

Alternatywne rozwiązania zabezpieczeń ziemnozwarciowych dla sieci o małych prądach doziemnych (rozdzielnie blokowe)

Piotr Olszowiec – Erea

Streszczenie

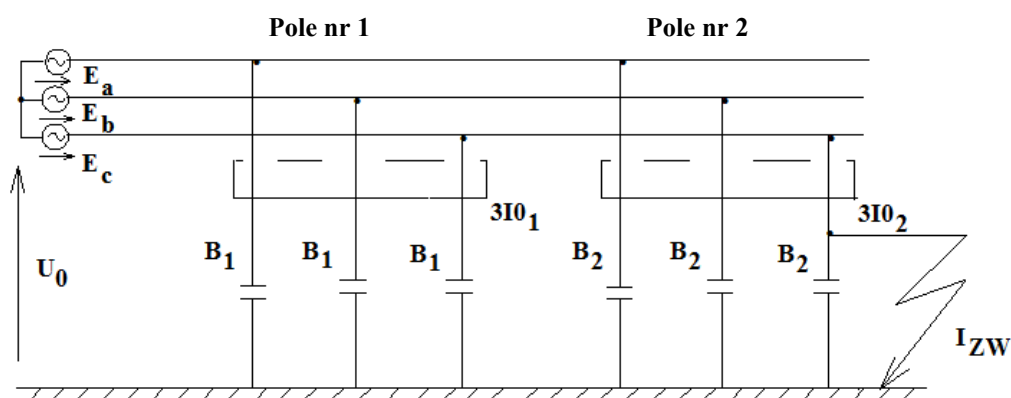
W referacie przedstawiono propozycje rozwiązań umożliwiających zwiększenie czułości istniejących zabezpieczeń ziemnozwarciowych dla sieci SN. Eksploatowane obecnie zabezpieczenia ziemnozwarciowe zerowoprądowe i zerowomocowe w sieciach z izolowanym punktem neutralnym i niewielką wartością prądu ziemnozwarciowego wykazują stosunkowo niewysoką czułość wykrywania zwarć oporowych z ziemią.

Zastosowanie odpowiedniego algorytmu kompensującego uchybowe prądy składowej zerowej, uwzględnienie prądu pojemnościowego własnego odpływu i adaptacja zabezpieczenia mocy czynnej dla składowych zerowych umożliwia wykrywanie zwarć z ziemią o wyższej oporności przejścia bez pogorszenia selektywności działania.

1. Wstęp

W sieciach SN z izolowanym punktem neutralnym stosuje się powszechnie następujące typy selektywnych kierunkowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych: a) zerowo-prądowe kierunkowe, b) admitancyjne, c) biernomocowe dla składowych zerowych.

Dla zapewnienia niezawodnego wykrywania zwarć z ziemią w chronionym odpływie, konieczny jest dobór prawidłowej nastawy, tj. prądu $3I_0$, admitancji rozruchowej $Y_0=3I_0/U_0$ lub mocy $Q_0=Im[U_0 \times I_0^*]$ [1]. Niestety, bywa to trudne lub niemożliwe w nietypowych, choć dość częstych stanach pracy rozdzielni, gdy występuje zasilanie tylko jednego lub kilku krótkich kabli przy wyłączonych pozostałych odpływach.



Rys. 1. Schemat sieci 3-fazowej z izolowanym punktem neutralnym – doziemienie fazy L3 w polu nr 2

W takim przypadku, przy doziemieniu w jednym z tych nielicznych kabli (pole nr 2 na rys. 1) wartość prądu $3I_{02}$, mierzonego przez przekątnik tego pola, może okazać się – jako proporcjonalna do susceptancji pojemnościowej doziemnej izolacji pozostałej części sieci $3B_1$ – niewystarczająca do pobudzenia zabezpieczenia, mimo że spełnione są pozostałe warunki, czyli przekroczony jest próg napięcia $3U_0$ i występuje właściwy kąt między fazorami U_0 i I_0 .

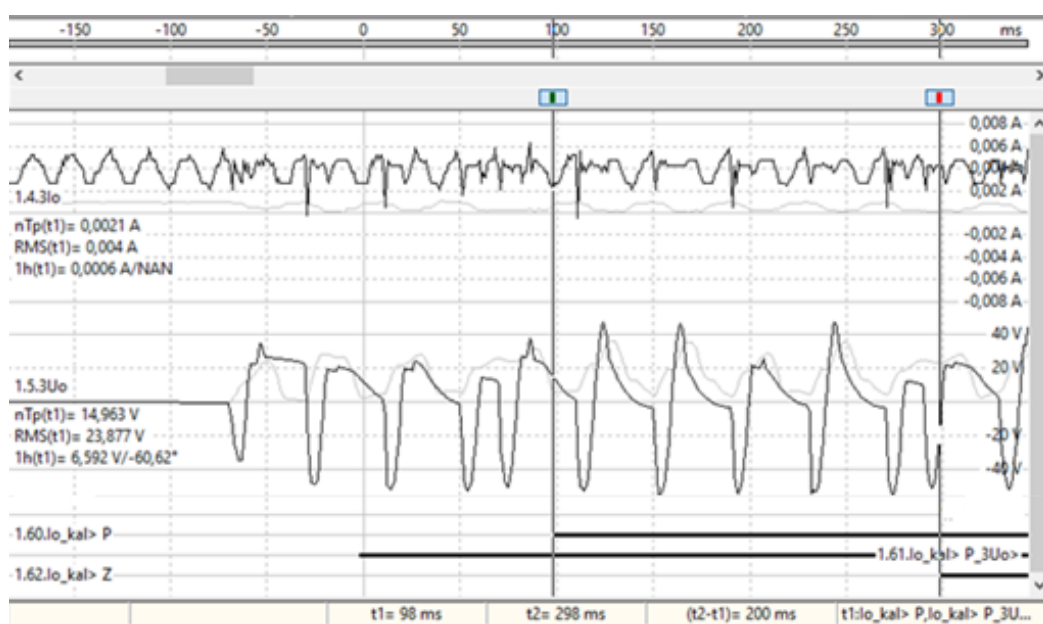
Dla zapewnienia niezawodnego wykrywania zwarć z ziemią przez zabezpieczenie zerowo-prądowe kierunkowe konieczna jest więc odpowiednio duża sumaryczna susceptancja izolacji pozostałej części sieci, zapewniająca przepływ prądu $3I_0$ większego od dolnej granicy zakresu nastaw danego zabezpieczenia. Granica ta, w typowych zabezpieczeniach krajowych i zagranicznych, wynosi 5 mA (wyjątkowo 2 mA) po stronie wtórnej przekładnika Ferrantiego.

Taki prąd doziemny w sieci kablowej 6 kV jest wymuszany przez zwarcie metaliczne przy łącznej długości kabli około 500 m. W zabezpieczeniach zerowo-prądowych należy nastawiać próg prądu z odpowiednim współczynnikiem czułości (np. 1,5) dla osiągnięcia skutecznej detekcji zwarć oporowych. Zatem żadaną wartość prądu $3I_0$ uzyska się przy zwarcia oporowych dopiero w sieci o łącznej długości około $1,5 \times 500 \text{ m} = 750 \text{ m}$. Przy nastawianiu zabezpieczenia tego typu należy ponadto uwzględnić możliwość pojawienia się w obwodzie wtórnym przekładnika Ferrantiego uchybowego prądu zmiennego. Dlatego w praktyce zabezpieczeń zerowo-prądowych nie można nastawić tak nisko, by zapewnić wykrywanie zwarć

oporowych z ziemią przy każdej możliwej konfiguracji sieci i występowaniu ewentualnego prądu uchybowego.

2. Prądy uchybowe składowej zerowej

Poważną przeszkodą dla realizacji czułych zabezpieczeń ziemnozwarciowych są uchybowe prądy składowej zerowej, pojawiające się w obwodzie wtórnym przekładników Ferrantiego przy braku przepływu prądu składowej zerowej w chronionych kablach. Dla wyeliminowania tej przeszkody proponuje się zastosowanie kompensacji tego prądu przy wyznaczaniu faktycznej wartości składowej zerowej prądu w stanie zwarcia z ziemią. W tym celu należy od rejestrowanego przebiegu czasowego prądu $3I_0'$ odejmować przebieg prądu uchybowego $3I_0$ zarejestrowanego w okresie poprzedzającym wystąpienie zwarcia. Użycie wyznaczonego matematycznie faktycznego prądu zwarcia $3I_0''$ zapewnia więc niezależność działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych od ewentualnych prądów uchybowych tej składowej. Dzięki temu znika konieczność odstrojenia progu działania zabezpieczenia od ewentualnego przepływu prądu uchybowego, co w efekcie pozwala na obniżenie progu prądu rozruchu zabezpieczenia. Skuteczność proponowanego rozwiązania ilustruje rysunek 2 - oscylogram działania zmodyfikowanego zabezpieczenia ziemnozwarciowego typu I_{0_kal} (pkt. 4), które wyposażono w opisaną kompensację prądu uchybowego [3], [4].



Rys. 2. Oscylogram działania zabezpieczenia I_{0_kal} (P-pobudzenie, Z-zadziałanie) ze zwłoką 200 ms przy sinusoidalnym prądzie uchybowym (widoczny przed chwilą wystąpienia zwarcia „-70 ms”) nałożonym na odkształcony prąd zwarcia z ziemią

3. Redefinicja prądu

Dla poprawy czułości wykrywania zwarć oporowych z ziemią przez funkcje zabezpieczenia zerowoprądowego przydatne jest użycie innego kryterium działania, a mianowicie wyznaczania rzeczywistego prądu zwarcia z ziemią (I_{zw} na rys. 1).

Natężenie prądu upływu lub zwarcia do ziemi jest właściwym (obok rezystancji przejścia) parametrem charakteryzującym uszkodzenie izolacji doziemnej, umożliwiając określenie szybkości i skali ewentualnej destrukcji termicznej elementów toru przepływu prądu do ziemi (izolacji doziemnej, blach rdzenia maszyny itp.). Prądu zwarcia z ziemią I_{zw} nie można oczywiście zmierzyć bezpośrednio, natomiast można go obliczyć w poniższy sposób.

Z bilansu prądów upływu do ziemi w odplywie nr 2 (I prawo Kirchhoffa) uzyskuje się wzór na wartość skuteczną prądu I_{zw} .

$$I_{zw} = |3I_{02} - j \cdot 3B_2 \cdot \underline{U}_0| \quad (1)$$

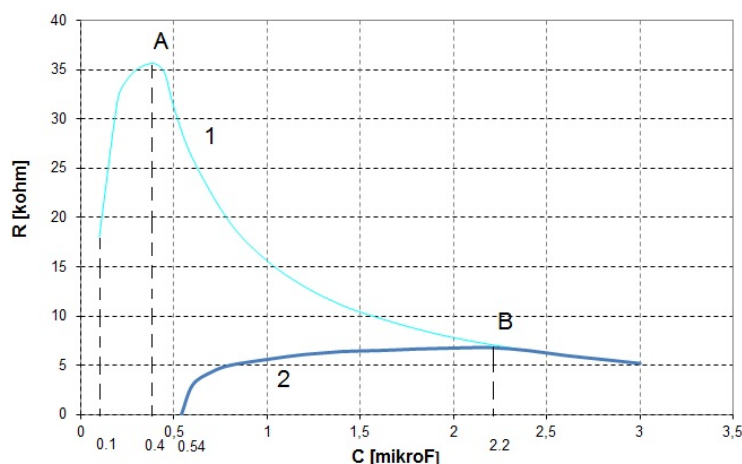
We wzorze tym występują wielkości pomiarowe fazy \underline{U}_0 i $3I_{02}$, które są doprowadzone do każdego przełącznika wyposażonego w funkcję zabezpieczenia ziemnozwarciowego kierunkowego. Do stosowania tej metody konieczne jest wprowadzenie do zabezpieczenia wartości susceptancji pojemnościowej $3B_2$ kabla tego pola. W stanie bezzakłóceniovym w każdym polu poszczególne składniki, tj. $3I_0$ i $3B_2U_0$,

a tym samym wyrażenie (1), są równe zero. Po wystąpieniu zwarcia z ziemią w doziemionym polu (nr 2) suma obu składników równa się prądowi I_{zw} . W pozostałych polach/polu wyrażenie (1) pozostaje równe zero.

Użycie zmodyfikowanej wielkości prądu wg wzoru (1) do wykrywania zwarć z ziemią jest możliwe jedynie na liniach o znanej susceptancji izolacji doziemnej.

4. Ocena czułości zmodyfikowanego ziemnozwarciowego zabezpieczenia zerowoprądowego

W oparciu o zależności napięcia i prądu składowej zerowej od rezystancji przejścia zwarcia z ziemią, wyznaczono teoretycznie i potwierdzono doświadczalnie zdolność zmodyfikowanego zabezpieczenia zerowoprądowego (wg wzoru (1)) I_{0_kal} do wykrywania zwarć oporowych. Czułość tego zabezpieczenia pokazano na rys. 3 i porównano z tradycyjnym kierunkowym zabezpieczeniem zero-prądowym I_{0K} .



Rys. 3. Charakterystyki działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych: tradycyjnego I_{0K} i zmodyfikowanego I_{0_kal} o nastawach prądu rozruchowego 5 mA (I_{0K}) i 1 mA (I_{0_kal}) oraz progu napięcia $U_{0r} = 20$ V dla stabilnych zwarć oporowych w sieci 6 kV (objaśnienia w tekście)

Zalety nowego rozwiązania uwidacznia porównanie przebiegu charakterystyk działania zabezpieczeń I_{0K} i I_{0_kal} o najmniejszych możliwych nastawach prądu rozruchowego $I_{0r} = 5$ mA (I_{0K}) i $I_{zw} = 1$ mA (I_{0_kal}); obniżenie progu do 1 mA dzięki zastosowaniu kompensacji prądu uchybowego) oraz jednakowej nastawie napięcia odblokowującego $U_{0r} = 20$ V. Przedstawiają one maksymalną wartość rozruchową rezystancji przejścia

do ziemi obu zabezpieczeń w funkcji sumarycznej pojemności doziemnej całej sieci 6 kV przy stabilnych zwarciach w chronionym odplywie o ustalonej pojemności 0.1 μ F. Charakterystyka 1 (I_{0_kal}) w zakresie pojemności sieci 0.1 – 0.4 μ F (do punktu A) jest wyznaczona przez warunek przekroczenia prądu rozruchowego I_{zw} , natomiast dla $C > 0.4$ μ F ograniczenie rezystancji rozruchowej wynika z warunku przekroczenia napięcia $3U_{0r}$. Podobnie wartości krzywej 2 (I_{0K}) w początkowym zakresie 0.54 - 2.2 μ F są określone przez nastawę prądową $3I_{0r}$, zaś dla większych pojemności sieci (poza punktem B przecięcia charakterystyk obu zabezpieczeń) krytycznym warunkiem jest uzyskanie minimalnej wartości napięcia odblokowującego $3U_{0r}$. Z rysunku wynika, że już w punkcie początkowym krzywej 1 (przy zerowej pojemności sieci zewnętrznej) zabezpieczenie I_{0_kal} wykrywa zwarcia o rezystancji przejścia do 18 k Ω . Natomiast krzywa 2 bierze początek od pojemności 0.44 μ F sieci zewnętrznej, co oznacza, że zwarcia doziemne przy mniejszych pojemnościach układu w ogóle nie są wykrywane przez zabezpieczenie I_{0K} (niezależnie od pojemności zabezpieczanego odplywu). Dodatkowym atutem nowego rozwiązania jest wyższa czułość w całym zakresie $C < 2.2$ μ F.

5. Zabezpieczenia ziemnozwarciowe zerowomocowe dla sieci z małym prądem doziemnym

Użycie zmodyfikowanej wielkości prądu wg wzoru (1) do wykrywania zwarć z ziemią w linii o znanej susceptancji izolacji doziemnej pozwala na udoskonalenie nie tylko zabezpieczeń zerowoprądowych, lecz także zabezpieczeń zerowomocowych [2].

W sieciach SN z punktem neutralnym izolowanym stosuje się zabezpieczenie reagujące na moc bierną składowej zerowej prądu I_{0k} i napięcia U_0 zgodnie z wzorem

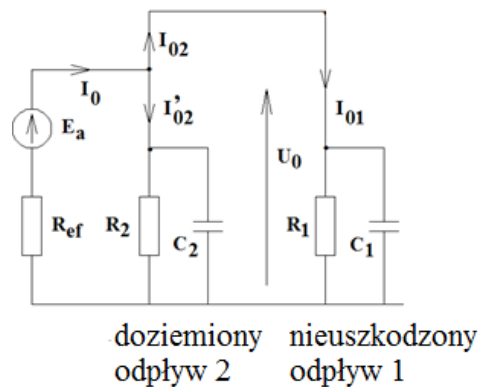
$$Q_{0k} = \text{Im} \left[U_0 \cdot 3I_{0k}^* \right] \quad (2)$$

Zamiast prądu I_{0k} można użyć prądu zwarcia z ziemią I_{zw} danego wzorem (1). Nowe zabezpieczenie biernomocowe w k -tym polu ma działać wg wzoru

$$Q_{0k} = \text{Im} \left[\underline{U}_0 \cdot (3\underline{I}_{0k} - 3jB_k \underline{U}_0)^* \right] \quad (3)$$

Oczywiście, jak w przypadku zabezpieczenia ziemnozwarciowego nadprądowego, w odplywach nieuszkodzonych moc określona wzorem (3) jest równa zero.

Metoda ta jest prosta i skuteczna dla niskooporowych zwarć z ziemią. Przy wyższych wartościach rezystancji przejścia okazuje się zawodna z powodu zbyt niskich wartości mocy Q_0 wywołanych obniżeniem wartości napięcia U_0 . Dla podniesienia czułości działania zabezpieczenia biernomocowego (tradycyjnego - wzór (2) i zmodyfikowanego – wzór (3)) czyli poszerzenia zakresu wykrywanych rezystancji przejścia proponuje się wykorzystanie dodatkowego kryterium, a mianowicie obliczania sumy mocy czynnych wydzielanych przez składowe zerowe prądu w upływnościach izolacji doziemnej wszystkich obwodów sieci oraz w rezystancji przejścia do ziemi R_{ef} [2], [3]. Tę nową koncepcję objaśniono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat zastępczy sieci dla składowej zerowej prądu i napięcia przy zwarciu z ziemią w fazie A odpływu „2” (patrz rys. 1)

Ze schematu tego wynika, że suma mocy czynnych wydzielanych przez prądy składowej zerowej w rezystancjach R_1, \dots, R_n oraz R_{ef} jest równa mocy czynnej wydawanej przez źródło napięcia E_a (zgodnie z zasadą Thevenina jest to napięcie doziemne fazy A U_{a-pref} w stanie poprzedzającym zwarcie, założono $U_{a-pref} \approx E_a$) danej wzorem

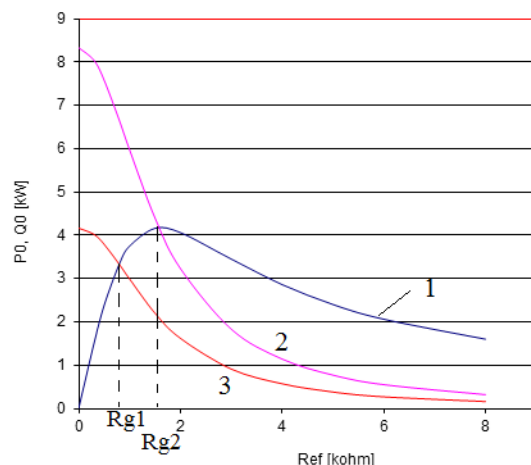
$$P_0 = \text{Re} \left[\underline{U}_{a-pref} \cdot 3\underline{I}_0^* \right] \quad (4)$$

Przytoczone wzory (2) - (4) służą do wyznaczania wartości mocy dla ustalonych zwarć z ziemią z sinusoidalnymi wielkościami pomiarowymi. Dla zwarć łukowych - zamiast zależności (4) - proponuje się określać moc czynną wydawaną przez źródło napięcia $e_A(t)$ zgodnie z zależnością

$$P_{0k} = \frac{3}{T_z} \int_0^{T_z} e_A(t) \cdot [i_{0k}(t) - C_{0k} \cdot du_0(t)/dt] dt \quad (5)$$

gdzie P_{0k} – moc czynna w k -tym odpływie uśredniona w przedziale czasu T_z , i_{0k} – wartość chwilowa składowej zerowej prądu w k -tym odpływie, C_{0k} – pojemności doziemne faz w k -tym odpływie, $u_0(t)$ – wartość chwilowa składowej zerowej napięcia. Różnica w nawiasie kwadratowym określa chwilowy prąd zwarcia w doziemionym odpływie; w odpływach nieuszkodzonych wynosi ona zero.

Zaletą tej nowej koncepcji jest możliwość skuteczniejszej detekcji oporowych zwarć z ziemią w sieciach z izolowanym punktem neutralnym. Okazuje się bowiem, że przy rezystancji przejścia większej od określonej wartości granicznej metoda ta osiąga wyższą czułość od tradycyjnie stosowanego w tego typu sieciach zabezpieczenia biernomocowego. Zjawisko to ilustruje wykres charakterystyk tych zabezpieczeń (moce dla składowych zerowych obliczonych po stronie pierwotnej) pokazany na rysunku 5. Założono równość susceptancji pojemnościowych zabezpieczanego odpływu i pozostałej części sieci. Przebieg charakterystyk wskazuje, że dla rezystancji przejścia większych od R_{g1} proponowana funkcja czynnomocowa posiada wyższą czułość od tradycyjnego zabezpieczenia biernomocowego. Dlatego warto rozpatrzyć możliwość jednoczesnego stosowania obu rodzajów funkcji do ochrony ziemnozwarciowej w sieciach z izolowanym punktem neutralnym.



Rys. 5. Przykładowe (dla całkowitej pojemności doziemnej sieci $2 \mu F$) charakterystyki funkcji zerowomocowych: zmodyfikowanej czynnomocowej (krzywa 1 wg wzoru (5)), biernomocowej (krzywa 2 wg wzoru (3)), biernomocowej (krzywa 3 wg wzoru (2)) w funkcji rezystancji zwarcia z ziemią R_{ef} w sieci 6 kV z punktem neutralnym izolowanym

6. Wnioski

W artykule pokazano nowe możliwości podniesienia czułości działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach o niskim prądzie zwarcia z ziemią oraz przy występowaniu zakłócających prądów uchybowych. Efekty te można uzyskać dzięki zastosowaniu takich rozwiązań jak:

- 1) obliczenie wartości faktycznego prądu w miejscu zwarcia jako nowej wielkości kryterialnej,
- 2) kompensacja prądu uchybowego składowej zerowej w poszczególnych odpywach,
- 3) badanie strat mocy czynnej dla składowych zerowych w całej sieci.

Z uwagi na wykorzystanie dotychczas stosowanych wielkości pomiarowych tj. składowych zerowych prądu i napięcia, uruchomienie zmodyfikowanych funkcji zabezpieczeń ziemnozwarciowych nie wymaga żadnych dodatkowych zmian w obwodach zewnętrznych, ani w samym urządzeniu. Konieczne jest jedynie zaimplementowanie nowych algorytmów działania. Cel ten osiągnięto za pomocą środków 1) i 2) w zmodyfikowanej funkcji zabezpieczenia zerowoprądowego I_{0_kal} zaimplementowanej w zespole zabezpieczeń typu iZAZ-400.

Literatura

- [1] Talaga M., Halinka A.: „Warunki pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach średnich napięć o bardzo małych prądach zwarcia z ziemią”, Wiadomości Elektrotechniczne 3/2017
- [2] Кучумов Л. и др.: „Переходное сопротивление в месте ОЗЗ”, Новости Электротехники 4/2017
- [3] Olszowiec P.: „Modifications of Earth Fault Zero-Sequence Power Protections for MV Networks”, PACW Conference Glasgow 2019
- [4] Olszowiec P., Krzęcio M., Duży M.: „Nowe rozwiązanie zabezpieczenia ziemnozwarciowego w sieciach SN z izolowanym punktem neutralnym i jego implementacja w zespole zabezpieczeń iZAZ400”, Seminarium KAE SEP Łądek Zdrój 2017

