

Marian Mikrut, Zygmunt Pilch,  
Antoni Przygodzki  
Instytut Elektroenergetyki  
i Sterowania Układów

## PRZEPIĘCIA ZIEMNOZWARCIOWE W KOPALNIANYCH SIECIACH KABLOWYCH 6 kV

Streszczenie. W artykule podano sposób określania przepięć ziemnozwarciowych metodą pomiarową w przemysłowych sieciach kablowych wysokiego napięcia. Na podstawie wykonania dużej liczby pomiarów w tych sieciach oszacowano spodziewane ich wielkości. Wykazano, że przepięcia o tych krotnościach nie powinny stanowić niebezpieczeństwa dla izolacji badanych sieci oraz zaproponowano praktyczną metodę przeprowadzania profilaktycznych prób jej izolacji.

### 1. Wstęp

W kopalnianych sieciach kablowych 6 kV zaobserwowano podczas występowania jednofazowych zwarcí doziemnych dużą ilość dodatkowych uszkodzeń kabli i muf poza miejscem zwarcia. Zachodziło podejrzenie, że przyczynę tych uszkodzeń mogły stanowić przepięcia ziemnozwarciowe o dużych krotnościach. Ponieważ obliczenie tych przepięć jest praktycznie niemożliwe, zdecydowano się na ich określenie metodą pomiarową. Z tego względu konieczne było wykonywanie zwarcí 1-fazowych doziemnych, w czasie których rejestrowano przebiegi napięć, a na ich podstawie określano wielkości przepięć.

### 2. Charakterystyka sieci

Przedmiotem badań były kopalniane sieci kablowe pracujące na napięciu 6 kV. Sieci te zasilane były w czasie pomiarów z energetycznych stacji transformatorowo-rozdzielczych 110/6 kV/kV lub 60/6 kV/kV oraz ewentualnie z elektrowni przemysłowych. We wszystkich przypadkach sieci te pracowały jako promieniowe z punktem zerowym izolowanym bez możliwości kompensacji prądów ziemnozwarciowych. Wartości skuteczne ustalonych prądów ziemnozwarciowych w zależności od wielkości i konfiguracji galwanicznie połączonej sieci mieściły się w zakresie  $13 \frac{2}{3}$  140 A. Widać więc, że w badanych sieciach prąd zwarcia z ziemią w niektórych przypadkach znacznie przekracza wartości granicznego prądu zwarcia określonego przepisami PBUE, który dla sieci kablowej o napięciu 6 kV wynosi 40 A.

### 3. Przepięcia ziemnozwarciowe

Przepięcia ziemnozwarciowe występują przy zwarciach doziemnych, tj. przy połączeniu z ziemią przez małą rezystancję bieguna wysokiego napięcia - przewodu linii, zacisku transformatora itp. - w sieciach z izolowanym punktem zerowym. Wielkości tych przepięć występujących w układzie sieciowym można określić przy pomocy tzw. współczynnika przepięcia, który jest zdefiniowany następująco:

$$k = \frac{U_{\max}}{U_f}$$

gdzie  $k$  - współczynnik przepięcia (krotność napięcia fazowego),  
 $U_{\max}$  - maksymalna wartość napięcia fazy względem ziemi w czasie zwarcia doziemnego,  
 $U_f$  - amplituda napięcia fazowego.

Przepięcia ziemnozwarciowe są stosunkowo małe, jeśli zwarcia doziemne są metaliczne. Przy zwarciu tym główną rolę odgrywa podwyższenie napięcia "zdrowych" faz względem ziemi o 73%. Niebezpieczeństwo uszkodzenia izolacji w tym przypadku jest małe i w zasadzie sieć może przez pewien okres czasu pracować z takim doziemieniem.

Przepięcia o wartościach niepomijalnych dla wytrzymałości izolacji sieci mogą wystąpić natomiast podczas zwarć doziemnych łukowych.

Istnieje wiele teorii przepięć ziemnozwarciowych [1], [2], [3], jednak w zależności od przyjętych założeń i uproszczeń z teorii tych otrzymywano różne obrazy przebiegu zjawiska, a tym samym różne wartości występujących przepięć i to w dość szerokich granicach. Do chwili obecnej żadna z teorii nie została ogólnie przyjęta i uznana za zgodną z doświadczeniem w sieciach rzeczywistych, dlatego też jedynym możliwym sposobem określenia wartości przepięć jest metoda pomiarowa.

### 4. Pomiar przepięć ziemnozwarciowych

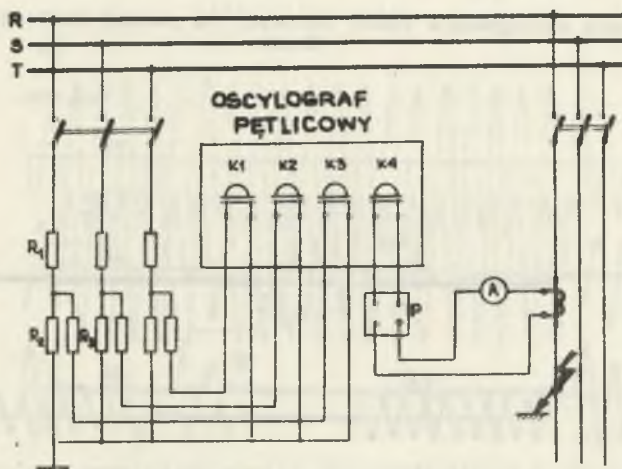
Pomiary przepięć ziemnozwarciowych przeprowadzano w kopalnianych sieciach kablowych 6 kV podczas celowo wykonywanych zwarć doziemnych metalicznych i łukowych. Przebiegi czasowe napięć rejestrowano za pomocą oscylografów pętlicowych przyłączonych do sieci poprzez dzielniki operowe.

Korzystanie z istniejących w rozdzielniach przekładników napięciowych uznano za niewłaściwe ze względu na możliwość zniekształcania przez nie przebiegów o dużych częstotliwościach, jakie występują w czasie przepięć ziemnozwarciowych. Przy pomocy oscylografu pętlicowego rejestrowano również przebieg pojemnościowego prądu ziemnozwarciowego, natomiast ustaloną wartość skuteczną tego prądu mierzono przy pomocy amperomierza.

Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 1. Ze względu na różne możliwe reżimy pracy kopalnianych sieci 6 kV pomiary wykonano w dziedzięciu najbardziej prawdopodobnych i realnych wariantach pracy tych sieci

Jako kryterium podziału na warianty przyjęto wartość prądu zwarcia z ziemią. W każdym z tych wariantów wykonano od kilku do kilkunastu celowych zwarć doziemnych metalicznych i łukowych, podczas których rejestrowano przebiegi napięcia i prądu.

W celu uchwycenia pełnego obrazu przebiegów ziemnozwarciowych w poszczególnych wariantach, rejestracji przebiegów dokonywano w dwóch lub trzech odległych do siebie punktach sieci, przy czym jeden z tych punktów umieszczony był w miejscu wykonywania zwarć.



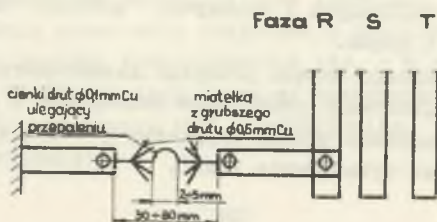
Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do rejestracji przebiegów ziemnozwarciowych

Zwarcia metaliczne wykonano przy pomocy zwory wytrzymałej prąd zwarcia, natomiast zwarcia łukowe uzyskiwano poprzez wykonanie doziemień cienkim drutem, który przy przepływie prądu zwarcia doziemnego ulegał szybkiemu przepaleniu inicjując zapłon łuku. Praktyczny sposób wykonywania zwarć łukowych pokazano na rys. 2.

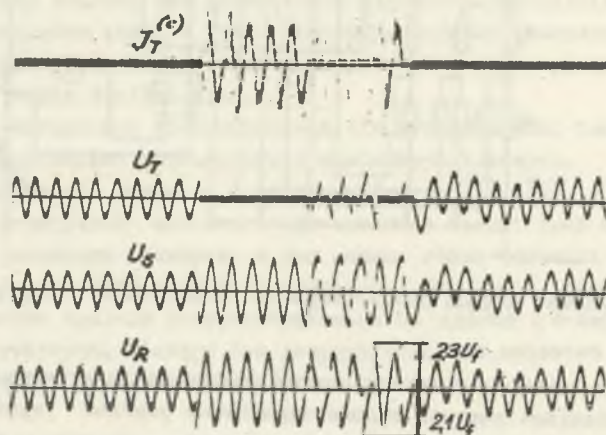
## 5. Wyniki i analiza pomiarów

Wyniki pomiarów otrzymane w formie oscylogramów dla wszystkich wykonanych prób ze zrozumiałych względów nie mogą być zamieszczone w niniejszym opracowaniu. Przykładowo dla zobrazowania zjawiska przebiegów zamieszczono trzy oscylogramy. Na rys. 3 przedstawiono oscylogram z przebiegami prądu i napięć fazowych w miejscu zwarcia podczas krótkotrwałego przemijającego doziemienia fazy T, natomiast rys. 4 przedstawia oscylogramy przebiegu napięć w dwóch różnych punktach sieci przy doziemieniu fazy R.





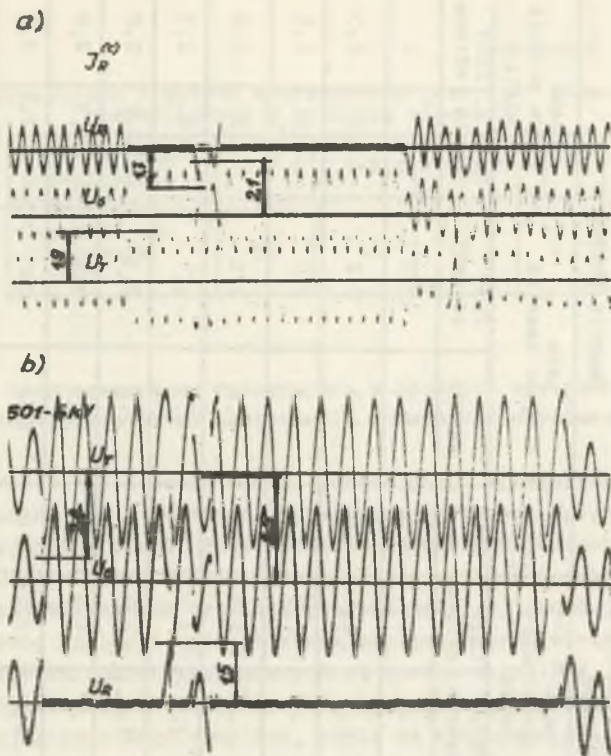
Rys. 2. Sposób wykonywania zwarć łukowych za pomocą mioteczki i cienkiego drutu



Rys. 3. Oscylogram przebiegów prądu i napięć fazowych w miejscu zwarcia podczas krótkotrwałego przemijającego doziemienia fazy T.

Na podstawie 88 prób wykonanych w dziesięciu wariantach pracy sieci w tabelicy 1 podano maksymalne wartości współczynników przebiegów występujących w danym wariantcie.

Jak widać z tabelicy 1, nie ma wyraźnej zależności między wartością prądu zwarcia z ziemią, a wartością maksymalnego współczynnika przebiegów. W zależności od rodzaju zwarcia - metaliczne lub łukowe - można zaobserwować występowanie większych wartości współczynników przebiegów w przypadku zwarć łukowych. Widać również, że na ogół większe przebiegi występują poza miejscem zwarcia. Z reguły w fazie zwartej przebiegi są mniejsze niż w fazach zdrowych, lecz w przypadkach zwarć łukowych przerywanych mogą osiągnąć duże wartości (wariant VIII).



Rys. 4. Oscylogramy przebiegów napięć fazowych podczas krótkotrwałego przebiegającego doziemienia fazy R:

a) w miejscu zwarcia, b) w odległości 1 km od miejsca zwarcia

Dla pełniejszego zobrazowania wielkości przebiegów ziemnozwarciowych występujących w badanych sieciach w tabelicy 2 podano procentową częstość ich występowania. Z danych zestawionych w tej tabelicy widać, że najczęściej występujące przebiegięcia w badanych sieciach, to przebiegięcia o krotnościach od 1,8 do 2,0. Najrzadziej występują przebiegięcia o krotnościach większych od 2,3, bo tylko 4% wszystkich przebiegów, lecz grupa ta jest najbardziej interesująca, ponieważ może zawierać przebiegięcia o krotnościach stwarzających groźbę dla izolacji sieci. Maksymalna wartość przebiegięcia, jaką zarejestrowano podczas wszystkich wykonywanych prób wynosi 3,1, co odpowiada 16,7 kV m. Ponieważ wartość napięcia probierczego wyprostowanego, jaką powinna wytrzymać bez przebicia izolacja kabla o napięciu 6 kV wynosi 22 kV [6], widać stąd, że jest to wartość większa od maksymalnego spodziewanego napięcia fazowego w czasie przebiegów ziemnozwarciowych.

Tablica 1

Maksymalne wartości współczynników przebieg w zależności od wariantu pracy sieci

Nr wariantu	Prąd zwarcia doziemnego [A]	Zwarcia metaliczne				Zwarcia łukowe					
		Ilość zwarc	k <sub>maks</sub> w miejscu zwarcia		Ilość zwarc	k <sub>maks</sub> w miejscu zwarcia		k <sub>maks</sub> w innym punkcie sieci			
			faza zwarta	fazy zdrowe		faza zwarta	fazy zdrowe		faza zwarta	fazy zdrowe	
I	13	4	1,8	2,0	-	-	2	1,7	2,0	-	-
II	25	7	1,7	2,2	1,7	2,1	12	1,9	2,2	1,9	2,5
III	35	1	-	1,8	-	1,8	6	1,9	2,2	2,3	2,5
IV	38	2	-	1,9	-	2,0	5	1,8	2,2	1,8	2,4
V	46	4	1,6	2,2	2,3	2,5	8	1,5	2,1	1,8	2,3
VI	53	2	1,7	1,8	1,8	1,9	7	1,9	2,3	2,0	2,2
VII	74	1	-	1,8	-	2,3	5	1,6	3,1	1,9	2,6
VIII	78	1	1,7	1,9	2,0	2,0	10	2,2	2,8	2,8	2,6
IX	104	2	1,9	1,8	-	-	-	-	-	-	-
X	140	1	1,7	2,0	-	-	8	1,7	2,8	1,8	2,3



Tablica 2

Procentowa częstość występowania przebiegów ziemnozwarciowych w badanych sieciach

Współczynnik przebiegów k	do 1,8	1,8-2,0	2,0-2,3	ponad 3
Częstość występowania w [%]	33	44	19	4

## 6. Wnioski

Przebiegiem ziemnozwarciowe występujące w badanych sieciach nie powinny stwarzać niebezpieczeństwa uszkodzenia prawidłowo utrzymanej izolacji tych sieci.

Przyczyny dodatkowych uszkodzeń elementów sieci w czasie zwarć doziemnych należy szukać nie w krotności przebiegów, lecz w istnieniu słabych miejsc izolacyjnych w sieci. Wobec powyższego celem uniknięcia nieprzewidywanych zakłóceń w pracy sieci, wydaje się za najbardziej korzystne przeprowadzanie systematycznych profilaktycznych prób jej izolacji.

Ponieważ próby izolacji wyprostowanym napięciem probierczym dla rozbudowanych sieci w warunkach kopalnianych są bardzo uciążliwe, należałoby rozpatrzyć możliwość zastosowania prób w tych sieciach polegających na doziemianiu kolejno poszczególnych faz, czyli na wykonywaniu celowych zwarć doziemnych. Próby te można przeprowadzać w odpowiednim czasie, przy odpowiednim podziale sieci na małe rejonów tak, aby wynikiem w czasie badania ewentualne uszkodzenia, które i tak stwarzały groźbę awarii, można było usunąć bez szkody dla eksploatacji. Próby takie przeprowadzane w sieciach niemieckich i francuskich dały dobre efekty [5].

## LITERATURA

1. Bielakow N.N.: Issledowanije pierienapriazhenij pri dugowych zamykaniach na ziemi w sietiach 6 i 10 kV s izolirowannoj nejtralu. Električestwo 1957 zesz. 5.
2. Jakubowski J.L.: Podstawy teorii przebiegów w układach energoelektrycznych. PWN-Warszawa 1968.
3. Kinsner R.: Przebiegiem ziemnozwarciowe w sieciach średnich napięć. PWN-Warszawa 1967.
4. Kinsner K.: Eksperymentalne badania przebiegów ziemnozwarciowych w sieciach średnich napięć. Energetyka 1963 zesz. 12.
5. Kinsner K.: Ochrona sieci średnich napięć od przebiegów ziemnozwarciowych. Energetyka 1963. zeszyt 2.
5. Praca zbiorowa: Instrukcje eksploatacji elektroenergetycznych linii kablowych. Zjednoczenie Energetyki 1966 r.

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ  
В ГОРНЫХ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6 кВ

Р е з ю м е

В статье приведен практический способ определения перенапряжений при замыканиях на землю в промышленных кабельных сетях высокого напряжения. На основе большого количества измерений в этих сетях выведена оценка ожидаемых величин перенапряжений.

GROUND-FAULT OVER VOLTAGE IN 6 kV COOL-MENE-CABLE SYSTEMS

S u m m a r y

The practical test of the ground-fault overvoltages by the method of measurement in the high voltage industrial cable systems is presented. A large number of measurements on mentioned above cable-systems allowed to calculate maximum values of the ground-fault over voltages.