# POLITECHNIKA POZNAŃSKA WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI



# **ROZPRAWA DOKTORSKA**

## mgr inż. Bartosz Olejnik

# Skuteczność sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego podczas wysokooporowych zwarć doziemnych w sieci średniego napięcia

Promotor: prof. dr hab. inż. Józef Lorenc

Promotor pomocniczy: dr inż. Bogdan Staszak





Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego 1 grudnia 2014 r. – 30 września 2015 r.

Autor rozprawy doktorskiej jest stypendystą w ramach projektu pt.: "Wsparcie stypendialne dla doktorantów na kierunkach uznanych za strategiczne z punktu widzenia rozwoju Wielkopolski", Poddziałanie 8.2.2 Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Beeing the author of the Ph. thesis, I declare that I am a scholarship holder within the projest "Scholarship support for Ph.D. students specializing in majors strategic for Wielkopolska's development", Sub-measure 8.2.2 Human Capital Operational Programme, co-financed by European Union under the European Social Fund.

## Spis treści

WYKAZ V	VAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ6
STRESZC	ZENIE9
ABSTRAC	Т10
1. WPRC	WADZENIE11
2. SIEĆ Ś	REDNIEGO NAPIĘCIA14
2.1. In	formacje ogólne14
2.2. Sp	osoby pracy punktu neutralnego sieci SN15
2.3. St	ruktura sieci średniego napięcia w Polsce19
2.4. Av	varyjność sieci średniego napięcia w Polsce21
3. SKUT	ECZNOŚĆ DZIAŁANIA SYGNALIZATORÓW PRZEPŁYWU PRĄDU
ZWARCIO	WEGO W SIECIACH SN PODCZAS ZAKŁÓCEŃ DOZIEMNYCH26
3.1. Zv	varcie doziemne jako zjawisko fizyczne26
3.2. OI	oliczanie wartości prądów zwarć doziemnych w sieci średniego napięcia27
3.3. Sy	gnalizatory przepływu prądu zwarciowego29
4. KRYT	ERIA DETEKCJI ZWARĆ DOZIEMNYCH W SIECI ŚREDNIEGO
NAPIĘCIA	
4.1. W	prowadzenie34
4.2. Sc	entralizowane metody detekcji zwarć doziemnych35
4.2.1.	Metody impedancyjne
4.2.2.	Metody bazujące na sztucznej inteligencji
4.2.3.	Metody falowe
4.3. Zo	ecentralizowane metody detekcji zwarć doziemnych42
4.3.1.	Uwagi ogólne42
4.3.2. elektry	Lokalizacja zwarć z wykorzystaniem inteligentnych liczników energii
4.3.3.	Sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego44

4.3.4. Metody bazujące na dodatkowych sygnałach wprowadzanych do sieci53				
4.4. Wnioski do rozdziału55				
5. CEL, TEZA I ZAKRES ROZPRAWY				
6. UPROSZCZONE METODY WYZNACZANIA SKŁADOWEJ ZEROWEJ				
NAPIĘCIA				
6.1. Informacje ogólne59				
6.2. Metoda pomiaru U <sub>0</sub> z wykorzystaniem jednego napięcia fazy względem ziemi 63				
6.2.1. Podstawa teoretyczna63				
6.2.2. Algorytm wyznaczania składowej zerowej napięcia na podstawie jednego				
wektora napięcia fazy względem ziemi67				
6.2.3. Badania laboratoryjne algorytmu69				
6.3. Metoda wyznaczania $U_0$ z wykorzystaniem jednego napięcia fazy względem ziemi				
oraz napięcia międzyfazowego78				
6.3.1. Uwagi ogólne i podstawa teoretyczna				
6.3.2. Badania laboratoryjne81				
6.4. Wnioski do rozdziału88				
7. KRYTERIA ZEROWOPRĄDOWE Z FUNKCJĄ ADAPTACYJNĄ				
7.1. Skuteczność kryteriów zerowoprądowych89				
7.1.1. Uwagi ogólne				
7.1.2. Sieć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor				
7.1.3. Sieć skompensowana z AWSCz92				
7.2. Kryterium adaptacyjne zerowoprądowe dla sieci skompensowanej				
7.3. Kryteria adaptacyjne zerowoprądowe dla sieci z punktem neutralnym				
uziemionym przez rezystor100				
7.3.1. Kryterium zerowoprądowe adaptacyjne wykorzystujące do adaptacji nastawy				
zmienność napięć faz względem ziemi po wystąpieniu doziemienia103				
7.3.2. Kryterium zerowoprądowe adaptacyjne wykorzystujące do adaptacji nastawy				
wartość składowej zerowej napięcia w sieci107				

7.4.	Wnioski do rozdziału109
8. KRY	TERIUM ADMITANCYJNE DO DETEKCJI ZWARĆ DOZIEMNYCH111
9. BAD	ANIA SYMULACYJNE KRYTERIÓW ADAPTACYJNYCH116
9.1.	Uwagi ogólne116
<b>9.2.</b> I	Model symulacyjny116
9.3. ]	Badania symulacyjne kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego dla sieci
skomp	ensowanej121
<b>9.4.</b> ]	Badania symulacyjne kryteriów zerowoprądowych adaptacyjnych dla sieci z
punkte	em neutralnym uziemionym przez rezystor126
9.5.	Wnioski do rozdziału131
10. BAD	ANIA SIECIOWE WYBRANYCH METOD I KRYTERIÓW133
10.1.	Uwagi ogólne133
10.2.	Badania sieciowe algorytmu i metody do wyznaczania składowej zerowej
napięci	ia na podstawie pomiaru jednego napięcia fazy względem ziemi135
10.3.	Badania sieciowe kryterium admitancyjnego do detekcji zwarć doziemnych .138
10.4.	Wnioski do rozdziału143
11. POD	SUMOWANIE I WNIOSKI144
BIBLIO	GRAFIA147

а	_	względny udział pojemnościowego prądu zwarcia doziemnego linii w prądzie pojemnościowym całej sieci
<u>a</u>	—	operator obrotu fazora o kąt $\frac{2}{3}\pi$
$B_0$	_	susceptancja zerowa
С	_	pojemność jednej fazy względem ziemi
$C_{\rm s}$	_	zastępcza pojemność doziemna sieci
$d_0$	—	współczynnik tłumienia sieci
$f_{\rm p}$	_	częstotliwość próbkowania
$G_0$	_	konduktancja zerowa
$G_{0nast}$	_	nastawa członu konduktancyjnego danego kryterium ziemnozwarciowego
$\underline{I}_{0}^{(1)}$	_	pierwsza harmoniczna fazora składowej zerowej prądu
$\underline{I}_0^{(n)}$	—	n-ta harmoniczna fazora składowej zerowej prądu
I <sub>0nast</sub>	—	nastawa członu nadprądowego zerowego danego kryterium ziemnozwarciowego
I <sub>AWSCz</sub>	—	wartość prąd wymuszany podczas zwarcia doziemnego przez układ automatyki wymuszania składowej czynnej
$I_{\rm CLi}$	_	pojemnościowy prąd ziemnozwarciowy i-tego odcinka linii
I <sub>CS</sub>	_	pojemnościowy prąd zwarcia jednofazowego z ziemią galwanicznie połączonej sieci SN
I	_	nrad w miejscu wystanienia zwarcja doziemnego (wielkość zespolona)
$I_{1-1}$		wartość skuteczna pradu w miejscu wystapienia zwarcja doziemnego
$I_{\rm kZ}$	_	prąd ziemnozwarciowy przepływający przez dany punkt sieci, np. miejsce zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego (wielkość
7		zespolona)
I <sub>kZ</sub>	_	wartose skuteczna prądu ziemnozwarciowego przepływającego przez dany punkt sieci, np. miejsce zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego
$I_{ m L}$	_	suma prądów indukcyjnych urządzeń kompensujących podłączonych w punkcie neutralnym sieci
IR	_	znamionowy prad ziemnozwarciowy rezystora w punkcie neutralnym sieci
K	_	stopień zestroienia kompensacji ziemnozwarcjowej
ka	_	współczynnik adaptacji
$k_{\rm b}$	_	współczynnik bezpieczeństwa
kc	_	współczynnik czułości
$k_{\rm p}$	_	współczynnik powrotu
$L_{\rm k}$	_	indukcyjność urządzeń kompensujących podłączonych w punkcie neutralnym sieci
Ν	_	liczba obsługiwanych przez operatora odbiorców energii elektrycznej
Nnd	_	liczba odbiorców narażona na skutki przerwy długiej
$n_{\rm pd}$	_	łaczna liczba wszystkich przerw długich u odbiorców
n <sub>pk</sub>		
r	_	aczna liczba wszystkich przerw krotkich u odbiorcow

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

<b>R</b> <sub>Fmax</sub>	—	maksymalna wykrywana przez kryterium ziemnozwarciowe rezystancja						
		przejścia między przewodem fazowym a ziemią						
S	_	współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej						
<i>t</i> <sub>pd</sub>	_	czas trwania przerwy długiej						
$U_0$	—	wartość skuteczna składowej zerowej napięcia w sieci						
$\underline{U}_0$	—	wartość zespolona składowej zerowej napięcia w sieci						
<u>U</u> <sub>0</sub> "	—	fazor składowej zerowej napięcia z uwzględnieniem współczynnika przetwarzania przetwornika pomiarowego						
$U_{0a}$	_	wartość skuteczna składowej zerowej napięcia wyznaczona z użyciem algorytmu danej metody						
$U_{0\mathrm{b}}$	—	wartość skuteczna składowej zerowej napięcia wyznaczona z wykorzystaniem wirtualnego instrumentu pomierowego						
Uomm	_	wituamego instrumentu poimarowego maksymalna wartość składowci zerowci naniocia na stronie wtórnej filtry						
Uonast	_	nastawa członu zerowonaniecjowego danego kryterium zjemnozwarcjowego						
Uon	_	wartość skuteczna składowej zerowej nanjecja rejestrowana przez rejestrator						
$U_{0w}$	_	wartość skuteczna składowej zerowej napięcia mierzona z wykorzystaniem						
C 0w		woltomierza						
$U_1$	_	wartość skuteczna składowej zgodnej napięcia w sieci						
$\underline{U}_1$	_	wartość zespolona składowej zgodnej napięcia w sieci						
$U_2$	_	wartość skuteczna składowej przeciwnej napięcia w sieci						
$\underline{U}_2$	_	wartość zespolona składowej przeciwnej napięcia w sieci						
$\underline{U}_{\mathrm{L}}$	_	napięcie fazy względem ziemi (wielkość zespolona)						
$U_{ m L}$	_	wartość skuteczna napięcia fazy względem ziemi						
$U_{\rm L}$ '	_	napięcie fazy względem ziemi po stronie wtórnej przetwornika pomiarowego						
$U_{\text{L-L}}$ '	_	napięcie międzyfazowe po stronie wtórnej przetwornika pomiarowego						
<u>U</u> L-Lp	_	napięcie międzyfazowe mierzone przez układ pomiarowy (wielkość zespolona)						
<u>U</u> Lp	_	napięcie fazy względem ziemi mierzone przez układ pomiarowy (wielkość zespolona)						
$U_{\rm L1}^0$	_	napięcie fazy L1 względem ziemi przed wystąpieniem zakłócenia doziemnego						
$\overline{U}_{L1k}$	_	napięcie fazy L1 względem ziemi po wystąpieniu zakłócenia doziemnego						
$U_{\rm L2}^0$	_	napięcie fazy L2 względem ziemi przed wystąpieniem zakłócenia doziemnego						
$\overline{U}_{L2k}$	_	napięcie fazy L2 względem ziemi po wystąpieniu zakłócenia doziemnego						
$\overline{U}_{\rm L3}^0$	_	napięcie fazy L3 względem ziemi przed wystąpieniem zakłócenia doziemnego						
$U_{\rm L3k}$	_	napięcie fazy L3 względem ziemi po wystąpieniu zakłócenia doziemnego						
$\underline{Y}_0^{(n)}$	_	n-ta harmoniczna wektora admitancji zerowej						
Y <sub>0nast</sub>	_	nastawa kryterium admitancyjnego						
<u>Z</u> 0	—	impedancja obwodu zwarciowego dla składowej zerowej						
$\underline{Z}_1$	—	impedancja obwodu zwarciowego dla składowej zgodnej						
$\underline{Z}_2$	_	impedancja obwodu zwarciowego dla składowej przeciwnej						
<u>Z</u> <sub>F</sub>	—	impedancja przejścia między przewodem fazowym a ziemią w miejscu zwarcia (wielkość zespolona)						
<u></u>	_	współczynnik ziemnozwarciowy (wielkość zespolona)						
β	_	współczynnik ziemnozwarciowy (moduł wielkości zespolonej)						

$\Delta I_{0\mu}$	_	błąd prądowy	filtru	składowej	zerowej	prądu
~ p-				5	5	ιι

 $\Delta U_{0a}$  – błąd bezwzględny wyznaczania wartości skutecznej składowej zerowej napięcia z użyciem algorytmu danej metody

 $\Delta Y_{0\mu}$  – admitancja wynikająca z błędów pomiarowych lub szumu pomiarowego

 $\delta U_{0a}$  – błąd względny wyznaczania wartości skutecznej składowej zerowej napięcia z użyciem algorytmu danej metody

 $\omega$  – pulsacja napięcia sieciowego

#### STRESZCZENIE

Rozprawa doktorska składa się z jedenastu rozdziałów oraz spisu literatury. Rozprawa liczy łącznie 152 strony.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi wprowadzenie w problematykę pracy, którą jest skuteczność sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego podczas wysokooporowych zakłóceń doziemnych w sieci średniego napięcia.

W rozdziale drugim przedstawione są ogólne informacje związane z budową i eksploatacją sieci średniego napięcia, ze szczególnym uwzględnieniem realiów krajowych. Ważną częścią rozdziału są informacje o awaryjności sieci średniego napięcia w Polsce.

Rozdział trzeci opisuje zwarcie doziemne jako zjawisko fizyczne, podaje metodologię podstawowych obliczeń ziemnozwarciowych oraz szczegółowo wprowadza w tematykę sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego.

W rozdziale czwartym prezentowane są opisywane w literaturze światowej kryteria i metody detekcji zwarć doziemnych w sieci średniego napięcia.

W kolejnym, piątym rozdziale przedstawiono cele oraz tezy rozprawy doktorskiej. Opisano również zakres pracy dotyczący wykonywanych badań i analiz.

W rozdziale szóstym skupiono się na przedstawieniu dwóch uproszczonych metod wyznaczania składowej zerowej napięcia w sieci średniego napięcia. W rozdziale przedstawione są rozważania teoretyczne związane z tymi metodami i wyniki badań laboratoryjnych.

Kryteria zerowoprądowe z funkcją adaptacji do detekcji zwarć doziemnych w sieci średniego napięcia z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor oraz dławik gaszący zaprezentowane zostały w rozdziale siódmym.

Rozdział ósmy poświęcono na analizę skuteczności kryterium admitancyjnego, które jako źródło informacji o składowej zerowej napięcia wykorzystuje uproszczone metody przedstawione w rozdziale szóstym.

Ważną częścią rozprawy jest rozdział dziewiąty. Przedstawiono w nim wyniki badań symulacyjnych kryteriów zerowoprądowych z funkcją adaptacyjną.

Rozdział dziesiąty związany jest w całości z badaniami sieciowymi wybranych metod i kryteriów. Przedstawiono wyniki eksperymentów przeprowadzonych w rzeczywistej sieci średniego napięcia w marcu 2018 roku.

Rozprawę zamyka rozdział jedenasty, podsumowujący uzyskane w toku realizacji rozprawy rezultaty prac w odniesieniu do podstawionych wcześniej tez.

## ABSTRACT

The doctoral dissertation is composed of eleven chapters and compiliation of literature. The dissertation consists of 152 pages.

The first chapter is an introduction to the problems of dissertation, which is the efficiency of fault current passage indicators during high-resistance earth faults in the medium voltage network.

The second chapter presents general information related to the construction and operation of medium voltage networks, with particular emphasis on national realities. An important part of the chapter is information on the failure frequency of medium voltage networks in Poland.

Chapter three describes an earth fault as a physical phenomenon, provides a methodology for basic earth fault calculations and introduces in detail the earth fault current indicators.

The fourth chapter presents the criteria and methods for earth fault detection in the medium voltage network described in the world literature.

The fifth chapter presents the objectives and theses of the doctoral dissertation. The scope of work related to tests and analyzes was described.

The sixth chapter focuses on presenting two simplified methods for determining the zero voltage component in a medium voltage network. The chapter presents theoretical considerations related to these methods and the results of laboratory tests.

Zero-current criteria with the function of adaptation to the detection of earth faults in the medium voltage network with a resistor or arc-suppression coil in neutral point are presented in chapter seven.

The eighth chapter is devoted to the analysis of the efficiency of the admittance criterion, which uses simplified methods presented in the sixth chapter as a source of information about the zero voltage component.

Chapter nine is an important part of the dissertation. It presents the results of simulation tests of the effectiveness of zero-current criteria with an adaptive function.

Chapter ten is entirely related to research in the real network of selected methods and criteria. The results of experiments carried out in the medium voltage network in March 2018 are presented.

The dissertation closes with the eleventh chapter, summarizing the results of the work obtained in the course of the dissertation in relation to the theses.

### **1. WPROWADZENIE**

Sieć średniego napięcia to jeden z filarów systemu przesyłu i dystrybucji energii elektrycznej. Jej głównym zadaniem jest rozdzielenie energii, dostarczenie jej bezpośrednio do odbiorców przemysłowych lub do głównych punktów zasilania, w których, dzięki zainstalowanym tam transformatorom, parametry energii dopasowywane są do wymagań konsumentów indywidualnych. Do sieci średniego napięcia (SN) mogą być także dołączane jednostki wytwórcze, szczególnie opierające się na odnawialnych źródłach energii. Komfort odbiorców – użytkowników jest zależny bezpośrednio od jakości pracy sieci średniego napięcia, a ta z kolei – między innymi od zainstalowanych w niej urządzeń. Eksploatacją i zarządzaniem majątkiem sieci średniego napięcia zajmują się w warunkach krajowych operatorzy sieci dystrybucyjnej (OSD).

Sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego, określane także w literaturze mianem wskaźników przepływu prądu zwarciowego (lub czasem też sensorami zwarciowymi) są urządzeniami stosunkowo nowymi. Ich podstawowym zadaniem jest stwierdzenie, czy przez odcinek linii z zainstalowanym sygnalizatorem przepływa prąd zwarciowy. Inaczej mówiąc – jeśli za (patrząc od strony zasilania) miejscem zainstalowania urządzenia dojdzie do awarii w postaci doziemienia lub zwarcia międzyfazowego, sprawnie działający sygnalizator takie uszkodzenie powinien wykryć.

Wyróżnia się dwa główne typy sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego – przeznaczone do pracy w liniach kablowych lub liniach napowietrznych. W obu przypadkach główna różnica koncentruje się wokół członu pomiarowego oraz sygnalizacyjnego. Kryteria decyzyjne dla obu typów wskaźników są podobne, tak samo jak ewentualne zadania i funkcje członu komunikacyjnego.

Z uwagi na wszystkie powyżej wymienione cechy należy przypuszczać, że skuteczność sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego zainstalowanych w liniach kablowych i napowietrznych będzie różna. Praktyka wskazuje, że urządzenia pracujące w pierwszym z wymienionych przypadków spełniają pokładane w nich nadzieje. Znacznie niższą jakość pracy można zauważyć w liniach napowietrznych, gdzie istnieją realne trudności z pomiarem wielkości kryterialnych. Z tego powodu w niniejszej rozprawie skupiono się głównie na problemie skuteczności sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego w liniach napowietrznych, proponując także metody jej poprawy.

Niniejsza rozprawa składa się z 11 rozdziałów oraz zestawienia literatury i liczy łącznie 152 strony.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi niniejsze wprowadzenie.

W rozdziale drugim przedstawione są ogólne informacje związane z budową i eksploatacją sieci średniego napięcia, ze szczególnym uwzględnieniem realiów krajowych. Charakteryzowane są sposoby pracy punktu neutralnego, które mają istotny wpływ na zjawiska ziemnozwarciowe. Ważną częścią rozdziału są informacje o awaryjności sieci średniego napięcia w Polsce.

Rozdział trzeci opisuje zwarcie doziemne jako zjawisko fizyczne, podaje metodologię podstawowych obliczeń ziemnozwarciowych oraz szczegółowo wprowadza w tematykę sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego.

Rozbudowany rozdział czwarty prezentuje opisywane w literaturze światowej kryteria detekcji zwarć doziemnych w sieci średniego napięcia, wśród nich także te, które związane są ze stosowaniem w sieci sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego.

W kolejnym, piątym rozdziale przedstawiono cele oraz tezy rozprawy doktorskiej. Opisano również zakres pracy dotyczący wykonywanych badań i analiz.

W rozdziale szóstym skupiono się na przedstawieniu dwóch nowych metod wyznaczania składowej zerowej napięcia (tak wartości zespolonej jak i modułu) w sieci średniego napięcia z wykorzystaniem jednego napięcia fazy względem ziemi, z opcjonalnym wzbogaceniem metod o pomiar napięcia międzyfazowego. W rozdziale przedstawione są rozważania teoretyczne związane z tymi metodami i wyniki badań laboratoryjnych z wykorzystaniem wirtualnych instrumentów pomiarowych i rzeczywistych urządzeń zabezpieczeniowych.

Kryteria zerowoprądowe adaptacyjne do detekcji zwarć doziemnych w sieci średniego napięcia zaprezentowane zostały w rozdziale siódmym. W pierwszym podrozdziale przedstawiana jest skuteczność klasycznych kryteriów zerowoprądowych a w dalszych podrozdziałach – nowe kryteria dla sieci skompensowanej oraz z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor.

Rozdział ósmy poświęcono na analizę skuteczności kryterium admitancyjnego, które jako źródło informacji o składowej zerowej napięcia wykorzystuje metody przedstawione w rozdziale szóstym.

Ważną częścią rozprawy jest rozdział 9. Przedstawiono w nim wyniki badań symulacyjnych kryteriów zerowoprądowych adaptacyjnych, przy czym model sieci średniego napięcia stworzony został w środowisku PSCAD.

Rozdział dziesiąty związany jest w całości z badaniami sieciowymi algorytmu do wyznaczania wartości składowej zerowej napięcia z wykorzystaniem jednego napięcia fazy względem ziemi oraz algorytmu admitancyjnego. Przedstawiono wyniki eksperymentów przeprowadzonych w rzeczywistej sieci średniego napięcia w marcu 2018 roku.

Rozprawę zamyka rozdział jedenasty, podsumowujący uzyskane w toku realizacji rozprawy rezultaty prac w odniesieniu do podstawionych wcześniej tez.

### 2. SIEĆ ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

#### 2.1. INFORMACJE OGÓLNE

Na sieć średniego napięcia składają się wszelkie urządzenia służące do dystrybucji energii elektrycznej. Są to transformatory, dławiki, szyny zbiorcze, łączniki oraz linie, tak napowietrzne jak i kablowe. Wszystkie one mają napięcie wyższe od 1 kV. Górna granica średniego napięcia nie jest jednoznacznie ustalona – wynosi od 30 do 60 kV, a nawet 100 kV i jest zależna od rozpatrywanej sytuacji [32, 45, 78, 79, 80, 84]. Dla automatyki zabezpieczeniowej przyjmuje się, że w sieci średniego napięcia jego wartość jest z przedziału od 1 do 60 kV, co związane jest z zagadnieniem sposobu pracy punktu neutralnego sieci [32].

Struktury sieci SN spotykane w praktyce są zwykle zależne od powierzchniowej gęstości obciążenia sieci oraz od wymagań, które sieć powinna spełnić. Najczęściej jest to minimalizacja kosztów budowy, zapewnienie maksymalnego bezpieczeństwa dostaw energii czy łatwości prowadzenia eksploatacji. Wyróżnia się dwie główne struktury: otwartą i zamkniętą [45].

Sieć otwarta to taka, w której przepływy zależą przede wszystkim od wartości poboru energii elektrycznej prze odbiorców. Nie ma ona oczek, a z węzła do węzła istnieje tylko jedna droga przepływu prądu. Typowym przykładem sieci otwartej są: układ promieniowy (rys. 2.1) oraz układ magistralny (rys. 2.2). Cechą wszystkich układów otwartych jest brak rezerwowania odbiorów. Oznacza to, że uszkodzenie sieci w dowolnym miejscu powoduje zanik dostawy energii do części odbiorów aż do czasu jego usunięcia [45]. W skrajnym przypadku, gdy awaria będzie miała miejsce bardzo blisko punktu generacji, zasilania pozbawieni zostaną wszyscy odbiorcy. Układy o strukturze otwartej stosowane są przede wszystkim w terenie słabo zurbanizowanym i zwykle są tworzone z linii napowietrznych. W tego typu sytuacjach usunięcie uszkodzeń jest proste, natomiast straty spowodowane nieciągłością zasilania – przeciętnie niewielkie. Należy jednak zauważyć, że w tym przypadku szczególnie istotny jest problem szybkiej i precyzyjnej lokalizacji miejsca awarii.



Rys. 2.1. Układ promieniowy z pojedynczym odbiorem na końcu linii

Rys. 2.2. Układ magistralny

W sieci zamkniętej istnieje możliwość zasilania każdego odbioru z co najmniej dwóch niezależnych źródeł. Korzystną jej cechą jest fakt rezerwowania zasilania odbiorców, dzięki czemu spełnia się podstawowe wymaganie stawiane sieci rozdzielczej – pewność dostawy energii elektrycznej. Do podstawowych układów sieci o strukturze zamkniętej zalicza się:

- a) układ pętlowy (nazywany także pętlicowym, rys. 2.3, rys. 2.4),
- b) układ kłosowy,
- c) układ wrzecionowy,
- d) układ dwuliniowy zamknięty (nazywany też dwumagistralnym),
- e) układ kratowy [45].



Rys. 2.3. Układ pętlowy przy założeniu zasilania z dwóch szyn zbiorczych jednego GPZ (LS – łącznik szyn)



Stosowane są także inne układy, często będące połączeniem bądź modyfikacją wyżej wymienionych.

#### 2.2. Sposoby pracy punktu neutralnego sieci SN

Z punktu widzenia zjawisk zachodzących podczas normalnej i awaryjnej pracy sieci średniego napięcia największe znaczenie ma sposób połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią. Ogólnie – sieci o napięciu nominalnym niższym niż 60 kV pracują w warunkach krajowych z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym [32]. W tego typu sytuacjach punkt neutralny sieci SN może być:

- a) uziemiony przez impedancję (zwykle rezystancję),
- b) uziemiony przez dławik, prawie zawsze z układem automatycznego wymuszania składowej czynnej AWSCz,
- c) izolowany.

Wymienione powyżej sposoby uziemienia punktu neutralnego są najczęściej spotykane. Poza nimi można także spotkać nieliczne sieci z punktem neutralnym:

- a) uziemionym przez układ równoległy dławika i rezystora,
- b) z tzw. dekompensacją.

Przez sieć z punktem neutralnym uziemionym przez impedancję [45, 65] rozumie się taką sieć, w której składowa czynna prądu ziemnozwarciowego wymuszona przez urządzenia w punkcie neutralnym (zwykle: odpowiednio dobrany rezystor) jest równa lub większa od składowej pojemnościowej. W praktyce wartość prądu czynnego przekracza zwykle 100 A, zapewniając tym samym dostateczne tłumienie przepięć ziemnozwarciowych [33].

Sieć z punktem neutralnym uziemionym dławik nazywana jest częściej siecią skompensowaną (rys. 2.5). Definicyjnie jest to sieć, w której co najmniej jeden punkt neutralny jest uziemiony za pośrednictwem urządzenia o indukcyjności przeznaczonej do przybliżonego skompensowania pojemności między przewodami liniowymi a ziemią w przypadku pojedynczego doziemienia [82]. Definicja podawana w [78] podaje, że sieć skompensowana to taka, w której przynajmniej jeden punkt neutralny transformatora lub transformatora uziemiającego jest uziemiony przez dławik gaszący, a łączna indukcyjność dławików gaszących jest zasadniczo dostrojona do pojemności doziemnej sieci. Dodatkowo norma [81] dodaje słowa "dla częstotliwości sieciowej".

Dzięki odpowiedniemu doborowi indukcyjności dławika wartość prądu zwarcia doziemnego jest przeciętnie na tyle niska, że możliwe jest samoistne wygaszenie tych zakłóceń, które podtrzymywane są przez łuk elektryczny. Jako urządzenia kompensujące współcześnie stosuje się przede wszystkim cewki Petersena, jednak historycznie były to także transformatory: Baucha oraz Reithofera [65, 93].

Stopień zestrojenia kompensacji definiuje się zależnością (2.1):

$$K = \frac{1}{3\omega^2 L_K C} \cong \frac{I_L}{I_{CS}}$$
(2.1)

gdzie:  $I_{\rm L}$  – suma prądów indukcyjnych urządzeń kompensujących podłączonych w punkcie neutralnym sieci,  $I_{\rm CS}$  – pojemnościowy prąd zwarcia jednofazowego z ziemią,  $\omega$  – pulsacja napięcia sieciowego,  $L_{\rm K}$  – indukcyjność urządzeń kompensujących podłączonych w punkcie neutralnym sieci, C – pojemność jednej fazy sieci względem ziemi [51]. Innym parametrem istotnym w przypadku opisywania właściwości sieci skompensowanej jest współczynnik rozstrojenia układu kompensacji (lub: współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej), który w Polsce opisywany jest zależnością:

$$s = K - 1 = \frac{1}{3\omega^2 L_K C} - 1 \cong \frac{I_L - I_{CS}}{I_{CS}}$$
(2.2)

Indukcyjność urządzenia kompensacyjnego, a tym samym wartość prądu indukcyjnego  $I_L$  powinna być tak dobrana, aby wartość współczynnika rozstrojenia układu kompensacji *s* mieściła się w przedziale  $s \in \langle 5;15 \rangle \%$  [33, 65, 102]. Uzyskanie takiej wartości opisywanego współczynnika jest możliwe na drodze regulacji dławika gaszącego. Współcześnie coraz częściej stosowana jest tzw. regulacja nadążna tych urządzeń. W takiej sytuacji cyfrowy sterownik dba o to, aby, niezależnie od konfiguracji sieci, wartość współczynnika *s* była równa zadanej wartości.

Współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej może być także definiowany jako:

$$s = 1 - K \cong \frac{I_{CS} - I_L}{I_{CS}} \tag{2.3}$$

jednak w takiej formie pojawia się on przede wszystkim w literaturze zagranicznej. W niniejszej rozprawie obowiązywać będzie definicja współczynnika *s* według wzoru (2.2).



Rys. 2.5. Sieć skompensowana z AWSCz

Z uwagi na fakt, że w sieciach skompensowanych wartość prądu zwarcia jednofazowego jest niewielka, w celu poprawy warunków pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych stosuje się automatykę wymuszania składowej czynnej – AWSCz (rys. 2.5). Działanie tego układu polega na tym, że w chwili wystąpienia doziemienia powiększana jest wartość prądu zwarciowego o prąd, który płynie przez rezystor, który tymczasowo podłącza się w punkcie neutralnym.

W eksploatacji pozostają także układy z punktem neutralnym uziemionym przez dławik z automatyką wymuszania składowej biernej AWSB (rys. 2.6), która wspomaga działanie wybranych typów zabezpieczeń od skutków zwarć doziemnych.



Rys. 2.6. Sieć z punktem neutralnym uziemionym przez impedancję z automatyką AWSB

Sieć z punktem neutralnym izolowanym to taka sieć, w której punkt neutralny nie jest uziemiony w sposób zamierzony. Wyjątek stanowią tutaj połączenia z ziemią o dużej impedancji służące celom zabezpieczeniowym lub pomiarowym [33, 82]. Ten rodzaj uziemienia punktu neutralnego stosowany jest zwykle w zakładach przemysłowych zasilanych konsumentowymi liniami SN, popularny jest także w górnictwie. W krajowej energetyce zawodowej jest obecnie rzadko spotykany. Jego występowanie można zauważyć w sieciach na południu Polski, zwłaszcza w Małopolsce, gdzie takie rozwiązania wynikają głównie z uwarunkowań historycznych [33]. Układy potrzeb własnych elektrowni także pracują z izolowanym punktem neutralnym. Mimo wszystko wyraźnie widoczne jest odchodzenie od tego typu sieci i korzystanie z punktów neutralnym pośrednio uziemionych.



Rys. 2.7. Sieć z izolowanym punktem neutralnym

Sieci z punktem neutralnym uziemionym przez układ równoległy dławika i rezystora w Polsce są rzadkością. Ciekawostką są sieci z tzw. dekompensacją, które w układzie normalnym pracują z punktem neutralnym uziemionym przez dławik, a po wykryciu zwarcia wyłącza się transformator uziemiający i przechodzi do pracy z izolowanym punktem neutralnym.Takie postępowanie ma ułatwiać pracę i zwiększać skuteczność zabezpieczeń ziemnozwarciowych [30]. Współcześnie jest to rozwiążanie wycofywane i można je spotkać tylko w kilku sieciach na Górnym Śląsku.

#### 2.3. Struktura sieci średniego napięcia w Polsce

Zgodnie z danymi podawanymi przez Urząd Regulacji Energetyki, w maju 2019 roku w Polsce było 178 przedsiębiorstw, które kwalifikowane były jako operator systemu dystrybucyjnego OSD [105]. W tej grupie znajduje się także 5 największych spółek dystrybucyjnych, które swoim zasięgiem pokrywają łącznie teren całego kraju. Zalicza się do nich następujące przedsiębiorstwa:

- a) PGE Dystrybucja S.A. z siedzibą w Lublinie,
- b) Tauron Dystrybucja S.A. z siedzibą w Krakowie,
- c) Energa-Operator S.A. z siedzibą w Gdańsku,
- d) Enea Operator sp. z o.o. z siedzibą w Poznaniu,
- e) innogy Stoen Operator sp. z o.o. z siedzibą w Warszawie.

Strukturę sieci poszczególnych, największych OSD przedstawiono w tablicy 2.1, przy czym użyto w tej tablicy skrótowych nazw przedsiębiorstw.

#### Tablica 2.1.

OSD	linie wysokie	ego napięcia	linie średniego napięcia		linie niskiego napięcia	
	napowietrzne	kablowe	napowietrzne	kablowe	napowietrzne	kablowe
PGE	10184	79	90465	21953	121764	46536
Tauron	10975	139	40507	24650	72600	38508
Energa	6421	50	55198	13595	56661	32961
Enea	5308	31	33545	12326	27259	26467
innogy	363	144	282	7545	1322	5732
Razem	33251	443	219997	80069	279606	150204

Długości linii w km największych polskich OSD na koniec 2018 roku

Zgodnie z danymi podanymi w tablicy 2.1, które pochodzą z [86], sieć dystrybucyjna w Polsce składa się głównie z ciągów napowietrznych. W przypadku sieci średniego napięcia, z którymi związana jest niniejsza rozprawa, operatorem z największą długością eksploatowanych linii jest PGE Dystrybucja S.A. z, łącznie, 112418 km linii SN. Zdecydowanie wyróżniającym się OSD jest innogy Stoen Operator, który w strukturze swojej sieci ma zdecydowanie więcej linii kablowych, a wszystkie linie tworzące sieć są stosunkowo krótkie. Rysunek 2.8 pokazuje podział linii SN poszczególnych OSD na napowietrzne i kablowe.



Rys. 2.8. Podział technologii budowy linii SN poszczególnych OSD

Rysunek 2.9, opracowany na podstawie [85], przedstawia strukturę wiekową wybranych elementów sieci dystrybucyjnej pięciu największych OSD na koniec 2017 roku,

która, pomimo bardzo wielu inwestycji prowadzonych przez poszczególne przedsiębiorstwa, ciągle opiera się na urządzeniach starszych niż 25-letnich.



Rys. 2.9. Struktura wiekowa wybranych elementów systemu dystrybucyjnego największych polskich OSD

Niestety, linie napowietrzne SN w zdecydowanej większości wybudowane zostały ponad 25 lat temu, co może sugerować ich znaczną awaryjność.

### 2.4. Awaryjność sieci średniego napięcia w Polsce

Problem niezawodności pracy systemu elektroenergetycznego jest analizowany w wielu aspektach i do tej pory poświęcono mu bardzo wiele prac tak eksperymentalnych, jak i tych o charakterze teoretycznym. W literaturze niezawodność i awaryjność systemu elektroenergetycznego związana jest głównie z nazwiskami R. Billintona i R. Allana, którzy wraz ze swoimi współpracownikami publikowali wiele artykułów i książek, np. [9], w tej tematyce. W literaturze krajowej z problematyką niezawodności pracy sieci związane są m.in. prace J. Paski [75, 76] czy A. Chojnackiego [15].

Analiza niezawodności dotyczy sieci na każdym poziomie napięcia i duży wpływ na nią ma struktura danego układu sieciowego. Rzeczywiste rozwiązania sieciowe są zwykle bardzo rozbudowane, a do ich oceny stosowane są powszechnie znane wskaźniki, takie jak np. SAIDI, SAIFI czy MAIFI [12, 15, 38, 44]. Wskaźniki te wyznaczane są na podstawie zdarzeń rejestrowanych w sieci eksploatowanej przez OSD. Gromadzone przez poszczególne przedsiębiorstwa informacje związane z awariami sieci są tajemnicą firmy i są ogólnie niedostępne, a publikowane dane są zwykle okrojone, jak np. w [2].

Zgodnie z rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [94], każdy OSD podaje do publicznej wiadomości wartości następujących wskaźników:

- SAIDI dla przerw planowanych i nieplanowanych,

- SAIFI dla przerw planowanych i nieplanowanych,
- MAIFI.

Wskaźnik przeciętnego systemowego czasu trwania przerwy długiej SAIDI (rys. 2.10) definiowany jest jako suma iloczynów czasu trwania przerwy i liczby odbiorców narażonych na działanie tej przerwy w ciągu roku, podzieloną przez łączną liczbę obsługiwanych odbiorców, tzn.:

$$SAIDI = \frac{\sum t_{pd} N_{pd}}{N}$$
(2.4)

gdzie:  $t_{pd}$  – czas trwania przerwy długiej,  $N_{pd}$  – liczba odbiorców narażonych na skutki przerwy, N – łączna liczba odbiorców obsługiwana przez operatora.



Rys. 2.10. Wartości współczynników SAIDI dla przerw nieplanowanych (bez uwzględniania katastrof) u największych polskich OSD

Wskaźnik przeciętnej systemowej częstości przerw długich SAIFI (rys. 2.11) definiowany jest jako liczba wszystkich tych przerw w ciągu roku podzielone przez łączną liczbę obsługiwanych odbiorców, tzn.:

$$SAIFI = \frac{n_{pd}}{N}$$
(2.5)

gdzie:  $n_{pd}$  – łączna liczba wszystkich przerw długich u odbiorców, N – liczba odsługiwanych przez operatora odbiorców energii elektrycznej.



Rys. 2.11. Wartości współczynników SAIFI dla przerw nieplanowanych (bez uwzględniania katastrof) u największych polskich OSD

Wskaźnik przeciętnej systemowej częstości przerw krótkich MAIFI definiowany jest jako liczba wszystkich tych przerw w ciągu roku podzielone przez łączną liczbę obsługiwanych odbiorców, tzn.:

$$MAIFI = \frac{n_{pk}}{N}$$
(2.6)

gdzie:  $n_{pk}$  – łączna liczba wszystkich przerw krótkich u odbiorców, N – liczba odsługiwanych przez operatora odbiorców energii elektrycznej.

Zaznacza się też, że zgodnie z [94] przerwa krótka to taka, której czas trwania wynosi od 1 sekundy do 3 minut, natomiast przerwy długie trwają od 3 minut do 12 godzin.

Wartości współczynników SAIDI oraz SAIFI dla przerw nieplanowanych, czyli takich, które związane są z wystąpieniem awarii w sieci, dla największych polskich OSD za lata 2013 – 2018 przedstawiają rysunki 2.10 oraz 2.11.

Zabiegi prowadzone przez OSD dość skutecznie prowadzą do systematycznego obniżania wskaźników SAIDI i SAIFI, co jest głównie zasługą licznych i kosztownych inwestycji prowadzonych aktualnie w sieciach dystrybucyjnych [25].

Warto także nadmienić, że każdy OSD zobowiązany jest do corocznego wypełniania tzw. formularza G-10.5 "Sprawozdanie o stanie urządzeń elektrycznych" i dostarczenia do Agencji Rynku Energii. Dane przekazywane w tych formularzach są, jak już wcześniej wspomniano, objęte tajemnicą.

Istotne dane podawane są w pracach [7] oraz [16], gdzie podane są pewne dane statystyczne dotyczące awaryjności linii średniego napięcia w wykonaniu kablowym i napowietrznym, które pochodzą z prowadzonych przez nich obserwacji.

W przypadku pracy [7] większość danych pochodzi z lat 2004 – 2009 i autorzy podkreślają, że linie kablowe są znacznie mniej awaryjne niż linie napowietrzne (rys. 2.12), chociaż w przeliczeniu na liczbę uszkodzeń na 100 km linii, to awarii więcej jest w liniach kablowych. Potwierdzenie tego faktu znajduje się np. w dokumencie "Aktualizacja założeń do planu zaopatrzenia w ciepło, energię elektryczną i paliwa gazowe dla obszaru miasta Poznania", gdzie podaje się, że na terenie Poznania w rozpatrywanym okresie odnotowano ok. 17 uszkodzeń/100 km linii napowietrznej oraz ok. 19 uszkodzeń/100 km linii kablowej [21].



Rys. 2.12. Procentowy rozkład częstości występowania awarii w liniach napowietrznych i kablowych w latach 2004 – 2009 [7]

Awaryjność linii napowietrznych jest w dużym stopniu uzależniona od warunków atmosferycznych: mrozu, burz, wichur, śniegu. Znaczny wpływ na awarie zimowe ma szadź, która przyczynia się do przeciążenia wagowego przewodów.

Do głównych przyczyn awarii linii napowietrznych zalicza się zjawiska starzeniowe oraz pogodowe, w szczególności wichury i burze. Zagrożeniem dla linii napowietrznych są także drzewa i gałęzie, które mogą być źródłami zwarć doziemnych przerywanych [16]. Najczęściej awaria dotyczy przewodów, izolatorów bądź elementów osprzętu liniowego [7].

W przypadku linii kablowych głównymi powodami występowania zwarć są procesy starzeniowe oraz działalność człowieka (np. nieostrożność podczas prowadzenia prac ziemnych z wykorzystaniem koparki).

Statystyki przedstawiane w [91] przedstawiają inny procentowy rozkład częstości występowania awarii w liniach napowietrznych i kablowych:

- w liniach kablowych ok. 20 % wszystkich zwarć,
- w liniach napowietrznych ok. 80 % wszystkich zwarć.

Utrzymuje się jednak pogląd, że to linie napowietrzne są głównym źródłem awarii w sieci SN.

#### Tablica 2.2.

## Częstotliwość występowania poszczególnych rodzajów zwarć w sieciach napowietrznych [91]

Typ zwarcia	Liczba w stosunku do wszystkich zwarć
L-E	85 %
L-L	8 %
L-L-E	5 %
L-L-L	< 2 %

Częstotliwość występowania poszczególnych typów zwarć w sieciach napowietrznych przedstawiona została w tablicy 2.2, w której zwarcie L-E to zwarcie jednofazowe doziemne, L-L zwarcie dwufazowe, L-L-E to zwarcie podwójne doziemne, natomiast L-L-L to zwarcie trójfazowe.

W ogólnym rozrachunku jednak dla całokształtu wszystkich sieci średniego napięcia, niezależnie od technologii wykonania linii, zwarcia doziemne stanowią ok. 70 % wszystkich zwarć [23, 49]. Doziemienia zatem, będąc najczęściej występującym typem zwarć, wymagają precyzyjnej detekcji i lokalizacji.

## 3. SKUTECZNOŚĆ DZIAŁANIA SYGNALIZATORÓW PRZEPŁYWU PRĄDU zwarciowego w sieciach SN podczas zakłóceń doziemnych

#### 3.1. ZWARCIE DOZIEMNE JAKO ZJAWISKO FIZYCZNE

Zwarciem doziemnym nazywane jest wystąpienie przypadkowej ścieżki przewodzącej między przewodem fazowym a ziemią [39].

Ziemia w powyższej definicji nie występuje w sensie dosłownym, czyli zbliżonym do pojęcia "grunt". O ile takie zwarcia, tj. opadnięcie przewodu fazowego na grunt, oczywiście występują, o tyle znacząca liczba zwarć dotyczy raczej zetknięcia przewodu fazowego z uziemioną częścią przewodzącą. Przykład takiego uszkodzenia to np. przebicie izolatora w linii napowietrznej, opadnięcie przewodu na poprzecznik słupa czy uszkodzenie izolacji w linii kablowej między żyłą roboczą a żyłą powrotną lub powłoką. Często przyczyną zwarcia doziemnego jest zetknięcie przewodu fazowego z gałęzią drzewa, które ma zwykle wystarczającą przewodność, aby mógł popłynąć prąd zwarciowy.

Zwarciem doziemnym oporowym nazywa się takie zwarcie, którego rezystancja jest dostatecznie duża do wystąpienia napięcia o znaczącej wartości między uszkodzonym przewodem a ziemią lub między przewodami [39].

O tym, czy zwarcie jest oporowe czy też nie, decyduje przede wszystkim wystąpienie rezystancji przejścia  $R_F$  w miejscu zwarcia.

Zwarcia oporowe cechują się występowaniem złożonej nieliniowej i niestacjonarnej rezystancji zwarcia  $R_{\rm F}$ . Składa się ona zwykle z rezystancji łuku, rezystancji przeszkody (np. gałęzi i pnia drzewa) oraz rezystancji gruntu. Każdy z wymienionych elementów może wykazywać nieliniowość i zmienność w czasie [58].



Rys. 3.1. Charakterystyki napięciowo-prądowe statyczne rezystancji przejścia (a) i łuku (b) oraz charakterystyka dynamiczna całkowitej rezystancji zwarcia;  $U_k$  – napięcie załamania charakterystyki,  $U_z$  – napięcie zapłonu łuku,  $R_0$  – rezystancja początkowa,  $R_1$  – rezystancja przy dużych prądach [58]

Z badań eksperymentalnych zamieszczonych w [101] wynika, że rezystancję przejścia można aproksymować w pierwszym przybliżeniu statyczną charakterystyką napięciowoprądową w postaci linii łamanej, która jest przedstawiona na rysunku 3.1.

W niniejszej rozprawie za zwarcie wysokooporowe będzie rozumieć się zwarcie, które cechuje się rezystancją przejścia większą niż  $R_{\rm F} = 1000 \ \Omega$  bez szczegółowego uwzględniania zjawisk łukowych. Zaznacza się także, że w literaturze dolna granica rezystancji przejścia dla zwarć wysokooporowych bywa różna – od 200  $\Omega$  [27] aż do 1000  $\Omega$  [50].

Przyczyny zwarć mogą [42] zostać podzielone na elektryczne i nieelektryczne. Do przyczyn elektrycznych zalicza się np. przepięcia atmosferyczne, przepięcia łączeniowe, przepięcia ferrorezonansowe czy przepięcia ziemnozwarciowe, które powoduje samo zwarcie doziemne, ale i jego zanik. Do przyczyn nieelektrycznych można zaliczyć np. wady fabryczne urządzeń, uszkodzenie mechaniczne wywołane pracami ziemnymi (dotyczy głównie kabli), niecelowe działanie człowieka (np. dotknięcie przewodu fazowego częścią maszyny rolniczej, ramieniem koparki itp.) czy działanie zwierząt.

W zasadzie wszystkie zwarcia doziemne wywołują zagrożenie porażeniowe, będąc tym samym niebezpiecznymi dla ludzi i zwierząt [30].

#### 3.2. OBLICZANIE WARTOŚCI PRĄDÓW ZWARĆ DOZIEMNYCH W SIECI ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

Najczęściej spotykane zależności opisujące wielkości ziemnozwarciowe w sieciach SN o nieskutecznie uziemionym punkcie neutralnym nie uwzględniają impedancji wzdłużnych elementów systemu elektroenergetycznego. Chociaż postępowanie takie nie jest do końca uzasadnione, to zależności te zapewniają wystarczającą dokładność i mogą z powodzeniem służyć do obliczania nastaw różnego typu zabezpieczeń [31]. Zależności pomijające impedancje wzdłużne przedstawiają wzory [51]:

$$\underline{U}_{0} = \underline{\beta} U_{\mathrm{L}}, \qquad (3.1)$$
$$\underline{I}_{\mathrm{k1}} = \underline{\beta} U_{L} C_{S} (d_{0} - js),$$

gdzie:  $\underline{U}_0$  – składowa zerowa napięcia w sieci,  $\underline{\beta}$  – współczynnik ziemnozwarciowy,  $U_L$  – napięcie fazy względem ziemi,  $\underline{I}_{k1}$  – prąd w miejscu wystąpienia zwarcia doziemnego,  $C_S$  – zastępcza pojemność doziemna sieci,  $d_0$  – współczynnik tłumienia sieci, s – współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej.

Współczynnik ziemnozwarciowy  $\underline{\beta}$  można obliczyć według zależności:

$$\underline{\beta} = \frac{1}{1 + R_F \omega C_S (d_0 - js)} \tag{3.3}$$

w której:  $R_F$  – rezystancja przejścia między przewodem fazowym a ziemią w miejscu zwarcia,  $\omega$  – pulsacja napięcia sieciowego.

Współczynnik tłumienia sieci  $d_0$  oblicza się z wystarczającą dokładnością z bardzo uproszczonej zależności:

$$d_0 = \frac{I_{\rm R}}{I_{\rm CS}} \tag{3.4}$$

za  $I_{\rm R}$  przyjmując znamionową wartość prądu ziemnozwarciowego rezystora uziemiającego (w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor) lub też, dla sieci skompensowanych, wartość prądu wymuszanego po stronie pierwotnej przez układ AWSCz.



Rys. 3.2. Prąd ziemnozwarciowy w miejscu zwarcia oraz w dowolnym punkcie linii

Wartość prądu ziemnozwarciowego płynącego przez dany punkt linii (np. miejsce zainstalowania zabezpieczenia czy sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego) może być obliczona wg zależności:

$$\underline{I}_{kZ} = \underline{\beta} I_{CS} \sqrt{d_0^2 + (s+a)^2}$$
(3.5)

gdzie *a* – względny udział pojemnościowego prądu zwarcia doziemnego linii za rozpatrywanym punktem patrząc od strony szyn w rozdzielni SN z pracującym polem transformatora uziemiającego w prądzie pojemnościowym całej sieci.

Poszczególne prądy zostały zaznaczone na rysunku 3.2Rys. 3.2.

Wartość parametru a można obliczyć z zależności:

$$a = \frac{I_{CLi}}{I_{CS}} \tag{3.6}$$

przy czym I<sub>CLi</sub> to wartość prądu pojemnościowego *i*-tego odcinka linii.

Na podstawie wartości wyznaczonego prądu oraz składowej zerowej napięcia można obliczać także admitancję, susceptancję oraz konduktancję mierzoną we wskazanych miejscach.

#### 3.3. SYGNALIZATORY PRZEPŁYWU PRĄDU ZWARCIOWEGO

Sygnalizator przepływu prądu zwarciowego (ang. *fault current passage indicator, faulted current indicator, FCI*) to jedno- lub wielofazowe urządzenie, które jest przeznaczone do wykrywania prądu zwarciowego i wskazywania, że prąd zwarciowy przepłynął przez przewód/przewody fazowe w punkcie, w którym ten czujnik jest zainstalowany [36]. Jeżeli sygnalizator przepływu prądu zwarciowego wykryje prąd zwarciowy, to powinien zapewnić wizualne lub zdalne wskazanie zaistniałej usterki. Wskazanie wizualne opiera się zwykle na uruchomieniu światła ostrzegawczego zabudowanego w urządzeniu, zdalne – na przesłaniu odpowiedniego komunikatu do systemu nadzoru (np. typu SCADA).

Pierwszy sygnalizator przepływu prądu zwarciowego został zbudowany w firmie Horstmann w 1946 roku i był on przeznaczony do stosowania w liniach kablowych [34]. Pierwsze sygnalizatory dla linii napowietrznych (rys. 3.3) zostały wprowadzone przez firmę Nortroll z Norwegii w 1977 roku [68]. W Polsce sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego montowane są w sieciach średniego napięcia od około 15 lat, przy czym w ostatnich 5 latach obserwuje się wyraźne zwiększenie zainteresowania operatorów systemu dystrybucyjnego tego typu aparaturą.



Rys. 3.3. Pierwszy cyfrowy sygnalizator przepływu prądu zwarciowego dla linii napowietrznych – Nortroll KBX-1 – wiszący po lewej stronie

Idea pracy sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego przedstawiona jest na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Idea działania sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego w sieci SN – zwarcie wykryte przez sygnalizatory w stanie zadziałania – efektem zwarcia zadziałanie zabezpieczenia w polu liniowym

Rozróżnia się dwa główne typy sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego – przeznaczone do montażu w liniach kablowych oraz przeznaczone do montażu w liniach napowietrznych. Oba te typy urządzeń znacząco się od siebie różnią, nie tylko pod względem konstrukcji, ale także pod względem zastosowanych kryteriów detekcji zwarć.

Struktura typowego sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego przedstawiona jest na rysunku 3.5.

Typowy sygnalizator przepływu prądu zwarciowego zbudowany jest z czterech podstawowych członów: decyzyjnego, pomiarowego, komunikacyjnego i sygnalizacyjnego, przy czym trzy ostatnie człony współpracują z dodatkowym blokiem wejść i wyjść.



Rys. 3.5. Struktura typowego sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego

W członie decyzyjnym prowadzona jest analiza wielkości pomiarowych i podejmowana jest na podstawie określonego kryterium decyzja dotycząca wystąpienia (lub nie) zwarcia doziemnego lub międzyfazowego. Człon pomiarowy dostarcza do algorytmów decyzyjnych informacje o wybranych wielkościach fizycznych, charakterystycznych dla zwarć różnego typu, przy czym w przypadku zwarć doziemnych jest to przede wszystkim informacja o składowej zerowej prądu oraz, opcjonalnie, o składowej zerowej napięcia. Źródła wielkości pomiarowych mogą być różne, tak samo jak algorytmy pomiarowe.

Człon komunikacyjny jest w zasadzie opcjonalny, ponieważ w ogólnym przypadku komunikacja sygnalizatora z systemem nadzoru nie jest wymagana. Współcześnie jednak trudno sobie wyobrazić brak tej funkcji w urządzeniu. Człon służy do przesyłania informacji o statusie urządzenia. Warto tutaj dodać, że wybrani producenci oferują sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego z funkcją łączności bliskiej odległości (np. Bluetooth) z telefonem komórkowym. Elementem członu komunikacyjnego jest także łącze inżynierskie, umożliwiające zmianę konfiguracji sygnalizatora.

Człon sygnalizacyjny służy do wizualizacji stanu sygnalizatora, a ściślej – informowania o przepływie prądu zwarciowego. Informacja może mieć postać np. świecącej się diody LED czy błysków.

Sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego montowane na linii kablowej zwykle są urządzeniami wnętrzowymi, współpracującymi z indukcyjnymi przekładnikami prądowymi, cewkami Rogowskiego lub sensorami prądowymi. Z uwagi na to, że sieci kablowe pracują zwykle z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, gdzie wartość prądu zwarciowego podczas zwarcia doziemnego jest dość duża, rzędu kilkuset amperów, detekcja zwarć doziemnych odbywa się przeważnie w oparciu o kryterium zerowoprądowe (por. podrozdział 4.3.3.5). Widok typowych sygnalizatorów przeznaczonych do zabudowy na kablu przedstawiają rysunki 3.6 oraz 3.7.



Rys. 3.6. Sygnalizator przepływu prądu zwarciowego Nortroll Cabletroll 3500 z sensorami prądowymi oraz modułem komunikacyjnym [92]



Rys. 3.7. Sygnalizator przepływu prądu zwarciowego Schneider Electric Easergy Flair 200C [97]

O ile większość sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego dla linii kablowych ma konstrukcję do siebie zbliżoną, o tyle w przypadku urządzeń do linii napowietrznych jest wiele rozwiązań konstrukcyjnych. Wśród nich najczęściej spotykane to:

 a) sygnalizatory montowane na słupie z detekcją zwarcia na podstawie analizy pola elektromagnetycznego (rys. 3.8),

- b) sygnalizatory montowane na przewodach fazowych z opcjonalną komunikacją z jednostką centralną zamontowaną na słupie lub jego otoczeniu, tzw. sygnalizatory "bombkowe" (rys. 3.9),
- c) sygnalizatory będące elementem sterowników obiektowych, np. sterowników rozłączników, które współpracują z układami pomiarowymi w postaci przekładników lub sensorów prądowych i, opcjonalnie, napięciowych (rys. 3.10).



Rys. 3.8. Sygnalizator przepływu prądu zwarciowego Nortroll Line Troll R400D na słupie linii SN [68]



Rys. 3.9. Sygnalizator przepływu prądu zwarciowego Horstmann Navigator LM HV [34]



Rys. 3.10. Przykładowy sterownik obiektowy z funkcją sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego Mikronika SO-52v21 (wybrana konfiguracja) [60]

### 4. KRYTERIA DETEKCJI ZWARĆ DOZIEMNYCH W SIECI ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

#### 4.1. WPROWADZENIE

Społeczeństwo współcześnie uzależnione jest od dostaw energii elektrycznej. Z tego względu wymagana jest wysoka niezawodność zasilania i pewność jej dostaw. Jeżeli w elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej wystąpi awaria, szybka jej lokalizacja, wydzielenie oraz przywrócenie zasilania jest dla OSD priorytetem. Ostatecznym celem wszystkich spółek dystrybucyjnych jest wdrożenie systemów w pełni automatycznych, których zadaniem byłoby "samouleczenie" sieci. Systemy FDIR wymagają jednak dostarczenia wiarygodnych informacji o przepływie prądów zwarciowych, które muszą być dostarczone do stanowiska pracy dyspozytora, np. w rejonowej dyspozycji ruchu. Do przetwarzania informacji służą systemy SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) lub DMS (Distribution Management System), które odpowiedzialne są także za wizualizację danych i przedstawienie bieżącej sytuacji dyspozytorowi. W przypadku wystąpienia zwarcia podejmuje on decyzję o przełączeniach samodzielnie, alternatywnie może śledzić działanie automatyki FDIR.

O ile w przypadku zwarć doziemnych w sieciach o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor istnieją ustalone metody lokalizacji uszkodzeń, bazujące na pomiarze wartości składowej zerowej prądu, to nie istnieje jedna powszechnie akceptowana, niezawodna i opłacalna metoda lokalizacji zwarć doziemnych w sieciach o izolowanym punkcie neutralnym oraz w sieciach skompensowanych.

Metody lokalizacji doziemień w sieci średniego napięcia można podzielić na dwie główne grupy: scentralizowane oraz zdecentralizowane. W metodach scentralizowanych pomiary wykonywane są w stacji elektroenergetycznej WN/SN (np. w GPZ-cie) i w tym miejscu podejmowana jest decyzja. W metodach zdecentralizowanych pomiary wykonywane są przez rozproszone wzdłuż linii średniego napięcia urządzenia pomiarowe, w związku z czym niezbędne jest zapewnienie komunikacji między nimi a systemem nadzoru. Szczegółowa klasyfikacja metod lokalizacji zwarć doziemnych w sieci SN przedstawiona jest na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Klasyfikacja metod lokalizacji zwarć doziemnych w sieci średniego napięcia

### 4.2. Scentralizowane metody detekcji zwarć doziemnych

#### 4.2.1. Metody impedancyjne

Metody impedancyjne opierają się na pomiarze impedancji linii. W chwili, gdy zwarcie doziemne nie występuje, impedancja taka, która może być mierzona od strony jednego lub obu końców linii, jest duża. Skutkiem wystąpienia zwarcia jest obniżenie wartości mierzonej impedancji. Ponieważ długość linii od punktu pomiarowego do miejsca zwarcia jest proporcjonalna do zmierzonej impedancji to, znając impedancję jednostkową linii, można wyznaczyć odległość do miejsca zwarcia. Metoda ta jest szczególnie przydatna i powszechnie wykorzystywana do lokalizacji zwarć w sieciach wysokiego i najwyższego napięcia, w których struktura pojedynczego ciągu liniowego jest zwykle jednorodna. W sieci SN, szczególnie w warunkach krajowych, spotkać się jest z tym bardzo trudno. Sieć SN, w odróżnieniu od sieci WN i NN, jest także mocno rozgałęziona. Poza tym, w sieciach skompensowanych oraz z izolowanym punktem neutralnym prąd zwarcia doziemnego jest istotnie mniejszy od prądów obciążenia i nie zależy od odległości miejsca zwarcia od punktu zabezpieczeniowego, stąd dodatkowe trudności w detekcji i lokalizacji zwarcia. Nie bez znaczenia jest także częste występowanie dużej rezystancji w miejscu wystąpienia zwarcia. Ogólnie rzecz biorąc, w metodach impedancyjnych największym problemem jest poprawne oszacowanie impedancji pętli zwarciowej oraz określenie impedancji jednostkowej linii. Podjęto wiele prób rozwiązania tego problemu, które opisane są w [18, 40, 46, 88]. Praca [64] porównuje 10 różnych sposobów określenia impedancji pętli zwarciowej.

W praktyce większość metod wyznaczania impedancji bazuje na pomiarze prądu i napięcia o częstotliwości sieciowej na początku linii.

W tradycyjnej lokalizacji uszkodzeń na bazie impedancji linii oblicza się jej impedancję po wystąpieniu zwarcia i porównuje się ją z impedancją linii zmierzoną przed wystąpieniem uszkodzenia, szacując w ten sposób odległość do miejsca zwarcia [69]. Przyjmuje się, dla uproszczenia, zerową wartość rezystancji przejścia w miejscu zwarcia. Może to jednak powodować znaczny błąd, szczególnie w liniach napowietrznych, gdzie rezystancja ta jest niezerowa. W pracy [28] proponowana jest metoda udoskonalona, przyjmująca z góry założoną rezystancję przejścia w miejscy zwarcia i uwzględniająca dodatkowo rozkład prądu obciążenia wzdłuż linii. Rezultaty badań pokazują, że metoda niesie korzyści tylko dla sytuacji, w których rezystancja przejścia jest mniejsza od 30  $\Omega$ . W związku z tym raczej nie znajduje ona zastosowania w praktyce.

Inny algorytm przedstawiony został w [3], gdzie analiza bazuje na teorii składowych symetrycznych. Autorzy modelują całe obciążenie wybranego pola rozdzielni SN w jednym punkcie, który znajduje się w pewnej założonej odległości od stacji, gdzie obniżenie wartości napięcia podczas zwarcia doziemnego jest największe, a impedancja linii największa. Poprzez rzeczywisty pomiar spadku napięcia podczas zwarcia szacowana jest odległość (w jednostkach względnych) do miejsca zwarcia. Metoda była weryfikowana symulacyjnie oraz w rzeczywistej sieci, gdzie potwierdzono jej skuteczność tylko dla zwarć o niewielkiej wartości rezystancji przejścia.

Opisywane wyżej metody są skuteczne tylko w sieci o izolowanym punkcie neutralnym. Autorzy różnych prac proponują inne podejście do lokalizacji zwarć w sieci skompensowanej.

W algorytmie lokalizacji zwarcia przedstawionym w pracy [28] wyznaczana jest reaktancja od szyn zbiorczych do miejsca zwarcia poprzez pomiar składowej zerowej prądu oraz napięcia fazowego fazy zwartej. Istotne jest wystąpienie zmiany wartości tych wielkości na skutek załączenia rezystora AWSCz. Na podstawie tych pomiarów oraz znajomości struktury sieci i jej parametrów jednostkowych wyznaczana jest względna odległość do miejsca zwarcia. Wyniki prowadzonych symulacji pokazują, że metoda jest względnie skuteczna tylko dla zwarć metalicznych. W przypadku zwarcia o rezystancji przejścia równej  $R_{\rm F} = 30 \ \Omega$  błąd szacowania odległości do miejsca zwarcia jest większy od 10 %.

W pracy [6] autorzy podejmują próbę zastosowania teorii przedstawionej w [3] do sieci skompensowanej, wykorzystując dodatkowo założenia i metody stosowane przez innych
babaczy w pracy [28]. Mowa tutaj o pomiarze zmian  $I_0$  oraz napięcia fazowego po załączeniu rezystora AWSCz. Artykuł jest istotnie rozbudowany o analizę czułości przedstawianej metody w celu zbadania wpływu czynników zaburzających wyniki pomiaru, a mogących występować w praktyce. Szczególny nacisk położony jest na rezystancję przejścia, przy czym analizy kończą się na wartości  $R_F = 500 \Omega$ . Wniosek z pracy jest taki, że wraz ze wzrostem wartości tego parametru wzrastają trudności pomiarowe, w związku z czym niezbędne do poprawnego wyznaczania odległości do miejsca zwarcia są układy pomiarowe o bardzo wysokiej jakości.

Ta sama grupa autorów zaproponowała kilka lat później inny algorytm przeznaczony do lokalizacji miejsca zwarcia w sieci skompensowanej – opisany został w pracy [4]. Do opisu stanu sieci wykorzystywane są cztery równania ze składowymi symetrycznymi. W podejściu przedstawionym w pracy [3] były to dwa równania, które tutaj zostały uzupełnione. Postanowiono osobno rozpatrywać ich części rzeczywiste oraz urojone. Wykorzystując koncepcję przedstawioną w [3] można wyznaczyć odległość do miejsca zwarcia. Poprzez wykorzystanie specyficznie przedstawionych czterech równań unika się także wpływu zmiany wartości prądu AWSCz na wynik szacowania odległości. Jest to dość istotne, ponieważ wpływ rezystancji przejścia  $R_F$  na wartość prądu automatyki wymuszania składowej czynnej jest znaczny (rys. 4.2). Algorytm proponowany przez autorów został przez nich zweryfikowany, a jego skuteczność okazała się na tyle wysoka (dla zwarć o rezystancji przejścia  $R_F < 500 \Omega$ ), że podjęto próbę zaimplementowania go w wybranych sterownikach polowych ABB dostępnych na niektórych rynkach.



Rys. 4.2. Zależność wartości prądu czynnego wymuszanego w trakcie doziemienia przez automatykę AWSCz w funkcji rezystancji przejścia  $R_F$  ( $I_{CS} = 120$  A, s = 0,1) dla różnych wartości znamionowych  $I_{AWSCz n}$ 

W publikacji [5] stwierdza się, że dotychczasowe badania pozwalają szacować odległości od szyn do miejsca zwarcia bardzo precyzyjnie, nie mniej jednak w tej samej pracy opisywany jest układ mieszany do lokalizacji zwarć, który wykorzystuje nie tylko sygnały mierzone w polu liniowym, ale też pochodzące z głębi sieci. Pomimo bardzo szeroko zakrojonych prac badawczych, rozwiązania komercyjne bazujące na osiągnięciach przedstawionych w pracach [3], [4] i [5] nie są jeszcze dostępne.

4.2.2. Metody bazujące na sztucznej inteligencji

Metody bazujące na sztucznej inteligencji są dość szeroko opisywane w literaturze, a większość z nich bazuje na sieciach neuronowych [17, 62, 63, 87, 89, 99]. Metody wykorzystujące sztuczną inteligencję mogą być bardzo korzystne do stosowania w sieciach o wysokim stopniu złożoności.

W [62] do lokalizacji zwarć wykorzystano system łączący możliwości sztucznej sieci neuronowej i logiki rozmytej (ANFIS – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System). Do pięciowarstwowej sieci neuronowej doprowadzany jest prąd mierzony w poszczególnych fazach w polu liniowym oraz te same sygnały poddane transformacji falkowej. System nie wskazuje określonego miejsca wystąpienia zwarcia a jedynie linię, w której ono wystąpiło. W [63] przedstawiono możliwość rozszerzenia funkcjonalności systemu o precyzyjną lokalizację miejsca zwarcia proponując nowe algorytmy uczenia sieci neuronowej. Z uwagi na złożoność obliczeniową przedstawianych metod, ich możliwość zastosowania w praktyce należy poddać dużej wątpliwości.

Publikacje [17], [87] oraz [89] poruszają problematykę transformaty falkowej. Użyto jej do dekompozycji sygnałów ze stanów przejściowych. Udowadniane jest, że korzystając z takiej istnieje możliwość wykorzystania komponentów pochodzących z tego przekształcenia do lokalizacji miejsca zwarcia. W dalszych częściach artykułów autorzy wykorzystują te informacje do uczenia sztucznych sieci neuronowych (w [17] oraz [89]) oraz sieci neuronowych z logiką rozmytą [87]. We wszystkich metodach wielkościami wejściowymi są prądy fazowe.

Trudno jest znaleźć dowody na rzeczywiste wdrożenia urządzeń i systemów, które wykorzystywałyby sztuczną inteligencję do lokalizacji zwarć. Ponadto należy zauważyć, że liczba prac badawczych dotyczących tych metod zmniejsza się z roku na rok.

## 4.2.3. Metody falowe

Ze wszystkich stanów nieustalonych, które mogą zachodzić w systemie elektroenergetycznym, zjawiska falowe charakteryzują się najkrótszym czasem trwania. Podaje się, że wynosi od kilku mikrosekund do kilku milisekund. Zjawiska falowe są związane z propagacją fal elektromagnetycznych, które są następstwem wystąpienia zwarcia, wyładowań atmosferycznych lub operacji łączeniowych w sieci. Fala propaguje z punktu wystąpienia zakłócenia w dwie przeciwne strony (rys. 4.3). Falę elektromagnetyczną można podzielić na falę napięciową (która jest związana ze zjawiskami zachodzącymi w polu elektrycznym) oraz prądową (związaną z polem magnetycznym). Istotną cechą takiej fali jest to, że przesuwa się ona wzdłuż linii ze znaną, skończoną prędkością, zbliżoną do prędkości światła [22].

Generalnie istnieje 5 typów lokalizatorów falowych, oznaczanych literami A, B, C, D oraz E [35]. Lokalizacja typu "A" jest metodą bierną i pozwala na obserwację tylko zwarć pojedynczych. Pomiar polega na wyznaczeniu różnicy czasu między zarejestrowaniem w miejscu analizy pierwszego czoła fali i jego odbicia od miejsca zwarcia. Znając prędkość propagacji fali w linii można wyznaczyć odległość do miejsca zwarcia  $d_A$  z prostej zależności:

$$d_{\rm A} = v_{\rm p} \cdot \frac{\Delta t_{\rm A}}{2}$$

gdzie:  $v_p$  – prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w linii elektroenergetycznej,  $\Delta t_A$  – różnica czasowa między pierwszym czołem fali i jego odbiciem od miejsca zwarcia.



Rys. 4.3. Refrakcja i odbicia fali elektromagnetycznej w linii elektroenergetycznej; *Fault Point* – miejsce zwarcia, *Reflection* – odbicie, *Refraction* - refrakcja [35]

Lokalizacja typu "B" jest także metodą bierną, jednak bazuje na pomiarze na dwóch końcach linii. Mierzy się różnicę czasu między czołami fal do nich docierających. Niezbędne

są dwa urządzenia pomiarowe z bardzo wydajną komunikacją między nimi. Wyznaczona różnica czasu używana jest do obliczania odległości od zwarcia wg zależności:

$$d_{\rm B} = \frac{L}{2} + \frac{\nu_p \cdot \Delta t_{\rm B}}{2} \tag{3.8}$$

gdzie: L – długość linii,  $\Delta t_{\rm B}$  – różnica czasu między czołami fal docierających do miejsc pomiarowych na końcach linii.

Lokalizacja typu "C" jest, w odróżnieniu od "A" i "B", metodą aktywną, tzn. po wykryciu zwarcia do linii wprowadzany jest dodatkowy impuls elektromagnetyczny. Metoda jest znana także jako reflektometria w dziedzinie czasu i jest bardzo zbliżona do metody lokalizacji uszkodzeń w kablach. Odległość do zwarcia jest obliczana poprzez pomiar różnicy czasu między wprowadzeniem impulsu a nadejściem jego odbicia. Stosowana zależność jest tożsama z wzorem (3.1).

Lokalizacja typu "D" bazuje na metodzie typu "B" z tym odróżnieniem, że wymaga stosowania w urządzeniach pomiarowych znaczników czasowych o wysokiej dokładności. Fala elektromagnetyczna w momencie dotarcia do wybranego końca linii jest opatrywana znakiem czasu (rys. 4.3). Komunikacja między urządzeniami może być prostsza niż w lokalizacji typu "B" a stosowane zależności matematyczne opisujące odległość do miejsca zwarcia są różne, jednak zwykle zbliżone do wzoru (3.2).



Rys. 4.4. Sygnały prądowe wykorzystywane w metodzie falowej typu "D"; *Left Terminal* – terminal na lewym końcu linii, *Right Terminal* – terminal na prawym końcu linii [35]

Lokalizacja typu "E" bazuje na sygnałach przejściowych generowanych w trakcie działania automatyki SPZ, dokładnie w trakcie pierwszego automatycznego załączania linii. Jest ona teoretycznie zbieżna z metodą typu "C".

Wszystkie powyższe metody lokalizacji bardzo dobrze sprawdzają się w sieci WN, przy czym za podstawowy uznaje się sposób "D" [22].

W sieciach dystrybucyjnych z powodu wielu odbić fal elektromagnetycznych związanych np. z istnieniem wielu odczepów od linii głównych, podstawowym wyzwaniem jest odróżnienie odbicia właściwego od miejsca zwarcia od wszystkich pozostałych. Autorzy prac [26], [20] i [96] twierdzą, że dokonali tego rozróżnienia wykorzystując metodę lokalizacji typu "A" i utrzymują, że metoda może być wykorzystywana do detekcji wysokooporowych zwarć doziemnych. Prezentowane podejście, w każdym przypadku, wymaga jednak bardzo skomplikowanego systemu decyzyjnego i rozbudowanej infrastruktury komputerowej. Ponadto, nie przeprowadzono żadnych testów terenowych, które miałyby przedstawiane metody zweryfikować.

Inna metoda została przedstawiona w pracy [1]. Bazuje ona na wprowadzaniu serii impulsów o wysokiej częstotliwości do sieci i zarejestrowaniu jej odpowiedzi w celu stworzenia szablonu zachowania się sieci w warunkach bezzwarciowych. Po wykryciu doziemienia (np. na bazie zmiany wartości składowej zerowej napięcia) procedura wstrzykiwania impulsów jest powtarzana, a uzyskana odpowiedź systemu jest inna niż wcześniej zarejestrowany szablon (rys. 4.5).



Rys. 4.5. Porównanie szablonu i odpowiedzi sieci SN ze zwarciem po wstrzyknięciu do sieci serii impulsów o wysokiej częstotliwości; *Prefault signal* – sygnał przed zwarciem, *Fault signal* – sygnał po wystąpieniu zwarcia, *Comparision* – porównanie, *Estimated fault distance* – estymowana odległość do miejsca zwarcia [1]

Opisywana metoda nie została zastosowana w praktyce, przeprowadzono jedynie badania symulacyjne oraz testy laboratoryjne. Należy podać w wątpliwość rezultaty uzyskane w tych ostatnich z uwagi na to, że do testów wykorzystano przewody o przekroju roboczym równym s = 1,5 mm<sup>2</sup>, podczas gdy w rzeczywistych sieciach SN nie spotyka się linii o przekroju mniejszym niż s = 25 mm<sup>2</sup>.

W pracach [95], [96] oraz [103] omawia się próby zastosowania metod falowych do lokalizacji zwarć w sieci dystrybucyjnej. Jednak we wnioskach podkreśla się główny problem – z powodu znacznego rozgałęziania tego typu sieci odbicia fal mogą pochodzić z różnych źródeł, nie tylko z miejsca zwarcia. Sprawia to, że zastosowanie ich w rzeczywistej sieci jest praktycznie niemożliwe. Niemniej jednak sugerują, że może zostać opracowana bardzo skuteczna metoda bazująca na teorii falowej możliwa do zastosowania w pewnych określonych, specyficznych, nierozgałęzionych układach sieciowych.

#### 4.3. ZDECENTRALIZOWANE METODY DETEKCJI ZWARĆ DOZIEMNYCH

## 4.3.1. Uwagi ogólne

Współczesna sieć średniego napięcia cechuje się pewnym, niezbyt jeszcze wysokim, nasyceniem urządzeniami z grupy *smart grid*, do których można zaliczyć terminale i sterowniki polowe, reklozery, sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego czy inteligentne liczniki energii elektrycznej. Wprowadzenie do eksploatacji tych urządzeń spowodowało, że zaczęto proponować tzw. zdecentralizowane metody detekcji uszkodzeń, w tym zwłaszcza zwarć doziemnych. Ich idea jest taka, że lokalizacja odbywa się nie na podstawie sygnałów z jednego punktu pomiarowego (zwykle pola liniowego), lecz na podstawie pomiarów prowadzonych w wielu miejscach danej linii.



Rys. 4.6. Idea zdecentralizowanej lokalizacji miejsca zwarcia w sieci SN

Najważniejszą rolę w procesie lokalizacji pełnią sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego, które są w stanie wykryć zwarcie i wysłać odpowiedni sygnał o jego zaistnieniu do systemu nadzoru. Podstawowa idea zdecentralizowanej lokalizacji miejsca zwarcia przedstawiona jest na rysunku 4.6.

Lokalizacja zwarć w sieci SN bazująca na pomiarach realizowanych przez inteligentne liczniki energii elektrycznej (AMI) opiera się na analizie asymetrii napięć po stronie niskiego napięcia transformatorów rozmieszczonych wzdłuż linii SN. Podejście takie zaprezentowane jest w pracach [41], [77] oraz [104].

# 4.3.2. Lokalizacja zwarć z wykorzystaniem inteligentnych liczników energii elektrycznej

Z uwagi na fakt, że asymetria napięć jest w sieci rzeczą naturalną, o czym mowa np. w [51], w pracy [57] proponuje się stworzenie "odcisku palca" zdrowej sieci. W przypadku wystąpienia zwarcia ten "odcisk palca" stanowi punkt wyjścia i odniesienie do dalszych analiz stanu sieci. Na podstawie znajomości typowych właściwości zapadów napięcia przedstawianych w [10], rozróżnia się zwarcia doziemne od pozostałych typów zakłóceń. Metoda została zweryfikowana na 123-węzłowym modelu sieci dystrybucyjnej (rys. 4.7) i, zdaniem autorów, jest bardzo precyzyjna.



Rys. 4.7. 123-węzłowy model sieci dystrybucyjnej wg IEEE [37]

Żadna z przedstawionych powyżej metod nie została zweryfikowana w praktyce. Ponadto, w [41] podaje się, że algorytm jest słuszny tylko dla zwarć metalicznych. Podważa to jakąkolwiek skuteczność metod bazujących na pomiarach przez liczniki inteligentne. Jak na razie, inteligentne liczniki i infrastruktura pomiarowa AMI praktyczne zastosowanie znajdują tylko podczas detekcji i lokalizacji zwarć międzyfazowych [8].

Niemniej jednak, liczniki inteligentne mogą być źródłem bardzo istotnych informacji podczas wykrywania specyficznych zwarć, np. zwarć doziemnych z przerwą od strony zasilania [47].

4.3.3. Sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego

Kwestia sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego jest kluczowa dla niniejszej rozprawy. Wymagany jest zatem precyzyjny przegląd istniejących już rozwiązań, ze wskazaniem ich wad i zalet.

Rozwój sieci dystrybucyjnej w kierunku *smart grid* wymaga ich stosowania choćby ze względu na fakt, że OSD ma do dyspozycji dodatkowy zestaw urządzeń pomiarowych z tą właściwością, że mierzą one wybrane parametry elektryczne w głębi sieci.

Sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego są urządzeniami, które z sukcesem można stosować podczas lokalizacji zwarć doziemnych także w sieciach o istotnie rozgałęzionej strukturze. Naturalnymi miejscami, w których sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego mogą być instalowane, są stacje transformatorowe SN/nn, zwłaszcza wnętrzowe. Urządzenia tego typu można także instalować w miejscu zabudowy rozłączników napowietrznych, wyjątkowo mogą także pracować autonomicznie w dowolnym punkcie sieci SN.

Postępy w technologiach związanych z sygnalizatorami przepływu prądu zwarciowego sprawiły, że Międzynarodowy Komitet Elektrotechniki IEC powołał komitet techniczny TC 38, który zajmuje się m.in. standaryzacją sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego [13].

W niniejszym podrozdziale krótko omówione zostaną rozważania teoretyczne jak również rozwiązania praktyczne stosowane przez wybrane przedsiębiorstwa energetyczne i producentów sprzętu.

4.3.3.1. System Centralnego Sterowania Rozłącznikami

W 2015 roku w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej podjęto prace nad Systemem Centralnego Sterowania Rozłącznikami (SCSR). Z założenia system ten ma za zadanie sterować rozłącznikami zainstalowanymi w głębi sieci na podstawie sygnałów pomiarowych pochodzących tak z sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego, jak i z wybranych pól w rozdzielni SN. Zakłada się, że sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego, w celu uzyskania wyższej ich skuteczności, działają z kryterium admitancyjnym Y<sub>0</sub>>. Aby było to możliwe, niezbędnym jest wykorzystanie do uzyskania wiarygodnych danych pomiarowych o wartości składowej zerowej napięcia w sieci. W systemie SCSR wynik pomiaru składowej zerowej prądu przepływającej przez sygnalizator przepływu prądu zwarciowego jest przesyłany drogą radiową do rozdzielni SN, gdzie na podstawie stosownych obliczeń i z uwzględnieniem wartości  $U_0$  mierzonej przez sterownik polowy w polu pomiaru napięcia, podejmowana jest automatycznie decyzja o ewentualnym istnieniu zwarcia [53, 70].

Idea pracy sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego w sieci z systemem SCSR przedstawia rysunek 4.8.



Rys. 4.8. Sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego w systemie SCSR; *MV Switchgear* – rozdzielnia średniego napięcia, *U0 measurement* – pomiar składowej zerowej napięcia, *Y0 calculation* – obliczanie admitancji zerowej, *decission* – *Fault* – zwarcie, *decission* – *noFault* – brak zwarcia, *Fault current passage indicator* – sygnalizator przepływu prądu zwarciowego [53]

System SCSR nie został wdrożony, ale jego skuteczność i poprawność działania została potwierdzona badaniami symulacyjnymi w środowisku PSCAD.

4.3.3.2. System ENEL

ENEL jest największym włoskim koncernem energetycznym, który jest instytucją rządową, notowaną na Giełdzie Papierów Wartościowych w Mediolanie. Prowadzi swoją działalność w Europie, Ameryce Północnej oraz Ameryce Łacińskiej. Sieć dystrybucyjna ENEL zbudowana jest z ponad 350 tysięcy kilometrów linii średniego napięcia i pracuje w niej

2100 stacji WN/SN oraz ponad 448 tysięcy stacji SN/nn, przy czym około 30 % z nich jest połączona z systemem nadzoru.

Sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego w sieci tego operatora zaczęły być montowane ponad 20 lat temu i współcześnie w sieci eksploatowane są urządzenia różnych generacji, większość jednak produkowana jest przez ENEL lub zgodnie ze ścisłymi wytycznymi opracowanymi przez tą firmę. Urządzenia najnowszej, czwartej generacji, nazywane RGDM, są urządzeniami z funkcjami zabezpieczeń (np. do współpracy z reklozerami), sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego, pomiarowymi i sterowniczymi. Sprzęgane są z dwufunkcyjnymi sensorami pomiarowymi prądu i napięcia (rys. 4.9), które wg producenta cechują się klasą 0,2. Urządzenia typu RGDM posiadają zintegrowaną obsługę protokołu IEC 61850. Opracowany przez ENEL system, w zakresie detekcji zwarć doziemnych, posiada zestaw różnych kryteriów zabezpieczeniowych. Podawane jest, że system cechuje się wysoką skutecznością detekcji doziemień, jednak wymaga to analizy danych pochodzących z kilku tysięcy zainstalowanych w całej sieci operatora sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego i terminali polowych w polach liniowych [13].

Celem ENEL jest montaż sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego przy każdym łączniku w głębi sieci SN [14].



Rys. 4.9. Dwa różne prototypy zintegrowanych sensorów prądu i napięcia stosowane przez ENEL [13]

# 4.3.3.3. Wieloczęstotliwościowe zabezpieczenie admitancyjne do detekcji zwarć doziemnych ABB

Szwajcarski koncern ABB powstał ponad 30 lat temu poprzez fuzję szwedzkiej firmy ASEA oraz szwajcarskiej Brown, Boveri & Cie. Pierwsze z przedsiębiorstw znane było z budowy linii wysokich i najwyższych napięć, a drugie przede wszystkim z produkcji urządzeń wyposażenia elektrowni. Współcześnie koncern obecny jest w wielu gałęziach przemysłu, w tym także w elektroenergetyce, produkując m.in. urządzenia związane z elektroenergetyczną automatyką zabezpieczeniową.

W pracy [5] zaprezentowano koncepcję wykorzystania sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego w skompensowanych sieciach SN. Urządzenia dokonują pomiarów składowej zerowej prądu i napięcia w stacjach SN/nn. Do detekcji używane jest wieloczęstotliwościowe kryterium admitancyjne, które, zdaniem autorów, pozwala wykrywać zwarcia doziemne o rezystancji przejścia równej  $R_{\rm F} = 10$  k $\Omega$ .

Do lokalizacji miejsca zwarcia wykorzystywana jest metoda kombinowana, z jednej strony bazująca na pomiarze reaktancji pętli zwarciowej, a z drugiej wykorzystująca informacje z sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego. Idea ta przedstawiona jest na rysunku 4.10.



Rys. 4.10. Idea systemu lokalizacji zwarć doziemnych w systemie ABB; Estimated reactance is 10 Ohms, or distance 30 km based on given Ohm/km setting – estymowana reaktancja jest równa 10 Ω lub odległość na podstawie podanej wartości Ω/km jest równa 30 km, The corresponding fault locations and distances are shown on the map – odpowiadające lokalizacje zwarć i odległości pokazane na mapie, Subsation level analysis (relay) – analiza na poziomie rozdzielni, Control room level analysis (DMS) – analiza w systemie DMS [5]

Sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego do detekcji zwarć doziemnych wykorzystują wieloczęstotliwościowe kryterium admitancyjne, które pozwala z dużą skutecznością wykrywać także zwarcia przerywane. Algorytm opiera się na uwzględnieniu

zarówno składowej podstawowej sygnału, jak i wyższych harmonicznych w formie sumy admitancji dla składowych zerowych wg zależności:

$$\underline{Y}_{0sum} = Re\{\underline{Y}_{0}^{(1)}\} + j \cdot Im\left\{\underline{Y}_{0}^{(1)} + \sum_{n=2}^{m} \underline{Y}_{0}^{(n)}\right\}$$
(3.9)

gdzie

$$\underline{Y}_{0}^{(1)} = \frac{\underline{I}_{0}^{(1)}}{-\underline{U}_{0}^{(1)}}$$
(3.10)

to składowa zerowa admitancji dla częstotliwości podstawowej, a

$$\underline{Y}_{0}^{(n)} = \frac{\underline{I}_{0}^{(n)}}{-\underline{U}_{0}^{(n)}}$$
(3.11)

to składowa zerowa admitancji dla *n*-tej harmonicznej. Algorytm opisany zależnością (3.3) jest wykorzystywany w procedurze wyznaczania tzw. kumulacyjnej sumy fazorowej (ang. *CPS – Cumulative Phasor Sum*), który polega na sumowaniu fazorów admitancji dla składowej zerowej w czasie. Zasadę działania algorytmu przedstawia rysunek 4.11. Wyliczony, skumulowany fazor, cechuje się stabilnym wskazaniem kierunku zwarcia, także w przypadku zwarć przerywanych.



Rys. 4.11. Zasada działania algorytmu CPS [107]

Przedstawiona metoda została pomyślnie przetestowana w trakcie prób terenowych, w trakcie których zarejestrowano ponad 60 zwarć doziemnych o rezystancjach przejścia z zakresu od  $R_{\rm F} = 0 \Omega$  do  $R_{\rm F} = 6.2 \text{ k}\Omega$  [5].

4.3.3.4. Podejście wykorzystujące składową przeciwną prądu

Wykorzystanie składowych przeciwnych prądu i napięcia było już wcześniej wspominane w związku z ich pomiarem przez inteligentne liczniki energii elektrycznej.

W przypadku sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego o ich potencjalnym użyciu mówi się w pracy [48], w której autorzy przedstawiają w zasadzie trzy różne metody, ale interesująca jest tylko jedna z nich. Stwierdza się w niej, że zasadniczo istnienie zwarcia doziemnego w linii można wykryć poprzez obserwację tylko składowej zerowej prądu, z czym można zgodzić się jedynie w przypadku sieci z izolowanym punktem neutralnym. Problem ten jest w pracy zauważony, proponowane jest rozwiązanie w postaci jednoczesnego pomiaru składowej przeciwnej i zerowej, a potem ich porównanie. W miejscu zwarcia wszystkie trzy składowe symetryczne są równe. W odcinku linii między stacją zasilającą a miejscem zwarcia występują nieznaczne zmiany wartości składowej przeciwnej  $I_2$  a za miejscem zwarcia w zasadzie ona nie występuje.

Przedstawiona metoda weryfikowana jest tylko symulacyjnie, a podczas prezentowania wyników symulacji nie są przedstawiane przebiegi  $I_2$  za miejscem zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego, ani nawet wartości tej składowej. Niemniej jednak metoda wydaje się być interesującą i możliwą do wykorzystania w rzeczywistej sieci.

4.3.3.5. Klasyczne kryteria ziemnozwarciowe

W warunkach krajowych prawie wszystkie pracujące w sieci oraz oferowane przez producentów i dystrybutorów sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego urządzenia zaimplementowane mają standardowe algorytmy ziemnozwarciowe, od lat stosowane w terminalach i sterownikach polowych pracujących w polach rozdzielni średniego napięcia. Są to kryteria jedno- i wielowielkościowe.

Spośród kryteriów jednowielkościowych najbardziej rozpowszechnione jest kryterium zerowoprądowe  $I_0$ >, które z powodzeniem może być stosowane w sieci pracującej z izolowanym punktem neutralnym, jeśli udział prądu pojemnościowego linii za miejscem jego zainstalowania nie przekracza wartości ok. 0,3. W przypadku sieci skompensowanej kryterium może być zastosowane tylko w kilku określonych sytuacjach przy spełnionym warunku czułości – prąd pojemnościowy linii za miejscem zainstalowania urządzenia z kryterium  $I_0$ > musi być bardzo mały, a sieć stosunkowo mocno przekompensowana. Warto zauważyć, że

kryterium I<sub>0</sub>> jest bardzo czułe na wartość rezystancji przejścia w miejscu zwarcia [30, 51]. Zakres możliwych, wykrywalnych rezystancji przejścia w sieci skompensowanej (w funkcji współczynnika udziału *a*) oraz uziemionej przez rezystor (w funkcji współczynnika tłumienia  $d_0$ ) przedstawiają rysunki 4.12 i 4.13.

Zastosowanie kryteriów zerowoprądowych jest dla zwarć oporowych bardzo mocno ograniczone. W sieci skompensowanej i z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor daje ono możliwości wykrycia tego typu uszkodzeń tylko dla linii lub fragmentów linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego o bardzo małej wartości prądu pojemnościowego.



Rys. 4.12. Graniczna wartość wykrywanych rezystancji przejścia podczas zwarć doziemnych w sieci skompensowanej z AWSCz przy założeniu, że prąd pojemnościowy sieci  $I_{CS} = 100 \text{ A} [72]$ 



Rys. 4.13. Graniczna wartość wykrywanych rezystancji przejścia podczas zwarć doziemnych w sieci uziemionej przez rezystor przy założeniu, że prąd pojemnościowy sieci  $I_{CS} = 120 \text{ A} [72]$ 

Kryteria ziemnozwarciowe zwykle dwuwielkościowe, bazujące na pomiarze admitancji doziemnej sieci i jej składowych w trakcie występowania zwarcia. Tego typu kryteria, opracowane w latach 80. XX wieku przez prof. J. Lorenca z Politechniki Poznańskiej, cechują się wysoką skutecznością i stosunkowo prostą implementacją w urządzeniach zabezpieczeniowych [51, 52, 54, 71, 74].

Wśród kryteriów z rodziny admitancyjnych wyróżnia się:

- kryterium nadmiarowo admitancyjne Y<sub>0</sub>>,
- kryterium konduktancyjne bezkierunkowe G<sub>0</sub>>,
- kryterium konduktancyjne kierunkowe  $G_{0k}$ >,
- kryterium susteptancyjne kierunkowe B<sub>0k</sub>>,
- kryterium porównawczo admitancyjne YY<sub>0</sub>>.

Spośród wymienionych kryteriów tylko kryterium porównawczo admitancyjne YY0> nie może być stosowane w sygnalizatorach przepływu prądu zwarciowego.

Kryterium nadmiarowo konduktancyjne Y<sub>0</sub>>, którego charakterystyka przedstawiona jest na rys. 4.14, cechuje się jedną bardzo istotną właściwością - mierzona admitancja jest niezależna od wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia, co umożliwia zastosowanie kryterium w wielu szczególnych przypadkach, np. w sieci skompensowanej o bardzo małym prądzie pojemnościowym (kilka amperów). Kryterium Y<sub>0</sub>> jest polecane do stosowania w sieciach z rezystorem w punkcie neutralnym oraz uziemionych przez układ równoległy dławika i rezystora.



Rys. 4.14. Charakterystyka rozruchowa kryterium nadmiarowo admitancyjnego Y<sub>0</sub>> – rozruch dla  $|Y_{0p}| > Y_{0nast}$  oraz  $U_{0p} > U_{0nast}$ , indeksem "p" oznaczono wartość pomiarową; kreskowaniem zaznaczono obszar zadziałania [51]

Kryterium konduktancyjne bezkierunkowe  $G_0$ >, którego charakterystyka rozruchowa jest przedstawiona na rysunku 4.15, ma szereg bardzo ważnych zalet. Przede wszystkim, nastawa tego kryterium jest niezależna od wartości prądu pojemnościowego linii za miejscem jego zainstalowania i w związku z tym, kryterium jest także nieczułe na zmiany wartości parametrów ziemnozwarciowych. Nie ma konieczności fazowania obwodów pomiarowych. Można, dokonując prostej analizy, wyznaczyć jedną, uniwersalną (ale zależną np. od konstrukcji urządzeń) nastawę dla wszystkich sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego w sieci (jak w pracy [73]). Poza siecią skompensowaną kryterium znajduje zastosowanie także w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor oraz układ równoległy dławika i rezystora [51].



Rys. 4.15. Charakterystyka rozruchowa kryterium konduktancyjnego bezkierunkowego  $G_0 > -$  rozruch dla  $|G_{0p}| > G_{0nast}$  oraz  $U_{0p} > U_{0nast}$ , indeksem "p" oznaczono wartość pomiarową; kreskowaniem zaznaczono obszar zadziałania [51]

Kryterium susceptancyjne kierunkowe  $B_{0k}$ >, którego charakterystykę rozruchową przedstawiono na rysunku 4.16, jest możliwe do zastosowania w sieciach z izolowanym punktem neutralnym lub z zastosowaną dekompensacją. Może być też stosowane jako kryterium rezerwowe w sieciach z innymi sposobami pracy p.n., w których dopuszcza się możliwość pracy sieci z wyłączonym polem transformatora uziemiającego [30, 51].



Rys. 4.16. Charakterystyka rozruchowa kryterium susceptancyjnego kierunkowego  $B_{0k}$ > - rozruch dla  $G_{0p} > G_{0nast}$  oraz  $U_{0p} > U_{0nast}$ , indeksem "p" oznaczono wartość pomiarową; kreskowaniem zaznaczono obszar zadziałania [51]

Zastosowanie kryteriów z grupy admitancyjnych w sygnalizatorach przepływu prądu zwarciowego wymaga tego, aby takie urządzenia, poza składową zerową prądów, miały dostęp także do wyników pomiaru składowej zerowej napięcia. Fazor  $U_0$  może być zarówno mierzony w miejscu zainstalowania sygnalizatora, jak i przesyłany do niego z innego, dowolnego miejsca sieci i wykorzystywany do niezbędnych obliczeń. Ta druga teoria przedstawiana jest np. w [53].

4.3.4. Metody bazujące na dodatkowych sygnałach wprowadzanych do sieci

W literaturze spotykane są zdecentralizowane metody lokalizacji zwarć doziemnych w sieci średniego napięcia bazujące na wprowadzaniu w punkcie neutralnym sieci dodatkowych sygnałów, zarówno w postaci impulsów jak i sygnałów ciągłych o częstotliwości innej niż sieciowa. Potocznie o sygnałach wprowadzanych do sieci mówi się, że są do niej "wstrzykiwane".

Idea metod, niezależnie od specyficznych rozwiązań jest jednakowa i przedstawia ją rysunek 4.17. Pomysł bazuje na tym, że dodatkowy, wstrzykiwany sygnał, zamyka się tylko w obwodzie linii doziemionej.



Rys. 4.17. Idea metod bazujących na "sygnałach wstrzykiwanych" [19]

W pracy [19] autorzy proponują wprowadzanie dodatkowego sygnału w postaci przebiegu prostokątnego o wysokiej częstotliwości. Klasyczne podejście, także opisywane przez autorów, bazuje na wprowadzaniu sygnału prostokątnego o okresie ok. 1 s, który uzyskiwany jest przez cykliczne załączanie i wyłączanie baterii kondensatorów połączonych w punkcie neutralnym równolegle do cewki uziemiającej. Jak to zostało już wcześniej napisane, sygnał prostokątny propaguje tylko poprzez linię doziemioną. Lokalizacja uszkodzonego segmentu linii odbywa się poprzez "poszukiwanie" wstrzykniętego sygnału przez sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego. Metoda wydaje się być efektywna, jednak posiada jedną zasadniczą wadę – aby skutecznie zlokalizować zwarcie musi być ono utrzymywane przez co najmniej 25 sekund. Tak długi czas trwania zwarcia wiąże się z bardzo ostrymi wymaganiami związanymi z uziemieniami w sieci, stąd zastosowanie tej metody w praktyce jest w zasadzie niemożliwe.

Z uwagi na to ograniczenie w [19] proponowane jest zastosowanie wstrzykiwanego sygnału prostokątnego o znacznej częstotliwości, co istotnie poprawia czas trwania lokalizacji zwarcia, który określany jest na maksymalnie 1 sekundę. Metoda została przetestowana podczas prób terenowych i deklarowana jest jej skuteczność dla zwarć o rezystancji przejścia do 10 k $\Omega$ .

W pracy [11] dokonywany jest przegląd metod lokalizacji zwarć doziemnych bazujących na sygnałach "wstrzykiwanych", wśród których szczególnie wyróżnia się metodę opisaną w pracy [90]. Algorytm tam przedstawiony został opracowany dla sieci

skompensowanych i zakłada wstrzykiwanie w punkcie neutralnym prądu o amplitudzie 1 A i częstotliwości 183 Hz. Lokalizacja zwarć jest realizowana z wykorzystaniem czujników pola magnetycznego dostrojonych do częstotliwości wprowadzanego prądu. Metoda jest bardzo prosta, ale skuteczna tylko w przypadku zwarć niskorezystancyjnych.

# 4.4. WNIOSKI DO ROZDZIAŁU

Większość przedstawionych w tym rozdziale metod to rozwiązania eksperymentalne, które nie znalazły i nie znajdą szerszego zastosowania w praktyce, a część z nich była testowana tylko obliczeniowo.

Wydaje się, że najbardziej obiecującą technologią lokalizacji zwarć są metody wykorzystujące sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego. Wśród przedstawionych metod można znaleźć implementacje z rzeczywistych sieci. Zasadniczą wadą metod z sygnalizatorami przepływu prądu zwarciowego jest fakt, że można z ich pomocą określić tylko uszkodzony fragment sieci, a nie wskazać precyzyjnie miejsce zwarcia. Nie jest to jednak poważny problem, ponieważ lokalizacja odcinkowa, z punktu widzenia eksploatacji sieci, jest wystarczająca.

W celu ułatwienia porównania metod omówionych w tym rozdziale, ich główne cechy zestawiono w tablicy 4.1.

# Tablica 4.1.

# Główne cechy wybranych metod lokalizacji zwarć doziemnych

	Metody impedancyjne	Metody falowe	Metody wykorzystujące "wstrzykiwanie"	Sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego
Główne zalety	<ul> <li>prosta implementacja</li> <li>stosunkowo niski koszt wdrożenia</li> </ul>	<ul> <li>stosunkowo prosta implementacja</li> <li>dobrze rozpoznana teoria</li> <li>teoretycznie wysoka dokładność</li> </ul>	<ul> <li>zweryfikowane w praktyce</li> <li>do lokalizacji uszkodzonego odcinka wystarczy tylko pomiar prądu wzdłuż linii</li> </ul>	<ul> <li>zweryfikowane w praktyce</li> <li>zwykle wysoka dokładność</li> </ul>
Główne wady	<ul> <li>brak przekonującej weryfikacji w sieci skompensowanej</li> <li>skuteczność zależna od szacowanych parametrów linii</li> </ul>	<ul> <li>nieskuteczna w liniach z licznymi rozgałęzieniami</li> <li>bardzo ograniczone doświadczenia w sieci średniego napięcia</li> </ul>	<ul> <li>wykrywane raczej niewielkie rezystancji przejścia, pomimo różnych deklaracji badaczy</li> <li>wybrane metody są wolne</li> </ul>	<ul> <li>metody wymagają znacznej liczby urządzeń instalowanych wzdłuż linii</li> </ul>
Stosowanie w sieci skompensowanej	nie	nie, metoda, z uwagi na strukturę sieci, właściwie nie nadaje się do stosowania w sieci SN	tak	tak
Zweryfikowane przez próby terenowe	częściowo	nie	tak	tak
Dodatkowe wymagania	<ul> <li>wymagają precyzyjnych pomiarów</li> <li>wymagają precyzyjnej znajomości struktury sieci</li> </ul>	<ul> <li>w wybranych rozwiązaniach wymagana rozbudowana infrastruktura</li> <li>wysoki koszt urządzeń z uwagi na ich skomplikowanie</li> </ul>	<ul> <li>wymagają ingerencji w urządzenia w punkcie neutralnym sieci</li> <li>wymagają rozbudowanej komunikacji</li> <li>sensory wzdłuż linii</li> </ul>	<ul> <li>wymagają stosowania co najmniej sensorów prądu</li> <li>wymagana pewna komunikacja</li> </ul>
Dalsze perspektywy	po wielu niezadowalających podejściach do realizacji – perspektywy mało obiecujące	możliwa do stosowania w bardzo specyficznych układach sieciowych – linie bez odczepów.	możliwe do stosowania w sieci skompensowanej	metody lokalizacji zwarć doziemnych wykorzystujące sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego będą coraz powszechniejsze

# w sieci średniego napięcia

Z uwagi na korzystne cechy związane z lokalizacją zwarć należy spodziewać się wzrostu liczby zainstalowanych sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego w sieciach średniego napięcia. Trend ten jest już obserwowany.

# 5. CEL, TEZA I ZAKRES ROZPRAWY

Kluczowym zadaniem wszystkich współcześnie działających operatorów systemu dystrybucyjnego jest takie zarządzanie ich siecią, aby jakość dostarczanej energii była możliwie wysoka. Jednym z kryteriów oceny tej jakości są współczynniki związane z niezawodnością pracy sieci (podr. 2.4). Metod ich minimalizacji jest wiele, jednak do najbardziej skutecznych zaliczają się działania prowadzące do szybkiej lokalizacji zwarć. Bardzo skutecznym środkiem do realizacji tych zadań jest instalacja dużej liczby sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego (roz. 3, 4). W celu uzyskania uzyskać odpowiednich rezultatów tych działań należy stosować urządzenia wysokiej jakości, z odpowiednio dobranymi metodami pomiaru wielkości kryterialnych oraz algorytmami decyzyjnymi.

Szczególnie dużym problemem dla sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego jest detekcja doziemnych zwarć wysokooporowych.

Dotychczas opracowane i szeroko dostępne na rynku sygnalizatory przepływu prądów zwarciowych przeznaczone do pracy w sieci średniego napięcia wykrywają doziemienia w oparciu o analizę wartości chwilowej lub skutecznej składowej zerowej prądu. Istnieją także koncepcje urządzeń, które do detekcji wykorzystują admitancję i jej składowe, jednak bazują na skomplikowanych układach pomiarowych, których koszt nierzadko przekracza cenę samego sygnalizatora.

Głównym **celem** niniejszej rozprawy jest opracowanie algorytmów pomiarowych i decyzyjnych do zastosowania w przede wszystkim w sygnalizatorach przepływu prądu zwarciowego, które byłyby możliwie tanie i proste w konstrukcji, a zapewniłyby wykrywanie zwarć doziemnych o szerszym spektrum rezystancji przejścia w stosunku do stanu obecnego, tym samym umożliwiłyby pewną i skuteczną detekcję zwarć wysokooporowych.

W rozprawie stawia się następującą tezy:

- wysoką efektywność pracy sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego można uzyskać przez zastosowanie adaptacyjnych kryteriów ziemnozwarciowych, których nastawy w sposób dynamiczny mogą być dopasowane do warunków napięciowych powstałych w sieci podczas doziemienia,
- w celu ograniczenia kosztu jednostkowego sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego wyposażonego w kryteria adaptacyjne poziom składowej zerowej napięcia sieci można określać w oparciu o analizę napięcia rejestrowanego tylko w jednej fazie,

3) zastosowanie uproszczonego układu szacowania poziomu składowej zerowej napięcia umożliwia niskokosztowo zaimplementować w sygnalizatorach przepływu prądu zwarciowego kryteria admitancyjne, których skuteczność w detekcji doziemień będzie wyższa niż kryteriów nadprądowych zerowych.

Do realizacji celu rozprawy oraz weryfikacji postawionych tez określono **zakres rozprawy**, na który składają się cztery główne zadania:

- ocena skuteczności współcześnie stosowanych sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego podczas zakłóceń ziemnozwarciowych,
- 2) opracowanie kryteriów adaptacyjnych do detekcji wysokooporowych zwarć doziemnych, których idea bazować będzie na zmianie wartości nastawczej prądu w zależności od wartości składowej zerowej napięcia w sieci, do zastosowania w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor oraz w sieci skompensowanej,
- opracowanie uproszczonych metod wyznaczania składowej zerowej napięcia, wykorzystujących sygnały pochodzące z jednego sensora napięciowego do pomiaru napięcia fazy względem ziemi oraz transformatora potrzeb własnych dowolnego urządzenia zainstalowanego w głębi sieci średniego napięcia,
- analiza skuteczności kryterium admitancyjnego do detekcji wysokooporowych zwarć doziemnych, który wykorzysta nowe metody wyznaczania składowej zerowej napięcia z punktu 3.

## 6. UPROSZCZONE METODY WYZNACZANIA SKŁADOWEJ ZEROWEJ NAPIĘCIA

#### 6.1. INFORMACJE OGÓLNE

We współczesnej sieci średniego napięcia podstawowym źródłem pomiaru składowej zerowej napięcia jest znany od dawna tzw. układ otwartego trójkąta klasycznych przekładników napięciowych. Z uwagi na jego powszechność, jest to układ bardzo dobrze rozpoznany. Cechuje się przede wszystkim wysoką jakością pomiaru, przy czym rozumie się przez to przede wszystkim niewielkie błędy, praktycznie brak szumu pomiarowego czy stabilność temperaturową uzyskiwanych wyników.

W układzie otwartego trójkąta wykorzystywane są trzy indukcyjne przekładniki napięciowe. Strony pierwotne tych przekładników połączone są w gwiazdę, której punkt gwiazdowy jest uziemiony. Strona wtórna układu połączona jest w otwarty trójkąt – do układu można wpiąć woltomierz (lub np. przekaźnik nadnapięciowy), który mierzy sumę trzech fazorów napięć faz względem ziemi. Suma ta jest równa potrojonej wartości składowej zerowej napięcia w sieci w danej chwili. Schemat przekładników napięciowych połączonych w układ otwartego trójkąta przedstawia rysunek 6.1.



Rys. 6.1. Układ otwartego trójkąta przekładników napięciowych i napięcia mierzone podczas zwarcia doziemnego w sieci SN [56]

Idea innych znanych metod bezpośredniego pomiaru składowej zerowej napięcia w sieci SN jest przedstawiona na rysunku 6.2. Metody wykorzystujące gwiazdę pojemności i gwiazdę impedancji są do siebie zbliżone. Tworzony jest "sztuczny" punkt neutralny z wykorzystaniem trzech jednakowych pojemności lub impedancji. Wymagana jest tutaj odpowiednia kalibracja woltomierza, a zastosowane komponenty muszą być przede wszystkim stabilne termicznie.



Rys. 6.2. Pomiar składowej zerowej napięcia z wykorzystaniem gwiazdy pojemności (a) i gwiazdy impedancji (b) [66]

Składową zerową napięcia (także prądu) można wyznaczyć także metodą analityczną, znając wartości chwilowe napięć fazowych oraz posługując się transformatą Fortescue'a.

Zgodnie z podaną przez Fortescue'a [29, 59, 106] teorią składowych symetrycznych, każdy system trójfazowych wielkości sinusoidalnych niesymetrycznych fazowych lub międzyfazowych (przewodowych), reprezentowanych przez fazory  $X_{L1}$ ,  $X_{L2}$  i  $X_{L3}$  (z następstwem faz L1 – L2 – L3), których moduły jak i wzajemne przesunięcia fazowe mogą być różne, można rozłożyć na:

- składowe symetryczne  $X_{L1_1}$ ,  $X_{L2_1}$ ,  $X_{L3_1}$  o kolejności faz zgodnej z kolejnością faz wielkości dekomponowanych,
- na składowe symetryczne  $X_{L1_2}$ ,  $X_{L2_2}$ ,  $X_{L3_2}$  o kolejności przeciwnej (L1 L3 L2) w stosunku do następstwa wielkości fazowych pierwotnych,
- składowe symetryczne  $X_{L1_0}$ ,  $X_{L2_0}$ ,  $X_{L3_0}$  o kolejności zerowej, wykazujące przesunięcia fazowe równe wielokrotności kąta pełnego.

Teorię tą w postaci ogólnej przedstawiają następujące zależności:

$$\begin{bmatrix} \underline{X}_{L1} \\ \underline{X}_{L2} \\ \underline{X}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{X}_{L1_{-1}} + \underline{X}_{L1_{-2}} + \underline{X}_{L1_{-0}} \\ \underline{X}_{L2_{-1}} + \underline{X}_{L2_{-2}} + \underline{X}_{L2_{-0}} \\ \underline{X}_{L3_{-1}} + \underline{X}_{L3_{-2}} + \underline{X}_{L3_{-0}} \end{bmatrix}$$

oraz:

$$\begin{bmatrix} \underline{X}_{L1} \\ \underline{X}_{L2} \\ \underline{X}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{X}_{L1\_1} \\ \underline{X}_{L1\_2} \\ \underline{X}_{L1\_0} \end{bmatrix}.$$
(6.2)

Wszystkie wielkości występujące we wzorach (6.1) i (6.2) są fazorami zespolonymi (oznaczone są podkreśleniem), przy czym operator obrotu

$$\underline{a} = e^{j\frac{2}{3}\pi}.$$

Operator <u>a</u> powoduje obrót fazora o kąt  $\frac{2}{3}\pi$  w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara.

Przechodząc na mniejszy stopień ogólności jest:

$$\underline{U}_{0} = \frac{1}{3} \left( \underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L3} \right)$$

$$\underline{U}_{1} = \frac{1}{3} \left( \underline{U}_{L1} + \underline{a}\underline{U}_{L2} + \underline{a}^{2}\underline{U}_{L3} \right)$$

$$\underline{U}_{2} = \frac{1}{3} \left( \underline{U}_{L1} + \underline{a}^{2}\underline{U}_{L2} + \underline{a}\underline{U}_{L3} \right)$$
(6.3)

Sumując zatem fazory napięcia faz względem ziemi w danej chwili można otrzymać drogą analityczną wartość potrojonej składowej zerowej napięcia. Sposób taki jest szeroko stosowany we współczesnej automatyce zabezpieczeniowej, w szczególności w przypadku urządzeń zainstalowanych w głębi sieci.



Rys. 6.3. Sensor pomiarowy SP-1 prod. ZPUE Włoszczowa [109]

Rysunek 6.3 przedstawia popularny w polskiej sieci dystrybucyjnej układ sensorów pomiarowych typu SP-1 produkcji ZPUE Włoszczowa, który umożliwia pomiar trzech prądów fazowych oraz trzech napięć fazy względem ziemi, które to sygnały służą potem do wyznaczania składowych zerowych z wykorzystaniem transformaty Fortescue'a.

Wszystkie przedstawione wyżej metody cechują się wysoką jakością pomiaru, w szczególności uwaga ta dotyczy metody z wykorzystaniem klasycznego układu otwartego trójkąta przekładników napięciowych.

W niniejszej rozprawie nacisk położony jest na detekcję zwarć doziemnych przez sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego zainstalowane w linii napowietrznej, z dala od pola liniowego w rozdzielni średniego napięcia. Fakt ten rodzi choćby takie konsekwencje, że instalacja trzech przekładników napięciowych i połączenie ich w układ otwartego trójkąta jest utrudnione z uwagi na gabaryty urządzeń i ich ciężar – jeden typowy przekładnik napięciowy waży kilkadziesiąt kilogramów.

Ponadto należy zauważyć, że w sieci SN zainstalowanych jest obecnie dość dużo sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego, które wyposażone są tylko w układy pomiarowe prądu. Jak pokazują analizy przedstawione np. w [72], takie sygnalizatory nie spełniają swojej roli w sieci skompensowanej, mają także stosunkowo wąskie spektrum wykrywanych rezystancji przejścia w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor.

Ponieważ kryteria z grupy admitancyjnych są w ogólnej ocenie bardziej skuteczne od kryterium zerowoprądowego [51, 52], rodzi się problem doposażenia już istniejących urządzeń w układy pomiaru składowej zerowej napięcia. Jak wyżej wspomniano, instalacja przekładników napięciowych nie zawsze jest możliwa. Sensory pomiarowe, np. SP-1, są za to rozwiązaniem stosunkowo kosztownym. Można jednak wyznaczyć składową zerową napięcia innymi metodami, które zostały opracowane przez autora jako element tej rozprawy:

- 1) metodą z wykorzystaniem pomiaru jednego napięcia fazy względem ziemi  $\underline{U}_{Lp}$ ,
- metodą z wykorzystaniem pomiaru jednego napięcia fazy względem ziemi <u>U</u><sub>Lp</sub> i jednego napięcia międzyfazowego <u>U</u><sub>L-Lp</sub>.

Obie te metody są szczególnie polecane do implementacji w takiej sytuacji, gdzie sygnalizator przepływu prądu zwarciowego jest już zainstalowany, jednak cechuje się niską jakością działania z uwagi na fakt niedostatecznie skutecznych kryteriów ziemnozwarciowych wykorzystujących tylko składową zerową prądu.

### 6.2. Metoda pomiaru $U_0$ z wykorzystaniem jednego napięcia fazy względem ziemi

## 6.2.1. Podstawa teoretyczna

Wystąpienie zwarcia doziemnego w sieci średniego napięcia rozpoznawane jest na podstawie zmiany wartości składowej zerowej napięcia w sieci. Przed wystąpieniem zwarcia wartość tej składowej zależy tylko od asymetrii naturalnej sieci i jest równa co najwyżej kilka procent napięcia fazowego sieci. Podczas zwarcia doziemnego wartości napięć faz względem ziemi zmieniają się, przy czym skala tego zjawiska zależy od wartości impedancji przejścia w miejscu zwarcia  $Z_F$ . Ponieważ jednak impedancja ma zwykle charakter czysto rezystancyjny, można przyjąć pewne uproszczenie i zakładać, że  $Z_F = R_F$ . W celu wyjaśnienia zjawiska należy rozpatrzyć układ sieci, którego uproszczony schemat przedstawiono na rysunku 6.3.



Rys. 6.4. Uproszczony schemat rozpatrywanego fragmentu systemu dla składowych symetrycznych , sieć z punktem neutralnym uziemionym przez impedancję

Jeśli założy się uproszczenia polegające na tym, że:

 impedancje gałęzi wzdłużnych linii i transformatora oraz impedancja zastępcza systemu są dużo mniejsze niż impedancja gałęzi poprzecznych na schemacie, – impedancja  $\underline{Z}_N$  uziemiająca punkt neutralny jest duża w porównaniu z impedancją gałęzi wzdłużnych linii i transformatora oraz impedancją zastępczą systemu,

to schemat z rysunku 6.4 można odwzorować uproszczonym schematem dla składowych symetrycznych przedstawionym na rysunku 6.5.



Rys. 6.5. Uproszczony schemat dla składowych symetrycznych w przypadku zwarcia jednofazowego w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez impedancję z połączeniem równoległych pojemności

Zakładając, że zwarcie jest w fazie L1 oraz napięcie fazy L1 względem ziemi przed wystąpieniem zwarcia jest równe:

$$\underline{U}_{L1}^0 = +jE \tag{6.4}$$

gdzie *E* to siła elektromotoryczna źródła, to składowe symetryczne napięć w obwodzie jak na rysunku 6.5 mogą zostać wyrażone wzorami [42]:

$$\underline{U}_{0} = -\underline{Z}_{0}\underline{I}_{0} = \frac{\underline{Z}_{0}}{\underline{Z}_{0} + 3R_{F}}\underline{U}_{L1}^{0}$$

$$\underline{U}_{1} = \underline{U}_{L1}^{0}$$

$$\underline{U}_{2} = 0$$
(6.5)

gdzie  $\underline{Z}_0$  wyraża impedancję obwodu zwarciowego dla składowej zerowej, w której skład wchodzi impedancja uziemienia punktu neutralnego i reaktancja pojemnościowa sieci.

Napięcia fazy względem ziemi w każdej chwili, zgodnie z teorią składowych symetrycznych, są równe:

$$\underline{U}_{L1} = \underline{U}_0 + \underline{U}_1 + \underline{U}_2$$

$$\underline{U}_{L2} = \underline{U}_0 + \underline{a}^2 \underline{U}_1 + \underline{a} \underline{U}_2$$

$$\underline{U}_{L3} = \underline{U}_0 + \underline{a} \underline{U}_1 + \underline{a}^2 \underline{U}_2.$$
(6.6)

Zatem:

$$\underline{U}_{L1} = \underline{U}_{0} + \underline{U}_{1} = \underline{U}_{L1}^{0} + \frac{\underline{Z}_{0}}{\underline{Z}_{0} + 3R_{F}} \underline{U}_{L1}^{0} 
\underline{U}_{L2} = \underline{a}^{2} \underline{U}_{L1}^{0} + \frac{\underline{Z}_{0}}{\underline{Z}_{0} + 3R_{F}} \underline{U}_{L1}^{0} 
\underline{U}_{L3} = \underline{a} \underline{U}_{L1}^{0} + \frac{\underline{Z}_{0}}{Z_{0} + 3R_{F}} \underline{U}_{L1}^{0}.$$
(6.7)

Zauważając, że przy założeniu symetryczności napięć fazowych względem ziemi:

$$\underline{a}^2 \underline{U}_{L1}^0 = \underline{U}_{L2}^0 \tag{6.8}$$

oraz

$$\underline{aU}_{\mathrm{L}1}^{0} = \underline{U}_{\mathrm{L}3}^{0} \tag{6.9}$$

dochodzi się do wniosku, że wektory napięć fazowych względem ziemi po wystąpieniu zwarcia doziemnego są tożsame wektorom napięć fazowych względem ziemi sprzed zwarcia zsumowanymi z wektorem składowej zerowej napięcia. Wówczas prawdą jest, że:

$$\underline{U}_{0} = \underline{U}_{L1k} - \underline{U}_{L1}^{0}$$

$$\underline{U}_{0} = \underline{U}_{L2k} - \underline{U}_{L2}^{0}$$

$$\underline{U}_{0} = \underline{U}_{L3k} - \underline{U}_{L3}^{0}$$
(6.10)

gdzie indeksem "k" oznaczono fazor mierzony po wystąpieniu zwarcia. Sytuacja przedstawiona jest na rysunkach 6.6 oraz 6.7.





Rys. 6.6. Wektory napięć fazy względem ziemi w sieci nieobjętej zwarciem doziemnym – przypadek idealny

Rys. 6.7. Wektory napięć fazy względem ziemi w sieci ze zwarciem doziemnym w fazie L1, przy czym  $R_{\rm F} \neq 0$ 

Zależności (6.10) są prawdziwe niezależnie od fazy, w której wystąpiło zwarcie, rezystancji przejścia w miejscu zwarcia czy parametrów obwodu zwarciowego dla składowej zerowej.

Można zatem, mierząc tylko jedno napięcie fazy względem ziemi, wyznaczyć wektor składowej zerowej napięcia w danym miejscu sieci. Wyznaczenie takie polega na odjęciu wektora napięcia danej fazy względem ziemi po wystąpieniu zwarcia od wektora napięcia danej fazy względem ziemi przed wystąpieniem zwarcia, a więc z przeszłości.

Żeby takie działanie było możliwe należy zaproponować taki algorytm, aby buforowane były wartości modułu i argumentu wektora, z czym skorelowane są pewne ograniczenia, związane np. ze skończoną pojemnością pamięci cyfrowej w urządzeniu wykonawczym.

Opracowany algorytm został przekazany do konstruktorów z firmy Relpol S.A., których zadaniem było zaimplementowanie go w urządzeniu CZIP-SRZ. Urządzenie to powstało w ramach współpracy Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej (IE PP) z firmą Relpol S.A. Zadaniem Instytutu Elektroenergetyki związanym z tym produktem było opracowanie koncepcji urządzenia oraz algorytmów decyzyjnych wszystkich kryteriów. Członkiem zespołu IE PP był autor niniejszej rozprawy.

6.2.2. Algorytm wyznaczania składowej zerowej napięcia na podstawie jednego wektora napięcia fazy względem ziemi

Uproszczony schemat blokowy algorytmu wyznaczania składowej zerowej napięcia z wykorzystaniem jednego napięcia fazy względem ziemi przedstawia rysunek 6.8.

Algorytm rozpoczyna się blokiem pomiarowym, w którym wyznaczany jest wektor napięcia fazy względem ziemi i przekazywany dalej do bufora danych. Bardzo istotnym elementem całości jest proces przewidywania, w którym przewidywana jest niezbędna do obliczeń wartość napięcia fazy względem ziemi. Napięcie to, opisane jako  $U_{Lp}$ , to wektor napięcia fazy względem ziemi na podstawie którego wyznacza się wektor składowej zerowej napięcia. Struktura procesu przewidywania przedstawiona jest na rysunku 6.9.



Rys. 6.8. Uproszczony algorytm wyznaczania wektora  $\underline{U}_0$  na podstawie pomiaru jednego napięcia fazy względem ziemi

W procesie przewidywania wyznaczana jest średnia wartość wszystkich modułów wektorów zgromadzonych w buforze danych  $U_{\text{Lavg}}$ . Bufor z założenia ma ograniczoną pojemność – powinien zgromadzić dane z ostatnich 5 sekund. W przypadku jego przepełnienia powinny zostać nadpisane najstarsze dane. Następuje porównanie wartości średnich modułów z wartością modułu bieżącego napięcia fazowego – jeżeli iloraz tych dwóch wielkości znajduje się w przedziale:

$$\frac{U_{Lavg}}{U_L} \in (0.98; 1.02) \tag{6.11}$$

to za nowy wektor przewidywanego napięcia fazy względem ziemi przyjmowany jest bieżący wektor napięcia. Jeżeli warunek podany zależnością (6.11) nie jest spełniony, to wektor przewidywany nie ulega zmianie.



Rys. 6.9. Procedura wykorzystywana w module przewidywania

6.2.3. Badania laboratoryjne algorytmu

Przedstawiony w podrozdziale 6.2.2 algorytm został zaimplementowany w prototypie urządzenia CZIP-SRZ. Jest to uniwersalny sterownik reklozerów, który może pełnić rolę sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego, przeznaczony jest do realizacji algorytmów kryteriów ziemnozwarciowych bazujących tak na pomiarze składowej zerowej prądu, jak i składowej zerowej napięcia.

Widok prototypu urządzenia z zaimplementowanym algorytmem pomiaru składowej zerowej napięcia na podstawie zmian jednego napięcia fazy względem ziemi przedstawia rysunek 6.10.



Rys. 6.10. Widok na panel czołowy prototypu sterownika CZIP-SRZ

Badania laboratoryjne wykonane zostały z wykorzystaniem modelu sieci SN będącego wyposażeniem Laboratorium Elektroenergetycznej Automatyki Zabezpieczeniowej działającego w ramach IE PP.

Model, którego widok przedstawia rysunek 6.11, jest bardzo uniwersalny. Odwzorowywane są w nim 3 linie SN, każda o innej budowie i o innej wartości ziemnozwarciowego prądu pojemnościowego:

- w linii 1:  $I_{CL1} = 11 \text{ A}$ ,
- w linii 2:  $I_{CL2} = 7 \text{ A}$ ,
- w linii 3:  $I_{CL3} = 3 A$ ,

co daje całkowity prąd pojemnościowy całej odwzorowywanej sieci równy  $I_{CS} = 21$  A. Sieć może pracować z dowolnym sposobem uziemienia punktu neutralnego, w szczególności także

może być odwzorowywana sieć skompensowana z automatyką wymuszania składowej czynnej. Dla takiego wariantu istnieje możliwość zmiany współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej oraz wartości prądu AWSCz.

W każdej z modelowanych linii zainstalowany jest inny typ filtru składowej zerowej prądu:

- w linii 1: filtr Ferrantiego,
- w linii 2: filtr Holmgreena,
- w linii 3: cewka Rogowskiego z odpowiednio dobranym przetwornikiem.



Rys. 6.11. Model sieci SN w laboratorium elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej IE PP

W modelu do dyspozycji są także trzy przekładniki napięciowe o przekładni  $\vartheta_u = \frac{230 \text{ V}}{100 \text{ V}}$  oraz filtr składowej zerowej napięcia w układzie otwartego trójkąta zbudowany na bazie tych przekładników.

Celem prowadzonych pomiarów była weryfikacja poprawności algorytmu jak i jego implementacji. Schemat zbudowanego układu badawczego przedstawiony został na rysunku 6.12.



Rys. 6.12. Układ badawczy do badania algorytmu wyznaczania składowej zerowej napięcia na podstawie pomiaru jednego napięcia fazy względem ziemi <u>U</u><sub>L</sub>

Główne elementy układy badawczego to sterownik CZIP-SRZ z odpowiednim algorytmem oraz rejestrator Energotest RZ-40. Do urządzeń dostarczono następujące sygnały:

- do CZIP-SRZ jedno napięcie fazy względem ziemi ze strony wtórnej przekładnika napięciowego <u>U</u><sub>L2</sub>,
- do rejestratora RZ-40 jedno napięcie fazy względem ziemi ze strony wtórnej przekładnika napięciowego  $\underline{U}_{L2}$  oraz składową zerową napięcia  $\underline{U}_0$  z wyjścia filtru

w układzie otwartego trójkąta i moduł tej wielkości uznawany był za wartość referencyjną.

Widok stanowiska pomiarowego w trakcie badań przedstawia rysunek 6.13.



Rys. 6.13. Widok stanowiska pomiarowego podczas badania skuteczności wyznaczania  $\underline{U}_0$  na podstawie pomiaru jednego napięcia fazowego względem ziemi

W tablicach 6.1 i 6.2 zestawione zostały wyniki pomiarów wartości skutecznych składowej zerowej napięcia wyznaczone z wykorzystaniem algorytmu przedstawionego w podrozdziale 6.2.2 oraz odczytane z zapisów rejestratora RZ-40. Zwarcia doziemne realizowane były w sieciach z różnymi sposobami uziemienia punktu neutralnego (trzy warianty) oraz przez różne rezystancje przejścia  $R_{\rm F}$ .

W trakcie badań mierzono napięcie fazy L2 względem ziemi, a zwarcia wykonywano w fazie L2 oraz L3 co oznacza, że mierzono napięcie fazy względem ziemi tak w fazie zwartej, jak i tej bez zakłócenia. Eksperyment miał pokazać niezależność wyników pomiarów od fazy wybranej do pomiaru napięcia.
### Tablica 6.1.

Wyniki pomiarów wartości skutecznych składowej zerowej napięcia – pomiar w fazie

Wariant	RF	CZIP-SRZ	<b>RZ-40</b>	woltomierz	A 17 X7	ST/ 0/
	$w \Omega$	U <sub>0a</sub> w V	Uor w V	U <sub>0w</sub> w V	$\Delta U 0a W V$	0U0a W %0
	0	107,64	105,38	106,12	2,26	2,14
1	100	10,15	10,35	10,12	-0,20	-1,93
	220	5,52	5,27	5,28	0,25	4,74
	0	107,20	105,29	105,58	1,91	1,81
2	100	9,25	9,36	9,17	-0,11	-1,18
2	220	5,34	5,12	5,11	0,22	4,30
	0	107,21	105,52	107,32	1,69	1,60
	0	102,70	103,88	105,77	-1,18	-1,14
2	100	39,22	38,92	39,73	0,30	0,77
3	100	28,55	28,94	29,53	-0,39	-1,35
	220	29,24	29,40	28,57	-0,16	-0,54
	220	19,19	20,78	21,18	-1,59	-7,65

nieobjętej zakłóceniem

W wariancie 1 punkt neutralny sieci był izolowany. W wariancie 2 punkt neutralny sieci był uziemiony przez rezystor o rezystancji dobranej odpowiednio do wartości prądu pojemnościowego sieci  $I_{CS}$ . W wariancie 3 sieć była skompensowana, a współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej był równy  $s \approx 0.05$ .

W tablicy 6.1. dla wariantu 3 wartości podane nad kreską odpowiadają modułowi składowej zerowej napięcia mierzonemu przed załączeniem rezystora AWSCz, natomiast pod kreską – po jego załączeniu.

W tablicach 6.1 oraz 6.2:

$$\Delta U_{0a} = U_{0a} - U_{0r} \tag{6.12}$$

$$\delta U_{0a} = \frac{\Delta U_{0a}}{U_{0r}} \cdot 100 \%$$
 (6.13)

Sygnały  $\underline{U}_{L2}$  oraz  $\underline{U}_0$  pochodzące ze stron wtórnych przekładników były rejestrowane z wykorzystaniem rejestratora Energotest RZ-40. Sygnał  $\underline{U}_0$  wyznaczany przez nowy proponowany algorytm był rejestrowany przez wewnętrzny rejestrator zakłóceń zaimplementowany w urządzeniu CZIP-SRZ. W obu przypadkach częstotliwość próbkowania sygnału wynosiła  $f_p = 16$  kHz.

### Tablica 6.2.

Wyniki pomiarów wartości skutecznych składowej zerowej napięcia – pomiar w fazie

Wariant	RF	CZIP-SRZ	RZ-40	Woltomierz	A 17 X7	ST/ 0/
	$w \Omega$	U <sub>0a</sub> w V	U <sub>0r</sub> w V	U <sub>0w</sub> w V	$\Delta U 0a W V$	0U0a W %0
	0	107,03	105,90	105,92	1,13	1,07
1	100	9,12	8,72	8,64	0,4	4,59
	220	3,58	3,25	3,18	0,73	10,15
	0	105,05	104,21	104,04	0,84	0,81
2	100	7,82	8,10	8,01	-0,28	-3,46
_	220	3,47	3,73	3,72	-0,26	-6,97
	0	107,50	104,21	104,31	3,29	3,16
	0	106,39	103,31	103,30	3,08	2,98
2	100	38,82	41,23	41,73	-2,41	-5,85
3	100	27,06	29,11	29,53	-2,05	-7,04
	220	15,29	16,25	16,57	-0,96	-5,91
	220	12,94	13,09	13,08	-0,15	-1,15

objętej zakłóceniem

W przypadku sygnału zapisywanego przez rejestrator zakłóceń w sterowniku CZIP-SRZ jest on przeskalowany na stronę pierwotną sensora pomiarowego VSO. Ponieważ dla parametrów układu pomiarowego sterownika sensor ten ma przekładnię  $\vartheta_{uVSO} = \frac{\frac{22000}{\sqrt{3}}}{170} \frac{V}{V} \approx 75 \frac{V}{V}$  to otrzymane przebiegi należy odpowiednio o wartość tej przekładni przeskalować. Wówczas będzie można dokonać porównania wartościowego sygnałów zarejestrowanych przez rejestrator RZ-40 i rejestrator zakłóceń w CZIP-SRZ. Na rysunkach 6.14 – 6.17 wszystkie sygnały są już przeskalowane i przeniesione na stronę wtórną klasycznych przekładników napięciowych przy założeniu znamionowego napięcia  $U_n = 100$  V.

W niniejszej rozprawie zostanie przedstawiona tylko część zarejestrowanych przebiegów. Ich zestawienie znajduje się w tablicy 6.3.

### Tablica 6.3.

### Zestawienie prezentowanych rejestracji sygnałów zapisanych w czasie badań laboratoryjnych algorytmu

Wariant	$R_{ m F} \le \Omega$	Pomiar <u>U</u> 12 w fazie objętej zakłóceniem?	Numer porządkowy rejestracji	
1	0	nie	R.1	
2	100	tak	R.2	
3	220	nie	R.3	

Na wszystkich wykresach oraz przebiegach sygnałów przedstawionych w tym podrozdziale oraz w załączniku przyjęto oznaczenia:

- U\_L2\_SRZ wektor napięcia fazy L2 względem ziemi mierzony przez sterownik CZIP-SRZ,
- U\_L2\_RZ40 wektor napięcia fazy L2 względem ziemi zapisywany przez rejestrator RZ-40,
- U\_0\_SRZ wektor składowej zerowej napięcia wyznaczany z proponowanego algorytmu przez sterownik CZIP-SRZ,
- U\_0\_RZ40 wektor składowej zerowej napięcia po stronie wtórnej układu otwartego trójkąta przekładników napięciowych zapisywany przez rejestrator RZ-40.

Wykres wskazowy napięć dla rejestracji R.1 przedstawiono na rysunku 6.14. Jak wynika z tablicy, błąd względny wyznaczania wartości skutecznej  $U_0$  z wykorzystaniem proponowanego algorytmu wynosi  $\delta U_{0a} = 2,14$  %. Wektory U\_0\_RZ40 oraz U\_0\_SRZ są rozchylone o  $\Delta \varphi_0 = 9,71^\circ$ , przy czym przyjmując kierunek wirowania wektorów w lewo (przeciwnie do kierunku obrotu wskazówek zegara) wektor U\_0\_SRZ jest opóźniony w stosunku do wektora U\_0\_RZ40.



Rys. 6.14. Wykres wskazowy mierzonych wielkości - rejestracja R.1



Rys. 6.15. Wykres wskazowy mierzonych wielkości - rejestracja R.2

W przypadku rejestracji R.2 mierzone napięcie fazy względem ziemi pochodziło z fazy objętej zwarciem, czego skutkiem jest jego obniżenie się po wystąpieniu tego zakłócenia. Wykres wskazowy przedstawiony jest na rysunku 6.15. W tym przypadku błąd bezwzględny wyznaczania wartości skutecznej składowej zerowej napięcia z wykorzystaniem proponowanego algorytmu jest równy  $\delta U_{0a} = -7,69$ %. Zachowując koncepcję jak dla rejestracji R.1, wektor U\_0\_SRZ jest opóźniony względem wektora U\_0\_RZ40 o kąt  $\Delta \varphi_0 = 30,6^{\circ}$ .

Wykres wskazowy mierzonych wielkości dla rejestracji R.3 w chwili po wystąpieniu zwarcia, ale jeszcze przed załączeniem automatyki AWSCz, przedstawiony został na rysunku 6.16. Rezultat załączenia w punkcie neutralnym rezystora wymuszającego przepływ dodatkowego prądu czynnego w miejscu zwarcia pokazuje rysunek 6.17.



Rys. 6.16. Wykres wskazowy mierzonych wielkości – rejestracja R.3 – stan przed załączeniem AWSCz



Rys. 6.17. Wykres wskazowy mierzonych wielkości - rejestracja R.3 - stan po załączeniu AWSCz

Błąd względny wyznaczania wartości skutecznej składowej zerowej napięcia z wykorzystaniem proponowanego algorytmu przed załączeniem AWSCz był równy  $\delta U_{0_przed_AWSCz} = -0,75$  %, natomiast po załączeniu AWSC –  $\delta U_{0_po_AWSCz} = -10,3$  %. Zaznacza się, że jest to największy otrzymany podczas badań błąd względny wyznaczania  $U_0$ , niezależnie od konfiguracji sieci i rezystancji przejścia w miejscu zwarcia.

Zachowując koncepcję jak dla rejestracji R.1 i R.2, wektor U\_0\_SRZ przed załączeniem AWSCz jest opóźniony względem wektora U\_0\_RZ40 o kąt  $\Delta \varphi_{0_przed_AWSCz} = 27,31^\circ$ , natomiast po załączeniu AWSCz o kąt  $\Delta \varphi_{0_po_AWSCz} = 29,74^\circ$ .

Warto w tym miejscu dodać, że ze względu na skalę modelu, rezystancja przejścia  $R_{\rm F} = 100 \ \Omega$  w rzeczywistej sieci przekłada się na rezystancję ok.  $R_{\rm F_r} = 1750 \ \Omega$ , natomiast rezystancja  $R_{\rm F} = 220 \ \Omega$  w rzeczywistej sieci przekłada się na ok.  $R_{\rm F_r} = 5000 \ \Omega$ .

Błąd fazowy wyznaczania składowej zerowej według proponowanego algorytmu wynika z opóźnień przetwornika analogowo-cyfrowego sterownika i opóźnieniem wprowadzanym przez obliczenia. Niemniej jednak, uwzględniając dodatkowo poprawkę kąta równą  $\varphi_k = 30^\circ$ , można wyznaczać proponowaną metodą <u>U</u><sub>0</sub> z zadowalającą precyzją.

Przedstawiony algorytm cechuje się jednak pewną istotną wadą – z jego wykorzystaniem nie da się wyznaczyć  $U_0$  chwilę po załączeniu linii. Ma to szczególnie istotne znaczenie w sytuacji załączania linii z istniejącym doziemieniem. Dzieje się tak dlatego, że w przypadku załączenia linii na zwarcie bufor danych (por. rys. 6.8) nie będzie wystarczająco wypełniony. Z tego powodu postanowiono zaproponować inny algorytm metody pomiaru  $U_0$ , w którym wada ta została wyeliminowana.

### 6.3. METODA WYZNACZANIA <u>U</u><sub>0</sub> z wykorzystaniem jednego napięcia fazy względem ziemi oraz napięcia międzyfazowego

6.3.1. Uwagi ogólne i podstawa teoretyczna

W celu poprawnego wyznaczenia składowej zerowej napięcia z wykorzystaniem tej metody, należy do sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego dostarczyć dwa sygnały:

- napięcie dowolnej fazy względem ziemi <u>U</u>L,
- napięcie międzyfazowe <u>U</u><sub>L-L</sub>.

Zakłada się, że źródłem napięcia fazy względem ziemi będzie sensor pomiaru napięcia, np. typu VSO-25, podobnie jak miało to miejsce w algorytmie wyznaczania  $U_0$  na podstawie

tylko jednego napięcia fazy względem ziemi i po stronie wtórnej napięcie to będzie miało oznaczenie  $\underline{U}_L'$ .

Źródłem napięcia międzyfazowego  $U_{L-L}$  jest, wg założenia, transformator potrzeb własnych sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego, który w przypadku montażu tego typu urządzenia w linii SN zawsze jest instalowany. Po stronie wtórnej sensora napięcie to będzie oznaczane przez  $U_{L-L}$ '. Schematyczny sposób połączenia sensora i transformatora potrzeb własnych w sieci przedstawiony jest na rysunku 6.18.



Rys. 6.18. Układ do wyznaczania składowej zerowej napięcia na podstawie jednego napięcia fazy względem ziemi i jednego napięcia międzyfazowego

Puntem wyjścia do analizy jest założenie, że w układzie symetrycznym kąt fazowy między wektorem napięcia fazowego i międzyfazowego jest równy  $\alpha = 30^{\circ}$ , jak pokazano to na rysunku 6.19.

W takiej sytuacji wiadomo, korzystając z wcześniejszego założenia (por. podr. 6.2.1), że po wystąpieniu zwarcia doziemnego prawdą jest:

$$\frac{U_{L-L}'}{\sqrt{3}}e^{j30} - U_{L}'e^{j\varphi} = \underline{U}_{0}'', \tag{6.14}$$

gdzie  $\varphi$  – to kąt fazowy między wektorami napięcia fazy względem ziemi i napięcia międzyfazowego. Oznaczenie <u>U</u><sub>0</sub>'' dotyczy wektora składowej zerowej napięcia z uwzględnieniem przekładni transformatora potrzeb własnych oraz sensora napięcia.



Rys. 6.19. Fazory napięć fazy względem ziemi i napięć międzyfazowych

Rozwijając trygonometrycznie wzór (6.14) jest:

$$\frac{U_{L-L}'}{\sqrt{3}}(\cos 30^\circ + j\sin 30^\circ) - U_L'(\cos\varphi \mp j\sin\varphi) = \underline{U}_0''.$$
(6.15)

Przekształcając dalej otrzymuje się:

$$\frac{U_{L-L}'}{\sqrt{3}}\cos 30^\circ - U_L'\cos\varphi + j\left(\frac{U_{L-L}'}{\sqrt{3}}\sin 30^\circ \mp U_L'\sin\varphi\right) = \underline{U}_0''. \tag{6.16}$$

Moduł wyrażenia (6.16) jest równy:

$$\sqrt{\left(\frac{U_{L-L}'}{\sqrt{3}}\cos 30^\circ - U_L'\cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{U_{L-L}'}{\sqrt{3}}\sin 30^\circ \mp U_L'\sin \varphi\right)^2} = U_0'' \qquad (6.17)$$

a to z kolei doprowadza do wzoru, że

$$U_0'' = \sqrt{\left(\frac{U_{L-L}'}{\sqrt{3}}\right)^2 + U_L'^2 - \frac{2}{\sqrt{3}}U_{L-L}'U_L'\cos(30^\circ - \varphi)}.$$
 (6.18)

Argument U0 jest równy

$$\arg(\underline{U}_0^{\prime\prime}) = \arg(\underline{U}_0) = 30^\circ - \varphi. \tag{6.19}$$

W zależności (6.18) należy uwzględnić przekładnię transformatora potrzeb własnych  $\vartheta_{tpw}$  oraz sensora napięciowego  $\vartheta_{vs}$  i otrzymuje się wówczas:

$$U_0 = \sqrt{\left(\frac{\vartheta_{tpw}U_{L-L}'}{\sqrt{3}}\right)^2 + (\vartheta_{vs}U_L')^2 - \frac{2}{\sqrt{3}}\vartheta_{tpw}\vartheta_{vs}U_{L-L}'U_L'\cos(30^\circ - \varphi)}.$$
 (6.20)

W celu odniesienia wartości skutecznej z zależności (6.20) do standardowego filtru składowej zerowej napięcia wymagane jest, żeby:

$$U_{0_n} = U_0 \cdot \frac{100}{U_n},\tag{6.21}$$

gdzie  $U_n$  to napięcie nominalne sieci.

Na podstawie pomiarów następujących wielkości: wartości skutecznej napięcia fazy względem ziemi  $U_{L-L}$ , wartości skutecznej napięcia międzyfazowego  $U_L$  oraz kąta fazowego między wektorami tych wielkości można w dowolnej chwili i miejscu sieci SN wyznaczyć składową zerową napięcia <u>U</u><sub>0</sub> i dalej – wykorzystać ją do realizacji kryteriów ziemnozwarciowych w sygnalizatorach przepływu prądu zwarciowego, zwiększając tym samym ich skuteczność.

Opisywana metoda została zgłoszona do ochrony w Urzędzie Patentowym Rzeczpospolitej Polskiej i zarejestrowana pod numerem P.426446 [55].

6.3.2. Badania laboratoryjne

W celu weryfikacji przedstawionej w podrozdziale 6.3.1 metody wyznaczania składowej zerowej napięcia w sieci SN z wykorzystaniem pomiaru jednego napięcia fazy względem ziemi oraz jednego napięcia międzyfazowego, w środowisku NI LabView zbudowany został wirtualny instrument pomiarowy, który bazował na karcie akwizycji danych typu NI USB 6009.

Schemat układu pomiarowego przedstawia rysunek 6.20.



Rys. 6.20. Schemat układu laboratoryjnego do wyznaczania składowej zerowej napięcia  $\underline{U}_0$  z wykorzystaniem pomiaru napięcia fazy względem ziemi oraz napięcia międzyfazowego

Zgodnie ze schematem z rysunku 6.20 do płytki prototypowej z fizyczną częścią układu pomiarowego doprowadzone są sygnały:

- <u>U</u><sub>L</sub>' napięcie fazy względem ziemi po stronie wtórnej przekładnika napięciowego zabudowanego w modelu sieci SN,
- <u>U</u><sub>L-L</sub>' napięcie międzyfazowe po stronie wtórnej przekładników napięciowych zabudowanych w modeli sieci SN.

Z uwagi na fakt, że wejścia analogowe karty akwizycji danych NI USB 6009 obsługują sygnały napięciowe z zakresy ±10 V [67] a znamionowe napięcie stron wtórnych przekładników napięciowych jest równe  $U_{2n} = 100$  V należało zastosować, dla każdego toru pomiarowego, transformatory pośredniczące o mocy  $S_{n_{tr}} = 0,5$  VA i przekładni  $\vartheta_t = \frac{230}{9} \frac{V}{V}$  oraz dzielnik rezystancyjny o przekładni  $\vartheta_d = 1,33 \frac{v}{v}$ . Taki układ kondycjonowania sygnału w każdym z torów pomiarowych umożliwił bezpieczny pomiar wszystkich wymaganych wielkości i nie wprowadzał do nich błędów kątowych.

Widok płytki prototypowej przedstawia rysunek 6.21.



Rys. 6.21. Płytka prototypowa z fizyczną częścią układu pomiarowego

Poza tym płytka prototypowa została przystosowana do obsługi cęgowego sensora prądowego typu SCT-013-020 (rys. 6.22), który umożliwia jej wykorzystanie do realizacji algorytmów kryteriów ziemnozwarciowych z grupy admitancyjnej.



Rys. 6.22. Sensor pomiaru prądu typu SCT-013

Dodatkowo, na płytce prototypowej umieszczone zostały dwie diody sygnalizacyjne. Zielona odzwierciedla status urządzenia, czerwona jest dowolnie programowalna i była wykorzystywana do sygnalizowania przekroczenia przez wartość skuteczną  $\underline{U}_{0m}$  zadanej wartości. Oznaczenie  $\underline{U}_{0m}$  dotyczy składowej zerowej napięcia wyznaczonej z wykorzystaniem przedstawianej tutaj metody.

Widok logicznej części stworzonego instrumentu pomiarowego przedstawia rysunek 6.23, natomiast na rys. 6.24. pokazano widok panelu użytkownika w czasie trwania przykładowych badań.

W celu weryfikacji algorytmu wykonane zostały pomiary analogiczne do tych z podrozdziału 6.2.3, identyczne było także wariantowanie. W związku z tym badania prowadzone były w sieci z punktem neutralnym izolowanym, uziemionym przez rezystor oraz w sieci skompensowanej przy trzech rezystancjach przejścia w miejscu zwarcia.

Wyniki wykonanych pomiarów wartości skutecznej napięcia w przypadku pomiaru napięcia fazy względem ziemi w fazie nieobjętej zakłóceniem i napięcia międzyfazowego przedstawia tablica 6.4, a w przypadku pomiaru napięcia fazy względem ziemi w fazie zwartej – tablica 6.5. Wartości błędów pomiarowych były liczone wg zależności (6.12) oraz (6.13) jednak przy założeniu, że wartością referencyjną jest wartość skuteczna składowej zerowej napięcia zmierzona z wykorzystaniem woltomierza.

### Tablica 6.5.

### Wyniki pomiarów wartości skutecznych składowej zerowej napięcia – pomiar w fazie nieobjętej zakłóceniem

Wariant	$R_{ m F} \le \Omega$	NI USB 6009	woltomierz	$\Delta oldsymbol{U}_{0\mathbf{b}} \mathbf{w} \mathbf{V}$	δ <i>U</i> 0ь <b>w %</b>
		$U_{0\mathrm{b}} \le \mathrm{V}$	U <sub>0w</sub> w V		
	0	105,65	105,90	-0,25	-0,24
1	100	12,71	13,01	-0,3	-2,31
	220	5,98	6,28	-0,3	-4,78
	0	100,33	96,45	3,88	4,02
2	100	9,01	9,13	-0,12	-1,31
	220	4,36	4,32	0,04	0,93
	0	103,39	101,25	2,14	2,11
	0	100,08	99,89	0,19	0,19
2	100	42,58	41,70	0,88	2,11
3	100	30,22	29,25	0,97	3,32
	220	26,98	26,90	0,08	0,30
	220	17,40	17,88	-0,48	-2,68



Rys. 6.23. Część logiczna instrumentu pomiarowego



Rys. 6.24. Widok panelu użytkownika stworzonego instrumentu pomiarowego

W przypadku pomiaru napięcia fazy względem ziemi w fazie nieobjętej zakłóceniem maksymalny uzyskany błąd względny pomiaru wartości skutecznej  $U_0$  odniesiony do pomiaru wykonanego z użyciem woltomierza po stronie wtórnej filtru składowej zerowej napięcia wyniósł  $\delta U_{0b_{max}} = -4,78$  %, w dodatku dla niesprzyjających warunków. Średnia wartość błędu względnego dla przeprowadzonych pomiarów  $\delta \overline{U}_{0b} = 0,14$  % a mediana  $Me(\delta U_{0b}) = 0,245$  %.

Pomiar z wykorzystaniem proponowanej metody jest skuteczny i wystarczający dla wszystkich rozpatrywanych przypadków.

W przypadku pomiaru napięcia fazy względem ziemi w fazie objętej zakłóceniem średnia wartość błędu względnego dla przeprowadzonych pomiarów  $\delta \overline{U}_{0b} = -0,86\%$ , a wartość mediany była tożsama z wartością średnią błędu, tj.  $Me(\delta U_{0b}) = -0,86\%$ .

Wnioskując można stwierdzić, że proponowana metoda, niezależnie od konfiguracji sieci i właściwości zwarcia, jest skuteczna i można wyznaczane z jej wykorzystaniem wielkości wykorzystywać do realizacji kryteriów ziemnozwarciowych. Dla potrzeb realizacji funkcji adaptacyjnych wystarczy bowiem szacowanie poziomu  $U_0$ .

### Tablica 6.5.

### Wyniki pomiarów wartości skutecznych składowej zerowej napięcia – pomiar w fazie objętej zakłóceniem

Wariant	$R_{ m F} \le \Omega$	NI USB	woltomierz		
		6009		$\Delta U_{0\mathrm{b}} \le \mathrm{V}$	$\delta U_{0\mathrm{b}} \le \%$
		$U_{0\mathrm{b}} \le \mathrm{V}$	$U_{0\mathrm{w}} \le \mathrm{V}$		
	0	105,65	103,22	2,43	2,35
1	100	12,71	13,90	-1,19	-8,56
	220	4,98	4,82	0,16	3,32
	0	100,33	101,82	-1,49	-1,46
2	100	7,85	8,20	-0,35	-4,27
	220	4,09	3,90	0,19	4,87
	0	102,55	103,50	-0,95	-0,92
	0	100,92	101,73	-0,81	-0,80
2	100	47,67	48,70	-1,03	-2,11
3	100	31,25	32,30	-1,05	-3,25
	220	19,42	19,22	0,20	1,04
	220	14,97	15,04	-0,07	-0,47

Dodatkowo, istnieje możliwość takiej implementacji tej metody, aby możliwe było wyznaczanie admitancji zerowej, konduktancji zerowej oraz susceptancji zerowej i realizacja kryteriów z grupy admitancyjnych.

#### 6.4. WNIOSKI DO ROZDZIAŁU

Sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego montowane są w głębi sieci SN, gdzie pomiar składowej zerowej napięcia z wykorzystaniem dotychczas znanych układów i metod jest trudny, a czasami nawet niemożliwy. Proponowane uproszczone metody wyznaczania wartości skutecznej  $U_0$  są niskokosztowe i pozwalają obliczać wartość tej wielkości z wystarczającą dokładnością.

Metoda wykorzystująca pomiar jednego napięcia fazy względem ziemi pozwala na wyznaczenie fazora  $\underline{U}_0$  poprzez rozbudowę stanowiska słupowego o jeden sensor napięcia i została gruntownie przetestowana w warunkach laboratoryjnych kiedy to stwierdzono, że maksymalna wartość względnego błędu wyznaczania  $U_0$  była równa  $\delta U_0 = \pm 10,3$  %. Błąd fazowy wyznaczania składowej zerowej według proponowanej metody wynika z właściwości sprzętu i jest równy ok.  $\Delta \varphi \approx 30^\circ$ . Uwzględniając poprawkę kąta równą  $\varphi_k = 30^\circ$ , można wyznaczać proponowaną metodą  $\underline{U}_0$  z zadowalającą precyzją.

Przedstawiona metoda i algorytm cechują się jednak pewną istotną wadą – z jego wykorzystaniem nie da się wyznaczyć  $U_0$  w chwilę po załączeniu linii. Ma to szczególnie istotne znaczenie w sytuacji załączania linii z istniejącym doziemieniem. Metoda została także przetestowana w warunkach rzeczywistej sieci SN, a wyniki badań przedstawiono w odpowiednim rozdziale niniejszej rozprawy.

W przypadku metody wykorzystującej do wyznaczania wartości skutecznej składowej zerowej napięcia jedno napięcie fazy względem ziemi oraz jedno napięcie międzyfazowe, który wymaga rozbudowy stanowiska słupowego także tylko o jeden sensor napięcia, maksymalna wartość błędu względnego wyznaczania wartości skutecznej  $U_0$  jest równa  $\delta U_0 = \pm 4,78$  %.

Można stwierdzić, że proponowana metoda, niezależnie od konfiguracji sieci i właściwości zwarcia, jest skuteczna i można wyznaczane z jej wykorzystaniem wielkości używać do realizacji kryteriów ziemnozwarciowych. Dla potrzeb realizacji funkcji adaptacyjnych wystarczy bowiem szacowanie poziomu  $U_0$ .

Podsumowując, proponowane uproszczone metody wyznaczania składowej zerowej napięcia są wystarczające do stosowania w sygnalizatorach przepływu prądu zwarciowego i dają możliwość zwiększenia skuteczności ich działania.

### 7. KRYTERIA ZEROWOPRĄDOWE Z FUNKCJĄ ADAPTACYJNĄ

### 7.1. Skuteczność kryteriów zerowoprądowych

### 7.1.1. Uwagi ogólne

Wiele ze współcześnie eksploatowanych sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego, zwłaszcza tych montowanych przed ok. 2015 rokiem, pracuje w oparciu tylko o kryterium zerowoprądowe. W celu wykazania, na ile skutecznie tego typu urządzenia wykrywają zwarcia doziemne, a ściślej – zwarcia o jakiej wartości rezystancji przejścia są w danych warunkach wykrywane, przeprowadzone zostały analizy przedstawione poniżej. Rozpatrywano sieci z dwoma najpopularniejszymi sposobami pracy punktu neutralnego, czyli sieć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor oraz sieć skompensowaną.

7.1.2. Sieć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor

Do celów obliczeniowych założono, że prąd pojemnościowy sieci  $I_{CS} = 120$  A. Ponieważ w tego typu układach zakłada się, że współczynnik tłumienia  $d_0$  powinien wynosić około  $d_0 = 1,5$  [51], wartość znamionowego prądu ziemnozwarciowego rezystora przyjętą równą  $I_R = 180$  A, co przy napięciu nominalnym sieci równym 15 kV daje jego rezystancję znamionową równą  $R_R = 48,11 \Omega$ .

W tablicy 7.1. przedstawione zostały wartości współczynników ziemnozwarciowych  $\underline{\beta}$  dla różnych rezystancji przejścia w sieci o parametrach podanych wyżej, przy czym współczynnik obliczany był z zależności (3.3).

### Tablica 7.1

	$R_{ m F}$ w $\Omega$										
	1	10	100	200	500	1000	2000	5000			
ß	0,979 - j0,012	0,820 - j0,085	0,280 - j0,113	0,158 - j0,076	0,068 - j0,037	0,035 - j0,020	0,017 - j0,010	0,007 - j0,004			
β	0,979	0,824	0,302	0,175	0,077	0,040	0,020	0,008			

Wartości współczynników ziemnozwarciowych  $\underline{\beta}$  i ich modułu dla różnych rezystancji przejścia  $R_{\rm F}$  w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor

Obliczone wartości prądu ziemnozwarciowego w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego zgodnie z zależnością (3.5), dla różnych wartości prądu pojemnościowego linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora, przedstawiono w tablicy 7.2.

Nastawa prądowa kryterium zerowoprądowego dobierana jest w sygnalizatorach przepływu prądu zwarciowego z klasycznej zależności:

$$I_{0nast} = \frac{k_b I_{CLi}}{k_p} + \Delta I_{0\mu},\tag{7.1}$$

w której:  $k_b$  – współczynnik bezpieczeństwa, przyjmowany w sieciach z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor równy 2,  $I_{CLi}$  – pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego,  $k_p$  – współczynnik powrotu, przyjmowany z zakresu 0,85 – 0,98, tutaj 0,98,  $\Delta I_{0\mu}$  – błąd prądowy filtru składowej zerowej prądu.

Nastawa kryterium musi także spełniać drugi warunek:

$$k_{c} = \frac{I_{CS}\sqrt{d_{0}^{2} + (1 - a_{i})^{2}} - \Delta I_{0\mu}}{I_{0nast}},$$
(7.2)

gdzie  $k_c$  to współczynnik czułości zabezpieczenia, który dla dobranej nastawy  $I_{0nast}$  powinien być większy co najmniej od 1,2 a najlepiej od 2.

Problemy z właściwym doborem nastawy prądowej kryterium zerowoprądowego wynikają przede wszystkim z tego, że kryteria te w układach z sygnalizatorami przepływu prądu zwarciowego pozyskują sygnały z nietypowych filtrów w postaci trzech połączonych szeregowo cewek Rogowskiego, trzech przekładników prądowych o budowie przelotowej, w izolacji z silikonu (rys. 7.1) lub innych rozwiązań nietypowych, np. potencjalnie cewki pomiarowe wykonane w technologii PCB HDI [24]. Ponadto błąd prądowy filtru składowej zerowej prądu w zależności (7.1) należy podawać po stronie pierwotnej filtru, bo nastawa dobierana jest po stronie pierwotnej. Obecnie można przyjmować, że wartość tego błędu jest równa  $\Delta I_{0\mu} = 0,5$  A, jednak zdaniem autora niniejszej rozprawy jest to wartość zbyt niska. Bezpieczniej byłoby uznawać, że  $\Delta I_{0\mu} = 0,75$  A, a nawet 1 A, ponieważ właściwości konkretnych rozwiązań zależą od producenta urządzeń. W dalszych analizach przyjmowana będzie jednak wartość  $\Delta I_{0\mu} = 0,5$  A z nadzieją, że jest ona poprawna, a już na pewno z uwzględnieniem ciągłego rozwoju i poprawy jakości instrumentów pomiarowych.



Rys. 7.1. Przekładniki prądowe przelotowe w izolacji silikonowej

Tablica 7.2 zawiera także nastawy sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego  $I_{0nast}$  obliczone zgodnie z zależnością (7.1) i zaokrąglone w górę do wartości całkowitej. Za podwójną linią i wyróżnione pochyłą czcionką znajdują się takie takie rezystancje przejścia, które nie zostaną wykryte przez poprawnie nastawione czujniki przepływu prądu zwarciowego, przy czym oznacza to, że  $I_{kZ} < I_{0nast}$ . Wyraźnie widać, że w sytuacji, gdy prąd pojemnościowy linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora jest niewielki, czyli w praktyce za sygnalizatorem jest tylko linia napowietrzna, skuteczność kryterium  $I_0$ > jest dość wysoka. Mogą być wykryte zwarcia o rezystancji przejścia sięgającej kilku k $\Omega$ . Wzrost  $I_{CLi}$  (por. rys. 3.2) nie powoduje znacznego spadku wartości składowej zerowej prądu w miejscu zainstalowania sygnalizatora  $I_{kZ}$ , jednakże w celu uniknięcia zadziałań zbędnych, należy zwiększyć jego nastawę. Sprawia to, że w liniach o większym prądzie pojemnościowym za miejscem zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego kryterium  $I_0$ > ma bardzo ograniczoną skuteczność.

Należy pamiętać, że w przypadku nastawy, dla której współczynnik czułości  $k_c$ , liczony jest według zależności (7.2), osiągnie wartość mniejszą od 1, sygnalizator nie wykryje żadnego zwarcia, nawet metalicznego.

Wartości prądu ziemnozwarciowego *I*<sub>k</sub>z w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego podczas zwarć w liniach o różnej wartości prądu pojemnościowego *I*<sub>CLi</sub> i dla różnych rezystancji przejścia *R*<sub>F</sub> w sieci o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor

ICLi	a	I0nast	1-				$R_{\rm F}$ w	Ω			
w A	a	w A	Kc	1	10	100	200	500	1000	2000	5000
1	0,01	3	59,2	211,37	177,48	63,91	36,85	16,18	8,36	4,25	1,72
5	0,04	11	15,7	209,23	175,68	63,26	36,48	16,02	8,27	4,20	1,70
10	0,08	21	7,9	206,64	173,51	62,48	36,03	15,82	8,17	4,15	1,68
15	0,13	31	5	204,12	171,40	61,72	35,59	15,62	8,07	4,10	1,68
20	0,17	41	3,6	201,70	169,36	60,98	35,16	15,44	7,97	4,05	1,64
25	0,21	52	2,7	199,37	167,4	60,28	34,76	15,26	7,88	4,01	1,62
30	0,25	62	2,2	197,13	165,52	59,60	34,37	15,09	7,79	3,96	1,60

Wyznaczone maksymalne możliwe wykrywane rezystancje przejścia w funkcji współczynnika udziału *a* dla różnych wartości tłumienności w sieci rozpatrywanej w tym podrozdziale przedstawia rysunek 7.2.



Rys. 7.2. Wpływ wartości współczynnika tłumienia sieci i udziału prądu pojemnościowego linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora w prądzie pojemnościowym całej sieci na wartość wykrywanej rezystancji przejścia zwarcia doziemnego w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor

### 7.1.3. Sieć skompensowana z AWSCz

Do analizy pracy sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego w sieci skompensowanej z AWSCz założono, wartość prądu pojemnościowego całej sieci będzie równa  $I_{CS} = 120$  A, co jest wartością typową dla polskich sieci średniego napięcia. Optymalna

wartość prądu indukcyjnego dławika kompensującego powinna zawierać się w przedziale [31, 33, 51, 108]:

$$I_L \in \langle 1,05 \dots 1,15 \rangle I_{CS},$$
 (7.3)

w związku z czym założono  $I_{\rm L} = 132$  A. Dla takiej sieci wartość współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej s = 0,1. Przyjęto także, że w układzie pracuje automatyka wymuszania składowej czynnej, przy czym  $I_{\rm AWSCz} = 20$  A. Współczynnik tłumienia sieci w takim przypadku jest równy  $d_0 = 0,167$ . Napięcie nominalne sieci  $U_{\rm n} = 15$  kV.

Tablica 7.3 przedstawia wartości współczynników ziemnozwarciowych  $\underline{\beta}$  dla różnych wartości rezystancji przejścia  $R_F$  i sieci z założeniami jak wyżej.

Prąd zwarciowy w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego  $I_{kZ}$  dla sieci skompensowanej oblicza się, podobnie jak dla sieci uziemionej przez rezystor, z zależności (3.5). Obliczone nastawy kryterium zerowoprądowego umieszczone są w kolumnie  $I_{0nast}$  w tablicy 7.4.

### Tablica 7.3

## Wartości współczynników ziemnozwarciowych $\underline{\beta}$ i ich modułu dla różnych rezystancji przejścia $R_F$ w sieci skompensowanej

	$R_{ m F}$ w $\Omega$										
	1	10	100	200	500	1000	2000	5000			
ß	0,997 + j0,001	0,977 + j0,013	0,802 + j0,090	0,660 + j0,125	0,420 + j0,135	0,257 + j0,108	0,143 + j0,170	0,061 + j0,033			
β	0,997	0,977	0,807	0,672	0,441	0,279	0,222	0,069			

Skuteczność wykrywania zwarć doziemnych przez czujniki przepływu prądu zwarciowego bazujące tylko na kryterium I<sub>0</sub>> jest niższa w sieci skompensowanej z AWSCz, niż w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor. W tym przypadku prawdopodobne jest niewykrycie zwarcia także w linii o bardzo małym prądzie pojemnościowym. Graniczne wartości wykrywania zwarć doziemnych w przypadku sieci skompensowanej z AWSCz dla różnych wartości współczynnika *a* oraz różnych wartości współczynnika rozstrojenia kompensacji przedstawia rysunek.

### Tablica 7.4

Wartości prądu ziemnozwarciowego *I*<sub>k</sub>z w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego podczas zwarć w liniach o różnej wartości prądu pojemnościowego za miejscem instalacji sygnalizatora i dla różnych rezystancji

<b>I</b> CLi	a	I0nast	1-				<b>R</b> F w	Ω			
w A	u	w A	КC	1	10	100	200	500	1000	2000	5000
1	0,01	2	75	23,80	23,31	19,25	16,03	10,54	6,65	3,81	1,66
5	0,04	7	21,5	26,19	25,66	21,19	17,64	11,60	7,32	4,19	1,83
10	0,08	13	11,6	29,66	29,06	24,00	19,98	13,13	8,28	4,74	2,07
15	0,13	19	8	33,52	32,84	27,12	22,58	14,84	9,36	5,36	2,34
20	0,17	26	5,9	37,65	36,88	30,47	25,36	16,67	10,52	6,02	2,63
25	0,21	32	4,8	41,96	41,10	33,95	28,26	18,58	11,72	6,71	2,93
30	0,25	38	4,1	46,41	45,46	37,55	31,26	20,55	12,96	7,42	3,24





Rys. 7.3. Wpływ wartości współczynnika rozstrojenia kompensacji i udziału prądu pojemnościowego linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora w prądzie pojemnościowym całej sieci na wartość wykrywanej rezystancji przejścia zwarcia doziemnego w sieci skompensowanej

Z punktu widzenia skuteczności detekcji zwarć doziemnych przez sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego bardzo istotna jest poprawna wartość współczynnika rozstrojenia kompensacji *s*, tzn. należy dobrać do danej sieci dławik kompensacyjny o takim prądzie jak w zależności (7.3). Jakiekolwiek zwarcie może być wykryte w sieci idealnie skompensowanej (czyli  $I_{CS} = I_{dt}$ ) tylko w liniach, których udział *a* < 0,22, czyli w rozpatrywanym przypadku  $I_{CL}$  < 26,4 A. W sieciach niedokompensowanych sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego (i zabezpieczenia) bazujące na kryterium I0> będą działać tylko w specyficznych przypadkach zwarć o bardzo małych rezystancjach przejścia. Warto tutaj wspomnieć, że analizy są prowadzone dla minimalnej możliwej nastawy, czyli maksymalnego

możliwego do osiągnięcia współczynnika czułości wskaźnika. Zwiększenie nastawy, a więc zmniejszenie czułości, pociągnie za sobą pogorszenie skuteczności czujników.

#### 7.2. KRYTERIUM ADAPTACYJNE ZEROWOPRĄDOWE DLA SIECI SKOMPENSOWANEJ

Adaptacja polega na dostosowaniu czegoś do istniejących warunków [98]. W przypadku kryterium adaptacyjnego zerowoprądowego istnieje możliwość dostosowania wartości nastawy prądowej kryterium do istniejących w czasie trwania zwarcia warunków i tym samym poprawa jego skuteczności.

Nastawa kryterium adaptacyjnego powinna być dobrana według zależności:

$$I_{0nast_a} = k_a I_{0nast}, \tag{7.4}$$

gdzie  $k_a$  – współczynnik adaptacji,  $I_{0nast}$  – nastawa kryterium zerowoprądowego wyznaczona z warunku klasycznego, tj. wg wzoru (7.1).

Czułość kryterium adaptacyjnego można sprawdzać z klasycznego warunku określonego zależnością (7.2).

Wielkością kryterialną do wyznaczania współczynnika adaptacji  $k_a$  jest wartość modułu współczynnika ziemnozwarciowego  $\beta$ .

Wartość modułu współczynnika ziemnozwarciowego  $\beta$  może być obliczona z bardzo uproszczonego, ale wystarczającego wzoru:

$$\beta = \frac{U_0}{U_{0\text{max}}},\tag{7.5}$$

gdzie  $U_0$  – wartość skuteczna składowej zerowej napięcia w trakcie zwarcia doziemnego,  $U_{0max}$  – maksymalna wartość skuteczna składowej zerowej napięcia podczas wystąpienia zwarcia metalicznego w danej sieci.

Maksymalna wartość składowej zerowej napięcia podczas zwarcia metalicznego jest równa wartości znamionowej napięcia fazy względem ziemi  $U_{Ln}$ , czyli:

$$U_{0\max} = U_{Ln} \tag{7.6}$$

Wyznaczanie wartości skutecznej składowej zerowej napięcia podczas zwarcia doziemnego może być zrealizowane z wykorzystaniem metod opisanych w rozdziale 6. Równie dobrze można skorzystać z założeń przedstawionych w [53] i informację o wartości  $U_0$  przesyłać do sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego drogą radiową. Jest to rozwiązanie o tyle interesujące, że nie wymaga zmiany w konstrukcji słupa, na którym sygnalizator jest zainstalowany. Zastosowanie konkretnej metody będzie zależeć np. od infrastruktury OSD czy możliwości technicznych konkretnych urządzeń. W tej części rozprawy zostaną podane jedynie informacje ogólne dotyczące proponowanej metody.

Wartość współczynnika adaptacji powinna być wyznaczona z zależności:

$$k_{\rm a} = \frac{\beta I_{CLi} + \Delta I_{0\mu}}{I_{CLi} + \Delta I_{0\mu}} \tag{7.7}$$

gdzie  $\beta$  – współczynnik ziemnozwarciowy,  $I_{CLi}$  – wartość prądu pojemnościowego i-tego odcinka linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego,  $\Delta I_{0\mu}$  – błąd (szum) filtru składowej zerowej prądu.

#### Tablica 7.5

Wartości modułów składowej zerowej napięcia mierzonych w sieci skompensowanej o napięciu nominalnym  $U_n = 15$  kV dla różnych rezystancji przejścia  $R_F$ 

$R_{ m F} \le \Omega$	<u>B</u>	<u>U</u> 0p w V	Uop w V
1	0,997 + j0,001	8634,02 + j8,66	8634,02
10	0,977 + j0,013	8460,82 + j112,58	8461,57
100	0,802 + j0,090	6945,32 + j779,40	6988,92
200	0,660 + j0,125	5715,60 + j1082,50	5817,21
500	0,420 + j0,135	3637,20 + j1169,10	3820,47
1000	0,257 + j0,108	2225,62 + j935,28	2414,15
2000	0,143 + j0,070	1238,38 + j606,20	1378,79
5000	0,061 + j0,033	528,26 + j285,78	600,61

W tablicy 7.5 przedstawiono wartości modułu składowej zerowej napięcia dla sieci skompensowanej jak w podrozdziale 7.1.3. Dodatkowo, obliczone wartości  $U_{0p}$  po stronie pierwotnej filtru w funkcji rezystancji przejścia  $R_F$  pokazuje rysunek 7.4.

Jak wynika z analiz prowadzonych w podrozdziale 7.1.2, klasyczne kryterium zerowoprądowe w sieci skompensowanej jest skuteczne dla zdecydowanej większości przypadków w sytuacji, gdy rezystancja przejścia jest mniejszą niż ok. 200 Ω. Przy tej

rezystancji przejścia dla rozpatrywanych sieci wartość składowej zerowej napięcia po stronie pierwotnej filtru jest dla sieci skompensowanej równa  $U_{0p} = 5800 \text{ V} \approx 0,67 U_L$ ,



Rys. 7.4. Wartości skuteczne składowej zerowej napięcia w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor oraz w sieci skompensowanej w funkcji rezystancji przejścia *R*<sub>F</sub>

Zasadność adaptacji nastawy zabezpieczenia zerowoprądowego występuje zatem dla składowych zerowych napięć mniejszych niż  $0,70U_L$ . Dolną granicę działania kryterium adaptacyjnego należy ustawić na wartość  $U_0$  równą  $0,15U_L$  co spowoduje, że zabezpieczenie będzie nieczułe na asymetrię naturalną sieci. Podobnie, na ok.  $0,15U_L$  nastawia się człony rozruchowe zerowonapięciowe w kryteriach admitancyjnych [31, 51, 52].



Rys. 7.5. Zależność współczynnika adaptacji  $k_a$  od wartości współczynnika ziemnozwarciowego  $\beta$ 

Rysunek 7.4 pokazuje obliczone wartości współczynnika adaptacji dla różnych wartości prądu pojemnościowego linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego.

W celu weryfikacji poprawności metody wykonane zostały analizy obliczeniowe. Wyznaczana była, zgodnie z zależnością (3.5), wartość prądu ziemnozwarciowego płynącego w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego. Dodatkowo, z zależności (7.4) wyznaczone zostały nastawy kryterium nadprądowego adaptacyjnego a z wzoru (7.1) – klasycznego nadprądowego. Analiza przeprowadzona została dla sieci jak w podrozdziale 7.1.2.

W tablicy 7.6. przedstawiono wyniki obliczeń prądu zwarciowego w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego dla różnych rezystancji przejścia *R*<sub>F</sub>, podano także wartości składowej zerowej napięcia w sieci, współczynniki ziemnozwarciowe oraz współczynniki adaptacji dla konkretnych sytuacji. Tablica uzupełniona jest o wartości nastaw zabezpieczeń nadprądowych wyznaczonych z klasycznej zależności (7.1) oraz kryterium adaptacyjnego wg zależności (7.4).

Rysunek 7.6 przedstawia maksymalne wyznaczone rezystancje przejścia możliwe do wykrycia przez sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego pracujące z klasycznym kryterium zerowoprądowym ( $R_{\rm Fmax}$ ) oraz kryterium adaptacyjnym ( $R_{\rm Fmax}_a$ ) dla sieci o różnych wartościach współczynnika rozstrojenia kompensacji *s*.



Rys. 7.6. Porównanie wykrywanych rezystancji przejścia dla zabezpieczeń nadprądowych pracujących z klasycznym algorytmem zerowoprądowym (*R*<sub>Fmax</sub>) oraz algorytmem zerowoprądowym adaptacyjnym (*R*<sub>Fmax\_a</sub>) dla różnych wartości *s* 

Wartości prądu zwarciowego w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu

zwarciowego, składowej zerowej napięcia, współczynnika ziemnozwarciowego, współczynników adaptacji i nastaw zabezpieczeń dla sieci skompensowanej o napięciu nominalnym *U*<sub>n</sub> = 15 kV i współczynniku rozstrojenia kompensacji *s* = 0,1 dla różnych wartości współczynnika udziału *a* oraz rezystancji przejścia *R*<sub>F</sub>

$R_{\rm F} \le \Omega$	а	I <sub>kz</sub> w A	U <sub>0</sub> w V	β	ka	Ionast	Ionast_a
	0,01	28,89	8640	0,998	1	1,82	1,82
	0,05	32,37	8640	0,998	1	7,10	7,10
1	0,1	36,98	8640	0,998	1	13,70	13,70
	0,15	41,77	8640	0,998	1	20,30	20,30
	0,2	46,67	8640	0,998	1	26,90	26,90
	0,01	22,95	6863	0,792	1	1,82	1,82
	0,05	25,71	6863	0,792	1	7,10	7,10
100	0,1	29,38	6863	0,792	1	13,70	13,70
	0,15	33,18	6863	0,792	1	20,30	20,30
	0,2	37,09	6863	0,790	1	26,90	26,90
	0,01	11,3	3380	0,39	0,569	1,82	1,04
	0,05	12,66	3380	0,39	0,437	7,10	3,10
500	0,1	14,46	3380	0,39	0,414	13,70	5,67
	0,15	16,34	3380	0,39	0,406	20,30	8,24
	0,2	18,27	3380	0,39	0,402	26,90	10,81
	0,01	6,71	2006	0,232	0,458	1,82	0,83
	0,05	7,24	2006	0,232	0,291	7,10	2,07
1000	0,1	8,59	2006	0,232	0,263	7,10	3,60
	0,15	9,70	2006	0,232	0,253	20,3	5,14
	0,2	10,85	2006	0,232	0,248	26,90	6,67
	0,01	2,53	754	0,087	1	1,82	1,82
	0,05	2,84	754	0,087	1	7,10	7,10
3000	0,1	3,24	754	0,087	1	13,70	13,70
	0,15	3,66	754	0,087	1	20,30	20,30
	0,2	4,10	754	0,087	1	26,90	26,90
	0,01	1,57	463	0,054	1	1,82	1,82
	0,05	1,76	463	0,054	1	7,10	7,10
5000	0,1	2,01	463	0,054	1	13,70	13,70
	0,15	2,27	463	0,054	1	20,30	20,30
	0,2	2,54	463	0,054	1	26,90	26,90

Stosując zerowoprądowe kryterium adaptacyjne w sieci skompensowanej w postaci proponowanej w tym rozdziale uzyskać można, w porównaniu do klasycznego kryterium zerowoprądowego, zdecydowanie szerszy zakres rezystancji przejścia  $R_F$  wykrywanych przez sygnalizator przepływu prądu zwarciowego. Niezależnie od wartości współczynnika rozstrojenia kompensacji *s*, dla dużego zakresu współczynnika udziału a maksymalne

wykrywane rezystancje przejścia są równe co najmniej  $R_{\text{Fmax}} = 1500 \ \Omega$ . To z kolei pozwala zakwalifikować kryterium zerowoprądowe adaptacyjne do grupy kryteriów wykrywających zwarcia wysokooporowe w skompensowanej sieci średniego napięcia. Niestety, dla sieci niedokompensowanych o dużym udziale wartości prądu pojemnościowego linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora w stosunku do całego prądu pojemnościowego sieci istnieje ryzyko niezadziałania zabezpieczenia bazującego na proponowanym kryterium nawet podczas wystąpienia zwarcia metalicznego. W takiej jednak sytuacji należy podkreślić, że:

- 1. nie jest zalecana praca sieci z wartością rozstrojenia kompensacji s < 0,
- sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego instalowane są w głębi sieci i wówczas wartości prądu pojemnościowego linii za miejscem zainstalowania konkretnego urządzenia są niewielkie; ocenia się, że w zdecydowanej większości sieci nie wystąpi sytuacja, że dla konkretnego urządzenia a > 0,1.

Należy zatem uważać, że proponowane kryterium może w znaczącym stopniu poprawić skuteczność detekcji zwarć doziemnych, wykorzystując modyfikację klasycznego kryterium nadprądowego, przy czym modyfikacja polega na uwzględnieniu w nastawie wartości skutecznej składowej zerowej napięcia mierzonej w sieci podczas zwarcia doziemnego. Do tego pomiaru wykorzystać można np. metody opisane w rozdziale 6 niniejszej rozprawy.

## 7.3. KRYTERIA ADAPTACYJNE ZEROWOPRĄDOWE DLA SIECI Z PUNKTEM NEUTRALNYM UZIEMIONYM PRZEZ REZYSTOR

Dla sieci średniego napięcia z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor klasyczne kryterium zerowoprądowe jest nieco bardziej skuteczne w porównaniu z siecią skompensowaną, nie mniej jednak ciągle maksymalne wartości wykrywanych rezystancji przejścia są niewielkie.

W celu poprawy skuteczności wykrywania zwarć doziemnych w sieci SN z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor proponuje się skorzystanie z kryteriów detekcji wykorzystujących do adaptacji nastawy:

- zmianę napięć faz względem ziemi po wystąpieniu doziemienia z jednoczesną analizą wartości prądu zwarciowego w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego,
- zmianę wartości składowej zerowej napięcia w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego.

Zakładając, że w sieci wystąpiło zwarcie niemetaliczne w fazie L1 wartości napięć fazy względem ziemi w miejscu zwarcia, na podstawie teorii składowych symetrycznych, zgodnie z zależnością (6.6) będą równe [43]:

$$\underline{U}_{L1} = \underline{U}_0 + \underline{U}_1 + \underline{U}_2 = \frac{3R_F}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 + 3R_F}\underline{E}$$
(7.8)

$$\underline{U}_{L2} = \underline{U}_0 + a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2 =$$

$$= \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 + 3R_F} \left[ (a^2 - a) \underline{Z}_2 + (a^2 - 1) \underline{Z}_0 + 3a^2 R_F \right]$$
(7.9)

$$\underline{U}_{L3} = \underline{U}_0 + a\underline{U}_1 + a^2\underline{U}_2 = \\
= \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0 + 3R_F} \left[ -(a^2 - a)\underline{Z}_2 + (a - 1)\underline{Z}_0 + 3aR_F \right]$$
(7.10)

gdzie <u>E</u> – siła elektromotoryczna źródła równa napięciu nominalnemu sieci, <u>U</u><sub>0</sub>, <u>U</u><sub>1</sub>, <u>U</u><sub>2</sub> – fazory składowej zerowej, zgodnej i przeciwnej napięcia,  $R_{\rm F}$  – rezystancja przejścia w miejscu zwarcia, <u>Z</u><sub>0</sub>, <u>Z</u><sub>1</sub>, <u>Z</u><sub>2</sub> – impedancja obwodu zwarciowego dla składowej zerowej, zgodnej i przeciwnej,  $a = e^{j\frac{2}{3}\pi}$ .

Napięcia fazy względem ziemi podczas zwarć doziemnych cechujących się różnymi wartościami rezystancji przejścia w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor i ze współczynnikiem tłumienia  $d_0 = 1,5$  przedstawione zostały w tablicy 7.7 i na wykresach wskazowych na rysunku 7.6.

Wartość prądu pojemnościowego linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego, zgodnie z zależnościami (7.8) - (7.10), nie ma wpływu na wartości napięć fazy względem ziemi w miejscu zwarcia po jego wystąpieniu.

Co zrozumiałe, przy zwarciu o bardzo małej rezystancji przejścia napięcie fazy zwartej względem ziemi zbliża się do zera, podczas gdy napięcia faz zdrowych wzrastają niemalże do wartości napięcia międzyfazowego. Wraz ze wzrostem *R*<sub>F</sub> dysproporcje między poszczególnymi napięciami się zmniejszają – dla zwarć wysokooporowych napięcia fazy względem ziemi są bliskie nominalnym.

Napięcia faz względem ziemi podczas zwarcia doziemnego w sieci średniego napięcia

L.p.	$R_{\rm F}$ w $\Omega$	<u>U</u> L1k W V	<u>U</u> L2k W V	<u>U</u> L3k W V	UL1k wV	UL2k wV	Ul3k wV
1	1	176,74 +	-12811,37 -	-12811,37 +	205	14702	1/1200
1.	1	j103,14	j7394,08	j7605,92	203	14/92	14099
n	10	1559,28 +	-11428,98 -	-11428,98 +	1722	12202	14095
۷.	10	j730,21	j6767,65	j8232,35	1/22	15262	14005
2	50	4765,22 +	-8223,74 -	-8223,74 +	4011	10266	11064
5.	50	j1188,16	j6310,87	j8689,13	4911	10300	11904
1	100	6234,54 +	-6754,87 -	-6754,87 +	6211	9387	10942
4.	100	j981,11	j6518,35	j8481,65	0311		10045
5	250	7539,98 +	-5449,91 -	-5449,91 +	7561	0001	9732
5.	230	j563,25	j6936,53	j8063,47	/301	0021	
6	500	8072,56 +	-4917,55 -	-4917,55 +	8070	9701	0220
0.	300	j321,53	j7178,36	j7821,64	8079	8701	9239
7	1000	8359,39 +	-4630,85 -	-4630,85 +	8261	8668	8061
7.	1000	j172,19	j7327,75	j7672,25	8301	8008	0901
Q	2000	8508,06	-4482,24 -	-4482,24 +	8500	8661	<u>991</u> /
0.	2000	+j89,16	j7410,81	j7589,18	6509	0001	0014

z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor,  $U_n = 15$  kV,  $d_0 = 1.5$ 

Poprawnie nastawione zabezpieczenie zerowoprądowe, w zależności od wartości prądu pojemnościowego linii za  $I_{CLi}$  za miejscem zainstalowania sygnalizatora może wykryć zwarcia praktycznie tylko niskooporowe. Wartości maksymalnych rezystancji przejścia, dla których występuje rozruch kryterium I<sub>0</sub>> przedstawiono w tablicy 7.8.

### Tablica 7.8.

Maksymalne wykrywane rezystancje przejścia podczas zwarć doziemnych w sieci średniego napięcia z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor,

a	I <sub>CL</sub> w A	$d_0 = 1,5$	$d_0 = 2$	$d_0 = 2,5$
0,01	1,2	2300	2500	2500
0,05	6	600	650	660
0,1	12	300	300	300
0,15	18	150	160	160
0,2	24	140	150	155
0,25	30	95	105	110

 $U_{\rm n} = 15 \text{ kV}, I_{\rm CS} = 120 \text{ A}$ 

Zwarcia wysokooporowe są przez klasyczne zabezpieczenie nadprądowe zerowe wykrywane tylko w sytuacjach, w których wartość prądu pojemnościowego linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego jest bardzo mała, czyli w praktyce wtedy, gdy urządzenie takie zainstalowane jest w krótkim odczepie linii kablowej (o długości max. 500 m) lub w odgałęzieniu napowietrznym.



Rys. 7.7. Napięcia faz względem ziemi w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor w stanie bez zwarcia (indeks dolny "n") oraz podczas zwarcia doziemnego o danej rezystancji przejścia *R*<sub>F</sub>

7.3.1. Kryterium zerowoprądowe adaptacyjne wykorzystujące do adaptacji nastawy zmienność napięć faz względem ziemi po wystąpieniu doziemienia

Po wystąpieniu w sieci zwarcia doziemnego napięcia faz względem ziemi zmieniają się, np. tak jak pokazano w tablicy 7.7. i na rysunku 7.7. Proponuje się wykorzystać tę zmienność napięcia do adaptacji nastawy zabezpieczenia nadprądowego zwłocznego. Ponieważ do poprawy skuteczności kryteriów decyzyjnych z założenia proponuje się skorzystanie tylko z pomiaru jednego napięcia fazy względem ziemi, należy zwrócić uwagę, że:

- napięcie fazy doziemionej względem ziemi zmniejsza się po wystąpieniu uszkodzenia,
- napięcia faz zdrowych względem ziemi rosną (niesymetrycznie) po wystąpieniu uszkodzenia.

W związku z tym adaptacja nastawy kryterium zerowoprądowego powinna być aktywna w sytuacji, gdy:

## względna zmiana wartości napięcia fazy względem ziemi jest z przedziału od -60% do -5% (warunek 1)

### lub

względna zmiana wartości napięcia fazy względem ziemi jest z przedziału od +2% do +60% (warunek 2)

Dodatkowo należy wprowadzić trzeci warunek, który pozwoli zastosować adaptację kryterium gdy:

wartość składowej zerowej prądu mierzonej przez sygnalizator przepływu prądu zwarciowego z wykorzystaniem odpowiedniego układu pomiarowego spełnia zależność  $I_{kZ} > 5 \cdot \Delta I_0$ (warunek 3).

Zmiana wartości nastawy kryterium zerowoprądowego powinna wystąpić, gdy spełnione będzie następujące wyrażenie logiczne:

$$[(warunek 1) \lor (warunek 2)] \land (warunek 3)$$
(7.11)

Warunek 1 może być spełniony, gdy pomiar napięcia niezbędny do działania kryterium prowadzony będzie w fazie, w której doszło do doziemienia.

Warunek 2 może być spełniony w sytuacji, gdy pomiar napięcia wykonywany jest w fazie zdrowej.

Warunek 3 jest dla kryterium bardzo istotny, ponieważ pozwala odróżnić fakt występowania zwarcia od wahań napięcia w sieci.

Do określania zmian wartości skutecznej napięcia fazy względem ziemi należy wykorzystywać napięcie nominalne sieci, czyli dla każdego i-tego napięcia fazy względem ziemi zmiana jego wartości skutecznej po wystąpieniu doziemienia:

$$U_{\rm Li\%} = \frac{U_{\rm Lik}}{U_{Ln}} \tag{7.12}$$

Wyrażenie określające nastawę kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego dla sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor w sytuacji, gdy do adaptacji wykorzystywana jest zmienność napięć faz względem ziemi jest następujące:

$$I_{0nast_a1} = k_{a1}k_b \frac{I_{CLi}}{k_p} + \Delta I_{0\mu}$$
(7.13)

gdzie:  $k_{a1}$  – współczynnik adaptacji,  $k_b$  – współczynnik bezpieczeństwa równy 2,  $I_{CLi}$  – wartość prądu pojemnościowego linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego,  $k_p$  – współczynnik powrotu przyjmowany równy 0,98,  $\Delta I_{0\mu}$  – błąd prądowy filtru składowej zerowej prądu przyjmowany równy 0,5 A.

Wartość współczynnika adaptacji  $k_{a1}$  z zależności (7.13) powinna być równa:

- 0,55, jeżeli spełniony jest warunek określony zależnością (7.11), czyli adaptacja kryterium i nastawy jest aktywna,
- 1, jeżeli warunek (7.11) nie jest spełniony i kryterium pracuje jako klasyczne kryterium zerowoprądowe.

Tablica 7.9.

### Wielkości logiczne oraz nastawy kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego dla sieci SN z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor przy założeniu

	¢.	¢.	c.	•	<b>a</b> =	0,01	a =	0,05	a =	0,1	a =	0,2
R <sub>F</sub> wΩ	warunek 1	warunek 2	warunek 3	adaptacja'	I <sub>0nast_a1</sub> w A	rozruch?	Ionast_a1 W A	rozruch?	I0nast_a1 W A	rozruch?	I0nast_a1 W A	rozruch?
1	Ν	Ν	Т	N	3	Т	13	Т	26	Т	51	Т
10	Ν	Т	Т	Т	1,8	Т	7,2	Т	14	Т	27,4	Т
50	Т	Т	Т	Т	1,8	Т	7,2	Т	14	Т	27,4	Т
100	Т	Т	Т	Т	1,8	Т	7,2	Т	14	Т	27,4	Т
250	Т	Ν	Т	Т	1,8	Т	7,2	Т	14	Т	27,4	Т
500	Т	N	Т	Т	1,8	Т	7,2	Т	14	Т	27,4	Ν
1000	Ν	N	Т	N	3	Т	13	N	26	Ν	51	Ν
2000	Ν	N	Т	N	3	Т	13	N	26	N	51	Ν
4000	Ν	N	N	N	3	N	13	N	26	Ν	51	Ν

$U_{\rm n} = 15 \text{ kV}, \text{ d}$	$0 = 1,5, I_{\rm C}$	s = 120 A
--	----------------------	-----------

Wartości logiczne warunków i rozruchu oraz nastawy kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego dla zwarć doziemnych w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor  $(d_0 = 1,5)$  dla różnych wartości udziału prądu pojemnościowego linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego w stosunku do prądu pojemnościowego całej sieci przedstawiono w tablicy 7.9.

W tablicy 7.9 (i każdej następnej w tym rozdziale) oznaczenie "N" dotyczy sytuacji, w której dany warunek nie jest spełniony lub nie ma dla takiego zwarcia rozruchu kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego. Jeżeli w komórce tablicy jest oznaczenie "T" to znaczy, że dany warunek jest dla zwarcia o danej rezystancji przejścia spełniony lub występuje rozruch kryterium.

Tablica 7.10 przedstawia ewentualne rozruchy kryterium zerowoprądowego klasycznego oraz adaptacyjnego dla zwarcia o danej rezystancji przejścia. Na tej podstawie można ocenić, czy zastosowanie kryterium adaptacyjnego może przynieść korzyść w postaci poszerzenia zakresu wykrywanych przez sygnalizator przepływu prądu zwarciowego rezystancji przejścia.

### Tablica 7.10.

# Rozruchy kryterium zerowoprądowego klasycznego i adaptacyjnego wykorzystującego zmienność napięć faz względem ziemi w sieci SN z punktem neutralnym uziemionym

	a = 0,01		a = 0,05		a = 0,1			a = 0,2				
R <sub>F</sub> wΩ	rozruch I <sub>0</sub> > klasyczne	rozruch I <sub>0</sub> > adaptacyjn	korzyść?	rozruch I <sub>0</sub> > klasyczne	rozruch I <sub>0</sub> > adaptacyjn	korzyść?	rozruch I <sub>0</sub> > klasyczne	rozruch I <sub>0</sub> > adaptacyjn	korzyść?	rozruch I <sub>0</sub> > klasyczne	rozruch I <sub>0</sub> > adaptacyjn	korzyść?
1	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν
10	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν
50	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν
100	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν
250	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν	Ν	Т	Т
500	Т	Т	Ν	Т	Т	Ν	Ν	Т	Т	Ν	Ν	Ν
1000	Т	Т	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν
2000	Т	Т	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν	Ν	N	Ν	N
4000	N	N	Ν	N	N	N	N	Ν	Ν	N	N	N

przez rezystor,  $U_n = 15 \text{ kV}$ ,  $I_{CS} = 120 \text{ A}$ ,  $d_0 = 1,5$ 

Korzyść z zastosowania kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego dla sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, które do adaptacji nastawy wykorzystuje

zmianę wartości napięć faz względem ziemi uzyskuje się dla sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego zainstalowanych w takich miejscach sieci, w których za miejscem zainstalowania sygnalizatora linia SN ma stosunkowo dużą wartość prądu pojemnościowego. Dla współczynnika udziału a = 0,01 oraz a = 0,05 nie notuje się zwiększenia skuteczności kryterium adaptacyjnego.

Wspominana korzyść jest z pozoru niewielka, jednak należy tutaj dodać, że w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia są znacznie mniejsze w porównaniu z siecią skompensowaną. Ma to związek z relatywnie dużą wartością prądu płynącego w miejscu zwarcia.

7.3.2. Kryterium zerowoprądowe adaptacyjne wykorzystujące do adaptacji nastawy wartość składowej zerowej napięcia w sieci

Podobnie jak w przypadku sieci skompensowanej, dla sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor można zastosować uproszczoną metodę pomiaru wartości skutecznej składowej zerowej napięcia w sieci z wykorzystaniem analizy tylko jednego napięcia fazy względem ziemi, która została przedstawiona w rozdziale 6.

Wartości skuteczne składowej zerowej napięcia w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor dla różnych wartości znamionowego prądu ziemnozwarciowego rezystora, a więc także współczynnika tłumienia sieci  $d_0$  przedstawiono w tablicy 7.11.

### Tablica 7.11.

## Wartości skuteczne składowej zerowej napięcia w sieci SN z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor z różnymi współczynnikami tłumienia,

R <sub>E</sub> w O							
	$d_0 = 1,5$	$d_0 = 2$	$d_0 = 2,5$				
1	8484	8428	8373				
10	7138	6767	6436				
50	4071	3548	3145				
100	2616	2212	1913				
250	1254	1036	878				
500	670	549	462				
1000	347	283	237				
2000	176	143	120				
4000	89	72	60				

 $U_{\rm n} = 15 \text{ kV}, I_{\rm CS} = 120 \text{ A}$ 

Zgodnie z zależnościami (2.1) oraz (2.3) wartość skuteczna składowej zerowej napięcia w sieci nie zależy od współczynnika udziału prądu pojemnościowego linii za miejscem

zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego w stosunku do prądu pojemnościowego całej sieci.

Nastawa kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego wykorzystującego do adaptacji wartość skuteczną składowej zerowej napięcia powinna być wyznaczana z zależności (7.13) a wartość współczynnika adaptacji  $k_{a2}$  ze wzoru:

$$k_{a2} = \frac{0.3 + \frac{2\sqrt{3}U_0}{U_n}}{2} \tag{7.14}$$

gdzie  $U_0$  – wyznaczona wartość skuteczna składowej zerowej napięcia w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego,  $U_n$  – nominalne napięcie sieci.

Dla tak zdefiniowanego współczynnika adaptacji jego wartości dla sieci SN z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, dla której wartości skuteczne  $U_0$  podczas różnych zwarć przedstawione są w tablicy 7.11, uzyskuje się współczynniki adaptacji podane w tablicy 7.12.

#### Tablica 7.12.

Wartości współczynników adaptacji ka dla sieci SN z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor z różnymi współczynnikami tłumienia, *U*<sub>n</sub> = 15 kV, *I*<sub>CS</sub> = 120 A

$R_{\rm E} \ge 0$	ka							
AF W 22	$d_0 = 1,5$	$d_0 = 2$	$d_0 = 2,5$					
1	1,13	1,12	1,12					
10	0,97	0,93	0,89					
50	0,62	0,56	0,51					
100	0,45	0,41	0,37					
250	0,29	0,27	0,25					
500	0,23	0,21	0,2					
1000	0,19	0,18	0,18					
2000	0,17	0,17	0,16					
4000	0,16	0,16	0,16					

Wartości prądu w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego  $I_{kZ}$ , nastawy kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego wykorzystującego do adaptacji wartość skuteczną składowej zerowej napięcia  $I_{0nast_a2}$  oraz informacje o rozruchu kryterium przedstawiono w tablicy 7.13. Brane są pod uwagę różne wartości współczynnika  $a_i$  przy współczynniku tłumienia równym  $d_0 = 1,5$ .
Kryterium zerowoprądowe adaptacyjne, które do zmiany wartości nastawy wykorzystuje wartość skuteczną składowej zerowej napięcia wyznaczaną przez sygnalizator np. na podstawie pomiaru jednego napięcia fazy względem ziemi, może być w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor bardzo skuteczne. Dla sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego, które zainstalowane są w krótkich odczepach mogą być wykrywane doziemienia o rezystancji przejścia równej nawet  $R_{\rm F} = 4$  k $\Omega$ .

#### Tablica 7.13.

Wartości prądu zwarciowego w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego, nastawy kryterium adaptacyjnego i informacja o rozruchu kryterium adaptacyjnego w sieci o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor,

	<i>a</i> = 0,01		<i>a</i> =	0,05	<i>a</i> = 0,1		<i>a</i> = 0,2		
R <sub>F</sub> wΩ	I <sub>k</sub> z w A	I <sub>0nast_a</sub> 2 w A	rozruch?	I <sub>0nast_a</sub> 2 w A	rozruch?	I <sup>0nast_a2</sup> w A	rozruch?	I <sub>0nast_a</sub> 2 w A	rozruch?
1	204,55	3,4	Т	14,7	Т	29,4	Т	57,6	Т
10	172,11	2,9	Т	12,6	Т	25,2	Т	49,5	Т
50	98,2	1,9	Т	8,1	Т	16,1	Т	31,6	Т
100	63,1	1,4	Т	5,9	Т	11,7	Т	23	Т
250	30,24	0,9	Т	3,8	Т	7,5	Т	14,8	Т
500	16,16	0,7	Т	3	Т	6	Т	11,7	Т
1000	8,36	0,6	Т	2,5	Т	4,9	Т	9,7	N
2000	4,25	0,5	Т	2,2	Т	4,4	N	8,7	N
4000	2,15	0,5	Т	2,1	Т	4,2	N	8,2	N

$$U_{\rm n} = 15 \text{ kV}, I_{\rm CS} = 120 \text{ A}$$

Skuteczność kryterium spada wraz ze wzrostem wartości prądu pojemnościowego linii za sygnalizatorem, jednak zawsze wartości graniczne  $R_F$  są, dla kryterium z tym typem adaptacji, wyższe w porównaniu z zabezpieczeniami klasycznymi.

## 7.4. WNIOSKI DO ROZDZIAŁU

W rozdziale 7 zaporoponowano trzy kryteria zerowoprądowe z funkcją adaptacyjną, spośród których dwa przeznaczone są do pracy w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, a jedno – do sieci skompensowanej.

Dla sieci skompensowanej zaproponowane zostało kryterium, które do adaptacji nastawy wykorzystuje wartość składowej zerowej napięcia.  $U_0$  może być wyznaczone

klasycznie bądź z wykorzystaniem metod uproszczonych. Kryterium cechuje się zdecydowanie szerszym zakresem wykrywanej rezystancji przejścia  $R_F$  w stosunku do klasycznego kryterium zerowoprądowego. Niezależnie od wartości współczynnika rozstrojenia kompensacji *s*, dla dużego zakresu współczynnika udziału *a* maksymalne wykrywane rezystancje przejścia są równe co najmniej  $R_{\text{Fmax}} = 1500 \ \Omega$ . To z kolei pozwala zakwalifikować kryterium zerowoprądowe adaptacyjne do grupy kryteriów wykrywających zwarcia wysokooporowe w skompensowanej sieci średniego napięcia.

W przypadku sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor zaproponowano adaptację nastawy z wykorzystaniem zmiany wartości napięcia faz względem ziemi oraz z wykorzystaniem wartości  $U_0$ , mogącej pochodzić z uproszczonej metody wyznaczania tej wielkości.

Korzyść z zastosowania kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego dla sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, które do adaptacji nastawy wykorzystuje zmianę wartości napięć faz względem ziemi, uzyskuje się dla sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego zainstalowanych w takich miejscach sieci, w których za miejscem zainstalowania sygnalizatora linia SN ma stosunkowo dużą wartość prądu pojemnościowego. Dla współczynnika udziału *a* nie większego niż 0,05 nie notuje się zwiększenia skuteczności kryterium adaptacyjnego. Zaznaczyć należy, że wzrost wykrywanej rezystancji przejścia jest o kilkaset omów, co w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor jest wartością istotną.

Kryterium zerowoprądowe z funkcją adaptacyjną, które do zmiany wartości nastawy w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor wykorzystuje wartość skuteczną składowej zerowej napięcia wyznaczaną przez sygnalizator np. na podstawie pomiaru jednego napięcia fazy względem ziemi, może być bardzo skuteczne. Dla sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego, które zainstalowane są w krótkich odczepach mogą być wykrywane doziemienia o rezystancji przejścia równej nawet  $R_F = 4 \text{ k}\Omega$ . Skuteczność kryterium spada wraz ze wzrostem wartości prądu pojemnościowego linii za sygnalizatorem, jednak zawsze wartości graniczne  $R_F$  są, dla kryterium z tym typem adaptacji, wyższe w porównaniu z zabezpieczeniami klasycznymi.

Należy zatem uważać, że proponowane kryteria mogą w znaczącym stopniu poprawić skuteczność detekcji zwarć doziemnych i przyczynić się do zwiększenia efektywności pracy sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego.

## 8. KRYTERIUM ADMITANCYJNE DO DETEKCJI ZWARĆ DOZIEMNYCH

Kryterium admitancyjne, opracowane przez prof. J. Lorenca w latach 80. XX wieku, jest obecnie jednym z najczęściej stosowanych kryteriów do wykrywania zwarć doziemnych w sieciach średniego napięcia z punktem neutralnym uziemionym przez dławik gaszący lub rezystor. Wysoka skuteczność zabezpieczeń opartych na pomiarze Y<sub>0</sub>> oraz ich stosunkowo prosta konstrukcja rokują nadzieję na możliwość przeniesienia tych zasad także do czujników przepływu prądu zwarciowego.

Istnieje podstawowy problem, który z pozoru uniemożliwia stosowanie kryterium  $Y_0$ > w sygnalizatorach przepływu prądu zwarciowego. Mowa tu o trudnościach z wiarygodnym pomiarem składowej zerowej napięcia w miejscu zainstalowania urządzenia z tym kryterium. Problem ten może być rozwiązany z wykorzystaniem metod przedstawionych w rozdziale 6 niniejszej rozprawy. Wszystkie dalsze analizy prowadzone będą przy założeniu, że w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego dostępne są następujące przetworniki pomiarowe:

- zestaw trzech przekładników prądowych do pomiaru składowej zerowej prądu, cechujący się błędem pomiaru, jak było to zakładane wcześniej, równym  $\Delta I_{0\mu} = 0,5$  A, ale zostanie także określony wpływ wartości tego uchybu na skuteczność kryterium,
- jeden sensor do pomiaru napięcia fazy względem ziemi.

Zakłada się także dostęp do transformatora potrzeb własnych rozłącznika, przy którym zainstalowany jest sygnalizator.

Wyznaczanie wartości admitancji Y<sub>0</sub> prowadzić należy według standardowej zależności opisanej wzorem:

$$Y_0 = \frac{I_{\rm kZ}}{U_0}.\tag{8.1}$$

W zależności (8.1):  $I_{kZ}$  – wartość skuteczna prądu ziemnozwarciowego zmierzona z wykorzystaniem przekładników prądowych w miejscu zainstalowania sygnalizatora,  $U_0$  – wartość skuteczna składowej zerowej napięcia mierzona w miejscu zainstalowania sygnalizatora z wykorzystaniem algorytmu przedstawionego w podrozdziale 6.2.

Detekcja doziemienia następuje w sytuacji, gdy jednocześnie spełnione są warunki określone zależnościami:

$$Y_0 \ge Y_{0\text{nast}} \tag{8.2}$$

$$U_0 \ge U_{0\text{nast}} \tag{8.3}$$

W przypadku zabezpieczeń ziemnozwarciowych instalowanych w polach rozdzielni SN zwykle nastawianą wartością progową składowej zerowej napięcia, przy której możliwy jest rozruch członów admitancyjnych, jest  $U_{0nast} = 15$  V. W sieci o napięciu nominalnym  $U_n = 15$  kV po stronie pierwotnej filtru składowej zerowej napięcia daje to wartość  $U_{0nast}^p = 1300$  V. W wielu spółkach dystrybucyjnych przyjmuje się także alternatywnie  $U_{0nast} = 10$  V, co po stronie wtórnej filtru składowej zerowej napięcia (dla  $U_n = 15$  kV) da  $U_{0nast}^p = 866$  V. Taka niższa wartość nastawcza  $U_0$  jest także stosowana często w sieciach z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, gdzie wartość naturalnej asymetrii pojemnościowej sieci jest niewielka.

Nastawa kryterium admitancyjnego w sygnalizatorach przepływu prądu zwarciowego powinna być wyznaczona z klasycznych zależności:

$$Y_{0nast} \ge \frac{k_b I_{CLi}}{U_{0max}} + \Delta Y_{0\mu}$$
(8.4)

$$Y_{0nast} < \frac{I_{CS} \sqrt{d_0^2 + (s + a_i)^2}}{U_{0max} k_c}$$
(8.5)

gdzie  $k_b$  – współczynnik bezpieczeństwa przyjmowany zwykle równy 1,2,  $I_{CLi}$  – prąd pojemnościowy linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego,  $U_{0max}$  – maksymalna wartość składowej zerowej napięcia po stronie wtórnej filtru, która dla klasycznych układów otwartego trójkąta jest równa 100 V, a dla urządzeń nastawianych po stronie pierwotnej to wartość nominalna napięcia fazy względem ziemi,  $\Delta Y_{0\mu}$  – admitancja wynikająca z błędów pomiarowych lub szumu pomiarowego,  $I_{CS}$  – prąd pojemnościowy całej sieci,  $d_0$  – współczynnik tłumienia, s – współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej,  $a_i = \frac{I_{CLi}}{I_{CS}}$ ,  $k_c$  – współczynnik czułości o wartości równej co najmniej 2.

Warto dodać, że wzory (8.4) i (8.5) są uniwersalne, tzn. można ich używać do doboru nastaw w sieci z dowolnym sposobem pracy punktu neutralnego.

Sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego przyjęło nastawiać się z uwzględnieniem wielkości ziemnozwarciowych występujących po stronie pierwotnej przekładników, zatem we wzorach (8.4) i (8.5) pominięta została przekładnia filtru składowej zerowej prądu.

Wartość błędu admitancyjnego  $\Delta Y_{0\mu}$  jest w literaturze (np. [30]) określana dla klasycznych filtrów składowej zerowej prądu i przyjmuje się zwykle:

- dla filtru Holmgreena: 2 mS,
- dla filtru Ferrantiego: 0,6 mS,

przy czym są to wielkości odniesione do strony wtórnej filtrów.

Dla urządzeń nastawianych w odniesieniu do strony pierwotnej filtrów producenci urządzeń podają [61], że błąd admitancyjny jest uzależniony od wartości nastawczej  $U_{0nast}$  w sygnalizatorze i trzeba go obliczyć z zależności:

$$\Delta Y_{0\mu} = \frac{\Delta I_{0\mu}}{U_{0\text{nast}}(1 - \delta U_0)}$$
(8.6)

gdzie  $\Delta I_{0\mu}$  – błąd prądowy filtru po stroni pierwotnej,  $U_{0nast}$  – nastawiona wartość rozruchowa członu napięciowego kryterium,  $\delta U_0$  – względny błąd napięciowy układu pomiaru składowej zerowej napięcia.

Nastawioną wartość rozruchową członu napięciowego kryterium zakłada się równą  $U_{0nast} = 1300$  V. Względny błąd napięciowy układu do pomiaru składowej zerowej napięcia jest, dla metod proponowanych w rozdziale 6, równy:

- przy wyznaczaniu składowej zerowej napięcia na podstawie pomiaru tylko jednego napięcia fazy względem ziemi:  $\delta U_{0_1} = 10$  %,
- przy wyznaczaniu składowej zerowej napięcia na podstawie pomiaru jednego napicia fazy względem ziemi i jednego napięcia międzyfazowego:  $\delta U_{0_2} = 5 \%$ .

Gdyby nie uwzględniać błędów prądowych filtrów można by uważać, że jedynym czynnikiem ograniczającym wykrywane rezystancje przejścia jest naturalna asymetria sieci i związana z nią nastawa  $U_{0nast}$ . W takim przypadku zastosowanie kryteriów admitancyjnych w sygnalizatorach przepływu prądu zwarciowego zapewniałoby wykrywanie zwarć w przypadku których rezystancja przejścia wynosiłaby nawet ok. 4 k $\Omega$  (rys. 8.1).



Rys. 8.1. Przykładowe wartości skuteczne składowej zerowej napięcia w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor oraz w sieci skompensowanej z zaznaczonymi dwoma wartościami  $U_{0nast}$ 

Uwzględnienie uchybów filtrów składowej zerowej prądu i napięcia sprawia, że zakres wykrywanych rezystancji przejścia zmniejsza się. Na potrzeby analizy wpływu błędu pomiaru składowej zerowej prądu na wykrywane rezystancje przejścia założono, że rozpatrzone zostaną przypadki z błędami filtru (po stronie pierwotnej) wynoszącymi 0,5 A, 0,75 A, 1 A i 2 A.

W tablicy 8.1. zestawione zostały obliczone wartości błędu admitancyjnego dla różnych sytuacji opisanych w tekście powyżej.

### Tablica 8.1.

## Błąd admitancyjny filtrów składowej zerowej wyznaczony dla kryteriów nastawianych względem strony pierwotnej tych filtrów

	$\Delta Y_{0\mu} \mathbf{w} \mathbf{mS}$					
	$\Delta I_{0\mu} = 0,5 \text{ A}$	$\Delta I_{0\mu} = 0,75 \text{ A}$	$\Delta I_{0\mu} = 1 \text{ A}$	$\Delta I_{0\mu} = 2 \mathrm{A}$		
$\delta U_0 = 5 \%$	0,40	0,61	0,81	1,62		
$\delta U_0 = 10 \%$	0,43	0,64	0,85	1,71		

Korzystając z zależności (8.2) oraz (8.3) można wyznaczyć górną granicę zakresu wykrywanych rezystancji przejścia z wykorzystaniem kryterium opartego na pomiarze admitancji doziemionego odcinka linii za sygnalizatorem przepływu prądu zwarciowego. Wyznaczone rezystancje maksymalne zestawiono w tablicy 8.2. Zakłada się w obliczeniach, że sieć pracuje z punktem neutralnym uziemionym przez dławik gaszący, współczynnik rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej jest równy s = 0,1 a wartość prądu

pojemnościowego całej sieci  $I_{CS} = 120$  A, prąd automatyki wymuszania składowej czynnej  $I_{AWSCz} = 20$  A.

## Tablica 8.2.

$\Delta Y_{0\mu}$ w mS	a = 0.01 $Y_0 = 3.35$ mS	a = 0.05 $Y_0 = 3.75$ mS	a = 0,1 $Y_0 = 4,28$ mS	a = 0.15 $Y_0 = 4.83$ mS	a = 0,2 $Y_0 = 5,40$ mS
0,40	1650	1650	1650	1650	1650
0,61	1650	1650	1650	1650	1650
0,81	1650	1650	1650	1650	1650
1,62	1650	1650	1650	1650	1650
0,43	1650	1650	1650	1650	1650
0,64	1650	1650	1650	1650	1650
0,85	1650	1650	1650	1650	1650
1,71	1650	1650	1650	1650	1650

## Maksymalne wartości wykrywanej rezystancji przejścia $R_F$ w $\Omega$ dla kryterium admitancyjnego

Wyniki obliczeń przedstawione w tablicy 8.2. pokazują, że dla przyjętego zakresu współczynnika udziału prądu pojemnościowego linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora przepływu w stosunku do całego prądu pojemnościowego sieci wykrywane przez kryterium admitancyjne są zwarcia o rezystancji przejścia mniejszej niż  $R_{\rm F} = 1650 \ \Omega$  i wartość ta nie zależy (w przyjętym przedziale *a*) od wartości błędu admitancyjnego filtru. Ściślej, nastawa admitancyjna kryterium jest w rozpatrywanych przypadkach wyższa od wartości  $Y_0$  mierzonej przez sygnalizator. W każdym z przypadków ograniczenie zakresu wykrywanej rezystancji przejścia wynika z niespełnienia warunku danego wzorem (8.3).

Zakłócenia wykrywane przez kryterium admitancyjne, w porównaniu do klasycznych kryteriów zerowoprądowych, mają znacznie większą wartość  $R_{\rm Fmax}$ , która dodatkowo nie zależy od wartości współczynnika udziału prądu pojemnościowego linii za sygnalizatorem w stosunku do prądu pojemnościowego całej sieci. Implementacja tego skutecznego kryterium jest możliwa z wykorzystaniem uproszczonych metod wyznaczania składowej zerowej napięcia.

## 9. BADANIA SYMULACYJNE KRYTERIÓW ADAPTACYJNYCH

### 9.1. UWAGI OGÓLNE

Większość prowadzonych współcześnie prac badawczych opiera się na wynikach eksperymentów przeprowadzanych w różnych środowiskach symulacyjnych. Ponieważ działanie kryteriów adaptacyjnych oraz algorytmu admitancyjnego, których rozpoznanie jest ważnym elementem niniejszej rozprawy, były analizowane obliczeniowo i wyniki tych obliczeń były satysfakcjonujące, postanowiono zbudować model symulacyjny sieci SN, w którym zjawiska ziemnozwarciowe byłyby odzwierciedlane z maksymalną możliwą dokładnością, skala modelu byłaby adekwatna do rozmiarów rzeczywistych sieci, a możliwości jego rozbudowy znaczne, na potrzeby przyszłych badań.

Do budowy modelu wybrane zostało środowisko PSCAD w wersji 4.2.1.

### 9.2. MODEL SYMULACYJNY

Widok ogólny zbudowanego modelu przedstawia rysunek 9.1.

Model odwzorowuje stację elektroenergetyczną WN/SN zasilaną poprzez transformator o grupie połączeń YNd11 o mocy znamionowej  $S_{tr} = 25$  MVA. Napięcie nominalne modelowanej sieci SN jest równe  $U_n = 15$  kV, co daje nominalną wartość napięcia fazy względem ziemi równą  $U_{nL} = 8660$  V. Sieć może pracować z punktem neutralnym:

- uziemionym przez rezystor o dowolnej wartości rezystancji znamionowej,
- uziemionym przez dławik kompensujący o dowolnej wartości prądu kompensującego, bez automatyki wymuszania składowej czynnej,
- uziemionym przez dławik kompensujący jak wyżej, ale z automatyką wymuszania składowej czynnej, przy czym zaznacza się tutaj, że z powodu istniejących ograniczeń licencyjnych, nie została zamodelowana sekwencja załączania AWSCz,
- uziemionym przez układ równoległy dławika i rezystora,
- izolowanym.

Transformator uziemiający zamodelowany jest jako urządzenie o grupie połączeń Zy11 i ma moc kompensacji  $S_{tr_u} = 400$  kVA.

W modelu odwzorowywana może być sieć o dowolnej wartości pojemnościowego prądu ziemnozwarciowego *I*<sub>CS</sub>, przy czym cała wartość tego prądu rozkłada się na dwie linie:



Rys. 9.1. Model sieci SN wykorzystywany podczas badań symulacyjnych

- zasilaną z pola Y, która składa się z 5 odcinków, z możliwością wykonywania zwarcia na końcu każdego z odcinka i z pomiarem wielkości elektrycznych na początku każdego z nich odcinka. Odcinki numerowane są od 1 do 5 (szare prostokąty ze strzałkami),
- zasilana z pola X, która składa się z jednego odcinka, który ma odwzorowywać pozostałą część sieci, która nie jest objęta zwarciem. Linia zasilana z pola X stanowi tzw. tło sieci.

Każdy z odcinków sieci zbudowany jest jako czwórnik typu gamma. W gałęzi podłużnej czwórnika odwzorowywana jest rezystancja oraz indukcyjność, natomiast w gałęzi poprzecznej – pojemność oraz konduktancja związana z upływnością linii. Schemat wewnętrzny bloku LINE przedstawiony jest na rysunku Rys. 9.2.



Rys. 9.2. Struktura wewnętrzna bloku LINE

Parametry poszczególnych elementów bloku LINE są wyznaczane w odrębnych modułach obliczeniowych, przy czym rezystancja i indukcyjność linii, które mają niewielki wpływ na procesy ziemnozwarciowe, deklarowane są jako wartości stałe odpowiadające linii o rezystancji  $R0 = 0.5 \Omega$  oraz reaktancji indukcyjnej  $X0 = 0.05 \Omega$ .



Rys. 9.3. Moduł wyboru miejsca zwarcia i zadawania wartości rezystancji przejścia R<sub>F</sub>

Modelowane zwarcie może cechować się dowolną, nastawialną rezystancją przejścia  $R_F$  (parametr *RF*), jednak w każdej sytuacji zwarcie wykonywane jest między fazą L1 a ziemią. Miejsce wystąpienia zwarcia może być przez użytkownika wybierane przy użyciu odpowiedniego elementu sterującego spośród 7 lokalizacji:

- punkt 1: za odcinkiem 1 linii zasilanej z pola Y,
- punkt 2: za odcinkiem 2 linii zasilanej z pola Y,
- punkt 3: za odcinkiem 3 linii zasilanej z pola Y,
- punkt 4: za odcinkiem 4 linii zasilanej z pola Y,
- punkt 5: za odcinkiem 5 linii zasilanej z pola Y,
- punkt 6: za odcinkiem 6 linii zasilanej z pola X,
- punkt 7: zwarcie na szynach zbiorczych.

Za odcinkami 2, 4, 5 oraz 6 modelowane jest obciążenie linii w postaci trzech połączonych w trójkąt rezystorów o rezystancji  $R_{\text{load}} = 1 \text{ M}\Omega$ .

Sterowanie łącznikami, parametrami urządzeń w punkcie neutralnym oraz wartościami prądów pojemnościowych poszczególnych odcinków linii odbywa się w osobnym module kontrolnym, którego widok przedstawia rysunek 9.4.



Rys. 9.4. Widok ogólny na moduł kontrolny Control

Wyniki symulacji wizualizowane są w module pomiarowym, którego widok przedstawia rysunek 9.5. Istnieje możliwość bezpośredniego odczytu:

- wartości skutecznej składowej zerowej napięcia na szynach zbiorczych,
- wartości skutecznej składowej zerowej prądu na początku każdego z odcinków linii 1-6,
- wartości admitancji zerowej na początku każdego z odcinków linii 1-6,
- prądu dławika uziemiającego IPC,
- prądu rezystora uziemiającego IRAF.



Rys. 9.5. Widok ogólny modułu pomiarowego

Dodatkowo generowany jest raport do pliku tekstowego oraz pliku CSV, który poza wyżej wspomnianymi wielkościami udostępnia m.in.:

- wartości skuteczne składowej zerowej napięcia na początku każdego z odcinków linii 1-6,
- wartości skuteczne napięć faz względem ziemi na początku każdego z odcinków,
- wartości skuteczne prądów fazowych na początku każdego z odcinków.

Uzupełnieniem modułu pomiarowego jest możliwość wygenerowania pliku Comtrade z przebiegami czasowymi wybranych wielkości.

## 9.3. BADANIA SYMULACYJNE KRYTERIUM ZEROWOPRĄDOWEGO ADAPTACYJNEGO DLA SIECI SKOMPENSOWANEJ

Kryterium zerowoprądowe adaptacyjne dla sieci skompensowanej bazuje na uzależnieniu nastawy prądowej zabezpieczenia od wartości skutecznej składowej zerowej prądu mierzonej przez zainstalowany w głębi sieci sygnalizator przepływu prądu zwarciowego. Wartość współczynnika kompensacji  $k_a$  jest wyznaczana z zależności (7.7), w której istotna jest znajomość współczynnika ziemnozwarciowego, prądu pojemnościowego linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora oraz błąd prądowy filtru składowej zerowej. Zakłada się, że  $\Delta I_{0\mu} = 0,5$  A i takie założenie było też czynione podczas wszystkich wcześniejszych analiz.

Procedura weryfikacji symulacyjnej działania kryterium:

- 1) założenia:  $I_{CS} = 120 \text{ A}, I_{L} = 150 \text{ A}, I_{AWSCz} = 20 \text{ A},$
- n-krotny start symulacji dla różnych wartości *I*<sub>CLi</sub>, czyli dla różnych wartości prądu pojemnościowego linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora,
- 3) agregacja wartości składowej zerowej napięcia  $U_{0_s}$  oraz składowej zerowej prądu  $I_{0_s}$ w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego, przy czym zakłada się, że może to być początek dowolnego odcinka 1-6,
- 4) wyznaczenie w arkuszu kalkulacyjnym wartości współczynnika ziemnozwarciowego β,
   współczynnika adaptacji k<sub>a</sub> i nastawy kryterium I<sub>0nast\_a</sub>,
- 5) sprawdzenie warunku rozruchu zabezpieczenia i ocena możliwości jego zadziałania w danych warunkach.

Warunek rozruchu zabezpieczenia jest dany zależnością:

$$I_{0nast\_a} \le I_{0\_s} \tag{9.1}$$

gdzie  $I_{0nast_a}$  to wartość nastawcza kryterium dla danej metody,  $I_{0_s}$  – wyznaczona symulacyjnie wartość skuteczna składowej zerowej prądu w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego.

Symulowane były tylko zwarcia doziemne wysokooporowe, tj, zgodnie z podrozdziałem 3.1, o rezystancji przejścia  $R_{\rm F} \ge 1000 \Omega$ .

W tablicy 9.1. zestawiono wyniki symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem zbudowanego modelu sieci SN. W tablicy przez  $I_{CLi}$  oznaczono prąd pojemnościowy i-tego fragmentu linii za sygnalizatorem przepływu prądu zwarciowego,  $a_i$  to udział prądu pojemnościowego odcinka linii za sygnalizatorem w stosunku do  $I_{CS}$ ,  $U_{0_s}$  to wyznaczona

symulacyjnie wartość skuteczna składowej zerowej napięcia w miejscu zainstalowania sygnalizatora,  $\beta$  – współczynnik ziemnozwarciowy. Ponadto w kolumnie  $k_a$  znajdują się obliczone wartości współczynnika adaptacji, w kolumnie  $I_{0_s}$  wartości skuteczne składowej zerowej prądu wyznaczone symulacyjnie w miejscu zainstalowania sygnalizatora. Kolumna  $I_{0nast_a}$  zawiera wyznaczone analitycznie wartości nastawcze kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego.

## Tablica 9.1.

RF	ICLi	a:	U0_s	ß	k	I0_s	Ionast_a	rozruch?
wΩ	w A	<i>u</i> 1	w V	P	na	w A	w A	1021 uch :
	1,2	0,01	1888,92	0,22	0,25	6,99	0,46	TAK
	6	0,05	1902,6	0,22	0,23	7,41	1,66	TAK
1000	12	0,1	1890,83	0,22	0,22	8,21	3,07	TAK
	18	0,15	1891,59	0,22	0,22	9,08	4,55	TAK
	24	0,2	1892,05	0,22	0,22	10,05	6,04	TAK
	1,2	0,01	1352,85	0,16	0,19	5,01	0,35	TAK
	6	0,05	1353,55	0,16	0,17	5,35	1,23	TAK
1500	12	0,1	1354,23	0,16	0,16	5,88	2,24	TAK
	18	0,15	1354,92	0,16	0,16	6,51	3,31	ТАК
	24	0,2	1355,34	0,16	0,16	7,2	4,39	ТАК
	1,2	0,01	1269,21	0,15	0,18	4,7	0,33	ТАК
	6	0,05	1269,88	0,15	0,16	5,01	1,16	ТАК
1750	12	0,1	1270,6	0,15	0,15	5,52	2,1	ТАК
	18	0,15	1271,19	0,15	0,15	6,1	3,11	ТАК
	24	0,2	1271,63	0,15	0,15	6,75	4,12	ТАК
	1,2	0,01	1053,53	0,12	1	3,9	1,85	ТАК
	6	0,05	1063,05	0,12	1	4,14	7,23	NIE
2000	12	0,1	1054,73	0,12	1	4,58	13,97	NIE
	18	0,15	1055,23	0,12	1	5,07	20,7	NIE
	24	0,2	1055,62	0,12	1	5,61	27,44	NIE
	1,2	0,01	730,21	0,08	1	2,71	1,85	ТАК
	6	0,05	737,35	0,09	1	2,69	7,23	NIE
3000	12	0,1	731,08	0,08	1	3,17	13,97	NIE
	18	0,15	731,44	0,08	1	3,51	20,7	NIE
	24	0,2	731,61	0,08	1	3,89	27,44	NIE
	1,2	0,01	452,41	0,05	1	1,68	1,85	NIE
	6	0,05	457,11	0,05	1	1,78	7,23	NIE
5000	12	0,1	452,97	0,05	1	1,97	13,97	NIE
	18	0,15	453,2	0,05	1	2,18	20,7	NIE
	24	0,2	453,35	0,05	1	2,41	27,44	NIE

## Wyniki symulacji i obliczeń analitycznych związane z kryterium zerowoprądowym adaptacyjnym dla sieci skompensowanej

Przykładowe przebiegi w czasie wartości skutecznej składowej zerowej napięcia i prądu oraz napięcie skuteczne poszczególnych faz względem ziemi w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego (przy wyłączniku W1, por. rys. 9.1) przedstawione zostały na rysunku 9.6.



Rys. 9.6. Przebiegi wybranych wielkości zarejestrowane podczas symulacji zwarcia doziemnego o rezystancji przejścia  $R_{\rm F} = 1500 \ \Omega$  dla pojemnościowego prądu ziemnozwarciowego linii za miejscem wykonywania pomiarów równego  $I_{\rm CLi} = 6 \ A$ 

Łącznie w tablicy 9.1. przedstawiono wyniki symulacji dla 30 zwarć doziemnych. Proponowane kryterium zerowoprądowe adaptacyjne było skuteczne w przypadku 17 awarii, co stanowi 57% wszystkich przypadków. Kryterium jest skuteczne dla wszystkich zwarć o rezystancji przejścia mniejszej bądź równej od  $R_{\rm Fmax} = 1750 \ \Omega$ .

W tablicy 9.2. zestawiono fakt zaistnienia rozruchu kryterium adaptacyjnego i klasycznego kryterium zerowoprądowego w tych samych warunkach. Kryterium adaptacyjne okazało się mieć przewagę nad klasycznym nadprądowym, tzn. wejść w stan rozruchu w sytuacji, gdy kryterium klasyczne jest w spoczynku, w 11 analizowanych przypadkach. Przekłada się to na fakt, że proponowane kryterium zerowoprądowe adaptacyjne jest w sieci

skompensowanej o wartości prądu pojemnościowego  $I_{CS} = 120$  A, współczynniku rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej s = 0,1 oraz współczynniku tłumienia  $d_0 = 0,17$  co najmniej o 37% skuteczniejsze w detekcji wysokooporowych zwarć doziemnych niż klasyczne kryterium zerowoprądowe.

## Tablica 9.2.

<b>D</b>	I.e.		Rozruch	Rozruch	Przewaga			
		ai	kryterium	kryterium	kryterium			
W 32	WA		adaptacyjnego?	klasycznego?	adaptacyjnego?			
	1,2	0,01	TAK	TAK	NIE			
	6	0,05	TAK	TAK	NIE			
1000	12	0,1	TAK	NIE	TAK			
	18	0,15	TAK	NIE	TAK			
	24	0,2	TAK	NIE	ТАК			
	1,2	0,01	TAK	TAK	NIE			
	6	0,05	TAK	NIE	ТАК			
1500	12	0,1	TAK	NIE	ТАК			
	18	0,15	TAK	NIE	ТАК			
	24	0,2	TAK	NIE	ТАК			
	1,2	0,01	TAK	TAK	NIE			
	6	0,05	TAK	NIE	ТАК			
1750	12	0,1	TAK	NIE	ТАК			
	18	0,15	TAK	NIE	ТАК			
	24	0,2	TAK	NIE	ТАК			
	1,2	0,01	TAK	TAK	NIE			
	6	0,05	NIE	NIE	NIE			
2000	12	0,1	NIE	NIE	NIE			
	18	0,15	NIE	NIE	NIE			
	24	0,2	NIE	NIE	NIE			
	1,2	0,01	TAK	TAK	NIE			
	6	0,05	NIE	NIE	NIE			
3000	12	0,1	NIE	NIE	NIE			
	18	0,15	NIE	NIE	NIE			
	24	0,2	NIE	NIE	NIE			
	1,2	0,01	NIE	NIE	NIE			
	6	0,05	NIE	NIE	NIE			
5000	12	0,1	NIE	NIE	NIE			
	18	0,15	NIE	NIE	NIE			
	24	0,2	NIE	NIE	NIE			

## Porównanie skuteczności kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego

i zerowoprądowego klasycznego

Ocena skuteczności kryterium adaptacyjnego z wykorzystaniem zbudowanego modelu symulacyjnego została wykonana także dla innych wartości współczynnika rozstrojenia

kompensacji ziemnozwarciowej w sieci o sumarycznym prądzie pojemnościowym równym  $I_{CS} = 120$  A.

W tablicy 9.3. pokazano uproszczone wyniki symulacji, z zaznaczeniem rozruchu kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego i klasycznego kryterium nadprądowego. Symulowano zwarcia o rezystancji przejścia o wartościach  $R_{\rm F} = \{1000; 1750; 2000\} \Omega$ .

#### Tablica 9.3.

R <sub>F</sub>	~		s = -0,1	l		<i>s</i> = 0,1			<i>s</i> = 0,2	
$w \Omega$	u	roz_a	roz_k	korzyść	roz_a	roz_k	korzyść	roz_a	roz_k	korzyść
	0,01	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE
0	0,05	TAK	NIE	TAK	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE
00	0,1	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK
1	0,15	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK
	0,2	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK
(	0,01	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE
	0,05	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK	NIE	NIE	NIE
75(	0,1	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK	NIE	NIE	NIE
1	0,15	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK	NIE	NIE	NIE
	0,2	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK	NIE	NIE	NIE
	0,01	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE
C	0,05	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE
00	0,1	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE
7	0,15	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE
	0,2	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE

Skuteczność kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego w sieciach z różnymi wartościami współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej s

W tablicy 9.3. zastosowano następujące oznaczenia: roz\_a – rozruch kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego, roz\_k – rozruch klasycznego kryterium nadprądowego, korzyść – sytuacja, w której wystąpił rozruch kryterium adaptacyjnego a nie było rozruchu kryterium klasycznego.

W analizowanych przypadkach szczególnie ważna jest sytuacja, w której współczynnik rozstrojenia kompensacji jest ujemny, tzn. wartość prądu pojemnościowego  $I_{CL}$  przewyższa wartość znamionowego prądu dławika gaszącego przyłączonego w punkcie neutralnym sieci. Sytuacja taka jest dość często spotykana w praktyce, kiedy to na skutek rozbudowy sieci zwiększa się  $I_{CS}$  a dławik w punkcie neutralnym nie ma już możliwości regulacyjnych. W takiej sytuacji, na 15 symulowanych zwarć, klasyczne kryterium zerowoprądowe miało rozruch w 3 przypadkach, podczas gdy kryterium adaptacyjne w 11 przypadkach. Daje to względny przyrost liczby wykrywanych zwarć o 53 %.

Duże przekompensowanie sieci, czyli sytuacja, w której wartość współczynnika rozstrojenia kompensacji jest wieksza od s = 0,15, spotykana jest w praktyce rzadko. Jeżeli już znaczne przekompensowanie wystąpi, to kryterium adaptacyjne także będzie bardziej skuteczne niż klasyczne kryterium nadprądowe – w rozpatrywanych 15 zwarciach zanotowano przyrost liczby wykrywanych zwarć o 20 %. Tak niski wzrost skuteczności kryterium adaptacyjnego związany jest z węższym przedziałem rezystancji przejścia, dla których kryterium adaptacyjne działa (rys. 9.7). Jest ono aktywne tylko wtedy, gdy  $U_0 \in \langle 0,15; 0,70 \rangle U_{0max}$ .



Rys. 9.7. Zależność wartości skutecznej składowej zerowej napięcia w funkcji rezystancji przejścia w miejscu zwarcia z zaznaczonym obszarem z aktywną adaptacją kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego

Ten przedział  $U_0$  zaznaczony jest na rysunku 9.7 zieloną ramką. Widać wyraźnie, że zakres rezystancji przejścia, dla których aktywna jest adaptacja kryterium jest węższy dla s = 0,2 w stosunku dla dwóch pozostałych przypadków, stąd nieco niższa skuteczność kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego dla tego przypadku.

## 9.4. BADANIA SYMULACYJNE KRYTERIÓW ZEROWOPRĄDOWYCH ADAPTACYJNYCH DLA SIECI Z PUNKTEM NEUTRALNYM UZIEMIONYM PRZEZ REZYSTOR

W rozdziale 7.3. przedstawione zostały dwa kryteria zerowoprądowe adaptacyjne przeznaczone do implementacji w sygnalizatorach przepływu prądu zwarciowego w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor. Kryteria te wykorzystywały do wyznaczenia współczynnika adaptacji:

- wartość skuteczna napięcia jednej fazy względem ziemi i wartość składowej zerowej prądu w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego podczas zwarcia doziemnego,
- wartość składowej zerowej napięcia w warunkach jak wyżej.

Obie metody były weryfikowane podczas tych samych obliczeń symulacyjnych, przy czym wykorzystywana procedura testowa zakładała:

Procedura weryfikacji symulacyjnej działania kryterium:

- 1)  $I_{\rm CS} = 120$  A,  $I_{\rm R} = 180$  A,
- n-krotny start symulacji dla różnych wartości *I*<sub>CLi</sub>, czyli dla różnych wartości prądu pojemnościowego linii za miejscem zainstalowania sygnalizatora,
- agregacja wartości napięć wszystkich faz względem ziemi, tj. U<sub>L1\_k</sub>, U<sub>L2\_k</sub>, U<sub>L3\_k</sub>, składowej zerowej napięcia U<sub>0\_s</sub> oraz składowej zerowej prądu I<sub>0\_s</sub> w miejscu zainstalowania sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego, przy czym zakłada się, że może to być początek dowolnego odcinka 1-6,
- określenie, dla kryterium wykorzystującego do adaptacji wartość skuteczną napięcia jednej fazy względem ziemi i składową zerową prądu, wartości współczynnika adaptacji k<sub>a1</sub>,
- 5) wyznaczenie w arkuszu kalkulacyjnym wartości współczynnika adaptacji  $k_{a2}$ ,
- 6) obliczenie nastawy obu kryteriów  $I_{0nast_a1}$  oraz  $I_{0nast_a2}$ ,
- sprawdzenie warunku rozruchu kryteriów i ocena możliwości jego zadziałania w danych warunkach.

Warunek rozruchu kryteriów, analogicznie do wzoru (7.15), jest dany odpowiednimi zależnościami:

$$I_{0nast\_a1} \le I_{0\_s} \tag{9.2}$$

$$l_{0nast\_a2} \le l_{0\_s} \tag{9.3}$$

W tablicy 9.4. zestawiono wyniki symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem zbudowanego modelu sieci SN a dotyczących kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego wykorzystującego do adaptacji wartość  $U_{\text{Li}_k}$  oraz  $I_{0\_s}$ . W tablicy przez  $I_{\text{CLi}}$  oznaczono prąd pojemnościowy i-tego fragmentu linii za sygnalizatorem przepływu prądu zwarciowego,  $a_i$  to udział prądu pojemnościowego odcinka linii za sygnalizatorem w stosunku do  $I_{\text{CS}}$ ,  $U_{\text{L1}\_k}$ ,  $U_{\text{L2}\_k}$  i  $U_{\text{L3}\_k}$  to wyznaczone symulacyjnie wartości skuteczne napięć faz względem ziemi w miejscu

zainstalowania sygnalizatora. Przez  $I_{0_s}$  oznaczono wartość składowej zerowej prądu w miejscu zwarcia. W kolumnie  $k_{a1}$  znajdują się obliczone wartości współczynnika adaptacji.

Tablica 9.4.

Wyniki symulacji i obliczeń analitycznych związane z kryterium zerowoprądowym adaptacyjnym wykorzystującym do adaptacji wartość napięcia skutecznego jednej fazy względem ziemi oraz wartość składowej zerowej prądu w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, *I*<sub>CS</sub> = 120 A, *I*<sub>R</sub> = 180 A

<b>D</b> _	<b>T</b>	1	<b>T</b> 7	<b>T</b> 7	<b>T</b> 7	T.	
		ai				10_s	$k_{a1}$
W 12	W A	0.01	<b>W V</b>	<b>W V</b>	<b>W V</b>	W A	0.55
	1,2	0,01	6312	9387	10843	63,12	0,55
100	6	0,05	6311	9387	10843	63,11	0,55
100	12	0,10	6310	9387	10843	63,10	0,55
	18	0,15	6309	9387	10843	63,09	0,55
	24	0,20	6308	9387	10843	63,08	0,55
	1,2	0,01	7561	8821	9732	30,25	0,55
	6	0,05	7561	8821	9732	30,24	0,55
250	12	0,10	7560	8821	9733	30,24	0,55
	18	0,15	7560	8822	9733	30,24	0,55
	24	0,20	7559	8822	9733	30,24	0,55
	1,2	0,01	8079	8701	9239	16,16	0,55
	6	0,05	8079	8701	9239	16,16	0,55
500	12	0,10	8079	8701	9239	16,16	0,55
	18	0,15	8078	8701	9239	16,16	0,55
	24	0,20	8078	8701	9239	16,16	0,55
	1,2	0,01	8265	8677	9056	11,02	1
	6	0,05	8265	8677	9057	11,02	1
750	12	0,10	8265	8677	9057	11,02	1
	18	0,15	8265	8677	9057	11,02	1
	24	0,20	8265	8677	9057	11,02	1
	1,2	0,01	8361	8668	8961	8,36	1
	6	0,05	8361	8668	8961	8,36	1
1000	12	0,10	8361	8668	8962	8,36	1
	18	0,15	8361	8668	8962	8,36	1
	24	0,20	8361	8668	8962	8,36	1
	1,2	0,01	8509	8661	8814	4,25	1
	6	0,05	8509	8661	8814	4,25	1
2000	12	0,10	8508	8661	8814	4,25	1
	18	0,15	8508	8661	8814	4,25	1
	24	0,20	8508	8661	8814	4,25	1

Tablica 9.5. dotyczy kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego, które do wyznaczania współczynnika adaptacji wykorzystuje wartość skuteczną składowej zerowej napięcia. W tablicy  $U_{0_s}$  to wartość skuteczna składowej zerowej napięcia w miejscu zainstalowania

sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego,  $k_{a2}$  – współczynnik adaptacji wyznaczony z zależności (7.14).

## Tablica 9.4.

Wyniki symulacji i obliczeń analitycznych związane z kryterium zerowoprądowym adaptacyjnym wykorzystującym do adaptacji wartość składowej zerowej napięcia w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor,  $I_{CS} = 120$  A,  $I_{R} = 180$  A

RF	ICLi	a.	U0_s	k a
$w \Omega$	w A	<i>u</i> <sub>1</sub>	w V	Ka2
	1,2	0,01	2488	0,44
	6	0,05	2489	0,44
100	12	0,10	2489	0,44
	18	0,15	2489	0,44
	24	0,20	2489	0,44
	1,2	0,01	1184	0,29
	6	0,05	1184	0,29
250	12	0,10	1185	0,29
	18	0,15	1185	0,29
	24	0,20	1185	0,29
500	1,2	0,01	631	0,22
	6	0,05	631	0,22
	12	0,10	631	0,22
	18	0,15	631	0,22
	24	0,20	632	0,22
	1,2	0,01	430	0,20
	6	0,05	430	0,20
750	12	0,10	430	0,20
	18	0,15	430	0,20
	24	0,20	430	0,20
	1,2	0,01	326	0,19
	6	0,05	326	0,19
1000	12	0,10	326	0,19
	18	0,15	326	0,19
	24	0,20	326	0,19
	1,2	0,01	166	0,17
	6	0,05	166	0,17
2000	12	0,10	166	0,17
	18	0,15	166	0,17
	24	0,20	166	0,17

Skuteczność kryteriów została sprawdzona z wykorzystaniem zależności (7.16) oraz (7.17). W tym celu wyznaczone zostały nastawy kryteriów adaptacyjnych  $I_{0nast_a1}$  oraz  $I_{0nast_a2}$ .

## Tablica 9.4.

Wyniki symulacji i obliczeń analitycznych związane z kryteriami zerowoprądowymi adaptacyjnymi oraz wartości logiczne związane z rozruchami tych kryteriów w sieci

					kryte	erium	kryterium		
RE		I.	kryterium	klasyczne	wykorz	ystujące	wykorz	ystujące	
	ai				$U_{ m Li\_k}$ 0	raz I <sub>0_s</sub>	U	0_s	
W 12		WA	<b>I</b> 0nast	rozruch?	I0nast_a1	rozruch?	I0nast_a2	rozruch?	
			w A	10414011:	w A	1041 ucn:	w A	102,1ucn:	
	0,01	63,12	3	TAK	1,8	TAK	1,3	ТАК	
	0,05	63,11	13,1	TAK	7,2	TAK	5,8	ТАК	
100	0,10	63,10	25,8	TAK	14,0	TAK	11,4	TAK	
	0,15	63,09	38,4	TAK	20,7	TAK	16,9	TAK	
	0,20	63,08	51	TAK	27,4	TAK	22,4	ТАК	
	0,01	30,25	3	TAK	1,8	TAK	0,9	TAK	
	0,05	30,24	13,1	TAK	7,2	TAK	3,8	TAK	
250	0,10	30,24	25,8	TAK	14,0	TAK	7,5	TAK	
	0,15	30,24	38,4	NIE	20,7	TAK	11,1	ТАК	
	0,20	30,24	51	NIE	27,4	TAK	14,8	TAK	
	0,01	16,16	3	TAK	1,8	TAK	0,7	ТАК	
	0,05	16,16	13,1	TAK	7,2	TAK	2,9	TAK	
500	0,10	16,16	25,8	NIE	14,0	TAK	5,7	TAK	
	0,15	16,16	38,4	NIE	20,7	NIE	8,4	ТАК	
	0,20	16,16	51	NIE	27,4	NIE	11,2	ТАК	
	0,01	11,02	3	TAK	3,0	TAK	0,6	ТАК	
	0,05	11,02	13,1	NIE	13,1	NIE	2,6	ТАК	
750	0,10	11,02	25,8	NIE	25,8	NIE	5,2	TAK	
	0,15	11,02	38,4	NIE	38,4	NIE	7,7	ТАК	
	0,20	11,02	51	NIE	51,0	NIE	10,2	ТАК	
	0,01	8,36	3	TAK	3,0	TAK	0,6	ТАК	
	0,05	8,36	13,1	NIE	13,1	NIE	2,5	ТАК	
1000	0,10	8,36	25,8	NIE	25,8	NIE	4,9	TAK	
	0,15	8,36	38,4	NIE	38,4	NIE	7,3	ТАК	
	0,20	8,36	51	NIE	51,0	NIE	9,7	NIE	
	0,01	4,25	3	TAK	3,0	TAK	0,5	TAK	
	0,05	4,25	13,1	NIE	13,1	NIE	2,2	TAK	
2000	0,10	4,25	25,8	NIE	25,8	NIE	4,4	NIE	
	0,15	4,25	38,4	NIE	38,4	NIE	6,5	NIE	
	0,20	4,25	51	NIE	51,0	NIE	8,7	NIE	

z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor,  $I_{\rm CS} = 120$  A,  $I_{\rm R} = 180$  A

Łącznie wykonane zostały symulacje dla 30 zwarć o różnych rezystancjach przejścia o różnych wartościach *a*<sub>i</sub>.

Klasyczne kryterium zerowoprądowe pozwoliło wykryć 13 zwarć, co stanowi ok. 43 % wszystkich symulowanych uszkodzeń.

Kryterium zerowoprądowe adaptacyjne, które do adaptacji wykorzystuje wartość skuteczną napięcie dowolnej fazy względem ziemi oraz wartość skuteczną składowej zerowej prądu miało rozruch podczas 16 spośród symulowanych zwarć, co stanowi ok. 53 % wszystkich uszkodzeń. Kryterium jest zatem o ok. 10 % skuteczniejsze od klasycznego kryterium zerowoprądowego.

Kryterium zerowoprądowe adaptacyjne, które do adaptacji wykorzystuje wartość skuteczną składowej zerowej napięcia wyznaczaną metodami przedstawionymi w niniejszej rozprawie miało rozruch przy 26 symulowanych zwarciach, co odpowiada ok. 87 % wszystkich uszkodzeń. Kryterium jest w związku z tym o ok. 44 % skuteczniejsze od klasycznego kryterium zerowoprądowego.

Wyniki symulacji i obliczeń pokazują, że kryterium zerowoprądowe adaptacyjne wykorzystujące do adaptacji wartość skuteczną składowej zerowej napięcia cechuje się istotnie wyższą skutecznością detekcji doziemień niż kryterium bazujące na adaptacji na podstawie pomiaru napięcia fazy względem ziemi oraz składowej zerowej prądu. Różnice są szczególnie widoczne dla sytuacji, w której za sygnalizatorem przepływu prądu zwarciowego jest dłuższy ciąg kablowy, cechujący się stosunkowo dużą wartością prądu pojemnościowego. Dla takich linii lepsze z proponowanych kryteriów pozwala wykryć zwarcie o rezystancji przejścia  $R_{\rm F} = 750 \ \Omega$ . Jeżeli za miejscem zainstalowania sygnalizatora jest krótki odcinek linii kablowej lub linia napowietrzna, to proponowane kryteria są równie skuteczne i nie mają przewagi nad klasycznym kryterium zerowoprądowym.

## 9.5. WNIOSKI DO ROZDZIAŁU

Przeprowadzone zostały badania symulacyjne kryteriów zerowoprądowych z funkcją adaptacyjną przedstawionych w rozdziale 7. Środowiskiem symulacyjnym było oprogramowanie PSCAD.

Kryterium adaptacyjne dla sieci skompensowanej jest szczególnie skuteczne wówczas, gdy wartość współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej przyjmuje zalecane wartości. W stosunku do klasycznego kryterium nadprądowego można zaobserwować względny wzrost liczby wykrywanych zwarć o kilkadziesiąt procent. W symulowanej sieci, której parametry odpowiadają typowym układom rzeczywistym, graniczna wartość wykrywanych rezystancji przejścia jest równa  $R_{\text{Fmax}} = 1750 \ \Omega$ . Powyżej tej wartości warunki napięciowe panujące w sieci nie pozwalają na inicjację procesu adaptacji. Wyniki symulacji i obliczeń przeprowadzonych dla kryteriów zerowoprądowych z funkcją adaptacji dla sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor pokazują, że kryterium wykorzystujące do adaptacji wartość skuteczną składowej zerowej napięcia cechuje się istotnie wyższą skutecznością detekcji doziemień niż kryterium bazujące na adaptacji na podstawie pomiaru napięcia fazy względem ziemi oraz składowej zerowej prądu. Dla takich linii lepsze z proponowanych kryteriów pozwala wykryć zwarcie o rezystancji przejścia  $R_{\rm Fmax} = 750 \,\Omega$  w sytuacji, gdy klasyczne kryteria zawodzą. Jest to wartość wystarczająca, biorąc pod uwagę zakłócenia powstające w sieci z rezystorem w punkcie neutralnym.

#### **10. BADANIA SIECIOWE WYBRANYCH METOD I KRYTERIÓW**

## 10.1. UWAGI OGÓLNE

Z uwagi na pozytywne wyniki pomiarów laboratoryjnych prezentowanych w rozprawie kryteriów ziemnozwarciowych i metod pomiarowych wykonano badania w rzeczywistej sieci SN.

Badania odbyły się na początku marca 2018 r. w linii kablowo-napowietrznej w sieci Enea Operator sp. z o.o. zasilanej z GPZ Babimost na terenie Oddziału Dystrybucji Zielona Góra.

Dwusekcyjny GPZ Babimost wyposażony był w chwili wykonywania prób w jeden transformator WN/SN, a sprzęgło podłużne w rozdzielni było zamknięte. Każda z połączonych sekcji wyposażona była w pole potrzeb własnych.

Sieć zasilana z GPZ Babimost była skompensowana przez dwa dławiki nadążne prod. EGE, które to z kolei współpracowały z dwoma układami AWSCz. Każdy z nich mógł wprowadzić do obwodu ziemnozwarciowego podczas zwarcia bezrezystancyjnego prąd czynny o wartości  $I_{AWSCz} = 25$  A. W układzie normalnym sieci zasilanej z GPZ Babimost aktywne były obydwa układy AWSCz. Podczas wykonywania prób automatyka AWSCz nastawiona była w ten sposób, że rezystor AWSCz w polu potrzeb własnych sekcji 2 załączany był po 1 sekundzie od wystąpienia zwarcia, a w sekcji 1 – po 2 sekundach. Czas "aktywności" każdego rezystora nastawiony był na 2 sekundy.

Prąd pojemnościowy całej sieci zasilanej z rozdzielni SN w GPZ Babimost podczas badań był równy  $I_{CS} = 134$  A i został on odczytany z regulatorów dławików nadążnych. Dławiki nastawione były na prąd kompensacji równy  $I_L = 137,5$  A. Dało to wartość współczynnika rozkompensowania sieci, liczonego wg wzoru (2.2) równy:

$$s = \frac{137,5 - 134}{134} = 0,026$$

Wartość współczynnika tłumienia sieci podczas zwarć metalicznych dla sieci wg wzoru:
w przypadku pracy jednego układu AWSCz:

$$d_{01} = \frac{I_{AWSCZ}}{I_{CS}} = \frac{25}{134} = 0,186,$$

– w przypadku pracy dwóch układów AWSCz:

$$d_{02} = \frac{2 \cdot I_{AWSCz}}{I_{CS}} = \frac{50}{134} = 0,373.$$

Do pomiaru napięcia fazy względem ziemi wykorzystany został sensor pojemnościowy typu VSO-25 prod. KPB Intra Polska sp. z o.o., którego widok przedstawia rysunek 10.1. Wcześniej sensor ten został wyskalowany w Laboratorium Elektroenergetycznej Automatyki Zabezpieczeniowej IE PP. W czasie poszczególnych prób mierzone było zamiennie napięcie fazy względem ziemi dla fazy zdrowej (nie objętej doziemieniem) oraz fazy ze zwarciem. Sposób podłączenia sensora przedstawia rysunek 10.2.

Źródłem sygnałów prądowych były przekładniki prądowe przelotowe, zainstalowane na izolatorach przepustowych.



Rys. 10.2. Sposób montażu sensora VSO-25 w trakcie prowadzenia badań sieciowych

Do badań wybrany został algorytm wyznaczania składowej zerowej napięcia na podstawie pomiaru jednego napięcia fazy względem ziemi oraz algorytm admitancyjny do detekcji zwarć doziemnych.

## 10.2. BADANIA SIECIOWE ALGORYTMU I METODY DO WYZNACZANIA SKŁADOWEJ ZEROWEJ NAPIĘCIA NA PODSTAWIE POMIARU JEDNEGO NAPIĘCIA FAZY WZGLĘDEM ZIEMI

Sterownik CZIP-SRZ z zaimplementowanymi algorytmami oraz układ pomiarowy zainstalowane były na słupie rozłącznikowym z rozłącznikiem typu THO prod. ZPUE Włoszczowa. Widok stanowiska słupowego z zamontowanym sensorem napięcia przedstawiają rysunki 10.3 oraz 10.4.



Rys. 10.3. Ogólny widok stanowiska podczas badań sieciowych wybranych algorytmów



Rys. 10.4. Rozłącznik, sensor napięcia oraz aparatura pomocnicza na słupie linii SN



Rys. 10.5. Uziom sztuczny używany podczas badań sieciowych



Rys. 10.6. Uziom podczas prób 2 i 6

W celu weryfikacji algorytmu wyznaczania wartości składowej zerowej napięcia na podstawie pomiaru jednego napięcia fazy względem ziemi, w rozdzielni SN GPZ Babimost zainstalowany został rejestrator zdarzeń i zakłóceń typu Energotest RZ-40, którego zadaniem była rejestracja składowej zerowej napięcia na szynach zbiorczych. Ponieważ w uproszczeniu przyjmuje się, że wartość składowej zerowej napięcia w każdym miejscu sieci jest taka sama, fazor rejestrowany w rozdzielni SN przyjęto za fazor referencyjny.

W czasie prób wykonanych zostało 6 zwarć doziemnych, przy czym każde z nich w innej konfiguracji. Próby zostały scharakteryzowane w tablicy 11.1. Spośród wszystkich wykonanych zwarć, przypadki o numerach 3, 4, oraz 5 należy zakwalifikować do zwarć wysokooporowych ( $R_{\rm F} > 1000 \Omega$ ).

Do wykonywania zwarć wykorzystany został uziemiacz, podłączony uprzednio do jednego z zacisków rozłącznika. Do drugiego końca uziemiacza w jednym przypadku podłączony był uziom roboczy stanowiska słupowego, a w pięciu przypadkach – uziom sztuczny (rys. 10.5 i 10.6).

Rezystancja przejścia w miejscu zwarcia  $R_F$  została obliczona na podstawie zależności (2.1), przy czym bazą do obliczeń były wyniki rejestracji w rozdzielni GPZ Babimost.

## Tablica 10.1.

Nr próby	Opis	$R_{ m F} \le \Omega$
1	zwarcie do uziomu roboczego stanowiska słupowego, mierzone napięcie zwartej fazy względem ziemi	15
2	zwarcie do uziomu sztucznego pogrążonego w ziemi na ok. 1 metr, mierzone napięcie zwartej fazy względem ziemi	20
3	zwarcie do uziomu sztucznego położonego na ziemi i dociśniętego do niej, mierzone napięcie fazy zwartej względem ziemi	1380
4	zwarcie do uziomu sztucznego położonego na ziemi i dociśniętego do niej, mierzone napięcie zdrowej fazy względem ziemi	1450
5	zwarcie do uziomu sztucznego delikatnie położonego na ziemi, mierzone napięcie zdrowej fazy względem ziemi	2530
6	zwarcie do uziomu sztucznego jak w próbie 2, mierzone napięcie zdrowej fazy względem ziemi	20

Charakterystyka poszczególnych prób sieciowych

Przebieg napięcia mierzonego w fazie zdrowej oraz uzyskanego z algorytmu wyznaczania składowej zerowej napięcia na podstawie pomiaru jednego napięcia fazy względem ziemi podczas próby numer 3 przedstawia rysunek 10.7. Dodatkowo na tym samym rysunku umieszczono przebieg sygnału  $U_0$  zarejestrowany na wyjściu z układu otwartego trójkąta w GPZ Babimost przy użyciu rejestratora RZ40.



Rys. 10.7. Sygnały napięciowe rejestrowane w miejscu zwarcia oraz w GPZ w chwili doziemienia w trakcie próby nr 3

Analizując przebiegi można zauważyć, że przebiegi składowej zerowej napięcia wyznaczone w miejscu zwarcia z nowego algorytmu oraz zarejestrowane w rozdzielni SN są do siebie zbliżone. Różnica w skalowaniu osi X pochodzi stąd, że w przypadku CZIP-SRZ rejestrowane były wartości pierwotne napięć, podczas gdy w rozdzielni SN – wartości wtórne pochodzące z przekładników. Nie zmienia to faktu, że algorytm okazał się być skuteczny.

Sprawdzona została skuteczność algorytmu przy zwarciu doziemnym fazy, w której prowadzony był pomiar napięcia fazowego. Rysunek 10.8 przedstawia przebieg napięcia fazy względem ziemi dla fazy doziemionej, obliczony przez CZIP-SRZ przebieg  $\underline{U}_0$  oraz sygnał napięciowy zarejestrowany z wykorzystaniem układu otwartego trójkąta w rozdzielni SN. Przedstawiane dane zostały zebrane podczas próby 1. Także i tutaj potwierdza się skuteczność proponowanego algorytmu.



Rys. 10.8. Sygnały napięciowe rejestrowane w miejscu zwarcia oraz w GPZ w chwili doziemienia w trakcie próby nr 1

W tablicy 11.2. przedstawiono wartości skuteczne składowej zerowej napięcia zmierzone w polu liniowym GPZ Babimost (Energotest RZ-40) i przeliczone na stronę pierwotną oraz w miejscu zwarcia (CZIP-SRZ). Przedstawione są wyniki uzyskane dla wszystkich przeprowadzonych prób w trzech różnych chwilach czasowych: po zainicjowaniu zwarcia (A), po załączeniu pierwszego z układów AWSCz (B) oraz, jeżeli dane były dostępne, po załączeniu drugiego układu AWSCz (C). Wyniki pomiarów uzyskane w polu liniowym

traktowane są jako referencyjne. Wartości składowej zerowej napięcia podawane w tablicy 11.2 to wartości uśrednione w oknie o szerokości 100 ms, które obejmowało przypadkową chwilę rejestracji.

#### Tablica 10.2.

Wartości skuteczne składowej zerowej napięcia zmierzone w polu liniowym (indeks "RZ-40") oraz w miejscu zwarcia (indeks "SRZ") oraz błąd względny wyznaczania wartości składowej zerowej napięcia z wykorzystaniem algorytmu wykorzystującego pomiar tylko jednego napięcia fazy względem ziemi; A – brak AWSCz, B – aktywna jedna AWSCz, C – aktywne dwie AWSCz

by		A			В			С	
Nr pró	U0_SRZ w V	U0_RZ40 w V	δU0_SRZ w %	U0_SRZ w V	U0_RZ40 w V	δU0_SRZ w %	U0_SRZ W V	U0_RZ40 w V	δU0_SRZ w %
1	8527	8623	-1,11	8490	8282	2,51	8479	7974	6,33
2	8570	8667	-1,12	8521	8308	2,56	8521	7986	6,7
3	7006	7550	-7,21	4526	4393	3,03	-	-	-
4	7278	7847	-7,25	5332	5153	3,47	4131	3949	4,61
5	6512	6123	6,35	3465	3161	9,62	1942	2026	-4,15
6	8528	8655	-1,47	8457	8294	1,97	8350	7989	4,52

Wyniki pokazują, że w każdym z przypadków błąd względny wyznaczania składowej zerowej napięcia z wykorzystaniem tylko jednego napięcia fazy względem ziemi w rzeczywistej sieci SN mieścił się w zakresie  $\pm 10$  %. Potwierdzają się tutaj wyniki badań laboratoryjnych algorytmu i jednocześnie zadowalająca skuteczność algorytmu, szczególnie dla aplikacji niewymagających dokładnych pomiarów składowej zerowej napięcia.

# 10.3. BADANIA SIECIOWE KRYTERIUM ADMITANCYJNEGO DO DETEKCJI ZWARĆ DOZIEMNYCH

Badanie skuteczności algorytmu admitancyjnego do detekcji zwarć doziemnych polegało na połączeniu wyjścia sterującego łącznikiem w CZIP-SRZ z wejściem sterującym rozłącznika zainstalowanego w miejscu wykonywania badań i obserwacji zachowania się rozłącznika i sterownika podczas wykonywania doziemień.

Kryterium admitancyjne zostało nastawione zgodnie z informacjami podanymi w tablicy 10.3.

## Tablica 10.3

Tustutty Kryterfulli autilitaileyjitego pouezas badan sieciottyen						
Yonast	1 mS					
tnast	0,5 s					

Nastawy kryterium admitancyjnego podczas badań sieciowych

Za poprawne zadziałanie algorytmu uznać należy wytworzenie przez sterownik CZIP-SRZ sygnału na otwarcie łącznika i podanie go na odpowiednie wyjście urządzenia. W praktyce oznacza to, że jeśli kryterium zadziała poprawnie, to w trakcie doziemienia rozłącznik powinien zostać otwarty.

Ponieważ rozłączniki umożliwiają bezpieczne łącznie prądów o wartości do 100 A, a przewidywane wartości prądu w miejscu zwarcia to najwyżej kilka amperów, nie ma niebezpieczeństwa podczas wyłączania prądu zwarciowego tym typem łącznika.

Spośród wszystkich prób scharakteryzowanych w tablicy 10.1 bezproblemowo przebiegły próby oznaczone numerami 2, 3, 4, 5. Zwarcie doziemne za każdym razem zostało poprawnie zidentyfikowane przez algorytm admitancyjny i wypracowany został sygnał na otwarcie rozłącznika, który z niewielką zwłoką czasową wyłączał zwarcie. W każdym z przypadków notowano rozruchy zabezpieczenia ziemnozwarciowego ( $G_0$ >) w polu liniowym rozdzielni SN, ale nigdy nie doszło do jego zadziałania bo nastawa czasowa była większa niż w sterowniku rozłącznika.

W przypadku próby 1 zabezpieczenie zadziałało, jednak w niespodziewanym momencie – dopiero po załączeniu się drugiego rezystora AWSCz i zwiększeniu wartości prądu czynnego podczas zwarcia. Powodem takiego stanu była niewłaściwie dobrana nastawa zabezpieczenia.

W przypadku próby 6 nie doszło do zadziałania kryterium z uwagi na błędne funkcjonowanie blokady otwarcia rozłącznika (CZIP-SRZ jest w taką blokadę wyposażony). Podczas załączania zwarcia pojawił się krótki udar prądowy (ok. 16 ms). Amplituda tego udaru wynosiła ok. 110 A, co spowodowało aktywację blokady wszystkich funkcji zabezpieczeniowych sterownika CZIP-SRZ. Żeby nie uszkodzić rozłącznika, blokada jest niezbędna, ponieważ większość tego typu aparatów ma zdolność wyłączeniową 100 A. Po zaniku udaru blokada nie została usunięta, co było błędem algorytmu sterownika i co doprowadziło do braku zadziałania zabezpieczenia. Rozłącznik został otwarty zdalnie przez operatora. Sam algorytm został poprawiony i w bieżącej wersji prototypowej sterownika funkcja ta działa poprawnie. Analiza rejestracji pokazuje, że algorytm admitancyjny zadziałał poprawnie.

Przebiegi wartości skutecznych napięcia fazy L1 względem ziemi, składowej zerowej napięcia oraz składowej zerowej prądu mierzone w miejscu zwarcia (oznaczane indeksem SRZ) oraz w polu liniowym GPZ Babimost (oznaczane indeksem RZ40) dla wybranych prób przedstawiają rysunki 10.9 – 10.11, a wartości wielkości istotnych dla kryterium Y<sub>0</sub>> zestawione są w tablicy 10.3. Dodatkowo w tej tablicy indeksem górnym "p" zostały oznaczone wielkości przeliczone na stronę pierwotną przetworników pomiarowych.



Rys. 10.9. Przebiegi wartości skutecznych mierzonych wielkości podczas próby 1

Na rysunkach 10.9 – 10.11 należy zwrócić uwagę na niestandardowe działanie automatyki AWSCz, o czym zostało już wspomniane na początku niniejszego rozdziału. W czasie wykonywania prób aktywne były dwa układy AWSCz i każdy z nich załączał się z różnym opóźnieniem w stosunku do chwili inicjacji zwarcia. Ten błąd w ustawieniach automatyki został zidentyfikowany dopiero podczas analizy rejestracji. Ponadto należy dodać, że sygnały rejestrowane po zadziałaniu kryterium Y<sub>0</sub>> związane są z czasem własnym rozłącznika przy otwieraniu  $t_{OW}$ , który w przypadku zabudowanego w miejscu przeprowadzania pomiarów urządzenia wynosił ok. 0,4 s. Z uwagi na fakt, że rejestrator zakłóceń w sterowniku CZIP-SRZ był skonfigurowany w taki sposób, żeby zapisywać wybrane przebiegi przez czas 0,2 s od chwili zadziałania zabezpieczenia, nie jest widoczny w prowadzonych przez niego rejestracjach proces odbudowy napięcia po wyłączeniu zwarcia. W przypadku próby 1 wyłączenie na skutek niepoprawnie dobranej nastawy nastąpiło dopiero po zadziałaniu drugiego układu AWSCz. W chwili rozruchu kryterium Y<sub>0</sub>> admitancja wyznaczana przez sterownik CZIP-SRZ z wykorzystaniem proponowanego w tej rozprawie algorytmu wynosiła  $Y_{0_{SRZ}} = 5,41$  mS, natomiast w tym samym czasie w polu liniowym można było zmierzyć  $Y_{0_{RZ40}} = 5,97$  mS. Źródłem różnicy jest przede wszystkim to, że składowa zerowa napięcia mierzona w miejscu zwarcia miała zawyżoną wartość. Powodem takiej sytuacji były przede wszystkim warunki atmosferyczne – sensor został wyskalowany w warunkach zbliżonych do pokojowych, podczas gdy w trakcie pomiarów temperatura wynosiła ok. 0 °C a wilgotność względna była znaczna. Opisywany problem widoczny jest w każdej z 6 przeprowadzonych prób i jest to niedoskonałość stosowanego sensora.

## Tablica 10.4.

Wartości skuteczne wielkości istotnych dla kryterium Y0> mierzone w miejscu zwarcia
oraz w polu liniowym w GPZ Babimost

Nr próby	U0_SRZ w V	U0_RZ40 U0_RZ40 <sup>p</sup> W V	I0_SRZ W A	I0_RZ40 I0_RZ40 <sup>p</sup> W A	Y <sub>0_SRZ</sub> w mS	Y <sub>0_RZ40</sub> w mS
1	8524	92,06	46,11	0,476	5,41	5,97
		7973		47,6		
2	8577	95,845	26,29	0,26	3,07	3,13
		8300		26		
3	4522	51,439	13,45	0,15	2,97	3,37
		4455		15		
4	4118	45,37	21,82	0,22	5,30	5,60
		3929		22		
5	3464	36,64	8,68	0,088	2,51	2,93
		3000		8,8		
6	845	95,572	27,12	0,271	3,21	3,27
	7	8277		27,1		



Rys. 10.10. Przebiegi wartości skutecznych mierzonych wielkości podczas próby 3

W próbie 3, dla której zarejestrowane sygnały przedstawione są na rysunku 10.10, kryterium zadziałało poprawnie, tzn. po załączeniu jednego układu AWSCz. Admitancja wyznaczana w miejscu zwarcia była równa  $Y_{0\_SRZ} = 2,97$  mS, podczas gdy analiza danych zapisanych przez rejestrator RZ-40 zainstalowany w polu liniowym daje wartość admitancji  $Y_{0\_RZ40} = 3,37$  mS. Różnica, jak już zostało napisane wyżej, wynika głównie z błędu pomiaru składowej zerowej napięcia, chociaż w tym przypadku obserwuje się także dość dużą różnicę w pomiarze składowej zerowej prądu w GPZ oraz w miejscu zwarcia.



Rys. 10.11. Przebiegi wartości skutecznych mierzonych wielkości podczas próby 5

W próbie 5 kryterium Y<sub>0</sub>> zadziałało poprawnie, przy czym admitancja w miejscu zwarcia była równa  $Y_{0\_SRZ} = 2,51$  mS, a w polu liniowym  $Y_{0\_RZ40} = 2,93$  mS.

## 10.4. WNIOSKI DO ROZDZIAŁU

Przeprowadzone próby sieciowe pokazały, że dokładność wyznaczania wartości skutecznej składowej zerowej napięcia w sieci SN na podstawie pomiaru tylko jednego napięcia fazy względem ziemi jest wystarczająca do zastosowań praktycznych, w szczególności związanych z działaniem kryteriów ziemnozwarciowych automatyki zabezpieczeniowej. Ta uproszczona metoda wyznaczania wartości modułu składowej zerowej napięcia może być implementowana w dowolnym miejscu sieci SN, jednak przede wszystkim w lokalizacjach, w których do tej pory zainstalowane były rozłączniki ze zdalnym sterowaniem i z funkcją sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego. Zdecydowana większość tego typu urządzeń ma zaimplementowane tylko kryteria nadprądowe. Dodanie lokalnego pomiaru  $U_0$  pozwala stosować np. kryterium zerowoprądowe adaptacyjne lub admitancyjne, które cechują się wysoką skutecznością detekcji doziemień.

Jeszcze więcej korzyści niesie za sobą zastosowanie metody wyznaczania składowej zerowej napięcia na podstawie pomiaru jednego napięcia fazy względem ziemi i napięcia międzyfazowego. Metoda umożliwia wyznaczanie fazora  $\underline{U}_0$  i, co za tym idzie, możliwość skorzystania ze wszystkich kryteriów z grupy admitancyjnych, w szczególności z kryterium konduktancyjnego G<sub>0</sub>> i susceptancyjnego kierunkowego B<sub>0k</sub>>. Metoda nie została sprawdzona podczas badań sieciowych, jednak przeprowadzone eksperymenty laboratoryjne pozwalają zadowalająco ocenić efekty pracy algorytmu i jakość wyznaczania  $\underline{U}_0$ .

## **11. PODSUMOWANIE I WNIOSKI**

Zwarcia doziemne są najczęściej występującymi zakłóceniami w pracy sieci średniego napięcia. Ich detekcja dokonywana jest głównie przez zabezpieczenia pracujące w polach liniowych rozdzielni, jednak współcześnie, aby zmniejszać wartości współczynników opisujących ciągłość dostaw energii elektrycznej, istnieje potrzeba lokalizacji wystąpienia zakłócenia. Na podstawie literatury stwierdzono, że spośród wielu metod, którymi można ten cel osiągnąć, najbardziej warte zainteresowania jest wykorzystanie sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego. Literatura i doświadczenie pokazują, że dużym problemem dla tych urządzeń jest detekcja zwarć wysokooporowych.

Rozprawa podzielona została na dwie logicznie powiązane ze sobą części. Pierwsza związana jest z uproszczonymi metodami wyznaczania składowej zerowej napięcia, przy czym nacisk położony jest na sposoby możliwe do zastosowania w głębi sieci średniego napięcia. Drugą część stanowią propozycje kryteriów zerowoprądowych z funkcją adaptacyjną oraz kryterium admitancyjnego do detekcji wysokooporowych zwarć doziemnych. Elementem łączącym obie części jest poprawa skuteczności wykrywania zakłóceń doziemnych przez sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego.

Sygnalizatory przepływu prądu zwarciowego montowane są w głębi sieci SN, gdzie pomiar składowej zerowej napięcia z wykorzystaniem dotychczas znanych układów i metod jest trudny, a czasami nawet niemożliwy. Zaproponowane w rozprawie uproszczone metody wyznaczania wartości skutecznej  $U_0$  są niskokosztowe i pozwalają obliczać wartość tej wielkości z wystarczającą dokładnością.

Przedstawiona w rozprawie metoda wykorzystująca pomiar jednego napięcia fazy względem ziemi pozwala na wyznaczenie fazora  $\underline{U}_0$  poprzez rozbudowę stanowiska słupowego o jeden sensor napięcia i została gruntownie przetestowana w warunkach laboratoryjnych. Stwierdzono, że maksymalna wartość względnego błędu wyznaczania  $U_0$  była równa  $\delta U_0 = \pm 10,3$  %. Uwzględniając poprawkę kątową równą  $\varphi_k = 30^\circ$ , można wyznaczać proponowaną metodą fazor  $\underline{U}_0$  z zadowalającą precyzją.

W dalszej części pracy przedstawiono metodę, która do wyznaczania wartości skutecznej składowej zerowej napięcia wykorzystuje jedno napięcie fazy względem ziemi oraz jedno napięcie międzyfazowe. Maksymalna wartość błędu względnego wyznaczania wartości skutecznej  $U_0$  była dla tej metody równa  $\delta U_0 = \pm 4,78$  %. Proponowana metoda, niezależnie od konfiguracji sieci i właściwości zwarcia, jest skuteczna i można wyznaczane z jej wykorzystaniem wielkości wykorzystywać do realizacji kryteriów ziemnozwarciowych.
W dalszej części pracy przedstawiono opis i analizę trzech kryteriów zerowoprądowych z funkcją adaptacyjną. Dwa kryteria mogą być zastosowane w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, a jedno – w sieci skompensowanej.

Kryterium dla sieci skompensowanej, które do adaptacji nastawy wykorzystuje wartość składowej zerowej napięcia, cechuje się zdecydowanie szerszym zakresem wykrywanych rezystancji przejścia  $R_F$  w stosunku do klasycznego kryterium zerowoprądowego. Analizy wykonywane były przy założeniu, że wartość skuteczna składowej zerowej napięcia wyznaczana jest z wykorzystaniem metod uproszczonych. Kryterium jest szczególnie skuteczne dla sieci, w których wartość współczynnika rozstrojenia kompensacji ziemnozwarciowej przyjmuje zalecane wartości z zakresu od 1,05 $I_{CS}$  do 1,15 $I_{CS}$ . Maksymalne wykrywane rezystancje przejścia są równe co najmniej  $R_{Fmax} = 1500 \Omega$ . To z kolei pozwala zakwalifikować kryterium zerowoprądowe adaptacyjne do grupy kryteriów wykrywających zwarcia wysokooporowe w skompensowanej sieci średniego napięcia. Przeprowadzone badania symulacyjne pokazały, że zastosowanie kryterium adaptacyjnego pozwala osiągnąć znaczny przyrost liczby wykrywanych zwarć doziemnych w stosunku do klasycznego kryterium zerowoprądowego.

Korzyść z zastosowania kryterium zerowoprądowego adaptacyjnego dla sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor, które do adaptacji nastawy wykorzystuje zmianę wartości napięć faz względem ziemi uzyskuje się dla sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego zabudowanych w takich miejscach sieci, w których za miejscem zainstalowania sygnalizatora linia SN ma stosunkowo dużą wartość prądu pojemnościowego. Dla niewielkich wartości współczynnika udziału nie notuje się zwiększenia skuteczności kryterium adaptacyjnego. Kryterium zerowoprądowe z funkcją adaptacyjną, które do zmiany wartości nastawy w sieci z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor wykorzystuje wartość skuteczna składowej zerowej napięcia wyznaczana przez sygnalizator metoda uproszczoną jest bardzo skuteczne. Dla sygnalizatorów przepływu prądu zwarciowego, które zainstalowane są w krótkich odczepach mogą być wykrywane doziemienia o rezystancji przejścia nawet  $R_{\rm F} = 4 \text{ k}\Omega$ . Skuteczność kryterium spada wraz ze wzrostem wartości prądu pojemnościowego linii za sygnalizatorem, jednak zawsze wartości graniczne  $R_{\rm F}$  są dla kryterium z tym typem adaptacji większe w porównaniu z klasycznymi kryteriami zerowoprądowymi. Badania symulacyjne pokazały, że kryteria adaptacyjne pozwalają wykryć zwarcie o rezystancji przejścia  $R_{\rm F} = 750 \ \Omega$  w sytuacji, gdy klasyczne kryterium zerowoprądowe nie ma nawet rozruchu.

W kolejnym rozdziale analizowana była praca kryterium admitancyjnego, które do jej obliczania wykorzystuje uproszczone metody wyznaczania składowej zerowej napięcia. Zakłócenia wykrywane przez takie kryterium, w porównaniu do klasycznych kryteriów zerowoprądowych, mają znacznie większą wartość *R*<sub>F</sub>. Dodatkowo, skuteczność kryterium nie zależy od wartości współczynnika udziału prądu pojemnościowego linii za sygnalizatorem w stosunku do prądu pojemnościowego całej sieci.

W końcowej części pracy przedstawiono wyniki badań wybranych metod i kryteriów w rzeczywistej sieci SN.

Przeprowadzone próby sieciowe pokazały, że dokładność wyznaczania wartości skutecznej składowej zerowej napięcia w sieci SN na podstawie pomiaru tylko jednego napięcia fazy względem ziemi jest wystarczająca do zastosowań praktycznych, w szczególności związanych z działaniem kryteriów ziemnozwarciowych automatyki zabezpieczeniowej. Uproszczone metody działają w dowolnym miejscu sieci SN, jednak przede wszystkim w lokalizacjach, w których do tej pory zainstalowane były rozłączniki ze zdalnym sterowaniem i z funkcjonalnością sygnalizatora przepływu prądu zwarciowego.

Na podstawie wyników badań przedstawionych w rozdziałach 6 – 10 stwierdza się, że tezy postawione w rozdziale 5 rozprawy zostały potwierdzone. Adaptacyjne kryteria ziemnozwarciowe cechują się istotnie wyższą skutecznością detekcji doziemień w porównaniu z kryteriami bez adaptacji. Istnieją możliwości wyznaczenia składowej zerowej napięcia w miejscu zwarcia z wykorzystaniem metod uproszczonych, które z kolei są wystarczające do realizacji kryteriów adaptacyjnych i kryterium admitancyjnego.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Abad M., Borroy S., Lopez D., El Halabi N. i Garcia-Gracia M.: "New fault location method for up-to-date and upcoming distribution networks", w *CIRED 23rd International Conference on Electricity Distribution*, Lyon, 2015.
- [2] Agencja Rynku Energii S.A.: "Statystyka elektroenergetyki polskiej", Warszawa, 2012-2016.
- [3] Altonen J. i Wahlroos A.: "Advancements in fundamental frequency impedance based earth-fault location in unearthed distribution networks", w *CIRED 19th International Conference on Electricity Distribution*, Vienna, 2007.
- [4] Altonen J. i Wahlroos A.: "Novel algorithm for earth-fault location in compensated MVnetworks", w *CIRED 22nd International Conference on Electricity Distribution*, Stockholm, 2013.
- [5] Altonen J. i Wahlroos A.: "Performance of modern fault passage indicator concept", w *CIRED Workshop*, Helsinki, 2016.
- [6] Altonen J., Wahlroos A. i Pirskanen M.: "Advancements in earth-fault location in compensated MV-networks", w *CIRED 21st International Conference on Electricity Distribution*, Frankfurt, 2011.
- [7] Arciszewski A. i Zawodniak J. J.: "Linie średniego napięcia w aspekcie awaryjności oraz problemów formalno technicznych", *Prace Instytutu Elektrotechniki*, nr 247, 2010.
- [8] Bagheri A. i Bollen M.: "Additional information from voltage dips", w 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, 2016.
- [9] Billinton R. i Allan R., *Reliability Evaluation of Power Systems. Second Edition*. New York: Plenum Press, 1996.
- [10] Bollen H. J. M., *Understanding power quality problems: Voltage sags and interruptions*. Hoboken: Wiley - IEEE Press, 1999.
- [11] Buigues G., Valverde V., Zamora I., Mazón J. i Torres E.: "Signal injection techniques for fault location in distribution networks", w *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Santiago de Compostela, 2012.
- [13] Cerretti A., Calone R. i Fatica A.: "Evolution of the fault locator on MV distribution networks from simple stand alone device to a sophisticated strategic component of the smart grid control system", w *Proceedings of CIRED 2011*, Frankfurt, 2011.
- [14] Cerretti A., Scrosati G. i Consiglio L.: "Upgrade of ENEL MV network automation to improve performances in presence of faults and to deal DG", w *Proceedings od 21st International Conference on Electricity Distribution*, Frankfurt, 2011.
- [15] Chojnacki A., Analiza niezawodności eksploatacyjnej elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych. Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2013.
- [16] Chojnacki A.: "Modele niezawodnościowe linii napowierznych SN z przewodami gołymi", *elektro.info*, nr 5, 2016.
- [17] Chunju F., Li K.K., Chan W.L., Weiyong Y. i Zhaoning Z.: "Application of wavelet fuzzy neural network in locating single line to ground fault (SLG) in distribution lines", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, tom 29, nr 6, pp. 497-503, 2007.

- [12] Council of European Energy Regulators: "6th CEER Benchmarking Report on the Quality of Electricity and Gas Supply", Bruksela, 2016.
- [18] Djurcić B. M., Radojević M. Z. i Terzija V. V.: "Digital signal processing algorithm for arcing faults detection and fault distance calculation on transmission lines", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, tom 19, nr 3, pp. 165-170, 1997.
- [19] Druml G., Raunig C., Schenger P. i Fickert L.: "Fast selective earth fault localization using the new fast pulse detection method", w 22nd International Conference on *Electricity Distribution CIRED*, Stockholm, 2013.
- [20] Elkalashy I. N., Sabiha A. N. i Lehtonen M.: "Earth fault distance estimation using active traveling waves in energized-compensated MV networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, tom 30, nr 2, pp. 836-843, 2015.
- [21] Energoprojekt-Katowice S.A.: "Aktualizacja założeń do planu zaopatrzenia w ciepło, energię elektryczną i paliwa gazowe dla obszaru miasta Poznania", Katowice, 2010.
- [22] Glik K., Kowalik R. i Rasolomampionona D.: "Falowa lokalizacja miejsca zwarcia w linii WN", *Acta Energetica*, tom 3, pp. 5-12, 2011.
- [23] Gururajapathy S. S., Mokhlis H. i Bin I. A. Hazlee: "Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 74, pp. 949-958, 2017.
- [24] Habrych M., Wiśniewski G., Miedziński B. i Lisowiec A.: "Applicability of Rogowski coils made in PCB HDI technology in power system protections", w 2015 Modern Electric Power Systems (MEPS), Wrocław, 2015.
- [25] Handke J. i Olejnik B.: "Działania polskich operatorów systemu dystrybucyjnego w kierunku zmniejszenia współczynników związanych z przerwami w dostawie elektrycznej", w *Energetyka w odsłonach*. Poznań: Fundacja na Rzecz Czystej Energii, 2016, pp. 157-168.
- [26] Hänninen S., Single phase earth faults in high impedance grounded networks characteristics, indication and localisation, 2001, Doctoral Thesis.
- [27] Hänninen S. i Lehtonen M.: "Characteristics of earth faults in electrical distribution networks with high impedance earthing", *Electric Power Systems Research*, tom 44, nr 3, pp. 155-161, 1998.
- [28] Hänninen S. i Lehtonen M.: "Earth Fault Distance Computation with Fundamental Frequency Signals based on Measurements in Substation Supply Bay", Espoo, 2002.
- [29] Hartman M.: "Zastosowanie przekształcenia Fortescue'a do opisów stanów energetycznych w układach wielofazowych z niesinusoidalnymi przebiegami napięć i prądów", *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 82, nr 10, pp. 61-72, 2006.
- [30] Hoppel W., Sieci średnich napięć. Automatyka zabezpieczeniowa i ochrona od porażeń. Warszawa: WNT, 2017.
- [31] Hoppel W.: "Współczesne rozwiązania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach średnich napięć o nieskutecznie uziemionym punkcie neutralnym", *INPE*, nr 172-173, pp. 4-10, 2014.
- [32] Hoppel W.: "Zabezpieczenia linii elektroenergetycznych", Materiały otrzymane bezpośrednio od Autora, 2004.
- [33] Hoppel W. i Lorenc J.: "Ogólna ocena sposobów pracy punktu neutralnego sieci średnich napięć", w *Współczesna problematyka sieci średnich napięć*, Kórnik, 2007.
- [34] Horstmann Germany WebSite. [Online]. http://www.horstmanngmbh.com

- [35] "IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines - Redline", *IEEE Std C37.114-2014 (Revision of IEEE Std C37.114-2004) - Redline*, pp. 1-128, Jan 2015.
- [36] "IEEE Guide for the Application of Faulted Circuit Indicators on Distribution Circuits", *IEEE Std 1610-2016 (Revision of IEEE Std 1610-2007)*, pp. 1-26, 2017.
- [37] IEEE PES Power&Energy Society: "IEEE 123 Node Test Feeder", 1992.
- [38] Ilie I., Hernando-Gil I. i Djokic S.: "Reliability equivalents of LV and MV distribution networks", w *IEEE International Energy Conference and Exhibition ENERGYCON* 2012, Florence, 2012.
- [39] International Electrotechnical Comission. (2019, marzec) International Electrotechnical Vocabulary. [Online]. http://www.electropedia.org
- [40] Iurinic U. L., Herrera-Orozco R. A., Ferraz G. R. i Bretas S. A.: "Distribution systems high-impedance fault location: a parameter estimation approach", *IEEE Transactions on power delivery*, tom 31, nr 4, pp. 1806-1814, 2016.
- [41] Jia K., Ren Z., Bi T. i Yang Q.: "Ground Fault Location Using the Low-Voltage-Side Recorded Data in Distribution Systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, tom 51, nr 6, pp. 4994-5001, 2015.
- [42] Kacejko P. i Machowski J., Zwarcia w systemach elektroenergetycznych. Warszawa: WNT, 2013.
- [43] Kanicki A.: "Modelowanie systemu elektroenergetycznego w stanach zakłóceniowych z wykorzystaniem metody składowych symetrycznych", Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, tom 349, 2006.
- [44] Kolcun M., Kornatka M., Gawlak A. i Conka Z.: "Benchmarking the reliability of medium-voltage lines", *Journal of Electrical Engineering*, tom 68, nr 3, pp. 212-215, 2017.
- [45] Kujszczyk S., Mińczuk A. i Pasternakiewicz J., *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze*, Kujszczyk Szczęsny, Ed. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1994, tom 1.
- [46] Kulkarni S., Santoso S. i Short A. T.: "Incipient fault location algorithm for underground cables", *IEEE Transactions on Smart Grid*, tom 5, nr 3, pp. 1165-1174, 2014.
- [47] Kwapisz A., Identyfikacja zwarcia doziemnego z jednoczesną przerwą w fazie zwartej w rodzielczych sieciach SN rozprawa doktorska, 2003.
- [48] Lehtonen M., Siirto O. i Abdel-Fattah F. M.: "Simple fault path indication techniques for Earth Faults", w *IEEE Electric Power Quality and Supply Reliability Conference* (*PQ*), Rakvere, 2014.
- [49] Lim K. P. i Dorr S. D.: "Understanding and resolving voltage sag related problems for sensitive industrial customers", w 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, Singapore, 2000.
- [50] Loos M., Werben S., Kereit M. i Maun J.: "Detection of single phase earth fault in compensated network with C0 estimation", w 22nd International Conference on *Electricity Distribution*, Stockholm, 2013.
- [51] Lorenc J., Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2007.
- [52] Lorenc J., Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe kompensowanych sieci średnich napięć. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1992.

- [53] Lorenc J., Andruszkiewicz J., Olejnik B., Staszak B. i Balcerek P.: "Earth fault detection and isolation system for MV network", w *Proceedings of the Modern Electric Power Systems 2015 - MEPS 2015*, Wrocław, 2015.
- [54] Lorenc J., Handke J., Kwapisz A. i Staszak B.: "Ocena algorytmów zabezpieczeń admitancyjnych linii średnich napięć", *Poznań University of Technology Academic Journals Electrical Engineering*, nr 70, pp. 17-24, 2012.
- [55] Lorenc J. i Olejnik B.: "Układ do pomiaru składowej zerowej napięcia w sieci średniego napięcia", P.426446, 2018.
- [56] Lorenc J., Olejnik B. i Urbański P.: "Pomiary wielkóści charakterystycznych dla zwarć doziemnych w CZIP-SRZ - składowa zerowa napięcia", w Współczesna problematyka sieci średnich napięć 2019, Kolesin, 2019.
- [57] Lotfifard S., Kezunovic M. i Mousavi J. M.: "Voltage sag data utilization for distribution fault location", *IEEE Transaction on Power Delivery*, tom 26, nr 2, pp. 1239-1246, 2011.
- [58] Marciniak L.: "Identyfikacja zwarć doziemnych wysokorezystancyjnych w sieciach średnich napięć", *Przegląd Elektrotechniczny*, tom 91, nr 8, pp. 185-189, 2015.
- [59] Mikołajuk K., *Podstawy analizy obwodów energoelektronicznych*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1998.
- [60] Mikronika strona internetowa. [Online]. http://www.mikronika.pl
- [61] Mikronika, Dobór nastaw zabezpieczeń wytyczne obliczania nastaw dla reklozerów i sygnalizatorów, 2016.
- [62] Mora J. J., Carillo G. i Perez L.: "Fault location in power distribution systems using ANFIS nets and current patterns", w *Transmission & Distribution Conference and Exposition IEEE/PES: Latin America*, Caracas, 2006.
- [63] Mora-Florez J., Barrera-Nunez V. i Carrillo G.: "Fault location in power distribution systems using a learning algorithm for multivariable data analysis", *IEEE Transactions on power delivery*, tom 22, nr 3, pp. 1715-1721, 2007.
- [64] Mora-Flòrez J., Meléndez J. i Carrillo-Caicedo G.: "Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems", *Electric Power Systems Research*, tom 78, nr 4, pp. 657-666, 2008.
- [65] Musiał E.: "Sposób uziemienia punktu neutralnego sieci", *INPE Informacje o normach i przepisach elektrycznych*, nr 63, pp. 72-76, 2004.
- [66] Myatt L.J., Symmetrical Components. Oxford: Pergamon Press, 1968.
- [67] National Instrtuments, NI USB-6008/6009 User Guide.
- [68] Nortroll WebSite. [Online]. http://www.nortroll.no
- [69] Novosel D., Hart D., Hu Y. i Myllymaki J.: "System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads", 5,839,093, Listopad 17, 1998.
- [70] Olejnik B.: "Lokalizacja miejsca zwarcia dozienego w skompensowanej sieci średniego napięcia", Poznań University of Technology Adacemic Journals - Electrical Enegineering, tom 82, pp. 85-92, 2015.
- [71] Olejnik B.: "Selected protective algorithms of modern IED", *Computer Applications in Electrical Engineering*, tom 11, pp. 389-395, 2013.
- [72] Olejnik B.: "Skuteczność czujników przepływu prądu zwarciowego podczas zwarć doziemnych oporowych", w *Aktualna problematyka sieci średnich napięć 2014*, Opalenica, 2014.

- [73] Olejnik B., Lorenc J., Staszak B., Schoett A. i Wiśniewski A.: "Wyznaczanie nastaw zabezpieczeń przy reklozerach i wskaźników przepływu prądu zwarciowego w RD Wolsztyn wraz z wyznaczeniem pojemnościowego prądu zwarciowego sieci SN w GPZ Sława", Poznań, 2019.
- [74] Olejnik B. i Staszak B.: "Nowe rozwiązania w zabezpieczeniach od skutków zwarć doziemnych w sieciach SN", *Wiadomości Eletkrotechniczne*, nr 12, pp. 12-14, 2015.
- [75] Paska J.: "Chosen aspects of electric power system reliability optimization", *Eksploatacja i Niezawodnosc Maintenance and Reliability*, tom 15, nr 2, pp. 202-208, 2013.
- [76] Paska J., *Niezawodność systemów elektroenergetycznych*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2005.
- [77] Pereira A. R., da Silva G. L., Kezunovic M. i Mantovani R. J.: "Improved Fault Location on Distribution Feeders Based on Matching During-Fault Voltage Sags", *IEEE Transactions on Power Delivery*, tom 24, nr 2, pp. 852-862, 2009.
- [78] PN-E-05115 Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV.
- [79] PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych.
- [80] PN-EN 50341-2-22:2016 linie napowietrzne powyżej 1 kV, polski Załącznik Krajowy.
- [81] PN-EN 50522:2011 Uziemienie instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym niż 1 kV.
- [82] PN-IEC 60050-195:2001 Międzynarodowy słownik terminologiczny elektryki. Uziemienia i ochrona przeciwporażeniowa.
- [84] Polski Komitet Normalizacyjny, PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych.
- [83] Polski Komitet Normalizacyjny, PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych.
- [85] Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej: "Energetyka Dystrybucja i przesył", Poznań, 2018.
- [86] Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej: "Energetyka Dystrybucja i przesył", Poznań, 2019.
- [87] Pourahmadi-Nakhli M. i Akbar Safavi A.: "Path Characteristic Frequency-Based Fault Locating in Radial Distribution Systems Using Wavelets and Neural Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, tom 26, nr 2, pp. 772-781, 2011.
- [88] Radojević M. Z., Terzija V. V. i Djurcić B. M.: "Numerical algorithm for overhead lines arcing faults detection and distance and directional protection", *IEEE Transactions on Power Delivery*, tom 15, nr 1, pp. 31-37, 2000.
- [89] Rafinia A. i Moshtagh J.: "A new approach to fault location in three-phase underground distribution system using combination of wavelet analysis with ANN and FLS", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, tom 55, pp. 261-274, 2014.
- [90] Raunig C., Fickert L., Obkircher C. i Achleitner G.: "Mobile earth fault localization by tracing current injection", w *Proceedings of the 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference*, Kuressaare, 2010.
- [91] Ravindranath B., *Power System Protection and Switchgear*. New Delhi: New Age International, 2012.
- [92] Romind T&G. [Online]. https://romind.ro

- [93] Roth A., Hochspannungstechnik. Wiedeń: Springer-Verlag Wien GmbH, 1950.
- [94] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, 2007.
- [95] Rui L., Guoqing F., Xueyuan Z. i Xue X.: "Fault location based on single terminal travelling wave analysis in radial distribution network", *Electrical Power and Energy Systems*, tom 66, pp. 160-165, 2015.
- [96] Sadeh J., Bakhshizadeh E. i Kazemzadeh R.: "A new fault location algorithm for radial distribution systems using modal analysis", *Electrical Power and Energy Systems*, tom 45, nr 1, pp. 271-278, 2013.
- [97] Schneider Electric Official Website. [Online]. http://www.schneider-electric.com
- [98] Słownik języka polskiego PWN. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2013.
- [99] Sousa Martins L., Martins J., Alegria C. i Pires V.: "A network distribution power system fault location based on neural eigenvalue algorithm", w *Power Tech Conference Proceedings*, Bologna, 2003.
- [100] Strona internetowa KPB Intra Polska sp. z o.o. [Online]. http://intrapolska.pl
- [101] Synal B.: "Zjawiska ziemnozwarciowe w sieciach o małym prądzie zwarcia doziemnego", w *Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, Monografie nr 4.* Wrocław, 1975.
- [102] Talaga M. i Halinka A.: "Warunki pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach średnich napięć o bardzo małych prądach zwarcia z ziemią", *Wiadomości Elektrotechniczne*, tom 1, pp. 42-46, mar 2017.
- [103] Thomas W. D., Carvalho J. R., Pereira T. E. i Christopoulos C.: "Field trial of fault location on a distribution system using high frequency transients", w *IEEE Russia Power Tech*, St. Petersburg, 2005.
- [104] Trinidade C. F., Freitas W. i Vieira C. J.: "Fault Location in Distribution Systems Based on Smart Feeder Meters", *IEEE Transactions on Power Delivery*, tom 29, nr 1, pp. 251-260, 2014.
- [105] Urząd Regulacji Energetyki. Wykaz przedsiębiorstw energetycznych zajmujących się przesyłaniem lub dystrybucją energii elektrycznej. [Online]. https://rejestry.ure.gov.pl/o/15
- [106] Vechiu I., Curea O. i Camblong H.: "Transient operation of four-leg inverter for autonomous applications with unbalanced load", *IEEE Transactions on Power Electronics*, tom 25, nr 2, pp. 399-407, 2010.
- [107] Wahlroos A. i inni: "Wieloczęstotliwościowe zabezpieczenie admitancyjne", *Wiadomości Elektrotechniczne*, tom R. 84, nr 12, pp. 43-45, 2016.
- [108] Wiszniewski A i Winkler W., Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych. Warszawa: WNT, 2013.
- [109] ZPUE Włoszczowa, Sensor pomiarowy SP-1 karta katalogowa.