



Maciej JAROSZEWSKI, Paweł KOSTYŁA, Zbigniew WACŁAWEK

Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii

Metoda określenia wartości parametrów wewnętrznych modelu warystora na podstawie pomiaru wartości chwilowych prądu i napięcia

Streszczenie. Beziskernikowe ograniczniki przepięć, których aktywną część stanowią warystory oparte na tlenku cynku, spełniają coraz powszechniej rolę układów ochrony izolacji urządzeń elektroenergetycznych. Szczególnie istotny stał się więc problem oceny stanu funkcjonalnego warystorów. Z tego względu szczególnie interesujące jest określenie schematu zastępczego warystora ZnO i jego parametrów.

Abstract. (Method of varistor model internal parameters determination using measured values of current and voltage). The ZnO varistors are widely used as devices for overvoltage protection. There is need for a method of voltage load capacity assessment. In this paper the method of varistor equivalent circuit diagram parameters estimation is proposed.

Słowa kluczowe: warystor, ZnO, model.

Keywords: varistor, ZnO, model.

Wstęp

Warystory tlenkowo-cynkowe są ceramicznymi materiałami polikrystalicznymi, charakteryzującymi się silnie nieliniową charakterystyką napięciowo-prądową. Procesy technologiczne wytwarzania ceramiki warystorowej powodują powstanie struktury składającej się z matrycy z przewodzących ziaren ZnO otoczonych cienką warstwą międzyziarnową Bi₂O₃ (z dodatkiem tlenków innych metali) o właściwościach półprzewodzących. Tak ukształtowana mikrostruktura powoduje formowanie się podwójnych barier potencjału na złączach międzyziarnowych. Decydują one o powstawaniu nieliniowego przewodnictwa elektrycznego ceramiki warystorowej.

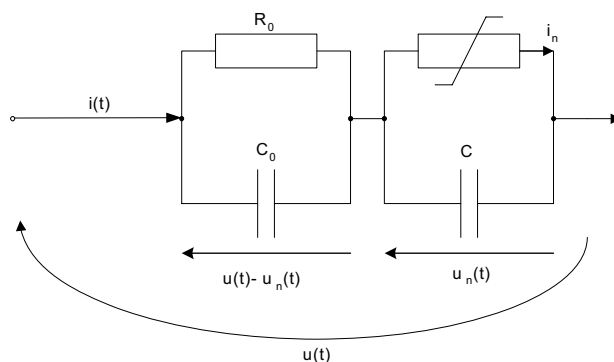
W celu analizy właściwości warystorów tlenkowych w warunkach eksploatacji buduje się ich schematy zastępcze. W literaturze, zarówno krajowej jak i zagranicznej, znaleźć można wiele schematów zastępczych warystorów ZnO [1-6]. Różnią się one stopniem skomplikowania, zastosowaniem dla danego rodzaju napięcia, czy ograniczeniem opisu do określonego zakresu charakterystyki napięciowo-prądowej. W modelach tych, dla napięć przemiennych, w zakresie napięcia trwałej pracy U_C, przyjmuje się najczęściej schematy zastępcze w postaci połączonych elementów R, C. Mają one charakter zarówno liniowy jak i nieliniowy. W referacie przedstawiono wyniki badań symulacji komputerowych wykonanych na modelu analitycznym warystora, przedstawionym szerzej przez autorów w [7]. Zaproponowany schemat elektryczny układu składa się z dwóch części adekwatnych do mikrostruktury warystora. Warstwa międzyziarnowa opisana jest jako schemat połączonych szeregowo-równolegle liniowych elementów R-C. Zjawiska występujące na granicy pomiędzy ziarnem ZnO i warstwy międzyziarnowej przedstawia schemat w postaci równoległego połączenia nieliniowej rezystancji i liniowej pojemności.

Model warystora

Rysunek 1 przedstawia model warystora składający się z elementów liniowych o nieznanych parametrach R₀, C₀, C oraz elementu rezystancyjnego o nieliniowej charakterystyce u_n=f(i_n). Odpowiedź prądową powyższego układu opisuje równanie:

$$(1) \quad i(t) = \frac{1}{R_0} [u(t) - u_n(t)] + C_0 \frac{d}{dt} [u(t) - u_n(t)]$$

gdzie: u(t) = U_m sin ωt - napięcie zasilające układ, u_n(t) = U_{1n} sin(ωt + Ψ₁) + U_{3n} sin(3ωt + Ψ₃) - napięcie na elemencie nieliniowym składające się (dla uproszczenia rozważań) z pierwszej i trzeciej harmonicznej, R₀ - nieznaną rezystancja elementu liniowego modelu, C₀ - nieznaną pojemności elementu liniowego modelu, U_{1n}, U_{3n}, Ψ₁, Ψ₃ - odpowiednio nieznanne amplitudy i fazy początkowe dla pierwszej i trzeciej harmonicznej napięcia na elemencie nieliniowym modelu.



Rys.1. Model analityczny warystora ZnO

W wyniku pomiaru otrzymuje się N próbek napięcia i prądu warystora. Wartości kolejnych próbek prądu opisuje równanie:

$$(2) \quad i(t_l) = \frac{1}{R_0} [u(t_l) - u_n(t_l)] + C_0 \left\{ \frac{d}{dt} [u(t) - u_n(t)] \right\}_{t=t_l}$$

gdzie: t_l - dla l=1, 2, ..., N.

Na podstawie tych pomiarów można wyznaczyć parametry R₀, C₀ w sposób opisany w następnym rozdziale. Mając wyznaczone parametry R₀, C₀ oraz napięcie na elemencie nieliniowym można wyznaczyć pojemność C.

W tym celu układamy równanie określające prąd na elemencie nieliniowym warystora:

$$(3) \quad f(u_n) = i(t) - C \left(\frac{du_n}{dt} \right)$$

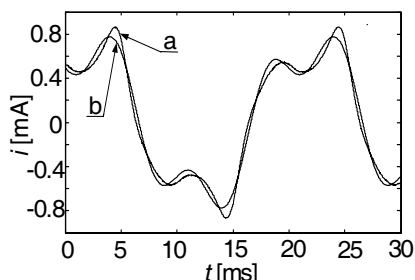
Dla odpowiednio dobranego czasu t_0 , przy którym: $u_n(t_0) = 0$ równanie (3) będzie miało postać:

$$(4) \quad f(u_n(t_0)) = i(t_0) - C \left(\frac{du_n}{dt} \right)_{t=t_0} = 0$$

umożliwiająca wyznaczenie liniowej pojemności C modelu warystora.

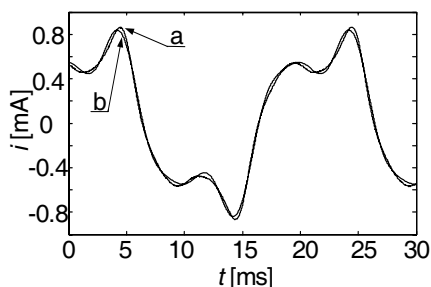
Wyznaczanie parametrów wewnętrznych

Dysponując zmierzonymi próbkami napięcia i prądu warystora można obliczyć parametry modelu rozwiązując problem regresji nieliniowej. Zadanie polega na takim dobraniu wartości R_0 , C_0 , aby wartości próbek prądu wynikające z przyjętego modelu, dane równaniem (2), były możliwie jak najbardziej zgodne z wartościami zmierzonymi. Do rozwiązania tego zadania zastosowano metodę minimalizacji błędów średniokwadratowych. Wykorzystano program MATLAB i pakiet *Optimisation Toolbox*, który umożliwia m. in. rozwiązanie zadania najmniejszych kwadratów metodą Levenberga-Marquardta. Początkowo przyjęto model zakładający występowanie jedynie podstawowej i trzeciej harmonicznej prądu warystora.



Rys.2. Przebieg zmierzony prądu (a) oraz przebieg wyznaczony analitycznie przy założeniu występowania 1 i 3 harmonicznej prądu warystora (b)

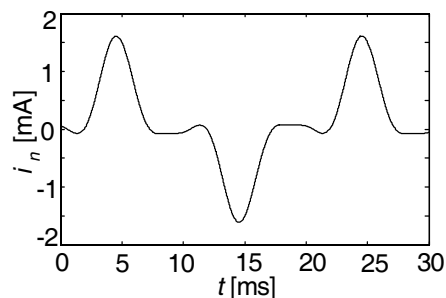
Po obliczeniu w opisany sposób parametrów R_0 , C_0 można wyznaczyć wartości prądu wynikające z (2). Rysunek 2 umożliwia porównanie krzywej teoretycznej prądu z przebiegiem zmierzonym. Jak widać, uzyskano dość dobrą zgodność. Następnie, w celu zmniejszenia błędów, zmodyfikowano model, uwzględniając występowanie oprócz trzeciej także piątej harmonicznej. Porównanie przebiegu zmierzonego z obliczonym w tym przypadku przedstawia rysunek 3.



Rys.3. Przebieg zmierzony prądu (a) oraz przebieg wyznaczony analitycznie przy założeniu występowania 1, 3 i 5 harmonicznej prądu warystora (b)

Można zauważyć, że uzyskano wyraźnie mniejszą różnicę między zmierzoną a wyznaczoną analitycznie krzywą prądu. Większą dokładność obliczeń potwierdza porównanie otrzymanych wartości błędów średniokwadratowych: 11,7 w pierwszym przypadku, gdy założono występowanie tylko trzeciej harmonicznej w modelu, oraz 2,7 po uwzględnieniu także 5 harmonicznej.

Do obliczeń parametrów warystora, przyjęto model, zakładający występowanie 5 harmonicznej. Otrzymano następujące wartości: $R_0=437 \text{ M}\Omega$, $C_0=70.8 \text{ pF}$. Następnie wyznaczono, zgodnie z (4), wartość $C=92,5 \text{ pF}$. Ostatecznie wyznaczono przebieg prądu płynącego przez element rezystancyjny nieliniowy $i_n=f(u_n)$ (rys. 4)



Rys.4. Przebieg prądu $i_n=f(u_n)$

Podsumowanie

Zaproponowano opis matematyczny modelu warystora ZnO. Posługując się tym opisem możliwe jest wyznaczenie parametrów wewnętrznych modelu dysponując jedynie zmierzonymi próbkami napięcia i prądu warystora. Przedstawione wyniki symulacji pokazują, że niezbędne jest uwzględnienie w obliczeniach nie tylko trzeciej ale i piątej harmonicznej w prądzie warystora.

LITERATURA

- [1] Petit A., Do X.D., St-Jean G., An experimental method to determine the electro-thermal model parameters of metal oxide surge arresters, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.6, No.2, (1991), 715-721
- [2] Bak-Jensen B., Bak-Jensen J., Mikkelsen S.D., Tolstrup J. Sorensen, Modelling of medium voltage ZnO arresters in the leakage region, *8th International Symposium on High Voltage Engineering*, Yokohama, Japan, (1993), 405-408
- [3] Bak-Jensen B., Bak-Jensen J., Mikkelsen S.D., Tolstrup Sorensen J., General equivalent circuit model of a ZnO arrester, *8th International Symposium on High Voltage Engineering*, (1993), 409-411
- [4] Furgał J., The modelling of electrothermal phenomena determined by overvoltages in without gapssurge arresters, *Scientific Papers of the Institute of Electrical Engineering Fundamentals Wrocław University of Technology*, No.32, Series Conference No.9, (1997), 155-160,
- [5] Bayadi A., Harid N., Zehar K, Belkhat S., Simulation of metal oxide surge arrester dynamic behavior under fast transients, *The International Conference on Power System Transients-IPST* (2003)
- [6] Fernandez F, Diaz R.; Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations; *The International Conference on Power System Transients-IPST* (2001)
- [7] Jaroszewski M. Kostyla P, Rezmer J.; Modeling of ZnO varistors in the leakage region; *XVII Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits*, (2002)

Autorzy: dr inż. Maciej Jaroszewski,
E-mail: maciej.jaroszewski@pwr.wroc.pl;
dr inż. Paweł Kostyla,
E-mail: pawel.kostyla@pwr.wroc.pl;
dr inż. Zbigniew Waclawek
E-mail: zbigniew.waclawek@pwr.wroc.pl

Politechnika Wrocławska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370