

ANALIZA NARAŻEŃ TRANSFORMATORÓW ROZDZIELCZYCH OD PRZEPIĘĆ ŁĄCZENIOWYCH

STRESZCZENIE

W czasie łączenia transformatorów, szczególnie wyłącznikami próżniowymi, mogą powstawać przebiegi stanowiące znaczne narażenia układów izolacyjnych zewnętrznych i wewnętrznych transformatorów. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń przebiegów powstających podczas załączania i wyłączania transformatorów w sieciach rozdzielczych. Analizowano wpływ ograniczników przebiegów oraz długości linii kablowych zasilających na przebiegi łączeniowe.

Słowa kluczowe: transformatory, napięcia łączeniowe

ANALYSIS OF RISKS OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS FROM SWITCHING OVERVOLTAGES

During switching of transformers, especially by use of vacuum breakers, overvoltages can be generated which have considerable influence on damage risk of external and internal transformer insulation systems. The calculation results of overvoltages which are generated during switch-on and switch-off distribution transformers are presented in the paper. The paper also presents an analysis of an influence of surge arresters and the length of the supply cable lines on switching overvoltages.

Keywords: transformers, switching overvoltages

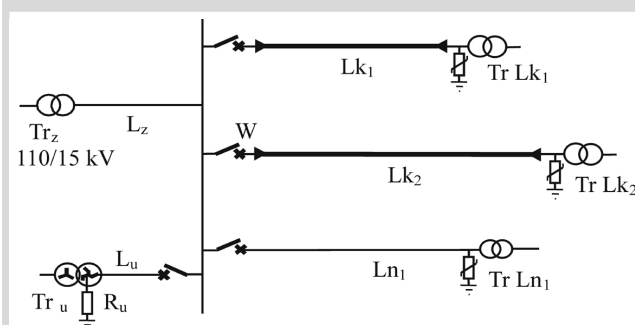
1. WPROWADZENIE

Układy izolacyjne transformatorów podczas czynności łączeniowych są narażane na działanie przebiegów. Szczególnie stosowanie wyłączników próżniowych do łączenia transformatorów może być związane z generowaniem przebiegów łączeniowych o znacznych wartościach maksymalnych. Wyłączniki próżniowe są stosowane coraz częściej – głównie w elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych średniego napięcia. Wyłączniki te wyróżniają się niezawodnością działania i dużą zdolnością łączeniową. Wykazują jednak specyficzne właściwości łączeniowe. Prąd w obwodzie wyłączanym jest przerywany przy natężeniach różnych od zera. Wyłączniki te cechuje szybki wzrost wytrzymałości elektrycznej oraz zdolność do przerywania prądów wielkiej częstotliwości [1]. Konsekwencją tych zjawisk mogą być przebiegi łączeniowe o znacznych wartościach szczytowych [2–4].

W artykule przedstawiono analizę przebiegów, powstających w czasie łączenia transformatorów rozdzielczych, w celu oceny działania ochrony przebiegiowej oraz wpływu konfiguracji układów elektroenergetycznych na narażenia przebiegiowe układów izolacyjnych. Podstawą analizy były wyniki komputerowych symulacji przebiegów generowanych podczas załączania i wyłączania transformatorów.

2. CHARAKTERYSTYKA SIECI ELEKTRYCZNEJ

Symulacje przebiegów łączeniowych, narażających transformatory w sieci rozdzielczej, przeprowadzono w układzie przedstawionym na rysunku 1. Układ ten obejmuje rozdzielnię 15 kV zasilaną z transformatora Tr_z 110/15 kV linią napowietrzną L_z , dwie linie kablowe L_{k1} , L_{k2} , oraz linię napowietrzną L_{n1} zasilające transformatory rozdzielcze $Tr L_{k1}$, $Tr L_{k2}$, $Tr L_{n1}$. Parametry linii elektroenergetycznych zamieszczono w tabeli 1. Parametry transformatorów pracujących w sieci zamieszczono w tabeli 2.



Rys. 1. Fragment sieci rozdzielczej 15 kV

Tabela 1
Parametry linii elektroenergetycznych

Linia L_z	Linia L_{k1}	Linia L_{k2}	Linia L_{n1}	Linia L_u
linia napowietrzna AFL 8-525	linia kablowa HAKnFtA 3x70	linia kablowa HAKnFtA 3x240	linia napowietrzna AFL 6-70	linia kablowa HAKnFtA 3x120
długość: 5,0 km	długość: 1,3 km	długość: 1,7 km	długość: 1,7 km	długość: 0,12 km

* Katedra Elektroenergetyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Tabela 2
 Parametry transformatorów

Oznaczenie	Typ	S_n	U_n	U_z	ΔP_{Fe}	ΔP_{Cu}	I_0
		kVA	kV	%	kW	kW	%
Tr _z	TNORBA16000/110 PNP	16000	110/16,5	12	12,84	88,75	0,24
TrK ₁ , Tr K ₂ , TrL ₁	TNOSAA 1000/15 PN	17000	15,75/0,4	6	1,6	10	1
Tr _u	TNOSN 100/20	100	15,75/0,4	4,5	0,245	1,6	2

Tabela 3
 Napięcia obniżone ograniczników przepięć typu POLIM-S

Typ	U_n	U_c	Napięcia obniżone przy udarach prądowych						
			1/2,5 μ s		8/20 μ s			30/60 μ s	
			5 kA	10 kA	5 kA	10 kA	20 kA	0,5 kA	2 kA
			kV						
POLIM-S 13	16,3	13,0	41,4	44,5	37,1	39,0	42,8	32,0	34,2
POLIM-S 18	22,5	18,0	57,3	61,6	51,3	54,0	59,2	44,3	47,3

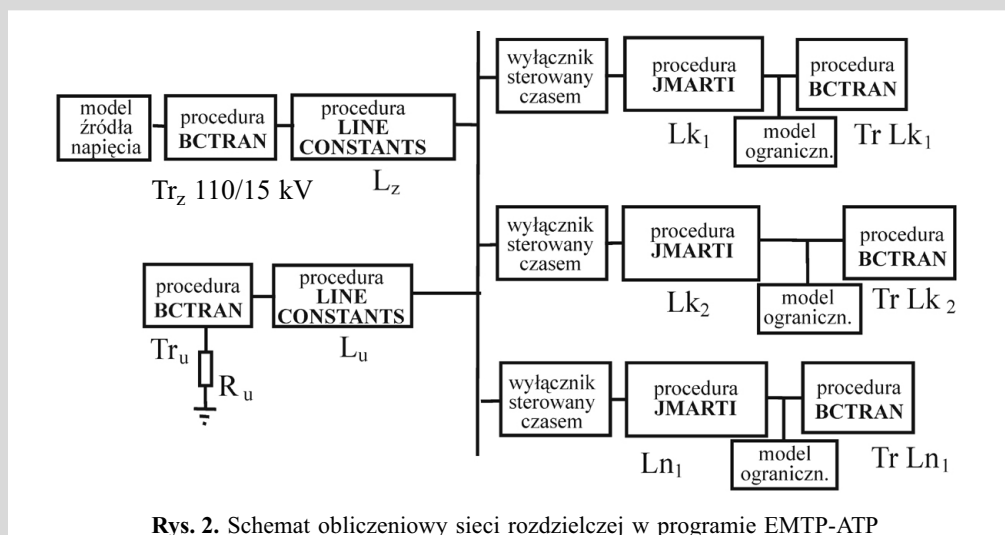
Wartości napięć pracy ciągłej ograniczników stosowanych w sieciach 15 kV z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, gdzie zwarcia doziemne są wyłączane automatycznie, wynosi 13 kV, a w sieci z punktem izolowanym od ziemi, gdy czas zwarcia nie jest ograniczony – 18 kV [5–7]. Warunki te spełniają ograniczniki typu POLIM-S 13 i POLIM-S 18 (tab. 3) [8].

3. METODA OBLICZEŃ PRZEPIĘĆ

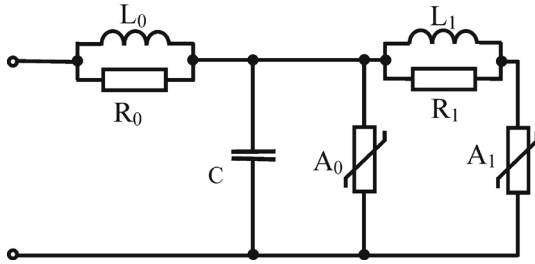
Obliczenia przepięć wykonano przy zastosowaniu programu Electromagnetic Transients Program–Alternative Transients Program (EMTP-ATP) [9]. Model obliczeniowy w programie EMTP-ATP sieci rozdzielczej przedstawionej na rysunku 1 zamieszczono na rysunku 2. Do modelowania linii kablowych i napowietrznych zastosowano procedurę

JMARTI, która generuje modele linii elektroenergetycznych o parametrach zależnych od częstotliwości. Danymi wejściowymi są wymiary kabli, linii napowietrznych oraz stałe materiałowe torów prądowych i układów izolacyjnych. Modele transformatorów otrzymano przy wykorzystaniu procedury BCTRAN na podstawie pomiarów transformatorów, wykonywanych w stanach zwarcia oraz biegu jałowego. Wyłączniki próżniowe zastępowano modelem sterowanym czasem z uwzględnieniem wartości prądu ucięcia.

Ograniczniki przepięć zastępowano schematem przedstawionym na rysunku 3 [10, 11]. Charakterystyki warystorów A_0 i A_1 oraz parametry elementów liniowych modelu są wyznaczane przy zastosowaniu wyników badań napięć obniżonych zamieszczanych w katalogach firmowych oraz podstawowych wymiarów ograniczników.



Rys. 2. Schemat obliczeniowy sieci rozdzielczej w programie EMTP-ATP



Rys. 3. Schemat zastępczy tlenkowych ograniczników przepięć

Zależności napięciowo-prądowe warystorów A_0 i A_1 zapisano w postaci:

$$A_0(i_{A_0}) = A_{w_0}(i_{A_0}) \frac{U_{8/20;10}}{1,6} \quad (1)$$

$$A_1(i_{A_1}) = A_{w_1}(i_{A_1}) \frac{U_{8/20;10}}{1,6} \quad (2)$$

gdzie:

$U_{8/20;10}$ – napięcie obniżone ogranicznika przy udarze prądowym 10 kA, 8/20 μ s,

$A_{w_0}(i_{w_0}), A_{w_1}(i_{w_1})$ – zależności wyrażone wzorami (3) i (4).

$$A_{w_0}(i_{w_0}) = C_0 i_{A_0}^{0,0506} \quad (3)$$

$$A_{w_1}(i_{w_1}) = C_1 i_{A_1}^{0,0577} \quad (4)$$

gdzie:

C_0, C_1 – stałe [-] ($C_0 = 1,1843$; $C_1 = 0,9152$);
 i_{A_0}, i_{A_1} – natężenia prądu w warystorach odpowiednio A_0 i A_1 .

Wartości indukcyjności L_0 i L_1 wyrażają zależności:

$$L_0 = 0,2 \frac{l_w}{n} \quad [\mu\text{H}] \quad (5)$$

$$L_1 = 15 \frac{l_w}{n} \quad [\mu\text{H}] \quad (6)$$

gdzie: l_w, n – wysokość kolumny warystorów i liczba kolumn.

Rezystancje R_0 i R_1 są obliczane przy użyciu wzorów:

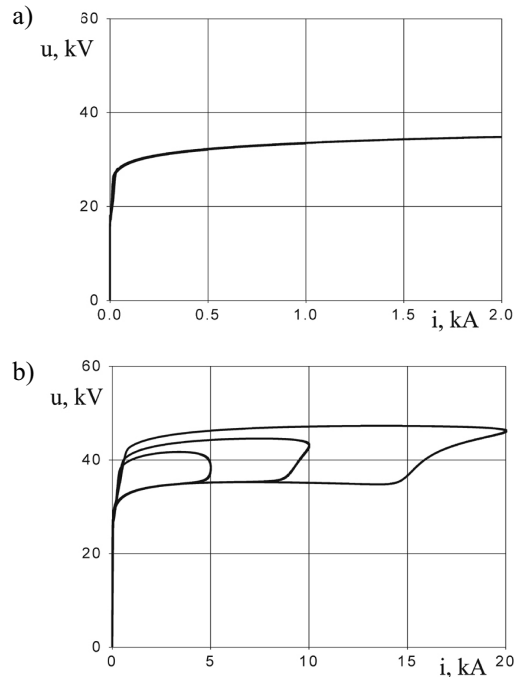
$$R_0 = 100 \frac{l_w}{n} \quad [\Omega] \quad (7)$$

$$R_1 = 65 \frac{l_w}{n} \quad [\Omega] \quad (8)$$

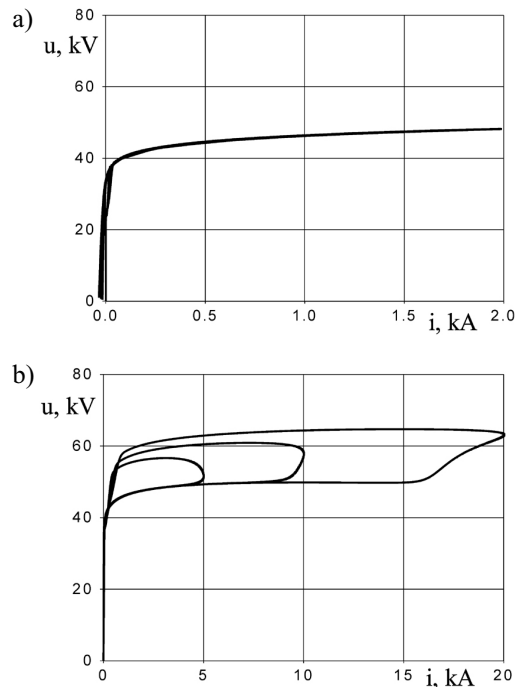
Pojemność C ograniczników wyraża zależność

$$C = 100 \frac{l_w}{n} \quad [\text{pF}] \quad (9)$$

Zależności napięciowo-prądowe ograniczników typu POLIM-S 13 i POLIM-S 18, wyznaczone przy wykorzystaniu modelu przedstawionego na rysunku 3, zamieszczono na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Zależności $u = f(i)$ ograniczników typu POLIM-S 13, wyznaczone przy użyciu schematu zastępczego ograniczników (rys. 3): a) wykresy dla udarów 30/60 μ s; 2 kA; b) wykresy dla udarów 1/5 μ s; 5, 10 i 20 kA



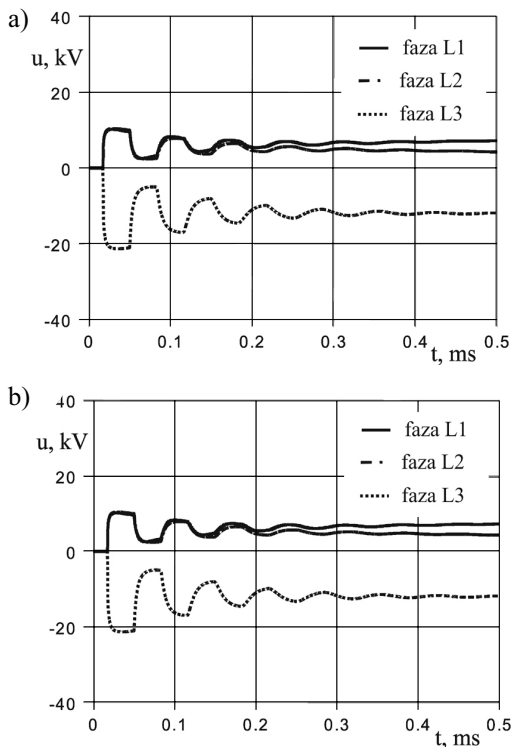
Rys. 5. Zależności $u = f(i)$ ograniczników typu POLIM-S 18, wyznaczone przy użyciu schematu zastępczego ograniczników (rys. 3): a) wykresy dla udarów 30/60 μ s; 2 kA; b) wykresy dla udarów 1/5 μ s; 5, 10 i 20 kA

Wykresy zależności $u = f(i)$ ograniczników przepięć o parametrach zalecanych dla sieci rozdzielczych 15 kV, przedstawione na rysunku 4, uwidaczniają wpływ wartości napięć pracy ciągłej U_c , zależnych od sposobu połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią na poziom ochrony ograniczników.

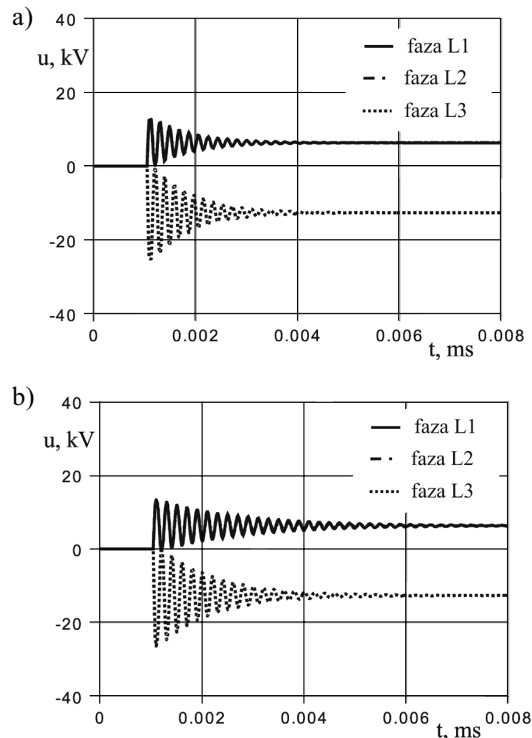
4. ANALIZA WPŁYWU OGRANICZNIKÓW NA NARAŻENIA TRANSFORMATORÓW OD PRZEPIĘĆ ŁĄCZENIOWYCH

Symulacje komputerowe obejmowały przepięcia generowane na zaciskach transformatora TrLk₂ podczas załączania i wyłączania linii kablowej zasilającej Lk₂ (rys. 1). Obliczenia wykonano przy założeniu, że transformator podczas czynności łączeniowych nie jest obciążony, a zamknięcie lub otwarcie biegunów wszystkich faz wyłącznika W (rys. 1) następuje jednocześnie.

Przebiegi przepięć doziemnych na zaciskach transformatora TrLk₂ podczas załączania linii zasilającej przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Na rysunku 6 zamieszczono przebiegi czasowe napięć fazowych po załączeniu linii kablowej Lk₂ o długości 1700 m, w przypadku gdy transformator jest chroniony ogranicznikami oraz po wyłączeniu ograniczników. Na rysunku 7 pokazano natomiast wykresy przepięć generowanych podczas załączania linii zasilającej o długości 5 m.



Rys. 6. Przebiegi napięć na zaciskach wejściowych transformatora TrLk₂ (rys. 1) po załączeniu linii Lk₂ o długości 1700 m (długość naturalna linii), gdy punkt neutralny sieci jest uziemiony przez rezystor: a) przepięcia na transformatorze chronionym ogranicznikami; b) przepięcia na transformatorze bez ochrony przepięciowej

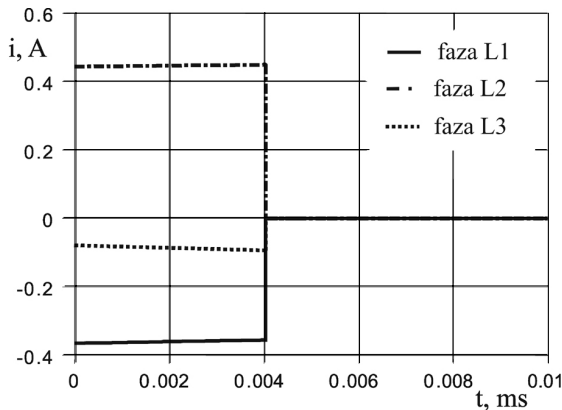


Rys. 7. Przebiegi napięć na zaciskach wejściowych transformatora TrLk₂ (rys. 1) po załączeniu linii Lk₂ o długości 5 m, w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor: a) przepięcia na transformatorze chronionym ogranicznikami; b) przepięcia na transformatorze bez ochrony przepięciowej

Z przedstawionych wyników obliczeń widać, że załączeniu linii zasilających transformatory towarzyszą napięcia chwilowe o charakterze drgań tłumionych o częstotliwości zależnej od długości linii zasilających. Ograniczniki tlenkowe praktycznie nie wpływają na takie przepięcia, gdyż ich wartości maksymalne są znacznie mniejsze od wartości napięć obniżonych ograniczników.

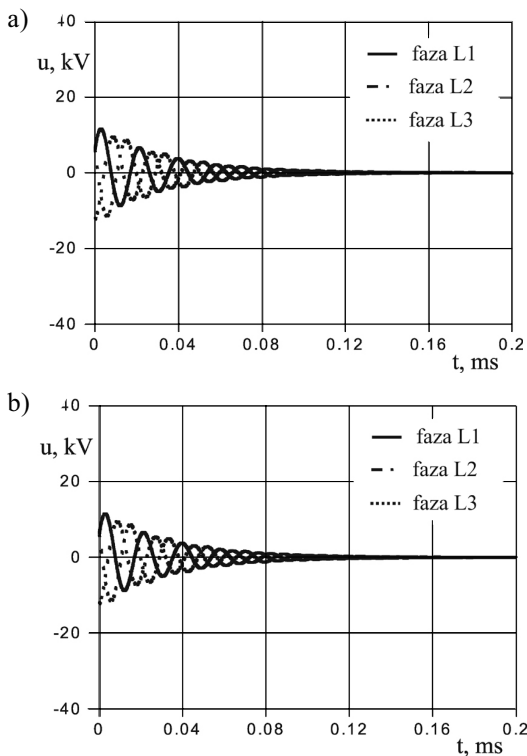
Wykonywano symulacje przepięć narażających układy izolacyjne wyłączanych transformatorów. Właściwości wyłączników przerywania prądów o wartościach różnych od zera uwzględniono w obliczeniach w programie EMTP-ATP przez zastosowanie modelu wyłączników umożliwiającego załączanie i wyłączanie poszczególnych biegunów w wybranych momentach czasowych. Model ten oprócz warunku czasowego otwarcia poszczególnych biegunów wyłącznika umożliwia również uwzględnienie warunku prądowego. Wybrane przebiegi prądów fazowych podczas wyłączania wyłącznikiem próżniowym transformatora TrLk₂ przedstawiono na rysunku 8.

Obliczenia przepięć wykonano przy różnych długościach linii zasilających transformatory. Zmiana długości linii wiąże się ze zmianą jej pojemności, która ma wpływ na wartości maksymalne przepięć. Przepięcia generowane podczas wyłączania transformatorów zasilanych liniami o dużych długościach są niewielkie. Potwierdzają to, przedstawione na rysunku 9, przebiegi przepięć wyznaczone na zaciskach transformatora Tr₂ (rys. 1) podczas wyłączania linii o długości 100 m.

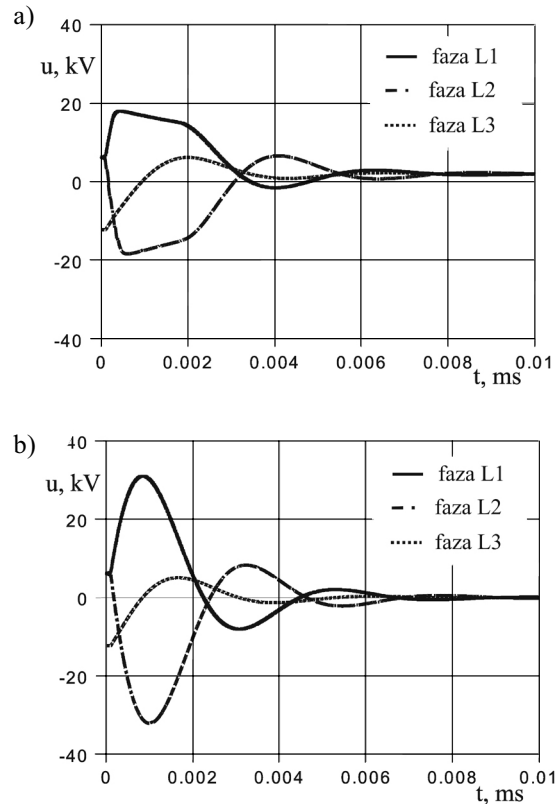


Rys. 8. Przebiegi prądów fazowych podczas wyłączania wyłącznikiem próżniowym W (rys. 1) transformatora TrLk₂ zasilanego linią o długości 5 m

Symulacje przepięć wykonano dla sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, gdzie stosowane są ograniczniki przepięć o napięciu pracy ciągłej $U_c=13$ kV. Wpływ długości linii na przepięcia uwiadcniają wyniki obliczeń przedstawione na rysunku 10, będące przebiegami czasowymi napięć na transformatorze podczas jego wyłączania. Obliczenia wykazują, że zmniejszenie długości linii zasilającej do 5 m powoduje wzrost przepięć generowanych na transformatorach podczas ich wyłączania do wartości około 30 kV (rys. 10).



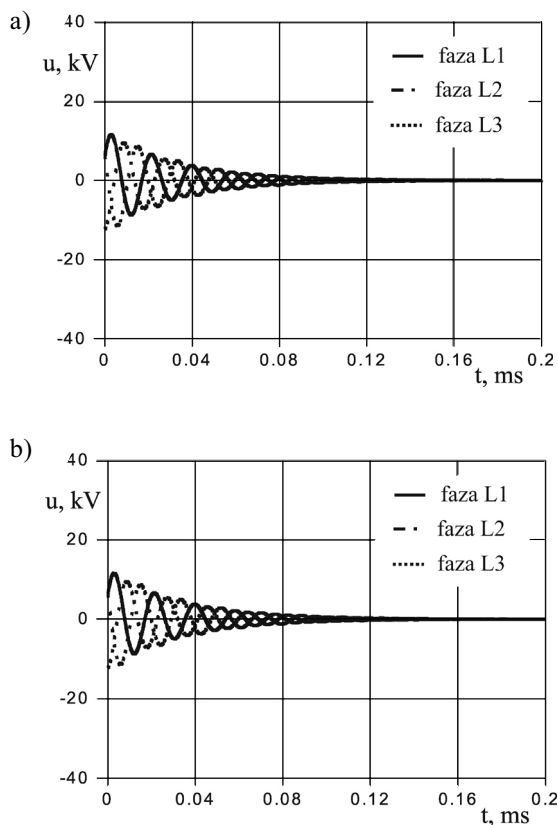
Rys. 9. Przepięcia doziemne na zaciskach wejściowych transformatora TrLk₂ (rys. 1) po wyłączeniu transformatora zasilanego linią Lk₂ o długości 100 m, w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor: a) przepięcia na transformatorze chronionym ogranicznikami; b) przepięcia na transformatorze bez ochrony przepięciowej



Rys. 10. Przepięcia doziemne na zaciskach wejściowych transformatora TrLk₂ (rys. 1) po wyłączeniu transformatora zasilanego linią Lk₂ o długości 5 m, w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor: a) przepięcia na transformatorze chronionym ogranicznikami; b) przepięcia na transformatorze bez ochrony przepięciowej

Przebiegi przepięć podczas wyłączania transformatora na biegu jałowym w sieci z punktem neutralnym izolowanym od ziemi, w których czas wyłączenia zwarcia doziemnego nie jest określony, przedstawiono na rysunkach 11 i 12. Na rysunku 11 zamieszczono przepięcia na transformatorze zasilanym linią kablową o długości 100 m, a na rysunku 12 – przepięcia generowane w przypadku wyłączenia linii zasilającej o długości 5 m. Wykresy na rysunkach 11a i 12a przedstawiają przebiegi przepięć na transformatorze z ochroną przepięciową, a na rysunkach 11b i 12b – przebiegi przepięć po wyłączeniu ograniczników tlenkowych.

Wykresy uwiadcniają odmiennosć przebiegów i różne wartości maksymalne przepięć narażających transformatory, zależne od sposobu połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią. Z wyników obliczeń widać, że wartości maksymalne przepięć narażających transformatory chronione ogranicznikami beziskiernikowymi w sieciach rozdzielczych z punktem neutralnym izolowanym od ziemi są znacznie większe od przepięć w sieciach z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor. Różnice te wynikają z różnych wartości parametrów ograniczników stosowanych w tych sieciach.



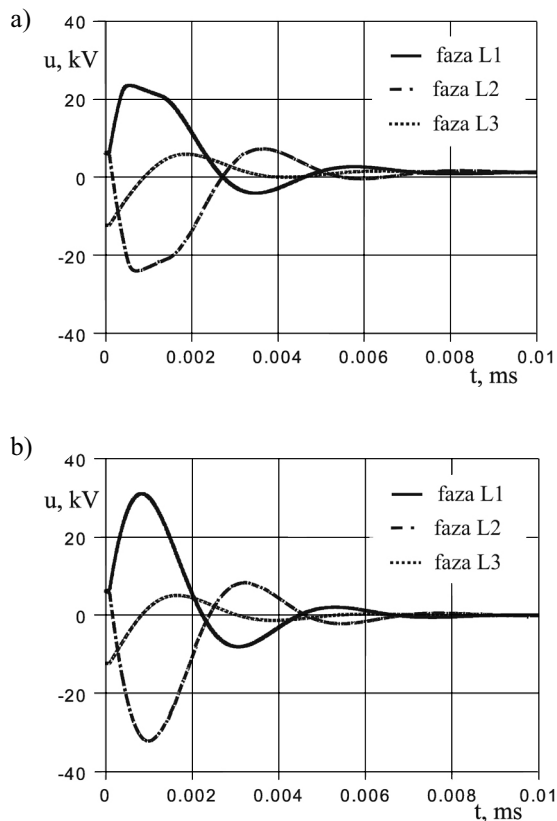
Rys. 11. Przepięcia doziemne na zaciskach wejściowych transformatora TrLk₂ (rys. 1) podczas wyłączenia transformatora zasilanego linią kablową Lk₂ o długości 100 m w sieci z punktem neutralnym izolowanym od ziemi:
a) przepięcia na transformatorze chronionym ogranicznikami;
b) przepięcia na transformatorze bez ochrony przepięciowej

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych symulacji komputerowych można stwierdzić, że załączanie i wyłączenie transformatorów powoduje chwilowy wzrost napięć, stanowiący narażenie układu izolacyjnego zewnętrznego i wewnętrznego. Transformatory są narażone na oddziaływanie przepięć o dużych wartościach maksymalnych, szczególnie podczas wyłączenia linii zasilających o niewielkich długościach. Wyniki symulacji komputerowych uwiadcniają także działanie ochronne ograniczników tlenkowych. Wartości maksymalne przepięć na chronionych transformatorach są uzależnione od parametrów ograniczników, wyznaczanych z uwzględnieniem sposobu połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią.

Literatura

- [1] Wróblewski Z.: *Badania i symulacja cyfrowa wybranych właściwości łączników próżniowych*. PAN, Komitet Elektrotechniki, Seria Wyd. Postępy Wysokich Napięć, Wrocław, Ofic. Wydawn. Polit. Wrocławskiej 2005
- [2] Kamikawaji T., Shioiri T., Funahashi T., Satch Y., Kaneko E., Ohshima I.: *An investigation into major factors in shunt capacitor switching performances by vacuum circuit breakers with copper-chro-*



Rys. 12. Przepięcia doziemne na zaciskach wejściowych transformatora TrLk₂ (rys. 1) po wyłączeniu transformatora zasilanego linią kablową Lk₂ o długości 5 m w sieci z punktem neutralnym izolowanym od ziemi:
a) przepięcia na transformatorze chronionym ogranicznikami;
b) przepięcia na transformatorze bez ochrony przepięciowej

- mium contacts*. IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 8, Nr 4, 1993, 1789–1795
- [3] Popov M., Acha E.: *Overvoltages due to switching off an unloaded transformer with a vacuum circuit breaker*. IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 14, Nr 4, October 1999, 317–322
- [4] Changping A., Wenxia S., Shiwei L., Leguan G.: *Vacuum circuit breaker overvoltage for interrupting unloaded transformer*. 12th Int. Symp. on High Voltage Engineering, 20–24 August 2001, Bangalore (India), paper 3.4
- [5] *Poradnik inżyniera elektryka, t. 3*. Warszawa, WNT 1997 (praca zbiorowa)
- [6] Arciszewski J., Komorowska I.: *Ochrona sieci elektroenergetycznych od przepięć*. Wskazówki wykonawcze. PTPiREE, Poznań, 1999
- [7] PN-IEC 600099-5 *Ograniczniki przepięć. Zalecenia doboru i stosowania*
- [8] *Ograniczniki przepięć z tlenków metali typu POLIM-S*. ABB Power Distribution Wyd. 08.2000 (strona internetowa: www.abb.pl)
- [9] ATPDRAW v.3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP User's Manual, 2002
- [10] IEEE Working Group 3.4.11: *Modeling of Metal Oxide Surge Arresters*. IEEE Trans. on PWRD, Vol. 7, No. 1, January 1992, 302–309
- [11] Furgał J.: *Analiza narażeń przepięciowych transformatora chronionego iskierkowymi i beziskierkowymi ogranicznikami przepięć*. Kraków, UWND AGH 2003

Wpłynęło: 27.04.2007



Jakub FURGAŁ

Absolwent Wydziału Elektrotechniki Górniczej i Hutniczej AGH. Od 1973 roku jest pracownikiem Katedry Elektroenergetyki AGH. Zajmuje się analizą narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych i ochroną przepięciową oraz problemami diagnostyki, szczególnie transformatorów energetycznych.

e-mail: furgal@agh.edu.pl



Marcin IBRAGIMOW

Absolwent Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH. Od roku 2005 pracownik Katedry Elektroenergetyki AGH. Zajmuje się analizą narażeń eksploatacyjnych urządzeń elektroenergetycznych.

e-mail: ibri@agh.edu.pl