

Stefan PASZEK*, Adrian NOCOŃ*, Piotr PRUSKI*

WPLYW WARTOŚCI WYBRANYCH PARAMETRÓW MODELI ELEMENTÓW SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO NA PRZEBIEGI W NIESYMETRYCZNYCH STANACH PRACY

W artykule przedstawiono model matematyczny systemu elektroenergetycznego (SEE) składającego się z zespołu wytwórczego (z generatorem synchronicznym) połączonego linią energetyczną (przesyłową) wysokiego napięcia z siecią sztywną. Równania stanu i równania wyjścia generatora przedstawiono w układzie współrzędnych $d, q, 0$ oraz przy użyciu wielkości fazowych stojana generatora, sieci sztywnej i linii energetycznej, szczególnie przydatnych w analizie stanów niesymetrycznych. Opracowano zwarty opis matematyczny całego SEE i obliczono przebiegi odpowiednich wielkości w stanach nieustalonych i ustalonych dla wybranych obciążeń niesymetrycznych. W obliczeniach przedstawionych w artykule uwzględniono zakłócenie stanu ustalonego w postaci zwarcia dwufazowego w linii przesyłowej. Badano oddziaływania układu wzbudzenia i układu regulacji prędkości kątowej generatora oraz wpływ wybranych parametrów modelu generatora na przebiegi.

SŁOWA KLUCZOWE: system elektroenergetyczny, niesymetria obciążenia, zwarcie dwufazowe, asymetria podprzejściowa generatora.

1. WSTĘP

Podstawowe analizy pracy SEE w stanach nieustalonych przeprowadza się zwykle przy założeniu występowania symetrycznych zakłóceń stanu ustalonego. Jednakże w rzeczywistości w czasie pracy systemu występują przede wszystkim zakłócenia niesymetryczne. W związku z tym zasadne jest prowadzenie badań mających na celu obliczenie przebiegów wybranych wielkości przy różnych niesymetriach występujących w SEE.

Niesymetryczny stan pracy SEE jest związany z niesymetrycznymi stanami pracy generatorów synchronicznych pracujących w SEE oraz wywołuje szereg niekorzystnych zjawisk: dodatkowe nagrzewanie się powierzchni wirnika, drgania mechaniczne elementów maszyn i powoduje konieczność ograniczeń czasu trwania stanów niesymetrycznych [7].

* Politechnika Śląska

Równania opisujące niesymetryczne procesy zwarciove maszyny synchronicznej są równaniami różniczkowymi o periodycznie zmiennych współczynnikach, co utrudnia ich rozwiązanie [2]. W przypadku samotnej pracy maszyny synchronicznej (bez SEE) możliwe jest znalezienie rozwiązania metodami przybliżonymi [1, 3, 4, 5]. Przebiegi prądów i napięć zawierają wtedy nieskończone widmo harmoniczných. Jedynie w przypadku symetrii podprzejściowych rozwiązanie nie zawiera nieskończonego szeregu harmoniczných, co znacznie upraszcza analizę układu [1, 2, 4]. Analiza pracy SEE z wszystkimi jego elementami (m.in. z generatorami synchronicznymi) jest skomplikowana i możliwa właściwie tylko metodami numerycznymi.

W artykule przedstawiono model matematyczny systemu elektroenergetycznego składającego się z zespołu wytwórczego (z generatorem synchronicznym) połączonego linią przesyłową z siecią sztywną. Równania stanu i równania wyjścia generatora przedstawiono w układzie współrzędnych $d, q, 0$ oraz przy użyciu wielkości fazowych stojana generatora i linii energetycznej (szczególnie przydatnych w analizie stanów niesymetrycznych). Uzyskano zwarty opis matematyczny całego SEE i obliczono przebiegi odpowiednich wielkości w stanach nieustalonych i ustalonych dla wybranych niesymetrycznych obciążeń.

2. MODEL MATEMATYCZNY SEE

W ramach badań opracowano model matematyczny SEE w środowisku programu Matlab-Simulink (rys. 1), przy czym do obliczeń wykorzystano zmodyfikowany program PARZW [6]). W pierwszej kolejności opracowano ogólny model zespołu wytwórczego. W modelu tym, korzystając z zastosowanych bloków typu *Configurable Subsystem*, można wygodnie konfigurować konkretny model jednostki wytwórczej wybierając model: generatora (m.in. jest do dyspozycji model GENROU z uwzględnieniem ewentualnej asymetrii podprzejściowej przy $X_d'' \neq X_q''$), układu wzbudzenia, turbiny, stabilizatora systemowego.

2.1. Model generatora synchronicznego

W badaniach zastosowano model GENROU, w którym występują po dwa zastępcze obwody wirnika w osiach d i q . Jest to typowy model generatora synchronicznego typu XT, który jest często stosowany przy analizach pracy SEE [6]. W modelu tym napięcie transformacji stojana jest pomijane, jako małe w porównaniu do napięcia rotacji generatora.

Równania różniczkowe stanu i równania algebraiczne w wielkościach względnych w osi d są następujące [5, 6]:

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

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} (E_{fd} - X_{ad} I_{fd}), \quad (1b)$$

$$\frac{d\Psi_{D1}}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} (E'_q - \Psi_{D1} - I_d (X'_d - X_\sigma)), \quad (1c)$$

$$\Psi''_d = E'_q \frac{X''_d - X_\sigma}{X'_d - X_\sigma} + \Psi_{D1} \frac{X'_d - X''_d}{X'_d - X_\sigma}, \quad (1d)$$

$$X_{ad} I_{fd} = E'_q + \Delta(X_{ad} I_{fd}) \frac{\Psi''_d}{|\Psi''_d|} + (X_d - X'_d) \left(I_d + T'_{do} \frac{d\Psi_{D1}}{dt} \frac{X'_d - X''_d}{(X'_d - X_\sigma)^2} \right), \quad (1e)$$

równania w osi q:

$$V_q = \Psi_d - I_q R_a = \Psi''_d - X''_d I_d - I_q R_a, \quad (2a)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{1}{T'_{qo}} (-I_{Q1} X_{aq}), \quad (2b)$$

$$\frac{d\Psi_{Q1}}{dt} = -\frac{1}{T'_{qo}} (-E'_d + \Psi_{Q1} + I_q (X'_q - X_\sigma)), \quad (2c)$$

$$\Psi''_q = E'_d \frac{X''_q - X_\sigma}{X'_q - X_\sigma} + \Psi_{Q1} \frac{X'_q - X''_q}{X'_q - X_\sigma}, \quad (2d)$$

$$X_{aq} I_{Q1} = E'_d + \Delta(X_{ad} I_{fd}) \frac{\Psi''_q}{|\Psi''_q|} \frac{X_{aq}}{X_{ad}} + (X_q - X'_q) \left(I_q + T'_{qo} \frac{d\Psi_{Q1}}{dt} \frac{X'_q - X''_q}{(X'_q - X_\sigma)^2} \right), \quad (2e)$$

równania różniczkowe ruchu:

$$T_m \frac{d(\Delta\omega)}{dt} = \frac{P_m - D\Delta\omega}{\omega} - M_e, \quad (3a)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_N \cdot \Delta\omega, \quad (3b)$$

$$M_e = \Psi''_d I_q - \Psi''_q I_d + I_d I_q (X''_q - X''_d). \quad (3c)$$

W równaniach (1), (2) i (3) wprowadzono następujące oznaczenia: $V_d, V_q, I_d, I_q, \Psi_d, \Psi_q$ – napięcia, prądy i strumienie skojarzone w osiach d i q, $\underline{\Psi}'' = \Psi''_q - j\Psi''_d$ – fazy podprzejściowego strumienia skojarzonego, $\Psi_{D1}, \Psi_{Q1}, I_{Q1}$ – strumienie skojarzone i prąd w pierwszym obwodzie tłumiącym w osiach d i q, E'_d, E'_q – napięcie za reaktancją przejściową, E_{fd}, I_{fd} – napięcie i prąd wzbudzenia, R_a, X_σ – rezystancja i reaktancja rozproszenia stojana, $X_d, X_q, X_{ad}, X_{aq}, X'_d, X'_q, X''_d, X''_q$ – reaktancje: synchroniczne, magnesujące, przejściowe i

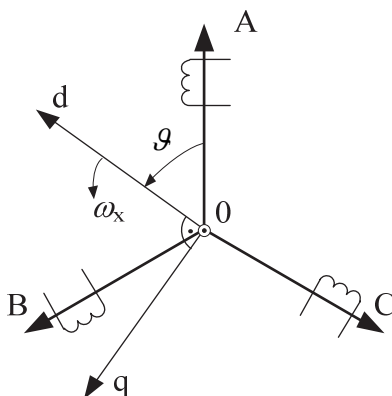
2.2. Równania wiążące wielkości stojana generatora, linii przesyłowej i sieci sztywnej

Przy analizie niesymetrycznych stanów SEE równania prądów i napięć stojana, linii przesyłowej i sieci sztywnej wygodnie jest zapisać przy użyciu wielkości fazowych. Wykorzystuje się wtedy równania transformacji Parka, wiążące ze sobą wielkości w układach współrzędnych $d, q, 0$ oraz A, B, C [6, 7]:

$$\begin{bmatrix} w_A \\ w_B \\ w_C \end{bmatrix} = \mathbf{C}^{-1} \begin{bmatrix} W_d \\ W_q \\ W_0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} W_d \\ W_q \\ W_0 \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} w_A \\ w_B \\ w_C \end{bmatrix}, \quad (5a)$$

$$\text{gdzie } \mathbf{C} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \cos\left(\vartheta + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \vartheta & -\sin\left(\vartheta + \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}^{-1} = \mathbf{C}^T, \quad (5b)$$

przy czym kąt ϑ zawiera się pomiędzy osią fazy A uzwojenia trójfazowego, a osią d , zgodnie z rys. 2.



Rys. 2. Położenie układów współrzędnych fazowego (naturalnego) A, B, C i dwuosowego d, q (oś zerowa jest prostopadła do osi d i q)

W ogólnym przypadku prędkość wirowania nowego układu współrzędnych ω_x może zostać dowolnie przyjęta. Wówczas kąt ϑ w macierzy transformacji (5) (przy założeniu zerowego kąta ϑ w chwili początku obserwacji t_0) wynosi:

$$\mathcal{G}(t) = \int_{t_0}^t \omega_x(t) \cdot dt. \quad (6)$$

W dalszej części artykułu założono, że ω_x równa jest wartości prędkości wiorowania pola magnetycznego (tj. prędkości synchronicznej).

W badaniach przeanalizowano różne niesymetrie występujące w linii przesyłowej. W związku z założonym pominięciem napięć transformacji, w równaniach stojana generatora i linii przesyłowej określono odpowiednie algebraiczne związki pomiędzy prądami i napięciami. Przykładowo dla przypadku zwarcia dwufazowego w linii przesyłowej (rys. 3) równania wiążące odpowiednie wielkości prądów i napięć są następujące:

$$i_A(t + \Delta t_A) = \frac{v_A(t) + v_r(t) - v_{zw}(t)}{|Z_{A1}|}, \quad \Delta t_A = \frac{\varphi_{A1}}{2\pi f}, \quad (7a)$$

$$i_B(t + \Delta t_B) = \frac{v_B(t) + v_r(t) - v_{zw}(t)}{|Z_{B1}|}, \quad \Delta t_B = \frac{\varphi_{B1}}{2\pi f}, \quad (7b)$$

$$i_C(t + \Delta t_C) = \frac{v_C(t) + v_r(t) - v_{zw}(t)}{|Z_C|}, \quad \Delta t_C = \frac{\varphi_C}{2\pi f}, \quad (7c)$$

$$i_{AS}(t + \Delta t_{AS}) = \frac{v_{zw}(t) - v_{AS}(t)}{|Z_{A2}|}, \quad \Delta t_{AS} = \frac{\varphi_{A2}}{2\pi f}, \quad (7d)$$

$$i_{BS}(t + \Delta t_{BS}) = \frac{v_{zw}(t) - v_{BS}(t)}{|Z_{B2}|}, \quad \Delta t_{BS} = \frac{\varphi_{B2}}{2\pi f}, \quad (7e)$$

$$i_A(t) + i_B(t) + i_C(t) = 0, \quad (7f)$$

$$i_A(t) + i_B(t) = i_{AS}(t) + i_{BS}(t), \quad (7g)$$

gdzie: i_j, i_{Sj}, v_j, v_{Sj} – prądy i napięcia fazowe generatora i sieci sztywnej ($j = A, B, C$), v_{zw} i v_r – napięcia: w miejscu zwarcia i różnicowe punktów gwiazdowych sieci sztywnej i generatora, $Z_{A1}, Z_{A2}, Z_{B1}, Z_{B2}, Z_C$, $\varphi_{A1}, \varphi_{A2}, \varphi_{B1}, \varphi_{B2}, \varphi_C$ – impedancje zespolone i ich kąty fazowe w linii przesyłowej, $f = 50$ Hz.

Napięcia fazowe sieci sztywnej wyznaczono przy wykorzystaniu zależności (5a) oraz równań na składowe d, q napięcia sieci:

$$V_{ds} = V_{s0} \sin(\delta), \quad V_{qs} = V_{s0} \cos(\delta), \quad (8)$$

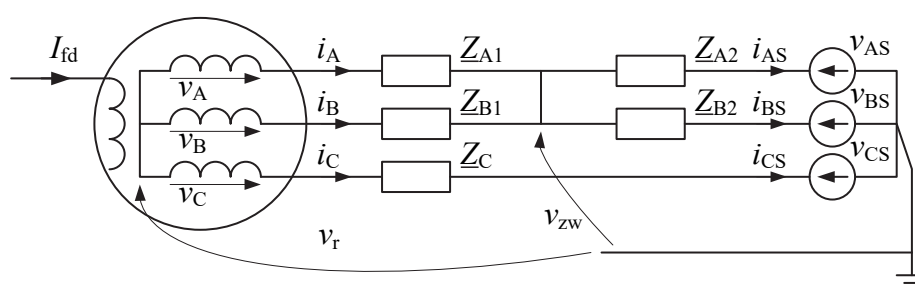
gdzie: $V_{s0} = |\underline{V}_0 - \underline{Z}_S \underline{I}_0|$, $\underline{V}_0 = V_{q0} - jV_{d0}$, $\underline{I}_0 = I_{q0} - jI_{d0}$, $\underline{Z}_S = R_S + jX_S$.

Korzystając z napięć osiowych stojana generatora (sygnały wyjściowe modelu generatora i modelu zespołu wytwórczego) można wyznaczyć wielkości fazowe tych wielkości. W związku z powyższym biorąc pod uwagę zależności (8) z układu równań (7) można obliczyć 7 wielkości: 5 prądów fazowych i napięcia

v_{zw} i v_r w kolejnych chwilach czasu. Jest to realizowane w opracowanym modelu SEE.

Mając do dyspozycji prądy fazowe generatora i korzystając z zależności (5), określono prądy osiowe generatora, które stanowią sygnały wejściowe modelu generatora i modelu zespołu wytwórczego.

Tak określony model SEE jest pełny i można przeprowadzać obliczenia symulacyjne.



Rys. 3. Schemat analizowanego SEE przy zwarciu dwufazowym

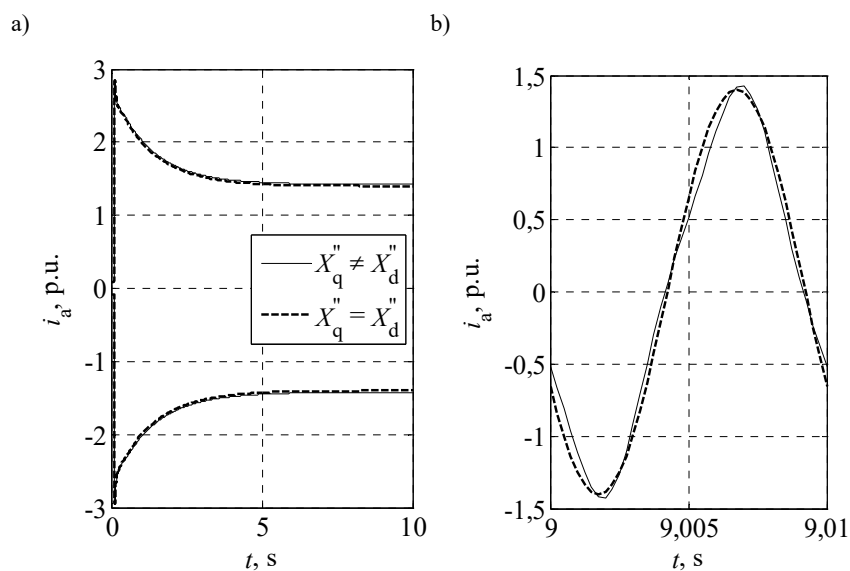
3. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA

Przedstawione w artykule wyniki dotyczą dwóch grup (przypadków) obliczeń symulacyjnych.

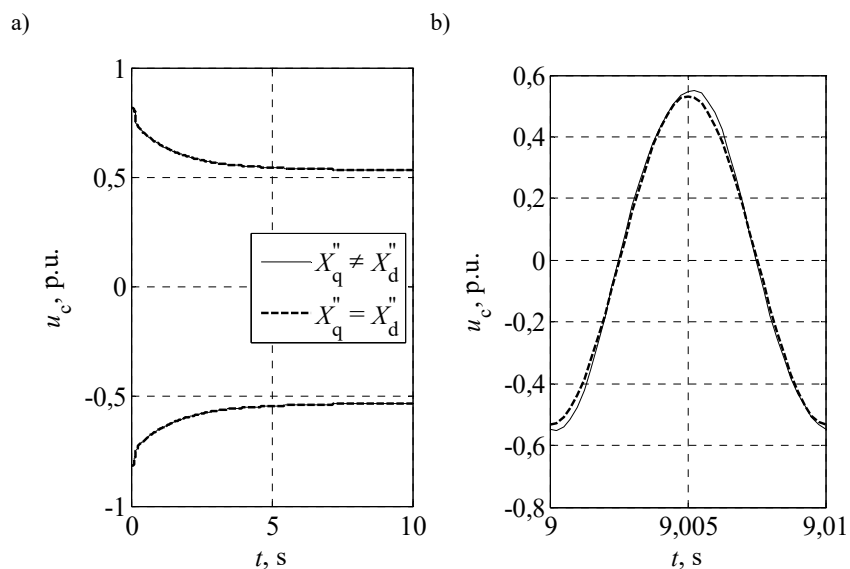
W pierwszym przypadku pominięto oddziaływanie układu wzbudzenia (wraz ze stabilizatorem systemowym) i turbiny. W konsekwencji przyjęto stałość napięcia wzbudzenia generatora i mocy mechanicznej turbiny. Poprzez odpowiedni dobór parametrów modelu wyeliminowano praktycznie równanie ruchu zespołu wytwórczego, przyjmując stałość prędkości kątovej generatora. Założono ponadto niewielkie obciążenie generatora mocą czynną i bierną oraz liniowość charakterystyki magnesowania maszyny. Zamodelowano długotrwałe dwufazowe zwarcie w linii przesyłowej, umiejscowione blisko zacisków generatora. Osiągnięto praktycznie stan ustalony w układzie. Rozpatrzono symetrię i asymetrię podprzejściową generatora. Na rys. 4-6 przedstawiono przebiegi prądu w zwartej fazie, napięcia generatora na fazie, gdzie nie było zwarcia, i prądu wzbudzenia generatora. W tabeli 1 przedstawiono rozkład amplitud harmoniczných tych wielkości w stanie ustalonym. W nawiasach podano procentowe wartości wyższych harmoniczných w odniesieniu do pierwszej harmonicznej dla wielkości stojana i do składowej stałej dla prądu wzbudzenia generatora.

W drugim przypadku obliczeń modelowano przemijające zwarcia (o czasie trwania $t_z = 0,15$ s) dla układu przy znamionowym obciążeniu generatora, uwzględnieniu równania ruchu, przy oddziaływaniu i braku oddziaływania układu wzbudzenia i turbiny (uwzględnienie braku oddziaływania elementów SEE można zrealizować poprzez wyzerowanie odpowiednich współczynników wzmocnienia

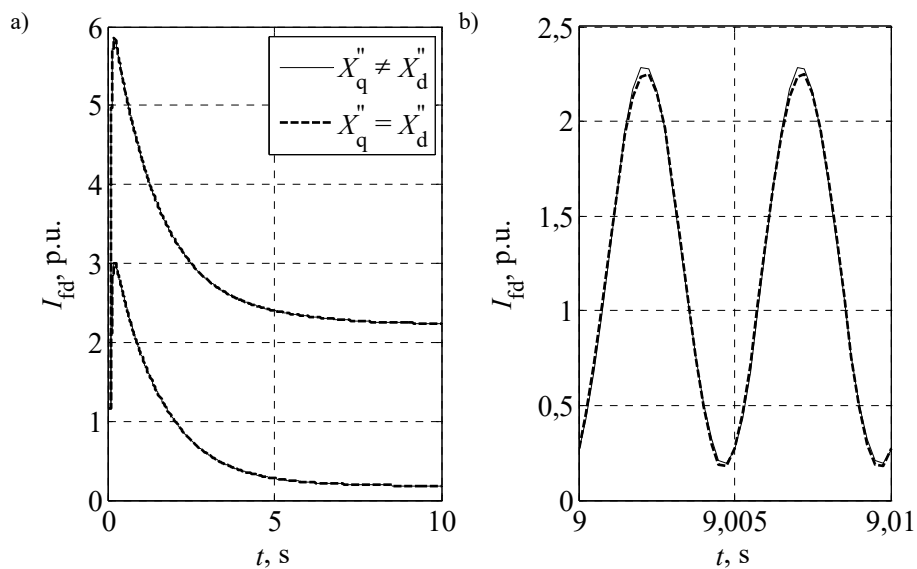
modeli tych układów) oraz przy uwzględnieniu symetrii i asymetrii podprzejściowej generatora. Odpowiednie przebiegi przedstawiono na rys. 79.



Rys. 4. Przebieg prądu w fazie A przy zwarciu długotrwałym (a - obwiednia, b - powiększenie jednego okresu w stanie ustalonym)



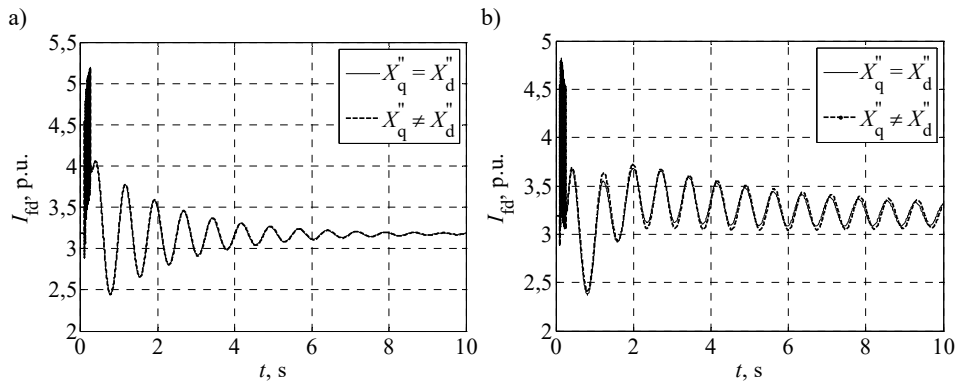
Rys. 5. Przebieg napięcia w fazie C przy zwarciu długotrwałym (a - obwiednia, b - powiększenie jednego okresu w stanie ustalonym)



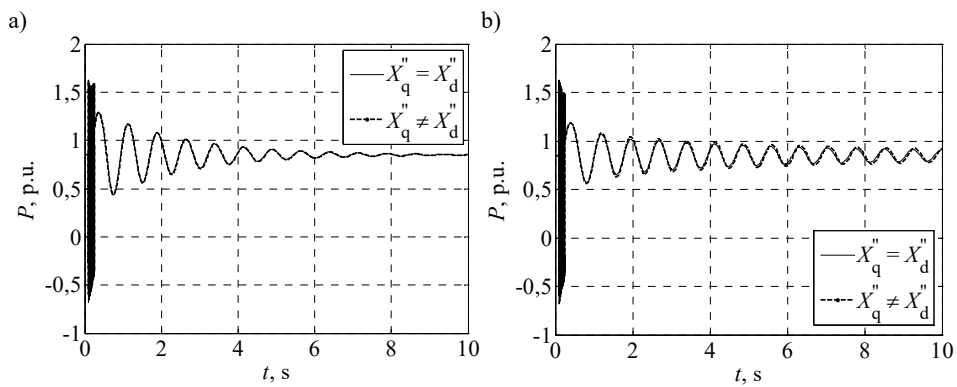
Rys. 6. Przebieg prądu wzbudzenia przy zwarciu długotrwałym
(a - obwiednia, b - powiększenie jednego okresu w stanie ustalonym)

Tabela 1. Amplitudy harmonicznych analizowanych wielkości w stanie ustalonym.

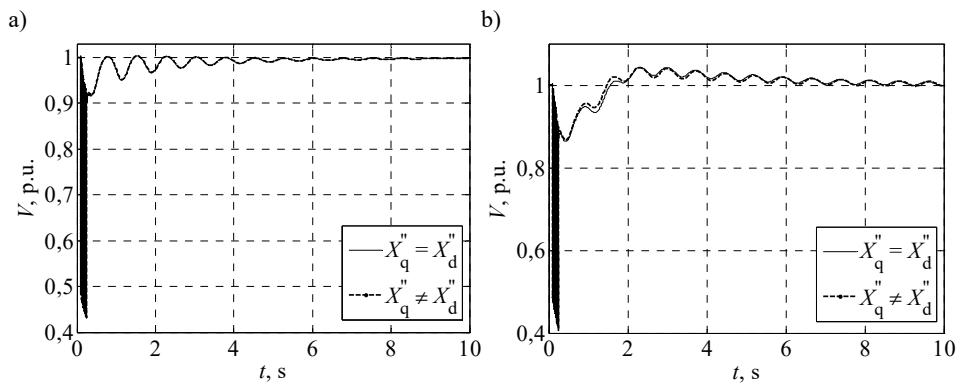
Harmoniczna	Asymetria podprzejsciowa			Symetria podprzejsciowa		
	i_a , p.u.	u_c , p.u.	I_{fd} , p.u.	i_a , p.u.	u_c , p.u.	I_{fd} , p.u.
0	0	0	1,2054	0	0	1,2042
1	1,3162	0,5572	0	1,4040	0,5328	0
2	0	0	1,0504 (87,1%)	0	0	1,0403 (101,6%)
3	0,1198 (9,1%)	0,0192 (3,45%)	0	$8,74 \cdot 10^{-3}$ (0,62%)	$1,31 \cdot 10^{-3}$ (0,25%)	0
4	0	0	0,0355 (2,95%)	0	0	$2,56 \cdot 10^{-3}$ (0,21%)
5	$4,06 \cdot 10^{-3}$ (0,312%)	$6,47 \cdot 10^{-4}$ (0,12%)	0	0	0	0



Rys. 7. Przebiegi prądu wzbudzenia generatora przy zwarcu przemijającym oraz braku oddziaływania (a) i oddziaływaniu (b) układu wzbudzenia i turbiny



Rys. 8. Przebiegi mocy chwilowej generatora przy zwarcu przemijającym oraz braku oddziaływania (a) i oddziaływaniu (b) układu wzbudzenia i turbiny



Rys. 9. Przebiegi napięcia stojana generatora przy zwarcu przemijającym oraz braku oddziaływania (a) i oddziaływaniu (b) układu wzbudzenia i turbiny

4. WNIOSKI Z OBLICZEŃ

Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że:

Przy asymetrii podprzejęciowej generatora synchronicznego podczas długotrwałego zwarcia dwufazowego w linii przesyłowej (umiejscowionym blisko generatora), mimo liniowego modelu układu, w przebiegach prądu zwarcia i napięcia na niezwartej fazie stojana, oprócz podstawowej harmonicznej, występują harmoniczne nieparzyste o znaczących amplitudach (stosunek trzeciej i pierwszej harmonicznej dla prądu jest równy około 9%, a dla napięcia około 3,5%). W prądzie wzbudzenia generatora w stanie ustalonym występują: składowa stała, druga harmoniczna i wyższe harmoniczne parzyste.

Przy symetrii podprzejęciowej generatora w stanie ustalonym podczas zwarcia dwufazowego występują praktycznie tylko następujące harmoniczne: pierwsza harmoniczna w prądzie zwarcia i w napięciu na niezwartej fazie stojana oraz składowa stała i druga harmoniczna prądu wzbudzenia.

W przypadku krótkotrwałych zwarć asymetria podprzejęciowa generatora ma niewielkie znaczenie. Przy uwzględnieniu oddziaływania układu wzbudzenia i turbiny można zaobserwować niewielki wpływ asymetrii podprzejęciowej na analizowane przebiegi (rys. 7–9).

Oddziaływanie układu wzbudzenia niekorzystnie wpływa na przebiegi mocy chwilowej i prędkości kątowej generatora przy analizowanym zwarcu dwufazowym. Wydaje się konieczne wprowadzenie do układu stabilizatora systemowego o odpowiednio dobranych parametrach. Wymaga to jednak dalszych, pogłębionych analiz.

Konieczne jest przeprowadzenie kolejnych badań dotyczących zwarć i niesymetrii dla różnych modeli elementów SEE, w szczególności generatora synchronicznego, układu wzbudzenia i stabilizatora systemowego oraz turbiny z jej układem regulacji.

LITERATURA

- [1] Berhausen S., Boboń A., Determination of high power synchronous generator subtransient reactances based on the waveforms for steady state two-phase short-circuit, *Appl. Math. Computation*, Elsevier, 2018 vol. 319, pp. 538-550.
- [2] Chassande J. P., Pillet E., Poloujadoff M., Pierrat L., Transient low frequency unsymmetrical operation of synchronous machines. *IEEE-PES*, February 1980, Paper 80 208-9.
- [3] Ching Y. K., Adkins B., Transient Theory of Synchronous Generators under Unbalanced Conditions, *Proceedings of the IEE*, Part IV, 7 (101), 1954, pp. 166-182.
- [4] Concordia Ch., *Synchronous Machines. Theory and Performance*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1951.

- [5] Paszek S., Wybrane metody oceny i poprawy stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [6] Paszek S., Berhausen S., Boboń A., Majka Ł., Nocoń A., Pasko M., Pruski P., Kraszewski T., Pomiarowa estymacja parametrów dynamicznych generatorów synchronicznych i układów wzbudzenia pracujących w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
- [7] Paszek W., Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego. Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998.

**THE INFLUENCE OF VALUES OF SELECTED PARAMETERS OF POWER
SYSTEM ELEMENT MODELS ON THE WAVEFORMS UNDER
ASYMMETRICAL OPERATING CONDITIONS**

In the paper, there is presented a mathematical model of a power system (PS) consisting of a generating unit (with a synchronous generator) connected by a high voltage power (transmission) line to a bus system. State and output equations of the generator are written in $d, q, 0$ coordinate system and with use of phase quantities (especially useful in the analysis of asymmetrical states) of the generator stator, bus system and power line. There was developed a compact mathematical description of the whole PS and there were calculated the waveforms of appropriate quantities in steady and transient states for selected asymmetrical loads. The calculations presented in the paper take into account the disturbance of the steady state in the form of a two-phase short-circuit in the transmission line. The influence of the excitation system and the governor of the generator as well as the effect of selected parameters of the generator model on the waveforms were investigated.

(Received: 23.01.2018, revised: 03.03.2018)