

ANALIZA NARAŻEŃ PRZEPIĘCIOWYCH TRANSFORMATORÓW ŚREDNICH NAPIĘĆ GENEROWANYCH PODCZAS CZYNNOŚCI ŁĄCZENIOWYCH

Jakub FURGAŁ¹, Piotr PAJĄK²

1. Akademia Górniczo-Hutnicza, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel: 012 617 37 61 fax: (012) 634 57 21 e-mail: furgal@agh.edu.pl
2. Akademia Górniczo-Hutnicza, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel: 012 617 44 16 fax: (012) 634 57 21 e-mail: ppajak@agh.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę narażeń przepięciowych transformatorów rozdzielczych. Podstawą analizy były wyniki symulacji komputerowych oraz wyniki badań przepięć generowanych podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi. Analizowano wpływ ograniczników przepięć z tlenków metali na przepięcia łączeniowe.

Słowa kluczowe: transformatory, przepięcia łączeniowe, modelowanie matematyczne

1. WPROWADZENIE

Do łączenia urządzeń elektrycznych w sieciach średnich napięć coraz szersze zastosowanie znajdują wyłączniki próżniowe. Jednymi z tych urządzeń są transformatory rozdzielcze. Wyłączniki próżniowe charakteryzują się dużą trwałością łączeniową. Zakres czynności konserwacyjnych jest ograniczony, a eksploatacja, po zastosowaniu odpowiednich układów automatyki, może być prowadzona zdalnie.

Wyłączniki próżniowe wyróżniają jednak specyficzne właściwości, wpływające na narażenia przepięciowe układów izolacyjnych. Najważniejsze z nich to zdolność ucinania prądu przed naturalnym przejściem przez zero oraz zdolność wyłączania prądów wielkiej częstotliwości, a także szybki wzrost wytrzymałości elektrycznej powrotnej. Konsekwencją zjawisk w komorach próżniowych są przepięcia narażające układy izolacyjne urządzeń wyłączanych.

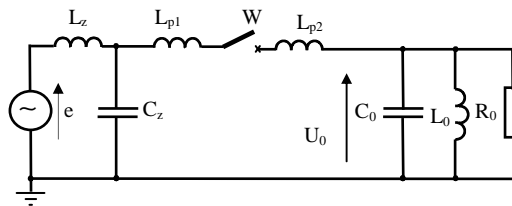
Równocześnie z coraz szerszym stosowaniem wyłączników próżniowych w sieciach elektrycznych są rozwijane badania zjawisk w komorach próżniowych towarzyszących czynnościom łączeniowym mających zasadniczy wpływ na przebiegi napięć i prądów w obwodach łączonych. Prowadzone są badania przepięć łączeniowych narażających układy izolacyjne urządzeń elektrycznych współpracujących z wyłącznikami próżniowymi [1-5]. Badania takie mają na celu poznanie charakteru przepięć i wyznaczenia wartości maksymalnych oraz sprawdzenie skuteczności stosowanych metod ich ograniczania.

W artykule przedstawiono analizę przepięć łączeniowych, powstających podczas wyłączania

transformatorów średniego napięcia. Podstawą analizy były wyniki symulacji komputerowych oraz wyniki badań przepięć.

2. MECHANIZM GENEROWANIA PRZEPIĘĆ ŁĄCZENIOWYCH W UKŁADACH Z WYŁĄCZNIKAMI PRÓŻNIOWYMI

Przebiegi i wartości maksymalne przepięć generowanych podczas wyłączania urządzeń elektrycznych wyłącznikami próżniowymi w dużym stopniu są zależne od zdolności takich wyłączników do ucinania prądu przed naturalnym przejściem przez zero. Ucinanie prądu w komorach próżniowych wyłączników jest konsekwencją szybkiego zgaszenia łuku elektrycznego w fazie jego niestabilnego palenia się, w której przy niewielkich wartościach chwilowych prądu łuku pojawia się składowa niestabilna prądu o dużej częstotliwości, płynąca w obwodzie $W-L_{p2}-C_0-C_z-L_{p2}$ (rys. 1) nakładająca się na składową podstawową prądu o częstotliwości sieciowej.



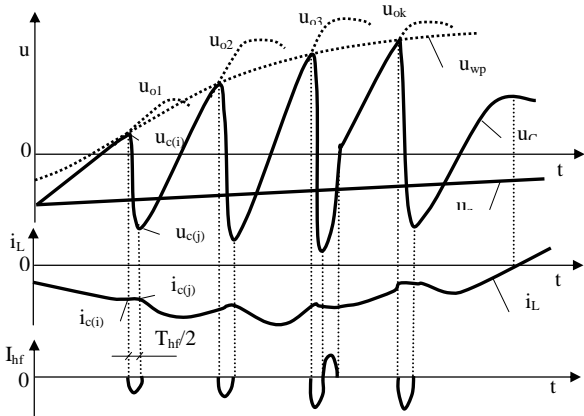
Rys. 1. Schemat zastępczy obwodu z wyłącznikiem próżniowym [1]

Prąd o dużej częstotliwości może zrównoważyć prąd o częstotliwości sieciowej wyłączanego obwodu i spowodować nagłe zmniejszenie wartości chwilowej prądu w obwodzie do wartości zbliżonej do zera. W takich warunkach następuje przerwanie obwodu przy niezerowej wartości prądu składowej podstawowej (prąd ucięcia), płynącego przez indukcyjność obciążenia L_0 . Jest to tzw. wirtualne ucięcie prądu [1,2].

Ze względu na bardzo szybkie odzyskiwanie wytrzymałości elektrycznej przerwy międzystykowej, ponowne zapłony łuku elektrycznego zwykle nie występują w łącznikach próżniowych. Jeżeli jednak wystąpią, to powodują one zwiększenie przepięć łączeniowych. Wartości przepięć w takich przypadkach mogą znacznie przekraczać wartości napięć wynikające z energii zgromadzonej w wyłączanym urządzeniu w chwili ucięcia prądu.

Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi prądów i napięć w

wyłączanym obwodzie (rys. 1) podczas ponownych zapłonów łuku w wyłączniku [1,2]. Po ucięciu prądu w wyłączniku (chwila $t = 0$) prąd ($i_L \approx I_L$) w indukcyjności L_0 płynie nadal przez pojemność C_0 , powodując na jej zaciskach szybką zmianę napięcia u_0 . Jednocześnie wzrasta napięcie powrotne pomiędzy stykami wyłącznika, będące różnicą napięcia zasilania u_z i napięcia wyłączanego obwodu $u_0 \approx u_C$. Przy powolnym wzroście wytrzymałości przerwy między stykami u_{wp} i szybkim narastaniu napięcia powrotnego ($u_0 \approx u_C$) może wystąpić ponowny zapłon łuku. Towarzyszy temu



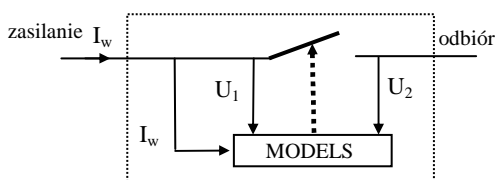
Rys. 2. Przebiegi prądu i_{hf} łącznika próżniowego, prądu i_L w indukcyjności L_0 , napięcia sieci u_z , napięcia u_C na odbiorniku i wytrzymałości powrotnej u_{wp} łącznika [2]

przepływ prądu wysokiej częstotliwości w obwodzie C_z - W - L_0 - C_0 (rys. 1) i bardzo szybkie przeładowanie pojemności C_0 do wyższego napięcia $u_{C(j)}$, jeśli prąd wysokiej częstotliwości zostaje wyłączony przy pierwszym przejściu przez zero. W krótkim czasie palenia się łuku ($T_{hf}/2 = t_{whf}$) prąd i_L nie zdąży zmienić swej wartości, $i_{L(i)} \approx i_{L(j)}$. Jeśli w takiej sytuacji napięcie $u_{C(j)}$ na pojemności C_0 po zgaśnięciu łuku jest większe od napięcia $u_{C(i)}$ w chwili zapłonu łuku, to zgromadzona w elementach L_0 i C_0 zwiększa się. W konsekwencji tego zwiększać się będą również wartości maksymalne napięcia spodziewanego na zaciskach wyłączanego obwodu.

3. METODA SYMULACJI PRZEPIĘĆ

Wykonano symulacje przepieć generowanych na zaciskach transformatora średniego napięcia podczas jego wyłączania. Zastosowano w tym celu program komputerowy Electromagnetic Transients Program – Alternative Transients Program (EMTP/ATP) [6]. Do modelowania linii zasilających zastosowano procedurę JMARTI. Model transformatora generowano przy zastosowaniu procedury SATURABLE.

Model wyłączników próżniowych, uwzględniający zjawiska zachodzące w komorze próżniowej podczas wyłączania urządzeń, przedstawiono schematycznie na rysunku 3.



Rys. 3. Model wyłącznika próżniowego

Ma on postać idealnego wyłącznika, zamykającego się w momencie, gdy napięcie na nim jest większe od napięcia przeskoku wyłącznika, a otwierającego się w momencie, gdy prąd jest mniejszy od prądu ucięcia. Mechanizm kontrolujący pracę wyłącznika został zaprogramowany przy użyciu języka programowania MODELS, będącego wewnętrznym środowiskiem programowania EMTP-ATP.

Zastosowany model wyłącznika próżniowego uwzględnia prąd ucięcia wyłącznika, napięcie wytrzymałowe przerwy próżniowej oraz zdolność gaszenia łuku przy wysokiej częstotliwości. Wartość prądu ucięcia przy częstotliwości 50 Hz wyrażono wzorem (1)

$$I_{ch} = (2 \pi f i \alpha \beta)^q \quad (1)$$

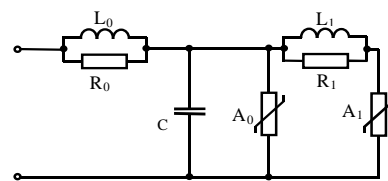
gdzie: f - częstotliwość źródła zasilania,
 i - natężenie prądu obciążenia,
 α, β, q - współczynniki ($\alpha = 6,2 \cdot 10^{-16}$; $\beta = 14,3$;
 $q = -0,07512$).

Prądy obliczone za pomocą wyrażenia (1) odpowiadają prądom ucięcia w wyłącznikach próżniowych ze stykami miedziowo-chromowymi. Istotny wpływ na przepięcia ma również prędkość otwarcia wyłącznika oraz zdolność gaszenia łuku. Pierwsza wielkość wpływa na prędkość wzrostu napięcia wytrzymałwanego, natomiast druga – na gaszenie łuku przy wysokich częstotliwościach. W modelu napięcie wytrzymałwane przerwy międzystykowej wyłącznika uzależniono liniowo od odległości pomiędzy stykami i zapisano wzorem

$$U_d = E_{kr} v t \quad (2)$$

gdzie: E_{kr} - wytrzymałwane natężenie pola elektrycznego między stykami,
 v - prędkość rozłączania styków,
 t - czas symulacji [4].

Po ucięciu prądu, gdy przejściowe napięcie powrotne przekroczy napięcie wytrzymałwane pomiędzy stykami otwierającego się wyłącznika, następuje zapłon powtórny łuku w wyłączniku. Kolejne otwarcie wyłącznika zachodzi wówczas, gdy wartość prądu jest mniejsza od wartości przy której następuje zgaszenie prądu wysokiej częstotliwości.



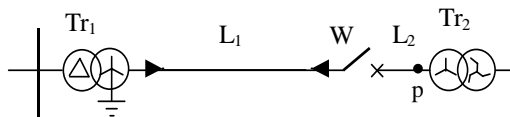
Rys. 4. Schemat zastępczy ograniczników przepieć z tlenków metali

W obliczeniach przepieć łączeniowych ograniczniki przepieć z tlenków metali, stosowane do ochrony przepięciowej transformatora, zastępowano modelem przedstawionym na rysunku 4 [7].

4. CHARAKTERYSTYKA UKŁADU DOŚWIADCZALNEGO

Przeprowadzono analizę przepieć narażających układ izolacyjny transformatora średniego napięcia podczas wyłączania transformatora średniego napięcia. Podstawą analizy były wyniki symulacji oraz wyniki badań przepieć w

układzie przedstawionym na rysunku 5, stanowiącym fragment sieci średniego napięcia. Zawiera on

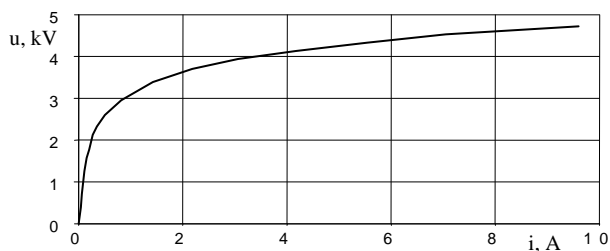


Rys. 5. Schemat układu do badań przebiegów łączeniowych w transformatorze: Tr_1 - transformator zasilający typu TNOSCT-250/15.75PNS, L_1 - linia kablowa, L_2 - szynoprzewody o długości 2 m, W - wyłącznik próżniowy, Tr_2 - transformator doświadczalny typu TOC 20/10, p - punkt rejestracji napięcia

transformator zasilający Tr_1 linię kablową zasilającą L_1 , szynoprzewody L_2 oraz transformator doświadczalny Tr_2 . Podstawowe parametry transformatorów i wyłącznika zamieszczono w tabelach 1 i 2. Linia L_1 jest wykonana przy użyciu kabla o długości 80 m, a linia L_2 ma postać przewodów o długości 2 m.

Tabela 1. Podstawowe parametry transformatorów stosowanych w stanowisku doświadczalnym

parametr/typ	TNOSCT-250/15.75PNS	TOC 20/10
S_n , kVA	250	20
U_n , kV	15,75/0,4	6/0,4
U_z , %	4,5	4,29
ΔP_{Fe} , kW	0,486	0,02-
ΔP_{Cu} , kW	3,509	0,22
I_0 , %	1,0	0,54



Rys. 6. Charakterystyka magnesowania transformatora średniego napięcia typu TOC 20/10

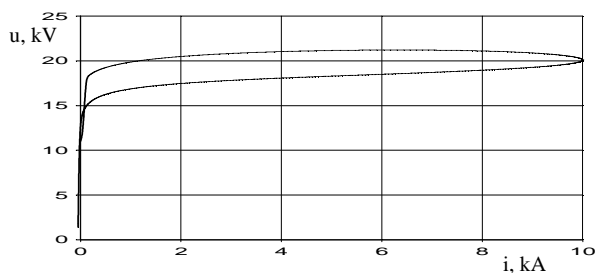
Tabela 2. Parametry wyłącznika próżniowego typu VD4

parametr	jednostka	wartość
napięcie znamionowe	kV	12
wytrzymywane natężenie pola	kV mm ⁻¹	12
szybkość rozchodzenia się styków	m s ⁻¹	1
maksymalny odstęp pomiędzy stykami	mm	5
prąd ucięcia wielkiej częstotliwości	A	0.125

Tablica 3. Napięcia obniżone ograniczników przepięć z tlenków metali typu POLIM-D 7,5 [8]

typ ogranicznika	U_n	U_c	napięcie obniżone przy udarach prądowych				
			8/20μs			30/60μs	
			5 kA	10 kA	20 kA	0,5 kA	2 kA
kV							
POLIM-D	7,5	6	19,6	21,0	23,9	16,6	18,2

Parametry ograniczników przepięć, o napięciu znamionowym 7,5 kV, stosowanych w sieciach 6 kV z uziemionym punktem neutralnym przez rezystor lub cewkę przedstawiono w tabeli 3. Zależność dynamiczną $u=f(i)$ dla udaru 8/20 μs tych ograniczników, wyznaczoną przy zastosowaniu schematu ograniczników pokazanego na rysunku 4, przedstawiono na rysunku 7.

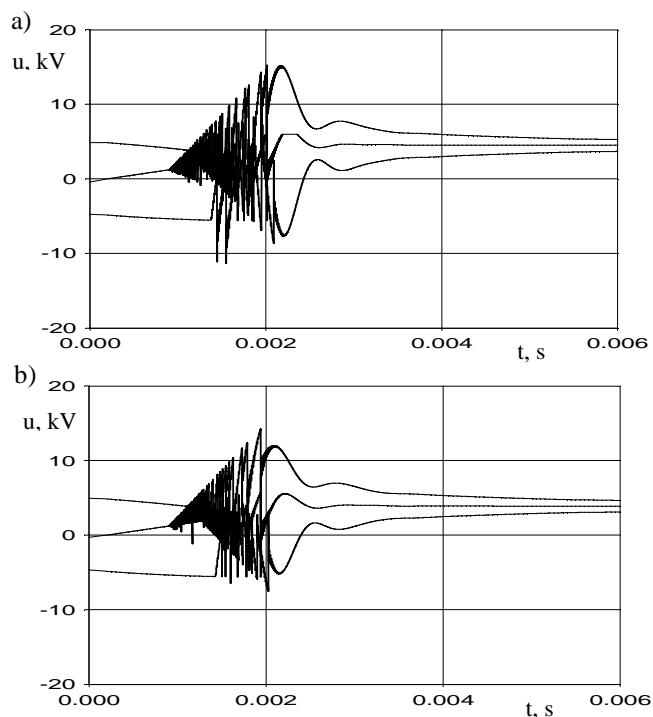


Rys. 7. Zależność dynamiczna napięciowo-prądowa dla udaru prądowego 10 kA 8/20 μs ogranicznika typu POLIM-D, wyznaczona przy zastosowaniu schematu zastępczego ograniczników (rys. 4)

Celem wykonanych badań teoretycznych i eksperymentalnych była analiza porównawcza wyników symulacji przepięć generowanych podczas wyłączania transformatorów, uzyskanych przy zastosowaniu przedstawionego modelu wyłączników próżniowych, z wynikami doświadczeń oraz analiza wpływu ograniczników przepięć na przebiegi takich przepięć.

5. WYNIKI SYMULACJI PRZEPIĘĆ

Symulacje komputerowe obejmowały przepięcia doziemne generowane na zaciskach transformatora Tr_2 podczas jego wyłączania na biegu jałowym. Przykładowe wyniki symulacji przepięć podczas wyłączania transformatora bez ochrony przepięciowej przedstawiono na rysunku 8a, natomiast wyniki symulacji, wykonane dla transformatora z ogranicznikami przepięć, pokazano na rysunku 8b.



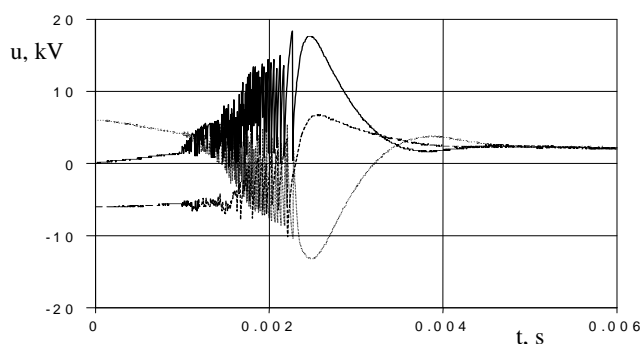
Rys. 8. Przebiegi teoretyczne przepięć na zaciskach wejściowych transformatora Tr_2 (rys. 1) po jego wyłączeniu (rys. 3): a - przepięcia doziemne na zaciskach transformatora bez ochrony przepięciowej, b - przepięcia na zaciskach transformatora chronionego ogranicznikami

Z obliczeń przebiegów przepięć, powstających podczas wyłączania transformatora wyłącznikami próżniowymi wynika, że układ izolacyjny transformatora jest narażony wówczas na

oddziaływanie prądów o wartościach znacznie większych od wartości maksymalnych napięcia roboczego. Przepięcia te mają charakter oscylacyjny, wynikający z przeskoków pomiędzy stykami otwieranego wyłącznika próżniowego. Przeprowadzone obliczenia potwierdzają także, że ograniczniki przepięć z tlenków metali zmniejszają wartości maksymalne przepięć łączeniowych. Nie mają one jednak istotnego wpływu na zmianę przebiegów tych przepięć i nie powodują tłumienia składowych oscylacyjnych przepięć.

6. WYNIKI BADAŃ

Wyniki badań eksperymentalnych mają postać przebiegów przepięć na zaciskach wejściowych transformatora Tr_2 bez ograniczników przepięć (rys. 2) podczas jego wyłączania. Przebiegi przepięć na rysunku 9.



Rys. 9. Przebiegi doświadczalne przepięć doziemnych na zaciskach wejściowych transformatora średniego napięcia Tr_2 bez ograniczników przepięć (punkt p) (rys. 3), wyłączanego przy zastosowaniu wyłącznika próżniowego

7. PODSUMOWANIE

Podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi następuje wzrost narażeń układów izolacyjnych od przepięć generowanych na zaciskach wejściowych uzwojeń. Wartości maksymalne przepięć

powstających podczas wyłączania transformatorów są zależne od przebiegu zjawisk wewnątrz komór wyłączników oraz zjawisk przejściowych w układzie elektrycznym. Symulacje przepięć łączeniowych, potwierdzają, że przedstawiony model wyłączników próżniowych umożliwia wyznaczanie przepięć generowanych podczas wyłączania urządzeń takimi wyłącznikami. Ograniczniki przepięć z tlenków metali zmniejszają wartości maksymalne przepięć łączeniowych, ale nie mają zasadniczego wpływu na składowe oscylacyjne takich przepięć.

LITERATURA

- [1] Wróblewski Z.: Badania i symulacja cyfrowa wybranych właściwości łączników próżniowych. PAN: Komitet Elektrotechniki, Seria Wydaw.: Postępy Techniki Wysokich Napięć, t. 25, Ofic. Wydaw. Pol. Wrocławskiej, 2005, ISBN: 8370858724
- [2] Popov M., Acha E.: Overvoltages due to switching off an unloaded transformer with a vacuum circuit breaker. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, Nr 4, October 1999, pp. 317 - 1322, ISSN: 0885-8977
- [3] 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
- [4] Popov M., van der Sluis L.: Improved calculations for no-load transformer switching surges. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.16, No. 3, July 2001. pp. 401 - 408, ISSN: 0885-8977
- [5] Wong S. M., Snider L. A., Loi E. W.: Overvoltages and reignition behavior of vacuum circuit breaker. Int. Conf. on Power Systems Transients IPST'2003, 28 Sept.-2 Oct. 2003, New Orleans (USA), paper 14a.3
- [6] ATPDRAW v.3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP User's Manual, 2002
- [7] IEEE Working Group 3.4.11: Modeling of metal oxide surge arresters. IEEE Trans. on PWRD, Vol. 7, No. 1, Jan. 1992, pp. 302 - 309
- [8] Ograniczniki przepięć z tlenków metali typu POLIM - D. ABB Power Distribution, Wyd. 08.2000 (strona internetowa: www.abb.pl)

ANALYSIS OF OVERVOLTAGE RISKS OF MEDIUM VOLTAGE TRANSFORMERS GENERATED DURING SWITCHING OPERATIONS

Key words: transformers, switching overvoltages, mathematical modelling

The paper presents analysis of overvoltage risks of transformers. This analysis is based on results of computer simulation and the investigations results of overvoltages generated during switching off by vacuum breakers. Influence of metal oxide surge arresters was analysed on base of the investigation results.