

Bolesław BRONIEWSKI

Biuro Projektów Górniczych, Katowice

Wilibald WINKLER

WARTOŚCI SKŁADOWEJ PRZECIWNEJ PRĄDU W GENERATORACH SYNCHRONICZNYCH PODCZAS NIESYMETRYCZNYCH ZAKŁÓCEŃ ZEWNĘTRZNYCH

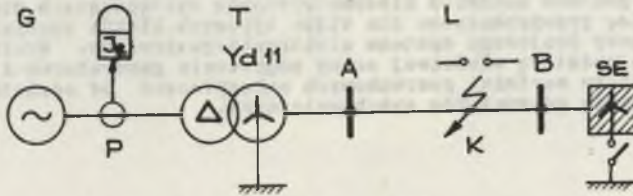
Streszczenie. Dokonano analizy kształtowania się względnej wartości składowej symetrycznej przeciwnej prądu płynącego w uzwojeniu stojana generatorów synchronicznych pracujących w układach blokowych podczas zakłóceń niesymetrycznych występujących poza blokiem. Analizę przeprowadzono dla kilku typowych bloków energetycznych dużej mocy krajowego systemu elektroenergetycznego. Wyniki mogą stanowić podstawę właściwej oceny zagrożenia generatorów i prawidłowego doboru wartości rozruchowych zabezpieczeń od asymetrii prądowej krajowych generatorów synchronicznych.

1. Wstęp

Wzrost mocy znamionowej generatorów synchronicznych i związane z tym zmiany konstrukcyjne oraz technologiczne spowodowały ponowne zainteresowanie i nieco inne niż dotychczas spojrzenie na rolę i zadanie jednego z rezerwowych zabezpieczeń elektroenergetycznych generatorów, jakim jest zabezpieczenie od asymetrii prądowej [1, 2, 3]. Ze względu na cieplne, mechaniczne, a także elektryczne zagrożenie wirnika w wyniku indukowania się w nim prądów o podwójnej częstotliwości w następstwie występowania w uzwojeniu stojana składowej przeciwnej prądu czas pracy asymetrycznej generatora jest ograniczony tym bardziej, im większa jest moc znamionowa danego generatora. Przyczyną asymetrii prądowej są zwarcia niesymetryczne oraz praca niepełnofazowa, stąd też dla właściwej oceny zagrożenia generatorów jak i prawidłowego doboru wartości rozruchowych zabezpieczeń od asymetrii prądowej istnieje potrzeba wyznaczenia względnej wartości składowej symetrycznej przeciwnej w prądzie stojana generatorów synchronicznych podczas tych zakłóceń. Analizę ilościową przeprowadzono dla kilku typowych bloków energetycznych krajowego systemu elektroenergetycznego.

2. Równanie opisujące składową symetryczną przeciwną prądu w punkcie zabezpieczeniowym podczas typowych zakłóceń niesymetrycznych

Podstawą analizy jest układ elektroenergetyczny przedstawiony na rys. 1, złożony z bloku generator-transformator oraz linii elektroenergetycznej łączącej blok z systemem elektroenergetycznym. Założono, że punkt gwiazdowy transformatora jest bezpośrednio uziemiony, natomiast system elektroenergetyczny (SE) może pracować zarówno z izolowanym, jak i bezpośrednio uziemionym punktem zerowym. Punkt przełącznikowy P pomiędzy generatorem G a transformatorem T jest miejscem, przez które przepływa prąd składowej symetrycznej przeciwnej podczas zakłóceń w punkcie K, położonym na linii elektroenergetycznej L, którego wartość ma zostać wyznaczona.



Rys. 1. Analizowany układ elektroenergetyczny

Wychodząc ze znanych zależności pomiędzy prądami oraz napięciami fazowymi a ich składowymi symetrycznymi w miejscu zakłócenia wyprowadzono równania opisujące składową symetryczną przeciwną w punkcie przełącznikowym. W tabelicy 1 zestawiono otrzymane wyrażenia pozwalające obliczyć składową symetryczną przeciwną prądu dla różnych zakłóceń niesymetrycznych i dwóch wariantów pracy punktu zerowego SE. Dla objaśnienia przyjętych w tabelicy 1 oznaczeń podano na rys. 2 przykładowo schemat zastępczy obwodów zakłóceniewych odpowiadających pracy niepełnofazowej w wyniku przerwy w fazie A. Inne oznaczenia są następujące:

$$\underline{Z}_1 = \frac{(\underline{Z}_{1G} + \underline{Z}_{1T} + K_1 \underline{Z}_{1L})(K_2 \underline{Z}_{1L} + a \underline{Z}_{1S})}{\underline{Z}_{1G} + \underline{Z}_{1T} + \underline{Z}_{1L} + a \underline{Z}_{1S}} \quad (1)$$

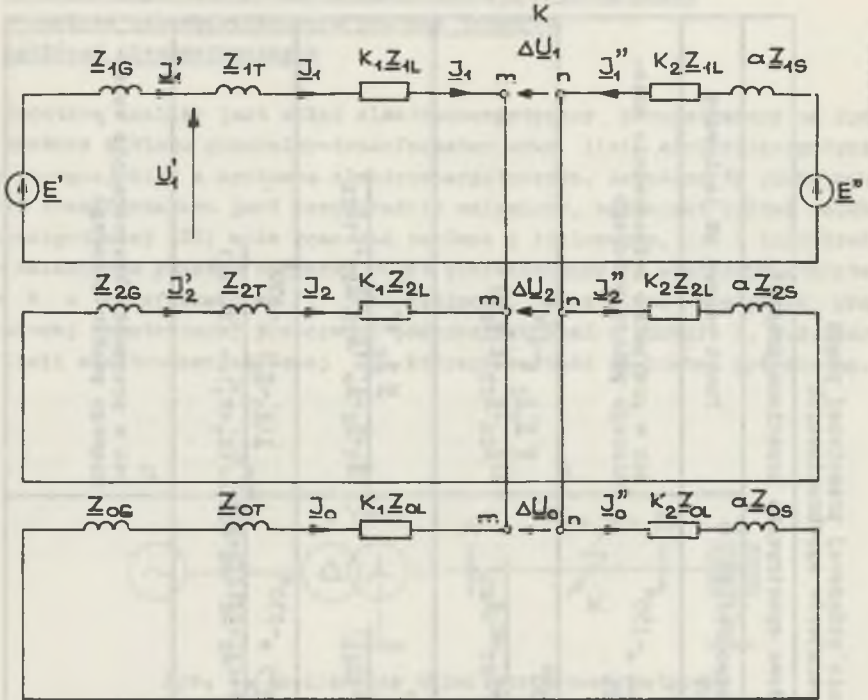
$$\underline{Z}_2 = \frac{(\underline{Z}_{2G} + \underline{Z}_{2T} + K_1 \underline{Z}_{2L})(K_2 \underline{Z}_{2L} + a \underline{Z}_{2S})}{\underline{Z}_{2G} + \underline{Z}_{2T} + \underline{Z}_{2L} + a \underline{Z}_{2S}} \quad (2)$$

$$\underline{Z}_0 = \frac{(\underline{Z}_{0T} + K_1 \underline{Z}_{0L})(K_2 \underline{Z}_{0L} + a \underline{Z}_{0S})}{\underline{Z}_{0T} + \underline{Z}_{0L} + a \underline{Z}_{0S}} \quad (3)$$

Tablica 1

Wzory umożliwiające obliczenie składowej przeciwnej prądu
w uwojeniu stojana generatorów synchronicznych

Rodzaj zakłócenia	Składowa symetryczna przeciwna prądu I_2	Punkt zerowy SE izolowany
Zwarcie dwufazowe BC	$\frac{-U \underline{Z}_2}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) (\underline{Z}_2 G + \underline{Z}_2 T + K_1 \underline{Z}_2 L)} e^{-j30^\circ}$	<p>Jak w przypadku bezpośrednio uziemionego punktu zerowego</p>
Zwarcie dwufazowe BC z ziemią	$\frac{U \underline{Z}_0 \underline{Z}_2 e^{-j30^\circ}}{(\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) (\underline{Z}_2 G + \underline{Z}_2 T + K_1 \underline{Z}_2 L)}$	$\frac{U \underline{Z}'_2 \underline{Z}_0 e^{-j30^\circ}}{M (\underline{Z}_2 G + \underline{Z}_2 T + K_1 \underline{Z}_2 L)}$
Zwarcie jednofazowe z ziemią fazy A	$\frac{U \underline{Z}_2 e^{-j30^\circ}}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0) (\underline{Z}_2 G + \underline{Z}_2 T + K_1 \underline{Z}_2 L)}$	$\frac{U \underline{Z}_2 e^{-j30^\circ}}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0) (\underline{Z}_2 G + \underline{Z}_2 T + K_1 \underline{Z}_2 L)}$
Praca niepełnofazowa w wyniku przerwy w fazie A	$\frac{-I (\underline{Z}'_1 + \underline{Z}'_0) (\underline{Z}_0 + \underline{Z}_0 \underline{Z}_0) e^{-j30^\circ}}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_1') (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 \underline{Z}_0) + (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_2') (\underline{Z}_0 + \underline{Z}_0)}$	$-\frac{I (\underline{Z}'_1 + \underline{Z}'_0) e^{-j30^\circ}}{(\underline{Z}'_1 + \underline{Z}'_0) + (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_2')}$
Zwarcie jednofazowe z ziemią fazy A z jednoczesną przerwą w tej fazie	$\frac{-I' \underline{Z}'_0 e^{-j30^\circ}}{\underline{Z}'_1 \underline{Z}'_0 + \underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_0}$	<p>Jak w przypadku bezpośrednio uziemionego punktu zerowego</p>



Rys. 2. Schemat zastępczy obwodów dla składowych symetrycznych w przypadku pracy niepełnofazowej (przerwa w fazie A)

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}'_1 &= \underline{Z}_{1G} + \underline{Z}_{1T} + K_1 \underline{Z}_{1L} \\ \underline{Z}'_2 &= \underline{Z}_{2G} + \underline{Z}_{2T} + K_1 \underline{Z}_{2L} \\ \underline{Z}'_0 &= \underline{Z}_{0T} + K_1 \underline{Z}_{0L} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}''_1 &= K_2 \underline{Z}_{1L} + a \underline{Z}_{1S} \\ \underline{Z}''_2 &= K_2 \underline{Z}_{2L} + a \underline{Z}_{2S} \\ \underline{Z}''_0 &= K_2 \underline{Z}_{0L} + a \underline{Z}_{0S} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}' - \underline{E}''}{\underline{Z}'_1 + \underline{Z}''_1} \quad (6)$$

$$K_1 = \frac{l_{AK}}{l_{ABmax}}; \quad K_2 = \frac{l_{BK}}{l_{ABmax}}, \quad (7)$$

$$\underline{M} = \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}'_0 (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2), \quad (8)$$

przy czym K_1 i K_2 są to tzw. współczynniki lokalizacji miejsca zwarcia określające dla linii AB odległości odpowiednio od stacji A do miejsca zakłócenia K lub od stacji B do punktu K.

3. Analiza ilościowa

Analizę kształtowania się względnej wartości składowej przeciwnej prądu w uzwojeniu stojana generatorów przeprowadzono dla kilku największych bloków energetycznych generator-transformator, pracujących w krajowym systemie elektroenergetycznym.

W tablicy 2 zestawiono wartości parametrów elementów układu elektroenergetycznego dla różnych wariantów współpracy typowych krajowych generatorów z transformatorami blokowymi o różnych napięciach po stronie SE i liniach elektroenergetycznych, których maksymalne długości podano w ostatniej rubryce. Obliczenia przeprowadzono dla największych dopuszczalnych poziomów mocy zwarciowej SE, które wynoszą: 5, 25 i 40 GV·A, odpowiednio dla napięć 110, 220, 400 kV; założono ponadto, że $X_{OS} = 0,8 X_{1S}$.

Na rys. 3a przedstawiono przebieg względnych wartości składowej przeciwnej prądu płynącego w uzwojeniu generatora współpracującego według wariantu 1A (por. tabl. 2) z SE bezpośrednio uziemionym, w zależności od położenia punktu zakłóceniewego K na linii elektroenergetycznej. Analogiczne przebiegi dla przypadku, gdy SE pracuje z izolowanym punktem zerowym, podaje rys. 3b.

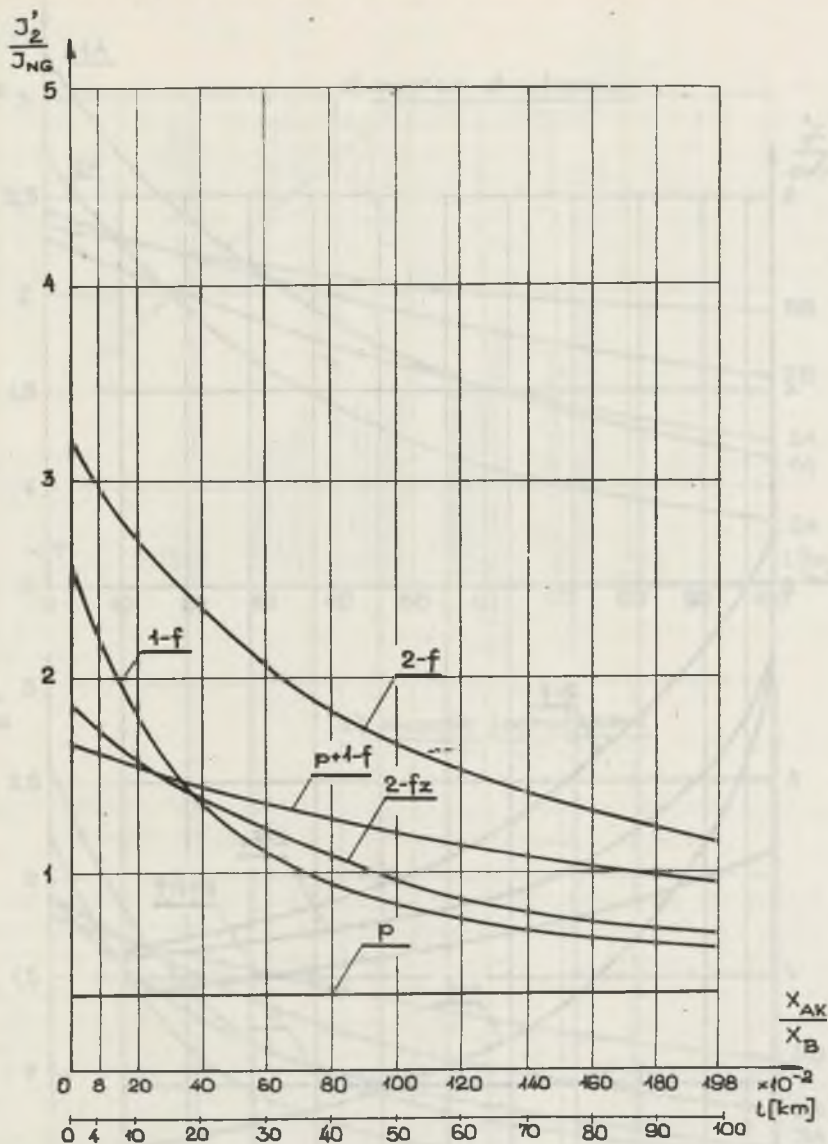
Z porównania otrzymanych charakterystyk wynika, że największa wartość I_{I_2}'/I_{nG} występuje podczas zwarcia dwufazowego, najmniejsza natomiast w przypadku pracy niepełnofazowej wywołanej przerwą w jednej fazie. W tym drugim przypadku względna wartość składowej przeciwnej prądu jest stała, niezależna od miejsca lokalizacji zakłócenia. Tego rodzaju charakterystyki zostały wyznaczone dla pozostałych wariantów pracy bloków, dla których wartości I_{I_2}'/I_{nG} kształtowały się podobnie, z tą jedynie różnicą, że dla bloków o większej mocy, współpracujących z SE z izolowanym punktem zerowym, najmniejsze wartości występują dla niektórych zwarc jednofazowych.

Na rys. 4a przedstawiono względną wartość składowej przeciwnej prądu podczas zwarcia dwufazowego dla wszystkich rozpatrzonych wariantów pracy bloków zawartych w tabl. 2, natomiast rys. 4b ilustruje zmiany tej składowej dla najczęściej występującego w analizowanych systemach zwarcia jednofazowego przy bezpośrednio uziemionym punkcie zerowym SE.

Tablica 2

Względne wartości reaktancji analizowanych bloków generator-transformator oraz linii elektroenergetycznych

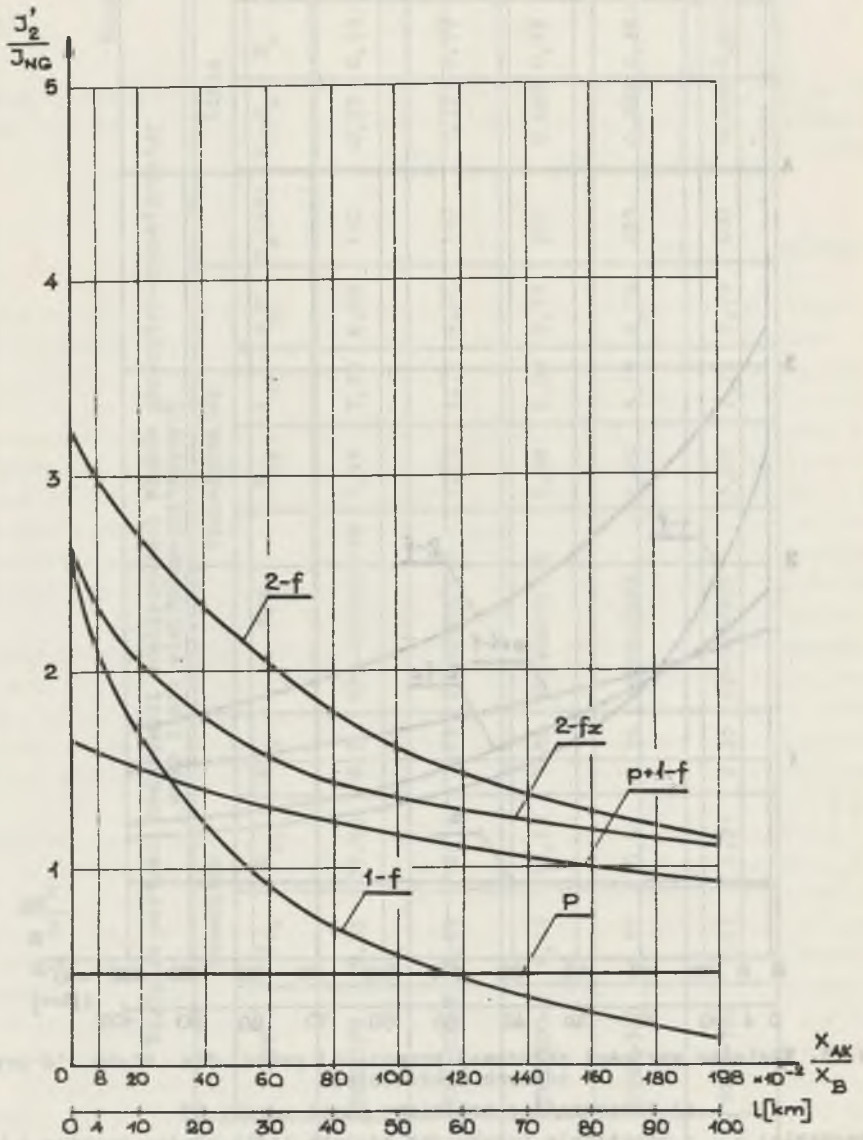
Lp.	Wa- riant	Generator				Transformator				Linia			
		Typ	X_{1G}	X_{2G}	X_{0G}	Typ	X_{1T}	X_{2T}	X_{0T}	U_n (kV)	$X_1=X_2$	X_c	l_{max} km
1	1A	TGH-120	9,33	12,66	6,3	RTr-160000/110	7,33	7,33	6,23	110	0,33	0,99	100
2	2A	TWW-200-2	8,49	10,19	3,82	TW240000/110	4,79	4,79	4,07	110	0,33	0,99	100
3	2B	TWW-200-2	8,49	10,19	3,82	TW240000/220	6,08	6,08	5,17	220	0,083	0,25	220
4	3A	GTHW-360	5,87	5,87	2,35	426000/220	3,28	3,28	2,79	220	0,083	0,25	220
5	3B	GTHW-360	5,87	5,87	2,35	426000/400	3,28	3,28	2,79	400	0,025	0,075	400



Rys. 3. Względne wartości składowej przeciwnej prądu dla bloku 1A przy różnych zakłóceniach

a) bezpośrednio uziemiony punkt zerowy SE

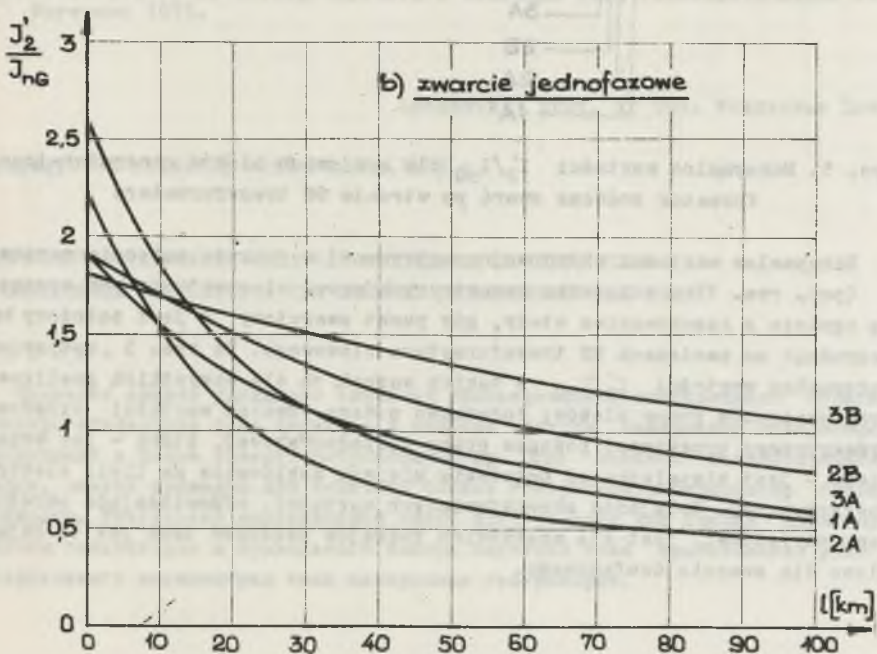
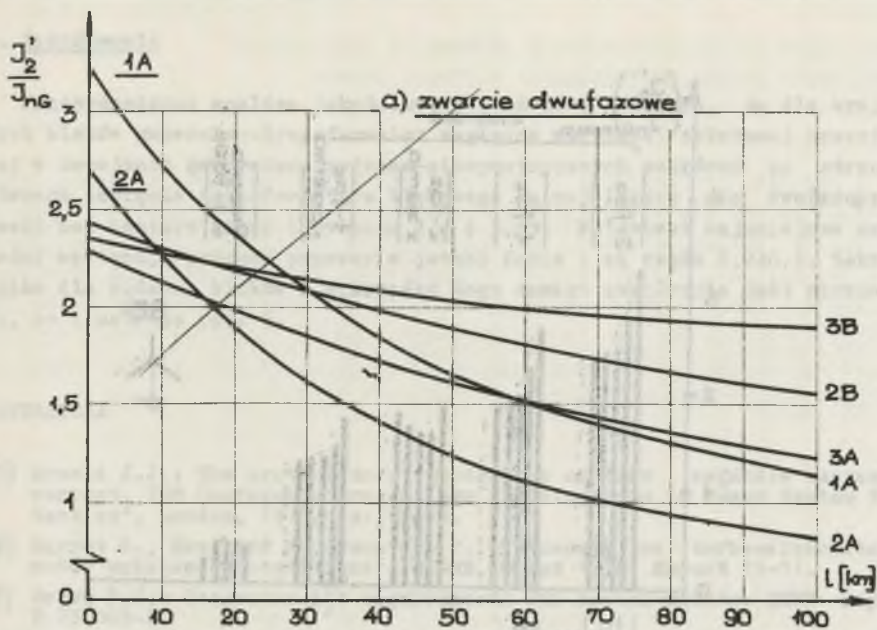
Oznaczenia: X_{AK} - reaktancja indukcyjna odcinka linii między punktem A i K (por. rys. 1); X_B - reaktancja indukcyjna bloku generator - transformator; $1-f$ - zwarcie jednofazowe z ziemią; $2-f$ - zwarcie dwufazowe; $2-f_z$ - zwarcie dwufazowe z ziemią; p - przerwa w jednej fazie; $p+1-f$ - zwarcie jednofazowe z jednoczesną przerwą w fazie zwartej



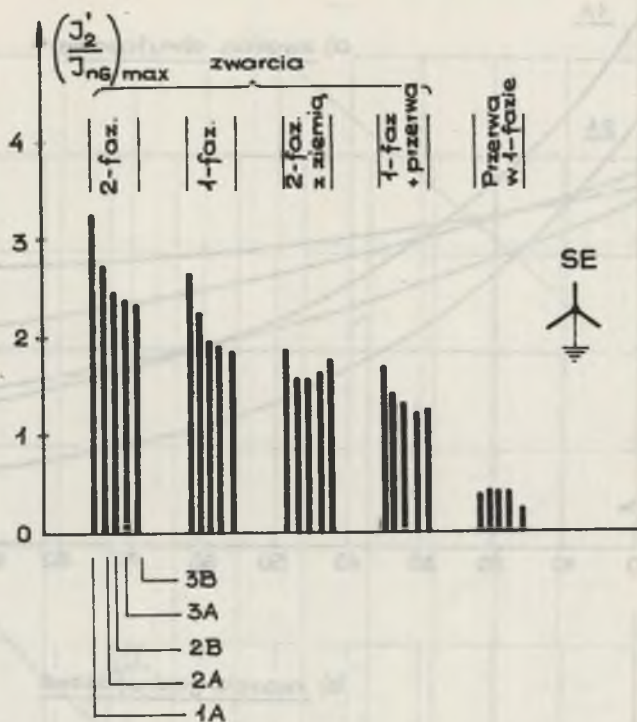
Rys. 3. Względne wartości składowej przeciwnej prądu dla bloku 1A przy różnych zakłóceniach

b) izolowany punkt zerowy SE

Oznaczenia: jak na rys. 3a



Rys. 4. Względne wartości składowej przeciwnej prądu podczas zewnętrznego zwarcia dwufazowego (a) i jednofazowego (b) dla analizowanych bloków



Rys. 5. Maksymalne wartości I_2'/I_{nG} dla krajowych bloków generator-transformator podczas zwarć po stronie GN transformatora

Maksymalne wartości składowej symetrycznej w punkcie zabezpieczeniowym P (por. rys. 1) w przypadku zewnętrznych zwarć niesymetrycznych występują zgodnie z oczekiwaniem wtedy, gdy punkt zwarcia K jest położony bezpośrednio na zaciskach GN transformatora blokowego. Na rys. 5 zestawiono maksymalne wartości I_2'/I_{nG} w takich warunkach dla wszystkich analizowanych wariantów pracy bloków; dodatkowo podano również wartości składowej symetrycznej przeciwnej podczas pracy niepełnofazowej, która - jak wspomniano - jest niezależna od położenia miejsca zakłócenia na linii elektroenergetycznej. Kolejność przedstawionych wartości, odpowiadająca określonemu wariantowi, jest dla wszystkich rodzajów zakłóceń taka jak to objaśniono dla zwarcia dwufazowego.

4. Zakończenie

Przeprowadzona analiza jakościowa i ilościowa wykazała, że dla krajowych bloków generator-transformator względne wartości składowej przeciwnej w uzwojeniu generatora podczas niesymetrycznych zakłóceń po stronie górnego napięcia transformatora blokowego są największe dla dwufazowych zwarć bez udziału ziemi i wynoszą $2,4 \div 3,25$. Natomiast najmniejsze wartości występują podczas przerwy w jednej fazie i są rzędu $0,2 \div 0,4$. Zakres zmian dla różnych bloków w przypadku tego samego zakłócenia jest niewielki, co ilustruje rys. 5.

LITERATURA

- [1] Arnold J.J.: The protection of generators against negative sequence current. IEE Conference Proceedings "Developments in Power System Protection", London, 1975, ss. 50-56.
- [2] Barret S., Heullard M., Coustere F.: Stresses on turbo-alternators under unbalanced conditions - CIGRE, Paryż 1970, Raport 11-11.
- [3] Brown P.G.: Generator $I_2^2 t$ requirements for system faults. IEEE Paper T 73-045-2.
- [4] Kołek W.: Praca turbogeneratorsa w układzie elektroenergetycznym. PWT, Warszawa 1955.

Recenzent: prof. dr inż. Władysław Latek

Wpłynęło do redakcji dnia 24.VII.1982 r.

ЗНАЧЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ТОКА В СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ ПРИ ВНЕШНИХ НЕСИММЕТРИЧЕСКИХ СБОЯХ

Резюме

Проведён анализ удельного значения симметрической составляющей обратной последовательности тока текущего в обмотке статора синхронных генераторов, работающих в блоке генератор-трансформатор при внешних несимметрических сбоях. Анализ проведён для типичных блоков генератор-трансформатор большой мощности. Результаты исследований могут быть основой для оценки надёжности работы генераторов и правильного выбора значений тока срабатывания реле от коэффициента несимметрии тока синхронных генераторов.

THE VALUES OF NEGATIV SEQUENCE CURRENT IN SYNCHRONOUS GENERATORS DURING UNSYMMETRICAL EXTERNAL FAULTS

Summary

A quantitative analysis of relative values of negative sequence phase current in the stator winding of synchronous generator connected via a delta-star transformer with the power system during unbalanced conditions due to different system faults is presented. The analysis has been performed for large typical generator-transformer units operating in the domestic power system. The obtained results can be used for proper estimations of the generator emergency and or the correct choice of operating value of negative sequence protection.

[1] ...

[2] ...

[3] ...

[4] ...

[5] ...

[6] ...

[7] ...

[8] ...

[9] ...

[10] ...

[11] ...

[12] ...

[13] ...

[14] ...

[15] ...

[16] ...

[17] ...

[18] ...

[19] ...

[20] ...

[21] ...

[22] ...

[23] ...

[24] ...

[25] ...

[26] ...

[27] ...

[28] ...

[29] ...

[30] ...

[31] ...

[32] ...

[33] ...

[34] ...

[35] ...

[36] ...

[37] ...

[38] ...

[39] ...

[40] ...

[41] ...

[42] ...

[43] ...

[44] ...

[45] ...

[46] ...

[47] ...

[48] ...

[49] ...

[50] ...

[51] ...

[52] ...

[53] ...

[54] ...

[55] ...

[56] ...

[57] ...

[58] ...

[59] ...

[60] ...

[61] ...

[62] ...

[63] ...

[64] ...

[65] ...

[66] ...

[67] ...

[68] ...

[69] ...

[70] ...

[71] ...

[72] ...

[73] ...

[74] ...

[75] ...

[76] ...

[77] ...

[78] ...

[79] ...

[80] ...

[81] ...

[82] ...

[83] ...

[84] ...

[85] ...

[86] ...

[87] ...

[88] ...

[89] ...

[90] ...

[91] ...

[92] ...

[93] ...

[94] ...

[95] ...

[96] ...

[97] ...

[98] ...

[99] ...

[100] ...