

Józef LORENC
Witold HOPPEL
Politechnika Poznańska
Instytut Elektroenergetyki

PROBLEMY WYKRYWANIA ZWARĆ DOZIEMNYCH W SIECIACH PRACUJĄCYCH Z NIEUZIEMIONYM BEZPOŚREDNIO PUNKTEM NEUTRALNYM

Streszczenie: W artykule przedstawiono wybrane problemy zabezpieczeń od skutków zwarć doziemnych w sieciach średnich napięć. Przeanalizowano wpływ różnych czynników na wartość sygnałów wejściowych, czyli składowych zerowych napięć i prądów, szczególnie asymetrii doziemnej sieci. Druga grupa zagadnień dotyczy oceny i odpowiedniego doboru kryteriów działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych dla różnych sposobów pracy punktu neutralnego. Przedstawiono zalety opracowanych w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej kryteriów admitancyjnych, które w stosunku do kierunkowych i zerowoprądowych posiadają wiele zalet, z których podstawowe to dobra praca w warunkach zwarć niestabilnych, duży zakres wykrywanych rezystancji przejścia oraz niewrażliwość większości z nich na kierunek podłączenia wielkości wejściowych.

1. Wprowadzenie

Wykonanie skutecznych zabezpieczeń ziemnozwarciowych dla sieci średnich napięć jest z reguły zadaniem trudnym. Powodem tego jest relatywnie niski poziom sygnałów pomiarowych zasilających zabezpieczenia. W wielu przypadkach przyjmują one wartości porównywalne z obszarem szumu pomiarowego wywołanego niedoskonałą pracą przekładników prądowych i naturalną asymetrią admitancji doziemnej sieci. Niski poziom prądów zwarciovych w sieci SN wynika przede wszystkim z braku bezpośredniego uziemienia jej punktu neutralnego. W sieciach o izolowanym punkcie neutralnym prąd ten wywołany jest admitancją obwodu zwarciovego, której głównymi elementami są pojemności doziemne wszystkich linii pracujących w sieci. Wartość tej admitancji wzrasta po uziemieniu sieci rezystancją, ale znacznie maleje (kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt razy) po zainstalowaniu w obwodach uziemienia punktu neutralnego dławików gaszących (cewek Petersena). W polskich sieciach średnich napięć układy do kompensacji ziemnozwarciowej stosowane są powszechnie. Ponad 80% sieci o napięciach 15 i 20 kV to układy pracujące z punktem neutralnym uziemionym przez cewkę Petersena i mimo pojawiającego się w ostatnich latach trendu do wprowadzania uziemienia rezystancyjnego, szczególnie w sieciach kablowych, liczba instalowanych urządzeń kompensujących jest ciągle duża i nie zmniejsza się.

Relatywnie mała przewodność obwodów doziemnych sieci umożliwia pojawianie się dodatkowych rezystancji i niekorzystnych zjawisk w miejscu zakłócenia doziemnego. W sieciach napowietrznych bardzo często pojawiają się zwarcia z ziemią, w których wartości takich dodatkowych rezystancji przekraczają kilkaset omów i nierzadkie są przypadki rezystancji przekraczających kilka tysięcy omów. Możliwości lokalizowania takich zakłóceń przez zabezpieczenia ziemnozwarciowe są znacznie ograniczone. Dodatkowym utrudnieniem pracy tych zabezpieczeń są zjawiska niestabilnego łuku w miejscu doziemienia i związane z tym krótkotrwałe przerwy w przepływie prądu zwarcia.

Dla sieci SN opracowano wiele zabezpieczeń ziemnozwarciowych, które wykorzystują w działaniu różne kryteria. Można je podzielić na dwie grupy. Do pierwszej zaliczyć należy zabezpieczenia, które

zasilane są wielkościami elektrycznymi mierzonymi w ustalonych warunkach doziemienia, a druga grupa to zabezpieczenia pracujące w stanach przejściowych. Zabezpieczenia reagujące na przebiegi wywoływane procesami przejściowymi badają cechy jakościowe składowych zerowych prądów i napięć pojawiających się w pierwszych chwilach po wystąpieniu zwarcia doziemnego. W dotychczasowej polskiej praktyce nie znalazły one szerszego zastosowania. Natomiast powszechnie stosowane są zabezpieczenia wykorzystujące ustalone przebiegi wielkości ziemnozwarciowych. Działają one w oparciu o różnego rodzaju kryteria prądowe, kierunkowe lub admitancyjne. Te ostatnie są przedmiotem szczegółowych badań i opracowań Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej [2, 3, 5, 6].

Niezależnie od zastosowanego kryterium podstawowymi sygnałami wykorzystywanymi przez zabezpieczenia ziemnozwarciowe są składowe zerowe napięcia sieci U_{op} i prądów mierzonych w poszczególnych liniach I_{op} . Na wartości napięcia U_{op} w ogólnym przypadku składają się dwa zjawiska: zwarcia doziemnego – U_{0z} oraz naturalna asymetria doziemna sieci – U_{0ns} . Natomiast na sygnały I_{op} składają się prądy mierzone przez filtry składowych zerowych linii ($3I_0$) oraz prądy I_μ wynikające z błędów pomiarowych tych filtrów. Poniżej przeprowadzono krótką analizę wartości sygnałów U_{op} i I_{op} występujących podczas typowych zakłóceń z ziemią w sieciach SN o odmiennych sposobach uziemienia punktu neutralnego. Wyniki takiej analizy są podstawą badania warunków pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych, dokonywania oceny ich skuteczności działania w różnych przypadkach zwarć doziemnych [8] i rekomendowania określonych rozwiązań sieciom różniącym się sposobem pracy punktu neutralnego.

2. Wartości sygnałów U_{op}

Napięcie U_{op} mierzone jest w polu pomiarów rozdzielni SN za pomocą filtra składowej zerowej (tzw. otwartego trójkąta) i można je traktować jako napięcie między punktem neutralnym sieci a ziemią. Przy pominięciu błędów transformacji filtrów jego wartości wynikają z zależności:

$$\underline{U}_{0p} = \frac{1}{\vartheta_u} (\underline{U}_{0z} + \underline{U}_{0ns}) \quad (1),$$

w której:

\underline{U}_{0z} - składowa wywołana skutkami zwarcia doziemnego,

\underline{U}_{0ns} - składowa wywołana napięciem naturalnej asymetrii doziemnej sieci U_{ns} ,

ϑ_u - przekładnia układu pomiarowego.

Poszczególne składowe oblicza się wg zależności:

$$\underline{U}_{0z} = \underline{U}_{ph} \frac{1}{1 + R_F \omega C_s [d_0 + j(1 - K)]} \quad (2),$$

$$\underline{U}_{0ns} = \frac{R_F \underline{U}_{ns} \omega C_s}{1 + R_F \omega C_s [d_0 + j(1 - K)]} \quad (3),$$

w których:

\underline{U}_{ph} - napięcie fazowe sieci,

R_F - rezystancja przejścia w miejscu zwarcia doziemnego,

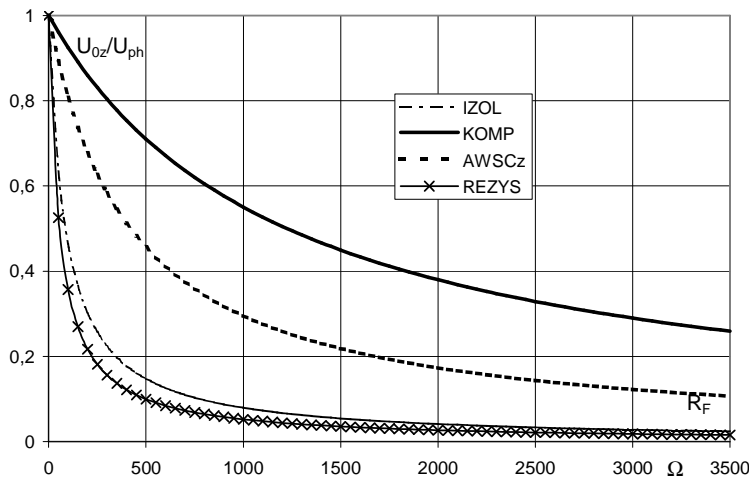
ω - pulsacja,

C_s - wypadkowa pojemność doziemna sieci,

d_0 - upływność doziemna sieci,

K - współczynnik kompensacji.

Na rys.1. przedstawiono krzywe wartości względnych składowych U_{0z} , a na rys.2 U_{0ns} w zależności od rezystancji przejścia w miejscu zwarcia R_F dla różnych sposobów uziemienia punktu neutralnego sieci. Poszczególne krzywe opisano skrótami: IZOL – sieć z izolowanym punktem neutralnym, KOMP – sieć skompensowana bez AWSCz, AWSCz – sieć skompensowana z automatyką wymuszania składowej czynnej, REZYS – sieć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor. Obliczenia wykonano dla sieci o napięciu 15 kV, pojemnościowym prądzie zwarcia z ziemią równym 100 A. Wartości upływności i współczynnika kompensacji przyjęto następujące dla poszczególnych

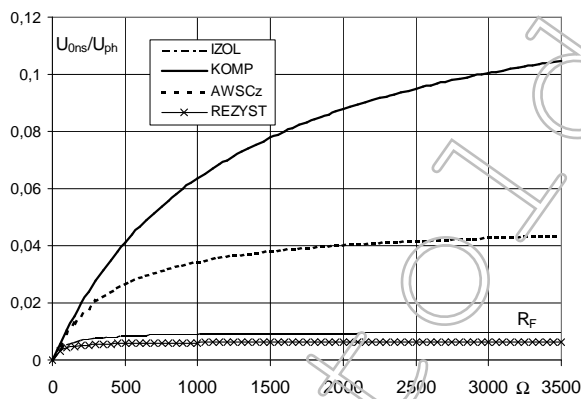


Rys.1. Zależność napięcia U_{0z} od rezystancji przejścia w miejscu zwarcia dla różnych sposobów pracy punktu neutralnego

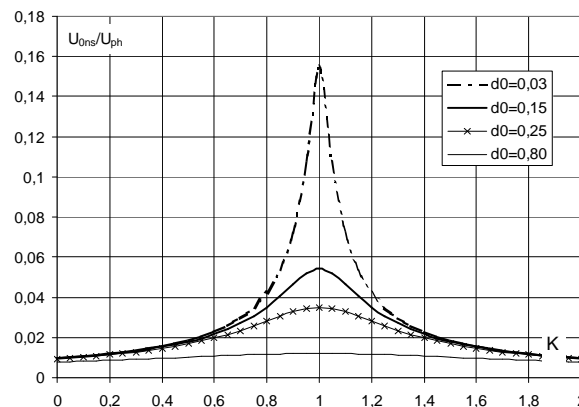
rozruchowych członów napięciowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych, urządzeń AWSCz oraz układów sygnalizujących zwarcia doziemne w sieci.

Na rys.3 przedstawiono zależność U_{0ns} dla sieci o ogólnych parametrach jak podano poprzednio, z punktem neutralnym uziemionym przez dławik gaszący w funkcji stopnia kompensacji podczas zwarcia doziemnego poprzez rezystancję $R_F=2500 \Omega$ dla różnych upływności sieci d_0 . Wartość 0,03 dotyczy sieci bez urządzeń AWSCz, 0,15 i 0,25 to zakres przeciętnych wartości dla sieci z wymuszaniem prądu czynnego, a 0,8 dotyczy sieci z punktem neutralnym uziemionym przez równoległy układ dławika i rezystora.

3. Sygnały I_{0p}



Rys.2. Zależność napięcia U_{0ns} od rezystancji przejścia w miejscu zwarcia dla różnych sposobów pracy punktu neutralnego



Rys.3. Zależność napięcia U_{0ns} od współczynnika kompensacji dla sieci o różnych upływnościach doziemnych

Wartości prądów I_{0p} , które pojawiają się na zaciskach zabezpieczeń ziemnozwarciowych wynikają z oddziaływania napięć U_{0z} i U_{0ns} na admitancję doziemną sieci Y_{0z} i admitancję doziemną własną rozpatrywanej linii Y_{0l} . Przy pewnych uproszczeniach prąd I_{0p} można wyrazić wzorem:

$$\underline{I}_{0p} = \frac{1}{\vartheta_i} (\underline{U}_{0z} + \underline{U}_{0ns}) (mY_{0z} - Y_{0l}) + \underline{I}_{\mu} \quad (4)$$

gdzie:

ϑ_i - przekładnia układu Holmgrena lub przekładnika Ferrantiego,

$m = 1$, gdy rozpatrujemy linię doziemioną,

$m = 0$, gdy rozpatrujemy linię zdrową pracującą w doziemionej sieci,

Y_{0l} - admitancja własna doziemna rozpatrywanej linii,

Y_{0z} - wypadkowa admitancja doziemna sieci,

przypadków: - IZOL - $d_0 = 0,02$, KOMP - $d_0 = 0,05$, $K = 1,05$, AWSCz - $d_0 = 0,2$, $K = 1,05$, REZYS - $d_0 = 1,2$. Założono przy tym, że względna wartość napięcia asymetrii U_{ns} jest równa 0,01, co w praktyce jest wartością ekstremalną. Przeważnie spotyka się wartości rzędu 0,001-0,006.

Z przebiegu tych krzywych wynika, że składowa U_{0ns} może mieć zauważalny wpływ na wartości U_{0p} tylko w sieciach kompensowanych podczas zwarć oporowych i przede wszystkim decyduje o poziomie napięcia U_{0p} w normalnych warunkach pracy. Składowa U_{0ns} ma więc znaczenie przy doborze wartości

I_{μ} - prąd uchybu pomiarowego układu Holmgreena lub przekładnika Ferrantiego.

Admitancja Y_{0z} decyduje o wartości prądu zwarcia z ziemią, a jej wartość zależy od sposobu uziemienia punktu neutralnego sieci. Można przyjąć, że jej moduł określony jest wzorami:

- dla sieci o izolowanym punkcie neutralnym,

$$Y_{0z} = \omega C_s \quad (5),$$

- dla sieci kompensowanej,

$$Y_{0z} = (1-K) \omega C_s \quad (6),$$

- dla sieci kompensowanej po wprowadzeniu do obwodu ziemnozwarciowego dodatkowej admitancji Y_w (po zadziałaniu urządzeń AWSCz lub AWSB),

$$Y_{0z} = (1-K) \omega C_s + Y_w \quad (7),$$

- dla sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystancję R_N .

$$Y_{0z} = \sqrt{\left(\frac{I}{R_N}\right)^2 + (\omega C_s)^2} \quad (8).$$

Zakładając, że wartości współczynnika K w sieciach kompensowanych są w granicach $1,05 \div 1,2$, a w sieci uziemionej przez rezystor R_N konduktancja ($1/R_N$) przyjmuje wartości $(1,2 \div 2) \omega C_s$, to można uznać, że admitancja Y_{0z} w sieci kompensowanej jest 5–20 razy mniejsza, a w sieci uziemionej rezystancją 1,5–2,2 większa niż dla sieci z punktem neutralnym izolowanym. Wyraźnie małe wartości Y_{0z} w sieciach kompensowanych są główną przyczyną bardzo niskich poziomów sygnałów I_{0p} . W przypadku sieci niedokompensowanej ($K < 1$) i odpowiedniej wartości admitancji własnej Y_{0l} prąd I_{0p} przyjmować może wartości bliskie zeru. Takie sytuacje praktycznie nie wystąpią po zadziałaniu urządzeń wymuszających przepływ dodatkowego prądu doziemienia (zwłaszcza podczas wymuszania prądu czynnego).

Jak zaznaczono we wzorze (4), na wartości prądu I_{0p} może mieć istotny wpływ prąd I_{μ} wynikający z błędów układów pomiarowych. Prąd ten może wpływać na warunki pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych przez powodowanie zmian w amplitudzie i wartości argumentu prądu I_{0p} . Na podstawie doświadczeń eksploatacyjnych i rejestrowanych przebiegów można wnioskować, że w normalnych warunkach pracy wartości prądów I_{μ} nie przekraczają z reguły kilkunastu miliamperów w układach Helmgreena i kilku miliamperów w przypadku stosowania przekładników Ferrantiego. Natomiast argument tego prądu jest zmienny i trudny do oszacowania. W dotychczasowej praktyce eksploatacyjnej przyjmuje się prądy I_{μ} na poziomie 50 mA dla układu Helmgreena i 20 mA dla przekładników Ferrantiego. Autorzy uważają, że dla potrzeb obecnie stosowanych układów pomiarowych można przyjmować wartości mniejsze (np. 25 mA dla układu Helmgreena i 5–10 mA dla przekładników Ferrantiego). Zmienność w czasie argumentu prądu I_{μ} uzasadnia przyjęcie zasady, że wzmacnia on prąd I_{0p} mierzony w linii niedoziemionej, a osłabia prądy I_{0p} występujące podczas doziemienia linii. Poziom prąd I_{μ} znacznie wzrasta w przypadku wystąpienia w linii zwarcie międzyfazowych. Przyjmuje się, że może on wtedy osiągać wartości w układach Holmgreena nawet do 500 mA. Tego typu uchyb ma jednak znaczenie tylko dla warunków pracy zabezpieczeń zerowoprądowych działających z czasem krótszym od zabezpieczeń chroniących linie od skutków zwarcie międzyfazowych.

4. Ocena i rekomendacje kryteriów działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych stosowanych w Polsce

Ze względu na sposób działania kryteria zabezpieczeń ziemnozwarciowych można podzielić na: prądowe, kierunkowe i admitancyjne. Kryteria admitancyjne opracowano w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej, a ich powszechne wykorzystanie w konstrukcjach zabezpieczeń ziemnozwarciowych nastąpiło w latach dziewięćdziesiątych, początkowo w postaci autonomicznych przekładników oraz analogowych modułów w systemach SMAZ i ZAZ, później w postaci algorytmów decyzyjnych w cyfrowych systemach CZIP [1]. Pozytywne doświadczenia z eksploatacji zabezpieczeń admitancyjnych w spółkach dystrybucyjnych w Polsce [4, 9] powodują,

że w wielu obecnie produkowanych cyfrowych systemach EAZ dla sieci średniego napięcia kryteria te stały się standardem.

Jak wspomniano wcześniej we wszystkich analizowanych kryteriach wejściowymi sygnałami pomiarowymi są sygnały I_{0p} i U_{0p} . W kryteriach prądowych wykorzystuje się tylko informacje o poziomie sygnału I_{0p} natomiast w kryteriach kierunkowych i admitancyjnych uczestniczą obie wielkości pomiarowe I_{0p} i U_{0p} .

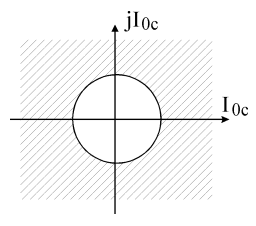
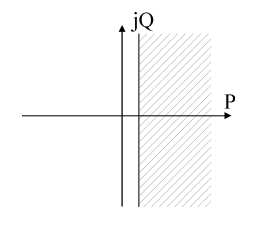
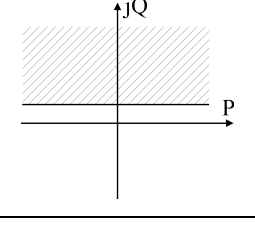
W tabelicy 1 przedstawiono te kryteria zaznaczając realizowane w nich warunki rozruchowe. Indeks p dotyczy wielkości pomiarowej, indeks n wielkości nastawczej. Kryteria decyzyjne dla poszczególnych zabezpieczeń zaznaczono znakiem „+”.

Tablica 1. Kryteria działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych i ich warunki rozruchowe

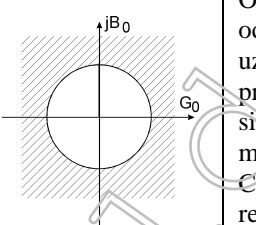
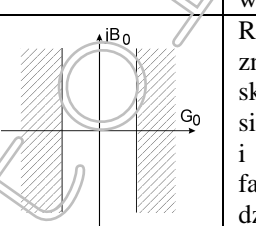
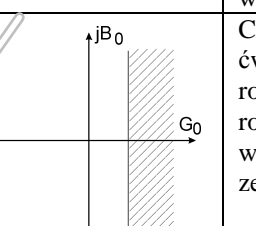
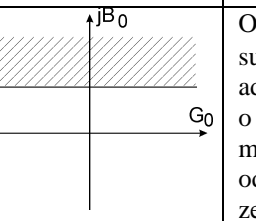
Kryterium	Symbol	$U_{0p} > U_{0n}$	$I_{0p} > I_{0n}$	$Y_{0p} > Y_{0n}$	$G_{0p} > G_{0n}$	$B_{0p} > B_{0n}$	kierunek
Nadprądowe	$I_0 >$		+				
Kierunkowe mocowe	\rightarrow	+	+				+
<i>Kryteria admitancyjne :</i>							
Admitancyjne	$Y_0 >$	+		+			
Konduktancyjne	$G_0 >$	+			+		
Konduktancyjne kierunkowe	G_{0k}	+			+		+
Susceptancyjne (kierunkowe)	$B_0 >$	+				+	+
Porównawczo - admitancyjne	YY_0	+		$ Y_{0p1} - Y_{0p2} > \Delta Y_{0n}$			
<i>Kryteria łączone :</i>							
Admitancyjno-konduktancyjne kierunkowe	YG_0	+		+	+		
Susceptancyjno-konduktancyjne kierunkowe	BG_{0k}	+			+		+
Y_{0p}, G_{0p}, B_{0p} – wartości admitancji, konduktancji i susceptancji linii wyznaczone z wartości napięcia U_{0p} oraz prądu I_{0p} , Y_{0p1}, Y_{0p2} – wartości Y_{0p} wynikające z pomiarów w dwóch różnych stanach zwarcia doziemnego (przed i po działaniu urządzeń wymuszających dodatkowe prądy zwarcia – np. przed i po działaniu AWSCz), <i>Kierunek</i> – oznacza realizację kryterium kierunkowego.							

Porównując tak zdefiniowane kryteria z warunkami określonymi przez sygnały U_{0p} i I_{0p} można badać ich przydatność w realizacji skutecznych zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach SN o różnych uziemieniach punktu neutralnego. Wieloletnie badania i zdobyte doświadczenia upoważniają do sformułowania odpowiednich ocen w tym zakresie. Przedstawiono je w tablicach 2, 3 i 4, w których zaprezentowano charakterystyki poszczególnych kryteriów wraz z rekomendacjami w zakresie ich wykorzystania. Tablica 2 dotyczy zabezpieczeń ziemnozwarciowych, które stosowano powszechnie w 70-tych i 80-tych latach ubiegłego wieku, a w tablicach 3 i 4 zaprezentowano zabezpieczenia admitancyjne. Oddzielnie opisano układy wykorzystujące w działaniu pojedyncze kryteria admitancyjne typu $Y_0 >$ lub $G_0 >$ (tablica 3) oraz rozwiązania, w których ostateczne decyzje wyjściowe podejmowane są na podstawie powiązań logicznych pojedynczych kryteriów lub w oparciu o wartość przyrostu admitancji wywołanej zadziałaniem urządzeń wymuszających dodatkowy prąd zwarcia (tablica 4).

Tablica 2. Ocena przydatności kryteriów podstawowych (tradycyjnych)

Kryterium	Warunki rozruchu	Charakterystyka i rekomendacje	
$I_0 >$ (nadprądowe zerowe)	$I_{0p} > I_{0n}$		Obszar płaszczyzny zespolonej oznaczony kolorem szarym określa prądy I_{0p} powodujące zadziałania zabezpieczenia. Kryterium to uzyskuje najlepsze warunki do działania w sieciach z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor. Poza tym są możliwości wykorzystania go w kablowych sieciach z punktem neutralnym izolowanym oraz w liniach o małym prądzie doziemnym w sieciach kompensowanych. Czułość działania silnie zależy od wartości rezystancji R_F .
\rightarrow (kierunkowe czynnomocowe)	$I_{0p} > I_{0n}$ i $U_{0p} > U_{0n}$		Obszar zadziałania wyznaczony wartością nastawczą leży w I i IV ćwiartce. Możliwości wykorzystania w sieciach z punktem neutralnym uziemionych rezystorem oraz w sieciach kompensowanych wyposażonych w urządzenia AWSCz. Czułość prądowa silnie zależy od wartości rezystancji R_F . Obwody wejściowe składowych zerowych nie wymagają fazowania.
\rightarrow (kierunkowe biernomocowe)	$I_{0p} > I_{0n}$ i $U_{0p} > U_{0n}$		Obszar zadziałania wyznaczony wartością nastawczą leży w I i II ćwiartce. Możliwości wykorzystania w sieciach o izolowanym punkcie neutralnym. Czułość prądowa silnie zależy od wartości rezystancji R_F . Obwody wejściowe składowych zerowych wymagają fazowania.

Tablica 3. Ocena przydatności kryteriów admitancyjnych

Kryterium	Warunki rozruchu	Charakterystyka i rekomendacje	
$Y_0 >$ (admitancyjne)	$ Y_{0p} > Y_{0n}$ i $U_{0p} > U_{0n}$		Obszar zadziałania na zewnątrz okręgu o promieniu odpowiadającym wartości admitancji nastawczej. Kryterium to uzyskuje najlepsze warunki do działania w sieciach uziemionych przez rezystor. Relatywnie duże możliwości wykorzystania go w sieciach z izolowanym punkcie neutralnym oraz w liniach o małym prądzie doziemnym w sieciach kompensowanych. Czułość działania członu admitancyjnego nie zależy od wartości rezystancji R_F . Obwody wejściowe składowych zerowych nie wymagają fazowania.
$G_0 >$ (konduktancyjne)	$ G_{0p} > G_{0n}$ i $U_{0p} > U_{0n}$		Rozruch kryterium następuje, gdy mierzona konduktancja znajdzie się w obszarze zakreskowanym. Kryterium reaguje na składową czynną prądu zwarcia. Szczególnie jest przydatne w sieciach kompensowanych wyposażonych w urządzenia AWSCz i w sieciach uziemionych rezystorem. Nie zachodzi potrzeba fazowania zacisków U_{0p} i I_{0p} . Nie uzyskuje warunków do działania w sieciach o izolowanym punkcie neutralnym. Obwody wejściowe składowych zerowych wymagają fazowania.
G_{0k} (konduktancyjne kierunkowe)	$G_{0p} > G_{0n}$ i $U_{0p} > U_{0n}$		Charakterystyka rozruchowa obejmuje obszary I-szej i IV-tej ćwiartki płaszczyzny admitancji. Kryterium to pełni taką samą rolę, jak zabezpieczenie kierunkowe czynnomocowe. Nie ma rozruchu prądowego, a czułość działania członu G_0 nie zależy od wartości rezystancji R_F . Obwody wejściowe składowych zerowych wymagają fazowania.
$B_0 >$ (susceptancyjne kierunkowe)	$B_{0p} > B_{0n}$ i $U_{0p} > U_{0n}$		Obszar działania zabezpieczeń realizujących kryterium susceptancyjne obejmuje I-szą i II-gą ćwiartkę płaszczyzny admitancji rozruchowej. Jest to więc charakterystyka kierunkowa o działaniu podobnym do zabezpieczenia biernomocowego. Nie ma rozruchu prądowego, a czułość działania członu B_0 nie zależy od wartości rezystancji R_F . Obwody wejściowe składowych zerowych wymagają fazowania.

Tablica 4. Ocena przydatności zabezpieczeń o złożonych kryteriach admitancyjnych

Kryterium	Warunki rozruchu	Charakterystyka i rekomendacje	
BG _{0k}	$G_{0p} > G_{0n}$ lub $G_{0p} > G_{0n}$ zawsze $U_{0p} > U_{0n}$		Realizowane ono jest przez połączenie kryteriów G _{0k} i B _{0k} . Takie zabezpieczenia uzyskują dobre warunki do działania w liniach pracujących w sieciach o izolowanym punkcie neutralnym lub uziemionych przez rezystor. Jest więc to zabezpieczenie bardzo przydatne w typowych sieciach uziemionych przez rezystor, gdyż podczas normalnej pracy sieci o zachowaniu się zabezpieczenia decyduje kryterium G _{0k} , natomiast po wyłączeniu awaryjnym rezystora lub transformatora potrzeb własnych i przejściu sieci w stan pracy z izolowanym punktem neutralnym rolę decydenta przejmuje kryterium B _{0k} . Kryterium wymaga fazowania obwodów wejściowych U _{0p} i I _{0p} .
YG ₀	$Y_{0p} > Y_{0n}$ i $G_{0p} > G_{0n}$ zawsze $U_{0p} > U_{0n}$		Zabezpieczenie typu YG ₀ uzyskuje się przez połączenie kryterium modułu admitancji z kryterium konduktancyjnym. Uzyskuje się wtedy charakterystykę rozruchową przedstawioną na rysunku. Pozwala ona na prawidłową lokalizację linii doziemionych w sieciach SN o różnych sposobach łączenia punktu neutralnego z ziemią. Ma to istotne znaczenie podczas wzajemnego rezerwowania się sieci o odmiennych uziemieniach punktów neutralnych. Z analizy wartości rozruchowych wynika, że w sieciach skompensowanych wyposażonych w urządzenia AWSCz lub uziemionych rezystorem zawsze co najmniej jedno z kryteriów uzyska warunki do pobudzenia. Natomiast po przejściu sieci w układ pracy o izolowanym punkcie neutralnym linie mogą być skutecznie chronione przez kryteria Y ₀ >.
YY ₀ (admitancyjno-porównawcze)	$ Y_{0p1} - Y_{0p2} > \Delta Y_n$ i $U_{0p} > U_{0n}$		Kryterium jego działania opiera się na przyroście admitancji zerowej mierzony w linii doziemionej po załączeniu urządzeń wymuszających dodatkowy prąd zwarcia z ziemią. Dla stwierdzenia przyrostu admitancji należy w czasie doziemienia mierzyć prądy I _{0p} i napięcie U _{0p} przed oraz po załączeniu urządzeń wymuszających oraz obliczyć różnicę admitancji doziemnej dla tych dwóch stanów. Kryterium to wykazuje wysoką czułość w wykrywaniu zwarć o dużej rezystancjach R _F . Jest szczególnie dedykowane dla sieci wyposażonych w urządzenia wymuszające dodatkowy prąd doziemienia (np. AWSCz lub AWSB).

5. Zakończenie

Z przedstawionych kryteriów zabezpieczeń ziemnozwarciowych znaczną liczbę stanowią obecnie te, które wykorzystują w działaniu admitancję obwodów linii dla składowych zerowych. Ocenia się, że do połowy roku 2004 zainstalowano ponad 10 000 takich zabezpieczeń wykonanych w technice analogowej lub w postaci systemów cyfrowych. Dotychczasowe doświadczenia z ich pracy są pozytywne. W wielu przypadkach zaobserwowano znaczny wzrost wskaźnika efektywności wykrywania linii doziemionych (często z 50% na 90% lub 95%). Ten wyraźny wzrost efektywności dotyczy zabezpieczeń pracujących w sieciach o punkcie neutralnym uziemionym przez dławik kompensujący. W sieciach tych stwierdza się wyraźne zwiększenie obszarów wykrywanych rezystancji przejścia. Przy rozruchowym progu napięciowym na poziomie odpowiadającym 10-15% napięcia fazowego stwierdzano działanie zabezpieczeń przy rezystancjach przejścia o wartościach przekraczających nawet 2500 Ω. Jest rzeczą oczywistą, że zakres wykrywanych rezystancji jest szczególnie wysoki w sieciach o małym rozstrojeniu kompensacji ziemnozwarciowej (np. K<1,1).

W konstrukcjach zabezpieczeń admitancyjnych sygnały decyzyjne można poddawać silnemu uśrednianiu, co sprzyja uzyskiwaniu warunków do ich zadziałania również podczas zwarć niestabilnych o łuku przerywanym. Badania wykazały, że chwilowe przerwy w przepływie prądu doziemienia w granicach 20 a nawet 40 milisekund nie muszą powodować utraty pobudzenia zabezpieczeń.

Zabezpieczenia admitancyjne znajdują również szerokie zastosowanie w sieciach z punktem neutralnym uziemionym rezystorem [7]. Przy stosowaniu napięciowego progu rozruchowego na

poziomie 5% lub 10% znamionowego napięcia fazowego sieci zakres wykrywanych rezystancji przejścia podczas doziemień jest znacznie większy niż w przypadku zabezpieczeń nadprądowych. Przeprowadzone przez autorów obliczenia dla przykładowej sieci 15kV, o prądzie pojemnościowym 100 A i pracującej z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor 80 Ω wykazały, że graniczne rezystancje w miejscu zwarcia z ziemią wykrywane przez człon Y_0 są takie same we wszystkich liniach i wynoszą około 1000 Ω (dla $U_{0n} = 5\% U_{ph}$) lub 500 Ω (dla $I_{0n} = 10\% U_{ph}$). Skuteczność działania zabezpieczeń prądowych I_0 w tych warunkach będzie znacznie mniejsza i dla linii o relatywnie dużych wartościach prądu pojemnościowego mogą tracić pobudzenie już w przypadkach zwarć metalicznych o rezystancji przejścia na poziomie kilkudziesięciu omów.

Dodatkową zaletą zabezpieczeń admitancyjnych jest ich zdolność do działania w warunkach uszkodzonego lub wyłączonego rezystora. W tym przypadku w członach Y_0 następuje nawet zwiększenie obszarów wykrywanych zwarć. Natomiast człony I_0 obniżają swój zakres działania i w liniach o dużych prądach pojemnościowych mogą całkowicie utracić zdolność do prawidłowego reagowania .

LITERATURA

1. Hoppel W., Lorenc J., Liszyński Z., Sekulski R.: Zespołom CZIF wyrosła nowa generacja. Automatyka Elektroenergetyczna, nr 3, 2000 r.
2. Lorenc J.: Admitancyjne kryteria działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Automatyka Elektroenergetyczna, nr 2, 1994 r.
3. Lorenc J.: Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe kompensowanych sieci średnich napięć. Politechnika Poznańska , Rozprawy nr 272, Poznań, 1992 r.
4. Lorenc J.: Skuteczność admitancyjnych zabezpieczeń ziemnozwarciowych w różnych układach pracy sieci średnich napięć. II Ogólnopolska Konferencja Techniczna " ENERGETYKA 2000", Stare Jabłonki, wrzesień 1998 r.
5. Lorenc J.: Sposób i układ selektywnego zabezpieczenia od zwarć z ziemią dla linii średnich napięć. Patent PL nr 173980 , data opublikowania: 29 maj 1998 r.
6. Lorenc J., Andruszkiewicz J., Kordus A., Marszałkiewicz K.: Admittance criteria of integrated protection system used in MV lines. VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, tom I, Gdańsk, 1995 r.
7. Lorenc J., Hoppel W.: Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe w sieciach uziemionych przez rezystor. Automatyka Elektroenergetyczna, nr 2-3, 1996 r.
8. Lorenc J., Marszałkiewicz K., Andruszkiewicz J.: Admittance criteria for earth fault detection in substation automation systems in polish distrybution power networks. CIRED, Birmingham, June 1997, Publication IEE No. 438, 1997 r.
9. Rakowska A., Lorenc J, Hoppel W.: Disturbances in polish 15 kV network by ground short-circuits. 17th International Conference Electricity Distribution – CIRED, Barcelona, 2003 r.