



Jakub Furgał*

PRZEPIĘCIA PIORUNOWE W UZWOJENIACH TRANSFORMATORA Z OGRANICZNIKAMI PRZEPIĘĆ Z TLENKÓW METALI

Streszczenie: W artykule przedstawiono schemat i wyniki obliczeń przepięć w uzwojeniach transformatora średniego napięcia z ogranicznikami przepięć z tlenków metali, połączonego z napowietrzną linią zasilającą, generowanych w wyniku wyładowań atmosferycznych. Zaprezentowano również przepięcia w uzwojeniach, powstające w czasie oddziaływania znormalizowanego pełnego udaru piorunowego.

Słowa kluczowe: przepięcia, transformatory, ograniczniki przepięć z tlenków metali, modelowanie cyfrowe

1. Wprowadzenie

Transformatory połączone z napowietrznymi liniami elektroenergetycznymi narażone są na oddziaływanie przepięć generowanych między innymi w czasie wyładowań piorunowych. Wprawdzie transformatory są chronione przed bezpośrednim oddziaływaniem przepięć przez stosowanie układów przeciwprzepięciowych, zawierających głównie ograniczniki przepięć z tlenków metali, umieszczone na zewnątrz transformatora i włączone między przewody fazowe linii zasilającej lub zasilanej a ziemię, jednak w czasie wyładowań piorunowych napięcia na ogranicznikach przepięć — a więc i napięcia doziemne na zaciskach liniowych chronionego transformatora — gwałtownie wzrastają. Ich wartości maksymalne są znacznie większe od amplitudy napięcia roboczego. Są one źródłem przepięć wewnętrznych, narażających izolację elektryczną.

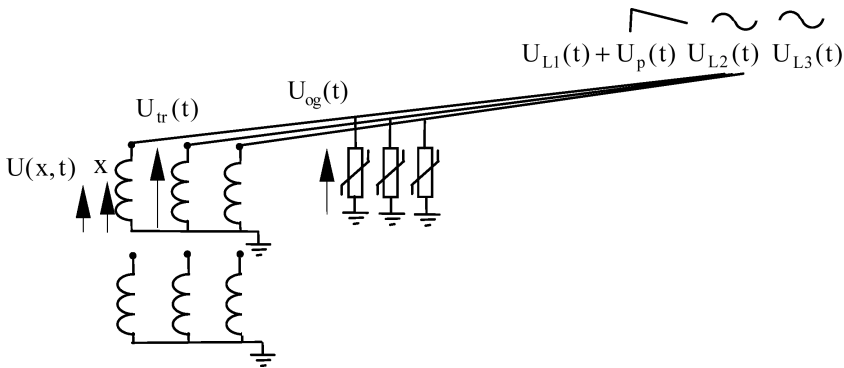
* Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Przebiegi wynikają z drgań napięcia w uzwojeniach, stanowiących układy wielu połączonych cewek — zawierających ferromagnetyczny rdzeń — między którymi istnieją silne sprzężenia indukcyjne oraz pojemnościowe.

W artykule przedstawiono rezultaty obliczeń przebiegów w transformatorze energetycznym średniego napięcia, chronionym przy zastosowaniu ograniczników przebiegów z tlenków metali, generowanych czasie wyładowań atmosferycznych. Zaprezentowano również teoretyczne przebiegi przebiegów wewnętrznych, wymuszanych przez znormalizowany udar napięciowy piorunowy.

2. Metoda obliczeń

Schemat układu: napowietrzna linia zasilająca—ograniczniki przebiegów—transformator przedstawiono na rys. 1. Do modelowania zjawisk falowych w linii napowietrznej wykorzystano metodę źródeł sterowanych [1]. Charakterystyki dynamiczne napięciowo-prądowe ograniczników przebiegów z tlenków metali modelowano za pomocą schematu zastępczego stosowanego do przebiegów napięciowych o czasach narastania zawartych w przedziale od $0,5\mu\text{s}$ do $45\mu\text{s}$ [2]. Przebiegi w transformatorze wyznaczano po stworzeniu reluktancyjnego modelu trójfazowego całego transformatora [3] oraz szczegółowego modelu uzwojeń jednej fazy [4, 5, 6]. Schemat blokowy programu, wykorzystanego do obliczeń przebiegów wewnątrz transformatora, przedstawiono na rys. 2.



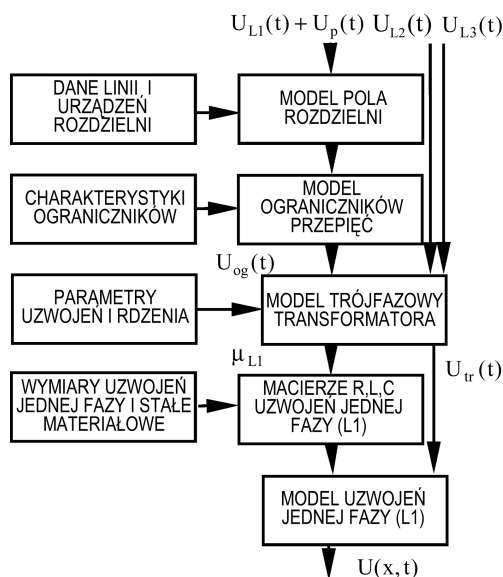
Rys. 1. Ogólny schemat połączeń transformatora z zewnętrznymi ogranicznikami przebiegów

3. Charakterystyka transformatora i ograniczników przebiegów

Wykonano obliczenia przebiegów wewnętrznych piorunowych w transformatorze średniego napięcia typu T3ZoNe20/20 o następujących danych technicznych: $S_n = 20 \text{ kVA}$, $U_n = 15/0,4 \text{ kV}$, $U_{zw} = 4,2\%$, $\Delta P_{Fe} = 114 \text{ W}$, $\Delta P_{Cu} = 525 \text{ W}$, $I_0 = 2,8\%$. Podstawowe parametry uzwojeń transformatora zamieszczono w tabeli 1.

Ochronę przeciwprzebiegiową transformatora stanowią ograniczniki przebiegów z tlenków metali typu GXD 14 produkowane w ZWAR.S.A. w Przasnyszu. Wyniki

badania ograniczników, zamieszczone w katalogu firmowym [7], przedstawiono w tabeli 2. W obliczeniach prądów przyjęto, że ograniczniki są włączone bezpośrednio między zaciski liniowe transformatora a ziemię.



Rys. 2. Schemat obliczeń prądów w transformatorze z ogranicznikami prądów z tlenków metali

Tabela 1. Podstawowe parametry uzwojeń transformatora typu T3ZoNe 20/20

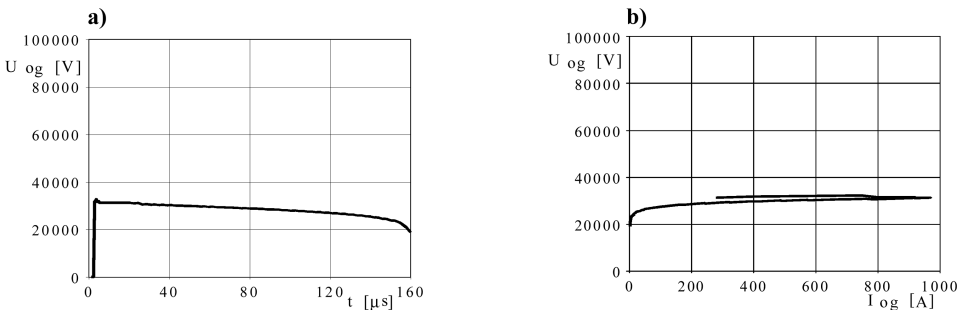
Parametr	Uzwojenie wn	
	Cewki zwykłe	Cewki wzmocnione
Ilość cewek [-]	4	4
Średnica wewnętrzna [m]	0,157	0,157
Średnica zewnętrzna [m]	0,205	0,205
Ilość zwojów w cewce [-]	810	650
Odległość między cewkami [m]	0,003	0,005
Wysokość cewki [m]	0,028	0,025
	Uzwojenie nn	
Średnica wewnętrzna [m]	0,114	
Średnica zewnętrzna [m]	0,137	
Ilość zwojów w uzwojeniu [-]	90	
	Rdzeń	
Średnica zastępcza [m]	0,105	

Tabela 2. Napięcia obniżone ograniczników przepięć z tlenków metali typu GXD 14 [7]

Napięcie znamion.	Napięcie trwałej pracy	Napięcie obniżone przy prądzie wyładowczym					
		1/2,5 μ s		8/20 μ s		30/60 μ s	
		10 kA	5 kA	10 kA	20 kA	500 A	1000 A
kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	
14	11,2	40,7	34,9	37,0	40,3	29,7	30,6

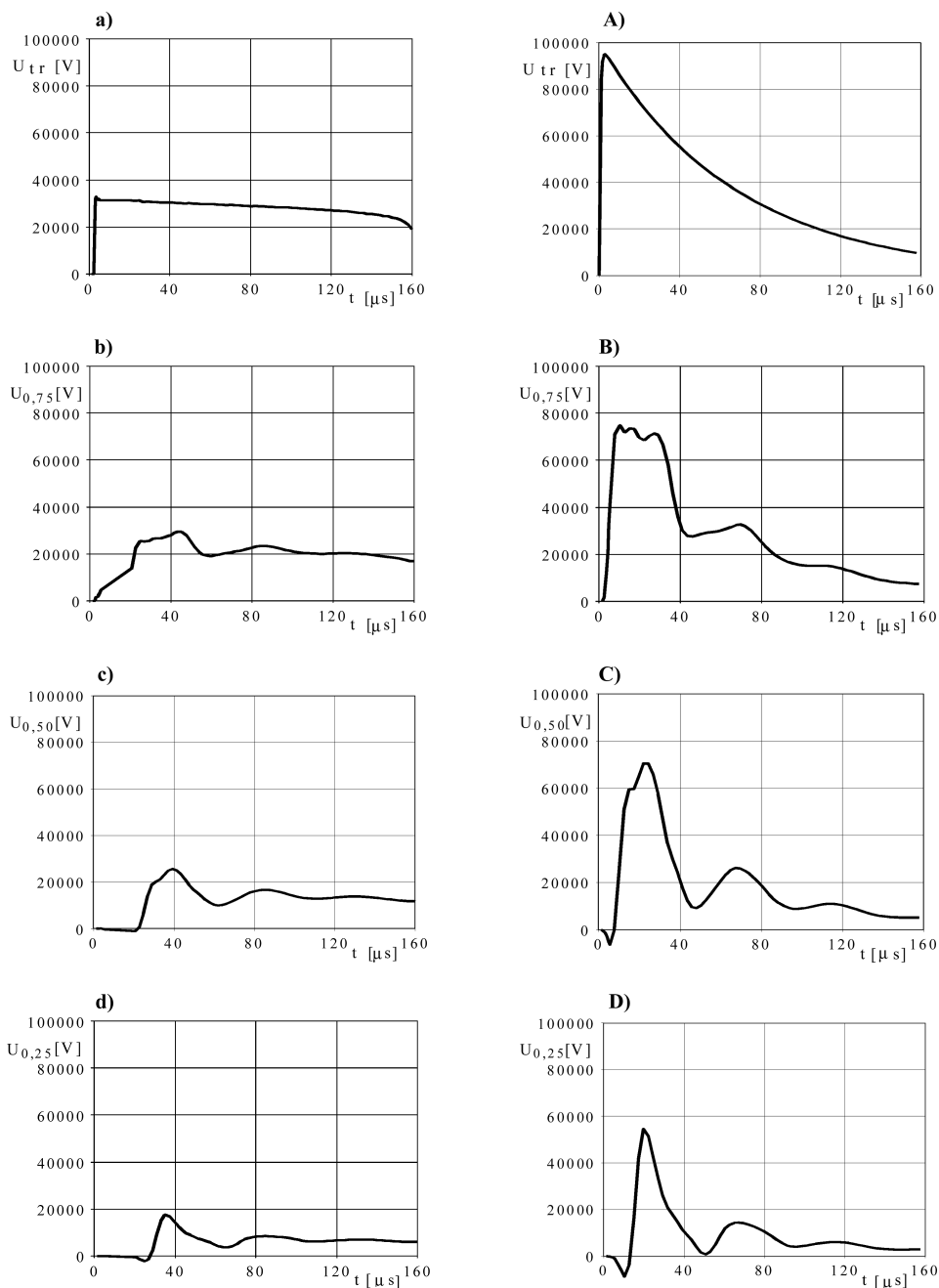
4. Rezultaty modelowania

W przewodzie fazy $L1$ napowietrznej linii 15 kV zasilającej transformator (rys. 1) generowane jest w wyniku wyładowania piorunowego napięcie o kształcie $1,2/50 \mu$ s i przyjętej wartości maksymalnej 200 kV. Fala napięciowa przemieszczając się wzdłuż linii o impedancji falowej 350Ω dociera do transformatora z ogranicznikami włączonymi równolegle do uzwojeniami wysokiego napięcia. Wówczas napięcie doziemne na zaciskach fazy $L1$ transformatora $c = U_{tr}(t) = U_{og}(t)$ (rys. 1, rys. 2). W czasie działania ogranicznika wewnątrz transformatora pojawiają się przepięcia. Na rys. 3 zamieszczono przebieg czasowy napięcia na ograniczniku w fazie $L1$ oraz dynamiczną zależność napięciowo-prądową.



Rys. 3. Zależność: a) czasowa napięcia, b) napięciowo-prądowa ogranicznika przepięć połączonego z zaciskiem liniowym transformatora w czasie oddziaływania fali napięciowej piorunowej

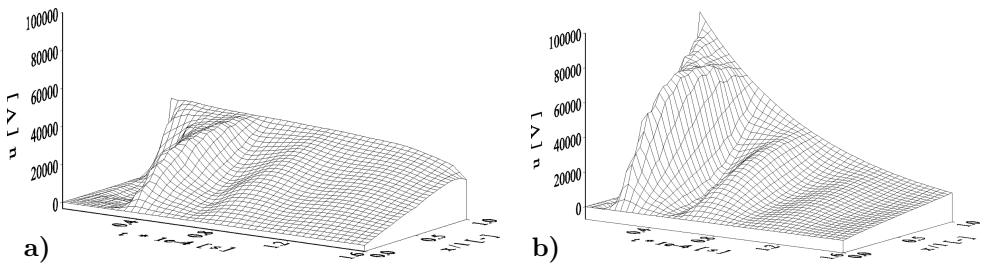
Na rys. 4a, b, c, d zaprezentowano natomiast krzywe przedstawiające zależności czasowe napięć doziemnych w wybranych czterech punktach uzwojenia wysokiego napięcia, określonych współrzędną x — wyrażającą odległość punktu od uzziemionego końca uzwojenia X w stosunku do długości uzwojenia l ($x = X/l$) — równą: 1,0; 0,75; 0,50; 0,25 (rys. 1). Dla porównania, na rys. 4A, B, C, D zamieszczono natomiast napięcia doziemne w tych samych punktach uzwojenia generowane po przyłożeniu do zacisku fazy $L1$ transformatora bez ograniczników udaru napięciowego piorunowego znormalizowanego pełnego o wartości maksymalnej 95 kV [8]. Wykorzystując



Rys. 4. Zależności czasowe napięć doziemnych $U_x(t)$ w wybranych punktach x uzwojenia w transformatora (rys. 1): a, b, c, d – z ogranicznikami w czasie wyładowań piorunowych; A, B, C, D – bez ograniczników w czasie oddziaływania napięcia udarowego znormalizowanego

zamodelowane przebiegi czasowe napięć w uzwojeniu przedstawione na rys. 3 stworzono, i zamieszczono na rys. 4, przestrzenne rozkłady przepięć piorunowych $u(x, t)$ w transformatorze.

Napięcia doziemne na zaciskach liniowych transformatora ($U_{tr}(t) = U_{1,0}(t)$) z ogranicznikami przepięciowymi, połączonymi bezpośrednio z tymi zaciskami, są praktycznie stałe w czasie oddziaływania fali napięciowej, generowanej w przewodach fazowych w wyniku wyładowania piorunowego. Uwidacznia to, zamieszczony na rys. 3a, przebieg czasowy napięcia na ograniczniku w fazie L1. Jest ono około 3-krotnie większe od amplitudy napięcia fazowego. Napięcia przejściowe doziemne w uzwojeniach mają natomiast charakter drgań tłumionych. Są one przedstawione na rys. 4a, b, c, d. Powstają tam znaczne przepięcia narażające izolację elektryczną uzwojeń. Są one jednak mniejsze od przepięć (przedstawionych na rys. 4A,B,C,D) w transformatorze bez ograniczników, generowanych w wyniku oddziaływania znormalizowanego udaru napięciowego piorunowego pełnego.



Rys. 5. Trójwymiarowy rozkład przepięć piorunowych $u(x, t)$ w uzwojeniu transformatora: a) z ogranicznikami przepięć w czasie wyładowań piorunowych, b) bez ograniczników poddanego działaniu udaru znormalizowanego

5. Podsumowanie

Transformatory z ogranicznikami przepięciowymi z tlenków metali w czasie wyładowań atmosferycznych mogą być narażone na działanie napięć przejściowych o wartościach maksymalnych znacznie większych od amplitudy napięcia roboczego. Przepięcia generowane wówczas wewnątrz uzwojeń narażające izolację elektryczną są jednak mniejsze od powstających w czasie oddziaływania napięcia znormalizowanego piorunowego pełnego.

Literatura

- [1] **Abugalia A., Furgał J., Włodek R.:** *Analysis of Different Models of Metal Oxide Surge Arrester for the Protection of Transformer.* IV Sympozjum: Metody Matematyczne w Elektroenergetyce, Zakopane 22–24.10.1998, str. 111–120
- [2] IEEE Working Group 3.4.11. *Modeling of Metal Oxide Surge Arresters.* IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, January 1992, pp. 302–309

- [3] **Chen X. C., Neudorfer P.:** *Digital Model for Transient Studies of a Three-Phase Five-Legged Transformer.* IEEE Proceedings – C, Vol. 139, No. 4, July 1992, str. 351–358
- [4] **Małecki R.:** *Modele cyfrowe do badania przebiegów udarowych w transformatorach.* Zesz. Nauk. Politechniki Łódzkiej, Rozprawy Naukowe, Z. 80, 1986
- [5] **Vakilian M., Degeneff R. C., Kupferschmid M.:** *Computing the Internal Transient Voltage Response of a Transformer with a Nonlinear Core Using Gear's Method.* Part 1: Theory. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 4, October 1995, pp. 1836–1842
- [6] **Furgał J.:** *Theoretical Analysis of Overvoltages in Transformer with MO-Surge Arresters.* 43rd Int. Scientific Colloquium, Techn. University of Ilmenau, Sept. 21–24 1998, band 4, pp. 23–28
- [7] *Ograniczniki przepięć typu GXD 10-45.* Karta katalogowa GXD/06/01. ZWARS.A.
- [8] PN-83/E-06040: *Transformatory. Wymagania ogólne*

LIGHTNING OVERVOLTAGES IN TRANSFORMER WINDINGS WITH MO-SURGE ARRESTERS

The scheme and results of modelling of internal overvoltages in the transformer of 15/0.4 kV with MO-surge arresters generated by influence of lightning discharges have been shown in the paper. As well overvoltages in the transformer windings without surge arresters generated by activity of standard lightning voltage wave have been presented.

Referat opracowano w ramach umowy nr 10.10.120.397
finansowanej przez Komitet Badań Naukowych