

Edward LAWERA

Józef TRYNKIEWICZ

### KONCEPCJA ZABEZPIECZENIA ZIEMNOZWARCIOWEGO LINII WIĄZKOWYCH W KABLOWYCH SIECIACH ROZDZIELCZYCH PRACUJĄCYCH Z IZOLOWANYM PUNKTEM ZEROWYM

Streszczenie. W artykule przedstawiona została koncepcja struktury i programu działania zabezpieczenia ziemnozwarciowego linii wiązkowych. Zaprezentowane zostały wnioski wynikające z analizy rozpiływów prądów ziemnozwarciowych w takich liniach stanowiące podstawę opracowanej koncepcji. Przedstawiono blokowy schemat funkcjonalny zabezpieczenia i omówiono wynikające stąd jego cechy.

### THE CONCEPTION OF GROUND-FAULT PROTECTION OF BUNDLE POWER LINE IN CABLE DISTRIBUTION NETWORK WITH ISOLATED NEUTRAL

Summary. In the paper there have been presented a conception of the structure, features and principles of operation of the ground-fault protection of a bundle power line. The paper includes results of analysis of the propagation of earth-fault currents in bundle power line and criterions for the operation ground-fault protection.

### КОНЦЕПЦИЯ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМКЯНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ПУЧКЕ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ.

Резюме. В статье представляется концепция структуры и программы работы защиты от замыканий на землю в пучке кабельных линий. Представлены выводы из анализа распределения токов заземления в таких линиях, являющиеся основой разработанной концепции. Приведена блок-схема функционирования устройства защиты, обсуждены вытекающие из этой схемы свойства этого устройства.

## 1. UWAGI WSTĘPNE

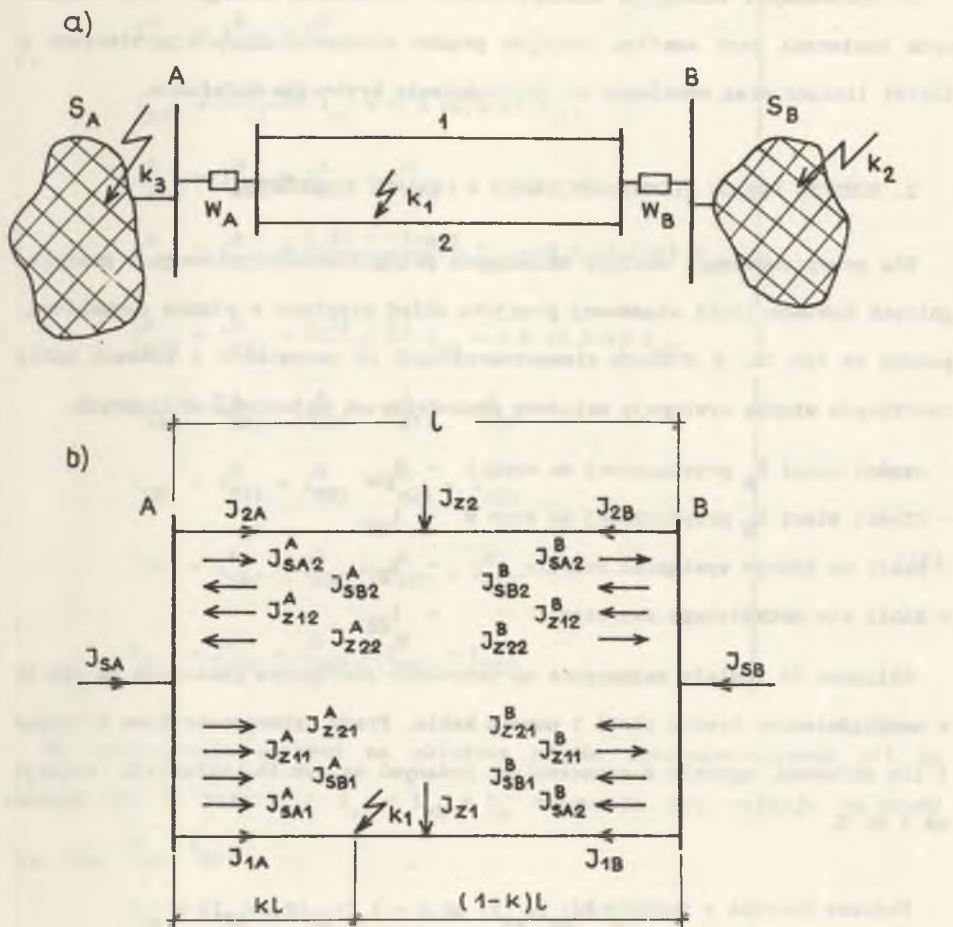
Linie wiązkowe są częstym sposobem realizacji połączeń w krajowych sieciach kablowych średniego napięcia pracujących z izolowanym punktem gwiazdowym. Szczególnie dotyczy to sieci rozdzielczych przemysłowych o napięciu 6 kV. Ilość kabli tworzących wiązki w większości linii wynosi 2 do 4. Stosowanie linii wiązkowych spowodowane jest następującymi względami:

- a) koniecznością zapewnienia możliwości przesyłu mocy przy zachowaniu wymaganych kryteriów doboru przekroju przewodów,
- b) brakiem wystarczającej liczby pól w stacjach rozdzielczych,
- c) dążeniem do uproszczenia zabezpieczeń zwarciovych i oszczędności w zakresie aparatury rozdzielczej.

Linie wiązkowe pracują w układach sieciowych promieniowych lub dwustronnie zasilanych. W sieciach promieniowych linie wiązkowe wyposażone są w wyłączniki na obydwu krańcach albo jedynie od strony zasilania. W sieciach dwustronnie zasilanych linie wiązkowe posiadają wyłączniki na obydwu krańcach. W liniach wiązkowych przekładniki składowej zerowej prądu są instalowane z reguły oddzielnie na każdym kablu wiązki.

Aktualnie linie wiązkowe z punktu widzenia zabezpieczeń traktowane są jako linie jednokablowe. W roli zabezpieczeń ziemnozwarciowych takich linii występują zabezpieczenia ziemnozwarciowe prądowe zwłoczne, kierunkowe zwłoczne i inne, które w przypadku zwarcia doziemnego w którymkolwiek kablu wiązki powodują wyłączenie linii w określonym czasie wynikającym ze stopniowania czasowego, zapewniającego selektywność ich pracy. Czasy te w bardziej rozległych sieciach mogą osiągać znaczne wartości.

Dużą uciążliwością jest wyszukiwanie uszkodzonego kabla wiązki, bowiem stosowane zabezpieczenia nie powodują jego wskazania. Zapewnienie identyfikacji kabla dotkniętego zwarcie przez zabezpieczenie ziemnozwarciowe ma istotne znaczenie, bowiem umożliwia szybkie odłączenie uszkodzonego kabla



Rys.1. Sieć modelowa z linią wiązkową dwukablową

a) schemat zastępczy ideowy

b) schemat zastępczy obliczeniowy przy zwarciu w  $k_1$

Fig.1. Model of network with two-cable bundle power line

a) equivalent scheme

b) scheme calculated for earth fault in point  $k_1$

oraz ewentualne załączenie do pracy zdekompletowanej wiązki w przypadku takiej konieczności.

Do opracowania koncepcji zabezpieczenia ziemnozwarciowego linii wiązkowych konieczna jest analiza rozpiętych prądów ziemnozwarciowych w sieciach z takimi liniami oraz ustalenie na jej podstawie kryteriów działania.

## 2. ROZPIĘTY PRĄDÓW ZIEMNOZWARCIOWYCH W LINIACH WIĄZKOWYCH

Dla przeprowadzenia analizy składowych prądu ziemnozwarciowego w poszczególnych kablach linii wiązkowej przyjęto układ sieciowy z wiązką dwukablową, podany na rys 1a. W prądach ziemnozwarciowych na początkach i końcach kabli tworzących wiązkę występują składowe pochodzące od pojemności doziemnych:

- części sieci  $S_A$  przyłączonej do szyn A -  $I_{SA}$ ,
- części sieci  $S_B$  przyłączonej do szyn B -  $I_{SB}$ ,
- kabla na którym wystąpiło zwarcie -  $I_{Z1}$ ,
- kabla nie dotkniętego zwarcie -  $I_{Z2}$ .

Składowe te zostały zaznaczone na schemacie zastępczym pokazanym na rys.1b z uwzględnieniem krańca linii i numeru kabla. Prądy ziemnozwarciowe w wiązce i ich składowe, zgodnie z oznaczeniami podanymi na rys.1b, określają relacje od 1 do 5.

Podczas zwarcia w punkcie  $k1$ :

$$I_{SA2}^A = \frac{k1}{21} I_{SA} = 0,5 k I_{SA},$$

$$I_{SA2}^B = I_{SA1}^B = I_{SA2}^A,$$

$$I_{SA1}^A = \frac{1+(1-k)1}{21} I_{SA} = 0,5 (2-k) I_{SA},$$

$$I_{SB1}^B = \frac{1+k1}{21} I_{SB} = 0,5 (1+k) I_{SB},$$

$$I_{SB2}^B = \frac{(1-k)1}{21} I_{SB} = 0,5 (1-k) I_{SB},$$

$$I_{SB2}^A = I_{SB1}^A = I_{SB2}^B$$

$$I_{z11}^A = \frac{0,5l-k1}{2l} I_{z1} = 0,5 (0,5-k) I_{z1}$$

$$I_{z12}^A = I_{z12}^B = I_{z11}^A = I_{z11}^B$$

$$I_{z21}^A = I_{z22}^A = \frac{0,5l + (1-k)l}{2l} I_{z2} = 0,5 (1,5-k) I_{z2}$$

$$I_{z21}^B = I_{z22}^B = \frac{0,5l + k1}{2l} I_{z2} = 0,5 (0,5+k) I_{z2}$$

$$I_{1A} = I_{SA1}^A + I_{SB1}^A + I_{z11}^A + I_{z21}^A$$

$$I_{1B} = I_{SA1}^B + I_{SB1}^B - I_{z21}^B + I_{z21}^B$$

$$I_{2A} = I_{SA2}^A - I_{SB2}^A - I_{z22}^A - I_{z12}^A$$

$$I_{2B} = I_{SB2}^B - I_{SA2}^B + I_{z12}^B - I_{z22}^B$$

(1)

(2)

Po podstawieniu wyrażeń na składowe prądów ziemnozwarciowych (1) do relacji (2) i założeniu  $I_{z1} = I_{z2} = I_z$  otrzymuje się relacje na prądy

$I_{1A}, I_{2A}, I_{1B}, I_{2B}$ :

$$I_{1A} = (I_{SA} + 0,5I_{SB} + I_z) - 0,5k (I_{SA} + I_{SB} + 2I_z)$$

$$I_{1B} = 0,5I_{SB} + 0,5k (I_{SA} + I_{SB} + 2I_z)$$

$$I_{2A} = -(0,5I_{SB} + 2I_z) + 0,5k (I_{SA} + I_{SB} + 2I_z)$$

$$I_{2B} = 0,5I_{SB} - 0,5k (I_{SA} + I_{SB} + 2I_z)$$

(3)

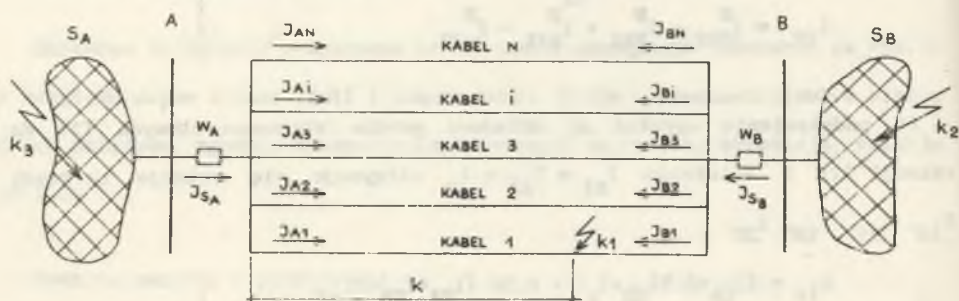
Przy zwarceniu w punkcie k2:

$$\left. \begin{aligned} I_{1A} &= I_{2A} = 0,5I_{SA}' \\ I_{1B} &= I_{2B} = -(0,5I_{SA}' + I_Z) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Przy zwarceniu w punkcie k3:

$$\left. \begin{aligned} I_{1A} &= I_{2A} = -(0,5I_{SB}' + I_Z) \\ I_{1B} &= I_{2B} = 0,5I_{SB}' \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Wyodrębnienie składowych w prądach ziemnozwarciowych na krańcach kabli tworzących wiązkę ułatwia analizę tych prądów w zależności od lokalizacji zwarcia i stanu wyłączników linii wiązkowej.



Rys.2. Schemat zastępczy sieci z linią wiązkową n-kablową

Fig.2. Equivalent scheme of the network with multi-cable bundle power line

W celu wyznaczenia rozpiętych prądów w linii wiązkowej n-kablowej dla przypadku zwarcia jednofazowego z ziemią przyjęto schemat podany na rys.2. Wyznaczono rozpiętych prądów w linii wiązkowej zakładając kolejno zwarcia w  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ . Przy wyprowadzaniu relacji określających prądy ziemnozwarciowe na początkach i końcach kabli tworzących linie wiązkowe przyjęto:

$$\left. \begin{aligned}
 a &= \frac{I_{SA}}{I_{zc}} ; \quad b = \frac{I_{SB}}{I_{zc}} ; \quad c = \frac{I_{z1} + I_{z2} + \dots + I_{zn}}{I_{zc}} = \frac{nI_z}{I_{zc}} \\
 I_z &= I_{z1} = I_{z2} = I_{zn} \quad I_{zc} = I_{SA} + I_{SB} + I_z' \\
 a + b + c &= 1
 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

gdzie:  $I_{zc}$  - całkowity prąd ziemnozwarciowy sieci,

$I_z$  - prąd ziemnozwarciowy pojedynczego kabla wiązki,

$I_{SA}$  - prąd ziemnozwarciowy części sieci  $S_A$ ,

$I_{SB}$  - prąd ziemnozwarciowy części sieci  $S_B$ .

Relacje określające prądy ziemnozwarciowe w kablach tworzących wiązkę, zgodnie z oznaczeniami na rys.2 mają postać:

przy zwarciu w punkcie k1

$$\left. \begin{aligned}
 I_{A1} &= \frac{1}{n} [k(n-1) - n + b + c] I_{zc}, \\
 I_{B1} &= -\frac{1}{n} [k(n-1) + b], \\
 I_{A2} &= \dots = I_{An} = \frac{1}{n} (k - b - c) I_{zc}, \\
 I_{B2} &= \dots = \frac{1}{n} (b - k) I_{zc},
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

przy zwarciu w punkcie k2

$$\left. \begin{aligned}
 I_{A1} &= \dots = I_{An} = \frac{1}{n} (1 - b - c) I_{zc}, \\
 I_{B1} &= \dots = I_{Bn} = -\frac{1}{n} (1 - b) I_z,
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

przy zwarciu w punkcie k3

$$\left. \begin{aligned}
 I_{A1} &= \dots = I_{An} = -\frac{1}{n} (b + c) I_{zc}, \\
 I_{B1} &= \dots = I_{Bn} = \frac{1}{n} b I_{zc}.
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Przy wyprowadzaniu relacji (7), (8), (9) przyjęto założenie:

$$I_1 = I_2 = I_n = 1 \quad (\text{w jednostkach względnych}).$$

Na podstawie analizy relacji od (1) do (9) można określić cechy rozpiętych prądów ziemnozwarciowych w liniach wiązkowych. Przy zwarciach poza linią, w punktach  $k_2$  i  $k_3$  na schematach podanych na rys. 1 i 2; prądy ziemnozwarciowe poszczególnych kabli w linii wiązkowej są sobie odpowiednio równe co do wartości i posiadają jednakowe kierunki na każdym z krańców linii. Kierunki prądów w kablach wiązki są jednakowe na początku i końcu kabla. Prądy płyną przez kable wiązki do miejsca zwarcia. Wartości prądów w kablach na krańcu wiązki położonym od strony części sieci, w której wystąpiło zwarcie, są większe od prądów na krańcu przeciwnym o wartość prądu ziemnozwarciowego kabla.

Przy zwarciach w jednym z kabli linii wiązkowej, w punkcie  $k_1$  na schematach podanych na rys. 1 i 2, w kablu dotkniętym zwarcie kierunki prądów na obydwu krańcach są dodatnie - prądy te są skierowane od szyn stacji A i B do miejsca zwarcia. Wartości i kierunki prądów we wszystkich kablach zdrowych są jednakowe. W kablach tych kierunki prądów na jednym krańcu są dodatnie, natomiast na drugim krańcu są ujemne z wyjątkiem przypadku zwarcia zlokalizowanego w strefie spełniającej szczególny warunek:

$$b \leq k \leq b+c. \quad (10)$$

Przy zwarciach w strefie spełniającej ten warunek kierunki prądów na początkach i końcach kabli zdrowych są ujemne - prądy skierowane są do szyn A i B. Dla granicznych wartości  $k$  z przedziału określonego nierównością (10) będzie przy  $k=b$  zachodzić  $I_{R2}=0$ , zaś przy  $k=b+c$  -  $I_{A2}=0$ .

### 3. KRYTERIA DZIAŁANIA ZABEZPIECZEŃ ZIEMNOZWARCIOWYCH LINII WIĄZKOWYCH

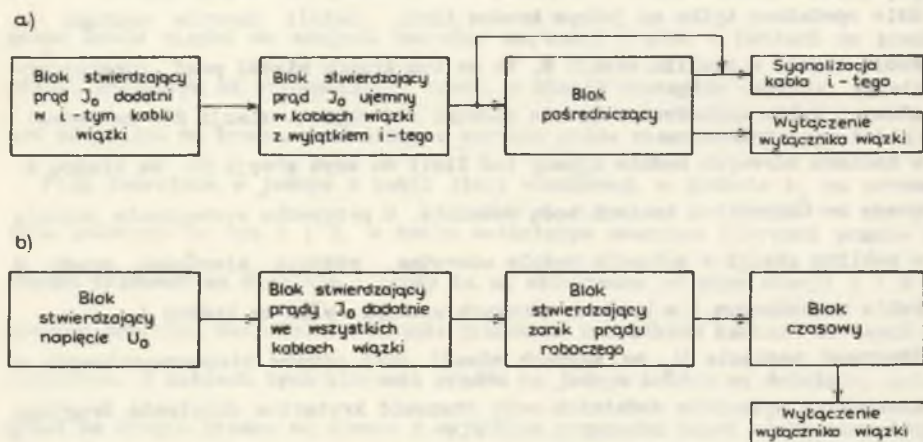
Z przeprowadzonej analizy rozpiętych prądów ziemnozwarciowych wynikają podane niżej wnioski dotyczące kryteriów działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych linii wiązkowych:



- a) Niezgodność kierunku prądu w kablu dotkniętym zwarcie z kierunkami prądów w kablach zdrowych na tym samym krańcu linii wiązkowej może stanowić kryterium identyfikacji kabla uszkodzonego i potrzeby wyłączenia linii wiązkowej.
- b) Kryterium różnicy prądów określone w punkcie a) jest ważne dla obydwu krańców linii wiązkowej dla zwarć zlokalizowanych w bardzo wąskiej strefie, w której k spełnia warunek (10). Dla innej lokalizacji zwarcia kryterium różnicy kierunków prądów w kablu uszkodzonym i w kablach zdrowych będzie spełnione tylko na jednym krańcu linii. Jeżeli zwarcie wystąpi na kablu wiązki w pobliżu stacji B, to na tym krańcu wiązki prąd ziemnozwarciowy w kablu uszkodzonym będzie dodatni (od szyn do stacji B), natomiast w kablach zdrowych będzie ujemny (od linii do szyn stacji B). Na krańcu A prądy we wszystkich kablach będą dodatnie. W przypadku wystąpienia zwarcia w pobliżu stacji A sytuacja będzie odwrotna, różnica kierunków prądu w kablu uszkodzonym i w kablach zdrowych wystąpi tylko na krańcu A.
- c) Obecność napięcia  $U_0$  na szynach stacji oraz prądów ziemnozwarciowych o kierunkach wyłącznie dodatnich może stanowić kryterium działania drugiego członu zabezpieczenia, powodującego otwarcie wyłącznika linii w tej stacji z dobraną zwłoką czasową.
- d) Kryterium określone w punkcie c) może być wykorzystane do wyłączenia drugiego wyłącznika przy zwarciach w linii o lokalizacji nie spełniającej warunku (10).
- e) Kryterium określone w punkcie c) może być również wykorzystane do wyłączenia wyłącznika linii przy zwarciach zewnętrznych.
- f) Kryterium określone w punkcie c) w przypadku zwarcia w linii wiązkowej może być zastosowane łącznie z kryterium braku prądu roboczego w linii, którego przerwanie następuje po otwarciu wyłącznika linii w stacji, w której zabezpieczenie działa według kryterium a).

## 4. CHARAKTERYSTYKA I PROGRAM DZIAŁANIA ZABEZPIECZENIA

Ustalone kryteria działania pozwalają określić koncepcję zabezpieczenia, wyjaśnioną bliżej na rys.3. Zabezpieczenie linii wiązkowej będzie składało się z dwu identycznych jednostek instalowanych na obydwu krańcach linii. Ograniczone zadania i ewentualny brak wyłącznika na krańcu odbiorczym linii nie wydają się uzasadniać potrzeby różnicowania zabezpieczeń.



Rys.3. Schemat blokowy zabezpieczenia ziemnozwarciowego linii wiązkowej  
 a) człon pierwszy - powoduje wyłączenie bezzwłoczne linii w stacji A lub B, albo A i B  
 b) człon drugi - powoduje wyłączenie linii w stacji, w której nie nastąpiło wyłączenie przez człon pierwszy

Fig.3. Block diagram of ground-fault protection of bundle power line  
 a) first element - switching of instantly bundle power line with in station A or B or A and B  
 b) second element - switching of bundle power line with time delay

Program działania przy zwarciu w jednym z kabli linii jest niezależny od jednostronnego czy też dwustronnego jej zasilania.

Identyfikacja kabla uszkodzonego będzie występowała na co najmniej jednym

krańcu linii. Przyjmuje się, że jest to wystarczające dla działań personelu eksploatacyjnego i remontowego.

Identyfikacja kabla uszkodzonego i bezzwłoczne wyłączenie jednego z wyłączników linii (w razie jego obecności) będzie powodowane działaniem pierwszego członu zabezpieczenia, reagującego na różnice kierunków prądu w kablu uszkodzonym i w kablach zdrowych. W razie spełnienia warunku (10) identyfikacja kabla uszkodzonego i bezzwłoczne wyłączenie linii będzie następowało na obu krańcach.

Drugostronne wyłączenie linii wiązkowej, przy lokalizacji zwarcia nie spełniającego warunku (10), będzie powodowane przez drugi człon zabezpieczenia działający zgodnie z kryterium obecności napięcia  $U_0$  i prądów ziemnozwarciowych o kierunkach dodatnich w kablach wiązki.

Przewidywany jest blok zabezpieczenia dający możliwość uzależnienia działania drugiego członu od braku prądu roboczego w linii. Stan taki występuje po otwarciu pierwszego wyłącznika i stwierdzenie go może być wykorzystane do przyspieszenia działania.

Program działania przy zwarciach poza linią wiązkową pracującą w sieci promieniowej jest następujący:

- a) Przy zwarciach w części sieci zasilanej linią, w stacji zasilającej działa drugi człon zabezpieczenia, reagujący na obecność napięcia  $U_0$  i dodatni kierunek prądów ziemnozwarciowych w kablach wiązki.
- b) Działanie zabezpieczenia w stacji zasilającej następuje ze zwłoką czasową nastawianą w bloku czasowym, zapewniającą selektywność zabezpieczeń sieci. Działania nie uzależnia się od braku prądu roboczego.
- c) Człony zabezpieczenia ziemnozwarciowego w stacji zasilanej nie są pobudzone przy zwarciach w sieci przyłączonej do tej stacji z powodu ujemnych kierunków prądów we wszystkich kablach wiązki - zabezpieczenie nie będzie działało.

d) Przy zwarciać w sieci zasilającej linię następuje pobudzenie drugiego członu zabezpieczenia w stacji na krańcu odbiorczym. Wyłączenie wyłącznika w tej stacji, mogące nastąpić w przypadku jego obecności, nie będzie eksploatacyjnie uciążliwe.

Program działania przy zwarciać poza linią wiązkową pracującą w sieci dwustronnie zasilanej jest dla zabezpieczeń na obydwu krańcach linii taki sam, jak dla zabezpieczenia linii w sieci promieniowej, zainstalowanego w stacji zasilającej. Zabezpieczenia działają z czasami wynikającymi z dwustronnego stopniowania czasów w sieci.

Inne cechy zabezpieczenia to:

- a) Kryteria i program działania nie zależą od liczby kabli w wiązce.
- b) Zabezpieczenie działające jako pierwsze i wskazujące uszkodzony kabel, czyni to na podstawie stwierdzenia w nim dodatniego kierunku prądu ziemnozwarciowego i równoczesnego stwierdzenia kierunku ujemnego lub braku prądu ziemnozwarciowego w pozostałych kablach. Takie rozwiązanie powoduje, że czułość zabezpieczenia nie jest warunkowana proporcją prądów  $I_{SA}$  i  $I_{SB}$ , lecz ich sumą. Pozwala to uzyskać dużą czułość zabezpieczenia.
- c) Działanie drugiego członu wyłączającego linię jest działaniem kierunkowym zwłocznym, co pozwala wykorzystać je w roli rezerwowego, o ile umożliwia to konfiguracja sieci.

## 5. WNIOSKI

Przedstawiona koncepcja zabezpieczenia ziemnozwarciowego umożliwia realizację zabezpieczenia spełniającego stawiane wymagania. Zabezpieczenie zapewnia selektywne wyłączanie linii wiązkowej przy zwarciać jednofazowych z ziemią niezależnie od konfiguracji sieci oraz ma istotną z eksploatacyjnego punktu widzenia zdolność identyfikacji uszkodzonego kabla. Aktualnie w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej przy

współpracy Zakładów Pomiarowo Badawczych Energetyki "Energopomiar" w Gliwicach opracowywany jest model funkcjonalny zabezpieczenia. Po przeprowadzeniu wszechstronnych badań ZPBE "Energopomiar" przewidują podjęcie się jego produkcji.

#### LITERATURA

- [1] Lawera E., Mikrut M.: Analiza rozpiływu prądów ziemnozwarciowych w izolowanych sieciach pierścieniowych w aspekcie doboru zabezpieczenia. ZN Pol. Śl. serii Elektryka, z. 105, Gliwice 1988.
- [2] Lawera E., Trynkiewicz J.: Linie równoległe w kopalnianych sieciach rozdzielczych i ich zabezpieczanie od zwarcí doziemnych. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, nr 12, 1990.

Recenzent: prof.dr hab.inż. Bohdan Synal

Wpłynęło do Redakcji dnia 21 lutego 1992 r.

#### THE CONCEPTION OF GROUND-FAULT PROTECTION OF BUNDLE POWER LINE IN CABLE DISTRIBUTION NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL

##### A b s t r a c t

The cable distribution networks of medium voltage in Polish electric power system, similar to that of other countries, operate with isolated neutral. Because of supply reliability and feasibility bundle lines, endowed with one circuit-breaker, frequently occur in these networks.

Earth faults dominate in cable distribution networks operating with isolated neutral. these faults give rise to several hazards for the network. The level of these hazards is conditioned by reliability, selectivity and operating speed of ground-fault protection. Recently produced and installed ground-fault protection meet in the proper extent these requirements in the

network of radial configuration with one circuit line.

In this paper there is:

- an analysis of distribution of earth fault currents in two-cable and multi-cable bundle power line,
- possible criterions for the operation ground-fault protection of bundle power line
- a newly elaborated conception of ground-fault protection of bundle power line.