

Selektywne wyłączanie zwarć doziemnych w sieciach średnich napięć zakładów przemysłowych – część II

Streszczenie. W drugim z cyklu artykułów dotyczących problematyki selektywnego wyłączania zwarć w sieciach średniego napięcia zostaną przedstawione warunki pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych, zasady ich właściwego doboru oraz koncepcja działania i doświadczenia eksploatacyjne zabezpieczeń z rodziny ZI₀₋₁ firmy Energotest-Energopomiar.

Abstract. The second article in the series of articles on the problem of selective elimination of earth-faults in medium voltage networks deals with the working conditions of earth-fault protections, the rules of their proper selection, the concept of operation and real-life experience concerning the family of ZI₀₋₁ protections of Energotest-Energopomiar. (Selective detection of earth faults in medium voltage networks of the industrial plants – part II).

Słowa kluczowe: zwarcia doziemne, zabezpieczenia ziemnozwarciowe.

Keywords: earth-fault, earth-fault protection.

doi:10.12915/pe.2014.03.06

Wstęp

Sieci o małym prądzie zwarcia ziemią to sieci pracujące z nieuziemiającym bezpośrednio punktem neutralnym. Dla takich sieci stosuje się trzy podstawowe sposoby pracy tego punktu:

- punkt neutralny izolowany,
- punkt neutralny uziemiony przez dławik gaszący (sieci kompensowane),
- punkt neutralny uziemiony przez rezystancję.

Ten ostatni sposób pracy punktu neutralnego ma na celu ograniczyć wartość prądu zwarciego do określonej wartości.

W praktyce można spotkać różne odmiany tych trzech zasadniczych sposobów pracy punktu neutralnego. Możliwe jest np. krótkotrwałe uziemienie przez rezystor sieci pracujących ze skompensowanym lub izolowanym punktem neutralnym. Chwilowe włączenie rezystancji pomiędzy punkt neutralny a ziemię wymusza przepływ składowej czynnej prądu ziemnozwarciowego. Osiąga ona wtedy wartość, która zapewnia odpowiednie „warunki” pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

Jeżeli we wcześniej wymienionych sieciach wystąpi zwarcie jednofazowe, prąd ziemnozwarciowy będzie miał znacznie niższe wartości od prądów, które popłyną podczas wystąpienia zwarć międzyfazowych. Wartości te często będą mniejsze od wartości prądów obciążeniowych. Dodatkowo możemy mieć do czynienia ze zwarciami pośrednimi (rezystancyjnymi), które jeszcze bardziej ograniczą wartość prądu zwarciego. Dlatego zabezpieczenia stosowane w tego typu sieciach opierają swoje działanie na pomiarze czy wyznaczeniu takich wielkości jak napięcie zerowe, prąd zerowy czy też moc zerowa.

Warunki pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach z izolowanym punktem neutralnym

Analiza warunków pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych może być przeprowadzona np. w układzie przedstawionym na rysunku 1. Odpowiednie położenie łączników Ł1 i Ł2 pozwala w tym przypadku na uzyskanie różnych konfiguracji pracy sieci o nieuziemiającym bezpośrednio punkcie neutralnym.

Przy zamkniętych łącznikach Ł1 i Ł2, prąd jednofazowego zwarcia pośredniego w miejscu zainstalowania przekładników wyraża się zależnością:

$$(1) \quad I_z = 3I_0 - \frac{E_{L1}Y}{1 + R_p Y}$$

w której I_0 – jest prądem zerowej kolejności faz, R_p jest rezystancją przejścia w miejscu zwarcia a Y – admitancją zastępczą określoną wzorem:

$$(2) \quad Y = 3Y_0 + Y_{0N}$$

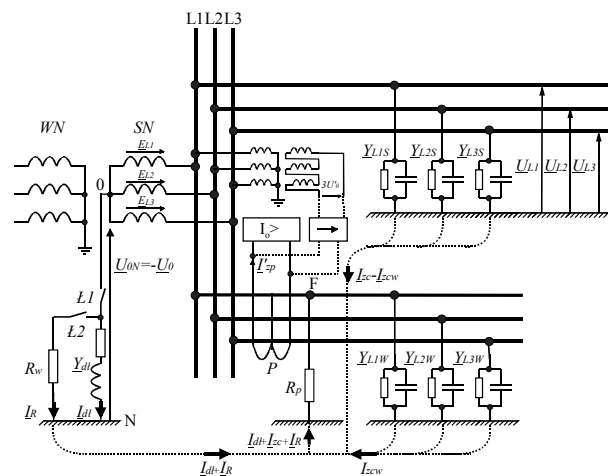
W zależności (2) $Y_0 = G_0 + j\omega C_0$ jest admitancją zerową

sieci, natomiast $Y_{0N} = \frac{1}{R_{d1} + j\omega L_{d1}} + \frac{1}{R_w}$ – admitancją uziemienia punktu neutralnego sieci.

Napięcie zerowe sieci przy zasilaniu symetrycznym jest określone zależnością:

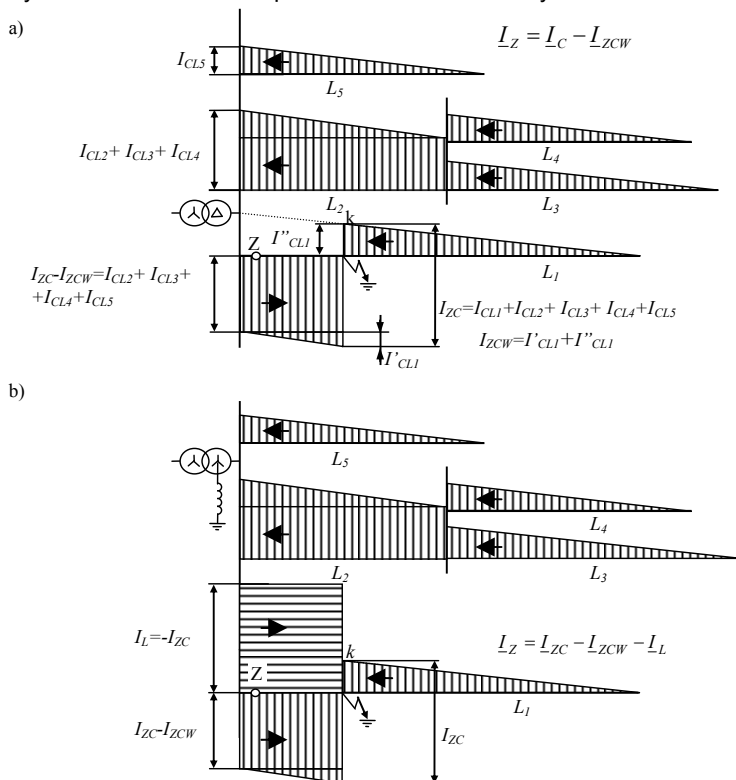
$$(3) \quad U_0 = \frac{E_{L1}}{1 + R_p Y}$$

przy czym w zależności (3) E_{L1} oznacza napięcie źródłowe fazy doziemionej (rysunek 1). Jeżeli punkt neutralny jest izolowany, prąd ziemnozwarciowy zawiera tylko składową I_{zc} . W sieciach z kompensacją bez wymuszenia dodatkowej składowej czynnej, prąd ziemnozwarciowy jest sumą geometryczną składowych I_{zc} i I_{dt} .



Rys. 1. Trójfazowy ogólny schemat sieci elektroenergetycznej do analizy zwarć jednofazowych z ziemią

Na rysunku 2a przedstawiono rozptył prądu zerowego w przykładowej sieci rozgałęzionej, która pracuje z punktem izolowanym (zwarcie na jednej linii). Rozptył składowych biernych prądu zerowego w sieci uziemionej przez dławik gaszący przedstawia rysunek 2b. Znajomość rozptyłu prądu zwarcowego w sieciach jest więc podstawą wyboru kryterium działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych.



Rys. 2. Rozptył prądu zerowego przy zwarcu w przykładowej sieci rozgałęzionej dla punktu neutralnego izolowanego a) oraz sieci skompensowanej przez dławik b)

Dobór zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach izolowanych średniego napięcia

W sieciach izolowanych średniego napięcia są stosowane z reguły zabezpieczenia działające w oparciu o kryterium nadprądowe lub kryterium kierunkowe [1, 2]. Najprostszym kryterium stosowanym do lokalizacji doziemienia jest kryterium nadprądowe. Kryterium to posiada wiele zalet, takich jak np. relatywnie prosta konstrukcja przekaźników zabezpieczeniowych. Dla tego kryterium nie ma konieczności ustalenia „kierunku działania”. Jest też ono „niewrażliwe” na uszkodzenia w obwodzie $3U_0$. Jednakże zakres stosowania tego kryterium jest w przypadku małych sieci izolowanych bardzo ograniczony. Wynika to głównie ze zmieniającej się wartości prądu zwarcowego w funkcji ilości załączonych pól. Zabezpieczenia nadprądowe nie mogą być nastawiane zbyt czule, ponieważ brak korelacji z napięciem $3U_0$ może powodować zbędne działanie zabezpieczeń od pojawiających się prądów uchybowych. Kryterium to zdaje egzamin tylko w przypadku bardzo krótkich linii zasilających transformator lub silnik.

Bardziej złożonym jest kryterium kierunkowe. Może ono mieć charakter kryterium biernomocowego, czynnomocowego oraz admitancyjnego. Stosowanie kryteriów kierunkowych daje najlepsze rezultaty w aspekcie możliwości lokalizacji miejsca doziemienia. Dla takich przypadków nie ma potrzeby „dokładnego” określania wartości rozruchowych zabezpieczeń. Stosunkowo czule nastawione zabezpieczenia będą działały selektywnie w

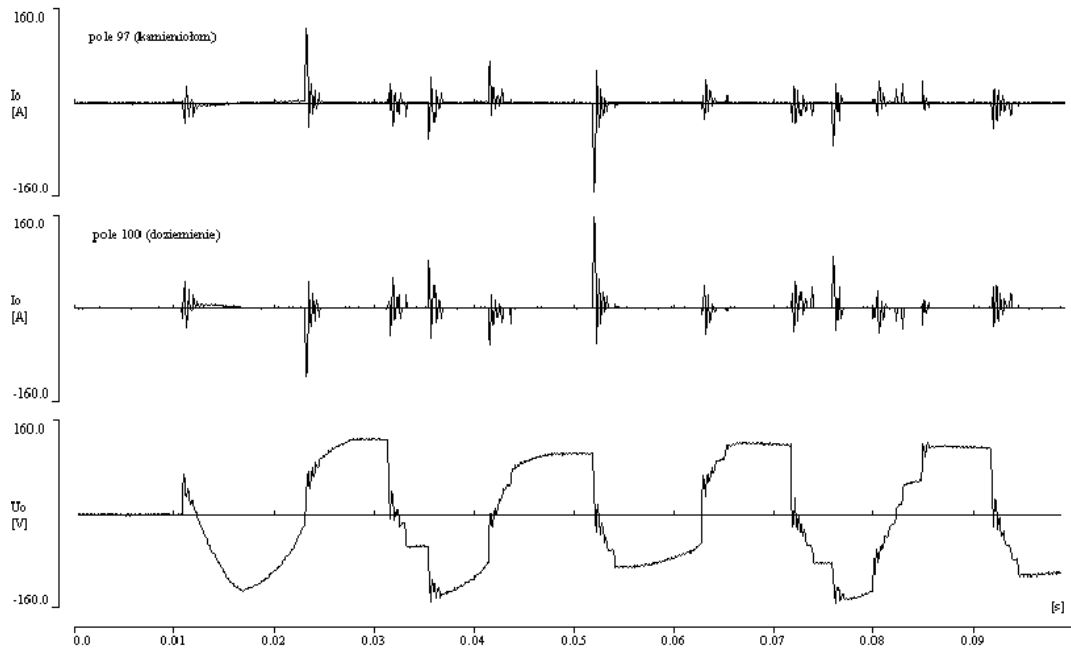
szerokim zakresie zmian konfiguracji sieci. Stosując zabezpieczenia kierunkowe większą uwagę należy zwrócić na wzajemne koordynacje tych zabezpieczeń, wartości nastawionych opóźnień czasowych, wzajemne blokady, itp. Jest to szczególnie istotne w polach zasilających poszczególne rozdzielnie przy skomplikowanym układzie sieci. Wskazane jest wtedy dokładne przeprowadzenie analizy teoretycznej, aby zagwarantować selektywność działania zabezpieczeń zarówno w warunkach pracy normalnej sieci jak i w stanach awaryjnych. Jak wynika z doświadczeń eksploatacyjnych, analizy przeprowadzane dla istniejących obiektów często wykazują niespójność nastaw zabezpieczeń ziemnozwarciowych pracujących w jednej sieci. Efektem tego było najczęściej nieselektywne działanie tych zabezpieczeń.

Jednym z istotnych wymagań, jakie stawia się zabezpieczeniom ziemnozwarciowym, jest ich właściwe działanie przy zwarcich łukowych. Według danych literaturowych i eksploatacyjnych stanowią one 70...90% zwarć jednofazowych z ziemią. W czasie zwarć łukowych dochodzi do cyklicznego impulsowego przeładowania pojemności sieci. Przykładowe przebiegi występujące podczas przeprowadzanych prób zabezpieczeń przedstawione są na rysunku 3. W takich warunkach praktycznie nie występuje składowa 50Hz w mierzonej prądzie ziemnozwarciowym, co znacznie utrudnia realizację kryteriów kierunkowych w zabezpieczeniach. Można się spodziewać, że nie wszystkie stosowane algorytmy właściwie reagują na wielkości wejściowe występujące podczas zwarć łukowych. Może to być powodem niektórych nieselektywnych zadziałań.

Zabezpieczenie ziemnozwarciowe typu ZI₀-1

Mikroprocesorowe zabezpieczenie ziemnozwarciowe typu ZI₀-1 jest zabezpieczeniem do lokalizacji i selektywnego wyłączenia zwarć doziemnych. Przeznaczone jest dla sieci średnich napięć izolowanych, uziemionych przez rezystor i kompensowanych z wymuszeniem składowej czynnej. Zabezpieczenia ZI₀-1 nie można stosować w sieciach kompensowanych bez wymuszenia składowej czynnej. Przyjęta w koncepcja działania zabezpieczenia pozwala na właściwe lokalizowanie doziemień niezależnie od rodzaju zwarcia (metaliczne, łukowe, oporowe). Duża czułość zabezpieczenia (która praktycznie nie maleje przy zwarcich łukowych) umożliwia jego stosowanie w sieciach o bardzo małych prądach zwarcia z ziemią.

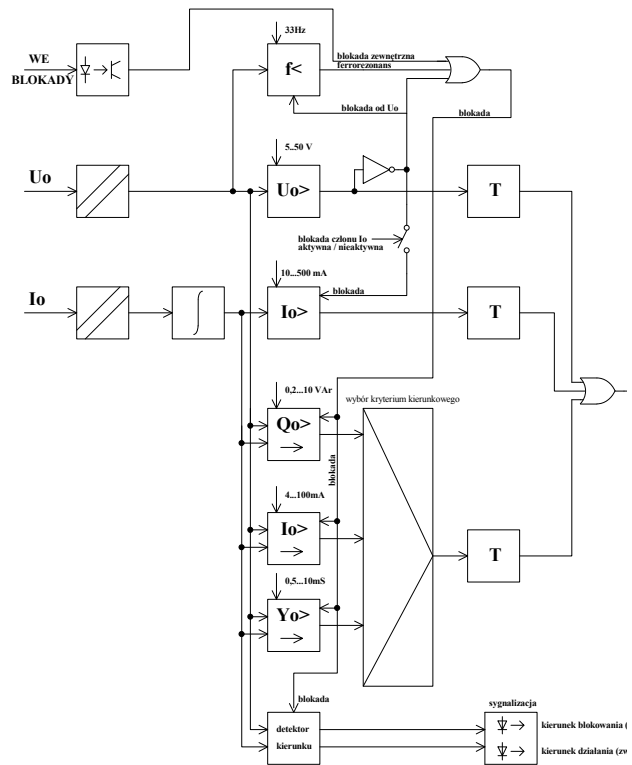
Zabezpieczenie typu ZI₀-1 składa się z trzech członów pomiarowych: napięciowego, prądowego i kierunkowego. Każdy z członów może wygenerować impuls wyłączający z niezależnym czasem opóźnienia (rysunek 4). Człon kierunkowy może pracować jako mocowy, prądowy lub admitancyjny. Wykorzystując człony kierunkowe i wejścia blokujące dwóch zabezpieczeń ZI₀-1, można zrealizować zabezpieczenie ziemnozwarciowe odcinkowe. Dzięki zastosowaniu trzech członów pomiarowych i bogatym funkcjom logicznym można w większości przypadków tak dobrać nastawy, aby zabezpieczenie poprawnie działało przy zmieniającej się konfiguracji sieci. Zabezpieczenie ZI₀-1 jest opcjonalnie wyposażane w rejestratory zdarzeń i zakłóceń oraz interfejs RS485 do komunikacji z systemem nadrzędnym.



Rys. 3. Przebiegi prądów i napięć podczas zwarcia doziemnego łukowego

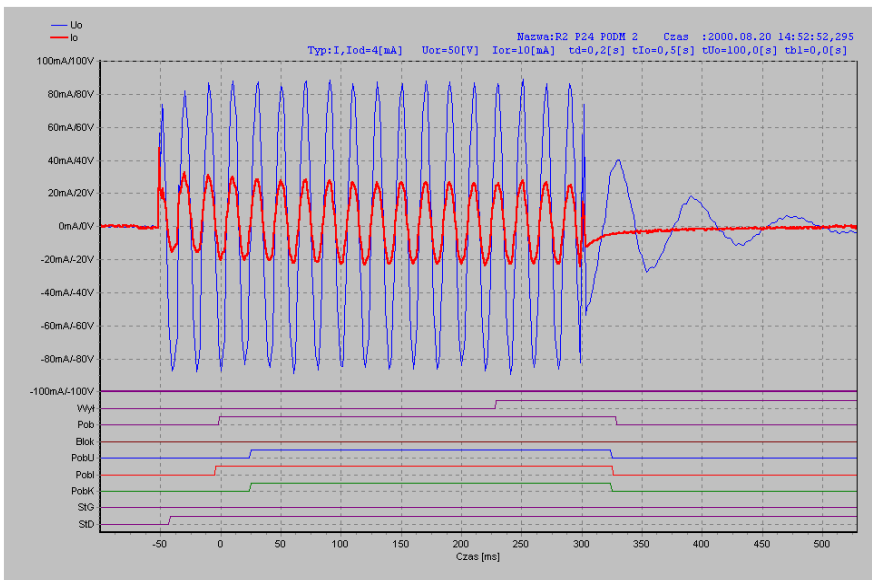
Doświadczenie eksploatacyjne

Zabezpieczenia ziemnozwarciowe z rodziny ZI_0 stosowane są od roku 1997 [3, 4]. Obecnie zainstalowane są na około tysiącu pól średniego napięcia. Są to zabezpieczenia szczególnie przystosowane do pracy w sieciach izolowanych o bardzo małych prądach zwarcia z ziemią (np. układy potrzeb własnych bloków energetycznych). Standardowo wartość rozruchowa ich członów kierunkowych jest nastawiona bardzo czule, tj. 4mA (przy przekładni przekładnika 100:1 daje to 0,4A po stronie pierwotnej). Sporadycznie stosowano również nastawę 2mA. Tak czule zabezpieczenia pozwalają na prawidłowe wykrywanie zwarc w większości istniejących sieci, nawet przy znacznie zmieniającej się ich konfiguracji. Jedynym warunkiem jest to, aby sumaryczny prąd pojemnościowy „zdrowych” linii przekraczał 0,6A (przy współczynniku czułości 1,5). Odpowiada to długości 600 metrów typowego kabla 6kV. Człon czasowe zabezpieczeń ZI_0 w polach zasilających transformatory i silniki są z reguły nastawiane na 0,2s. Mimo tak dużej czułości nastaw i krótkich opóźnień czasowych doświadczenia eksploatacyjne są bardzo pozytywne dla tego typu zabezpieczeń. Miały one okazję zadziałać już kilkadziesiąt razy, wykazując przy tym 100% selektywności działania. Na chwilę obecną brak jest danych o jakimkolwiek nieselektywnym zadziałaniu tych zabezpieczeń, a dane poawaryjne od użytkowników tych zabezpieczeń potwierdzają wysoką pewność podejmowanych przez nie decyzji. Z kilku obiektów otrzymano informacje, że zabezpieczenie ZI_0 charakteryzuje się wyjątkową czułością. Po wyłączeniu pola przez zabezpieczenie, pracownicy dokonywali sprawdzenia izolacji induktorem, nie znajdując powodu wyłączenia. Pole zostało załączone, a zabezpieczenie ponownie wyłączyło to pole. Sytuacja ta powtórzyła się kilkakrotnie, a obsługa podejrzewała uszkodzenie zabezpieczenia. Przeprowadzona próba napięciowa tego pola wykazała jednak uszkodzenie izolacji. Jak widać każde wyłączenie lub sygnalizacja doziemienia przez zabezpieczenie ZI_0 powinno być analizowane założeniem wysokiej pewności prawidłowości podjętej przez nie decyzji. Przykład doziemienia zarejestrowanego przez wewnętrzny rejestrator został przedstawiony na rysunku 5.



Rys. 4. Schemat blokowy zabezpieczenia ziemnozwarciowego typu ZI_0-1

Przeprowadzone próby zwarcia rodziny zabezpieczeń ziemnozwarciowych typu ZI_0 w kilku elektrowniach i zakładach przemysłowych (Elektrownia Turów, KWB Bełchatów, Cementownia Strzelce Opolskie, Elektrownia Opole, kopalnia bazaltu w Wilkowie, Elektrownia Bełchatów) potwierdziły poprawność działania tych układów zarówno przy zwarciach metalicznych, łukowych, jak też prawidłowe zachowanie się w czasie występowania ferorezonansu.



Rys. 5. Zwarcię doziemne wyłączone i zarejestrowane przez przekładnik ZI₀₋₁

Kolejnym etapem testów było sprawdzenie możliwości „sygnalizowania” przez zabezpieczenie wyładowań niezupełnych występujących w sieci. W 1998 roku w Elektrowni Bełchatów przeprowadzono próby zwarciowe w sieci ŚN, która w zależności od konfiguracji może pracować z punktem zerowym izolowanym lub uziemionym przez rezystor. Próby miały na celu wykazanie, które z zabezpieczeń ziemnozwarciowych wytypowanych do prób działa poprawnie, przy obydwu konfiguracjach sieci. Dodatkowo wykonano próby mające na celu stwierdzenie możliwości lokalizowania uszkodzonego pola przez zabezpieczenia ziemnozwarciowe przy zwarciach łukowych o bardzo krótkim czasie trwania. Próbom poddano kilka typów dostępnych na rynku polskim zabezpieczeń ziemnozwarciowych producentów krajowych jak i zagranicznych. Wśród nich było również opisywane wcześniej zabezpieczenie typu ZI₀ firmy Energotest-Energopomiar. Zabezpieczenie to, poprzez nastawienie kąta maksymalnej czułości na 120°, przystosowano do działania w sieci pracującej z punktem zerowym izolowanym jak i pracującej z punktem zerowym uziemionym przez rezystor.

Wyniki prób wykazały, że zastosowane w zabezpieczeniu typu ZI₀ kryterium działania jest poprawne zarówno dla sieci z punktem zerowym izolowanym jak i uziemionym przez rezystor. Zabezpieczenie jako jedyne prawidłowo lokalizowało pole doziemne w każdej przeprowadzonej próbie. Również w przypadku pojawienia się pojedynczych impulsów prądu ziemnozwarciowego, dzięki dużej czułości obwodów wejściowych, zabezpieczenie potrafiło poprawnie wskazać kierunek przepływu prądu.

W roku 2000 zabezpieczenie ZI₀ otrzymało certyfikat przydatności do stosowania w energetyce. Procedura przyznawania tego certyfikatu przewiduje m.in. przeprowadzenie wywiadów z dotychczasowymi użytkownikami zabezpieczenia. Przekazane przez nich opinie potwierdzają, że wybrane kryterium działania zabezpieczenia ZI₀ jest jednym z najbardziej niezawodnych kryteriów do lokalizacji miejsca zwarcia w izolowanych sieciach średniego napięcia. Kryterium działania i układ zabezpieczenia ZI₀ jest też opatentowane w Urzędzie Patentowym RP.

Podsumowanie

Awarie przemysłowych izolowanych sieci średniego napięcia przy niesprawnie działających zabezpieczeniach mogą być źródłem poważnych strat. Jednak selektywnie i szybko działające zabezpieczenia pozwalają ograniczyć skutki takiej awarii do niezbędnego minimum. Właściwe podejście do tematu zabezpieczeń ziemnozwarciowych począwszy od przekładników ziemnozwarciowych, a skończywszy na odpowiednim doborze zabezpieczeń i przeprowadzeniu analizy całej sieci, pozwala na osiągnięcie stanu selektywnego wyłączenia zwarć doziemnych [5, 6]. Dowodem tego mogą być doświadczenia zebrane podczas eksploatacji zabezpieczeń typu ZI₀. Samo urządzenie w sposób oczywisty nie stanowi jednak gwarancji właściwego podejmowania decyzji. Jedynie prawidłowe uruchomienie, dobór i właściwy montaż przekładników oraz wyznaczenie nastaw zabezpieczenia będzie stanowić o selektywnie działającym systemie zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

LITERATURA

- [1] Adam Pawłowski, Albin Trybus - „Zabezpieczenia ziemnozwarciowe”, OWPT, Bielsko-Biała 1983
- [2] Prace naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej. Seria: konferencje - „Zjawiska i zabezpieczenia ziemnozwarciowe w sieciach rozdzielczych średniego napięcia.” - II Krajowa konferencja naukowo-techniczna. Szklarska Poręba maj 1997 r.
- [3] Waldemar Graczykowski, Marek Trojanowski, Grzegorz Konopiński: „Badania reakcji zabezpieczeń ziemnozwarciowych podczas prób zwarciowych w EI. Bełchatów”- wyniki prób zwarciowych
- [4] Mariusz Talaga, Franciszek Rodoń: „Dokumentacja techniczno ruchowa mikroprocesorowego zabezpieczenia ziemnozwarciowego typu ZI₀” – Energotest-Energopomiar 1999 r.
- [5] Hoppel W., Lorenc J.: Podstawy doboru zabezpieczeń w polach SN. *Automatyka Elektroenergetyczna* 2003, nr 1, s. 45 - 50.
- [6] Lorenc J., Hoppel W.: Techniczne środki wspomagające działanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach SN., *Przegląd Elektrotechniczny* R.85 9/2009, s. 241-248

Autorzy: mgr inż. Mariusz Talaga, Energotest sp. z o.o., ul. Chorzowska 44B, 44-100 Gliwice, E-mail: MTalaga@energotest.com.pl; dr hab. inż. Adrian Halinka, Prof. Pol. Śl., Politechnika Śląska w Gliwicach, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-Mail: Adrian.Halinka@polsl.pl; dr inż. Michał Szewczyk, Politechnika Śląska w Gliwicach, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-Mail: Michal.Szewczyk@polsl.pl.