

*modele generatorów synchronicznych,
estymacja parametrów, testy pomiarowe*

Andrzej BOBÓŃ*, Stefan PASZEK*, Marian PASKO*,
Piotr PRUSKI*, Maria BOJARSKA*

PORÓWNANIE WYNIKÓW ESTYMACJI PARAMETRÓW RÓŻNYCH MODELI GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH UZYSKANYCH NA PODSTAWIE TESTÓW POMIAROWYCH

W artykule przedstawiono porównanie wyników estymacji wybranych parametrów (w osi d) następujących modeli generatorów synchronicznych: GENROU (model typu XT) oraz (3,3) i (2,2) (modele typu RL) wykorzystując przebiegi zakłóceniami, uzyskane przy skokowej zmianie napięcia zadanego regulatora napięcia generatora synchronicznego pracującego na biegu jałowym w Elektrowni Rybnik. Estymację parametrów generatora przeprowadzono w procesie iteracyjnym w taki sposób, aby obliczone na podstawie tych parametrów przebiegi dynamiczne aproksymowały przebiegi zmierzone z określoną dokładnością. Proces estymacji można sprowadzić do minimalizacji funkcji celu, na którą wpływają różnice przebiegów pomiarowych i aproksymujących w poszczególnych chwilach czasu.

1. WSTĘP

O jakości badań symulacyjnych systemów elektroenergetycznych (SEE) w stanach zakłóceń decydują zastosowane w obliczeniach modele matematyczne zespołów wytwórczych i ich podstawowych elementów: generatorów synchronicznych, układów wzbudzenia i turbin napędowych z regulatorami prędkości. Dokładność użytych modeli matematycznych zależy nie tylko od przyjętej wewnętrznej struktury modelu, ale w jeszcze większym stopniu od jakości jego parametrów [1, 3].

W badaniach symulacyjnych SEE wykorzystuje się zarówno uproszczone jak i bardziej rozbudowane modele matematyczne generatorów synchronicznych. Modele te można podzielić na modele wyrażone przez parametry standardowe – typu XT oraz modele wyrażone przez rezystancje i indukcyjności obwodów elektrycznych – typu RL. Modele wyrażone przez parametry standardowe są to modele przybliżone, wyra-

* Instytut Elektrotechniki i Informatyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska, Akademicka 10, 44-100 Gliwice.

zone przez reaktancje i stałe czasowe stanów podprześciowego, przejściowego i ustalonego [2, 4, 5]. W modelach tych pomija się napięcia transformacji w stojanie i uwzględnia się nasycenie rdzeni magnetycznych od strumienia głównego. Przyjęcie tych uproszczeń powoduje algebraizację równań stojana i obniżenie rzędu układu równań różniczkowych modelu.

W modelach wyrażonych przez rezystancje i indukcyjności obwodów elektrycznych obwody tłumiące wirnika o stałych rozłożonych przybliża się przez zastępcze obwody o stałych skupionych typu RL. Oznaczając typ modelu matematycznego generatora przez parę liczb $(1 + n_d, n_q)$ – przy czym n_d, n_q określają liczbę zastępczych obwodów tłumiących w osiach d i q wirnika – określa się modele typu (3,3) – dla $n_d = 2, n_q = 3, (2,2), (2,1)$ i $(1,0)$ [1, 4]. Przy wykorzystaniu tych modeli generatorów do badania stabilności kątowej SEE pomija się lub nie napięcie transformacji w obwodach twornika. Można również uwzględnić nasycenie rdzeni magnetycznych maszyny.

W artykule przedstawiono porównanie wyników estymacji wybranych parametrów (w osi d) następujących modeli generatorów synchronicznych: GENROU (model typu XT) oraz (3,3) i (2,2) (modele typu RL) wykorzystując przebiegi zakłócenia, uzyskane przy skokowej zmianie napięcia zadanego regulatora napięcia generatora synchronicznego pracującego na biegu jałowym.

2. MODELE GENERATORA

Typowym przedstawicielem modeli generatora synchronicznego typu XT, szeroko stosowanym w analizach SEE, jest model GENROU o dwóch zastępczych obwodach w osiach d i q generatora. Równania opisujące model matematyczny w osi d (wyrażone w jednostkach względnych) są następujące [5, 6]:

$$V_q = \Psi'_d - I_q R = \Psi''_d - X''_d I_d - I_q R, \quad \frac{dE'_d}{dt} = \frac{1}{T_{do}} (E_{fd} - X_{ad} I_{fd}),$$

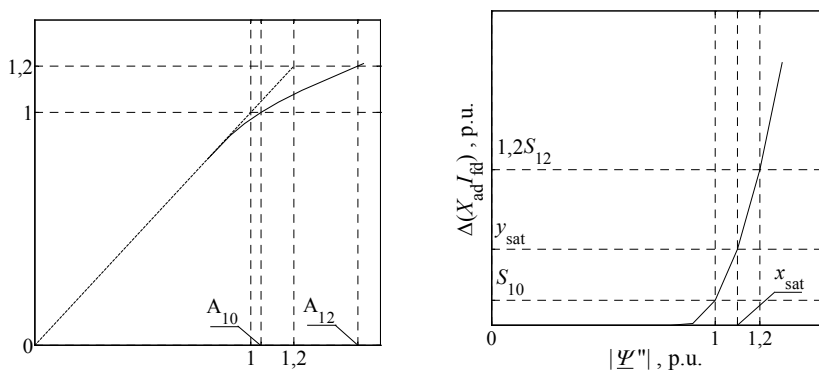
$$\frac{d\Psi_D}{dt} = \frac{1}{T_{do}} (E'_q - \Psi_D - I_d (X'_d - X_\sigma)), \quad \Psi''_d = E'_q \frac{X''_d - X_\sigma}{X'_d - X_\sigma} + \Psi_D \frac{X'_d - X''_d}{X'_d - X_\sigma}, \quad (1)$$

$$E_{fd} = X_{ad} I_{fd} = E'_q + (X_d - X'_d) \left(I_d + T_{do} \frac{d\Psi_D}{dt} \frac{X'_d - X''_d}{(X'_d - X_\sigma)^2} \right) + \Delta (X_{ad} I_{fd}) \frac{\Psi''_d}{|\underline{\Psi''}|},$$

gdzie: $V_d, V_q, I_d, I_q, \Psi_d, \Psi_q, \Psi_D, \Psi_Q, E'_d, E'_q$ – napięcia, prądy, strumienie skojarzone stojana, strumienie skojarzone obwodów tłumiących wirnika, napięcia stojana za reaktancją przejściową w osiach d i q, E_{fd}, I_{fd} – napięcie, prąd uzwojenia wzbudzenia, $\underline{\Psi''} = \Psi''_q - j\Psi''_d$ – fazor podprześciowego strumienia skojarzonego.

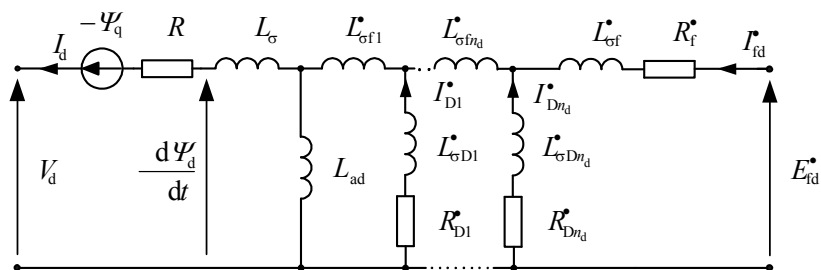
W równaniach tych, składnik $\Delta(X_{ad}I_{fd})$ wyraża wpływ nasycenia obwodu magnetycznego. Zjawisko nasycenia rdzenia magnetycznego maszyny uwzględnia się w przybliżony sposób, uzależniając je od sprzężonych strumieni magnetycznych za reaktancjami podprześciowymi w obu osiach. Dla modelu GENROU aproksymuje się nieliniową charakterystykę biegu jałowego generatora funkcją kwadratową [5, 6]. Podstawą aproksymacji jest określenie współczynników nasyceniowych wg zależności (rys. 1):

$$S_{10} = A_{10} - 1, \quad S_{12} = \frac{A_{12} - 1,2}{1,2}. \quad (2)$$



Rys. 1. Charakterystyka strumienia skojarzonego wirnika, aproksymowana funkcją kwadratową i definicja współczynników nasyceniowych S_{10}, S_{12}

Fig. 1. Characteristic of the rotor flux linkage approximated with a square function and definition of saturation coefficients S_{10}, S_{12}



Rys. 2. Schemat zastępczy w osi d generatora synchronicznego typu $(1+n_d, n_q)$ wyrażony przez rezystancje i indukcyjności obwodów elektrycznych

Fig. 2. Equivalent diagram (in d axis) of a synchronous generator of $(1+n_d, n_q)$ type expressed by resistances and inductances of electric circuits

Modele typu RL reprezentowane są często przez schematy zastępcze w osiach d i q. Taki schemat zastępczy generatora w osi d przedstawiono na rys. 2. W modelach tych nasycenie obwodu magnetycznego od strumienia głównego można uwzględnić w przy-

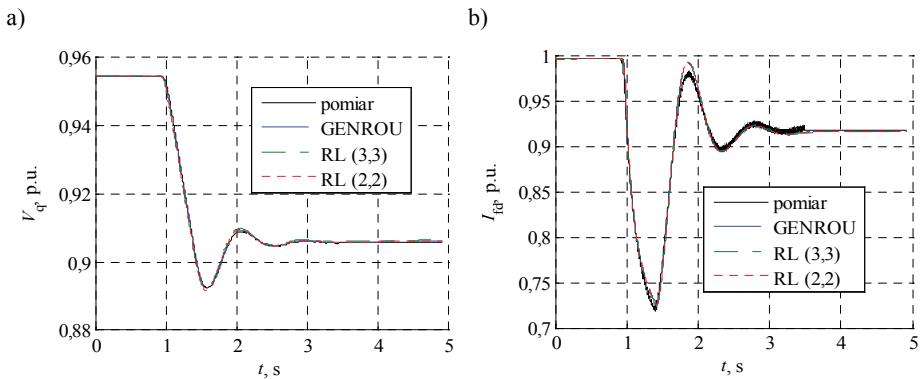
bliżony sposób, analogicznie jak dla modelu GENROU, poprzez współczynniki nasyceniowe S_{10} i S_{12} .

3. ESTYMACJA PARAMETRÓW

Podstawą estymacji parametrów modelu matematycznego generatora synchronicznego (wchodzącego w skład zespołu wytwórczego SEE) są wyniki pomiarów wybranych wielkości, np. przy skokowej zmianie napięcia zadanego regulatora napięcia generatora synchronicznego pracującego na biegu jałowym. W stanie nieustalonym zmienia się napięcie generatora (indukowane w osi q) oraz prąd wzbudzenia, a na przebiegi te wpływają tylko parametry generatora w osi d. Obliczenie parametrów modelu generatora w osi d można sprowadzić do minimalizacji funkcji celu, wyrażonej w postaci:

$$\varepsilon_d(\mathbf{P}_d) = \sum_{i=1}^n \left(\left| V_{Ti(m)} - V_{Ti(s)}(\mathbf{P}_d) \right|^2 + \left| I_{fdi(m)} - I_{fdi(s)}(\mathbf{P}_d) \right|^2 \right), \quad (3)$$

gdzie: V_{Ti} , I_{fdi} – wartości napięcia twornika (indukującego się tylko w osi q) i prądu wzbudzenia w i -tych chwilach czasowych, \mathbf{P}_d – wektor poszukiwanych parametrów, n – liczba uwzględnianych punktów pomiarowych. Indeks m oznaczono wartości zmierzone, a indeksem s wartości symulowane (aprosymujące).



Rys. 3. Porównanie przebiegów napięcia stojana (a) i prądu wzbudzenia (b) zmierzonych i obliczonych dla modeli: GENROU, RL (3,3) i (2,2) przy skokowej zmianie o -5% napięcia zadanego regulatora napięcia

Fig. 3. Comparison of waveforms of the stator voltage (a) and exciting current (b) measured and calculated for the models: GENROU, RL (3,3) and (2,2) at a step change of the regulator reference voltage by -5%

Obliczenia parametrów analizowanych modeli matematycznych generatora w osi d oparto na zmierzonych przebiegach dynamicznych napięcia wzbudzenia (sygnał wej-

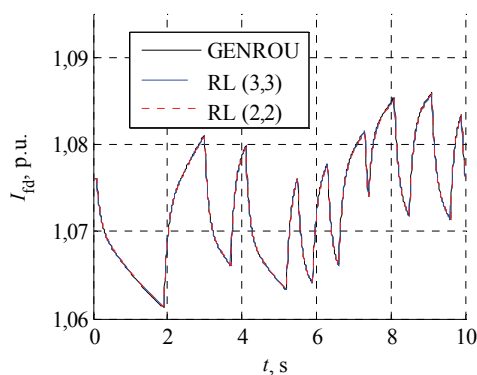
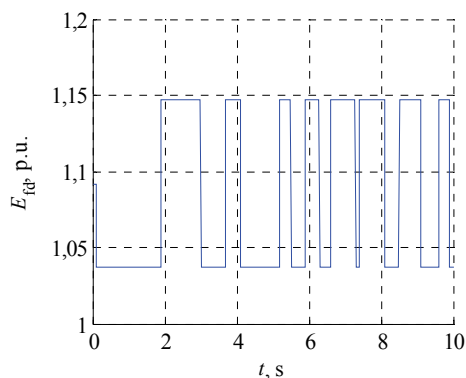
ściowy generatora) oraz napięcia stojana i prądu wzbudzenia (sygnały wyjściowe) przy skokowej zmianie o -5% napięcia zadanego regulatora napięcia w bloku wytwórczym nr 5 w Elektrowni Rybnik. W analizowanym zespole wytwórczym jest zainstalowany turbogenerator typu TWW-200-2A (o danych znamionowych: $S_N = 235 \text{ MV}\cdot\text{A}$, $V_{TN} = 15,75 \text{ kV}$, $\cos\varphi_N = 0,85$), napędzany turbiną parową. Generator ten wyposażony jest w elektromaszynowy układ wzbudzenia. Na rys. 3 przedstawiono przebiegi napięcia na zaciskach generatora i prądu wzbudzenia, zmierzone i obliczone dla wynikowych wartości parametrów dla modeli: GENROU, RL (3,3) i (2,2).

Tabela 1. Obliczone parametry modeli RL (3,3), (2,2) i GENROU oraz parametry XT wyznaczone na podstawie parametrów RL modelu (2,2)

Table 1. Calculated parameters of RL (3,3), (2,2) and GENROU models and parameters XT determined on a basis of the RL model (2,2) parameters

Par.	RL33	RL22	Par.	RL33	RL22	Par.	RL33	RL22
R	0,0018	0,0018	$L_{\sigma D1}^*$	0,0002	0,0806	R_{D2}^*	0,0044	
L_{σ}	0,1500	0,1500	R_{D1}^*	0,0263	0,0038	$L_{\sigma f}^*$	0,0648	0,0705
L_{ad}	1,8019	1,8036	$L_{\sigma D2}^*$	0,1117		R_f^*	0,0010	0,0010
S_{10}	0,0921	0,0913	S_{12}	0,4673	0,4578			
Par.	GENROU	RL22	Par.	GENROU	RL22	Par.	GENROU	RL22
R	0,0018	0,0018	X_d''	0,1488	0,1868	S_{10}	0,0921	0,0913
X_d	1,9063	1,9536	T_{do}'	5,9970	5,8571	S_{12}	0,4631	0,4578
X_d'	0,1919	0,2933	T_{do}''	0,1217	0,1229			

Parametry R i L_{σ} oszacowano na podstawie obliczeń w stanie ustalonym (m. in. obliczeń poleowych metodą elementów skończonych)



Rys. 4. Porównanie przebiegów prądu wzbudzenia obliczonych na podstawie modeli GENROU, RL (3,3) i (2,2) po zakłóceniu napięcia wzbudzenia sygnałem PRBS (a) na biegu jałowym generatora
Fig. 4. Comparison of the exciting current waveforms calculated on a basis of GENROU, RL (3,3) and (2,2) models after disturbing the field voltage with a PRBS signal (a) at no-load generator

W celu weryfikacji wyników estymacji, przeprowadzono dodatkowe symulacje zadając na wejście analizowanych modeli generatorów synchronicznych (o wyznaczonych poprzednio parametrach), inny przebieg napięcia wzbudzenia, zakłóconego sygnałem pseudolosowym PRBS [1, 6] – rys. 4a. Założono podobnie jak poprzednio, że generator pracuje na biegu jałowym. Na rys. 4b przedstawiono przebiegi wyjściowe, prądu wzbudzenia dla poszczególnych modeli generatora.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że:

- Mierząc odpowiednie przebiegi dynamiczne w elektrowni można estymować parametry modeli typów XT i RL generatorów synchronicznych (m.in. w osi d). Przy estymacji trzeba uwzględniać nieliniowość magnesowania rdzeni magnetycznych.
- Modele te, przy prawidłowo obliczonych parametrach, dają podobne (co do kształtu i wartości) odpowiedzi dla różnych zakłóceń stanu ustalonego.
- Biorąc pod uwagę wyniki estymacji parametrów modelu RL (2,2) generatora można wyznaczyć (na podstawie wzorów algebraicznych) z dobrą dokładnością parametry modelu GENROU typu XT (i odwrotnie).

Praca jest częściowo finansowana przez Polskie Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego ze środków budżetowych na naukę w latach 2009–2012 jako projekt badawczy N N511 352137.

LITERATURA

- [1] BOBON A., PASZEK S., PRUSKI P., *Wyznaczanie parametrów elektromagnetycznych generatora synchronicznego w środowisku Matlab/Simulink*, XV Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, Gdańsk–Jurata, 8–10.06.2011, Tom I, 221–228.
- [2] DE MELLO F.P., HANNETT L.H., *Determination of Synchronous Machine electrical characteristics by test*, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 102, No. 12, Dec. 1983, 3810–3815.
- [3] GHOMI M., SAREM Y.N., *Review of Synchronous Generator Parameters Estimation and Model Identification*, 42nd International Universities Power Engineering Conference, UPEC, 4–6 Sept. 2007, 228–235.
- [4] KUNDUR P., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [5] PASZEK S., BOBON A., KUDLA J., BIALEK J., ABI-SAMRA N., *Parameter estimation of the mathematical model of a generator, excitation system and turbine*, Przegląd Elektrotechniczny, 81 (2005), 11, 7–12.
- [6] PASZEK S., *Wybrane metody oceny i poprawy stabilności katowej systemu elektroenergetycznego*, Monografia, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.

COMPARISON OF PARAMETER ESTIMATION RESULTS OF
DIFFERENT SYNCHRONOUS GENERATOR MODELS
OBTAINED FROM MEASUREMENT TESTS

The paper presents comparison of estimation results of chosen parameters (in d axis) of the following synchronous generator models: GENROU (model of type XT) as well as (3.3) and (2.2) (models of type RL) using the disturbance waveforms obtained at a step change of the reference voltage of the synchronous generator voltage regulator working under no-load conditions in Power Plant Rybnik. The generator parameter estimation was performed in an iteration process in such a way that the dynamic waveforms calculated on a basis of those parameters approximated the measured waveforms with a given accuracy. The estimation process can be brought to minimisation of the objective function which is influenced by the differences between the measured and approximated waveforms at particular time instants.