

Problematyka wykrywania oraz modelowania zwarć wysokooporowych w sieciach rozdzielczych średnich napięć

Streszczenie. Artykuł dotyczy problematyki wykrywania zwarć wysokooporowych w rozdzielczych sieciach średniego napięcia. Przedstawiono problemy detekcji zwarć wysokooporowych oraz omówiono niektóre zagadnienia dotyczące komputerowego modelowania tych zwarć pod kątem wykorzystania danych symulacyjnych do testowania algorytmów zabezpieczeniowych. Przedstawiono wyniki symulacyjne uzyskane za pomocą opracowanego w ATP-EMTP modelu sieci rozdzielczej średnich napięć.

Abstract. The paper is concerned with the issue of high impedance fault detection in distribution medium voltage networks. The high impedance fault detection difficulties are presented and some issues regarding computer modeling of these faults are discussed. Simulation results were obtained from MV network modelling in EMTP. (**Problems of detection and modeling of high impedance faults in medium voltage distribution networks**).

Słowa kluczowe: zwarcia wysokooporowe, sieci średnich napięć, modelowanie komputerowe, ATP-EMTP.

Keywords: high impedance faults, medium voltage networks, computer modelling, ATP-EMTP.

Wstęp

Ciągły rozwój technologiczny elektroenergetyki wymusza na operatorach sieci rozdzielczych modyfikacje istniejących topologii sieci średnich napięć wraz z zastosowaniem nowych rozwiązań zapewniających odpowiednio wysoki poziom ochrony tych sieci. Na konieczne zmiany wpływ ma między innymi dynamiczny wzrost udziału źródeł rozproszonych instalowanych w sieciach średnich napięć. Źródła te, powszechnie znane pod nazwą „odnawialne źródła energii (OZE)”, oddziałują w coraz większym stopniu na funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego.

Badania systemu elektroenergetycznego mają często charakter prac teoretycznych weryfikowanych na drodze modelowania komputerowego. Z punktu widzenia całościowej poprawności modelowania systemu należy jednak w pierwszej kolejności zadbać o możliwie wiarygodne modelowanie poszczególnych elementów systemu, a następnie uzupełniać taki model o dodatkowe elementy wchodzące w skład szeroko rozumianych OZE. Umożliwia to w szerszym spektrum i z większą wiarygodnością efektów modelowania oceniać wpływ źródeł odnawialnych, takich jak instalacje fotowoltaiczne czy turbiny wiatrowe, na pracę modelowanej sieci.

W publikacji skupiono się w pierwszej kolejności na przedstawieniu podstawowego modelu SN bez udziału modeli źródeł odnawialnych. Głównym tematem artykułu, poza aspektem poprawności modelowania sieci rozdzielczych SN, jest w szczególności modelowanie zwarć wysokooporowych, które zgodnie z nomenklaturą zagraniczną przyjęto nazywać zwarciami o dużej impedancji *ang.* High Impedance Fault (HIF). W krajowym nazewnictwie zwarcia te określane są mianem zwarć wysokooporowych lub wysokorezystancyjnych. Występują one w elektroenergetycznych systemach dystrybucyjnych a także systemach przesyłowych, powodując zagrożenia pożarowe oraz porażeniowe, co w sposób bezpośredni stwarza zagrożenia dla życia ludzi [1]. W związku z tym poprawne wykrywanie zwarć wysokorezystancyjnych jest bezwzględnie konieczne dla zapewnienia odpowiedniego stopnia bezpieczeństwa dla pracy sieci oraz ludzi. Zwarcia wysokooporowe nie są poprawnie wykrywane przez klasyczne algorytmy zabezpieczeniowe, czego podstawową przyczyną jest zbyt mała wartość kryterialnych wielkości pomiarowych oraz niestacjonarność samego zjawiska zwarcia [4]. W ramach artykułu podjęto analizę wskazanego zjawiska i weryfikację przedstawionych tez.

W tym celu jako program bazowy do modelowania sieci średnich napięć wykorzystano dobrze znane środowisko ATP-EMTP, które umożliwia modelowanie elementów systemu elektroenergetycznego oraz elementów energoelektronicznych. Oprogramowanie to pozwoliło w dość poprawnym stopniu na odwzorowanie zjawisk rzeczywistych zachodzących w sieci SN.

W dalszej części publikacji omówione zostały zwarcia wysokooporowe, sposoby ich modelowania oraz kwestie problematyczne dotyczące modelowania zjawisk w omawianych sieciach rozdzielczych.

Zwarcia wysokooporowe

Szacuje się, że błędne zadziałania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach SN stanowią od 5% do 15% wszystkich występujących zwarć, a problem ten dotyczy przede wszystkim sieci skompensowanych [2].

Doziemne zwarcie wysokooporowe można rozważać jako zwarcie o znacznej wartości rezystancji R_f w miejscu zwarcia, która osiąga wartości powyżej kilku k Ω [3]. Na rezystancje zwarcia składa się rezystancja łuku zwarcia, rezystancja ziemi oraz rezystancja przeszkody tj. dodatkowego elementu ścieżki zwarcia, takiego jak np. gałąź drzewa. Zakłócenie to cechuje się występowaniem złożonej nieliniowej i niestacjonarnej rezystancji [4]. Znaczna rezystancja zwarcia występuje w przypadku zetknięcia się przewodu fazowego z maszynami mechanicznymi, gałęziami drzew, czy powierzchniami betonowymi umiejscowionymi na gruncie o znacznej rezystywności jednostkowej.

Wysoka rezystancja zwarcia przekłada się na znaczne trudności w ich wykrywaniu, co spowodowane jest małą wartością wielkości pomiarowych, w szczególności składowej zerowej napięcia U_0 oraz prądu I_0 w punktach zabezpieczeniowych poszczególnych linii odpywowych. Dodatkowym czynnikiem utrudniającym detekcję tego typu zaburzeń w sieciach SN jest ich niestacjonarność. Należy tutaj również zauważyć, że pojawiające się podczas zwarć zakłócenia w postaci wyższych harmonicznych generowanych przez źródła nieliniowe oraz impulsowe, pogarszają skuteczność detekcji [5].

Jak już wspomniano determinującą wielkością jest tutaj pomiar I_0 , który realizowany jest za pomocą specjalnych filtrów składowych zerowych tj. przekładników prądowych połączonych w układ Holmgreena lub filtra w postaci przekładnika Ferrantiego. W ramach dalszych rozważań

skupiono się na drugim z filtrów. Zasada działania przekładnika Ferrantiego opiera się na sumowaniu prądów fazowych płynących w uzwojeniu pierwotnym, które realizowane jest poprzez sumowanie strumieni magnetycznych, co reprezentuje zapis równania (1).

$$(1) \quad 3I_0 = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}$$

gdzie: I_{L1} , I_{L2} , I_{L3} – wektory prądów fazowych w zabezpieczanej linii.

W skrajnych przypadkach, gdy rezystancja zwarcia jest odpowiednio duża, wartość składowej zerowej napięcia $3U_0$, która jest ogólnym kryterium pobudzenia zabezpieczeń w sieciach SN, znajduje się poniżej ustawionego progu rozruchowego. Ponadto wartości składowej zerowej prądu $3I_0$ w poszczególnych liniach są niższe od wartości błęd pomiarowego stosowanych prądowych przekładników zabezpieczeniowych. W związku z tym zwarcia wysokooporowe nie są poprawnie wykrywane przez klasyczne zabezpieczenia ziemnozwarciowe kierunkowe oraz admitancyjne. Ograniczenia te w klasycznym podejściu do wykrywania doziemień i zwarc w sieciach rozdzielczych SN wymuszają poszukiwania nowych niestandardowych metod detekcji wykorzystujących np. metodę współczynników transformaty falkowej prądów fazowych [6], przyrosty mocy parzystych harmonicznych [7], wartość amplitudy prądów fazowych i wybranych harmonicznych [8], sztucznej inteligencji, a w szczególności rozwiązania wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe (SSN) [9].

W przypadku zwarc wysokooporowych mimo małych wartości prądów zwarciovych urządzenia i linie w sieci poddane są zagrożeniom cieplnym. Należy jednak podkreślić, że w przypadku sieci o małym prądzie ziemnozwarciowym są one z reguły niegroźne. Ponadto mogą wystąpić inne określone zagrożenia, takie jak: zagrożenia cieplne uziołów, przeciążenia termiczne podziemnych części słupów betonowych, zagrożenia przepięciowe oraz zagrożenia porażeniowe. Wynika z tego, że mimo względnie niewielkiej wartości prądu zwarciovego podczas tych zwarc istnieją określone zjawiska zagrażające poprawnej i bezpiecznej pracy sieci oraz bezpieczeństwu osób i zwierząt mogących mieć potencjalnie kontakt z elementami sieci rozdzielczej.

Model sieci średnich napięć

Na rysunku 1 przedstawiono podstawowy model sieci średnich napięć przyjęty za bazę do badań symulacyjnych w środowisku ATP-EMTP.

Oprogramowanie to pozwala na modelowanie zjawisk zachodzących w systemach elektroenergetycznych oraz wszelkich zjawisk elektromechanicznych, systemów energoelektronicznych, itp.

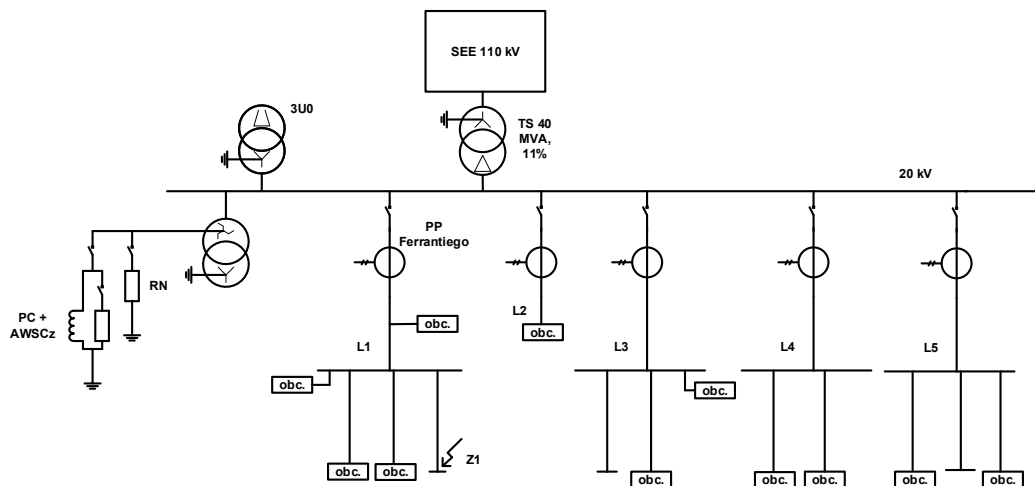
W przyjętym modelu szyny zbiorcze w stacji WN/SN (110kV/20kV) zasilane są poprzez transformator o mocy 40 MVA i grupie połączeń YNd11. Transformator uziemiający sieci rozdzielczej zamodelowany został w układzie ZNyn. Sieć rozdzielcza składa się z 5 pól liniowych podłączonych do głównych szyn stacji SN. W tabeli 1 zestawiono podstawowe dane o strukturze modelowanej sieci. Wszystkie linie modelowane były jako szeregowo połączone czworniki typu π . W każdym z pól liniowych realizowany jest pomiar składowej zerowej prądu za pomocą przekładników Ferrantiego.

Tabela 1. Charakterystyka pól odpyływowych (linii)

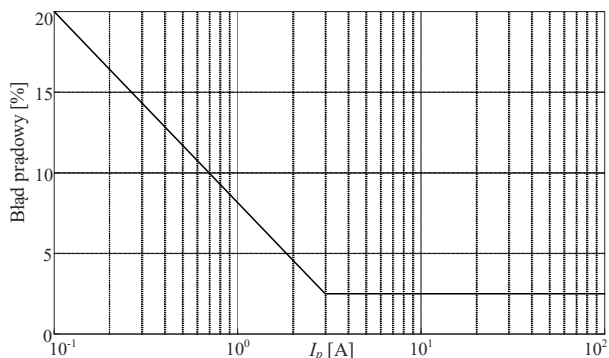
Oznaczenie	Charakterystyka
L1-4	Mieszane – odcinki kablowe oraz linie napowietrzne
L5	Odcinki kablowe

Pomiar składowej zerowej napięcia realizowany jest w układzie otwartego trójkąta na szynach zbiorczych modelowanej stacji. Dodatkowo do modelu sieci rozdzielczej wprowadzono źródło wyższych harmonicznych, które pozwala na zbiorcze modelowanie efektów występowania źródeł wyższych harmonicznych w głębi sieci SN. Zabieg taki umożliwi grupowe modelowanie źródeł wyższych harmonicznych bez wnikania w ich naturę fizyczną. Model opracowany na podstawie rozważań przedstawionych w [10] pozwala na wprowadzenie do symulowanego systemu do 15 harmonicznych prądu lub napięcia. Dopuszczalne jest również równoległe połączenie źródeł w przypadku, kiedy potrzebne jest uzyskanie większej liczby składowych harmonicznych.

W modelu sieci za pomocą sparometryzowanych przełączników dokonuje się wyboru sposobu pracy punktu neutralnego otrzymując sieć izolowaną, uziemioną przez rezystor oraz skompensowaną bez lub z automatycznym wymuszaniem składowej czynnej prądu zwarcia (AWS Cz). Pozwala to na dostosowanie modelu do szerszego spektrum wariantów symulacyjnych oraz nie ogranicza jego wykorzystania tylko do jednego typu sieci. Dzięki temu możliwa jest ocena zachowania sieci oraz wpływu zwarcia wysokooporowego na sieci o różnym sposobie pracy punktu neutralnego.



Rys. 1. Schemat modelowanej sieci SN



Rys.2. Nominalna charakterystyka błędu prądowego modelowanego przekładnika Ferrantiego

Filtr składowej zerowej prądu oraz model symulacyjny zwarcia wysokooporowego są zasadniczymi elementami modelu z punktu widzenia wiarygodności i przydatności otrzymanych z niego danych symulacyjnych.

Jako model wzorcowy wykorzystano charakterystykę błędu prądowego rzeczywistego przekładnika oferowanego przez jednego z polskich dostawców. Charakterystyka odwzorowuje błąd przekładnika przy $R_{obc} = 2\Omega$ (rys.2).

Uwzględnienie rzeczywistego poziomu błędów prądowych pozwala otrzymać względnie dokładne dane symulacyjne, co jest szczególnie istotne, gdy rozpatruje się ich wykorzystanie w analizie niekonwencjonalnych kryteriów zabezpieczeniowych. Pozwala to na otrzymanie wiarygodniejszych wyników pomiarowych dla I_0 , które są funkcją wartości błędów przekładnika Ferrantiego w zależności z kolei od wartości prądu pierwotnego.

Charakterystyka błędów prądowych aproksymowana została zgodnie z poniższym równaniem:

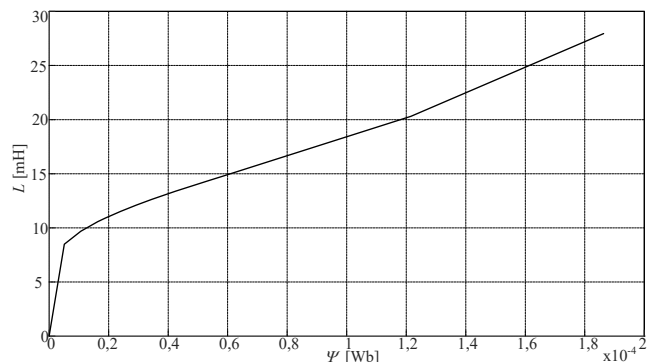
$$(2) \quad \delta = \frac{-(20 - 2,5)}{\log_{10} 3 - \log_{10} 0,1} (\log_{10} I_p + 1) + 20$$

przez uzależnienie indukcyjności uzwojenia wtórnego przekładnika od transformowanego prądu chwilowego (I_p – prąd pierwotny przekładnika).

Podczas zwarcia o znacznej wartości rezystancji przejścia, błąd prądowy przekładnika może osiągnąć wartość do 20%. Oznacza to znaczny udział błędów prądowych przekładnika w mierzonej wartości, co w znacznym stopniu wpływa na osiągalną czułość przekładnika zabezpieczeniowego, a tym samym poprawność detekcji zwarcia. Wskazana metoda modelowania umożliwiła szybkie odwzorowanie innych kształtów charakterystyk przekładnika, a więc uogólnienie badań ze względu na inne wyposażenie układu zabezpieczeniowego. Na rysunku 3 przedstawiono zależność indukcji uzwojenia PP od strumienia magnetycznego. Dane dotyczące strumienia magnetycznego oraz indukcyjności magnetycznej są z kolei wykorzystywane na potrzeby późniejszych obliczeń. Opracowane zależności posłużyły do przygotowania odpowiedniego skryptu w języku MODELS w ATP-EMTP, w którym modelowano prąd magnesowania rdzenia i którego wartości posłużyły do sterowania odpowiednim źródłem prądowym modelującym prąd magnesowania. Podejście takie umożliwiło dokładniejsze odwzorowanie błędów prądowych przekładników nawet w przypadku pracy w dolnym zakresie wartości prądów pierwotnych.

W ramach przeprowadzonych badań dokonano weryfikacji opracowanego modelu przekładnika prądowego w celu oceny jego działania w warunkach symulacyjnych. Oceny dokonano pod kątem wartości błędów prądowych w zależności od prądu pierwotnego w trakcie wystąpienia

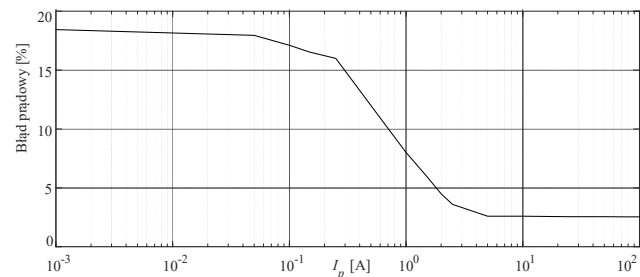
zwarcia. Pozwoliło to na zweryfikowanie wartości błędów w zależności od zadanych parametrów zwarciovych.



Rys.3. Zmiana indukcji magnetycznej uzwojenia przekładnika w zależności od strumienia magnetycznego

Na rysunku 4 przedstawiono wyznaczoną doświadczalnie charakterystykę wykorzystanego modelu przekładnika Ferrantiego.

Porównując uzyskaną charakterystykę przekładnika prądowego z nominalnieadaną, widoczne są różnice względem przebiegu nominalnego. Różnice te wynikają z ograniczonej dokładności przyjętych współczynników aproksymacji oraz algorytmu numerycznego wykorzystywanego do aproksymacji błędów w zależności od wartości prądu pierwotnego. Na podstawie badań modelu przekładnika wykonanych w programie ATP-EMTP stwierdzono, że wartość błędów dla niskich wartości prądu pierwotnego nie osiąga zakładanych 20%. Potwierdza się natomiast przedstawiona powyżej teza, że w przypadku znaczących wartości rezystancji zwarcia wartość błędów prądowych przyjmuje znaczne wartości, co wpływa na poprawność detekcji zwarcia. Wynika to z małej wartości prądu pierwotnego (ziemnozwarciowego).



Rys.4. Charakterystyka błędów prądowych modelowanego prądowego przekładnika Ferrantiego

W celu modelowania zwarcia wysokooporowych istotne jest opracowanie odpowiedniego modelu odwzorowującego zjawiska fizyczne zachodzące podczas wystąpienia tego typu doziemienia. Opracowane modele komputerowe (symulacyjne) powinny być weryfikowane w oparciu o rzeczywiste przebiegi rejestrowane podczas zwarcia wysokooporowych [11], co umożliwia w pełni ocenić poprawność ich działania i użyteczność otrzymanych danych symulacyjnych. Weryfikacja ta wymaga dostępu do danych rzeczywistych, co w wielu przypadkach jest utrudnione ze względu na konieczność ich zdobywania od operatorów sieci dystrybucyjnych. Dlatego też pewna część z opracowanych modeli nie została zweryfikowana na potrzeby dalszych badań, a ich weryfikacja pozostaje na etapie teoretycznym.

Wpływ założonych charakterystyk napięciowo-prądowych zwarcia łukowego na modelowanie oraz zachowanie sygnału prądu zwarcia ma szereg czynników,

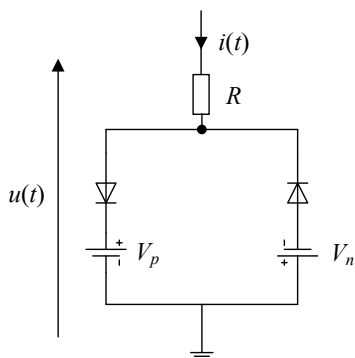
których wzajemna interakcja wpływa na uzyskane wyniki. Czynniki te wymieniono w tabeli 2 [12].

Tabela 2. Zjawiska wpływające na przebieg zwarć łukowych

Lp.	Czynniki
1	Kanały węglowo-krzemowe
2	Podrywanie przewodów nad powierzchnię gruntu
3	Nieliniowość łuku zwarciovego
4	Rezystancja na styku przewód-podłoże
5	Pojemności cieplne przewodu, gruntu i słupa łuku
6	Generacja dymu i pary
7	Zawartość wilgoci w gruncie
8	Podrywanie cząstek gleby
9	Właściwości podłoża

Uwzględnienie wyszczególnionych zmiennych znaczących dodatkowo utrudnia doświadczalne modelowanie zjawisk łukowych oraz doziemnych zwarć wysokoenergetycznych.

W ramach prowadzonych badań wykorzystano dwa modele pozwalające odwzorować zjawiska zachodzące podczas wysokoenergetycznych zwarć doziemnych. Pierwszym z nich był podstawowy model dwudiodowy zaproponowany w [13, 14]. Jego uproszczony schemat przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Model dwudiodowy zwarcia wysokoenergetycznego

Model składa się z dwóch diod oraz dwóch źródeł stałoprądowych, które połączone są przeciwnie. W czasie występowania dodatniego półokresu napięcia prąd przepływa przez źródło V_p . Asymetria przewodzenia połączenia przewód-grunt realizowana jest poprzez różnicowanie napięcia przebicia. Wzrost napięcia łuku przekłada się na zwiększenie zniekształcenia prądu łuku.

Drugi, bardziej złożony model, został opracowany na podstawie rozważań i badań zawartych w pracach [13, 15, 16, 17]. Model ten pozwala oddać dynamikę nieliniowej rezystancji łuku krótkiego w powietrzu [16]. Opisuje tę dynamikę następujące równanie różniczkowe:

$$(3) \quad \frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{\tau}(G(t) - g(t)),$$

któremu odpowiada transmitancja:

$$(4) \quad \frac{g(s)}{G(s)} = \frac{1}{\tau s + 1}$$

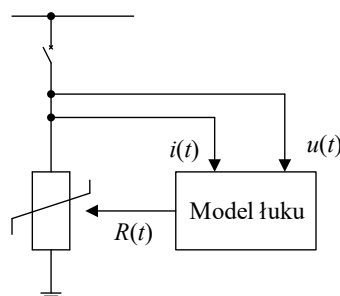
gdzie: $g(t)$ - zmienna w czasie konduktancja łuku, $G(t)$ - konduktancja stacjonarna, τ - stała czasowa.

Model łuku zwarciovego opracowany został z wykorzystaniem języka programowania w środowisku obliczeniowym MODELS programu ATP-EMTP. Proces powtórnego zapłonu łuku realizowano programowo poprzez wykorzystanie napięć V_p oraz V_n , które zaimplementowano w modelu jako zmienne.

Na rysunku 6 przedstawiono uproszczony schemat interakcji opracowanego modelu z systemem elektroenergetycznym.

Wyniki badań

Zgodnie z założeniami teoretycznymi w miarę zwiększania się rezystancji zwarcioviej maleją wartości składowych zerowych napięcia oraz prądu. Powoduje to trudności w wykryciu zwarcia doziemnego, co wpływa na stopień skuteczności działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych wykorzystujących stosowne kryteria decyzyjne. W omawianym rozdziale przedstawiono wyniki badań dla określonego scenariusza. Badany scenariusz zakłada wystąpienie zwarcia w punkcie Z1 oznaczonym na rysunku 1. Zaprezentowane wyniki odnoszą się do sieci uziemionej przez rezystor. Badania przeprowadzono dla 7 wartości rezystancji zwarcia. W tabeli 3 przedstawiono dane dotyczące zadanych wartości R_f . W badaniach wykorzystano model łuku opisany równaniami (3) i (4).



Rys.6. Model łuku zwarciovego

Tabela 3. Przyjęte wartości wypadkowej rezystancji doziemienia R_f

Lp.	Wartość [kΩ]
1	1,0
2	5,0
3	7,5
4	15,0
5	60,0
6	75,0
7	90,0

Oceny uzyskanych wyników badań dokonano na podstawie opracowanego algorytmu kryterialnego. W badaniach na potrzeby stosowanych algorytmów przyjęto częstotliwość próbkowania równą 10 kHz. W pierwszej kolejności sygnały pomiarowe $3I_0$ oraz $3U_0$ poddano wstępnej filtracji, następnie przy wykorzystaniu filtracji ortogonalnej wyznaczono wartości chwilowej amplitudy sygnałów zgodnie z poniższą ogólną zależnością.

$$(5) \quad A(n) = \sqrt{(g_C(n) \cdot a_C(n))^2 + (g_S(n) \cdot a_S(n))^2}$$

gdzie: $a_C(t)$, $a_S(t)$ - sygnały na wyjściach pary filtrów ortogonalnych, g_C , g_S - współczynniki korekcyjne uwzględniające wzmocnienia wprowadzane przez pary filtrów ortogonalnych.

W celu wyznaczenia admitancji dla stanu bez zwarcia oraz stanu zwarcia, wykorzystano wyznaczone wartości chwilowe napięcia i prądu kolejności zerowej. Następnie wyznaczono średnią ruchomą dla analizowanych wartości skutecznych oraz chwilowej wartości admitancji. W celu prezentacji wyników badań dokonano wyznaczenia wartości średniej ruchomej w oknie 20ms analizowanych sygnałów składowych zerowych oraz admitancji. Proces ten miał na celu uśrednienie uzyskanych wyników na potrzeby ich tabelarycznej prezentacji.

Analizy wyników badań wykazały, że oddziaływanie wyższych harmonicznych przy większych wartościach R_f

jest bardziej uwidocznione, co przekłada się na pogorszenie jakości stosowanej filtracji. W analizie skupiono się wyłączenie na ocenie skuteczności działania pod kątem zadziałania kryterium admitancyjnego, nie brano pod uwagę kryterium pobudzenia zabezpieczenia od składowej zerowego napięcia.

Na rysunku 7 przedstawiono uproszczony schemat blokowy przeprowadzonej metodyki analitycznej.

W badaniach jako kryterium decyzyjne zastosowano kryterium admitancyjne, które uzyskuje najlepsze warunki w sieciach uziemionych przez rezystor [19]. W celu jego zastosowania obliczono nastawy zabezpieczenia admitancyjnego dla badanej linii. Obliczeń dokonano zgodnie z założeniami przedstawionymi w [18].



Rys.7. Wykorzystany algorytm analityczny

W tabeli 4 przedstawiono wykorzystane wielkości kryterialne oraz dobraną nastawę. W celu wyznaczenia nastawy zabezpieczenia admitancyjnego posłużono się następującymi zależnościami. W przypadku wyznaczenia minimalnego progu rozruchowego zabezpieczenia admitancyjnego wykorzystano poniższą zależność.

$$(6) \quad Y_{0nast} \geq \frac{k_b I_{CL}}{U_{0max} \vartheta_{i0}} + \Delta Y_{0\mu}$$

gdzie: k_b - współczynnik bezpieczeństwa, I_{CL} - pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego zabezpieczanej linii, U_{0max} - największa wartość składowej zerowej napięcia po stronie wtórnej filtra, ϑ_{i0} - przekładnia filtra składowej zerowej prądu, $\Delta Y_{0\mu}$ - błąd pomiaru admitancji.

Maksymalną wartość progu rozruchowego zabezpieczenia obliczono zgodnie z następującą zależnością:

$$(7) \quad Y_{0nast} < \frac{I_{CS} \sqrt{d_0^2 + (s+a)^2}}{U_{0max} \vartheta_{i0} k_c}$$

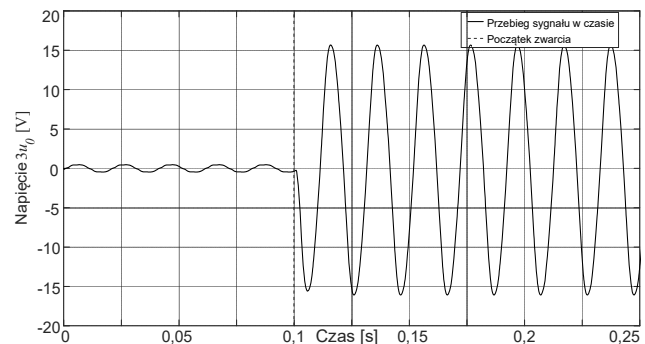
gdzie: k_c - współczynnik czułości, I_{CS} - pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego zabezpieczanej sieci, U_{0max} - największa wartość składowej zerowej napięcia po stronie wtórnej filtra, ϑ_{i0} - przekładnia filtra składowej zerowej prądu, d_0 - współczynnik tłumienia sieci, s - współczynnik rozkompensowania sieci, a - udział pojemnościowego prądu zwarcia doziemnego linii w prądzie zwarcia doziemnego sieci.

Tabela 4. Wielkości kryterialne doboru nastawy zabezpieczenia admitancyjnego

Parametr	Wartość
Pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego sieci (I_{CS}) [A]	82,697
Pojemnościowy prąd zwarcia doziemnego zabezpieczanej linii (I_{CL}) [A]	10,084
Znamionowy prąd ziemnozwarciowy rezystora (I_{RN}) [A]	100,0
Największa wartość składowej zerowej napięcia po stronie wtórnej filtra (U_{0max}) [V]	100,0
Współczynnik tłumienia sieci (d_0) [-]	1,209
Współczynnik rozkompensowania sieci (s) [-]	-1
Udział pojemnościowego prądu zwarcia doziemnego linii w prądzie zwarcia doziemnego sieci (α) [-]	0,122
Przekładnia filtra składowej zerowej prądu (ϑ_{i0}) [-]	100,0
Współczynnik bezpieczeństwa (k_b) [-]	1,2
Współczynnik czułości (k_c) [-]	1,5
Błąd pomiaru admitancji ($\Delta Y_{0\mu}$) [mS]	2,0
Minimalny próg nastawy zabezpieczenia ($Y_{0\geq}$) [mS]	3,21
Maksymalna wartość nastawy zabezpieczenia ($Y_{0r <}$) [mS]	8,24
Dobrana wartość nastawy zabezpieczenia (Y_{0r}) [mS]	5,0

Zgodnie z przedstawionymi informacjami dla badanej linii L1 dobrano nastawę zabezpieczenia admitancyjnego wynoszącą 5,0 mS. Dobrana nastawa pozwala zachować czułość zabezpieczenia powyżej 1,5.

Na rysunku 8 przedstawiono przebieg napięcia $3U_0$ dla przypadku wystąpienia zwarcia w miejscu Z1, przy $R_f = 1$ k Ω . Przebieg ilustruje stan przed wystąpieniem zwarcia oraz w trakcie zwarcia. Chwilę rozpoczęcia zwarcia zaznaczono przerywaną linią pionową.

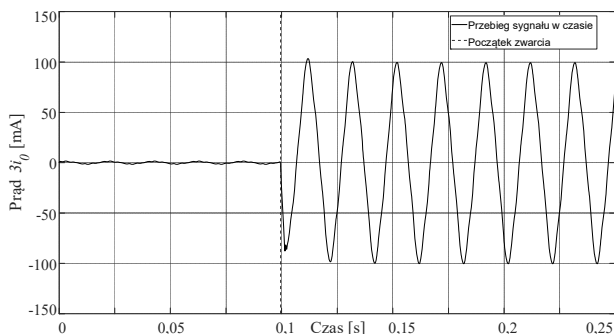


Rys.8. Przebieg sygnału $3u_0(t)$

Wyniki przedstawiono dla stanu po filtracji. Pierwotny przebieg charakteryzował się znacznym udziałem wyższych harmonicznych, co wpływało na jego zniekształcenie.

Analogiczną procedurę zastosowano do przypadku przedstawionego na rysunku 9 – przebieg $3I_0(t)$.

W tabeli 5 przedstawiono uzyskane wyniki symulacyjne dla uśrednionych (oznaczenie A przy indeksie dolnym) wartości skutecznych $3U_0$, $3I_0$ oraz uśrednioną wyznaczoną wartość Y_0 w stanie normalnej pracy sieci – brak zwarcia. Ponadto w tabeli zawarto informacje dotyczące aproksymowanego błędu prądowego przekładnika. W stanie normalnej pracy występowanie składowych zerowych mierzonych sygnałów związane jest z naturalną asymetrią sieci oraz istniejącymi błędami przyrządów pomiarowych. W tabeli zawarto również dane dotyczące wartości admitancji dla wskazanego stanu pracy sieci.



Rys.9. Przebieg sygnału $3i_0(t)$

Tabela 5. Wyniki badań dla stanu normalnej pracy sieci

Wartość R_f [kΩ]	Stan przed zwarcie			
	$3U_{0ARMS}$ [V]	$3I_{0ARMS}$ [mA]	Błąd prądowy [%]	Y_{0A} [mS]
1,0	0,3846	0,9257	14,94	2,70
5,0	0,3477	0,9083	15,03	2,60
7,5	0,3438	0,9094	15,02	2,66
15,0	0,3506	0,9065	15,04	2,58
60,0	0,3470	0,9044	15,05	2,59
75,0	0,3460	0,9046	15,05	2,60
90,0	0,3464	0,9037	15,05	2,59

Zgodnie z danymi przedstawionymi w tabeli 5 dla normalnej pracy sieci (brak zwarcia) wyznaczona wartość admittancji jest poniżej przyjętego progu rozruchowego kryterium admittancyjnego. Zachowanie to jest zgodne z oczekiwaniami, bowiem w stanie normalnej pracy sieci nie powinno dochodzić do pobudzenia się zabezpieczenia. Jest to istotna kwestia w aspekcie wykrywania zwarcz wysokooporowych, podczas których nie dochodzi do pobudzenia zabezpieczenia i/lub zadziałania odpowiedniego kryterium np. z rodziny kryteriów admittancyjnych.

Należy zauważyć, że pomiar składowej zerowej prądu obarczony jest znacznym błędem, który w analizowanym przypadku stanowi 15% mierzonej wartości. Wpływa to negatywnie na dokładność wyznaczonej wartości admittancji, gdyż z uwagi na błąd prądowy jej wartość również obciążona jest dodatkową niepewnością. Dlatego też w trakcie doboru nastawy ważne jest uwzględnienie błędów prądowych przekładników Ferrantiego.

Analogiczną procedurę prezentacji wyników zastosowano dla stanu zwarcia. W tabeli 6 przedstawiono uzyskane wyniki.

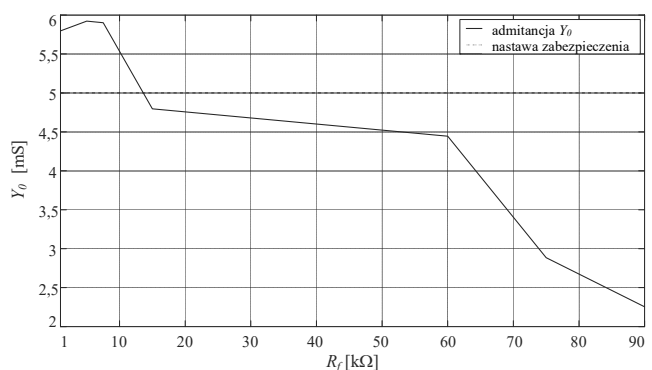
Tabela 6. Wyniki badań dla stanu zwarcia

Wartość R_f [kΩ]	Stan zwarcia			
	$3U_{0ARMS}$ [V]	$3I_{0ARMS}$ [mA]	Błąd prądowy [%]	Y_{0A} [mS]
1,0	11,30	65,50	4,04	5,80
5,0	2,53	14,97	6,36	5,92
7,5	1,63	9,61	7,28	5,90
15,0	1,11	5,30	8,74	4,80
60,0	0,15	0,63	16,79	4,45
75,0	0,18	0,50	18,01	2,88
90,0	0,20	0,46	18,55	2,25

W przedstawionych danych widoczny jest dominujący trend spadku wartości kryterialnych $3U_0$ oraz $3I_0$ wraz ze wzrostem rezystancji zwarcia. Pewną aberracją zjawiska zaobserwowano w ostatnim z badanych przypadków, dla którego, mimo najwyższej wartości R_f , nastąpił wzrost składowej zerowej napięcia. W przypadku $R_f = 75$ kΩ oraz $R_f = 90$ kΩ wartości $3U_0$ oraz $3I_0$ zbliżają się, a nawet spadają poniżej wartości dla stanu normalnej pracy sieci (stan bez zwarcia). Wartość błędu prądowego wzrasta

stopniowo z uwagi na zmniejszanie się wartości pierwotnego prądu ziemnozwarciowego, co przekłada się na pogorszenie dokładności pomiaru składowej zerowej prądu po stronie wtórnej, który wykorzystywany jest jako jeden z sygnałów kryterialnych dla zabezpieczenia ziemnozwarciowego. Znaczna wartość błędu decydować może o poprawności detekcji zwarcia wysokooporowego, czego efektem może być niepoprawne zadziałanie zabezpieczenia lub jego brak.

W celu oceny skuteczności działania kryterium admittancyjnego porównano wyznaczone wartości w stanie zwarcia z przyjętym progiem jego zadziałania. Na rysunku 10 przedstawiono trend zmian admittancji oraz zaznaczono próg rozruchowy zabezpieczenia.



Rys.10. Przebieg zmian wartości admittancji dla analizowanego przypadku

Zgodnie z przedstawionymi danymi widać, że dobrane nastawy byłyby skuteczne dla trzech przypadków analizowanej wartości R_f tj. 1 kΩ, 5 kΩ oraz 7,5 kΩ. Ponadto widoczne jest, że mimo zmniejszenia się wartości $3U_0$ oraz $3I_0$, następuje miejscowy (w funkcji R_f) wzrost wartości admittancji. W przypadku pozostałych 4 analizowanych przypadków wartości R_f należy stwierdzić, że zastosowane kryterium admittancyjne nie będzie skutecznie wykrywać zwarcia wysokooporowego.

Podsumowanie

Ważnym aspektem poprawności modelowania sieci rozdzielczych średnich napięć jest opracowanie modelu pozwalającego na odwzorowanie rzeczywistej natury zjawisk zachodzących w eksploatowanych sieciach. Problematyczną kwestią z tym związaną jest odpowiednie oddanie charakterystycznych zjawisk zachodzących podczas zwarcz, w tym szeroko omawianych zwarcz wysokooporowych. Wymaga to stworzenia indywidualnych elementów modelujących naturę łuku elektrycznego oraz wpływ zwarcia na analizowany fragment systemu elektroenergetycznego. Ponadto niezmiernie ważne jest odwzorowanie rzeczywistych układów pomiarowych, które pozwolą wiarygodnie oddać błędy rzeczywistych przyrządów pomiarowych.

Doziemne zwarcie wysokooporowe jest szczególnym stanem awaryjnym mogącym wystąpić w rozdzielczej sieci średniego napięcia. Znaczna wartość rezystancji zwarcia przekłada się na niskie wartości prądów zwarciovych a to stanowi duże wyzwanie dla stosowanej automatyki zabezpieczeniowej. Stosowane obecnie kryteria zabezpieczające nie pozwalają w pełni poprawnie wykrywać wskazanych zwarcz. Z uwagi na małą wartość analizowanych sygnałów zabezpieczeniowych wartości kryteriów zabezpieczeniowych często znajdująca się poniżej progu rozruchowego stosowanych zabezpieczeń i w związku z tym doziemienia przez duże rezystancje nie są poprawnie wykrywane i eliminowane.

Przeprowadzone badania wykazały, że w skrajnych przypadkach, przy znacznej wartości rezystancji zwarcia, dochodzi do spadku amplitudy sygnałów nawet poniżej stanu przed wystąpieniem zakłócenia. Rzutuje to na możliwość obniżenia progów rozruchowych zabezpieczeń, które to mogłyby prowadzić do błędnej detekcji zwarcia, a tym samym wyłączenia zdrowej części systemu i przerwy w zasilaniu, co negatywnie przekładałoby się na jakość zasilania odbiorców końcowych. Zjawisko to widoczne jest w przypadku analizowanego kryterium admitancyjnego, dla którego skuteczne zadziałanie określono jedynie dla trzech z siedmiu badanych R_f . W przypadku skrajnie wysokich wartości R_f widoczne jest zjawisko obniżenia się wartości admitancji do poziomu poniżej wartości wynikającej z naturalnej asymetrii sieci.

Biorąc pod uwagę powyższe czynniki, należy uznać, że standardowe kryterium, jakim jest kryterium admitancyjne będzie nieskuteczne w przypadku detekcji zwarć wysokooporowych. Implikuje to konieczność poszukiwania nowych niestandardowych kryteriów detekcji zwarć tego typu.

Autorzy: dr hab. inż. Mirosław Łukowicz, Politechnika Wroclawska, Katedra Energoelektryki, ul. Janiszewskiego 8, 50-372 Wrocław, E-mail: mirosław.lukowicz@pwr.edu.pl; mgr inż. Mateusz Myśliwiec, Szkoła Doktorska Politechniki Wroclawskiej, E-mail: mateusz.mysliwiec@pwr.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Hong Y.-Y., Huang W.-S., Locating High-Impedance Fault Section in Electric Power Systems Using Wavelet Transform, -Means, Genetic Algorithms, and Support Vector Machine, *Artificial Intelligence and Its Applications 2014*, Volume 2015.
- [2] Marciniak L., Wavelet criteria for identification of arc intermittent faults in medium voltage networks, *Conference on Modern Electric Power System (2010)*, Wrocław.
- [3] Synal B., Zjawiska ziemnozwarciowe w sieciach o małym prądzie zwarcie doziemnego, *Prace Naukowe Instytut Energoelektryki Politechniki Wroclawskiej (1975)*, nr 31, Monografie nr 4.
- [4] Marciniak L., Identyfikacja zwarć doziemnych wysokorezystancyjnych w sieciach średnich napięć, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.91 (2015), nr 8, 185-189.
- [5] Łukowicz M., Metody wykrywania zwarć wysokooporowych w napowietrznych liniach elektroenergetycznych, *Prace Naukowe Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Wroclawskiej (2013)*, nr 99, Monografie nr 32.
- [6] Lai T.M., Snider L.A., Lo E., Sutanto D., High Impedance Fault Detection Using Discrete Wavelet Transform and Frequency Range and RMS Conversion, *IEEE Trans. Power Del.* (2005), 20, No. 1, 397-407.
- [7] Lien K.-Y., Chen S.-L., Liao Ch.-J., Guo T.-Y., Lin T.-M., Schen J.-S., Energy Variance Criterion and Threshold Tuning Scheme for High Impedance Fault Detection, *IEEE Trans. Power Del.* (1999), 14, No. 3, 810-917.
- [8] Lazkano A., Ruiz J., Leturiondo L.A., Aramendi E., High impedance arcing fault detector for three-wire power distribution networks, *10th Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECon (2000)*, III, 899-902.
- [9] Michalik M., Rebizant W., Łukowicz M., Seung-Jae Lee, Sang-Hee Kang, High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm, *IEEE Trans. Power Del.* (2006), 21, No. 4, 1793-1802.
- [10] Martinez-Velasco, Juan A., Transient analysis of power systems a practical approach, *Hoboken, NJ :Wiley-IEEE Press (2020)*, 426-431.
- [11] Ziolkowski V., da Silva I.N., de Souza D.M.B.S, Flauzionario R.A., On Filed Experience Results Related to High-Impedance Faultes in Power Distribution System, *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PES'09)*, 5 p. (2009).
- [12] Sultan A.F., Swift G.W., Fedirchuk D.J., Detection of high impedance arcing faults using fault a multilayer perceptron, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 7, No. 4 p. 1871-1877 (1992).
- [13] Emanuel A.E., Cyganski D., Orr J.A., Shiller S., Gulachenski E.M., High Impedance Fault Arcing on Sandy Soil in 15 kV Distribution Feeders: Contribution to the Evaluation of the Low Frequency Spectrum, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, No. 2, p. 676-686 (1990).
- [14] Wai D.C.T., Yibin X., A novel technique for high impedance fault identification, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 13, No. 3, p. 738-744 (1998).
- [15] Elkalashy N.I., Lehtonen M., Darwish H.A., Izzularab, Taalab A.I., Modeling and Experimental Verification of a High Impedance Arcing Fault in MV Networks, *Power System Conference and Exposition, Atlanta, Georgia, USA p.1950-1956 (2006)*.
- [16] Kizilcay M., Pniok T., *Digital System Simulation of Fault Arcs in Power System, European Transactions on Electrical Power*, vol. 1, No. 1, p. 55-60 (1990).
- [17] Kwon W.H., Lee G.W., Park Y.M., Yoon M.C., Yoo M.H., High Impedance Fault Detection Utilizing Incremental Variance of Normalized Even Order Harmonic Power, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 6, No. 2, p.557-564 (1991).
- [18] Hoppel W., Sieci Średnich Napięć Automatyka zabezpieczeniowa i ochrona od porażień, *Wydawnictwo WNT, Warszawa (2017)*.
- [19] Lorenc J., Hoppel W., Problemy wykrywania zwarć doziemnych w sieciach pracujących z nieuziemiałym bezpośrednio punktem neutralnym, *Konferencja jubileuszowa, Ustronie 2005*