

doi:10.15199/48.2018.11.12

Innowacyjne kryteria zabezpieczeń od skutków zwarć doziemnych w sieciach SN w systemie CZIP®-PRO

Streszczenie. W artykule przedstawiono innowacyjne kryteria zabezpieczeniowe od skutków zwarć doziemnych w sieciach SN. Nowoczesne funkcje zabezpieczeniowe są propozycją rozwiązania problemów związanych z zakłóceniami w polu transformatora uziemiającego oraz trudno wykrywalnymi zjawiskami wysokooporowymi. Oba algorytmy zostały zaimplementowane i wdrożone w systemie CZIP®-PRO - cyfrowych zabezpieczeń, automatyki, pomiarów, sterowania, komunikacji i rejestracji dla stacji elektroenergetycznych SN produkowanych przez firmę RELPOL S.A. przy współpracy z naukowcami z Politechniki Poznańskiej.

Abstract. The article presents innovative protection criteria against the effects of earth faults in MV network. Modern protection functions are a proposal to solve problems related to interference in the field of the earthing transformer and difficult to detect high-resistance phenomena. Both algorithms were implemented and developed in the CZIP®-PRO - system of digital protection, automation, measurement, control, communication and registration for MV power substations manufactured by RELPOL S.A. in cooperation with scientists from the Poznan University of Technology. (Innovative earth fault protection criteria in MV network implemented in CZIP®-PRO system).

Słowa kluczowe: przekaźnik zabezpieczeniowy, automatyka zabezpieczeniowa, zwarcie doziemne-wysokooporowe.

Keywords: protection relay, protection automation, high-resistance ground faults.

Wstęp

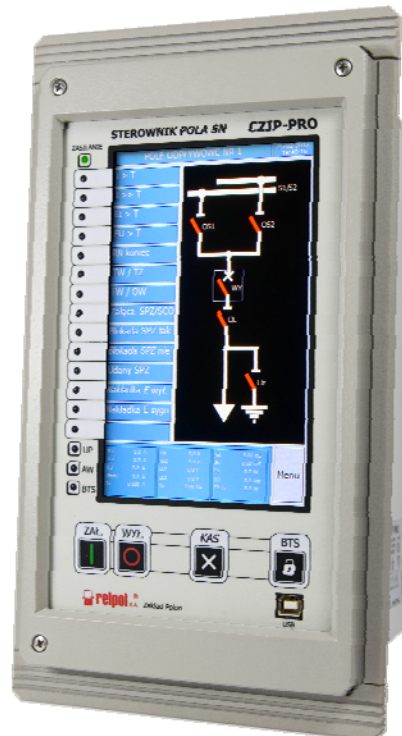
Głównym zadaniem urządzeń aparatury EAZ (Elektroenergetyczna Automatyka Zabezpieczeniowa) jest eliminowanie niekorzystnych zjawisk występujących w sieciach średnich napięć i ochrona przed zagrożeniami porażeniowymi. Powszechnie stosowane w tych urządzeniach zabezpieczenia z grupy admitancyjnych [1] w dużym stopniu zapewniają bezpieczeństwo pracy w sieci i prawidłowo reagują na zakłócenia. Doświadczenia eksploatacyjne wskazują jednak, że w pewnych „trudnych warunkach” istniejące kryteria mogą być niewystarczające.

Przykładem tego są zwarcia doziemne w obwodzie transformatora uziemiającego, które w praktyce traktowane są jako zwarcia na szynach zbiorczych. Nie są znane rozwiązania, które umożliwiają jednoznacznie identyfikację wystąpienia doziemienia w polu transformatora potrzeb własnych i urządzeń przyłączonych do jego punktu gwiazdowego. Kryteria zerowoprądowe i zerowonapięciowe stosowane w tych przypadkach nie są selektywne, stąd w sieciach skompensowanych i z izolowanym punktem neutralnym działają tylko na sygnalizację i nie zapewniają pełnej ochrony obwodów pierwotnych rozdzielni od skutków zwarć doziemnych. W sieciach o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor może dojść nawet do wyłączenia transformatora zasilającego.

Innym zjawiskiem obserwowanym w ostatnich latach, generującym problem w działaniu zabezpieczeń ziemnozwarciowych jest wzrastająca liczba trudno wykrywalnych zakłóceń o rezystancjach przejścia przekraczających kilka tysięcy omów. Wiąże się to ze wzrastającymi latem rezystywnościami gruntów, co powoduje znaczące obniżenie się wartości sygnałów pomiarowych filtrów składowych zerowych napięcia oraz prądu. Wartości te mogą być bliskie błędów pomiarowych. Skuteczna detekcja zwarć wysokooporowych jest bardzo istotna ze względu na ryzyko porażenia ludzi i zwierząt, do którego może dojść również nieświadomie, nie koniecznie przez bezpośredni kontakt z częścią czynną np. zerwanym przewodem. W tych trudnych przypadkach klasyczne zabezpieczenie może w ogóle nie zlokalizować zwarcia i nie wyłączyć doziemionej linii. Opisane sytuacje są znane w praktyce eksploatacyjnej i opisywane w literaturze [2]. W ostatnich latach zaproponowanych zostało kilka rozwiązań

tego typu problemu [1,3,4]. Dużym wyzwaniem dla producentów aparatury zabezpieczeniowej sieci SN jest reagowanie na pojawiające się zjawiska i implementowanie nowych algorytmów umożliwiających skuteczną ochronę przed skutkami takich zakłóceń.

Dzięki współpracy konstruktorów firmy Relpol S. A. z naukowcami z Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej, zostały opracowane i wdrożone w systemie CZIP®-PRO (rys.1) dwa algorytmy zawierające innowacyjne kryteria zabezpieczeń od skutków zwarć doziemnych.



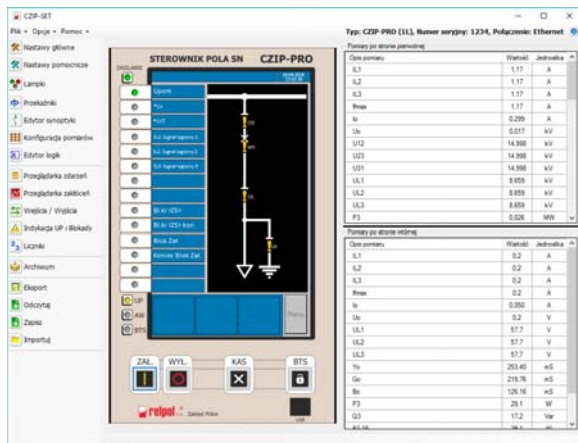
Rys.1. Terminal polowy CZIP®-PRO

Algorytmy te tzn. adaptacyjne zabezpieczenie konduktancyjne [5] oraz selektywne zabezpieczenie ziemnozwarciowe w polu transformatora uziemiającego dI_0 [6] są alternatywą dla stosowanych klasycznych funkcji

zabezpieczeniowych, które nie zawsze uwzględniają specyficzne potrzeby w zakresie zabezpieczeń pól rozdzielni SN.

Przeprowadzone badania [7] oraz doświadczenia praktyczne w działaniu nowych zabezpieczeń potwierdzają ich wysoką skuteczność i innowacyjność. Wdrożenie nowych zabezpieczeń nie wymaga żadnych dodatkowych nakładów inwestycyjnych. Aparatura niezbędna do realizacji obu zabezpieczeń stanowi standardowe wyposażenie współczesnych stacji rozdzielczych średnich napięć.

Wszystkie systemy CZIP®-PRO, produkowane przez firmę Relpol S. A. wyposażone są w szeroki wachlarz funkcji zabezpieczeniowych, w tym opisane w artykule dwa innowacyjne kryteria zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach SN. Na potrzeby realizacji funkcji zabezpieczeniowych urządzenie dokonuje ciągłych pomiarów wartości skutecznych trzech prądów fazowych i napięć oraz składowych zerowych prądów i napięć. Wraz z urządzeniem dostarczane jest wielofunkcyjne oprogramowanie narzędziowe CZIP®-SET (rys.2), które poza możliwością pełnej konfiguracji i monitorowania pracy urządzenia, pozwala na pobieranie, analizowanie danych z rejestratora zakłóceń i dziennika zdarzeń oraz zdalnie konfigurowanie parametrów zabezpieczeniowych i operacji łączeniowych w polu.



Rys.2. Okno główne oprogramowania CZIP®-SET

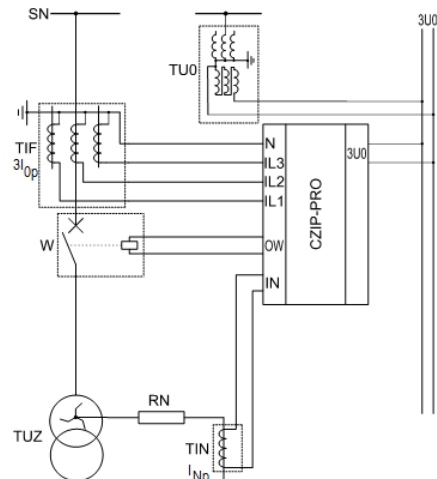
Uruchomienie, konfigurację oraz kontrolowanie działania nowych zabezpieczeń również można realizować za pomocą narzędzia CZIP®-SET. W dalszej części artykułu zostaną przedstawione zasady działania obu algorytmów w systemie CZIP®-PRO i ich konfiguracja w programie CZIP®-SET.

Selektywne zabezpieczenie od skutków zwarć doziemnych w polu transformatora uziemiającego

Nowe zabezpieczenie ziemnozwarciowe zaimplementowane w CZIP®-PRO, przeznaczone jest do zabezpieczenia pól transformatora potrzeb własnych w rozdzielniach sieci SN, w których punkt neutralny uziemiony jest przez dowolny element impedancyjny, w tym w sieciach skompensowanych. Dotychczasowe rozwiązania nie umożliwiały jednoznacznej identyfikacji zwarcia doziemnego w obrębie transformatora uziemiającego i przyłączonych do jego punktu gwiazdowego urządzeń. Typowe kryteria zerowoprądowe oraz zerowonapięciowe pobudzały jedynie sygnalizację i tym samym nie stanowiły pełnej ochrony obwodów od skutków zwarć doziemnych. Wykrycie zwarcia następowało przez wyłączenie innych urządzeń przyłączonych do rozdzielni (na przykład linii, szyn zbiorczych) i nie mogło być zrealizowane automatycznie, lecz przez obsługę.

Zasada działania zabezpieczenia dI_0 wykorzystuje ideę zabezpieczenia różnicowego i chroni obwody pola transformatora uziemiającego przed skutkami zwarć doziemnych [6]. Algorytm zaprezentowany zostanie na przykładzie typowego schematu pola transformatora uziemiającego (rys.3) wyposażonego w:

- transformator uziemiający TUZ,
- rezystor uziemiający RN,
- zespół przekładników prądowych TIF w układzie pełniej gwiazdy do pomiaru prądów fazowych,
- przekładnik prądowy TIN do pomiaru prądu w obwodzie uziemiającym punkt gwiazdowy transformatora,
- zespół wyłącznika W,
- cyfrowy sterownik polowy CZIP®-PRO.



Rys. 3. Schemat pola transformatora uziemiającego z terminalem CZIP®-PRO

W celu realizacji opisywanej funkcji zabezpieczeniowej na zaciski wejść pomiarowych sterownika CZIP®-PRO należy doprowadzić sygnały z przekładników pomiarowych prądów fazowych I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} i prądu w obwodzie uziemiającym I_N oraz napięcie składowej zerowej U_0 .

Idea zabezpieczenia oparta jest na detekcji różnicy pomiędzy wartością prądu zerowego $3I_{0p}$ wyliczoną z pomierzonych prądów fazowych w obwodzie łączącym szyny rozdzielni z wyłącznikiem pola, a wartością I_{Np} prądu płynącego w obwodzie uziemiającym punkt gwiazdowy transformatora, mierzoną przez przekładnik TIN. Obliczenia różnicy tych prądów wykonuje się zgodnie z zależnością:

$$(1) \quad dI_0 = |3I_{0p} - I_{Np}|,$$

gdzie: $3I_{0p}$ - wartość składowej zerowej prądu wyliczona z prądów fazowych po stronie pierwotnej, I_{Np} - zmierzona wartość prądu w obwodzie uziemiającym punkt neutralny, przeliczona na wartość po stronie pierwotnej.

Ponieważ wartości wszystkich prądów są mierzone po stronie wtórnej, a przekształcane są przez przekładniki o różnych przekładniach wartości powyższych prądów $3I_0$ oraz I_{Np} należy obliczyć z uwzględnieniem odpowiednich przekładni:

$$(2) \quad 3I_{0p} = \theta_i 3I_0,$$

gdzie: θ_i - przekładnia przekładnika prądowego w układzie gwiazdowym,

$$(3) \quad I_{Np} = \theta_{iN} I_N,$$

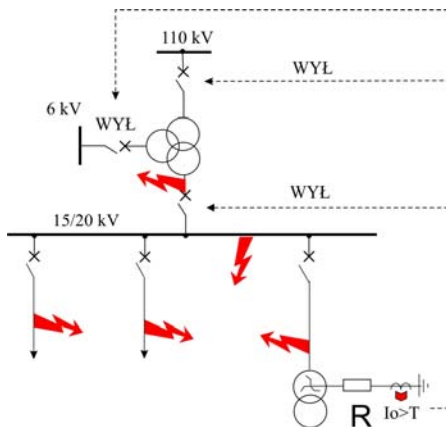
gdzie: θ_{iN} - przekładnia przekładnika uziemiającego w obwodzie uziemiającym punkt neutralny.

Dodatkowo porównywana jest wartość składowej zerowej napięcia U_0 z nastawioną wartością kryterialną. Jako kryterium rozruchu zabezpieczenia przyjmuje się spełnienie poniższych warunków:

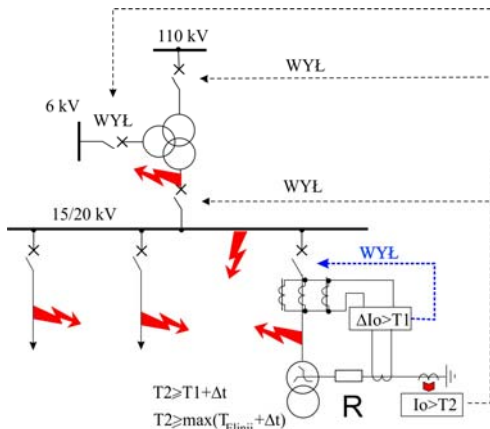
$$(4) \quad dI_0 > dI_{0n}, U_0 > U_{0n},$$

gdzie: dI_{0n} – wartość nastawcza określająca maksymalną dopuszczalną różnicę pomiędzy wartością wyliczoną prądu zerowego $3I_0$, a wartością prądu zerowego I_N zmierzoną w obwodzie uziemiającym punkt neutralny, U_{0n} – wartość nastawcza mierzonego napięcia zerowego U_0 , po przekroczeniu której zabezpieczenie jest aktywne.

Na rysunkach 4 i 5 zostało zaprezentowane porównanie zasad działania zabezpieczenia ziemnozwarciowego w polu transformatora uziemiającego z klasycznym algorytmem oraz z zabezpieczeniem dI_0 .



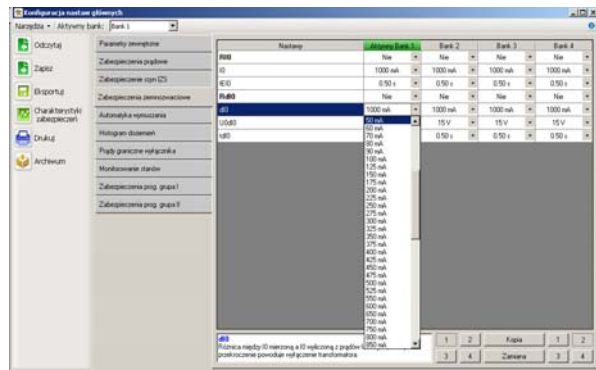
Rys. 4. Klasyczne zabezpieczenia ziemnozwarciowego w polu transformatora uziemiającego



Rys. 5. Zabezpieczenie ziemnozwarciowe w polu transformatora uziemiającego przy wyposażeniu go w zabezpieczenie dI_0 .

W oprogramowaniu narzędziowym CZIP®-SET w zakładce „Nastawy główne” w części „Zabezpieczenia ziemnozwarciowe” czułość zabezpieczenia można ustalać poprzez wybór wartości nastawy dI_0 , z zakresu od 0,05 A do 5,00 A – rys. 6. Dodatkowo można ustawić zwłokę czasową zabezpieczenia tdI_0 dobierając ją z zakresu od 0,05 s do 15,00 s.

Zaletą zaprezentowanego zabezpieczenia jest jego prostota i łatwość konfiguracji, a samo uruchomienie nie wymaga żadnych dodatkowych urządzeń czy np. narzędzi pomiarowych. Badania potwierdzają [7] uniwersalność zabezpieczenia, które może być przeznaczone do pracy w sieciach skompensowanych oraz sieciach, których punkt neutralny uziemiony jest przez rezystor.

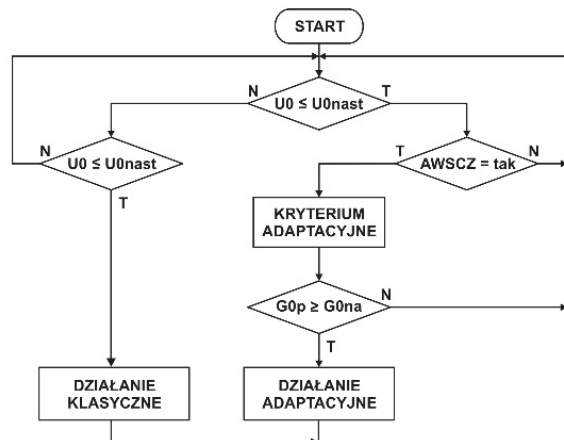


Rys. 6. Konfiguracja nastaw dla zabezpieczenia dI_0

Warto dodać, że CZIP®-PRO jest pierwszym na rynku krajowym urządzeniem, który ma zaimplementowany algorytm będący skutecznym sposobem na zabezpieczenie od skutków zwarć doziemnych w polu transformatora uziemiającego.

Adaptacyjne zabezpieczenie konduktancyjne

Podczas zwarć doziemnych, w których występują duża rezystancja przejścia R_F stosowane powszechnie kryteria zabezpieczeniowe, wykorzystujące sygnały I_0 oraz U_0 nie dają możliwości selektywnego wyłączania doziemionej linii. Skuteczna detekcja zwarć doziemnych, wysokooporowych możliwa jest dzięki zastosowaniu inteligentnego algorytmu, który w sposób dynamiczny optymalizuje kryterialne wartości nastawcze zabezpieczenia konduktancyjnego [5]. Mechanizm adaptacji jest inicjalizowany sygnałem logicznym potwierdzającym załączenie AWSZ. Idea działania algorytmu jest prosta, a jego ogólna struktura jest przedstawiona na rysunku 7.

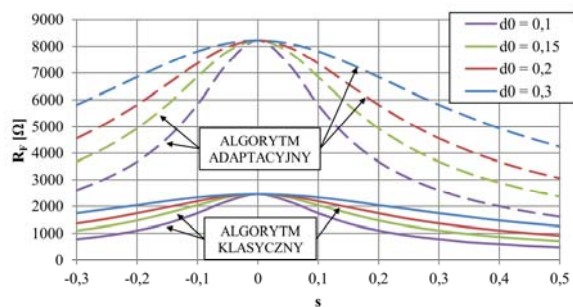


Rys. 7. Uproszczony schemat algorytmu adaptacyjnego zabezpieczenia konduktancyjnego

Algorytm adaptacyjnego zabezpieczenia konduktancyjnego jest skutecznym narzędziem do wykrywania zwarć doziemnych wysokooporowych w systemie CZIP®-PRO. Rysunek 8 przedstawia wykres zależności wykrywanej rezystancji przejścia R_F podczas doziemienia jednej fazy w funkcji współczynnika rozkompensowania sieci s , przy założeniu, że zabezpieczenie konduktancyjne pracuje wg tradycyjnych założeń i algorytmu adaptacyjnego. Współczynnik s jest wyznaczany z zależności:

$$(5) \quad s = \frac{I_L - I_{CS}}{I_{CS}},$$

gdzie: I_L – prąd dławika kompensującego, I_{CS} – pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego sieci/sekcji.



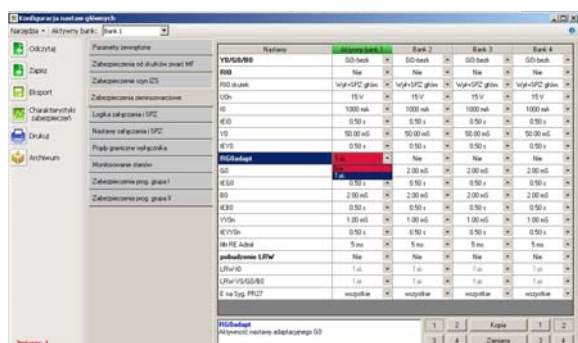
Rys. 8. Wartości wykrywanych rezystancji przejścia przez zabezpieczenie konduktancyjne pracujące z algorytmem klasycznym i adaptacyjnym [7].

Przeprowadzone badania symulacyjne pokazują jednoznacznie, że wprowadzenie nowego algorytmu adaptacyjnego do zabezpieczenia konduktancyjnego wielokrotnie zwiększa zakres wykrywanych rezystancji przejścia. Zaproponowany algorytm wg założeń jest możliwie prosty, nie wymaga dostarczania nowych sygnałów pomiarowych, a mimo to znacząco rozszerza spektrum wykrywanych doziemień. Zestawienie wybranych danych znajduje się również w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości wykrywanych rezystancji przejścia przez zabezpieczenie konduktancyjne pracujące z algorytmem klasycznym (K) i adaptacyjnym (A)

d_0	$R_f [\Omega]$					
	$s = 0,1$		$s = 0,2$		$s = 0,3$	
	K	A	K	A	K	A
0,1	1740	5820	1100	3680	780	2600
0,15	2040	6580	1470	4940	1100	3680
0,2	2190	7360	1740	5820	1360	4560
0,3	2330	7810	2040	6850	1740	5820

Analiza danych pokazuje, że nowy adaptacyjny algorytm zabezpieczenia konduktancyjnego pozwala wykryć zwarcia o wielokrotnie większej rezystancji w porównaniu z algorytmem klasycznym. Konfiguracja nastawy dla algorytmu w oprogramowaniu CZIP-SET jest równie prosta co w przypadku poprzedniego zabezpieczenia (rys.9).



Rys. 9. Konfiguracja nastaw dla zabezpieczenia RG0adapt

Algorytm można uaktywnić w grupie nastaw ziemnozwarciowych, ustawiając parametr „RG0adapt” na „tak”. Dodatkowym warunkiem jest doprowadzenie na zaciski X22.18-19 sygnału potwierdzającego załączenie

stycznika AWSCh. Nastawy G_0 i U_0 dobierać należy tak jak do działania w normalnym trybie.

Opisywany algorytm został zastosowany w terminalach polowych CZIP®-PRO i jest on w ich wyposażeniu standardowym. Doprowadzenie sygnału AWSCh (automatka wymuszania składowej czynnej prądu) do wejścia cyfrowego terminala CZIP®-PRO, to jedyny warunek jaki należy spełnić, by móc bez ograniczeń korzystać z tego narzędzia

Skuteczność działania zabezpieczenia została potwierdzona przez wykonywane w ostatnim czasie próby, których wyniki zaprezentowano w artykule. Odnotowywano również zadziałanie zabezpieczeń adaptacyjnych tam, gdzie algorytmy klasyczne w żaden sposób nie reagowały na pojawiające się zwarcie.

Podsumowanie

Wszystkie produkowane przez RELPOL S.A. urządzenia z systemu CZIP®-PRO wyposażane są w zaprezentowane w artykule innowacyjne funkcje zabezpieczeniowe od skutków zwarcć doziemnych. Adaptacyjne zabezpieczenie konduktancyjne pozwala na skuteczne wykrywanie zwarcć doziemnych o rezystancji przejścia na poziomie do 8 kΩ, może być stosowane w sieciach skompensowanych z układami wymuszania składowej czynnej AWSCh. Selekttywne zabezpieczenie od skutków zwarcć doziemnych w polu transformatora uziemiającego, to jedyne tego typu zabezpieczenie w kraju. Jego wdrożenie nie wymaga żadnych nakładów inwestycyjnych, a jedynie standardowego wyposażenia rozdzielni w aparaturę i układy pomiarowe. Nowe rozwiązania zostały opracowane i wdrożone na bazie unikalnych algorytmów autorstwa prof. Józefa Lorenca i jego zespołu.

Autorzy: dr Beata Zięba, Władysław Sieluk, Relpol S.A. zakład Polon, ul Browarna 11, 68-846 Zielona Góra E-mail: zieba.b@relpol.com.pl, sieluk.w@relpol.com.pl; mgr inż. Bartosz Olejnik, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: bartosz.olejnik@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Lorenc J., *Admitycyjne zabezpieczenie ziemnozwarciowe*, Poznań, (2007), Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej
- [2] Hoppel W., *Sieci średnich napięć. Automatyka zabezpieczeniowa i ochrona od porażeń*, Warszawa, (2017), Wydawnictwo WNT
- [3] Brusiłowicz B., Łukowicz M., Michalik M., Rebizant W., Schiel L., Sensitivity Comparison of Admittance and Watt-metric Criteria for Ground Fault Detection, *Development in Power System Protection*, Edynburg, (2016)
- [4] Wahlroos A., Altonen J., Hakola T., Kemppainen T., *Practical Application and Performance of Novel Admittance Based Earth-fault protection in Compensated MV-Networks*, CIGRE, Frankfurt, (2011)
- [5] Zgłoszenie patentowe (2015): *Sposób zabezpieczania od skutków wysokoenergetycznych zwarcć z ziemią w sieciach skompensowanych średniego napięcia*. P.412442
- [6] Zgłoszenie patentowe (2014): *Sposób selektywnego zabezpieczenia obwodów od skutków zwarcć doziemnych w polu transformatora uziemiającego*. P.409125
- [7] Olejnik B., Staszak B., Nowe rozwiązania w zabezpieczeniach od skutków zwarcć doziemnych w sieci SN, *Wiadomości Elektrotechniczne* (2015), nr 12 , s12-14