

Sebastian Berhausen, Andrzej Boboń, Stefan Paszek
Politechnika Śląska

ESTYMACJA PARAMETRÓW MODELU GENERATORA SYNCHRONICZNEGO NA PODSTAWIE ANALIZY PRZEBIEGÓW ZAKŁÓCENIOWYCH W STANIE OBCIĄŻENIA PRZY WYKORZYSTANIU METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

ESTIMATION OF SYNCHRONOUS GENERATOR MODEL PARAMETERS BASED ON ANALYSIS OF DISTURBANCE WAVEFORMS UNDER LOAD CONDITIONS WITH USE OF THE FINITE ELEMENT METHOD

Abstract: In the work there is presented a field-circuit model of a high power synchronous generator which enables determining the waveforms of electromagnetic quantities in steady and transient states. Verification of the field-circuit model was performed based on comparison of the measured and calculated with finite element method waveforms at a step change of the voltage regulator reference voltage of the generator operating under no load conditions in Połaniec Power Plant. The dynamic waveforms of the generator operating in a power system under load conditions, in which the transient state was caused by a step change of the field voltage, were the basis for estimation of the generator model electromagnetic parameters. Estimation of the generator model parameters was performed with use of the least square method.

Słowa kluczowe: generator synchroniczny, estymacja parametrów modelu, metoda elementów skończonych
Keywords: synchronous generator, estimation of model parameters, finite element method

1. Wstęp

W badaniach symulacyjnych stanów dynamicznych Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) najczęściej wykorzystywana jest baza parametrów modeli matematycznych zespołów wytwórczych, których wartości określone są na podstawie danych katalogowych i projektowych dostarczanych przez producentów elementów składowych zespołów lub są szacowane na podstawie typowych danych publikowanych w opracowaniach naukowo-technicznych. Określone w taki sposób wartości parametrów modeli matematycznych zespołów wytwórczych są przybliżone, obarczone w wielu przypadkach dużym błędem i nie odpowiadają aktualnym wartościom parametrów eksploatowanych zespołów. Wartości parametrów podane przez producentów nie uwzględniają aktualnych warunków pracy zespołów wytwórczych, w tym także zmian ich właściwości spowodowanych długotrwałą eksploatacją, remontami i modernizacją. W konsekwencji wyniki badań symulacyjnych KSE, które są podstawą planowania jego rozwoju oraz analiz

zagrożeń w czasie bieżącej eksploatacji są niepewne.

Obecnie uważa się, że modelowanie polowo-obwodowe generatorów synchronicznych jest jedną z najdokładniejszych metod obliczeniowych ponieważ możliwe jest uwzględnienie istotnych zjawisk elektromagnetycznych, elektromechanicznych oraz czynników decydujących o właściwościach maszyny, takich jak: nieliniowość charakterystyk magnesowania rdzeni magnetycznych, oddziaływanie prądów wirowych w przewodzących elementach wirnika, ruch wirnika [3, 5, 7, 12]. Głównym czynnikiem ograniczającym zastosowanie modeli polowo-obwodowych w symulacjach systemów elektroenergetycznych jest długi czas obliczeń i konieczność dostępu do komputerów o dużych mocach obliczeniowych. Modele takie są jednak coraz częściej stosowane do wyznaczania parametrów modeli obwodowych maszyn synchronicznych. Obliczenia polowo-obwodowe mogą być wykonane na etapie projektowania maszyny, mogą również naśladować testy pomiarowe – niekiedy bardzo trudne do przeprowadzenia w warunkach eksploatacyjnych generatora.

W niniejszym artykule przedstawiono dwuwymiarowy, polowo-obwodowy model generatora synchronicznego dużej mocy, umożliwiający wyznaczenie przebiegów wielkości elektromagnetycznych w stanach ustalonych i nieustalonych. Weryfikację modelu polowo-obwodowego generatora przeprowadzono w oparciu o porównanie zmierzonego i obliczonego napięcia stojana po zakłóceniu w układzie regulacji napięcia generatora typu TWW-200-2 pracującego w Elektrowni Połaniec. Zweryfikowany model polowo-obwodowy posłużył do obliczenia przebiegów dynamicznych w stanie obciążenia generatora będących podstawą estymacji parametrów elektromagnetycznych obwodowego modelu analizowanego generatora.

2. Model polowo-obwodowy generatora synchronicznego

W obliczeniach stanu nieustalonego wykorzystano dwuwymiarowy, polowo-obwodowy model generatora synchronicznego, w którym równania Kirchhoffa, opisujące stan elektromagnetyczny poszczególnych uzwojeń, powiązane są z równaniami opisującymi rozkład przestrzenno-czasowy pola elektromagnetycznego. Równania opisujące rozkład pola elektromagnetycznego wynikają z równań Maxwella.

Obliczenia polowo-obwodowe przeprowadzono w solverze Transient programu Maxwell-2D dla cylindrycznego generatora synchronicznego dużej mocy o następujących danych znamionowych: $S_n = 235,5 \text{ MV}\cdot\text{A}$, $P_n = 200 \text{ MW}$, $U_n = 15,75 \text{ kV}$, $I_n = 8625 \text{ A}$, $I_{fn} = 2680 \text{ A}$, $\cos\varphi_n = 0,85$.

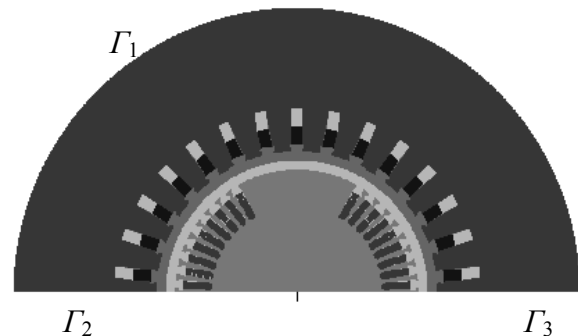
W modelu obliczeniowym uwzględniono [1, 2, 5, 6]:

- dwuwymiarowy rozkład pola elektromagnetycznego w przekroju poprzecznym generatora,
- nieliniowe charakterystyki magnesowania rdzeni stojana i wirnika,
- stałą prędkość wirowania wirnika,
- prądy wirowe indukowane w litym bloku i klinach żłobkowych wirnika.

Pominięto natomiast:

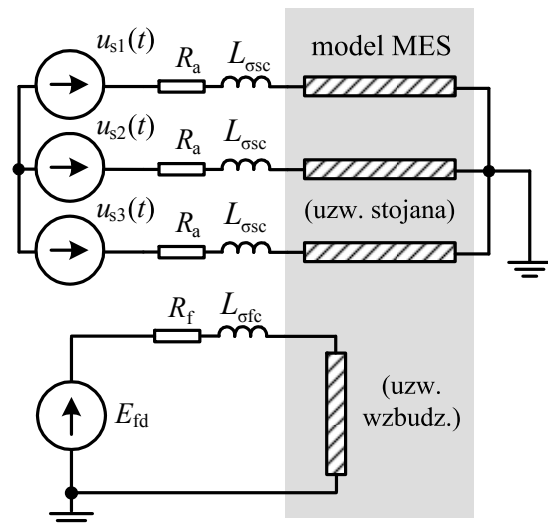
- zjawisko wypierania prądu w uzwojeniach stojana i wirnika,
- prądy wirowe w pakiecie blach stojana.

Ze względu na powtarzalność rozkładu pola magnetycznego pod każdą parą biegunów, do obliczeń przyjęto przekrój poprzeczny maszyny obejmujący jedną podziałkę biegunową. Polową część modelu obliczeniowego generatora przedstawiono na rys. 1. Rozważany przekrój poprzeczny modelu obliczeniowego generatora poddano dyskretyzacji za pomocą trójkątnych elementów skończonych drugiego rzędu. Na zewnętrznej powierzchni stojana (Γ_1) przyjęto zerowy warunek brzegowy Dirichleta dla wektorowego potencjału magnetycznego. Na dwóch pozostałych krawędziach Γ_2 i Γ_3 , oddalonych od siebie o podziałkę biegunową, przyjęto warunki antyperiodyczności potencjału.



Rys. 1. Obszar przekroju poprzecznego badanego turbogeneratora TWW-200-2

Obwodową część modelu obliczeniowego generatora przedstawiono na rys. 2. Składa się

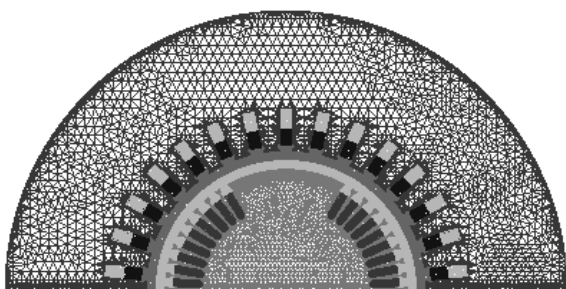


Rys. 2. Obwody zewnętrzne dołączone do modelu polowego turbogeneratora

ona z zewnętrznymi obwodami elektrycznymi dołączonymi do uzwojeń zamodelowanych w części polowej. Obwody te zawierają źródła zasilania oraz rezystancje i indukcyjności

rozproszenia czoł uzwojeń [13], których nie uwzględnia dwuwymiarowy model polowy.

W obliczeniach stanu nieustalonego przyjęto stały krok całkowania równań w dziedzinie czasu $\Delta t = 0,0002$ s. Na rys. 3 przedstawiono siatkę elementów skończonych składającą się z 40684 elementów trójkątnych.



Rys. 3. Siatka elementów skończonych

3. Weryfikacja pomiarowa modelu polowo-obwodowego generatora synchronicznego

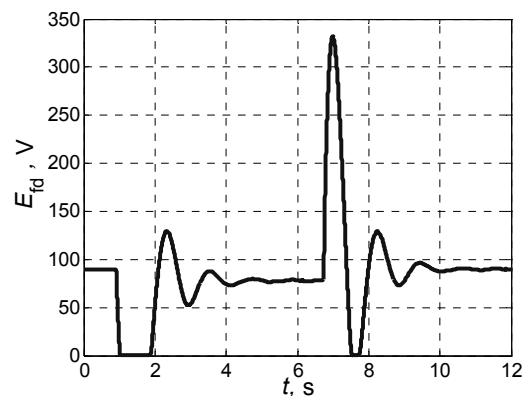
Badany generator TWW-200-2 zainstalowany w Elektrowni Połaniec, wyposażony jest w statyczny układ wzbudzenia. Test przeprowadzono na biegu jałowym generatora, przy stałej prędkości wirowania wirnika równej $n = 3000$ obr/min. Zakłócenie, w postaci skokowej zmiany (o $\pm 10\%$) napięcia zadanego w regulatorze napięcia, zainicjowało stan nieustalony, podczas którego zarejestrowano przebiegi napięcia wzbudzenia oraz napięcia stojana generatora. Przebiegi tych napięć przedstawiono na rys. 4. Napięcie wzbudzenia (rys. 4a) przyjmuje wartości nieujemne, co wynika z działania prostownika wzbudzenia pracującego w układzie regulacji napięcia generatora.

Na rys. 5 przedstawiono porównanie obliczonego i zmierzonego przebiegu napięcia stojana generatora. Na podstawie porównania tych przebiegów stwierdza się, że opracowany model polowo-obwodowy generatora synchronicznego TWW-200-2 w dostatecznie dokładny sposób odwzorowuje zjawiska zachodzące w maszynie na biegu jałowym w stanach ustalonych i nieustalonych.

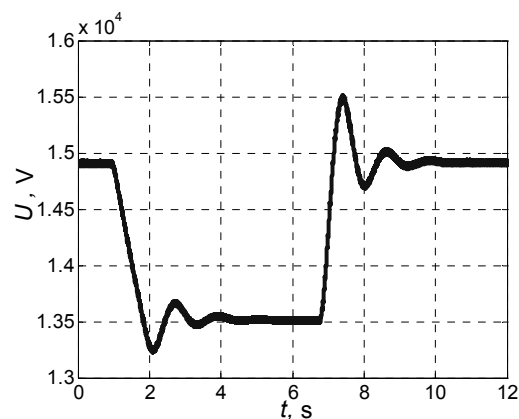
Pewne rozbieżności wyników obliczeń ze zmierzonymi przebiegami napięcia stojana (szczególnie widoczne w stanach dynamicznych) mogą wynikać z odmiennych wartości konduktywności elektrycznych litego bloku i klinów żłobkowych wirnika w maszynie

rzeczywistej i w modelu obliczeniowym. Konduktywności te mogą ulec zmianom, podczas długoletniej eksploatacji maszyny.

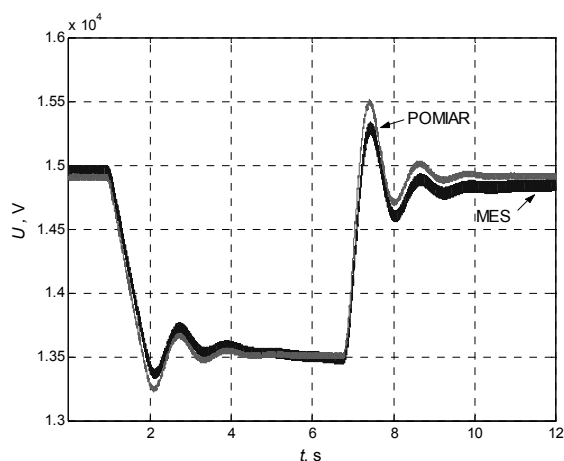
a)



b)



Rys. 4. Zmierzone przebiegi napięcia wzbudzenia (a) i napięcia stojana generatora (b)



Rys. 5. Porównanie obliczonego i zmierzonego przebiegu napięcia stojana generatora TWW-200-2

4. Model matematyczny generatora synchronicznego

Najważniejszym elementem zespołu wytwórczego jest generator synchroniczny, który jest podstawowym obiektem badań w niniejszym artykule.

W procesie estymacji parametrów wykorzystano obwodowy model matematyczny generatora wyrażony we współrzędnych Parka (d, q), zawierający jeden zastępczy obwód tłumiący w wirniku w osi d oraz dwa obwody zastępcze w osi q. W modelu tym w sposób przybliżony uwzględniono zjawisko nasycenia rdzeni magnetycznych oraz pominięto napięcia transformacji stojana – model GENROU [5, 8]. Model matematyczny maszyny synchronicznej wyrażony przez parametry standardowe (w jednostkach względnych) w osi d opisują równania:

$$(1a) \quad U_d = -\omega \Psi_q - I_d R_a = -\omega \Psi_q + \omega X_q' I_q - I_d R_a,$$

$$\frac{dE_q'}{dt} = \frac{1}{T_{d0}} (E_{fd} - X_{ad} I_{fd}),$$

$$\frac{d\Psi_{kd}}{dt} = \frac{1}{T_{d0}} (E_q' - \Psi_{kd} - I_d (X_d' - X_\sigma)),$$

$$\Psi_d' = E_q' \frac{X_d' - X_\sigma}{X_d' - X_\sigma} + \Psi_{kd} \frac{X_d' - X_\sigma}{X_d' - X_\sigma},$$

$$E_{fd} = X_{ad} I_{fd} = E_q' + (X_d - X_d') \left(I_d + T_{d0} \frac{d\Psi_{kd}}{dt} \frac{X_d' - X_\sigma}{(X_d' - X_\sigma)^2} \right) + \Delta(X_{ad} I_{fd}) \frac{\Psi_d'}{|\Psi_d'|},$$

a w osi q:

$$(1b) \quad U_q = \omega \Psi_d - I_q R_a = \omega \Psi_d - \omega X_d' I_d - I_q R_a,$$

$$\frac{dE_d'}{dt} = \frac{1}{T_{q0}} (X_{aq} I_{kq}),$$

$$\frac{d\Psi_{kq}}{dt} = \frac{1}{T_{q0}} (E_d' - \Psi_{kq} + I_q (X_q' - X_\sigma)),$$

$$-\Psi_q' = E_d' \frac{X_q'' - X_\sigma}{X_q' - X_\sigma} + \Psi_{kq} \frac{X_q' - X_\sigma}{X_q' - X_\sigma},$$

$$X_{aq} I_{kq} = -E_d' + (X_q - X_q') \left(I_q - T_{q0} \frac{d\Psi_{kq}}{dt} \frac{X_q' - X_\sigma}{(X_q' - X_\sigma)^2} \right) + \Delta(X_{ad} I_{fd}) \frac{\Psi_q'}{|\Psi_q'|} \frac{X_{aq}}{X_{ad}},$$

gdzie:

$$X_{ad} = X_d - X_\sigma, \quad X_{aq} = X_q - X_\sigma, \quad |\Psi_d'| = \sqrt{\Psi_d'^2 + \Psi_q'^2},$$

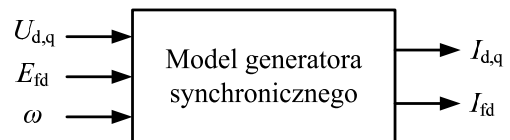
U, U_d, U_q, I_d, I_q – napięcie zaciskowe stojana,

napięcia i prądy stojana w osiach d i q maszyny, E_{fd}, I_{fd} – napięcie i prąd uzwojenia wzbudzenia, E_d', E_q' – siły elektromotoryczne rotacji proporcjonalne do odpowiednich strumieni magnetycznych obwodów wirnika, $\Psi_d', \Psi_q', \Psi_{kd}, \Psi_{kq}, \Psi_d'', \Psi_q''$ – strumienie sprzężone obwodów w osiach d i q wirnika i zastępczych obwodów tłumiących wirnika, $X_d, X_q, X_{ad}, X_{aq}, X_d', X_q', X_d'', X_q''$ – reaktancje synchroniczne, magnesujące, przejściowe i podprzejściowe w osiach d i q, $T_{d0}', T_{q0}', T_{d0}'', T_{q0}''$ – stałe czasowe przejściowe i podprzejściowe przy otwartym obwodzie stojana, R_a, X_σ – rezystancja i reaktancja rozproszenia stojana.

5. Metodyka estymacji parametrów

Parametry modelu matematycznego generatora synchronicznego można wyznaczyć (w obu osiach) na podstawie analizy przebiegów dynamicznych wywołanych zakłóceniem ustalonej pracy maszyny. Podstawą estymacji parametrów są przebiegi dynamiczne w stanie obciążenia generatora obliczone metodą elementów skończonych. Obliczenia przeprowadzono dla generatora synchronicznego pracującego w jednomaszynowym systemie elektroenergetycznym, w którym stan nieustalony wywołano skokową zmianą napięcia wzbudzenia równą $+5\%E_{fdn}$ [10]. W modelu połowo-obwodowym założono, że w stanie ustalonym generator obciążony jest znamionową mocą czynną P_n i bierną Q_n , a moduł fazona przestrzennego napięcia stojana jest równy znamionowemu U_n . Czas obliczeń stanów nieustalonych generatora wyznaczonych metodą elementów skończonych jest bardzo długi, zatem rozważania ograniczono do jednego rodzaju zakłócenia pracy ustalonej maszyny.

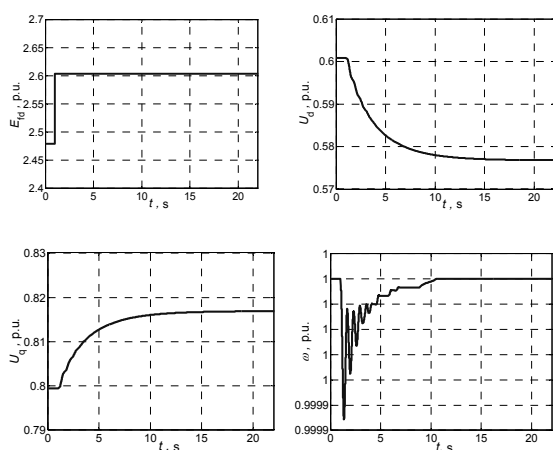
Na rys. 6 przedstawiono sygnały wejściowe i wyjściowe modelu generatora, uwzględniane w procesie estymacji parametrów.



Rys. 6. Sygnały modelu generatora synchronicznego uwzględniane w procesie estymacji parametrów

Dla rozpatrywanego przypadku przebiegi wielkości wejściowych modelu matematycznego generatora przedstawiono na rys. 7.

W procesie estymacji, parametry modelu matematycznego maszyny wyznacza się w taki sposób, aby zminimalizować funkcję celu w postaci błędu średniokwadratowego pomiędzy przebiegami wzorcowymi (przebiegi obliczone MES), a przebiegami obliczonymi za pomocą modelu symulacyjnego dla poszukiwanego wektora parametrów \mathbf{P} , który dla rozważanego przypadku można przedstawić w postaci $\mathbf{P} = [R_a \ X_\sigma \ X_{ad} \ X'_d \ X''_d \ T'_{d0} \ T''_{d0} \ X_{aq} \ X'_q \ X''_q \ T'_{q0} \ T''_{q0}]$.



Rys. 7. Przebiegi wielkości wejściowych modelu matematycznego generatora (napięcia wzbudzenia, napięcie U_d , U_q , prędkości kątowej wirnika) przy skokowej zmianie napięcia wzbudzenia równej $+5\%E_{fdn}$

Do estymacji wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów. Błąd średniokwadratowy pomiędzy przebiegami wzorcowymi a przebiegami obliczonymi za pomocą modelu symulacyjnego dla poszukiwanego wektora parametrów \mathbf{P} określono w następujący sposób [4, 5, 9, 11]:

$$\varepsilon(\mathbf{P}) = \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{I_{di}^m - I_{di}^s(\mathbf{P})}{I_{di}^m} \right|^2 + \left| \frac{I_{fdi}^m - I_{fdi}^s(\mathbf{P})}{I_{fdi}^m} \right|^2 + \left| \frac{I_{qi}^m - I_{qi}^s(\mathbf{P})}{I_{qi}^m} \right|^2 \right) \quad (2)$$

gdzie: I_{di}^m , I_{fdi}^m , I_{qi}^m , $I_{di}^s(\mathbf{P})$, $I_{fdi}^s(\mathbf{P})$, $I_{qi}^s(\mathbf{P})$ – wartości chwilowe odpowiednich sygnałów

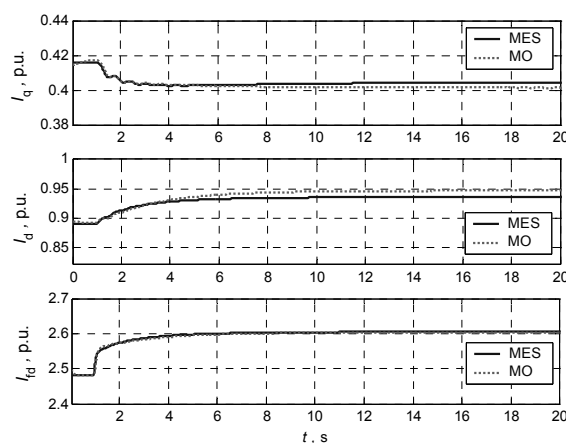
wyjściowych obliczonych MES (m) oraz modelu obwodowego obliczonych dla aktualnego zbioru parametrów $\mathbf{P}(s)$.

6. Wyniki estymacji parametrów

Minimalizację, błędu średniokwadratowego, zdefiniowaną wzorem (2), przeprowadzono w oparciu o algorytm gradientowy Levenberga - Marquardta z ograniczeniami, zawarty w Optimization Toolbox programu Matlab. Wyniki obliczeń parametrów elektromagnetycznych generatora zamieszczono w tabeli 1. Porównanie przebiegów prądów stojana w osiach d i q oraz prądu wzbudzenia obliczonych przy wykorzystaniu modelu polowo-obwodowego (MES) z przebiegami otrzymanymi z modelu obwodowego (MO), dla obliczonego zbioru parametrów, przedstawiono na rys. 8.

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń parametrów generatora synchronicznego

Parametr	X_{ad}	X'_d	X''_d	T'_{d0} [s]
wartość	1,637	0,2509	0,2182	5,31
Parametr	T'_{d0} [s]	X_{aq}	X'_q	X''_q
wartość	0,268	1,55	0,3547	0,235
Parametr	T'_{q0} [s]	T'_{q0} [s]	R_a	X_σ
wartość	2,202	0,0051	0,0014	0,192



Rys. 8. Porównanie przebiegów prądów stojana w osiach d i q oraz prądu wzbudzenia obliczonych na podstawie modelu polowo-obwodowego (MES) i modelu obwodowego (MO) wywołane skokową zmianą napięcia wzbudzenia o $+5\%E_{fdn}$

7. Wnioski

Z porównania przebiegów prądu stojana w osiach d i q oraz prądu wzbudzenia obliczonych na podstawie modelu polowo-obwodowego z przebiegami obliczonymi na podstawie modelu obwodowego dla wyznaczonego zbioru parametrów wynika, że model obwodowy w dostatecznie dokładny sposób odwzorowuje badany generator synchroniczny. Widoczne rozbieżności pomiędzy przebiegami obliczonymi na podstawie modelu polowo-obwodowego i modelu obwodowego mogą wynikać z przyjętych założeń upraszczających modelu obwodowego takich jak: pominięcie siły elektromotorycznej transformacji, pominięcie indukcyjności dynamicznych. Opracowanie dokładniejszych obwodowych modeli matematycznych generatora synchronicznego będzie przedmiotem dalszych prac autorów.

8. Literatura

- [1] Berhausen S., Boboń A., Paszek S.: *Estymacja parametrów elektromagnetycznych turbogeneratorsa na podstawie zweryfikowanych pomiarowo przebiegów obliczonych metodą elementów skończonych*. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), R. 86 Nr 8/2010, s.16-21.
- [2] Berhausen S., Boboń A., Paszek S.: *Metodyka wyznaczania parametrów elektromagnetycznych maszyny synchronicznej na podstawie przebiegów niustalonych wyznaczonych metodą elementów skończonych na biegu jałowym*. XLV Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME'2009, Rzeszów-Krasiczyn 23-26.06.2009. Zeszyty Problemowe "Maszyny Elektryczne" BOBRME Nr. 83, Katowice 2009, s. 29-32.
- [3] Berhausen S., Boboń A., Paszek S.: *Weryfikacja polowo-obwodowego modelu generatora synchronicznego na podstawie zmierzonych przebiegów niustalonych*. Archiwum Energetyki Tom XXXIX, 2009 Nr 1, s. 103-110.
- [4] Berhausen S., Paszek S.: *Estymacja parametrów modelu generatora synchronicznego pracującego w wielomaszynowym systemie elektroenergetycznym*. Przegląd Elektrotechniczny 2011, Nr 8, s. 192-197.
- [5] Berhausen S.: *Metody estymacji parametrów elektromagnetycznych generatorów synchronicznych na podstawie przebiegów w stanie obciążenia*. Praca doktorska, Gliwice, 2012.
- [6] Boboń A., Berhausen S.: *Estimation of synchronous machine parameters using short-circuit currents calculated by the finite element method*. XVI International Symposium on Electric Machinery in Prague, ISEM'2008, 10-11 Sep 2008, Prague, pp. 105-112.
- [7] Boboń A., Kudła J., Żywiec A.: *Parametry elektromagnetyczne maszyny synchronicznej. Wykorzystanie metody elementów skończonych*. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1998.
- [8] de Mello F.P., Hannett L.H.: *Validation of Synchronous Machine Models and Derivation of Model Parameters from Tests*. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.100, No.2, Feb. 1981, pp. 662-672.
- [9] Jahromi, M.E.; Firouzi, B.; Ranjbar, A.M.: *Possibility of large synchronous generator parameters estimation via on-line field tests using genetic algorithm*. Power India Conference, 2006 IEEE, 10-12 April 2006 Page(s): 6 pp.
- [10] Kudła J., Berhausen S.: *Ocena możliwości estymacji parametrów modeli matematycznych generatorów synchronicznych na podstawie przebiegów w stanie obciążenia*. Prace Naukowe Politechniki Śląskiej, ser. Elektryka Z.3 (203), Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007, s. 17-30.
- [11] Paszek S.: *Wybrane metody oceny i poprawy stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia, Gliwice 2012.
- [12] Reece A.B.J., Preston T.W.: *Finite element methods in electrical power engineering*. Oxford University Press, 2000.
- [13] Turowski J.: *Obliczenia elektromagnetyczne maszyn i urządzeń elektrycznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982.

Autorzy

Dr inż. Sebastian Berhausen
Sebastian.Berhausen@polsl.pl
Dr inż. Andrzej Boboń
Andrzej.Bobon@polsl.pl
Prof. dr hab. inż. Stefan Paszek
Stefan.Paszek@polsl.pl
Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10A

Recenzent

prof. dr hab. inż. Ludwik Antal