



Jakub FURGAŁ

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki

Analiza efektów działania beziskiernikowych ograniczników przepięć w sieci średniego napięcia

Streszczenie: Przedstawiono obliczenia przepięć w sieci elektrycznej średniego napięcia chronionej ogranicznikami beziskiernikowymi. Przeprowadzono analizę wpływu beziskiernikowych ograniczników przepięć na przepięcia ziemnozwarciowe, łączeniowe oraz piorunowe. Analizowano także wpływ sposobu połączenia punktu neutralnego sieci na przepięcia ziemnozwarciowe oraz długości linii kablowych na przepięcia podczas wyłączania transformatorów nieobciążonych.

Abstract: (Analysis of operational effects of metal oxide surge arresters in a medium voltage network) In this paper there are presented calculations of overvoltages in the medium voltage electrical network with metal oxide surge arresters. The influence of metal-oxide surge arresters on switching and lightning overvoltages has been analysed. The influence of method of connecting a neutral point to earth has been analysed too. It has been also investigated the dependency between the length of cable line and switching overvoltages generated during the switching-off transformers

Słowa kluczowe: przepięcia, ograniczniki przepięć, sieci średniego napięcia, symulacje numeryczne

Keywords: overvoltages, surge arresters, medium voltage electrical networks, numerical simulations

Wprowadzenie

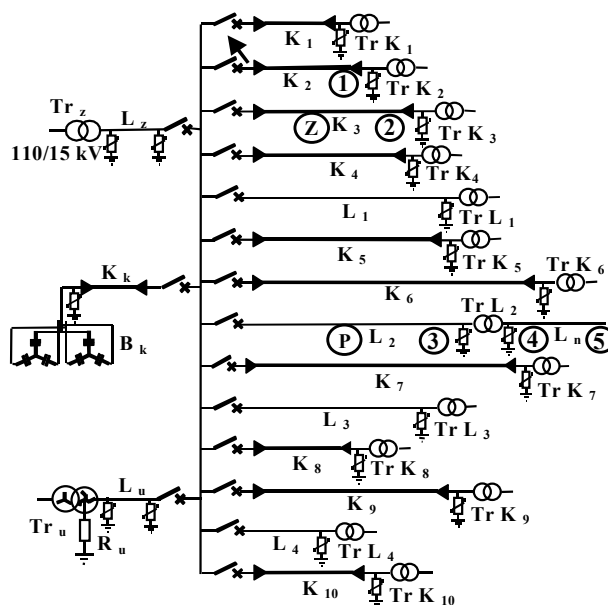
Beziskiernikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali są stosowane powszechnie do ochrony od przepięć urządzeń w sieciach elektrycznych. Są one montowane w sieciach budowanych oraz są nimi zastępowane systematycznie iskiernikowe ograniczniki przepięć z warystorami z węgla krzemu stosowane dotychczas w sieciach eksploatowanych. Właściwości ochronne ograniczników przepięć różnią się od właściwości ochronnych ograniczników iskiernikowych. W odróżnieniu od ograniczników iskiernikowych ograniczniki beziskiernikowe reagują na wszystkie przepięcia powstające w sieciach elektrycznych. Efekty działania tych ograniczników wynikają z charakterystyk napięciowo-prądowych warystorów tlenkowych.

Charakterystyki ochronne ograniczników beziskiernikowych są zależne głównie od wartości napięcia pracy ciągłej U_c oraz napięcia znamionowego U_r . Parametry te są wyznaczone z uwzględnieniem konieczności zapewnienia długotrwałej niezawodnej pracy ograniczników. Kryterium doboru wartości tych parametrów wynika z konieczności utrzymywania wartości prądu, płynącego w ograniczniku w warunkach pracy normalnej oraz podczas oddziaływania przepięć dorywczych, w zakresie bezpiecznym dla ogranicznika. Wartości tych napięć są zależne od napięcia znamionowego sieci, sposobu połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią oraz spodziewanych przepięć dorywczych. Wartości znamionowych napięć obniżonych ograniczników są natomiast funkcjami wartości napięć znamionowych ograniczników tlenkowych [1]. Wybór wartości napięcia pracy ciągłej oraz wartości napięcia znamionowego ogranicznika tlenkowego jest więc jednocześnie wyborem charakterystyki ochronnej ogranicznika.

W artykule przedstawiono analizę wpływu beziskiernikowych ograniczników przepięć, o parametrach dobranych zgodnie z zaleceniami normalizacyjnymi, na przepięcia ziemnozwarciowe, łączeniowe oraz przepięcia piorunowe powstające w sieci średniego napięcia. Prowadzono ją w oparciu o wyniki obliczeń przepięć powstających w rzeczywistej sieci rozdzielczej kablo- i napowietrznej średniego napięcia, wykonanych przy zastosowaniu programu komputerowego EMP-ATP [2].

Parametry sieci elektrycznej

Sieć elektryczna średniego napięcia, w której analizowano przepięcia zawiera dziesięć transformatorów rozdzielczych 15/0,4kV zasilanych kablami typu HAKnFtA oraz cztery transformatory zasilane liniami napowietrznymi (rys.1).



Rys. 1. Schemat układu połączeń sieci średniego napięcia
Z - miejsce zwarcia doziemnego,
P - punkt wystąpienia wyładowania piorunowego do linii,
1 - 5 - punkty, w których obliczono przepięcia doziemne

Parametry podstawowe linii kablowych są następujące:

$K_1(1,3 \text{ km}), K_{10}(0,9 \text{ km})$	– 70 mm ² ;
$K_2(1,8 \text{ km}), K_5(1,7 \text{ km}), K_6(3 \text{ km}),$	
$K_7(3 \text{ km}), K_9(1,9 \text{ km})$	– 240 mm ² ;
$K_4(1,3 \text{ km}), K_8(0,4 \text{ km}), K_k(0,12 \text{ km})$	– 120 mm ² ;
$K_3(1,5 \text{ km})$	– 95 mm ² ;

a długości i przekroje linii napowietrznych wynoszą odpowiednio:
 $L_1(1,7 \text{ km}), L_2(3,1 \text{ km}), L_3(1,5 \text{ km}),$

L_4 (1 km), L_u (0,1 km) – 70 mm²;
 L_z (0,5 km) – 525 mm²;
 L_n (1,05 km) – 70 mm².

Parametry transformatora 110/15kV zasilającego sieć oraz parametry transformatorów rozdzielczych 15/0,4 kV zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1: Parametry podstawowe transformatorów

Oznaczenie	S_n	U_n	U_z	ΔP_{Fe}	ΔP_{Cu}	I_0
	kVA	kV	%	kW	kW	%
r_z	16000	110/16,5	12	12,84	88,75	0,24
$Tr K_1 - Tr K_4, Tr K_8, Tr K_{10}$	630	15,75/0,4	6	0,9	6,25	1,6
$Tr K_5 - Tr K_7, Tr K_9, Tr L_1 - Tr L_4$	1000	15,75/0,4	6	1,6	10	1
Tr_u	100	15,75/0,4	4,5	0,245	1,6	2

Sieć pracuje z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor 16 Ω [3]. Z szynami rozdzielni jest połączona bateria kondensatorów o pojemności 11,3 μF w każdej fazie.

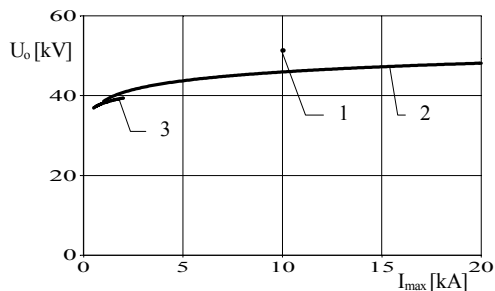
Wartości napięć pracy ciągłej oraz napięć znamionowych ograniczników beziskiernikowych, stosowanych w sieciach elektrycznych średnich napięć, są obliczane przy wykorzystaniu zależności zamieszczonych w publikacjach [4, 5, 6, 7]. Wyniki obliczeń tych parametrów ograniczników do sieci 15 kV zamieszczono w tabeli 2 [6].

Tabela 2: Wartości zalecane parametrów beziskiernikowych ograniczników przepięć do sieci elektrycznych 15 kV [6]

L.p	Parametr	kV	
1	Automatyczna eliminacja jednofazowego zwarcia doziemnego	U_c	12,8
		U_r	16
2	Eliminacja zwarcia doziemnego po czasie $t_z = 10$ s	U_c	14,4
		U_r	18
3	Czas trwania zwarcia nie jest ograniczony	U_c	17,6
		U_r	22

Znamionowy prąd wyładowczy 8/20 μs : $I_n = 10$ kA lub $I_n = 5$ kA
 Zdolność pochłaniania energii: nie mniej niż 2 kJ/1kV U_r
 Wytrzymałość na udary o kształcie prostokątnym, 2000 μs : próba prądem ≥ 250 A
 Wytrzymałość zwarcia: dostosowana do spodziewanego prądu zwarcia doziemnego
 Droga upływu izolacji: dostosowana do warunków zabrudzeniowych

Zawarto w niej wartości zalecane napięć U_c i U_r ograniczników tlenkowych zależne od czasu niezbędny do wyłączenia zwarc doziemnych wynikającego ze sposobu uziemienia punktu neutralnego sieci.



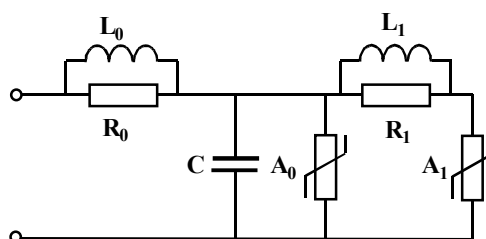
Rys. 2. Charakterystyki napięciowo-prądowe ograniczników przepięć typu Polim-S-15 dla udarów prądowych: 1 - 1/2,5 μs , 2 - 8/20 μs , 3 - 30/60 μs

Wymagania normalizacyjne dotyczące wartości parametrów ograniczników przepięć do sieci elektrycznych o napięciu nominalnym 15 kV, w których czas niezbędny do wyłączenia zwarcia wynosi 10 s, (tabela 2) spełniają ograniczniki typu Polim-S-15 (ABB). Napięcie pracy ciągłej tych ograniczników wynosi 15 kV, a napięcie znamionowe - 18,8 kV [8]. Charakterystyki napięciowo-prądowe ograniczników przedstawiono na rysunku 2.

Do ochrony uzwojeń niskiego napięcia transformatorów od przepięć zastosowano ograniczniki beziskiernikowe typu GXO-LOVOS-10 (ABB) [9,10] o napięciu pracy trwałej równym 0,28 kV i napięciu obniżonym wynoszącym 1,15 kV przy udarze prądowym 10 kA (8/20 μs).

Wyniki obliczeń przepięć

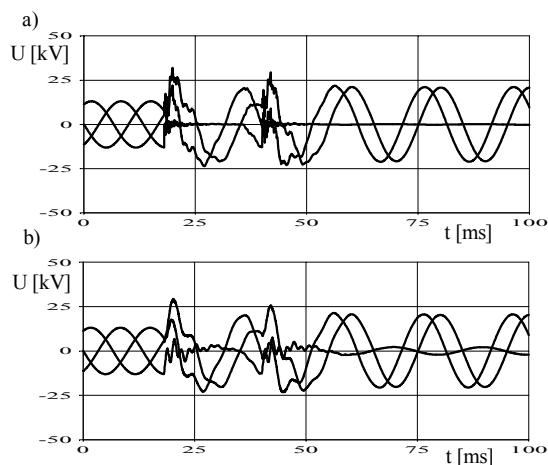
Do obliczeń przepięć w sieci wykorzystano program komputerowy Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP/ATP) [2]. Beziskiernikowe ograniczniki przepięć z tlenków metali modelowano za pomocą modelu częstotliwościowo-zależnego (rys. 3) [11].



Rys. 3. Model beziskiernikowych ograniczników przepięć [11]

Model uwzględnia wpływ kształtów udarów prądowych na charakterystyki napięciowo-prądowe ograniczników. Jest on zalecany do stosowania przy oddziaływaniu udarów prądowych o czasach narastania czoła do 45 μs .

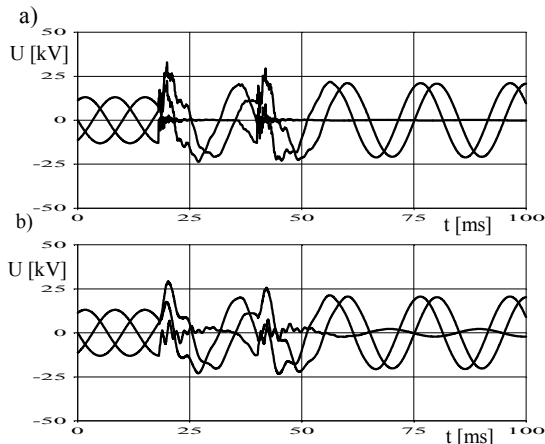
Wykonano obliczenia przepięć ziemnozwarciowych, łączeniowych oraz piorunowych w sieci. W artykule zamieszczono tylko wybrane wyniki obliczeń. Stanowią je przepięcia doziemne na zaciskach wejściowych uzwojeń górnego napięcia transformatorów: TrK_3 i TrL_2 (rys.1). Przedstawiono także przepięcia w linii niskiego napięcia L_n , powstające podczas wyładowań piorunowych do linii napowietrznej zasilającej transformator TrL_2 .



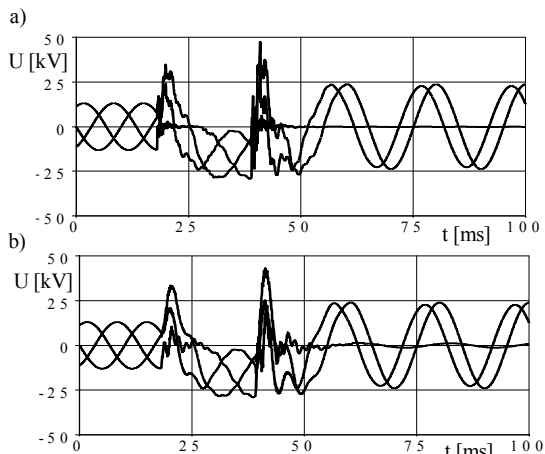
Rys. 4. Przepięcia doziemne w wybranych punktach sieci z ogranicznikami przepięć powstające podczas zwarcia doziemnego fazy L_1 w linii kablowej K_3 (rys.1):

a) przepięcia na zaciskach transformatora TrK_3 ,
 b) przepięcia doziemne na zaciskach transformatora TrL_2

Wyniki obliczeń przepięć ziemnozwarciowych na zaciskach wejściowych transformatorów TrK_3 i TrL_2 podczas zwarcia doziemnego w linii kablowej K_3 (punkt Z – rys.1) zamieszczono na rysunku 4. W obliczeniach przyjęto, że przebieg zwarcia doziemnego jest zgodny z teorią Petersa-Slepiana [3]. Na rysunku 5 natomiast zamieszczono przepięcia powstające na zaciskach tych samych transformatorów, ale bez ograniczników przepięć. Na rysunku 6 zamieszczono również przepięcia doziemne po odizolowaniu punktu neutralnego sieci od ziemi.



Rys. 5. Przepięcia doziemne na zaciskach transformatorów w sieci bez ograniczników przepięć powstające podczas zwarcia doziemnego fazy $L1$ w linii K_3 (rys.1): a) transformator TrK_3 , b) transformator TrL_2

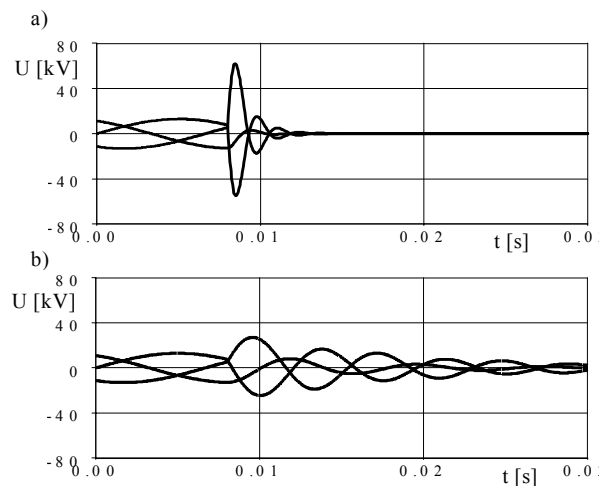


Rys. 6. Przepięcia doziemne na zaciskach transformatorów powstające podczas zwarcia doziemnego fazy $L1$ w linii kablowej K_3 (rys. 1) po odłączeniu punktu neutralnego sieci od ziemi: a) transformator TrK_3 , b) transformator TrL_2

Z obliczonych przebiegów przepięć doziemnych wynika, że ograniczniki przepięć mają niewielki wpływ na wartości przepięć ziemnozwarciowych w sieci. Odizolowanie punktu neutralnego sieci od ziemi powoduje natomiast znaczne zwiększenie przepięć ziemnozwarciowych. Największa wartość maksymalna przepięć ziemnozwarciowych w sieci z punktem neutralnym połączonym przez rezystor wynosi 30 kV, a po odizolowaniu punktu neutralnego od ziemi wzrasta ona do 45 kV.

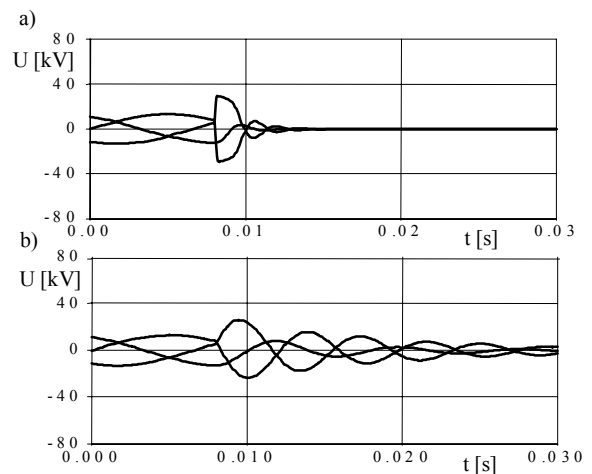
Przepięcia powstające wówczas na transformatorze bez zainstalowanych ograniczników przepięć przedstawiono na rysunku 7. Ze względu na dużą pojemność kabel zasilający ogranicza przepięcia powstające podczas wyłączenia transformatora. Gdy długość kabla zasilającego transformator wzrasta od 5 m do 50 m to wartości maksymalne tych przepięć maleją z 61 kV do 24,5 kV. Po

zastosowaniu ograniczników tlenkowych wartości maksymalne przepięć powstających podczas wyłączenia na transformatorze są zmniejszane do 29 kV (rys.7).



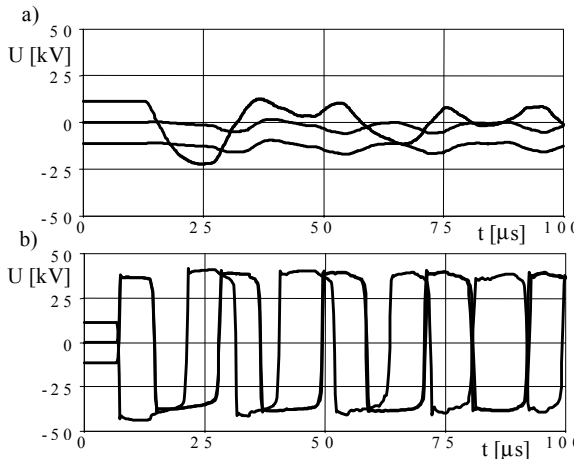
Rys. 7. Przepięcia doziemne na zaciskach transformatora TrK_2 nieobciążonego bez ograniczników przepięć, występujące podczas wyłączenia zasilających linii kablowych o różnych długościach: a) długość $d = 5$ m, b) długość $d = 50$ m

Obliczono także przepięcia doziemne na zaciskach transformatora TrK_3 (rys.1) 15/0,4kV powstające podczas wyłączenia wyłącznikiem próżniowym linii zasilającej transformator TrK_2 nieobciążony. Obliczenia wykonano dla linii kablowych zasilających o długościach wynoszących 5 m i 50 m.

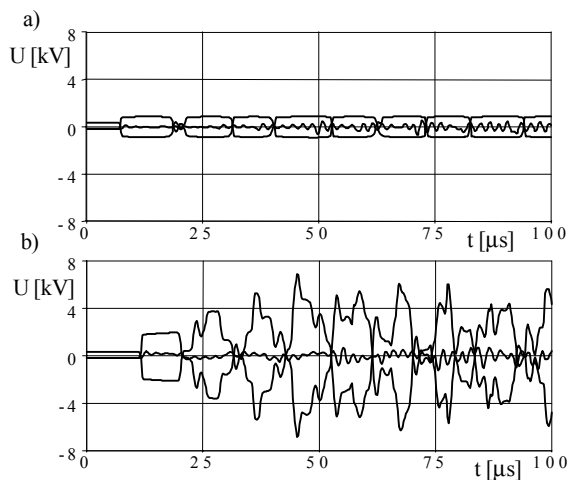


Rys. 8. Przepięcia doziemne na zaciskach nieobciążonego transformatora TrK_2 chronionego ogranicznikami przepięć, występujące podczas wyłączenia zasilających linii kablowych o różnych długościach: a) długość $d = 5$ m, b) długość $d = 50$ m

Sieć kablowo-napowietrzna jest narażona na oddziaływanie wyładowań piorunowych do linii napowietrznych. W celu wyznaczenia wartości maksymalnych oraz przebiegów przepięć piorunowych w sieci z ogranicznikami beziskiemkowymi obliczono przepięcia powstające podczas wyładowania piorunowego o wartości maksymalnej prądu 10 kA (8/20 μ s) do przewodu fazy $L1$ linii napowietrznej L_2 w odległości 2,05 km od transformatora TrL_2 (punkt P - rys.1). Na rysunku 9 zamieszczono wybrane wyniki obliczeń.



Rys. 9. Przepięcia doziemne na zaciskach transformatorów: powstające podczas wyładowania piorunowego w linii napowietrznej L_2 (rys.1): a) transformator TrK_3 , b) transformator TrL_2



Rys. 10. Przepięcia doziemne powstające podczas wyładowania piorunowego do przewodu fazy L_1 linii napowietrznej L_2 (rys.1): a) na zaciskach uzwojenia 0,4 kV transformatora TrL_2 chronionego ogranicznikami, b) na końcu linii niskiego napięcia L_n

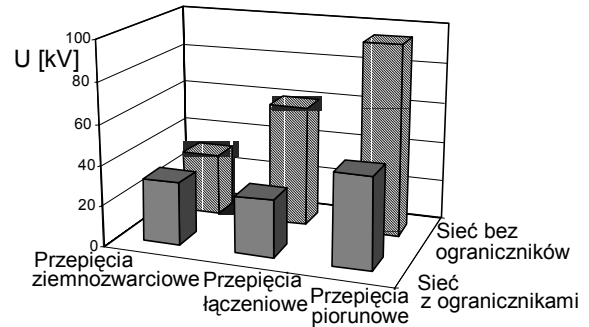
Przepięcia na zaciskach uzwojenia górnego napięcia transformatora TrL_2 chronionego ogranicznikami nie przekraczają 42 kV. Przepięcia są przenoszone przez uzwojenia transformatora. Na końcu linii nieobciążonej niskiego napięcia przepięcia osiągają wartości maksymalne 5 kV pomimo zastosowanych ograniczników przepięć chroniących uzwojenie niskiego napięcia transformatora (rys. 10). Po włączeniu odbiorników przepięcia ulegają jednak zmniejszeniu.

Podsumowanie

Przedstawiono wyniki obliczeń przepięć w sieci średniego napięcia z zamontowanymi beziskiernikowymi ogranicznikami przepięć. Celem obliczeń była analiza wpływu ograniczników tlenkowych na typowe przepięcia generowane w takiej sieci. Wynika z niej, że ograniczniki

beziskiernikowe zmniejszają wartości przepięć powstających przy wyłączaniu transformatorów nieobciążonych oraz przepięć generowanych podczas wyładowań atmosferycznych (rys. 11). Ich wpływ jest jednak niewielki zarówno na kształty jak i na wartości maksymalne przepięć ziemnozwarciowych. Przepięcia te nie przekraczają bowiem zwykle dwu i półkrotnej wartości maksymalnej napięcia fazowego sieci.

Przedstawione obliczenia potwierdzają, że program EMTP-ATP umożliwia wykonywanie symulacji numerycznych różnorodnych przepięć powstających w rozległych sieciach średniego napięcia.



Rys. 11. Wpływ beziskiernikowych ograniczników przepięć na wartości maksymalne wybranych przepięć w sieci średniego napięcia

Artykuł opracowano w ramach umowy o badania własne nr: 10.10.120.372 finansowanej przez Komitet Badań Naukowych

LITERATURA

- [1] PN-IEC 99-4 Ograniczniki przepięć. Beziskiernikowe zaworowe ograniczniki przepięć z tlenków metali do sieci prądu przemiennego
- [2] Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program, Rule Book. 1987
- [3] Anderson E.: Przepięcia wewnętrzne w sieciach średniego napięcia i ich ograniczanie. *Postępy Techniki Wysokich Napięć. Komitet Elektrotechniki PAN, Z. 22, Warszawa, 1997*
- [4] PN-EN 60099-5:1999 Ograniczniki przepięć. Zalecenia wyboru i stosowania
- [5] Arciszewski J., Komorowska I.: Ochrona sieci elektroenergetycznych od przepięć. *Wskazówki wykonawcze. PTP i REE, Poznań, 1999*
- [6] Kosztaluk R., Flisowski Z.: Dobór odgromników do pracy w sieciach elektrycznych. *Przegląd Elektrotechniczny. R. LXXIV, Nr 5, 1998, str. 118 - 122*
- [7] Kosztaluk R., Flisowski Z.: Koordynacja izolacji polskich sieci wysokich napięć. *Przegląd Elektrotechniczny. R. LXXIV, Nr 2, 1998, str. 41 - 45*
- [8] Ogranicznik przepięć z tlenków metali typu POLIM-S
- [9] SPD-ograniczniki przepięć typu GXO-LOVOS-5/10kA. Karta katalogowa LVA/06/02
- [10] PN-IEC 61643-1 Urządzenia ograniczające przepięcia w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia
- [11] IEEE Working Group 3.4.11: Modeling of Metal Oxide Surge Arresters. *IEEE Trans. on PD, Vol. 7, No. 1, January 1992, pp. 302 - 309*

Autor: dr inż. Jakub Furgał, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30, e-mail: furgal@uci.agh.edu.pl