



Jakub Furgał\*

## PRZEPIĘCIA W UZWOJENIACH ZAŁĄCZANEGO TRANSFORMATORA ENERGETYCZNEGO

**Streszczenie:** Transformatory w warunkach eksploatacji są narażone na oddziaływanie między innymi przepięć powstających w czasie operacji łączeniowych oraz w stanach przejściowych towarzyszących niektórym awariom. Mają one przeważnie charakter drgań oscylacyjnych o różnych częstotliwościach. W artykule przedstawiono reakcję transformatora na takie napięcia, generowane w wyniku załączania zasilającej linii kablowej. Zamieszczono rezultaty modelowania cyfrowego napięć przejściowych w linii po zamknięciu wyłącznika w różnych odległościach od transformatora oraz przepięć wewnątrz uzwojeń.

**Słowa kluczowe:** transformatory, przepięcia, narażenia izolacji

### 1. Wstęp

W czasie dokonywania operacji łączeniowych oraz w niektórych stanach awaryjnych w układzie elektroenergetycznym, w wyniku zmian przepływu energii, generowane są przepięcia oddziałujące między innymi na transformatory. Powstają one w warunkach łączenia linii, załączania i wyłączania transformatorów, a także w stanach przejściowych towarzyszących zwarciom doziemnym i międzyfazowym oraz w wyniku ponownych zapłonów łuku w wyłącznikach. W [1] przedstawiono rezultaty badań, z których wynika, że napięcie robocze może zawierać wówczas składowe przejściowe — głównie periodyczne — o różnych amplitudach, częstotliwościach i tłumieniu oraz czasach trwania.

W przypadku operacji łączeniowych w układzie (lub zwarć) powstają one w wyniku wielokrotnych odbić fali napięciowej, przemieszczającej się w odcinku linii między

---

\* Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

wyłącznikiem (lub miejscem zwarcia) a transformatorem. Częstotliwości drgań są zależne od rodzaju linii i jej długości. Można je wyznaczyć korzystając z zależności [2]:

$$f_1 = \frac{v_1}{4 \cdot l} \quad (1)$$

gdzie:  $f_1$  – częstotliwość naturalna linii [Hz],  $v_1$  – szybkość propagacji fali w linii [ $\text{ms}^{-1}$ ],  $l$  – długość linii [m].

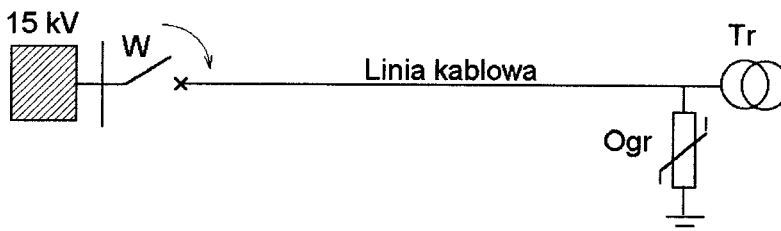
Amplitudy tych napięć są mniejsze od przepieć indukowanych w czasie wyładowań piorunowych. Mogą one oddziaływać bezpośrednio na transformatory, mimo włączonych ograniczników przepieć z tlenków metali. Nie przekraczają bowiem poziomów ochrony stosowanych ograniczników [1, 2]. W transformatorach mogą pojawiać się napięcia przejściowe o znacznych amplitudach. Gdy częstotliwość chwilowych oscylacji napięcia zasilającego jest równa częstotliwości własnej transformatora napięcia wewnątrz uzwojeń są bowiem wzmacniane w wyniku zjawiska rezonansu. Efekt ten jest szczególnie przedstawiony między innymi w publikacjach [3,4,5]. Zamieszczono tam zarówno wyniki badań jak i rezultaty obliczeń przepieć rezonansowych w transformatorach, generowanych przez napięcia o charakterze sinusoidalnym — tłumione oraz nietłumione. Analiza reakcji transformatorów na napięcia pojawiające się w stanach łączeniowych oraz awaryjnych, mających zwykle kształty odbiegające od sinusoidalnego, ma istotne znaczenie dla oceny praktycznych narażeń napięciowych izolacji w czasie eksploatacji.

W artykule przedstawiono rezultaty obliczeń przepieć wewnątrz uzwojeń transformatora, generowanych po załączeniu zasilającej linii kablowej. Analizowano wpływ długości linii na ich amplitudę.

## 2. Przepięcia generowane w załączanym transformatorze

### 2.1. Analizowany układ

Dokonano teoretycznej analizy przepieć w transformatorze w stanie załączania kablowej linii zasilającej. Wykonano obliczenia napięć przejściowych zarówno na zaciskach liniowych jak i w uzwojeniach transformatora, narażające izolację główną. Badano wpływ odległości między wyłącznikiem a załączanym transformatorem na przepięcia w uzwojeniach. Schemat analizowanego układu przedstawiono na rysunku 1.



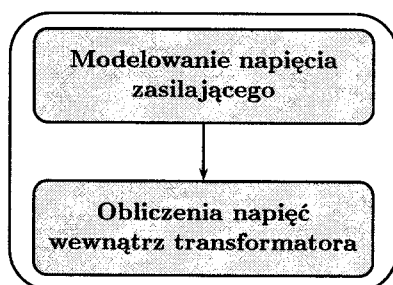
Rys. 1. Schemat układu zasilania transformatora

Do obliczeń przyjęto, że w układzie włączone są następujące urządzenia:

- kabel typu HKny 8,7/15 kV  $3 \times 120 \text{ mm}^2$  [6],
  - ograniczniki przepięć z tlenków metali typu GXE 14 [7],
  - transformator 20 kVA, 15 kV,
- i zasilane z rozdzielni, w której moc zwarciova na szynach 15 kV wynosi 50 MVA.

## 2.2. Modele urządzeń

Obliczenia zrealizowano w dwu etapach (rys. 2). W pierwszym zamodelowano zmiany doziemnych napięć na zaciskach liniowych transformatora Tr po zamknięciu wyłącznika W (rys. 1).



Rys. 2. Schemat obliczeń

W obliczeniach wykorzystano model kabli elektroenergetycznych, istniejący w programie ATP-EMTP, stosowany do modelowania szybkozmiennych stanów przejściowych [8]. Uwzględnia on zależności częstotliwościowe własności materiałów. Parametry elementów modelu wyznaczone są na podstawie zasadniczych wymiarów kabli oraz stałych materiałowych żył prądowych, izolacji oraz osłon i żył powrotnych.

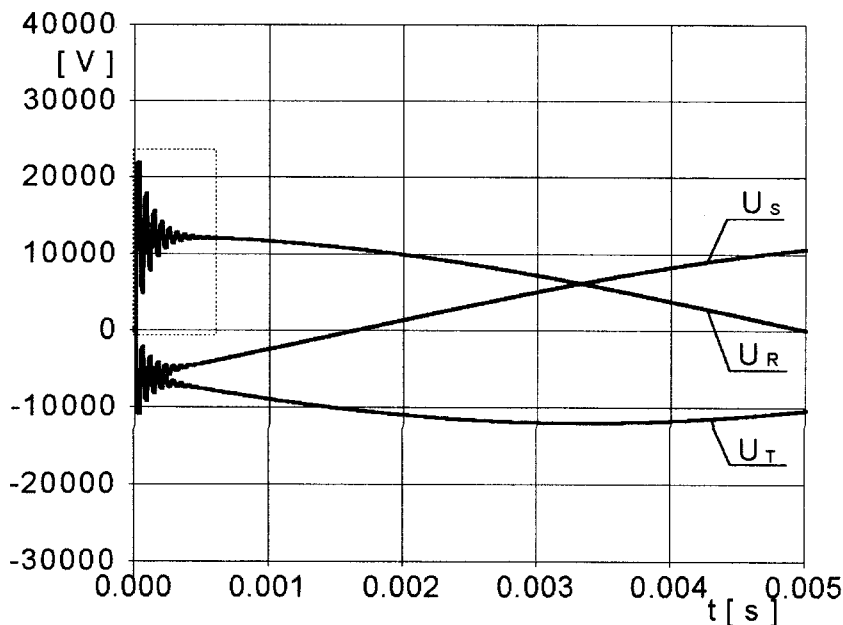
Wykorzystano także, istniejący w tym programie, model transformatorów trójfazowych. Parametry jego elementów są obliczane przy wykorzystaniu rezultatów podstawowych badań transformatorów. Model uwzględnia efekt nasycania rdzenia ferromagnetycznego [8].

W programie zaimplementowano model ograniczników przepięć z tlenków metali, właściwy dla prądów o czasach narastania do maksimum od  $0,5 \mu\text{s}$  do  $45 \mu\text{s}$  [9]. Zawiera on dwa warystory, o różnych charakterystykach, rozdzielone filtrem R-L oraz kondensator reprezentujący pojemność ograniczników. Jest on stosowany do modelowania dynamicznych charakterystyk z uwzględnieniem pętli napięciowo-prądowej istniejącej w warunkach oddziaływania przepięć.

W drugim etapie obliczeń, w którym wyznaczano napięcia wewnątrz transformatora, wykorzystano model matematyczny uzwojeń [5]. Uwzględnia on sprzężenia indukcyjno-pojemnościowe między cewkami uzwojeń jednej fazy, straty energii w uzwojeniach oraz izolacji, a także własności rdzenia ferromagnetycznego. Model wykorzystano do obliczenia rozkładu przejściowych napięć doziemnych w uzwojeniu górnego napięcia fazy R generowanych po załączeniu transformatora.

### 2.3. Wyniki obliczeń

Rezultaty obliczeń napięć na zaciskach transformatora po zamknięciu wyłącznika W (rys. 1), przy długości linii kablowej równej 2,8 km przedstawiono na rysunku 3.

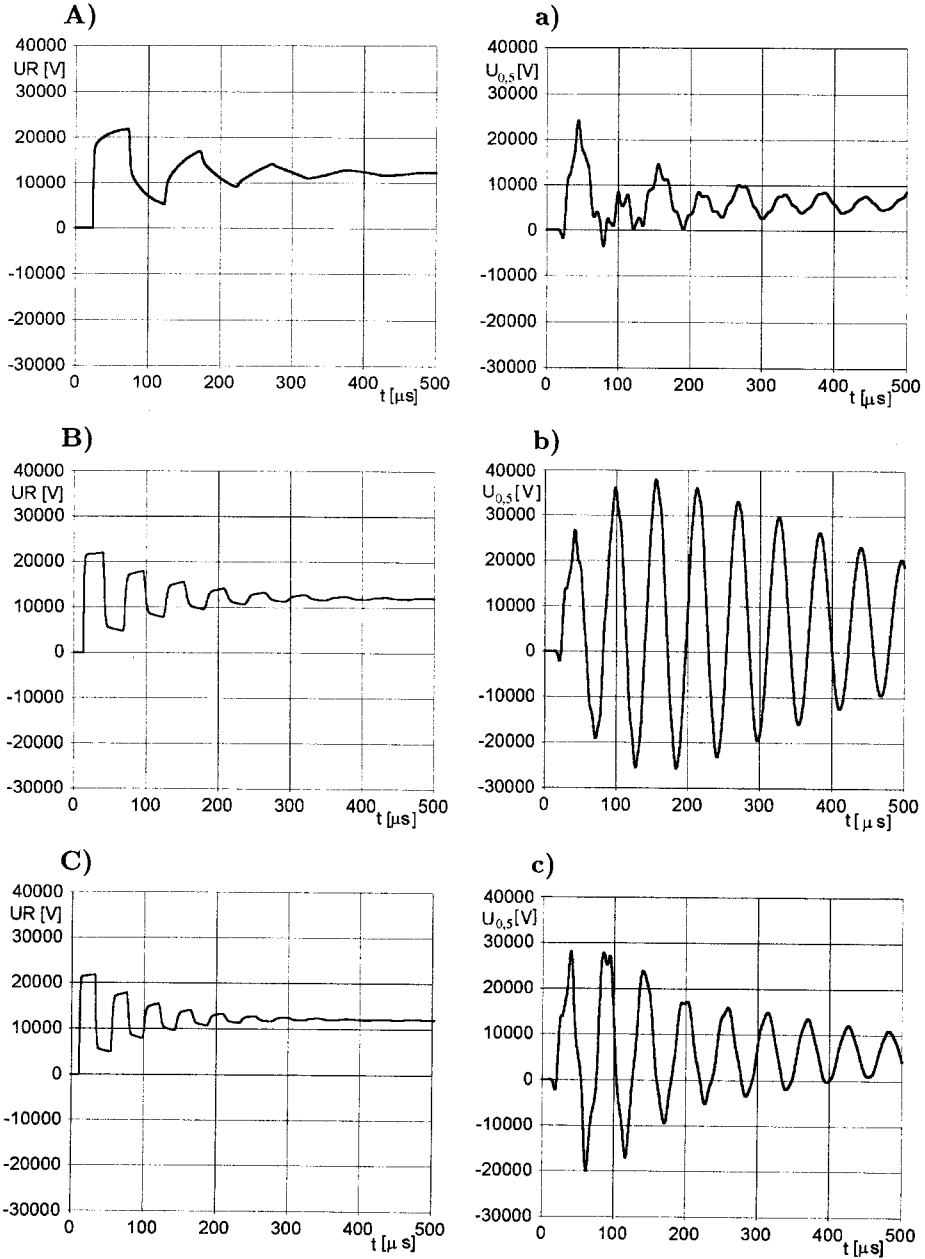


**Rys. 3.** Napięcia doziemne na zaciskach transformatora  $Tr$  (rys. 1) po zamknięciu wyłącznika  $W$  (długość linii kablowej – 2,8 km)

Linia przerywaną zaznaczono fragment napięcia zasilania fazy R, zawierający cykliczną składową generującą przebiegi w uzwojeniach. Wyniki obliczeń tych przebieg zamieszczono na rysunku 4. Przedstawiono tam doziemne napięcia przejściowe w (wybrany przykładowo) punkcie środkowym uzwojenia górnego napięcia fazy R (a, b, c) oraz napięcia na zaciskach liniowych uzwojenia tej fazy (A, B, C) obliczone przy długościach linii kablowej równych odpowiednio: 4,5 km, 2,8 km oraz 2 km.

### 3. Podsumowanie

Z zaprezentowanych rezultatów modelowania cyfrowego wynika, że w czasie załączania linii kablowej zasilającej transformator w napięciu 50 Hz generowana jest przejściowa składowa przemienna o dużej częstotliwości. Jest ona źródłem znacznych przebiegów wewnątrz transformatora. Długość linii, determinująca częstotliwość drgań, ma istotny wpływ na ich amplitudę.



**Rys. 4.** Przebiegi napięć doziemnych na zaciskach liniowych fazy R transformatora  $Tr$  (rys. 1) (A, B, C) oraz w środku uzwojenia  $gn$  fazy R (a, b, c) po zamknięciu wyłącznika  $W$  w odległości: A, a - 4,5 km; B, b - 2,8 km; C, c - 2 km

## Literatura

- [1] **Degeneff R. C., McNutt W. J., Neugebauer N., Panek J., McCallum M. E., Honey C. C.:** *Transformer Response to System Switching Voltages.* IEEE Trans. on Power Appar. and Systems, Vol. PAS-101, No 6, June 1982, pp. 1457-1469
- [2] **Musil R. J., Preiniger G., Schopper E., Weger S.:** *The Resonance Effect of Oscillating System Overvoltages on Transformer Windings.* IEEE Trans. on Power Appar. and Systems, Vol. PAS-101, No 10, October 1982, pp. 3703-3711
- [3] **Morched A. S., Marti L., Brierley R. H., Lackey J. G.:** *Analysis of Internal Winding Stresses in EHV Generator Step-Up Transformer Failures.* IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April 1996, pp. 888-894
- [4] **Gharehpetian G. B., Mohseni H., Gehnen M., Moller K.:** *Resonance Phenomena in Inhomogeneous Transformer Windings Due to Fast Transients.* 9th Intern. Symp. on High Voltage Engineering, Graz, August 28 - September 1, 1995, paper 6756
- [5] **Furgał J.:** *Analysis of Resonance Overvoltages in Transformer Windings.* 40. Intern. Wissenschaftliches Kollokwium - Technische Universitat - Ilmenau, 18-21.09.1995, Band 4, pp. 450-455
- [6] *Kable elektroenergetyczne o izolacji papierowej przesyconej syciwem nieściekającym i powłocę otowianej na napięcia 3,6/6 kV do 23/40 kV.* Karta katal. KFKiMK - Kraków
- [7] *Ograniczniki przepięć typu GXE 4-45.* Karta katal. GXE/06/00. ZWAR-Przasnysz
- [8] *Alternative Transients Program ATP-EMTP.* Rule Book. July 1987
- [9] **Furgał J.:** *Zastosowanie wybranego schematu zastępczego do modelowania graniczników przepięciowych z tlenków metali o zróżnicowanych parametrach.* III Ogólnop. Sympozjum: Inżynieria Wysokich Napięć IW '96, 19-22 maja 1996, s. 317-322

### OVERVOLTAGES IN WINDINGS OF SWITCHING-ON POWER TRANSFORMER

Transformers are exposed to action of temporary overvoltages which are generated by switching operations and any faults. They have usually an oscillated dumped character with a different frequency. The transformer reaction to the temporary overvoltages, generated by switching-on the cable supply line, have been presented in the paper. Results of modelling of transient voltage in the line, with different length and transformer have been shown.

Referat przygotowany w ramach działalności statutowej  
Zakładu Elektroenergetyki AGH w 1997 roku,  
finansowanej przez Komitet Badań Naukowych