

Jakub Furgał¹

PORÓWNANIE MODELI OGRANICZNIKÓW PRZEPIĘĆ Z TLENKÓW METALI STOSOWANYCH W OBLICZENIACH NARAŻEŃ PRZEPIĘCIOWYCH IZOLACJI URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH

Streszczenie: Ochrona od przepięć urządzeń elektrycznych jest coraz częściej realizowana przy zastosowaniu ograniczników przepięć z tlenków metali. Prowadzone są obliczenia narażeń przepięciowych izolacji chronionych urządzeń. Wykorzystywane są przy tym modele ograniczników. W artykule porównano dwa modele, których parametry mogą być wyznaczone przy wykorzystaniu tylko danych katalogowych. Przedstawiono przykład zastosowania modeli i ocenę dokładności obliczeń.

Słowa kluczowe: ograniczniki przepięć z tlenków metali, schematy zastępcze

1. Wstęp

Po zastosowaniu beziskiernikowych ograniczników przepięć z tlenków metali do ochrony od przepięć urządzeń elektrycznych uległy zmianie warunki pracy układów izolacyjnych. Rozwijane są nowoczesne metody koordynacji izolacji [1]. Prowadzone są obliczenia, których celem jest wyznaczenie rzeczywistych narażeń przepięciowych izolacji chronionych urządzeń. Niezbędne to tego są modele ograniczników przepięć. Dotychczas opracowano kilka modeli, przedstawionych między innymi w publikacjach [2,3,4,5,6,7]. Praktyczne zastosowanie w obliczeniach przepięć, wykonywanych do celów koordynacji izolacji w sieciach i urządzeniach, znajdują modele dające wyniki obarczone małym błędem i jednocześnie takie, których parametry można wyznaczyć bez konieczności wykonywania dodatkowych badań.

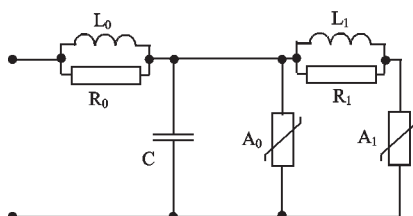
W artykule porównano wybrane dwa modele ograniczników przepięć z tlenków metali, które w dużym stopniu spełniają te warunki. Zamieszczono przykład zastosowania i ocenę dokładności modelowania ograniczników.

2. Struktura i parametry modeli

Spośród istniejących modeli ograniczników przepięć z tlenków metali praktyczne zastosowane znajduje model opracowany przez Grupę Roboczą 3.4.11 IEEE, przedstawiony na

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

rysunku 1 [5]. Zawiera on dwa warystory o różnych charakterystykach oraz elementy liniowe R,L,C. Dobór parametrów modelu jest dokonywany w dwu etapach. W pierwszym etapie wyznaczane są początkowe charakterystyki warystorów A_0 , A_1 i początkowe wartości elementów liniowych. Danymi, wykorzystywanymi do wyznaczania parametrów są wyniki badań napięć obniżonych zamieszczone w katalogach oraz wymiary stosu warystorów.



Rys. 1. Model Grupy Roboczej 3.4.11 IEEE beziskiernikowych ograniczników przepięć[5]

Początkowe charakterystyki warystorów modelu ograniczników przepięć z warystorami o średnicy 76 mm i znamionowych prądach wyładowczych $8/20\mu\text{s}$ o wartości maksymalnej 10kA wyrażają zależności

$$A_0 = A_{w_0} U_{8/20;10} / 1,6; \quad A_1 = A_{w_1} U_{8/20;10} / 1,6 \quad (1)$$

gdzie: $U_{8/20;10}$ – napięcie obniżone ogranicznika przy prądzie wyładowczym $8/20\mu\text{s}$; 10 kA,

$$A_{w_0}(i_{w_0}) = C_0 i_{A_0}^{\alpha_0}; \quad A_{w_1}(i_{w_1}) = C_1 i_{A_1}^{\alpha_1} \quad (2)$$

gdzie: C_0, C_1 – stałe [-]; $C_0 = 1,18$; $C_1 = 0,92$; α_0, α_1 – współczynniki nieliniowości; $\alpha_0 = 0,051$; $\alpha_1 = 0,058$; i_{A_0}, i_{A_1} – natężenia prądu w warystorach.

Wartości początkowe indukcyjności L_0 i L_1 rezystancji R_0 i R_1 oraz pojemności C oblicza się przy wykorzystaniu zależności

$$L_1 = 15 \frac{l_w}{n} [\mu H]; \quad R_1 = 65 \frac{l_w}{n} [\Omega]; \quad L_0 = 0,2 \frac{l_w}{n} [\mu H]; \quad R_0 = 100 \frac{l_w}{n} [\Omega]; \quad C = \frac{l_w}{n} [pF] \quad (3)$$

gdzie: l_w – wysokość kolumny warystorów [m], n – liczba równoległych kolumn [-].

W drugim etapie doboru parametrów korygowane są początkowe charakterystyki warystorów A_0, A_1 . Korekta jest dokonywana metodą iteracyjną tak, aby wyznaczona wartość napięcia obniżonego łączeniowego była równa wartości doświadczalnej. Następnie zmieniana jest początkowa wartość indukcyjności L_1 , aż do uzyskania zgodności wartości teoretycznej obniżonego napięcia piorunowego przy prądzie wyładowczym $8/20\mu\text{s}$, 10kA ($U_{8/20;10}$) z wartością doświadczalną.

Model przedstawiony na rysunku 1 został zaproponowany do modelowania ograniczników o znamionowym prądzie wyładowczym 10kA [5]. W sieciach elektroenergetycznych są stosowane również ograniczniki z tlenków metali o innych znamionowych prądach wyładowczych. Na przykład do ochrony od przepięć łączeniowych urządzeń w kablowych sieciach średnich napięć są stosowane ograniczniki o znamionowym prądzie wyładowczym 0,5kA z warystorami o średnicy 33mm [8].

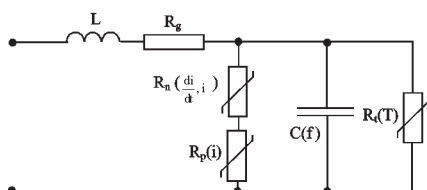
Przy doborze parametrów modelu takich ograniczników niezbędne jest wykonanie odpowiedniego przeskalowania charakterystyk wyrażonych wzorami (2) oraz uwzględnienie wpływu zmiany średnicy warystorów na zmianę rezystancji R_0 , R_1 i pojemności C . Charakterystyki warystorów $A_0(i)$ i $A_1(i)$ ograniczników o znamionowych prądach władowczych $I_{n;8/20} \neq 10$ kA są wyznaczane ze wzorów (1) po obliczeniu stałych C_0 i C_1 z następujących zależności [9]:

$$C_0 = 1,9 / I_{n;8/20}^{\alpha_0} ; C_1 = 1,55 / I_{n;8/20}^{\alpha_1} \quad (4)$$

gdzie: $I_{n;8/20}$ – znamionowy prąd wyładowczy o czasach $8/20\mu\text{s}$ ogranicznika [A].

Model, przedstawiony na rys.1, po uwzględnieniu powyższego uzupełnienia metody doboru parametrów może być wykorzystany do modelowania ograniczników przepięć o dowolnych parametrach. Zasadniczą trudność w jego wykorzystywaniu stanowi jednak konieczność stosowania iteracyjnej metody korekty jego parametrów.

Innym modelem ograniczników beziskiernikowych wykorzystywanym przy prowadzeniu obliczeń przepięć w sieciach i urządzeniach chronionych tymi ogranicznikami jest model Schmidta – Fesera, przedstawiony na rysunku 2 [6,7]. Dobór jego parametrów jest znacznie prostszy od doboru parametrów modelu zamieszczonego na rysunku 1. Indukcyjność L wynika z jednostkowej indukcyjności ogranicznika, wynoszącej $1\mu\text{Hm}^{-1}$, a R_g z rezystywności ziaren warystora, równej $0,023\ \Omega\text{m}$. Pojemność jednostkowa, warystorów o średnicy 76 mm, jest zawarta w zakresie od $24\ \text{pFm}^{-1}$ (przy dużej pochodnej prądu) $45\ \text{pFm}^{-1}$ (przy małej pochodnej) [6].



Rys. 2. Model Schmidta-Fesera beziskiernikowych ograniczników przepięć [5]

Zmiany konduktancji warystora R_n , w zależności od wartości i szybkości zmian prądu, wyraża następujące równanie różniczkowe [6,7]

$$\frac{dG_n}{dt} = \frac{G_{odn}}{T} \left[1 + \frac{G_n}{G_{odn}} \right] \left[1 + \frac{G_n}{G_{odn}} \left(\frac{i}{I_{odn}} \right)^2 \right] e^{\frac{u_{nn}}{U_{odn}}} \quad (5)$$

gdzie: G_n – konduktancja warystora R_n [Ω^{-1}]; G_{odn} – konduktancja odniesienia [Ω^{-1}] ($G_{odn} = 34/U_{8/20;I_n}$); U_{odn} – napięcie odniesienia [kV] ($U_{odn} = 0,57 (U_{1/T_1;I_n} - U_{8/20;I_n})$); $U_{8/20;I_n}$, $U_{1/T_2;I_n}$ – znamionowe napięcia obniżone przy prądach $8/20\mu\text{s}$ i $1/T_2$ [kV]; u_{nn} – napięcie na warystorze R_n ; I_{odn} – prąd odniesienia; $I_{odn} = 5,4$ kA; T – czas odniesienia ($T = 80\mu\text{s}$) [7].

Charakterystyka napięciowo-prądowa warystora R_p w postaci

$$U_{R_p}(i) = k i^\alpha \quad (6)$$

gdzie: k – stała, α – współczynnik nieliniowości [-], jest wyznaczana na podstawie wyników pomiarów napięć obniżonych przy prądach wyładowczych $8/20\mu\text{s}$.

Schemat, zamieszczony na rysunku 2, wykorzystywany do modelowania ograniczników przepięć przy dużych prądach wyładowczych, można znacznie uprościć. W tych warunkach pracy można pominąć wpływ rezystora $R_t(T)$ na napięcia na ogranicznikach. Charakterystyki warystorów z tlenków metali są bowiem zależne od temperatury tylko w obszarze przedprzebiciowym tj. przy niewielkich prądach. O zależnościach $u = f(i)$ przy przepływie dużych prądów decydują charakterystyki warystorów R_p , R_n oraz rezystancja R_g . Pojemność ograniczników ma niewielki wpływ na wynik modelowania. Jest ona znacznie mniejsza od pojemności chronionych urządzeń np. transformatorów, kabli. W wyniku takich przekształceń model z rysunku 2 ulega znacznemu uproszczeniu.

2. Wyniki obliczeń

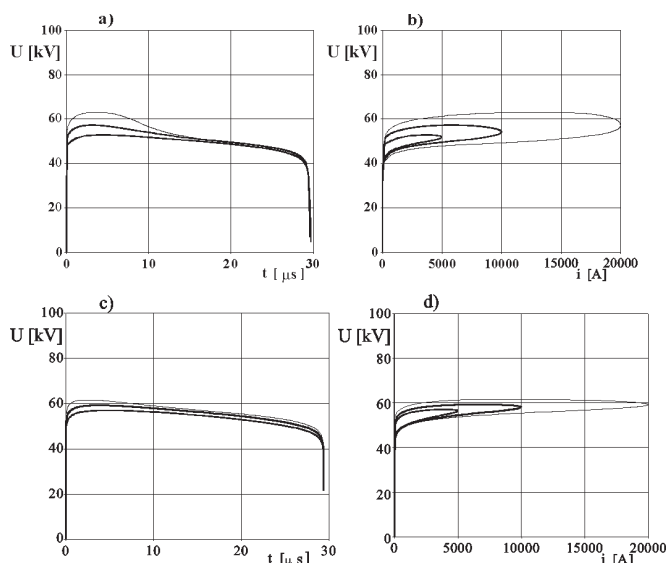
Przy wykorzystaniu modeli przedstawionych na rysunkach 1 i 2 wyznaczono dynamiczne charakterystyki napięciowo-prądowe wybranego ogranicznika beziskiernikowego stosowanego do ochrony urządzeń w sieciach średnich napięć. Na ich podstawie wyznaczono napięcia obniżone przy znormalizowanych prądach wyładowczych. Teoretyczne wartości napięć obniżonych porównano z wynikami badań. Obliczenia wykonano dla ogranicznika typu GXD22 o napięciu pracy ciągłej równym 17,6kV i napięciu znamionowym wynoszącym 22kV[10]. Ograniczniki o takich parametrach są zalecane do ochrony od przepięć urządzeń w sieciach 15 kV, gdzie czas wyłączenia zwarć doziemnych nie jest ograniczony.

Tabela 1. Wartości doświadczalne i obliczone napięcia obniżonego ogranicznika przepięć z tlenków metali typu GXD 22

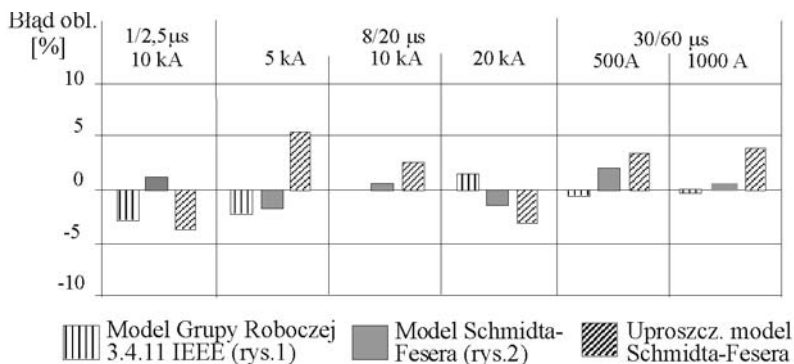
Stosowany model	Napięcie obniżone przy prądzie wyładowczym					
	1/2,5 μ s	8/20 μ s			30/60 μ s	
	10 kA	5 kA	10 kA	20 kA	500 A	1000 A
	kV	kV	kV	kV	kV	kV
Wartości doświadczalne [10]	62,9	54,0	57,2	62,3	45,8	47,3
Model Grupy Roboczej IEEE	61,2	52,8	57,2	63,1	45,4	47,2
Model Schmidta-Fesera	63,6	53,1	57,6	61,5	46,7	47,4
Uproszczony model Schmidta-Fesera	60,5	56,9	58,7	60,3	47,4	49,2

Wyznaczono zależności czasowe napięcia $u=f(t)$ oraz charakterystyki napięciowo-prądowe $u=f(i)$ ogranicznika dla prądów wyładowczych o czasach: 1/2,5 μ s (10kA), 8/20 μ s (5kA, 10kA, 20kA) oraz 30/60 μ s (0,5kA, 1kA) [10,11]. Do obliczeń zastosowano metodę Newtona rozwiązywania równań nieliniowych. Wybrane wyniki obliczeń zamieszczono na rysunku 3. Wartości napięć obniżonych ogranicznika, wyznaczone na podstawie obliczeń, zamieszczono w tabeli 1 łącznie z wartościami doświadczalnymi. Maksymalny błąd obliczeń napięcia obniżonego ogranicznika, wykonanych przy zastosowaniu modelu Grupy Roboczej 3.4.11 IEEE, nie przekracza 2,7%. Większą zgodność wyników obliczeń z badaniami uzyskano przy wykorzystaniu modelu Schmidta-Fesera. Maksymalny błąd obliczeń napięć obniż-

onych nie jest większy od 2%. Po uproszczeniu modelu błąd wynosi 5,3%. Uproszczenie modelu wpływa więc na dokładność obliczeń, ale znacznie ułatwia ich prowadzenie.



Rys. 3. Wybrane zależności $u=f(t)$ oraz $u=f(i)$ dla ogranicznika beziskiernikowego z tlenków metali typu GXD 22, wyznaczone dla prądu wyladowczego 8/20 μ s; 5kA, 10kA i 20kA przy wykorzystaniu: a,b – modelu IEEE (rys.1); c,d – modelu Schmidta-Fesera (rys.2)



Rys. 4. Maksymalne błędy obliczeń napięć obniżonych ogranicznika

Podsumowanie

W artykule przedstawiono modele ograniczników przepięć z tlenków metali o różnych strukturach i odmiennych procedurach doboru parametrów. Są one wykorzystywane w obliczeniach przepięć w sieciach i urządzeniach elektrycznych chronionych ogranicznikami bezi-

skiernikowymi. Ich cechą wspólną jest możliwość wyznaczania parametrów przy wykorzystaniu danych katalogowych. Umożliwiają one modelowanie ograniczników przepięć o dowolnych parametrach. Błędy obliczeń wykonywanych przy zastosowaniu obu modeli są zbliżone.

Literatura

- [1] **Flisowski Z., Koształuk R.:** *Współczesne metody koordynacji izolacji*. Przegląd Elektrotechniczny, R. LXXIV, Nr 2, 1998, str. 36-45
- [2] **Bak-Jensen B., Bak-Jensen J., Mikkelsen S. D., Sorensen T. J.:** *General Equivalent Circuit Model of a ZnO Arrester*. 8th Intern. Symp. on High Voltage Engineering. (Yokohama), August 23 - 27, 1993, pp. 409 - 412
- [3] **Kim I., Funabashi T., Sasaki H., Hagiwara T.:** *Study of ZnO Arrester Model for Steep Front Wave*. IEEE Trans. on Pow. Delivery, Vol. 11, No. 2, April 1996, pp. 834 - 839
- [4] **Sarto M. S.:** *A Nonlinear Distributed Parameter Model for the Transient Analysis of Surge Arresters in Power Lines*. Int. Symp. on Electrom. Compatibility (EMC'94) (Rome), Sept. 13-16, 1994, pp. 687 - 692
- [5] **IEEE Working Group 3.4.11.:** *Modelling of Metal Oxide Surge Arresters*. IEEE Trans. on Pow. Delivery, Vol. 7, No. 1, January 1992, pp. 302 - 309
- [6] **Schmidt U., Meppelink J., Richter B., Feser K., Kehl L., Qiu D.:** *Behaviour of MO-Surge Arrester Bloks to Fast Transients*. IEEE Trans. on Power Delivery. Vol. 4, No 1, January 1989, pp. 292 - 300
- [7] **Hileman A. R., Rogunin J., Weck K. H.:** *Metal Oxide Surge Arresters in AC Systems. Part V: Protection Performance of Metal Oxide Surge Arresters*. Electra, No 133, 1991, pp. 132 - 143
- [8] *Ograniczniki przepięć łączeniowych typu GX*. Karta katalogowa GX/06/03. ZWAR S.A.
- [9] **Furgal J.:** *Zastosowanie wybranego schematu zastępczego do modelowania ograniczników przepięć z tlenków metali o zróżnicowanych parametrach*. III Ogólnop. Symp.: Inżynieria Wysokich Napięć IW'96, Poznań/Kiekrz, czerwiec 1996, str. 317 - 322
- [10] *Ograniczniki przepięć typu GXD 10-45*. Karta katalogowa GXD/06/01. ZWAR S. A.
- [11] PN/IEC 99-4 *Ograniczniki przepięć. Beziskiernikowe zaworowe ograniczniki przepięć z tlenków metali do sieci prądu przemiennego*

COMPARISON OF MODELS OF MO-SURGE ARRESTERS USED TO CALCULATE OVERVOLTAGE RISK OF DEVICE INSULATION

Nowadays MO-surge arresters are commonly used in electrical networks. Calculations of overvoltage risks of protected devices are made. The application of models of MO-surge arresters is essential to make these calculations. Two models are compared in the paper. Their parameters can be determined using catalogue data. The example of application was presented and the estimation of modelling precision was also made.

Artykuł opracowano w ramach umowy nr 10.10.120.397/p
finansowanej przez Komitet Badań Naukowych