

ANALIZA PRZEPIĘĆ PODCZAS ŁĄCZENIA TRANSFORMATORÓW WYŁĄCZNIKAMI PRÓŻNIOWYMI

Jakub FURGAŁ¹, Piotr PAJĄK²

1. Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel: (12) 617 37 61 fax: (12) 634 57 21 e-mail: furgal@agh.edu.pl
2. Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel: (12) 617 44 16 fax: (12) 634 44 16 e-mail: ppajak@agh.edu.pl

Streszczenie: Do łączenia urządzeń elektrycznych w sieciach średnich napięć, coraz szersze zastosowanie znajdują wyłączniki próżniowe. Wyróżniają je duża trwałość łączeniowa oraz ograniczony zakres czynności konserwacyjnych. Wyłączniki próżniowe posiadają specyficzne właściwości, wpływające na narażenia przepięciowe układów izolacyjnych łączonych urządzeń. Najważniejsze z nich to zdolność ucinania prądu przed naturalnym przejściem przez zero oraz zdolność wyłączenia prądów wielkiej częstotliwości. Konsekwencją tych właściwości są przepięcia łączeniowe, o znacznych wartościach maksymalnych, zawierające składowe oscylacyjne tłumione o zróżnicowanych częstotliwościach. W artykule przedstawiono wyniki badań przepięć powstających podczas łączenia transformatorów rozdzielczych wyłącznikami próżniowymi. Na podstawie wyników badań szczegółowo analizowano przebiegi przepięć łączeniowych, stanowiących narażenia układów izolacyjnych.

Słowa kluczowe: transformatory, wyłączniki próżniowe, przepięcia łączeniowe, częstotliwości składowych przejściowych

1. WPROWADZENIE

Coraz częściej w sieciach średniego napięcia są stosowane wyłączniki próżniowe. Wyłączniki takie mają wiele zalet, wśród których wyróżniane są: duża trwałość łączeniowa oraz praktycznie bezobsługowa eksploatacja. Posiadają one zdolność do wyłączenia prądów o dużej częstotliwości oraz szybki wzrost wytrzymałości powrotnej, mające wpływ na narażenia układów izolacyjnych od przepięć powstających podczas wyłączenia urządzeń. Skutkiem takich właściwości wyłączników jest wyłączenie urządzeń przed naturalnym przejściem prądu przez zero. Powoduje to powstawanie przepięć o znacznych wartościach maksymalnych podczas łączenia urządzeń o charakterze indukcyjnym, takich jak np. transformatory, dławiki, maszyny elektryczne. Prowadzone są badania zjawisk zachodzących w komorach wyłączników próżniowych, wpływające na przebiegi prądów w łączonych obwodach i przepięć łączeniowych [1,2]. Celem badań jest doskonalenie konstrukcji wyłączników i analiza narażeń układów izolacyjnych urządzeń w sieciach elektrycznych z wyłącznikami próżniowymi. Narażenia układów

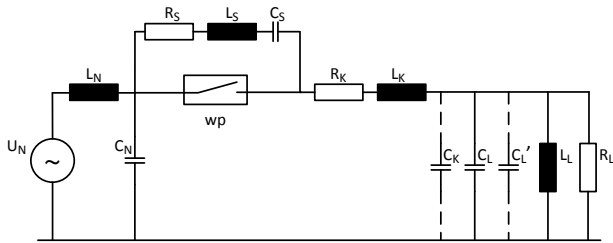
izolacyjnych są zależne od wartości maksymalnych przepięć, ich przebiegów oraz skuteczności ochrony przepięciowej, którą obecnie stanowią głównie ograniczniki przepięć z tlenków metali. Reakcja transformatorów, maszyn elektrycznych na przepięcia łączeniowe pojawiające się na zaciskach wejściowych tych urządzeń, zależy od kształtów oraz od wartości maksymalnych tych przepięć. Przebiegi przepięć są zróżnicowane i zależne od konfiguracji układów elektrycznych oraz parametrów urządzeń.

W artykule przeprowadzono analizę przepięć narażających układ izolacyjny transformatora średniego napięcia podczas wyłączenia transformatora pracującego na biegu jałowym. Podstawą analizy były wyniki badań przepięć podczas wyłączenia transformatora w typowym układzie elektrycznym z wyłącznikiem próżniowym. Szczegółowo analizowano wpływ parametrów urządzeń na częstotliwości składowych przejściowych napięcia, powstających podczas wyłączenia transformatora rozdzielczego.

2. ZJAWISKA PRZEJŚCIOWE PODCZAS WYŁĄCZANIA URZĄDZEŃ WYŁĄCZNIKAMI PRÓŻNIOWYMI

Przebiegi i wartości maksymalne przepięć generowanych podczas wyłączenia urządzeń elektrycznych wyłącznikami próżniowymi w dużym stopniu są zależne od zjawisk zachodzących w komorach wyłączników próżniowych. Szczególnie ucinanie prądu, będące efektem szybkiego gaszenia łuku elektrycznego, wpływa na przepięcia łączeniowe powstające podczas łączenia urządzeń o charakterze indukcyjnym. Prąd jest ucinany w momencie, gdy prąd o dużej częstotliwości powoduje zrównoważenie prądu o częstotliwości sieciowej wyłączanego obwodu. Następuje wówczas nagłe zmniejszenie wartości chwilowej prądu w obwodzie do wartości zbliżonej do zera. W takich warunkach następuje przerwanie obwodu przy niezerowej wartości prądu składowej podstawowej, płynącego przez indukcyjność obciążenia [2,5].

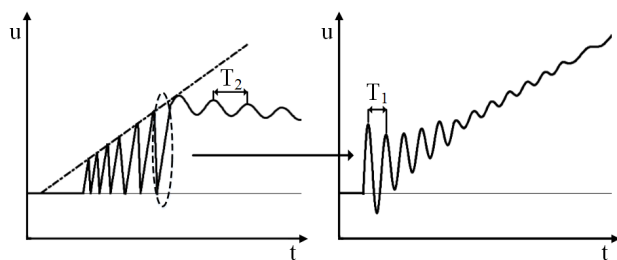
Na rysunku 1 przedstawiono schemat jednofazowy typowego układu sieci średniego napięcia z wyłącznikiem próżniowym z zaznaczonymi parametrami elektrycznymi urządzeń.



Rys. 1. Schemat jednofazowy typowego układu elektrycznego z wyłącznikiem próżniowym do badań przepięć podczas wyłączania transformatorów: U_N – napięcie źródła zasilania; L_N, C_N – indukcyjność i pojemność sieci zasilającej; L_K, R_K – indukcyjność i rezystancja kabla zasilającego transformator; C_L – suma pojemności linii kablowej C_K i transformatora C_L' ; C_L, L_L, R_L – pojemność wejściowa, indukcyjność transformatora i rezystancja reprezentująca straty transformatora; R_S, L_S, C_S – parametry wyłącznika próżniowego wp [1,3]

W wyłącznikach próżniowych, ze względu na bardzo szybkie odzyskiwanie wytrzymałości elektrycznej przerwy międzystykowej, ponowne zapłony łuku elektrycznego zwykle nie występują. 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. Po ucięciu prądu w wyłączniku próżniowym prąd nadal płynie przez indukcyjności L_K i L_L oraz pojemność C_L , powodując szybką zmianę napięcia na zaciskach urządzenia wyłączanego i wyłącznika próżniowego. Jednocześnie wzrasta napięcie powrotne pomiędzy stykami wyłącznika, będące różnicą napięcia zasilania i napięcia wyłączanego obwodu. Przy powolnym wzroście wytrzymałości przerwy między stykami wp i szybkim narastaniu napięcia powrotnego może wystąpić ponowny zapłon łuku. Zapłony powtarzają się wielokrotnie do momentu, gdy wytrzymałość elektryczna przerwy między stykami jest większa od wartości napięcia powrotnego na wyłączniku.

Typowy przebieg napięcia na odbiorniku wyłączanym podczas ponownych zapłonów łuku w wyłączniku próżniowym przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Typowy przebieg napięcia powrotnego podczas wyłączania urządzenia o charakterze indukcyjnym za pomocą wyłącznika próżniowego: $f_1 = 1/T_1$, $f_2 = 1/T_2$ – częstotliwości składowych napięcia [1]

Przebieg napięcia powrotnego, pojawiający się między stykami wyłącznika bezpośrednio po ucięciu prądu, zależy od parametrów układu. Zawiera on dwie typowe składowe przejściowe o różnych częstotliwościach f_1 i f_2 (rys. 2) [4]. W momencie, gdy pojawiają się ponowne zapłony na wyłączniku, indukcyjność obciążenia nieznacznie wpływa na składową wysokiej częstotliwości f_1 . Składowa ta jest

wymuszona poprzez pojemność kabla i obciążenia, pojemność źródła zasilania, pojemność przerwy między stykami wyłącznika, indukcyjność szyn oraz kabla od strony zasilania. Jeżeli uwzględnimy następujące zależności: $C_N \gg C_L$ oraz $L_S \ll L_K$, wówczas wzór na częstotliwość f_1 ma następującą postać:

$$f_1 = \left(2\pi \sqrt{L_K \frac{C_S C_L}{C_S + C_L}} \right)^{-1} \quad (1)$$

gdzie: L_K – indukcyjność linii kablowej, C_S – pojemność między stykami otwartego wyłącznika, C_L – suma pojemności linii kablowej oraz obciążenia (rys. 1).

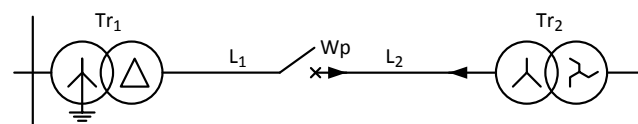
Częstotliwość f_1 zawiera się w zakresie do kilku megaherców. Druga częstotliwość f_2 jest znacznie niższa i zależy od parametrów wyłączanego urządzenia. Jest to częstotliwość naturalna drgań własnych obciążenia, której wartość mieści się w zakresie kilku kiloherców. Jej wartość można wyznaczyć z zależności:

$$f_2 = \left(2\pi \sqrt{L_L C_L} \right)^{-1} \quad (2)$$

gdzie: L_L – indukcyjność obciążenia, C_L – suma pojemności linii kablowej oraz obciążenia (rys. 1).

3. CHARAKTERYSTYKA UKŁADU DOŚWIADCZALNEGO

Przeprowadzono analizę przepięć narażających układ izolacyjny transformatora średniego napięcia podczas wyłączania wyłącznikiem próżniowym. Podstawą analizy były wyniki rejestracji przepięć w stanowisku doświadczalnym, stanowiącym typowy fragment sieci rozdzielczej średniego napięcia, którego schemat przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska do badań przepięć łączeniowych w transformatorze: Tr_1 – transformator zasilający typu TNOSCT-250/15,75PNS, L_1 – szynoprzewody o długości 2 m, L_2 – linia kablowa o długości 80m, Wp – wyłącznik próżniowy, Tr_2 – transformator doświadczalny typu TOC 20/10

Układ doświadczalny zawiera transformator zasilający Tr_1 , szynoprzewody L_1 , linię kablową zasilającą L_2 , oraz transformator doświadczalny Tr_2 . Podstawowe parametry transformatorów i wyłącznika zamieszczono w tablicach 1 i 2.

Tablica 1. Podstawowe parametry transformatorów stosowanych w układzie doświadczalnym (rys.3)

parametr/typ	TNOSCT-250/15.75 PNS	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

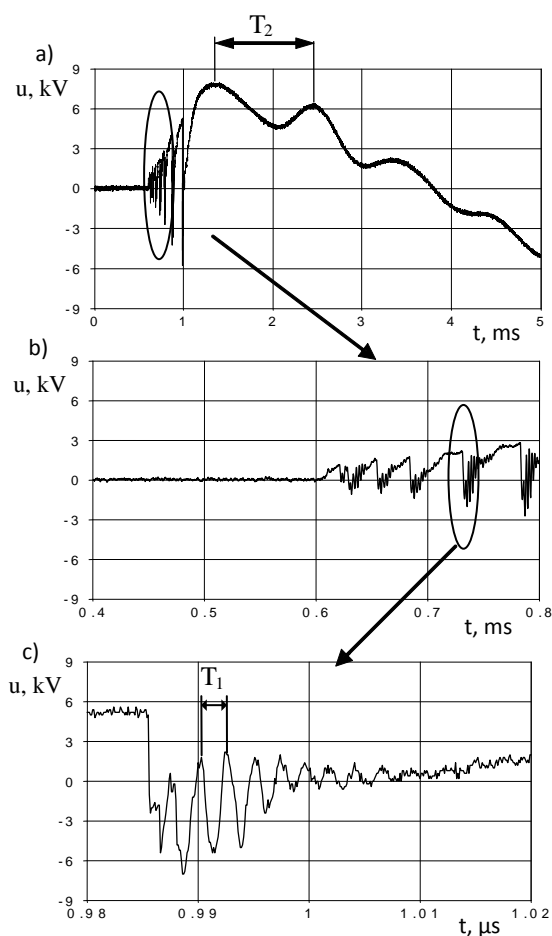
Tablica 2. Parametry wyłącznika próżniowego typu VD4

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	m m	5
prąd ucięcia wielkiej częstotliwości	A	0.125

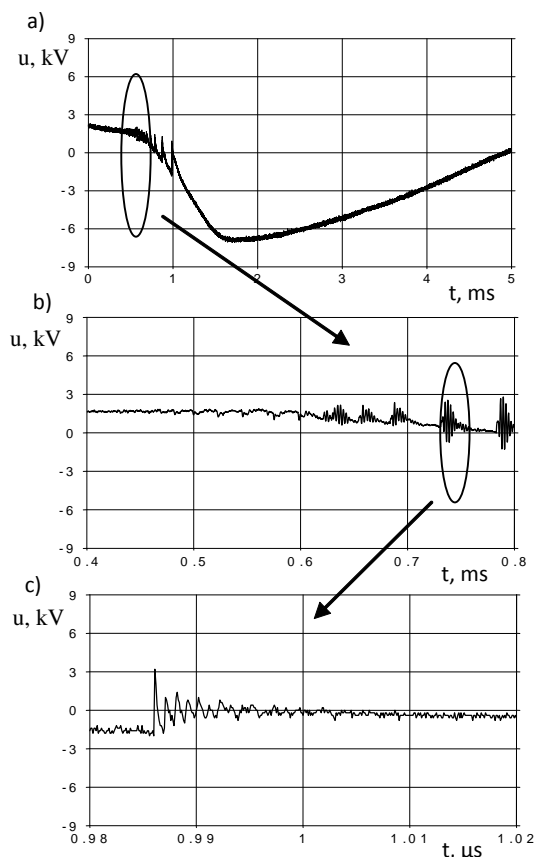
Linie zasilającą L_2 stanowi kabel o długości 80 m, natomiast szynoprzewody L_1 mają postać przewodów sztywnych o długości 2 m.

4. WYNIKI REJESTRACJI PRZEPIĘĆ

Wykonano rejestracje przebiegów przepięć doziemnych na zaciskach wyłącznika próżniowego oraz transformatora rozdzielczego 20 kVA Tr_2 podczas wyłączania transformatora na biegu jałowym. Wyniki rejestracji napięcia powrotnego na wyłączniku próżniowym podczas wyłączania transformatora przedstawiono na rysunku 4. Wykres pokazuje przebieg napięcia między biegunami jednej fazy wyłącznika. Kolejne rysunki, oznaczone literami 4b i 4c pokazują w różnych przedziałach czasowych fragmenty przebiegu napięcia zamieszczonego na rysunku 4a.



Rys. 4. Wyniki rejestracji napięcia między stykami wyłącznika próżniowego podczas wyłączania transformatora rozdzielczego 20 kVA (rys. 3, tab. 1): b,c – fragmenty przebiegu zamieszczonego na rysunku a, wyznaczone w różnych przedziałach czasowych



Rys. 5. Wyniki rejestracji przepięć doziemnych na zaciskach jednej fazy transformatora podczas wyłączania transformatora rozdzielczego 20 kVA wyłącznikiem próżniowym: b,c – fragmenty przebiegu zamieszczonego na rysunku a wyznaczone w różnych przedziałach czasowych

Wyniki rejestracji przebiegów przepięć doziemnych na zaciskach wejściowych uzwojenia jednej fazy transformatora podczas wyłączania transformatora na biegu jałowym wyłącznikiem próżniowym przedstawiono na rysunku 5. Wykresy przedstawiają przebiegi przepięć na wyłączanym transformatorze w tych samych przedziałach czasowych, dla których rejestrowano przepięcia na wyłączniku próżniowym (rys. 4). Przebiegi przepięć na transformatorze wyłączanym są odmienne niż przebiegi przepięć na wyłączniku próżniowym. Przepięcia na transformatorze są efektem zjawisk przejściowych w układzie zawierającym transformator wyłączany i kabel i są spowodowane napięciami przejściowymi na wyłączniku podczas procesu wyłączania.

Z analizy przebiegów doświadczalnych przepięć wynika, że częstotliwość f_1 przepięć na wyłączniku próżniowym w układzie doświadczalnym, którego schemat zamieszczono na rysunku 3, wynosi 400 kHz, a częstotliwość f_2 wynosi 1 kHz.

5. WYNIKI OBLICZEŃ CZĘSTOTLIWOŚCI SKŁADOWYCH PRZEJŚCIOWYCH PRZEPIĘĆ

Wykonano obliczenia częstotliwości składowych przejściowych przepięć, powstających podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi. Obliczenia wykonano wykorzystując wzory (1) i (2). W celu obliczeń wyznaczono parametry elektryczne urządzeń stanowiska pomiarowego przedstawionego schematycznie na rysunku 3. Parametry zamieszczone w tablicy 3.

Tablica 3. Parametry elektryczne urządzeń stanowiska doświadczalnego (rys. 3) przedstawione na schemacie zastępczym układu na rysunku 1

urządzenie\ parametr	R	L	C
zasilanie	–	$L_N = 5 \text{ mH}$	$C_N = 0,1 \mu\text{F}$
wyłącznik	$R_S = 50 \Omega$	$L_S = 50 \text{ nH}$	$C_S = 28 \text{ pF}$
kabel	$R_K = 0,6 \Omega$	$L_K = 1,128 \text{ mH}$	$C_K = 9,65 \text{ nF}$
obciążenie	$R_L = 23 \Omega$	$L_L = 218 \text{ mH}$	$C_L' = 1 \text{ nF}$

Wyniki obliczeń częstotliwości f_1 i f_2 zamieszczono w tablicy 4, łącznie z wartościami częstotliwości wyznaczonymi na podstawie rejestracji przebiegów.

Tablica 4. Charakterystyczne częstotliwości f_1 i f_2 przebiegów przebiegów podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi wyznaczone na podstawie przeprowadzonych badań i obliczeń

częstotliwość	wynik pomiarów	wynik obliczeń
f_1 , kHz	400	338,2
f_2 , kHz	1	4,45

Z porównania częstotliwości f_1 i f_2 składowych przejściowych przebiegów powstających podczas wyłączania transformatora rozdzielczego wyłącznikiem próżniowym wyznaczonych na podstawie badań i obliczeń, zamieszczonych w tabeli 4, wynika, że wartości doświadczalne są zbliżone do teoretycznych. Częstotliwości te są zróżnicowane i zależą od zjawisk zachodzących w układzie elektrycznym podczas wyłączania oraz od parametrów zastosowanych urządzeń elektrycznych.

6. PODSUMOWANIE

Wykonane badania przebiegów potwierdzają, że podczas wyłączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi dochodzi do wzrostu narażeń układów izolacyjnych od przebiegów generowanych na zaciskach wejściowych uzwojeń. Wartości maksymalne tych przebiegów a także ich częstotliwości są zależne od przebiegu zjawisk zachodzących wewnątrz komór wyłączników oraz zjawisk przejściowych w układzie elektrycznym. O wartościach maksymalnych przebiegów łączeniowych i częstotliwościach składowych przejściowych decydują parametry sieci.

LITERATURA

1. 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
2. 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, ISBN: 8370858724, 2005
3. Popov M., van der Sluis L.: Improved calculations for no-load transformer switching surges. IEEE Trans. on Power Delivery, ISSN: 0885-8977, Vol.16, No. 3, July 2001. pp. 401 - 408
4. Helmer J., Lindmayer M.: Mathematical Modeling of the High frequency Behavior of Vacuum Interrupters and Comparison with Measured Transients in Power Systems. XVIIth Int. Symp. on Discharges and Electr. Insul. in Vacuum, Berkeley 1996, pp.323 - 331
5. Popov M., Acha E.: Overvoltages due to switching off an unloaded transformer with a vacuum circuit breaker. IEEE Trans. on Power Delivery, ISSN: 0885-8977, Vol. 14, Nr 4, October 1999, pp. 1317 - 1322

ANALYSIS OF OVERVOLTAGES DURING SWITCHING TRANSFORMERS WITH VACUUM CIRCUIT BREAKER

Key-words: transformers, vacuum circuit breakers, switching overvoltages, frequency of transient components

Abstract: Vacuum circuit breakers are very often used to switch power devices in medium voltage electrical networks. They have many advantages. Vacuum circuit breakers have specific features, which have influence on overvoltage exposures of insulation systems of electrical devices. The most important characteristics are: ability to chop current before natural zero crossing and breaking ability of high frequency currents. The consequence of these parameters are switching surges with significant maximum values. These overvoltages contain damped oscillatory components with differential frequencies. The article presents an analysis of overvoltages that arise during switching distribution transformers with vacuum circuit breakers. During the studies, switching surge waveforms were also analyzed in detail.