



Jakub FURGAŁ, Marcin IBRAGIMOW

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki

Badania przepięć generowanych podczas łączenia transformatorów średnich napięć

Streszczenie: W sieciach elektrycznych średnich napięć coraz szersze zastosowanie znajdują wyłączniki próżniowe. Wyróżnia je duża trwałość i niezawodność działania. Wykazują one jednak specyficzne właściwości wpływające na przebiegi przepięć łączeniowych. W artykule przedstawiono wyniki badań przepięć generowanych podczas wyłączania i załączania transformatorów średnich napięć wyłącznikami próżniowymi. Na podstawie wyników badań analizowano wpływ lokalizacji wyłączników na narażenia przepięciowe transformatorów.

Abstract: (Investigations of overvoltages generated during switching of medium voltage transformers). Vacuum breakers are used more and more frequently in medium voltage electric networks. They distinguish themselves from others on operation time and high reliability. However, they have specific properties which influence on courses of switching overvoltages. The investigation results of overvoltages generated during switch off and switch on of medium voltage transformers are presented in the paper. Influence of location of vacuum breakers on overvoltage risks of transformers was analysed on base of the investigation results.

Słowa kluczowe: transformatory, wyłączniki próżniowe, przepięcia łączeniowe.

Keywords: transformers, vacuum breakers, switching overvoltages.

Wprowadzenie

W sieciach elektrycznych średnich napięć wyłączniki próżniowe znajdują coraz szersze zastosowanie do łączenia transformatorów, maszyn elektrycznych, linii kablowych i napowietrznych oraz baterii kondensatorów. Charakteryzują się one dużą trwałością łączeniową, przekraczającą sto tysięcy cykli łączeniowych znamionowego prądu ciągłego. Zakres czynności konserwacyjnych jest ograniczony, a eksploatacja, po zastosowaniu odpowiednich układów automatyki, może być prowadzona zdalnie. Przeprowadzane są tylko oględziny głównie torów prądowych, elementów izolacyjnych i elementów napędów. Zabiegom konserwacyjnym są poddawane wyłącznie elementy napędów.

Wyłączniki próżniowe wyróżniają jednak specyficzne właściwości wpływające na narażenia przepięciowe urządzeń łączonych. 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 izolację urządzeń wyłączanych o przebiegach odmiennych od przepięć towarzyszących pracy wyłączników małoolejowych, instalowanych przez wiele lat w sieciach elektrycznych średnich napięć.

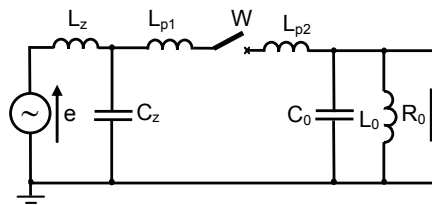
W artykule scharakteryzowano podstawowe zjawiska w komorach wyłączników próżniowych, towarzyszące procesom wyłączania odbiorników oraz przedstawiono wyniki badań przepięć generowanych podczas łączenia wyłącznikami próżniowymi transformatorów średniego napięcia.

Mechanizm generowania przepięć łączeniowych

Wyłączniki próżniowe charakteryzuje zdolność ucinania prądu. Polega ono na nagłym zgaszeniu łuku próżniowego 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 $W-L_{p2}-C_0-C_z-L_{p1}$ (rys. 1) nakładająca się na składową podstawową prądu o częstotliwości sieciowej. Prąd dużej częstotliwości może zrównoważyć prąd o częstotliwości sieciowej wyłączanego obwodu i spowodować nagłe zmniejszenie wartości chwilowej prądu w obwodzie do wartości zbliżonej do zera oraz przerwanie obwodu przy niezerowej wartości prądu składowej podstawowej (prąd

ucięcia), płynącego przez indukcyjność obciążenia L_0 .

W wyłącznikach próżniowych, pracujących w obwodach trójfazowych, występuje tzw. wymuszone (wirtualne) ucięcie prądu, polegające na nagłym przerwaniu prądu o częstotliwości sieciowej przed jego naturalnym przejściem przez zero. Jest ono spowodowane zgaśnięciem łuku w następstwie sprowadzenia jego prądu do zera w wyniku nałożenia się na składową prądu częstotliwości sieciowej prądów wysokiej częstotliwości. Prądy te pochodzą od ponownych zapłonów łuku w sąsiednich biegunach wyłącznika lub innych zakłóceń zewnętrznych [1,2].



Rys. 1. Schemat zastępczy obwodu z wyłącznikiem próżniowym

Wyłączniki próżniowe, mające zdolność wyłączania prądów wysokiej częstotliwości, mogą przy takim przejściu prądu łuku przez zero wyłączyć obwód przy niezerowych wartościach prądu częstotliwości sieciowej. Wartości wymuszonego prądu ucięcia mogą znacznie przekraczać wartości naturalnego prądu ucięcia wyłącznika. Zależą one nie tylko od właściwości wyłącznika próżniowego, lecz również w dużym stopniu od parametrów wyłączanego obwodu.

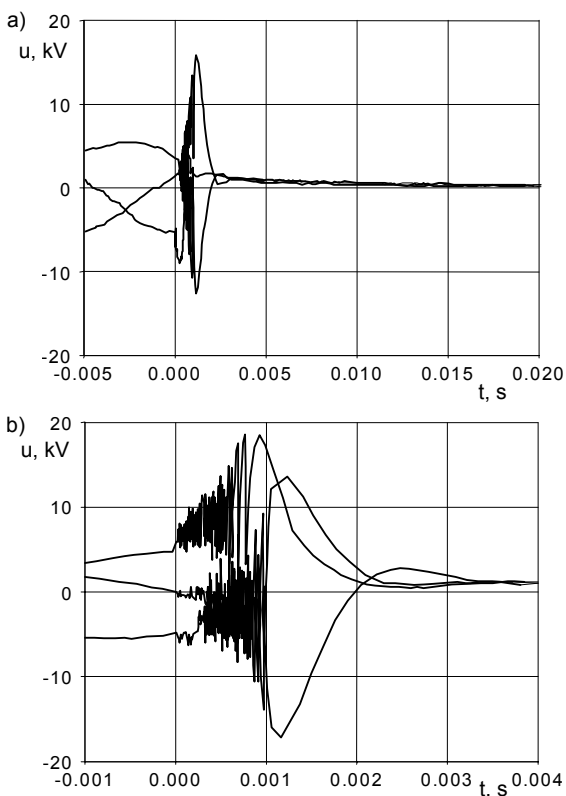
Maksymalne przepięcia wystąpią wówczas, gdy wartość maksymalna prądu wysokiej częstotliwości przekroczy wartości maksymalne składowych podstawowych prądów płynących w pozostałych fazach, a ponadto wartości wytrzymałości elektrycznej przerwy łącznika w tych fazach przekroczy wartości narastających napięć powrotnych.

W łącznikach próżniowych, ze względu na bardzo szybkie odzyskiwanie wytrzymałości elektrycznej przerwy międzyzestykowej, ponowne zapłony łuku z reguły nie występują. Jeżeli jednak wystąpią, to są one przyczyną zwiększenia przepięć łączeniowych (eskalacji przepięć). Wartości przepięć w takich przypadkach mogą znacznie przekraczać wartości napięć odpowiadające energii

- analiza wpływu lokalizacji wyłączników próżniowych na wartości szczytowe prądów narażających łączone transformatory.

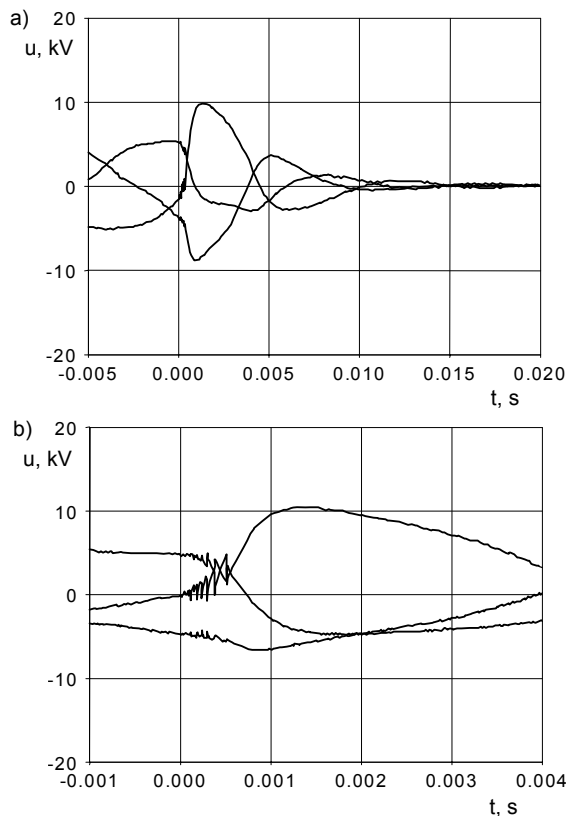
Wyniki badań

Wyniki badań miały postać przebiegów czasowych napięć przejściowych doziemnych na zaciskach wejściowych transformatora. Na rysunku 4 zamieszczono przebiegi napięcia na zaciskach transformatora Tr_2 wyłączanego przy zastosowaniu wyłącznika próżniowego połączonego z transformatorem doświadczalnym za pomocą przewodów o długości 2 m bez izolacji stałej. Na rysunku 4a pokazano przebiegi prądów doziemnych podczas wyłączenia transformatora rejestrowane na zaciskach wejściowych w czasie 20 ms. Na rysunku 4b przedstawiono natomiast przebiegi prądów doziemnych zarejestrowane w czasie 4 ms. Wyniki badań potwierdzają, że wyłączeniu transformatora nieobciążonego wyłącznikiem próżniowym towarzyszą wielokrotne przeskoki pomiędzy stykami otwierającego się wyłącznika. Przepięcia generowane podczas wyłączenia transformatorów osiągają znaczne wartości maksymalne. Wartości współczynnika prądów doziemnych na zaciskach wejściowych transformatora sięgają 3,5. W przebiegach czasowych prądów można wyróżnić dwie składowe o różnych częstotliwościach, wynoszących około 0,5 kHz i 20 kHz. Pierwsza jest zależna od parametrów elektrycznych wyłączanego transformatora. Na wartość drugiej składowej wpływa także przebieg zjawisk w komorach wyłącznika.



Rys. 4. Przebiegi prądów doziemnych na zaciskach wejściowych transformatora Tr_2 (punkt p) (rys. 3) wyłączanego przy zastosowaniu wyłącznika próżniowego połączonego z transformatorem przy użyciu przewodów bez izolacji o długości 2 m: a - przebiegi prądów doziemnych podczas wyłączenia transformatora, rejestrowane w czasie 20 ms, b - przebiegi prądów zarejestrowane w czasie 4 ms

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki rejestracji prądów doziemnych na zaciskach transformatora wyłączanego przy zastosowaniu wyłącznika próżniowego połączonego z transformatorem linią kablową o długości 100 m. Na rysunku 5a pokazano przebiegi prądów doziemnych na zaciskach wejściowych uzwojeń, generowane podczas wyłączenia transformatora i rejestrowane w czasie 20 ms, a na rysunku 5b - przebiegi prądów doziemnych rejestrowane w czasie 4 ms.

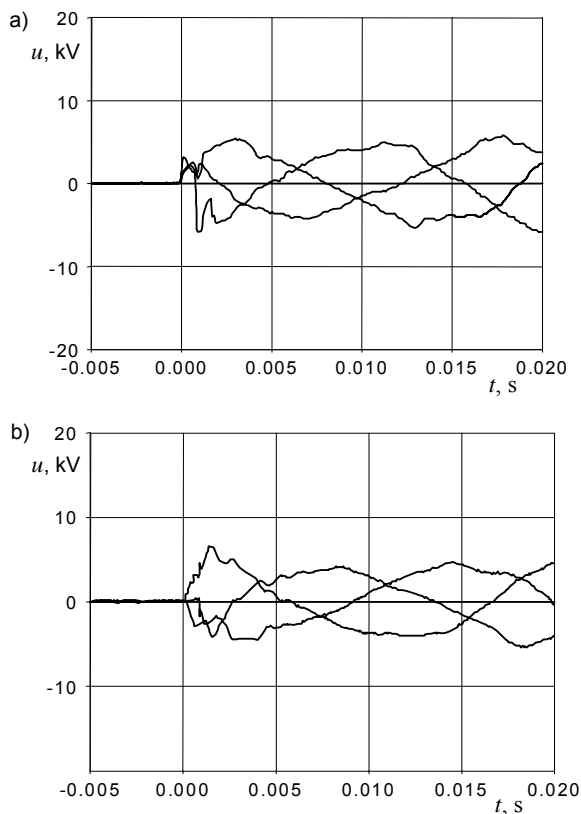


Rys. 5. Przebiegi prądów doziemnych na zaciskach wejściowych transformatora (Tr_2 - punkt p, rys. 3) wyłączanego przy zastosowaniu wyłącznika próżniowego połączonego z transformatorem linią kablową o długości 100 m: a - przebiegi prądów doziemnych na zaciskach wejściowych uzwojeń, rejestrowane w czasie 20 ms, b - przebiegi prądów doziemnych zarejestrowane w czasie 4 ms

Z analizy przebiegów prądów doziemnych zarejestrowanych na transformatorze, połączonym z wyłącznikiem próżniowym linią kablową o długości 100 m, wynika, że wartości szczytowe prądów powstających podczas wyłączenia transformatora wyłącznikiem próżniowym nie przekraczają dwukrotnej wartości maksymalnej napięcia zasilającego fazowego. Wartości maksymalne prądów narażających układ izolacyjny transformatora w takim układzie połączeń są więc około dwukrotnie mniejsze od prądów generowanych podczas wyłączenia transformatora wyłącznikiem połączonym z transformatorem przewodami o niewielkiej długości. Linia kablowa, ze względu na dużą pojemność własną, stanowi więc naturalny środek ochrony transformatorów od prądów łączeniowych.

Drugi etap badań obejmował rejestrację prądów generowanych podczas załączania transformatorów wyłącznikami próżniowymi. Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi prądów zarejestrowane podczas załączania transformatora przy zastosowaniu wyłącznika połączonego z transformatorem liniami o różnych długościach. Na rysunku 6a pokazano przebiegi prądów doziemnych podczas załączania transformatora połączonego z wyłącznikiem próżniowym przewodami nieizolowanymi

o długości 2 m, a na rysunku 6b - przebiegi prądów doziemnych na transformatorze połączonym z wyłącznikiem linią kablową o długości 100 m.



Rys. 6. Przebiegi prądów doziemnych na zaciskach wejściowych transformatora T_{r2} załączanego przy zastosowaniu wyłącznika połączonego z transformatorem, liniami o różnych długościach: a - przebiegi prądów doziemnych podczas załączania transformatora połączonego z wyłącznikiem przewodami o długości 2 m, b - przebiegi prądów doziemnych na transformatorze połączonym z wyłącznikiem linią kablową o długości 100 m

Z analizy zarejestrowanych przebiegów napięć przejściowych wynika, że wartości szczytowe prądów powstających podczas załączania transformatorów są znacznie mniejsze od prądów generowanych w warunkach wyłączania transformatorów nieobciążonych. Wartości szczytowe prądów nie przekraczają dwukrotnej wartości maksymalnej napięcia zasilającego fazowego. Przepięcia generowane w czasie czynności załączania transformatorów praktycznie nie są zależne od długości odcinka linii łączącej wyłącznik z transformatorem.

Podsumowanie

Badania prądów łączeniowych, wykonane w typowym układzie średniego napięcia, zawierającym transformator,

linię zasilającą oraz wyłącznik próżniowy, potwierdzają, że wartości maksymalne prądów, narażających układy izolacyjne transformatorów są zależne od przebiegu zjawisk wewnątrz komór wyłączników oraz zjawisk przejściowych w układzie elektrycznym. Wyłączaniu transformatorów towarzyszą wielokrotne przeskoki w komorach próżniowych. Wartości maksymalne prądów doziemnych generowanych na zaciskach transformatora podczas wyłączania wyłącznikiem połączonym bezpośrednio z transformatorem sięgają czterokrotnej wartości maksymalnej napięcia fazowego. Zastosowanie jednak linii kablowej, łączącej wyłącznik z transformatorem, powoduje znaczne zmniejszenie wartości maksymalnych prądów doziemnych powstających podczas wyłączania transformatorów.

LITERATURA

- [1] 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-chromium contacts. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8, Nr 4, 1993, pp. 1789-1795
- [2] Wróblewski Z., Badania i symulacja cyfrowa wybranych właściwości łączników próżniowych. Polska Akademia Nauk, Komitet Elektrotechniki, Seria Wydaw.: Postępy Techniki Wysokich Napięć, t. 25, Ofic. Wydaw. Pol. Wrocławskiej, 2005
- [3] 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. 317-322
- [4] Changping A., Wenxia S., Shiwei L., Leguan G., Vacuum circuit breaker overvoltage for interrupting unloaded transformer, 12th Int. Symp. on High Voltage Engineering, 2001, Bangalore (India), paper 3.4
- [5] 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
- [6] 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, New Orleans (USA), paper 14a.3
- [7] Lopez-Roldan J., de Herdt H., Min J., van Velthove R., Decklerq J., Sels T., Karas J., van Dommelen D., Popov M., van der Sluis L., Aquado M., Study of interaction between distribution transformer and vacuum circuit breaker. 13th Int. Symp. on High Voltage Engineering ISH'2003, Delft (Holland), pp. 62
- [8] Nobre D. M., Neves W. L. A., de Souza B. A., An Alternative to Reduce Medium-Voltage Transient Recovery Voltage Peaks. Int. Conf. on Power Systems Transients IPST'2001, Rio de Janeiro (Brasil), paper 136

Autorzy:

dr hab. inż. Jakub Furgał, Akademia Górniczo - Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, 30 - 059 Kraków, al. Mickiewicza 30, e - mail:

furgal@agh.edu.pl

mgr inż. Marcin Ibragimow, Akademia Górniczo - Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, 30 - 059 Kraków, al. Mickiewicza 30, e - mail: ibri@agh.edu.pl