiązania konstrukcyjnego źródła wzbudzenia na własności dynamiczne generatora synchronicznego jako obiektu regulacji oraz poprawności doboru możliwość adaptacii opracowanego napięcia. Istnieje modelu parametrów regulatora matematycznego układu na inne rozwiązania konstrukcyjne elektromaszynowych źródeł wzbudzenia generatora synchronicznego, np. wzbudnica prądu stałego, wzbudnica synchroniczna ze sterowanym układem prostowniczym.

LITERATURA

- Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: Parametry elektromagnetyczne maszyny synchronicznej. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.
- Kapinos J.: Badania synchronicznej wzbudnicy bezszczotkowej w awaryjnych stanach pracy. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Seria: Elektryka z. 171, Gliwice 2000, s. 241-253.
- 3. Krakowski M .: Elektrotechnika teoretyczna Obwody liniowe i nieliniowe. PWN, Warszawa 1991.
- Paszek W.: Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego. Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998.

Recenzent: Dr hab. inż. Ludwik Antal

Wpłyneło do Redakcji dnia 15 marca 2001 r.

Abstract

The paper presents the mathematical model and the results of simulation investigations of the excitation system of a synchronous generator with the brushless exciter as an excitation source (Fig.1). The synchronous brushless exciter supplying the synchronous generator excitation winding and a voltage regulator are the synchronous generator excitation system. The excitation system mathematical model was formulated using the system of state equations of a synchronous generator, a voltage regulator and the brushless exciter simplified model. The system of equations described by Eq. 4 was used for developing the simulation computer program based on Matlab-Simulink packet.

The following simulation investigations of the synchronous generator excitation system were made:

- investigations of generator armature voltage waveforms in no-load state at the jump of the given voltage (Fig. 2),
- investigations of generator armature voltage waveforms at the jump of the load inductive reactance in steady state (Figs.3 and 4).

The results of the simulation investigations enable to estimate the influence of the excitation source constructional solution on the synchronous generator dynamic properties and also on the correct selection of the voltage regulator parameters. The synchronous generator is a controlled system. The presented mathematical model of the excitation system can be adapted for other constructional solutions of synchronous generator excitation sources.