

Piotr PRUSKI*, Stefan PASZEK*

PORÓWNANIE PRZEBIEGÓW W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM W NIESYMETRYCZNYCH STANACH PRACY PRZY UWZGLĘDNIENIU RÓŻNYCH MODELI GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH

W artykule porównano przebiegi wielkości wyjściowych różnych modeli matematycznych generatora synchronicznego pracującego w systemie elektroenergetycznym (SEE). Założono, że SEE składa się z zespołu wytwórczego (w skład którego wchodzi m.in. generator synchroniczny) połączonego linią przesyłową wysokiego napięcia z siecią sztywną. W przedstawionych wynikach obliczeń przyjęto zakłócenia stanu ustalonego w postaci zwarć symetrycznych i niesymetrycznych w wybranym miejscu linii przesyłowej. W modelu generatora uwzględniono m.in. asymetrię podprzejściową, która podczas zwarć niesymetrycznych powoduje występowanie wyższych harmonicznych w przebiegach prądów i napięć stojana oraz prądu wzbudzenia (także przy braku uwzględniania zjawiska nasycenia rdzeni magnetycznych generatora). Badano modele obwodowe generatora synchronicznego typu XT oraz RL przy przyjęciu różnych wielkości wejściowych i wyjściowych układu.

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

1. WSTĘP

Dużą część awarii występujących w systemie elektroenergetycznym (SEE) stanowią zwarcia. Najczęściej są to zwarcia niesymetryczne, a udział zwarć symetrycznych w ogólnej liczbie zwarć wynosi zaledwie kilka procent. Ponad połowa zwarć w liniach napowietrznych wysokich napięć to zwarcia przemijające [1]. Niesymetryczne stany pracy SEE powodują wystąpienie wielu niekorzystnych zjawisk, m.in. w generatorach synchronicznych. Powoduje to konieczność ograniczenia czasu trwania takich stanów pracy [2].

Z powodu trudności w modelowaniu niesymetrycznych stanów pracy, w badaniach symulacyjnych analizuje się przede wszystkim zwarcia symetryczne. Większość specjalistycznych programów do analizy stanów przejściowych SEE umożliwia symulację jedynie symetrycznych stanów pracy. Dlatego zasadne jest

* Politechnika Śląska

prowadzenie badań mających na celu symulację przebiegów zakłóceńowych wybranych wielkości przy różnych niesymetriach występujących w SEE [2, 3, 4]. Można w tym celu wykorzystać powszechnie stosowane modele elementów zespołu wytwórczego, jednak należy wprowadzić w nich pewne modyfikacje.

Analiza niesymetrycznych stanów pracy SEE, w tym zwarcie, może pomóc np. w lepszym doborze nastaw zabezpieczeń elektroenergetycznych [5]. Wartości i przebiegi różnych wielkości SEE mogą się znacznie różnić w zależności od rodzaju występującej niesymetrii. Jedynie skutecznie działające zabezpieczenia mogą zmniejszyć negatywne skutki zakłóceń, co pozwala na zmniejszenie rozmiaru i skutków awarii występujących w SEE.

Celem artykułu jest porównanie przebiegów zakłóceńowych wybranych wielkości przy zwarcu 2-fazowym z ziemią oraz przy zwarcu 3-fazowym w jednomaszynowym SEE, składającym się z zespołu wytwórczego (z generatorem synchronicznym), linii przesyłowej wysokiego napięcia oraz sieci sztywnej. Wykorzystano modele generatorów synchronicznych: GENROU (typu XT) z wejściami prądowymi oraz RL (2,2) z wejściami prądowymi lub napięciowymi. W badaniach przedstawionych w artykule uwzględniono zjawisko asymetrii podprzejściowej generatora, pominięto natomiast zjawisko nasycenia jego rdzeni magnetycznych. Przyjęto, że generator pracuje z nieuziemiającym punktem neutralnym, w związku z czym w przebiegach odpowiednich wielkości nie występuje składowa zerowa.

2. MODEL MATEMATYCZNY SEE

W ramach badań opracowano model matematyczny SEE w środowisku programu Matlab-Simulink, składający się z wyodrębnionego modelu zespołu wytwórczego (w skład którego wchodzi m.in. model generatora synchronicznego określony w układzie współrzędnych d, q) połączonego linią przesyłową wysokiego napięcia z siecią sztywną. Do obliczeń wykorzystano zmodyfikowany program PARZW [6]). Uwzględniono w analizach następujące modele generatora synchronicznego: GENROU [6] z wejściami prądowymi z uwzględnieniem asymetrii podprzejściowej (gdy $X_d'' \neq X_q''$) oraz modele RL (2, 2) [6] z wejściami napięciowymi oraz z wejściami prądowymi.

2.1. Model generatora synchronicznego GENROU

W modelu GENROU 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 [7].

Równania różniczkowe stanu i równania algebraiczne w wielkościach względnych w osi d są następujące [6, 7, 8]:

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

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

$$\frac{d\Psi_{D1}}{dt} = \frac{1}{T_{do}''} (E_q' - \Psi_{D1} - I_d (X_d' - X_\sigma)), \quad (1c)$$

$$\Psi_d'' = E_q' \frac{X_d'' - X_\sigma}{X_d' - X_\sigma} + \Psi_{D1} \frac{X_d' - X_d''}{X_d' - X_\sigma}, \quad (1d)$$

$$X_{ad} I_{fd} = E_q' + \Delta(X_{ad} I_{fd}) \frac{\Psi_d''}{|\underline{\Psi}''|} + (X_d - X_d') \left(I_d + T_{do}'' \frac{d\Psi_{D1}}{dt} \frac{X_d' - X_d''}{(X_d' - X_\sigma)^2} \right), \quad (1e)$$

równania w osi q:

$$U_q = \Psi_d - I_q R_a = \Psi_d'' - X_d'' I_d - I_q R_a, \quad (2a)$$

$$\frac{dE_d'}{dt} = \frac{1}{T_{qo}'} (-I_{Q1} X_{aq}), \quad (2b)$$

$$\frac{d\Psi_{Q1}}{dt} = -\frac{1}{T_{qo}''} (-E_d' + \Psi_{Q1} + I_q (X_q' - X_\sigma)), \quad (2c)$$

$$\Psi_q'' = E_d' \frac{X_q'' - X_\sigma}{X_q' - X_\sigma} + \Psi_{Q1} \frac{X_q' - X_q''}{X_q' - X_\sigma}, \quad (2d)$$

$$X_{aq} I_{Q1} = E_d' + \Delta(X_{ad} I_{fd}) \frac{\Psi_q''}{|\underline{\Psi}''|} \frac{X_{aq}}{X_{ad}} + (X_q - X_q') \left(I_q + T_{qo}'' \frac{d\Psi_{Q1}}{dt} \frac{X_q' - X_q''}{(X_q' - X_\sigma)^2} \right), \quad (2e)$$

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) – (3) wprowadzono następujące oznaczenia: U_d , U_q , I_d , I_q , Ψ_d , Ψ_q – napięcia, prądy i strumienie skojarzone stojana w osiach d i q; $\underline{\Psi}'' = \Psi_q'' - j\Psi_d''$ – fazor podprzejsciowego strumienia skojarzonego; Ψ_{D1} , Ψ_{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 podprzejściowe; $T'_{d0}, T''_{d0}, T'_{q0}, T''_{q0}$ – stałe czasowe przejściowe i podprzejściowe przy otwartym uzwojeniu stojana; $T_m, D, P_m, M_e, \Delta\omega, \omega_N, \delta$ – mechaniczna stała czasowa, współczynnik tłumienia, moc mechaniczna turbiny, moment elektromagnetyczny, odchyłka prędkości kątowej, znamionowa prędkość kątowa, kąt mocy. Składnik $\Delta(X_{ad}I_{fd})$ odpowiada za efekt nasycenia obwodu magnetycznego maszyny [6, 8] i został pominięty w badaniach przedstawionych w niniejszym artykule.

2.2. Model generatora synchronicznego RL (2, 2)

W modelu RL (2, 2) występują po dwa zastępcze obwody wirnika w osiach d i q, które odpowiadają obwodom zastępczym modelu GENROU. W modelu tym uwzględniono napięcie transformacji stojana, a pominięto efekt nasycenia obwodu magnetycznego maszyny [6].

Równania różniczkowe stanu i równania algebraiczne w wielkościach względnych dla stojana są następujące:

$$\mathbf{U}_S = \frac{1}{\omega_N} \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_S + \mathbf{K}_S \boldsymbol{\Psi}_S + \mathbf{R}_S \mathbf{I}_S, \quad (4a)$$

$$\boldsymbol{\Psi}_S = \mathbf{L}_{SS} \mathbf{I}_S + \mathbf{L}_{SR} \mathbf{I}_R, \quad (4b)$$

$$\mathbf{U}_S^T = [U_d \quad U_q], \quad \mathbf{I}_S^T = [-I_d \quad -I_q], \quad \boldsymbol{\Psi}_S^T = [\Psi_d \quad \Psi_q], \quad (4c)$$

$$\mathbf{K}_S = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_S = \text{diag}\{R_a \quad R_a\}, \quad (4d)$$

$$\mathbf{L}_{SS} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_{SR} = \begin{bmatrix} L_{ad} & L_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{aq} & L_{aq} \end{bmatrix}, \quad (4e)$$

równania dla wirnika:

$$\mathbf{U}_R = \frac{1}{\omega_N} \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_R + \mathbf{R}_R \mathbf{I}_R, \quad \boldsymbol{\Psi}_R = \mathbf{L}_{RS} \mathbf{I}_S + \mathbf{L}_{RR} \mathbf{I}_R, \quad (5a)$$

$$\mathbf{U}_R^T = [E_{fd}^* \quad 0 \quad 0 \quad 0], \quad \mathbf{I}_R^T = [I_{fd}^* \quad I_{D1}^* \quad I_{Q1}^* \quad I_{Q2}^*], \quad (5b)$$

$$\boldsymbol{\Psi}_R^T = [\Psi_f^* \quad \Psi_{D1}^* \quad \Psi_{Q1}^* \quad \Psi_{Q2}^*], \quad \mathbf{R}_R^T = \text{diag}\{R_f^* \quad R_{D1}^* \quad R_{Q1}^* \quad R_{Q2}^*\} \quad (5c)$$

$$\mathbf{L}_{RR} = \begin{bmatrix} L_{ad} + L_{\sigma f}^{\bullet} & L_{ad} & 0 & 0 \\ L_{ad} & L_{ad} + L_{\sigma D1}^{\bullet} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{aq} + L_{\sigma Q1}^{\bullet} & L_{aq} \\ 0 & 0 & L_{aq} & L_{aq} + L_{\sigma Q2}^{\bullet} \end{bmatrix}, \mathbf{L}_{RS} = \mathbf{L}_{SR}^T, \quad (5d)$$

Równanie różniczkowe ruchu takie, jak w (3), z tym, że:

$$M_e = \Psi_d'' I_q - \Psi_q'' I_d. \quad (6)$$

W równaniach (4) – (6) wprowadzono następujące oznaczenia: $U_S, U_R, I_S, I_R, \Psi_S, \Psi_R$ – wektory napięć, prądów i strumieni skojarzonych w stojanie (S) i wirniku (R); ω – prędkość kątowna wirnika; $I_{D1}^{\bullet}, I_{Q1}^{\bullet}, I_{Q2}^{\bullet}, \Psi_{D1}^{\bullet}, \Psi_{Q1}^{\bullet}, \Psi_{Q2}^{\bullet}$ – prądy i strumienie skojarzone w zastępczych obwodach tłumiących wirnika w osiach d i q; Ψ_f^{\bullet} – strumień skojarzony obwodu wzbudzenia; $R_a, R_f^{\bullet}, R_{D1}^{\bullet}, R_{Q1}^{\bullet}, R_{Q2}^{\bullet}$ – rezystancje: uzwojenia stojana, uzwojenia wzbudzenia, obwodów tłumiących wirnika w osiach d i q; L_d, L_q – indukcyjności zastępcze obwodów stojana w osiach d i q; L_{ad}, L_{aq} – indukcyjności oddziaływania twornika (magnesujące); $L_{\sigma f}^{\bullet}$ – indukcyjność rozproszenia uzwojenia wzbudzenia; $L_{\sigma D1}^{\bullet}, L_{\sigma Q1}^{\bullet}, L_{\sigma Q2}^{\bullet}$ – indukcyjności rozproszenia obwodów tłumiących wirnika w osiach d i q; \bullet oznacza sprowadzenie wielkości na stronę stojana; pozostałe oznaczenia, jak dla modelu GENROU.

2.3. Wybór wielkości wejściowych i wyjściowych modelu generatora

Równania przedstawionych modeli generatora można przekształcić tak, aby wybrane składowe osiowe prądów lub napięć stojana były wielkościami wejściowymi modelu, a pozostałe wielkościami wyjściowymi. Uwzględniono dwa warianty modeli: z wejściami prądowymi (I_d oraz I_q są sygnałami wejściowymi, a U_d oraz U_q są sygnałami wyjściowymi) oraz z wejściami napięciowymi (wyższe sygnały wejściowe i wyjściowe zamieniono). W każdym z tych wariantów sygnałami wejściowymi są także E_{fd} oraz P_m , a sygnałami wyjściowymi m.in. napięcie zaciskowe U i moc chwilowa P generatora.

W przypadku modelu RL (2, 2) z wejściami prądowymi konieczne jest numeryczne obliczenie pochodnych strumieni skojarzonych stojana zgodnie zależnością (4a). Może to powodować powstawanie dodatkowych błędów numerycznych i wiąże się z mniejszą dokładnością wykonywanych obliczeń. Przy zastosowaniu modelu RL (2, 2) z wejściami napięciowymi tego typu problemy nie występują, ponieważ w tym przypadku po przekształceniu zależności (4) i (5) nie ma potrzeby wykonywania różniczkowania sygnałów wewnątrz modelu generatora.

Do równań generatora trzeba dopisać zależności linii przesyłowej i sieci sztywnej dla konkretnych przypadków niesymetrii obciążenia układu. W badaniach przedstawionych w niniejszym artykule pominięto napięcia transformacji w linii przesyłowej. Odpowiednie zależności przedstawiono w podrozdziale 2.4. Natomiast uwzględnienie napięć transformacji w modelu linii przesyłowej wymaga różniczkowania sygnałów w przypadku zastosowania modelu generatora z wejściami napięciowymi i wyjściami prądowymi.

Obliczenia pochodnej sygnałów można uniknąć w każdym z wymienionych przypadków, formułując równania całego modelu SEE w postaci normalnej osobno dla każdej konkretnej asymetrii obciążenia (w układzie współrzędnych fazowych lub $\alpha, \beta, 0$ [9]) co jest zadaniem trudnym i pracochłonnym. W tym przypadku nie można korzystać z wyodrębnionego modelu zespołu wytwórczego z generatorem synchronicznym.

Pośród wszystkich modeli generatora synchronicznego wykorzystanych w badaniach przedstawionych w artykule za najdokładniejszy można uznać model RL (2,2) z wejściami napięciowymi. Uwzględnia on napięcia transformacji w stanie i nie wymaga obliczania pochodnych sygnałów.

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

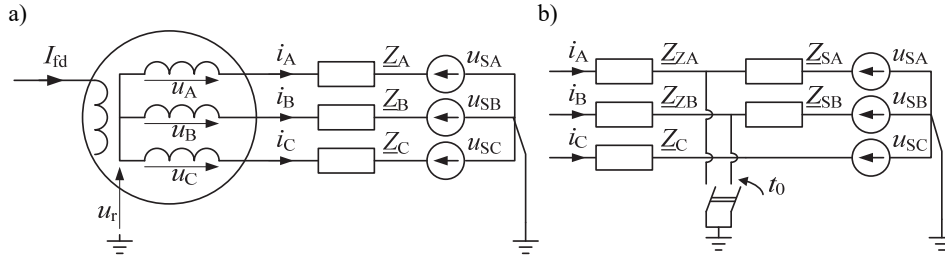
Przy analizie niesymetrycznych stanów SEE równania prądów i napięć stojana, linii przesyłowej i sieci sztywnej wygodnie jest zapisać przy użyciu wielkości fazowych. Wykorzystuje się wtedy równania transformacji Parka, wiążące ze sobą wielkości w układach współrzędnych $d, q, 0$ oraz A, B, C [6, 7, 9].

W badaniach przeanalizowano różne niesymetrie występujące w linii przesyłowej. Na rysunku 1 przedstawiono schemat analizowanego SEE przy zwarcia z ziemią. Na jego podstawie opracowano model linii elektroenergetycznej i sieci sztywnej dla tego rodzaju zwarć. Oznaczenia: i_j – prądy stojana generatora, u_j – napięcia stojana generatora, u_{Sj} napięcia sieci sztywnej, \underline{Z}_j – zespolone impedancje linii przesyłowej (wielkości fazowe, $j = A, B, C$), I_{fd} – prąd wzbudzenia generatora, u_r – napięcie między punktami neutralnymi generatora i sieci sztywnej.

Schemat ten obowiązuje zarówno w czasie normalnej pracy SEE, jak i w czasie zwarcia. W celu zamodelowania zwarcia doziemnego w wybranych fazach należy przyjąć zerowe napięcia sieci sztywnej u_{Sj} oraz proporcjonalnie zmienić impedancje linii:

$$\underline{Z}_{Zj} = l \cdot \underline{Z}_j, \quad \underline{Z}_{Sj} = \underline{Z}_j - \underline{Z}_{Zj}, \quad (7)$$

gdzie: \underline{Z}_{Zj} – impedancja j -tej fazy w czasie zwarcia, l – względna odległość miejsca zwarcia w linii przesyłowej od zespołu wytwórczego, w odniesieniu do długości całej linii.



Rys. 1. Schemat analizowanego SEE przy zwarcia z ziemią: a – ogólny, b – fragment zmodyfikowany w celu zamodelowania zwarcia 2-fazowego z udziałem ziemi, t_0 – chwila wystąpienia zakłócenia

W związku z założonym pominięciem napięć transformacji w równaniach linii przesyłowej określono odpowiednie algebraiczne związki pomiędzy prądami i napięciami. W zależności od wykorzystanego modelu generatora obliczane są prądy lub napięcia. Dla faz zdrowych:

$$i_j(t + \Delta t_j) = \frac{u_j(t) + u_r(t) - u_{Sj}(t)}{|Z_j|}, \quad \Delta t_j = \frac{\phi_j}{2\pi f}, \quad (8a)$$

$$\text{lub } u_j(t) = i_j(t + \Delta t_j) \cdot |Z_j| - u_r(t) + u_{Sj}(t), \quad (8b)$$

a dla faz ze zwarcie doziemnym:

$$i_j(t + \Delta t_j) = \frac{u_j(t) + u_r(t)}{|Z_{Zj}|}, \quad \text{lub } u_j(t) = i_j(t + \Delta t_j) \cdot |Z_j| - u_r(t), \quad (8c)$$

gdzie: ϕ_j – kąty fazowe impedancji linii przesyłowej, $f = 50$ Hz. Z powyższych wzorów uzyskuje się więc 3 równania. Dodatkowo dla układu z niezziemionym punktem neutralnym generatora obowiązuje:

$$i_A(t) + i_B(t) + i_C(t) = 0. \quad (8d)$$

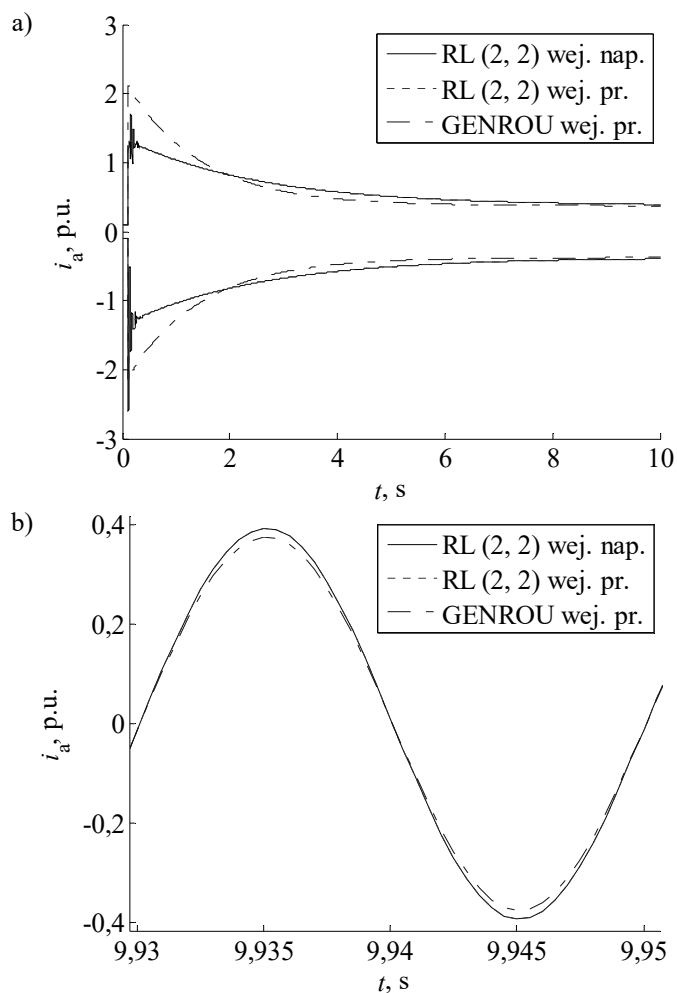
Korzystając z napięć lub prądów osiowych stojana generatora (sygnały wyjściowe modelu generatora i modelu zespołu wytwórczego) oraz napięć osiowych sieci sztywnej można wyznaczyć wielkości fazowe tych wielkości przez odwrotną transformację Parka. W związku z powyższym z układu równań (8) można obliczyć 4 niewiadome: 3 prądy lub napięcia fazowe i napięcie u_r w kolejnych chwilach czasu. Jest to realizowane w opracowanym modelu SEE. Mając do dyspozycji prądy lub napięcia fazowe generatora i korzystając z prostej transformacji Parka, określono prądy lub napięcia osiowe generatora, które stanowią sygnały wejściowe modelu generatora i modelu zespołu wytwórczego.

Tak określony model SEE jest pełny i umożliwia przeprowadzanie obliczeń symulacyjnych.

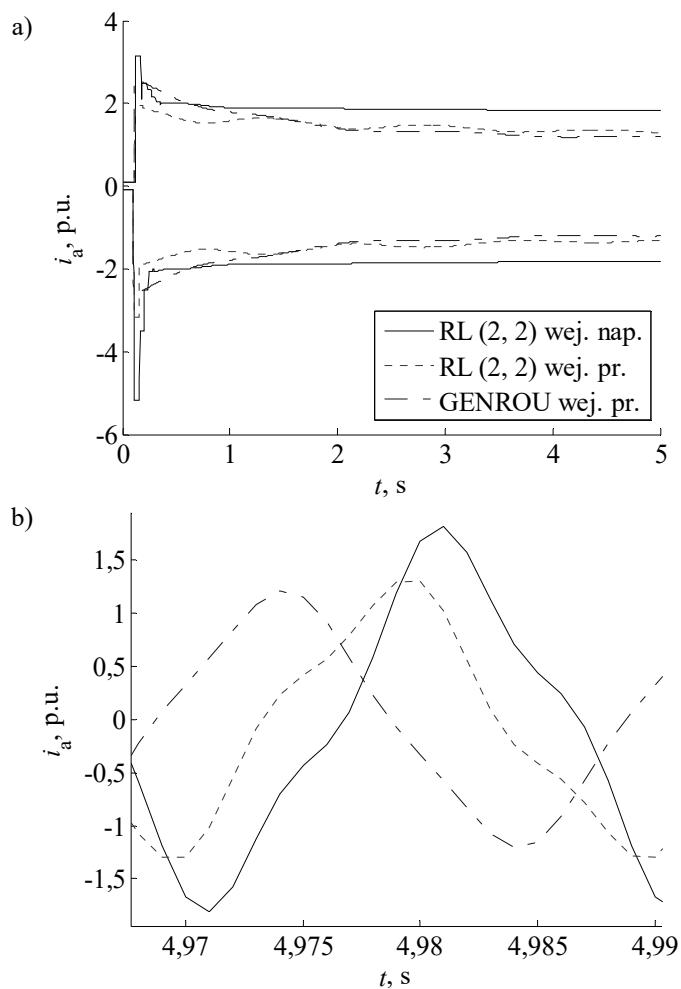
3. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA

Za pomocą przedstawionych modeli przeprowadzono obliczenia symulacyjne dla długotrwałych zwarcí trójfazowych oraz dwufazowych z ziemią (w fazach A i B). Generator pracował z nieziemionym punktem neutralnym. Przykładowo uwzględniono zwarcia w linii przesyłowej w odległości $l = 66\%$ od zespołu wytwórczego. Przyjęto obciążenie w stanie ustalonym przed zwarcie mocą czynną $P_0 = 0,1$ p.u. oraz mocą bierną $Q_0 = 0,05$ p.u.

Na rys. 2 i 3 przedstawiono przebiegi czasowe prądu stojana generatora i_a (w jednostkach względnych), dla zwarcia 3-fazowego oraz 2-fazowego.



Rys. 2. Przebieg prądu w fazie A przy zwarciu 3-fazowym
(a - obwiednia, b - powiększenie jednego okresu w stanie ustalonym)



Rys. 3. Przebieg prądu w fazie A przy zwarciu 2-fazowym
(a - obwiednia, b - powiększenie jednego okresu w stanie ustalonym)

W tabelach 1 i 2 przedstawiono rozkłady amplitud harmonicznych prądu w fazie A, napięcia w fazie C i prądu wzbudzenia w stanie ustalonym. Podano procentowe wartości wyższych harmonicznych w odniesieniu do pierwszej harmonicznej dla wielkości stojana i do składowej stałej dla prądu wzbudzenia generatora. W nawiasach podano wielkości odniesienia w jednostkach względnych.

Tabela 1. Amplitudy harmonicznych analizowanych wielkości w stanie ustalonym zwarcia 3-fazowego.

h	RL (2, 2) wej. nap.			RL (2, 2) wej. pr.			GENROU wej. pr.		
	$i_a, \%$	$u_c, \%$	$I_{fd}, \%$	$i_a, \%$	$u_c, \%$	$I_{fd}, \%$	$i_a, \%$	$u_c, \%$	$I_{fd}, \%$
0	0,0071	0,0039	100 (0,5593 p.u.)	0,0071	0,0039	100 (0,5593 p.u.)	0,0009	0,0005	100 (0,5348 p.u.)
1	100 (0,3977 p.u.)	100 (0,0788 p.u.)	0,0123	100 (0,3977 p.u.)	100 (0,0788 p.u.)	0,0123	100 (0,3768 p.u.)	100 (0,0746 p.u.)	0,0020
2	0,0048	0,0084	0,0062	0,0048	0,0084	0,0062	0,0006	0,0011	0,0010
3	0,0018	0,0046	0,0041	0,0018	0,0046	0,0041	0,0002	0,0006	0,0007
4	0,0010	0,0033	0,0031	0,001	0,0033	0,0031	0,0001	0,0004	0,0005
5	0,0006	0,0026	0,0025	0,0006	0,0026	0,0025	0,0001	0,0003	0,0004

Tabela 2. Amplitudy harmonicznych analizowanych wielkości w stanie ustalonym zwarcia 2-fazowego.

h	RL (2, 2) wej. nap.			RL (2, 2) wej. pr.			GENROU wej. pr.		
	$i_a, \%$	$u_c, \%$	$I_{fd}, \%$	$i_a, \%$	$u_c, \%$	$I_{fd}, \%$	$i_a, \%$	$u_c, \%$	$I_{fd}, \%$
0	0,0093	0,0040	100 (0,6376 p.u.)	0,0100	0,0001	100 (0,6547 p.u.)	0,021	0,0476	100 (0,6157 p.u.)
1	100 (1,5498 p.u.)	100 (1,4027 p.u.)	0,0435	100 (1,2149 p.u.)	100 (0,7686 p.u.)	0,0516	100 (1,1051 p.u.)	100 (0,4308 p.u.)	0,0327
2	0,0064	0,0033	73,9167	0,0084	0,0077	48,01	0,0373	0,0325	51,2251
3	19,2087	7,1042	0,0136	17,5839	6,4947	0,0194	9,3144	4,2098	0,0258
4	0,0027	0,0012	1,0665	0,0031	0,0032	0,6127	0,0086	0,0057	1,1062
5	0,3055	0,1074	0,009	0,2507	0,0927	0,0122	0,1987	0,0884	0,0082

4. WNIOSKI Z OBLICZEŃ

Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że:

- W stanie ustalonym przed zakłóceniem przebiegi wszystkich analizowanych wielkości są identyczne dla wszystkich analizowanych modeli.
- W przypadku zwarcia symetrycznego 3-fazowego uzyskano prawie identyczne przebiegi dla obu wariantów modelu generatora RL (2, 2). Jedynie w początkowej chwili zwarcia obwiednie przebiegów różnią się z powodu różnych metod obliczenia napięć transformacji w stojanie. Przebiegi uzyskane dla modelu GENROU różnią się od pozostałych amplitudą początkową i szybkością zmniejszania się amplitudy prądu, a także brakiem szybkich zmian amplitudy w chwili początkowej zwarcia, spowodowanym brakiem uwzględnienia napięć transfor-

macji w stojanie. Pomimo uwzględnienia asymetrii podprzejściowej generatora, w ustalonych przebiegach zwarciovych napięcia i prądu stojana występuje w praktyce tylko pierwsza harmoniczna, a w przebiegach prądu wzbudzenia tylko składowa stała.

– W przypadku zwarcia niesymetrycznego 2-fazowego przebiegi uzyskane dla poszczególnych analizowanych modeli różnią się w pewnym stopniu. Różnice te dotyczą amplitud początkowych przebiegów, szybkości zmniejszania się tych amplitud i ich wartości ustalonych. Dodatkowo w przypadku modelu GENROU nie występują szybkie zmiany amplitudy w chwilach początkowych po zwarcu. W przebiegach prądu zwarcia i napięcia na niezwartej fazie stojana, oprócz podstawowej harmonicznej, występują harmoniczne nieparzyste o znaczących amplitudach. W prądzie wzbudzenia generatora w stanie ustalonym występują: składowa stała, druga harmoniczna i wyższe harmoniczne parzyste. Poszczególne harmoniczne analizowanych wielkości dla badanych modeli różnią się zarówno amplitudami, jak i fazami.

– Przy analizie niesymetrycznych stanów pracy SEE równania wiążące wielkości zespołu wytwórczego, linii przesyłowej i sieci sztywnej zapisano przy użyciu wielkości fazowych. Jednak wyodrębnienie modelu zespołu wytwórczego umożliwiło wykorzystanie różnych (ale ogólnych) modeli generatorów synchronicznych określonych w układzie współrzędnych d, q przy analizie różnych stanów niesymetrycznych SEE (m.in. zwarć w linii przesyłowej). Wybór wielkości wejściowych modelu generatora może wiązać się z koniecznością numerycznego obliczenia pochodnych sygnałów, a w związku z tym ze zmniejszeniem dokładności obliczeń. Nie trzeba jednak dla każdej niesymetrii osobno formułować równań stanu całego SEE (zwykle w układzie współrzędnych fazowych lub $\alpha, \beta, 0$), co jest zadaniem trudnym i pracochłonnym.

– Przy badaniu zachowania SEE w niesymetrycznych stanach nieustalonych należy w miarę możliwości dokładnie modelować generatory synchroniczne. Nieuwzględnienie napięć transformacji w równaniach stojana może w tym przypadku prowadzić do znaczących błędów.

– Amplituda prądu zwarciovego generatora w stanie ustalonym przy zwarcu 2-fazowym jest znacznie większa niż przy zwarcu 3-fazowym. Jest to zgodne z teorią maszyn synchronicznych [10].

LITERATURA

- [1] Kacejko P., Machowski J, Zwarcia w systemach elektroenergetycznych, WNT, Warszawa, 2009.
- [2] Concordia Ch., Synchronous Machines. Theory and Performance, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1951.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] Winkler W., Wiszniewski A., Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych, WNT, Warszawa, 2004.
- [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 S., Nocoń A., Pruski P., Wpływ wartości wybranych parametrów modeli elementów systemu elektroenergetycznego na przebiegi w niesymetrycznych stacjach pracy. Poznań University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, No 95/2018, Poznań 2018, s. 117–128.
- [8] Paszek S., Wybrane metody oceny i poprawy stabilności kątowej systemu elektroenergetycznego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2012.
- [9] Paszek W., Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego. Wydawnictwo Helion, Gliwice 1998.
- [10] Krause P. C., Analysis of electric machinery, McGraw-Hill, 1986.

COMPARISON OF THE WAVEFORMS IN A POWER SYSTEM UNDER ASYMMETRIC OPERATING CONDITIONS WHEN CONSIDERING DIFFERENT SYNCHRONOUS GENERATOR MODELS

In the paper, the waveforms of the output quantities of different mathematical models of a synchronous generator operating in a power system (PS) are compared. It was assumed that the PS consisted of a generating unit (including, among others, the synchronous generator) connected by a high voltage transmission line to a bus. In the presented calculations results, disturbances of the steady state in the form of symmetric and asymmetric short-circuits in a selected place of the transmission line were assumed. In the generator model, the subtransient asymmetry which during asymmetric short-circuits results in occurrence of higher harmonics in the waveforms of stator currents and voltages as well as the field current (also when the phenomenon of magnetic saturation of the generator magnetic cores was not taken into account) were taken into account. The XT and RL circuit models of the synchronous generator when assuming different input and output quantities of the system were investigated.

(Received: 21.01.2019, revised: 04.03.2019)