

doi:10.15199/48.2015.06.30

Analiza przebiegów napięć ziemnozwarciowych w sieciach rozdzielczych

Streszczenie: Zwarcia doziemne są szczególnie częste w sieciach kablowych rozdzielczych. Podczas zwarć doziemnych pojawiają się przebiegi o dużych wartościach maksymalnych spowodowane wielokrotnymi zapłonami i gaszeniem łuku elektrycznego w miejscu zwarcia. W celu ograniczenia prądu ziemnozwarciowego, szybkiego zgaszenia łuku w miejscu zwarcia i ograniczenia napięć ziemnozwarciowych, punkt neutralny sieci elektrycznych jest łączony przez cewkę lub rezystor. Sieci elektryczne rozdzielcze o małym prądzie ziemnozwarciowym mogą pracować z punktem odizolowanym od ziemi. W artykule zamieszczono analizę przebiegów napięć ziemnozwarciowych w rzeczywistej sieci rozdzielczej kablowo-napowietrznej. Podstawą analizy były wyniki symulacji przebiegów podczas zwarć doziemnych w sieci przy różnych sposobach połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią. Do ochrony napięciowej urządzeń zastosowano ograniczniki napięć z tlenków metali. Symulacje prowadzono zgodnie z teoriami Petersa i Slepiana oraz Petersena, przy wykorzystaniu programu Electromagnetic Transients Program-Alternative Transients Program (EMTP-ATP).

Abstract: Overvoltages occurring under earth faults duration occur especially often in distribution cable electric networks. Significant values of overvoltages are caused by multiple ignitions of electric arc occurring in earth fault place. In order to limit short circuit current and overvoltages, neutral point of electric networks can be connected to earth by Petersen coil or resistor. Neutral points of electrical networks with small value of earth fault current can be designed as isolated from earth. This paper presents an analysis of overvoltages during short circuit to earth performed for real medium voltage cable network. Simulations have been performed for various ways of the neutral point connection to earth. Metal oxide surge arresters have been applied to provide overvoltage protection for devices installed in analyzed electrical network. Simulations have been performed in the EMTP-ATP program according to two short circuit theories – the Petersen's theory, as well as the Peters' and Slepian's theory. (Analysis of overvoltages during earth faults in distribution electrical networks).

Słowa kluczowe: przebiegi napięć ziemnozwarciowe, ochrona napięciowa, symulacje komputerowe, program EMTP-ATP
Keywords: overvoltages during earth faults, overvoltage protection, computer simulations, program EMTP-ATP

Wstęp

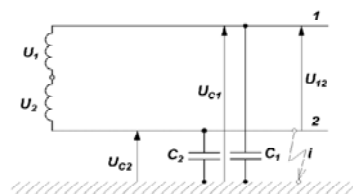
Zwarcia doziemne stanowią stany awaryjne szczególnie częste w rozległych sieciach elektrycznych rozdzielczych kablowych. Jednym ze skutków zwarć doziemnych są przebiegi napięć narażające układy izolacyjne urządzeń elektroenergetycznych. Przebiegi są efektem zjawisk przejściowych spowodowanych zwarcie jednej fazy z ziemią. Zjawiska w miejscu zwarcia, w którym przepływa prąd o dużym natężeniu mają wpływ na przebiegi napięć przejściowych i ich wartości maksymalne. Przebiegi napięć ziemnozwarciowych osiągają największe wartości w sieciach o dużych prądach doziemnych, gdy łuk jest zapalany i gaszony wielokrotnie [1]. Analiza przebiegów napięć ziemnozwarciowych w sieciach elektroenergetycznych ma duże znaczenie dla oceny narażeń układów izolacyjnych urządzeń i skuteczności ochrony napięciowej. Duży wpływ na przebiegi napięć ziemnozwarciowych ma sposób połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią.

Sieci średniego napięcia mogą pracować z punktem neutralnym izolowanym od ziemi, połączonym do ziemi przez cewkę Petersena, lub rezystor [2]. Włączenie cewki między punkt neutralny sieci a ziemię powoduje zmniejszenie prądu ziemnozwarciowego, łuk w miejscu zwarcia jest gaszony w krótkim czasie. Zastosowanie rezystora uziemiającego w sieci powoduje zwiększenie czułości wykrywania zwarć doziemnych i skrócenie czasu do wyłączenia sieci, w której nastąpiło zwarcie.

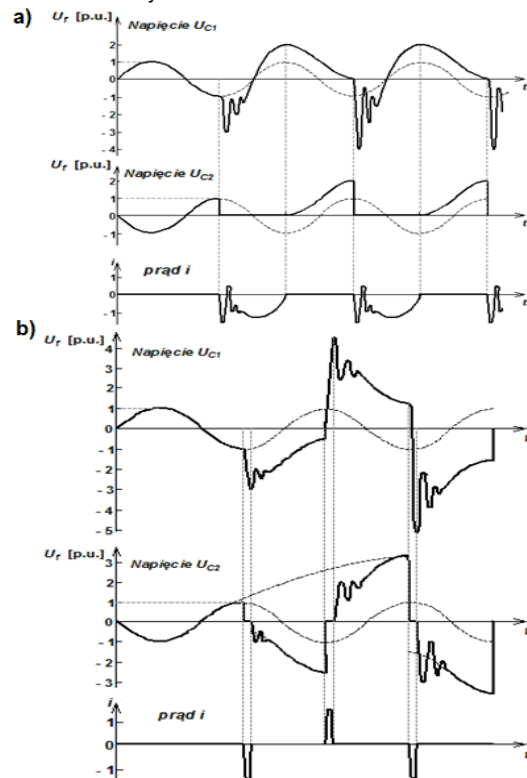
W artykule przedstawiono analizę przebiegów napięć ziemnozwarciowych w sieci rozdzielczej chronionej od przebiegów napięć z zastosowaniem ograniczników z tlenków metali, na podstawie wyników symulacji przebiegów, wykonanych w programie Electromagnetic Transients Program/Alternative Transients Program (EMTP-ATP). W obliczeniach przyjęto, że przebiegi zwarć są zgodne z teoriami: Petersa i Slepiana oraz Petersena. Szczegółowo analizowano wpływ sposobu połączenia punktu neutralnego sieci na wartości napięć ziemnozwarciowych.

Mechanizm powstawania napięć ziemnozwarciowych i metody ich ograniczania

Napięcia ziemnozwarciowe są skutkiem stanów przejściowych w sieciach elektrycznych podczas zwarć jednej fazy sieci z ziemią, gdy występują wielokrotne zapłony łuku w miejscu zwarcia.



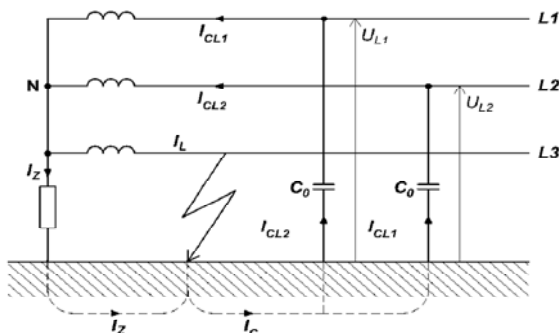
Rys. 1. Schemat zastępczy dwufazowej sieci elektrycznej ze zwarcie doziemnym



Rys. 2. Przebiegi napięć U_{C1} , U_{C2} oraz prądu i podczas zwarć doziemnego fazy 2 na rysunku 1 według: a – teorii Petersa-Slepiana, b – teorii Petersena [3, 4, 5]

W teoriach Petersa-Slepiana i Petersena podczas zwarcia fazy układu elektrycznego z ziemią zakłada się różne momenty gaszenia prądu ziemnozwarciowego. Uproszczone przebiegi napięć i prądów podczas zwarcć doziemnych w układzie dwufazowym (rys. 1), zgodnie z teoriami Petersa-Slepiana oraz Petersena przedstawiono na rys. 2. Zwarcie fazy z ziemią następuje przy maksymalnej wartości napięcia fazowego. Zgodnie z teorią Petersa-Slepiana, łuk elektryczny w miejscu zwarcia gaśnie, gdy składowa wolnozmienna prądu zwarciego osiąga wartość zero. W teorii Petersena zakłada się natomiast, że łuk gaśnie podczas przejścia przez zero składowej szybkozmiennej prądu ziemnozwarciowego [3].

Ograniczaniu przepięć ziemnozwarciowych sprzyja łączenie punktu neutralnego sieci z ziemią przez impedancję, którą stanowi zwykle cewka Petersena lub rezystor (rys. 3) [6, 7].



Rys. 3. Rozpływ prądu w sieci elektrycznej z punktem neutralnym połączonym z ziemią za pomocą impedancji

Zastosowanie cewki Petersena w sieciach elektrycznych powoduje ograniczenie prądu w miejscu zwarcia (rys. 4), skrócenie czasu palenia się łuku i ograniczenie przepięć ziemnozwarciowych. Prąd zwarcia w obwodzie z pojemnością oraz rezystancją obliczany jest ze wzoru [8]:

$$(1) \quad I_{ef} = \frac{3 \cdot \omega \cdot C \cdot E}{\sqrt{1 + (3 \cdot \omega \cdot C \cdot R_f)^2}}$$

gdzie: E – napięcie sieci, V , ω – pulsacja sieci, s^{-1} , R_f – rezystancja obwodu, Ω , C – pojemność doziemna sieci, F .

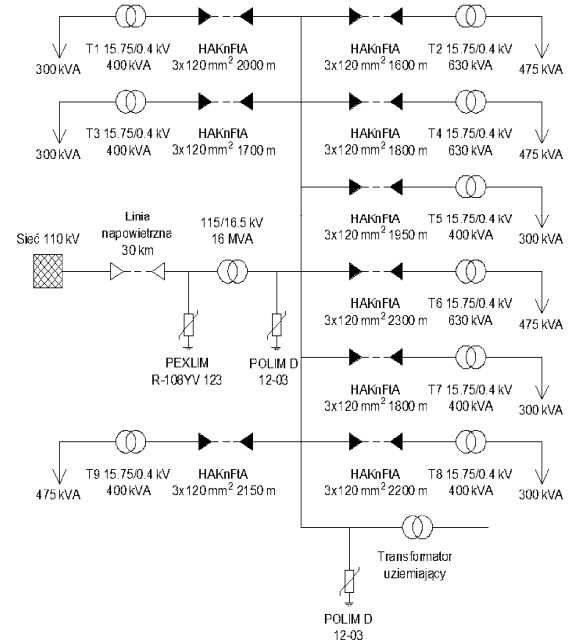
W sieciach z punktem neutralnym połączonym z ziemią przez rezystor zwarcia są wykrywane przez systemy zabezpieczeń ziemnozwarciowych, dla których sygnałem sterującym jest napięcie na rezystorze, którego wartość wzrasta, gdy płynie prąd ziemnozwarciowy. W celu ograniczania przepięć w sieciach elektrycznych stosowane są także ograniczniki przepięć z tlenków metali.

Sieć rozdzielcza doświadczalna i jej model w programie EMT-ATP

Wykonano symulacje przepięć ziemnozwarciowych w rozdzielczej sieci elektrycznej, której schemat zamieszczono na rys. 4. Podstawowe parametry (wraz z obliczoną pojemnością jednostkową) kabla typu HAKnFtA 3x120 mm², zastosowanego do budowy linii kablowych, zamieszczono w tabeli 1 [9], natomiast parametry transformatorów przedstawiono w tabeli 2 [10], a napięcia obniżone ograniczników przepięć podano w tabeli 3 [11].

Sieć jest zasilana przez transformator TORCA 16 MVA 115/16,5 kV. Transformatory TOd 630/15s 630 kVA 15,75/0,4 są stosowane do zasilania sieci 0,4 kV, a transformator TUOc 545/15 546 kVA 15,75/0,4 kV jest transformatorem uzimającym (tabela 2). Do ochrony przepięciowej sieci elektrycznej z punktem neutralnym

izolowanym od ziemi zastosowano ograniczniki przepięć typu POLIM D 18-05 o napięciu pracy ciągłej $U_c = 18$ kV, a w sieci z punktem neutralnym połączonym z ziemią przez cewkę Petersena lub rezystor wykorzystano ograniczniki typu POLIM D 12-03 o napięciu pracy ciągłej $U_c = 12$ kV (tabela 3) [12].



Rys. 4. Schemat doświadczalnej sieci elektrycznej rozdzielczej

Tabela 1: Parametry kabla typu HAKnFtA 3x120 mm² [9]

parametr	wartość	jednostka
napięcie znamionowe	8,7/15	kV
pole przekroju poprzecznego	3x120	mm ²
grubość izolacji	4,5	mm
grubość powłoki ołowianej	1,8	mm
średnica na powłoce ołowianej	51,7	mm
średnica zewnętrzna	61,4	mm
rezystancja żyły 20°C	0,252	$\Omega \cdot km^{-1}$
obliczona pojemność jednostkowa	0,385	$\mu F \cdot km^{-1}$

Tabela 2: Parametry transformatorów zainstalowanych w sieci [10]

parametr	jednostka	TORCA	TUOc 545/15	TOd 630/15s
S_n	MVA	16	0,546	0,63
U_n	kV	115/16,5	15,75/0,4	15,75/0,4
U_z	%	12	4,50	6,00
ΔP_{Fe}	kW	9	0,49	0,80
ΔP_{Cu}	kW	79,50	1,25	6,75

Tabela 3: Parametry ograniczników przepięć typu POLIM D 12-03 oraz POLIM D 18-05 [11]

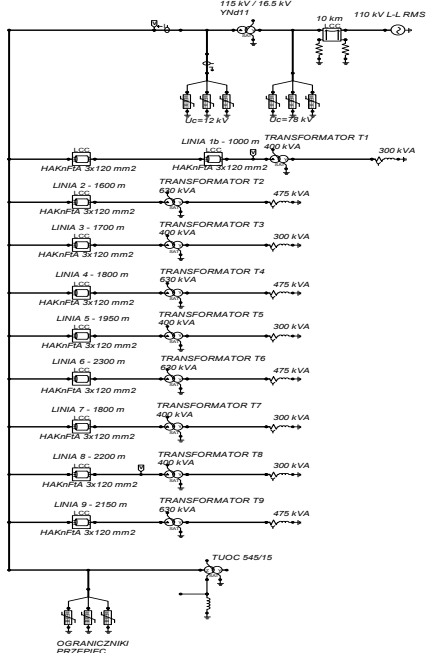
T_1/T_2	udar prądowy	napięcie obniżone	
		ogranicznik typu POLIM D 12-03	ogranicznik typu POLIM D 18-05
μs	I_{max}	kV	
1/2,5	5	43,39	47,9
	10	64,9	74,9
30/60	0,125	31,1	46,7
	0,250	32,2	48,2
	0,500	33,2	49,8
8/20	1	34,9	52,3
	2,5	37,0	55,5
	5	39,1	58,6
	10	42,0	63,0
	20	47,7	71,6

Opracowano model doświadczalnej sieci rozdzielczej w programie Electromagnetic Transients Program-Alternative

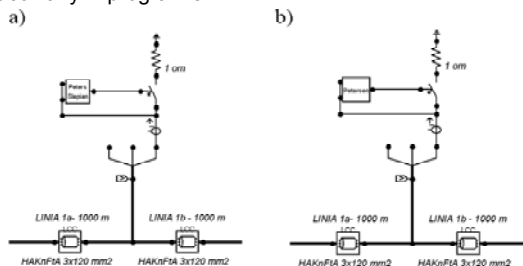
Transients Program (*EMTP-ATP*) [13]. Urządzenia elektroenergetyczne modelowano przy zastosowaniu następujących modeli:

- linie kablowe i napowietrzne – model *JMARTI*,
- transformatory – model *SATURABLE TRANSFORMER*,
- ograniczniki przepięć – model *WG 3.4.11 IEEE* [14],
- obciążenie linii – układ *RL*, $\cos \varphi = 0,9$.

Model analizowanej sieci zaimplementowanej w programie *EMTP-ATP* pokazano na rys. 5. W celu symulacji przebiegów zwarć doziemnych zgodnie z teoriami Petersa-Slepiana oraz Petersena opracowano algorytmy w środowisku programowania wewnętrznego *MODELS* programu *EMTP-ATP* (rys. 6 i 7).

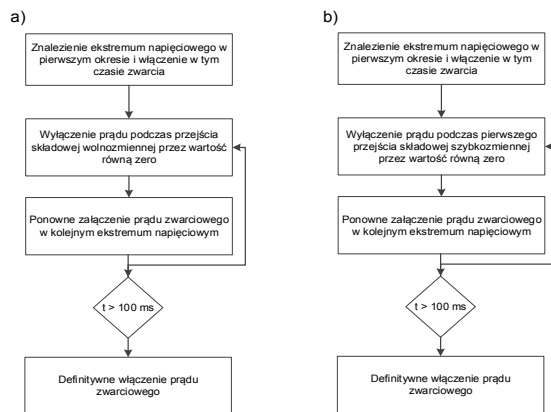


Rys. 5. Model sieci rozdzielczej doświadczalnej (rys. 4), opracowany w programie *EMTP-ATP*



Rys. 6. Modele realizujące przebieg zwarcia doziemnego jednej fazy linii kablowej z ziemią zgodnie z różnymi teoriami, opracowane w programie *EMTP-ATP*: a – model zwarcia przewodu fazy z ziemią według teorii Petersa-Slepiana, b – model zwarcia fazy z ziemią według teorii Petersena

Procedura realizująca przebieg zwarcia doziemnego w sieci zgodnie z teorią Petersa-Slepiana, przedstawiona schematycznie na rys. 7 i zaimplementowana w modelu realizującym przebieg zwarcia doziemnego zamieszczonym na rys. 6a, wyszukuje ekstremum napięcia w drugim okresie napięcia zasilania i zwiera przewód fazy *L1* z ziemią. Zwarcie doziemne jest przerywane gdy wartość składowej niskoczęstotliwościowej prądu jest mniejsza od wartości wprowadzonej przez wykonującego symulację jako prąd przy której łuk gaśnie w miejscu zwarcia. Jeśli prąd ziemnozwarciowy przestaje płynąć, procedura zwiera ponownie fazę z ziemią w momencie wystąpienia kolejnego ekstremum napięcia zasilającego. Liczba cykli zwarć fazy z ziemią i przerywania prądu ziemnozwarciowego może być zmieniana przez wykonującego symulację.



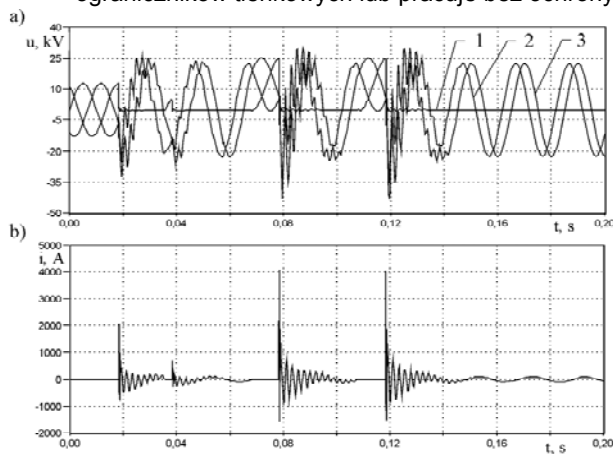
Rys. 7. Schematy blokowe algorytmów realizujących przebieg zwarcia doziemnych, opracowanych w programie *EMTP-ATP* zgodnie z teoriami: a – Petersa-Slepiana, b – Petersena

W celu modelowania przebiegu zwarcia doziemnego zgodnie z teorią Petersena zastosowano algorytm, który wymusza zwarcie fazy *L1* z ziemią w momencie, gdy napięcie osiąga wartość maksymalną. Zwarcie jest przerywane, gdy wartość chwilowa składowej szybkozmiennnej prądu jest mniejsza od wartości, przy której gaśnie łuk wprowadzonej przez wykonującego symulację. Procedura włącza ponownie zwarcie w czasie wystąpienia kolejnego ekstremum napięcia. Cykl jest powtarzany przez liczbę okresów zadeklarowaną przez użytkownika. Graniczna wartość prądu stosowana w symulacjach, przy której zwarcie doziemne jest przerywane wynosi 5 A, a krok obliczeniowy jest równy 1 μ s.

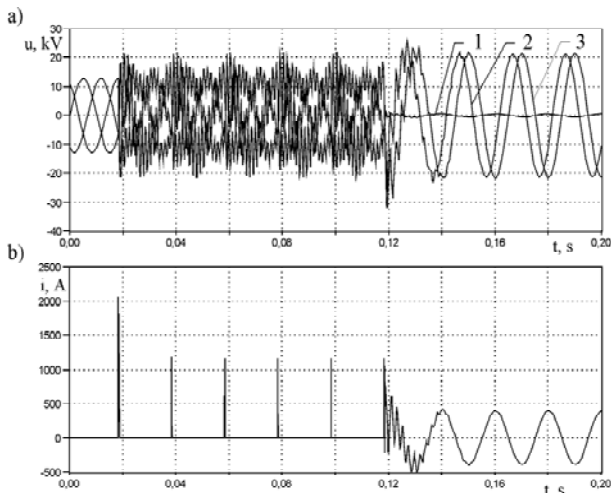
Symulacje przepięć ziemnozwarciowych

Wykonano symulacje:

- przebiegów przepięć ziemnozwarciowych napięć doziemnych w miejscu zwarcia oraz na zaciskach transformatora T8,
- przebiegów prądu ziemnozwarciowego, przy następujących założeniach:
- zwarcie fazy *L1* następuje w połowie długości linii kablowej K1,
- punkt neutralny sieci podczas symulacji jest połączony z ziemią przez cewkę Petersena o indukcyjności 502 mH lub przez rezystor o rezystancji 15 Ω lub jest izolowany od ziemi,
- sieć jest chroniona przy zastosowaniu ograniczników tlenkowych lub pracuje bez ochrony.



Rys. 8. Przebiegi napięć fazowych (a) w miejscu zwarcia oraz prądu ziemnozwarciowego (b) w sieci z punktem neutralnym izolowanym od ziemi chronionym ogranicznikami podczas zwarcia fazy *L1* na końcu linii kablowej K1 (rys. 5) o przebiegu zgodnym z teorią Petersa-Slepiana: 1 – faza *L1*, 2 – faza *L2*, 3 – faza *L3*



Rys. 9. Przebiegi napięć fazowych (a) w miejscu zwarcia oraz prądu ziemnozwarciowego (b) w sieci z punktem neutralnym izolowanym od ziemi chronionej ogranicznikami podczas zwarcia fazy L1 na końcu linii kablowej K1 (rys. 5) o przebiegu zgodnym z teorią Petersena: 1 – faza L1, 2 – faza L2, 3 – faza L3

Tabela 4: Wartości przepięć w sieci elektrycznej doświadczalnej podczas zwarcia doziemnego fazy L1 w połowie linii kablowej K1 (rys. 6)

punkt neutralny uziemiony przez:	miejsce zwarcia		transformator T8	
	sieć z ogranicznikami	sieć bez ograniczników	sieć z ogranicznikami	sieć bez ograniczników
teoria Petersa-Slepiana				
cewkę	2,41	2,53	2,42	2,54
rezystor	2,41	2,54	2,42	2,54
izolowany	3,33	3,34	3,34	3,35
teoria Petersena				
cewkę	2,52	2,88	2,52	2,88
rezystor	2,45	2,59	2,46	2,62
izolowany	2,22	2,22	2,22	2,22

Wybrane wyniki symulacji, wykonane przy założeniu, że przebiegi zwarcia doziemnego są zgodne z teoriami Petersa i Slepiana oraz Petersena przedstawiono na rys. 8 i rys. 9. Wartości maksymalne przepięć, wyrażone w odniesieniu do amplitudy napięcia fazowego, zamieszczono w tabeli 4. Z analizy przebiegów przepięć ziemnozwarciowych (rys. 8 i rys. 9) oraz wartości maksymalnych napięć (tabela 4) wynika, że charakter przebiegów przepięć ziemnozwarciowych oraz wartości maksymalne różnią się znacząco zależnie od założonego przebiegu zwarcia. Przepięcia ziemnozwarciowe o największych wartościach maksymalnych powstają w sieci doświadczalnej z punktem neutralnym izolowanym od ziemi i osiągają wartość 3,35 pu. Połączenie punktu neutralnego sieci z ziemią przez cewkę Petersena lub rezystor powoduje zmniejszenie przepięć ziemnozwarciowych. Ograniczniki przepięć z tlenków metali mają niewielki wpływ na wartości przepięć ziemnozwarciowych. Przepięcia ziemnozwarciowe w sieci bez ochrony przepięciowej są około 14 % większe od przepięć w sieci z ogranicznikami, o parametrach wyznaczonych zgodnie z zaleceniami normalizacyjnymi. Wartości przepięć ziemnozwarciowych w różnych punktach sieci są praktycznie takie same. Wpływ zmiany sposobu połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią na przepięcia ziemnozwarciowe uwidaczniają tylko wyniki symulacji prowadzonych przy założeniu, że przebieg zwarcia doziemnego jest zgodny z teorią Petersa i Slepiana.

Podsumowanie

Na podstawie wyników obszernych symulacji przepięć ziemnozwarciowych w sieci średniego napięcia można stwierdzić, że przebieg zwarcia doziemnego ma wpływ na wartości przepięć ziemnozwarciowych. Algorytmy realizujące przebiegi zwarc doziemnych zgodnie z teoriami Petersa i Slepiana oraz Petersena, opracowane w środowisku MODELS umożliwiają prowadzenie symulacji przepięć ziemnozwarciowych w programie EMTP-ATP z uwzględnieniem rzeczywistych przebiegów zwarc doziemnych. Wyniki symulacji są podstawą analizy narażeń przepięciowych urządzeń elektroenergetycznych w sieciach rozdzielczych i koordynacji izolacji.

Z wyników symulacji widać, że przepięcia ziemnozwarciowe o największych wartościach powstają w sieciach elektrycznych z punktem neutralnym izolowanym od ziemi. Połączenie punktu neutralnego sieci z ziemią przez cewkę Petersena lub rezystor powoduje zmniejszenie przepięć ziemnozwarciowych w sieciach rozdzielczych. Ograniczniki przepięć z tlenków metali, o parametrach dobranych zgodnie z zaleceniami normalizacyjnymi, nie mają praktycznego wpływu na przepięcia ziemnozwarciowe w sieciach średniego napięcia.

LITERATURA

- [1] Lorenc J., Musierowicz K., Kwapisz A.: Detection of the intermittent earth faults in compensated MV network, IEEE Power Tech Conference Proceedings, 2003 June 23th - 26th Bologna, Italy, Vol. 2
- [2] Druml G., Kugi A., Parr B.: Control of Petersen coils, XI. Int. Symp. on Theor. Electr. Engin., Aug. 2001, Linz, Austria, pp. 1 - 7
- [3] Peters J. F., Slepian J.: Voltages induced by arcing grounds, Spring Conv. of the A. I. E. E., Pittsburgh, April 24 - 26, 1923, pp. 781 - 792
- [4] Jakubowski J.: Podstawy teorii przepięć w układach elektroenergetycznych, PWN, Warszawa, 1968
- [5] Petersen W.: Overcurrents and overvoltages in systems with large ground current, E.T.Z., 1916
- [6] Marusic A., Frankovic D.: Earthing of previously unearthed medium voltage networks, 5th Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, WSEAS/IASME Tenerife, Spain, Dec. 16-18, 2005, pp. 273 - 279
- [7] Roberts J., Altuve H. J., Hou D.: Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded, and compensated distribution systems, USA, SEL, 2001, pp. 1-40
- [8] Hänninen S.: Single phase earth faults in high impedance grounded networks: Characteristics, indication and location, Technical Research Centre of Finland, Espoo 2001, VTT Publications 453, pp. 1 - 78 p. + app. 1-61
- [9] Katalog TELEF-FONIKA: Kable i przewody elektroenergetyczne, str. intern.: www.tfkable.com
- [10] Transformatory mocy oraz transformatory rozdzielcze, Karta katalogowa, Fabryka transformatorów - Żychlin, str. intern.: www.ftz.pl
- [11] Ograniczniki przepięć średniego napięcia. Karta katalogowa. ABB, str. intern.: www.abb.pl
- [12] IEC 60099-5: Surge arresters. Selection and application recommendations
- [13] Canadian/American EMTP User Group, Alternative Transients Program. Rule Book, 1992
- [14] IEEE Working Group 3.4.11: Modeling of metal oxide surge arresters, IEEE Trans. on Pow. Deliv., Vol. 7, No. 1, January 1992, pp. 302 - 309

Autorzy:

mgr inż. Piotr Oramus, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków
e-mail: piotr.oramus@pl.abb.com
dr hab. inż. Jakub Furgał, prof. n, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
e-mail: furgal@agh.edu.pl