

Jan KAPINOS

Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

BADANIA SYNCHRONICZNEJ WZBUDNICZY BEZSZCZOTKOWEJ W AWARYJNYCH STANACH PRACY

Streszczenie. W artykule przedstawiono model matematyczny synchronicznej wzbudnicy bezszczotkowej, przydatny do badań symulacyjnych wzbudnicy w awaryjnych stanach pracy. Badania symulacyjne przeprowadzono przy wykorzystaniu programu Matlab-Simulink. Wyniki badań symulacyjnych pozwalają określić wpływ stanu awaryjnego układu prostowniczego na jakość i niezawodność pracy wzbudnicy odnośnie do wymagań stawianych źródłu wzbudzenia generatora synchronicznego.

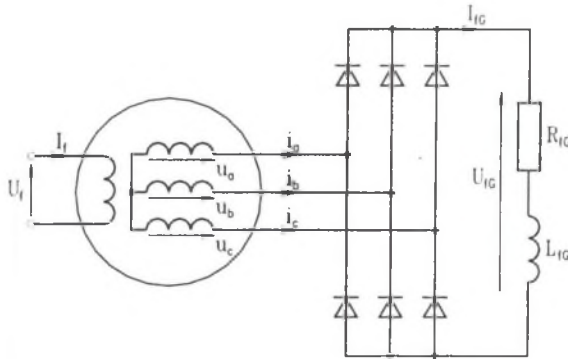
INVESTIGATIONS OF SYNCHRONOUS BRUSHLESS EXCITER OPERATION IN FAILURE CONDITIONS

Summary. The paper presents the mathematical model of a synchronous generator brushless exciter. This model is useful for simulation investigations of a brushless exciter in failure conditions of the bridge rectifier. The results of simulation allow to determine the properties of the brushless exciter as the excitation source of a synchronous generator.

1. WPROWADZENIE

W krajowym systemie elektroenergetycznym pracują generatory synchroniczne z różnymi rozwiązaniami źródeł wzbudzenia. W odniesieniu do generatorów dużej mocy podstawowymi rodzajami źródeł wzbudzenia są źródła elektromaszynowe na bazie maszyny synchronicznej o podwyższonej częstotliwości ($f=200\div 500\text{Hz}$) oraz statyczne układy wzbudzenia, zawierające transformator i przekształtnik wzbudzenia. Synchroniczna wzbudnica bezszczotkowa jest źródłem elektromaszynowym składającym się z trójfazowej prądnicy synchronicznej o budowie odwróconej oraz wirującego układu prostowniczego. Uwarunkowania techniczne powodują, że układ prostowniczy wykonany jest zwykle jako trójfazowy mostek diodowy.

Umieszczenie wirującego układu prostowniczego na wspólnym wale z generatorem pozwala na zasilanie uzwojenia wzbudzenia generatora bez pośrednictwa pierścieni ślizgowych. Schemat ideowy synchronicznej wzbudnicy bezszczotkowej przedstawiono na rys. 1.



Rys.1. Schemat ideowy wzbudnicy bezszczotkowej
Fig. 1. Schematic diagram of the 3-phase brushless exciter

Źródło wzbudzenia generatora synchronicznego musi charakteryzować się dużą niezawodnością pracy, z uwagi na konieczność zapewnienia ciągłości zasilania uzwojenia wzbudzenia generatora synchronicznego pracującego w systemie elektroenergetycznym. Stąd uzasadnione jest, aby stan awaryjny układu prostowniczego synchronicznej wzbudnicy bezszczotkowej, np. w postaci uszkodzenia pojedynczej diody bądź wyłączenia z pracy jednej z gałęzi mostka, nie powodował konieczności odstawienia generatora synchronicznego od systemu elektroenergetycznego. Awaryjny stan pracy mostka prostowniczego istotnie wpływa na pracę wzbudnicy bezszczotkowej, jest bowiem przyczyną jej niesymetrycznego obciążenia oraz powiększa stopień odkształcenia napięć i prądów fazowych [2].

Odkształcenie prądów fazowych wzbudnicy jest przyczyną powstawania dodatkowych strat mocy czynnej w uzwojeniu twornika i obwodach magnesnicy. Uszkodzenie układu prostowniczego pociąga za sobą wzrost pasożytniczych przepływów od wyższych harmonicznych prądów twornika i wymaga ich kompensacji celem zapewnienia poprawnych warunków pracy wzbudnicy bezszczotkowej. Uzyskuje się to poprzez wyposażenie wzbudnicy w odpowiednio dobraną klatkę tłumiącą [3]. Trudności w prowadzeniu badań na obiekcie rzeczywistym bądź modelu laboratoryjnym, takim jak synchroniczna wzbudnica bezszczotkowa generatora dużej mocy, zmuszają do określenia jej zachowania w warunkach eksploatacyjnych na podstawie modelu matematycznego, przy wykorzystaniu odpowiednich

programów komputerowych. Przedstawione w artykule badania symulacyjne własności eksploatacyjnych synchronicznej wzbudnicy bezszczotkowej w stanach awaryjnych jej układu prostowniczego przeprowadzono opierając się na opracowanym modelu matematycznym wzbudnicy, za pomocą programu Matlab-Simulink.

2. MODEL MATEMATYCZNY PRĄDNICZY SYNCHRONICZNEJ

Analizę współpracy prądnicy synchronicznej z przyłączonym do jej zacisków twornika układem prostowniczym wygodnie jest przeprowadzić bazując na modelu matematycznym prądnicy w układzie współrzędnych fazowych. Parametry prądnicy synchronicznej opisane we współrzędnych fazowych nie są wyznaczane bezpośrednio zarówno w toku obliczeń, jak i w sposób pomiarowy. Parametry te można uzyskać na bazie dostępnych parametrów modelu matematycznego prądnicy synchronicznej w układzie współrzędnych prostokątnych d-q-0, w wyniku transformacji modelu w układzie współrzędnych prostokątnych do modelu w układzie współrzędnych fazowych. Formułując równania opisujące model prądnicy synchronicznej zakłada się:

- liniowość obwodu magnetycznego maszyny ($\mu = \text{const}$),
- symetrię oraz sinusoidalność rozkładu przestrzennego układu prądowego uzwojeń twornika,
- sinusoidalny rozkład przestrzenny pola magnetycznego wytworzonego przez uzwojenie wzbudzenia,
- dwuosiową symetrię magnetyczną twornika,
- przyjęcie dwóch zastępczych obwodów o stałych skupionych umieszczonych w osiach d i q wirnika, uwzględniających działanie tłumiące bloku litego i klatki tłumiącej,
- stałość prędkości obrotowej ($\omega = \omega_0 = \text{const}$).

Równania prądnicy synchronicznej we współrzędnych fazowych mają następującą postać [4]:

$$\begin{bmatrix} u_s \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \omega_0 N_{ss} & \omega_0 N_{sr} \\ \omega_0 N_{sr}^T & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{sr}^T & L_{rr} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}, \quad (1)$$

gdzie:

- u_s, i_s - macierz napięć i prądów fazowych twornika,
- u_r, i_r - macierz napięć i prądów magneśnicy (wirnika),
- R_s, R_r - macierz rezystancji twornika i magneśnicy,

$L_{ss}, L_{sr}, L_{rr}, N_{ss}, N_{sr}$ - macierze indukcyjności, których elementy określone są przez parametry charakterystyczne modelu w układzie współrzędnych prostokątnych d-q-0,

ω_0 - synchroniczna prędkość kątowna.

Szczegółowy zapis macierzy występujący w równaniu (1) przedstawia się następująco:

$$[u_s] = [u_a, u_b, u_c]^T \quad [u_r] = [u_f^*, 0, 0]^T,$$

$$[i_s] = [i_a, i_b, i_c]^T \quad [i_r] = [i_f^*, i_{id}^*, i_{iq}^*]^T,$$

$$[R_s] = \text{diag}\{R, R, R\} \quad [R_r] = \text{diag}\{R_f, R_{ld}, R_{lq}\}$$

$$[N_{ss}] = \frac{2}{3}(L_q - L_d) \begin{bmatrix} \sin 2\gamma & \sin\left(2\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(2\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) \\ \sin\left(2\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(2\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) & \sin 2\gamma \\ \sin\left(2\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) & \sin 2\gamma & \sin\left(2\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix},$$

$$[N_{sr}] = -\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} L_{ad} \sin \gamma & L_{ad} \sin \gamma & L_{aq} \cos \gamma \\ L_{ad} \sin\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & L_{ad} \sin\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & L_{aq} \cos\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) \\ L_{ad} \sin\left(\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) & L_{ad} \sin\left(\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) & L_{aq} \cos\left(\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) \end{bmatrix},$$

$$[L_{sr}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} L_{ad} \cos \gamma & L_{ad} \cos \gamma & -L_{aq} \sin \gamma \\ L_{ad} \cos\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & L_{ad} \cos\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & -L_{aq} \sin\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) \\ L_{ad} \cos\left(\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) & L_{ad} \cos\left(\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) & -L_{aq} \sin\left(\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) \end{bmatrix},$$

$$[L_{rr}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} L_{ad} + L_{\sigma f}^* + L_{\sigma md}^* & L_{ad} + L_{\sigma md}^* & 0 \\ L_{ad} + L_{\sigma md}^* & L_{ad} + L_{\sigma md}^* + L_{\sigma td}^* & 0 \\ 0 & 0 & L_{lq} + L_{\sigma tq}^* \end{bmatrix},$$

$$[L_{\alpha}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} L_s + (L_d - L_q) \cos 2\gamma & L_n + (L_d - L_q) \cos\left(2\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) \\ L_n + (L_d - L_q) \cos\left(2\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & L_s + (L_d - L_q) \cos\left(2\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) \\ L_n + (L_d - L_q) \cos\left(2\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) & L_n + (L_d - L_q) \cos 2\gamma \\ L_n + (L_d - L_q) \cos\left(2\gamma - \frac{4}{3}\pi\right) & \\ L_n + (L_d - L_q) \cos 2\gamma & \\ L_s + (L_d - L_q) \cos\left(2\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & \end{bmatrix},$$

przy czym:

$$L_s = L_d + L_q + L_n,$$

$$\gamma(t) = \gamma_0 + \int_0^t \omega(t) dt,$$

$$L_n = L_n - \frac{1}{2}(L_d - L_q),$$

$u_{a,b,c}, i_{a,b,c}$ - napięcia i prądy fazowe uzwojenia twornika,

u_f^*, i_f^* - napięcie i prąd uzwojenia wzbudzenia,

i_{td}^*, i_{tq}^* - prądy w zastępczych obwodach tłumiących w osi d i q,

$R^*, R_f^*, R_{td}^*, R_{tq}^*$ - rezystancje: fazy uzwojenia twornika, uzwojenia wzbudzenia, zastępczych obwodów tłumiących w osi d, q,

L_d, L_q, L_{ad}, L_{aq} - indukcyjności: synchroniczna i oddziaływania twornika w osi d i q,

$L_{\sigma f}^*, L_{\sigma nd}^*, L_{\sigma td}^*, L_{\sigma tq}^*$ - indukcyjności rozproszeń: uzwojenia wzbudzenia, obwodów magnesnicy w osi d, zastępczych obwodów tłumiących w osi d, q,

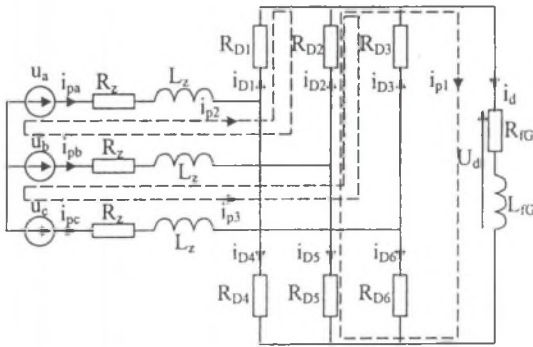
L_0 - indukcyjność dla składowej zerowej prądniczy synchronicznej,

γ_0 - kąt początkowy między osią podłużną d magnesnicy a osią fazy odniesienia uzwojenia twornika.

Kropką zostały oznaczone poszczególne parametry prądniczy sprowadzone na stronę uzwojenia twornika.

3. MODEL MATEMATYCZNY MOSTKA DIODOWEGO

Model matematyczny trójfazowego mostka diodowego przyjęty do badań



Rys.2. Schemat modelu mostka diodowego
Fig.2. Schematic diagram of the bridge rectifier

symulacyjnych wzbudnicy bezszczotkowej jest modelem o stałej strukturze. Diody mostka zamodelowano jako zmienne rezystancje, przyjmujące niewielką wartość R_{\min} w stanie przewodzenia oraz dużą wartość R_{\max} w stanie nieprzewodzenia. Schemat modelu trójfazowego mostka diodowego przedstawiono na rys. 2.

Stan obwodów mostka opisany jest układem równań różniczkowych:

$$C_{ps} u_s = R_p i_p + L_p \frac{d}{dt} i_p, \quad (2)$$

gdzie:

$$C_{ps} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_p = R_{pp} - R_{pa} F^{-1} G, \quad L_p = \begin{bmatrix} L_{WG} & 0 & 0 \\ 0 & 2L_z & L_z \\ 0 & L_z & 2L_z \end{bmatrix},$$

$$i_p = [i_{p1}, i_{p2}, i_{p3}]^T, \quad R_{pp} = \begin{bmatrix} R_{D2} + R_{D5} + R_{WG} & -R_{D2} & -R_{D2} \\ -R_{D2} & R_{D1} + R_{D2} + 2R_z & R_{D2} + R_z \\ -R_{D2} & R_{D2} + R_z & R_{D2} + R_{D3} + 2R_z \end{bmatrix}$$

$$R_{pa} = \begin{bmatrix} R_{D2} + R_{D5} & R_{D2} + R_{D5} \\ -R_{D1} - R_{D2} & -R_{D2} \\ -R_{D2} & -R_{D2} - R_{D3} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} R_{D2} + R_{D5} & -R_{D1} - R_{D2} & -R_{D2} \\ R_{D2} + R_{D5} & -R_{D2} & -R_{D2} - R_{D3} \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} R_{D1} + R_{D2} + R_{D4} + R_{D5} & R_{D2} + R_{D5} \\ R_{D2} + R_{D5} & R_{D2} + R_{D3} + R_{D5} + R_{D6} \end{bmatrix}$$

Prądy fazowe zasilające mostek diodowy i_{pa} , i_{pb} , i_{pc} , prądy diod i_{D1}, \dots, i_{D6} oraz prąd wyprostowany i_d powiązane są z prądami oczkowymi mostka za pomocą równania:

$$i_g = C_g \begin{bmatrix} I \\ F^{-1}G \end{bmatrix} i_p, \quad (3)$$

przy czym:

$$i_g = [i_{pa}, i_{pb}, i_{pc}, i_{D1}, \dots, i_{D6}, i_d]^T, \quad I \quad - \quad \text{macierz jednostkowa,}$$

$$C_g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

4. MODEL MATEMATYCZNY WZBUDNICY BEZSZCZOTKOWEJ

Dla prądnicy synchronicznej współpracującej z mostkiem diodowym wektor stojana i_s związany jest z wektorem prądów mostka i_p relacją:

$$i_s = C_p i_p \quad (4)$$

gdzie:

$$C_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Wprowadzając równanie (4) do równań (1) i (2) uzyskuje się pełny układ równań modelu synchronicznej wzbudnicy bezszczotkowej:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_p - C_{ps} [R_s + \omega_0 N_{ss}] C_p & -C_{ps} \omega_0 N_{sr} \\ \omega_0 N_{sr}^T C_p & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_r \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} L_p - C_{ps} L_{ss} C_p & C_{ps} L_{sr} \\ L_{sr}^T C_p & L_{rr} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_p \\ i_r \end{bmatrix}. \quad (5)$$

5. BADANIA SYMULACYJNE

Układ równań różniczkowych (5) modelu matematycznego synchronicznej wzbudnicy bezszczotkowej wykorzystano do zamodelowania wzbudnicy w programie Matlab-Simulink. Do numerycznego rozwiązania układu sztywnych równań różniczkowych (5) zastosowano metodę Geara-Adamsa ze zmiennym krokiem całkowania. Badania symulacyjne przeprowadzono dla synchronicznej wzbudnicy bezszczotkowej zaprojektowanej do współpracy z turbogeneratorem o mocy znamionowej $P_N = 63$ MW:

- dane znamionowe wzbudnicy:

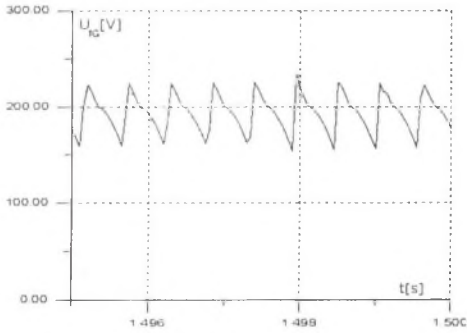
$$\begin{aligned} S_N &= 545 \text{ kV} \cdot \text{A}, & f_N &= 300 \text{ Hz}, \\ U_N &= 200 \text{ V}, & n_N &= 3000 \text{ obr/min}, \\ I_N &= 1565 \text{ A}, & U_{fN} &= 50 \text{ V}, \\ \cos \varphi_N &= 0,88, & I_{fN} &= 57 \text{ A}, \end{aligned}$$

- podstawowe parametry wzbudnicy (jednostki względne):

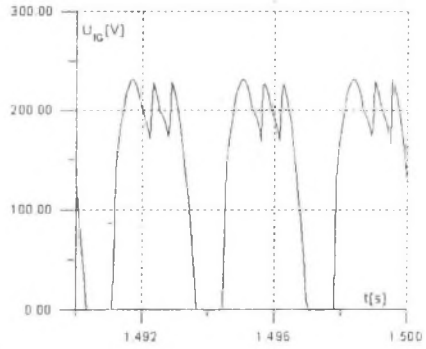
$$\begin{aligned} X_d &= 0,802, & X_q &= 0,520, & R_f^* &= 0,0012, \\ X_{ad} &= 0,700, & X_{aq} &= 0,418, & R_{fd}^* &= 0,016, \\ X_d' &= 0,229, & X_q'' &= 0,328, & R_{fd}' &= 0,018, \\ X_d'' &= 0,211, & X_{\sigma q}^* &= 0,075, & R &= 0,00036, \\ X_{\sigma d}^* &= 0,110, & X_{\sigma f}^* &= 0,156. \end{aligned}$$

Badania symulacyjne obejmowały pracę wzbudnicy bezszczotkowej przy obciążeniu odbiornikiem RL o parametrach uzwojenia wzbudzenia współpracującego z nią turbogeneratora. Wyniki symulacji pracy wzbudnicy bezszczotkowej w stanie ustalonym, przy pracy symetrycznej oraz określonych stanach awaryjnych układu prostowniczego przedstawiono na rys. 3+5. Porównanie uzyskanych przebiegów napięcia wyprostowanego, prądu wzbudzenia i prądów w zastępczych obwodach tłumiących wzbudnicy pozwala ocenić wpływ stopnia uszkodzenia mostka prostowniczego na jakość pracy wzbudnicy tj. zmianę wartości napięcia wyprostowanego, jak również poprawność doboru uzwojenia tłumiącego wzbudnicy.

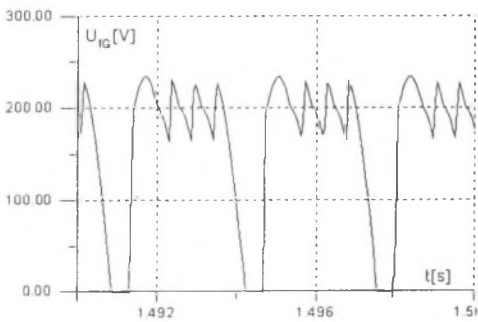
a)



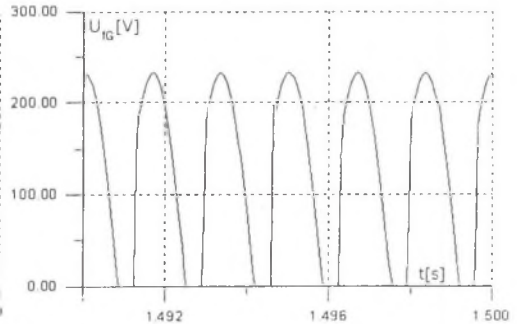
c)



b)



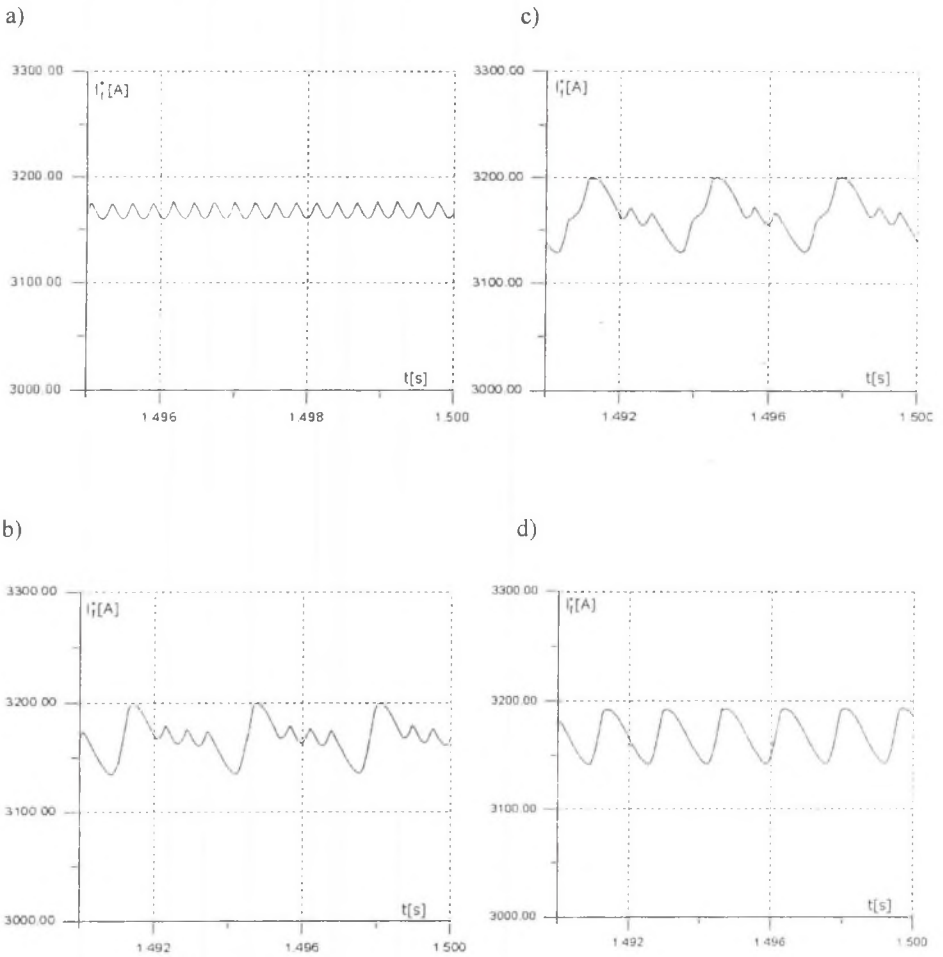
d)

Rys. 3. Przebieg czasowy napięcia wyprostowanego U_{FG} wzbudnicy:

a) mostek symetryczny, b) wyłączona dioda, c) wyłączone dwie diody, d) wyłączona gałąź

Fig. 3. Waveforms of the exciter rectified voltage U_{FG} :

a) symmetrical bridge, b) one diode defected, c) two diode defected, d) one branch defected

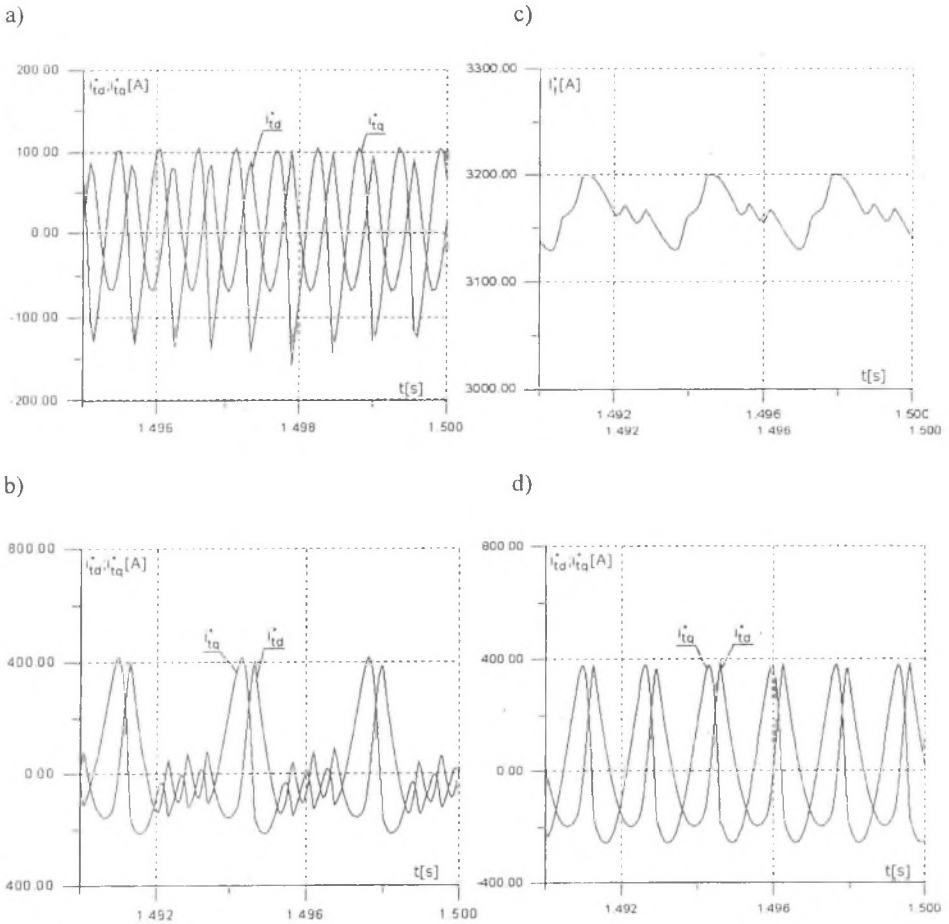


Rys. 4. Przebieg czasowy prądu wzbudzenia I_f^* wzbudnicy:

- a) mostek symetryczny, b) wyłączona gałąź, c) wyłączone dwie diody, d) wyłączona gałąź

Fig. 4. Waveforms of the exciter excitation current I_f^*

- a) symmetrical bridge, b) one diode defected, c) two diode defected, d) one branch defected



Rys. 5. Przebieg czasowy prądów i_{td}^* , i_{tq}^* w zastępczych obwodach tłumiących wzbudnicy:

a) symetryczny mostek, b) wyłączona dioda, c) wyłączone dwie diody, d) wyłączona gałąź

Fig. 5. Waveforms of currents i_{td}^* , i_{tq}^* in the damper winding of the exciter

a) symmetrical bridge, b) one diode defected, c) two diode defected, d) one branch defected

6. PODSUMOWANIE

Przedstawiony model matematyczny synchronicznej wzbudnicy bezszczotkowej jest przydatny do badań jej własności eksploatacyjnych jako źródła wzbudzenia generatora synchronicznego. Model ten może podlegać modyfikacji w części dotyczącej prądnicy synchronicznej w zależności od zakładanej dokładności odwzorowania skutków prądów wirowych w bloku litym i klatce tłumiącej – istnieje możliwość zastosowania bardziej rozbudowanego modelu matematycznego prądnicy synchronicznej. Uzyskane wyniki obliczeń symulacyjnych w awaryjnych stanach pracy poza oceną jakości pracy wzbudnicy pozwalają zarazem na określenie poprawności doboru uzwojenia tłumiącego i mogą być przydatne do jego optymalnego zaprojektowania.

LITERATURA

1. Janik T., Kapinos J.: Badania symulacyjne synchronicznej wzbudnicy bezszczotkowej. XXI Seminar „Wybrane problemy elektrycznych strojów a pohnu” Svratka. Czechy, 24÷26 maj 1999, pp. 70-77.
2. Janik T., Kapinos J., Miksiewicz R.: Wpływ uszkodzenia układu prostowniczego na pracę wzbudnicy bezszczotkowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Ser. Elektryka z. 168, Gliwice 1999, s. 173-186.
3. Kapinos J., Miksiewicz R.: Praca wzbudnicy bezszczotkowej w stanie awaryjnym układu prostowniczego. XXIX Sympozjum Maszyn Elektrycznych – „Niesymetrie w maszynach elektrycznych i transformatorach” Wrocław – Szklarska Poręba 1993, s. 154-159.
4. Paszek W.: Dynamika maszyn prądu przemiennego. Wyd. Helion, Gliwice 1998.

Recenzent: Dr hab. inż. Ernest Mendrela
Prof. Politechniki Opolskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 kwietnia 2000 r.

Abstract

Synchronous generators with different types of excitation sources operate in Polish power system. One of them is a synchronous brushless exciter. It consists of a three-phase synchronous generator and a rotating rectifier system. A synchronous generator excitation source should be characterized by high operational reliability. The failure of the brushless exciter rectifier system influences considerably on the exciter exploitation parameters.

Investigations of the brushless exciter operation in steady, failure-free and failure states have been made basing on the worked out mathematical model of the exciter. The system of differential equations (5) has been used for modelling of the brushless exciter by Matlab-Simulink program. In order to solve the system of stiff differential equations (5) the Gear-Adams method with variable integration step has been applied. Simulation investigations have been performed for the brushless exciter fitted for co-operation with the 63 MW synchronous generator. Some results of the exciter operation are presented in Figs.3÷5. The obtained simulation results enable to determine the influence of the rectifier system failure on the exciter exploitation parameters as well as to assess the correctness of selection of the exciter damper winding. The presented mathematical model of a synchronous brushless exciter is quite useful for the investigations of its exploitation properties.