

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI
INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI



AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Aleksandra Schött-Szymczak

ZJAWISKA PRZEPIĘCIOWE
W ELEKTROENERGETYCZNYCH KABŁACH SN ZE
SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM SPOSOBU PRACY ICH ŻYŁ
POWROTNYCH

Promotor:

dr hab. Inż. Krzysztof Walczak, prof. PP

Poznań, 2025

1. Wprowadzenie

Zagadnienia związane z wykorzystaniem i eksploatacją linii kablowych średniego napięcia (SN) dotyczą przede wszystkim kabli elektroenergetycznych o izolacji z polietylenu usieciowanego, wykonanych jako kable jednożyłowe z żyłą powrotną zapewniającą skuteczne odprowadzenie prądu zwarciovego i współpracę z urządzeniami automatyki zabezpieczeniowej w celu szybkiego wyłączenia zagrażających izolacji kabla prądów zwarciovych. W związku z tym, łącza kablowe w sieciach średnich napięć, wykonywane przez polskie spółki dystrybucyjne, są najczęściej zbudowane z trzech jednożyłowych kabli posiadających żyły powrotne uziemione dwustronnie. W takim układzie zapewnione zostaje odprowadzenie prądu zwarciovego oraz bezpieczeństwo porażeniowe i przeciwprzebiegowe. Wykorzystując taką konfigurację, napięcie na żyłę powrotną jest pomijalnie niskie, co skutkuje możliwością spełnienia warunków ochrony przebiegowej bez konieczności stosowania dodatkowych środków ochrony. Istotną wadą takiego rozwiązania jest pojawienie się w trakcie normalnej pracy znaczących strat energii elektrycznej wynikających z przepływu prądów powłokowych będących skutkiem wyindukowania się w żyłę powrotną siły elektromotorycznej.

Straty energii w kablach elektroenergetycznych stanowią istotny koszt dla operatorów sieci przesyłowych i dystrybucyjnych i są przedmiotem wielu prac badawczych, które mają na celu opracowanie zmian konfiguracji i sposobu pracy linii kablowej, aby straty te zminimalizować. Ich źródłem w liniach kablowych są żyły robocze, izolacje czy powłoki przewodzące kabla, takie jak: żyła powrotna, pancerze czy warstwa półprzewodząca. Redukcja strat w kablach w sieciach SN jest możliwa poprzez wykorzystanie metod stosowanych w liniach kablowych WN i NN, a mianowicie zastosowanie alternatywnych sposobów połączeń i uziemienia żył powrotnych, takich jak: uziemienie jednostronne z ogranicznikami przepięć, przeplecenie żył powrotnych bez lub z transpozycją lub dodawanie dodatkowych rezystancji lub reaktancji w miejscu uziemienia.

Odpowiednia zmiana sposobu konfiguracji uziemienia żył powrotnych jednożyłowych elektroenergetycznych linii kablowych SN może stanowić rozwiązanie problemu, jakim są straty przesyłowe wynikające z indukowania się prądów powłokowych w żyłę powrotną, przy jednoczesnym zapewnieniu spełnienia wymagań stawianych żyłom powrotnym. Propozycja układu, który spełnia większość tych wymagań, została przedstawiona przez zespół badawczy

Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej. W ramach prac badawczych zdecydowano się na konfigurację uziemienia żył powrotnych, w których żyły uziemione są jednostronnie, w wariantach nieuziemienia jednej lub dwóch faz żyły powrotnej. Analiza zagadnienia opisanego w materiałach dotyczących tego zagadnienia pozwala na wnioskowanie, że możliwym technicznie i opłacalnym ekonomicznie jest wykonanie uziemienia żył powrotnych kabli elektroenergetycznych SN z nieuziemioną jedną, bądź dwiema fazami żyły powrotnej. Podstawowym zastrzeżeniem jest jednak indukujące się w nieuziemionych żyłach napięcie mogące stanowić zasadnicze niebezpieczeństwo przepięciowe dla powłok zewnętrznych kabli pracujących w ten sposób.

Wzrost wartości płynącego w żyłach roboczych kabla elektroenergetycznego prądu przemiennego będzie skutkował proporcjonalnym dla tego układu wzrostem poziomu napięć wyindukowanych w żyłach powrotnych. Takie zjawisko będzie miało miejsce w przypadku wystąpienia warunków zakłóceń, podczas których prąd przepływający przez żyłę roboczą będzie krotnością prądu roboczego, co następuje między innymi w trakcie trwania zwarć międzyfazowych oraz doziemnych, stanowiących główne zagrożenie dla urządzeń pracujących w układach elektroenergetycznych. W sieciach SN, będących w większości sieciami o charakterze mieszanym kablowo-napowietrznym, bardzo prawdopodobnymi i spodziewanymi zdarzeniami są zwarcia doziemne, a szczególnie zwarcia doziemne jednofazowe, które stanowią 75% wszystkich zwarć w sieci SN, spośród których 85% to zwarcia samogasnące. Zdarzenia o charakterze wolnozmiennym, którymi są zwarcia doziemne, stanowią źródło ziemnozwarciowych przepięć dorywczych, które mogą stanowić zagrożenie dla izolacji urządzeń elektroenergetycznych. Poziom przepięć dorywczych będzie wynikał zarówno z wartości prądu zakłóceń powstającego w wyniku zwarcia doziemnego, jak i z długości kabla oraz z indukcyjności wzajemnej żyły roboczej i powłoki kabla zależnej od wymiarów geometrycznych układu i przenikalności magnetycznej środowiska. Wszystkie te składowe, wpływające na zagrożenie przepięciowe mogące pojawić się w trakcie zwarć doziemnych w linii kablowej, będą znaczące z punktu widzenia zmiany sposobu uziemienia żył powrotnych. Konfiguracja uziemienia żył powrotnych może mieć istotny wpływ na poziom przepięć dorywczych mogących stanowić zagrożenie dla izolacji powłoki kabla elektroenergetycznego, a co za tym idzie dla bezpieczeństwa i niezawodności pracy sieci elektroenergetycznej. Wykorzystywane i opracowywane warianty uziemienia żył powrotnych muszą zapewnić bezpieczeństwo, zarówno dla urządzeń pracujących w sieci, jak i dla ludzi,

jednocześnie spełniając podstawowe kryteria niezbędne do pozytywnej oceny wykorzystywanego rozwiązania praktycznego z uwzględnieniem funkcjonalności oraz ekonomiczności.

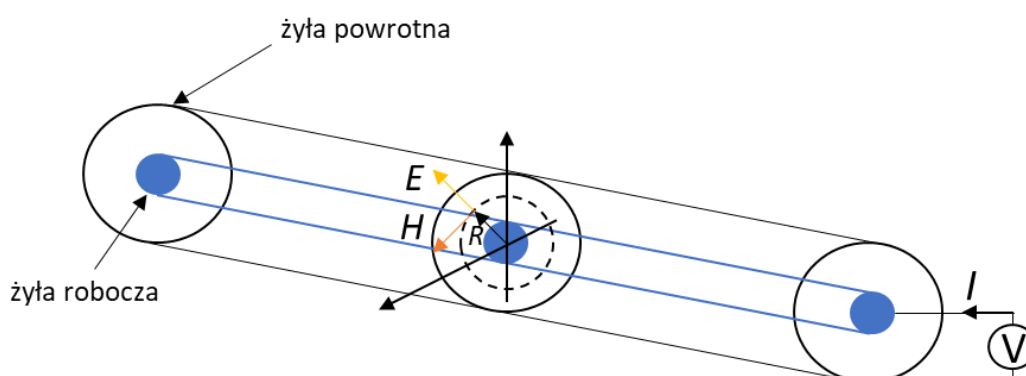
Propozycje alternatywnej konfiguracji uziemienia żył powrotnych mogą wiązać się z wprowadzeniem dodatkowych urządzeń do pracujących w sieci elektroenergetycznej systemów kablowych, które pozwolą na zapewnienie bezpiecznej pracy, przy jednoczesnym ograniczeniu strat przesyłowych. Podstawowym rozwiązaniem stosowanym w układach, gdzie żyły powrotne linii kablowej są nieuziemione, jest zainstalowanie warystorowych ograniczników przepięć. Decyzja o wykorzystaniu znanych rozwiązań, dla wykorzystywanej w rozprawie konfiguracji uziemienia żył powrotnych kabla SN, zależeć będzie od maksymalnych poziomów przepięć ziemnozwarciowych ustalonych dla przyjętych w trakcie badań kryteriów

2. Kable elektroenergetyczne średniego napięcia

2.1. Analiza oddziaływań wzajemnych przewodów ziemnopowrotnych w liniach kablowych średniego napięcia

Zastosowanie w systemie elektroenergetycznym linii kablowej wymaga uwzględnienia zjawisk fizycznych, jakie zachodzą między powłokami kabla. Zarówno w przypadku przepływu przez żyłę roboczą prądów roboczych, jak i prądów zakłóceń, dochodzi do wyindukowania się siły elektromotorycznej w żyłę powrotnej. Zjawisko to nazywane jest rozwojem prądów powłokowych w liniach kablowych.

Na rysunku 1 przedstawione zostało zjawisko rozwoju prądów powłokowych wynikające ze sprzężenia magnetycznego istniejącego pomiędzy żyłą roboczą, a ekranem metalicznym. Przepływ prądu przez przewodnik wynikający z różnicy potencjałów na niego oddziałujących można opisać korzystając z równań Maxwella.



Rys. 1. Schemat poglądowy indukcji prądów powłokowych w liniach kablowych

Zgodnie z teorią obwodów ziemnopowrotnych, w przewodzie ułożonym równolegle do trzech przewodów, przez które przepływa symetryczny prąd trójfazowy, pojawia się natężenie pola elektrycznego E [V/m] o wartości opisanej wzorem (1):

$$\underline{E}_p = j\omega \underline{I}_2 2 \cdot 10^{-7} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{D_{1p} D_{3p}}{D_{2p}^2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{D_{3p}}{D_{1p}} \right) \quad (1)$$

gdzie $\underline{I}_2$ – prąd w przewodzie 2, prąd odniesienia [A], ω – pulsacja [Hz], D , D_{2p} , D_{3p} – odległości między osiami przewodu p i przewodów 1, 2 oraz 3 [m].

Parametry opisujące wartości charakterystyczne układu symetrycznego przedstawiono z kolei zależnościami (2) oraz (3):

$$\underline{I}_1 = a \underline{I}_2; \underline{I}_3 = a^2 \underline{I}_2 \quad (2)$$

$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}; a^2 = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3)$$

Dla jednożyłowych kabli elektroenergetycznych wyposażonych w żyły powrotne, ułożonych w układzie trójfazowym, żyły powrotne można potraktować jako przewody równoległe, które są oddalone od przewodzącej żyły roboczej na odległość r_p , która oznacza średni promień tej żyły. Zakładając, że w pobliżu omawianego układu kablowego nie ma innych przewodów z prądem, napięcia indukowane można wyznaczyć korzystając ze wzoru (1):

$$\underline{E}_1 = j\omega \underline{I}_2 2 \cdot 10^{-7} \left(-\frac{1}{2} \ln \frac{2D_{12}^2}{dD_{31}} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{2D_{31}}{d} \right) \quad (4)$$

$$\underline{E}_2 = j\omega \underline{I}_2 2 \cdot 10^{-7} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{4D_{12}D_{23}}{d^2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{D_{23}}{D_{12}} \right) \quad (5)$$

$$\underline{E}_3 = j\omega \underline{I}_2 2 \cdot 10^{-7} \left(-\frac{1}{2} \ln \frac{2D_{23}^2}{dD_{31}} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{2D_{13}}{d} \right) \quad (6)$$

gdzie d – średnia średnica żyły powrotnej.

2.2. Konfiguracje uziemienia

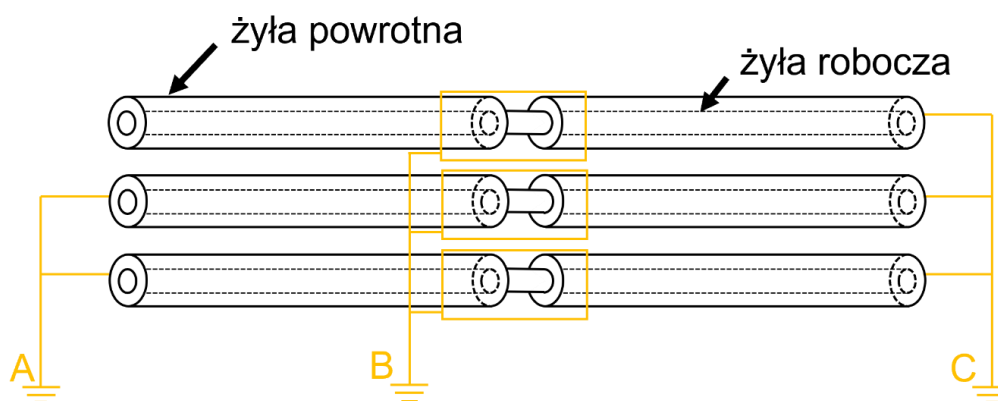
W wyniku pojawiania się sił oddziaływujących na powłoki kabli elektroenergetycznych, w żyłach powrotnych dochodzi do przepływu indukowanego prądu elektrycznego, którego konsekwencją jest powstawanie strat energii elektrycznej. Jest to jeden z czynników, których występowanie powoduje wzmożone zainteresowanie sposobami uziemienia żył powrotnych linii kablowych na poziomie napięć średnich.

W literaturze można spotkać wiele rozwiązań, które pozwalają na ograniczenie niebezpiecznych poziomów napięć pojawiających się na ekranach metalicznych w różnych

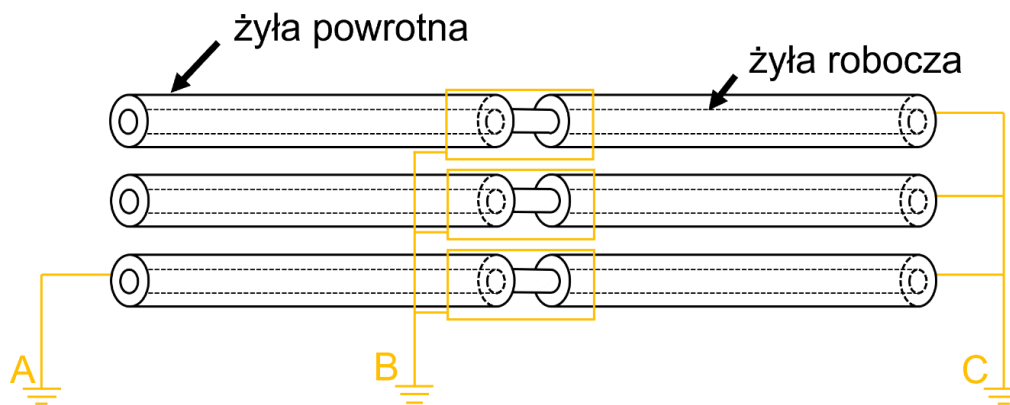
warunkach pracy linii kablowej oraz zminimalizowanie przepływu prądu powłokowego. Najczęściej stosowane metody uziemienia żył powrotnych omówione są w normach oraz standardach. Bez względu na sposób w jaki są wykonane, uziemienia ekranów metalicznych muszą spełniać następujące warunki:

- zapewniać uziemienie kabla elektroenergetycznego,
- zagwarantować drogę przepływu dla prądu zakłóceniewego przez żyłę powrotną,
- ograniczyć napięcie indukowane na żyłę powrotnej do akceptowalnego i minimalnego poziomu,
- znacząco zmniejszyć lub wyeliminować straty energii elektrycznej,
- ograniczyć przepięcia w stanach przejściowych do poziomu akceptowalnego, z uwzględnieniem połączeń z ogranicznikami przepięć.

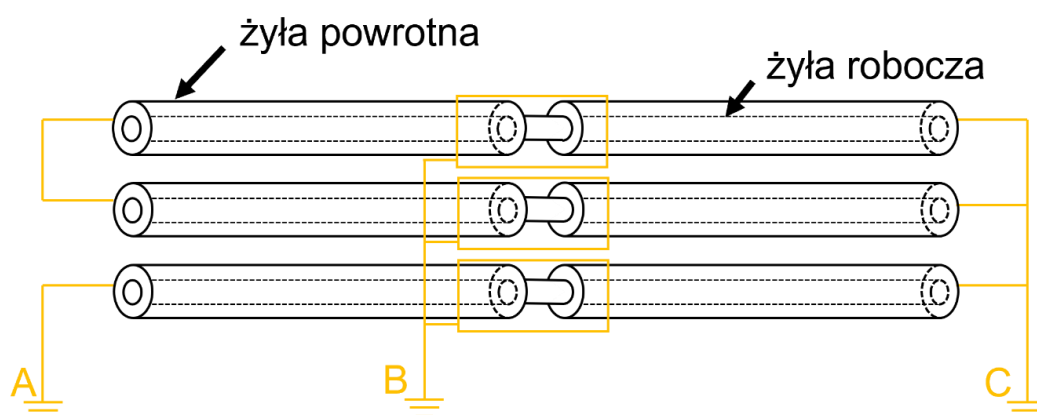
Możliwość spełnienia wszystkich tych warunków jest ważnym zagadnieniem, które rozpatruje się dla linii kablowych na wszystkich poziomach napięć. Najczęściej wykorzystywane sposoby łączenia żyły powrotnej z ziemią są w stanie zapewnić całkowite spełnienie części z tych wymagań. W związku z zastrzeżeniami dotyczącymi aktualnie stosowanych metod uziemienia żył powrotnych, zostały zaproponowane zmiany w podejściu do konfiguracji obustronnego ich uziemienia dla kabli średniego napięcia. Ograniczenie strat energii elektrycznej w kablach, przy jednoczesnym zapewnieniu ochrony przeciwporażeniowej i zminimalizowaniu zagrożenia przepięciowego, jest możliwe poprzez zaproponowanie alternatywnego układu połączeń żyły powrotnej, przedstawionego na rysunkach 2, 3 oraz 4. Na potrzeby rozprawy konfiguracje sposobu uziemienia żył powrotnych otrzymały oznaczenia: wariant a, wariant b oraz wariant c.



Rys. 2. Schemat funkcjonalny wariantu uziemienia obustronnego z nieuziemioną jednostronnie jedną fazą żyły powrotnej – wariant a



Rys. 3. Schemat funkcjonalny wariantu uziemienia obustronnego z nieuziemionymi jednostronnie dwiema fazami żył powrotnych – wariant b



Rys. 4. Schemat funkcjonalny wariantu uziemienia obustronnego z nieuziemionymi jednostronnie dwiema fazami żył powrotnych i zwartymi – wariant c

Rozwiązanie proponowane w rozprawie jest efektem współpracy naukowców Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej z firmą Enea Operator Spółka z o.o. Badania przeprowadzone z wykorzystaniem modelu komputerowego sieci elektroenergetycznej pracującej z trójfazową linią kablową średniego napięcia o kablach jednożyłowych z żyłami powrotnymi uwzględniały określenie wielkości strat początkowych dla zadanego obciążania, a następnie określenie o ile zredukowano te straty korzystając z alternatywnego sposobu połączeń żył powrotnych w tym układzie. Weryfikację badań symulacyjnych wykonano przy wykorzystaniu modelu rzeczywistego. Badania te potwierdziły ekonomiczną zasadność wykonania odziemienia dwóch żył powrotnych dla istniejących połączeń kablowych obciążonych mocą maksymalnie rzędu 2 MVA dla odbiorców komunalnych oraz zasadność jednoczesnego zmniejszenia pola przekroju poprzecznego żyły powrotnej ze standardowych 50 mm² do 25 mm² i nieuziemiania dwóch z trzech żył powrotnych układu dla nowych inwestycji. Autorzy zauważyli jednak płynące z takiego rozwiązania zagrożenia. W przypadku

ochrony przeciwporażeniowej należy uwzględnić zagrożenie porażeniowe na stacjach rozdzielczych SN/nn, wynikające z występowania napięć rażeniowych spowodowanych przepływem prądu zwarciovego w układzie. W przypadku jednostronnego nieuziemiaenia całkowitego lub częściowego żył powrotnych kabla średniego napięcia zaleca się sprawdzenie dopuszczalnych poziomów napięć rażeniowych korzystając z programów symulacyjnych, z uwzględnieniem rezystancji uziemień stacji połączonych żyłami powrotnymi.

Istotnym aspektem koniecznym do oceny przed wykorzystaniem tego sposobu pracy żył powrotnych jest możliwość występowania przepięć zagrażających powłoce zewnętrznej linii kablowej. W przypadku pracy normalnej nie występuje zagrożenie przepięciowe w liniach z jednostronnie nieuziemiaionymi, całkowicie lub częściowo, żyłami powrotnymi. Znaczące zagrożenie pojawia się natomiast w momencie występowania zwarć doziemnych oraz międzyfazowych w kablach SN. Szczególnie narażone na zjawiska przepięciowe będą kable pracujące w układzie z linią napowietrzną, gdzie zwarcia zdarzają się dużo częściej. W dalszych rozdziałach rozprawy przedstawione zostaną badania dotyczące zjawisk przepięciowych w liniach kablowo-napowietrznych średniego napięcia z alternatywnym sposobem uziemienia żył powrotnych.

3. Cel, tezy i zakres rozprawy

Cel rozprawy

Zmiana konfiguracji uziemienia żył powrotnych kabli elektroenergetycznych ma wymierny wpływ na zmniejszenie się strat energii elektrycznej w linii kablowej, lecz sposób doboru metody jej uziemienia powinien uwzględniać również inne aspekty, takie jak możliwość odprowadzania przez żyłę powrotną prądu zakłóceniovego czy minimalizację przepięć pojawiających się w stanach nieustalonych. Podstawowym rozwiązaniem w sieciach SN jest obustronne uziemienie żyły powrotnej linii kablowej, które spełniając większość warunków skutecznej pracy takiego uziemienia, stanowi rozwiązanie zwiększające straty energii elektrycznej. Celem rozprawy jest określenie poziomów przepięć ziemnozwarciowych pojawiających się w żyłach powrotnych kabli średniego napięcia i wynikających z nich zagrożeń dla izolacji tych kabli rozpatrując jednostronne odziemienie bądź nieuziemiaenie jednej lub dwóch faz żyły powrotnej. Wyznaczenie parametrów przepięciowych pozwoli na zaproponowanie rozwiązań eksploatacyjnych sieci i ograniczenie zagrożeń dla urządzeń oraz ludzi.

Tezy

Na podstawie analizy zagadnienia z uwzględnieniem stanu literaturowego oraz normatywnego sformułowane zostały następujące tezy:

Częściowe, jednostronne nieuziemiaenie jednej lub dwóch faz żył powrotnych jednożyłowych kabli elektroenergetycznych pracujących w układzie trójfazowym mające na celu ograniczenie strat w dystrybucji energii elektrycznej może generować niebezpieczne zjawiska przebiegiowe

oraz

Znajomość skali zjawisk przebiegowych powstających w częściowo nieuziemiaionych żyłach powrotnych trójfazowego układu kabla elektroenergetycznego średniego napięcia pozwala na dobór odpowiednich zabezpieczeń w celu uniknięcia jego uszkodzenia i wywołania zagrożenia przebiegowego

Przeprowadzenie badań nad zjawiskami przebiegowymi w żyłach powrotnej kabla elektroenergetycznego wymaga również rozwiązania zagadnienia dotyczącego możliwości przeprowadzenia wiarygodnej i zgodnej z rzeczywistością symulacji komputerowej tych zjawisk. W następstwie tego sformułowana została teza pomocnicza, którą przedstawiono poniżej.

Istnieje możliwość zamodelowania żyły powrotnej kabla elektroenergetycznego średniego napięcia w celu oceny zjawisk przebiegowych zachodzących w różnych konfiguracjach sieci elektroenergetycznej.

Zakres prac

Zakres prac obejmuje analizę zjawisk przebiegowych generowanych w żyłach powrotnej w różnej konfiguracji i przy różnych parametrach pracy sieci. W celu weryfikacji wstępnych tez dotyczących poziomów przebiegów w częściowo odziemionych żyłach powrotnych niezbędny był wybór metod badawczych, które pozwoliłyby na zidentyfikowanie problemu oraz odzwierciedlenie możliwych wartości rzeczywistych. W celu udowodnienia postawionych tez podjęto następujące kroki:

- wykonano przegląd literatury przedmiotu z uwzględnieniem warunków normatywnych i wymagań stawianych elektroenergetycznym liniom kablowych średniego napięcia przez operatorów sieci elektroenergetycznej w kraju,

w szczególności z punktu widzenia żyły powrotnej kabla – jej budowy, roli oraz zjawisk, które towarzyszą jej pracy,

- na podstawie literatury, zaproponowano rozwiązania sposobu uziemienia żyły powrotnej kabla elektroenergetycznego uwzględniające możliwości techniczne oraz wymagane warunki pracy linii kablowej w sieciach średniego napięcia,
- dokonano doboru metodologii badawczej bazując na wcześniejszych doświadczeniach, skupiając się na możliwości stworzenia warunków, przy których uzyskane wyniki badań będą najbliższe rzeczywistości,
- przeprowadzono wstępne analizy sieciowe z wykorzystaniem programu komputerowego Power Factory, w trakcie których zamodelowano rzeczywisty układ sieci średniego napięcia z pracującą w nim linią kablową. Wyniki symulacji komputerowych zostały zweryfikowane w badaniach terenowych i stanowią próbę wstępnego potwierdzenia słuszności postawienia tezy o możliwości powstania przebiegów ziemnozwarciowych o poziomach niebezpiecznych dla izolacji kabla w zaproponowanych konfiguracjach uziemienia żyły powrotnej,
- korzystając z narzędzia symulacyjnego zweryfikowanego we wstępnych badaniach, przeprowadzono symulacje w oparciu o wiedzę techniczną i eksploatacyjną, badając najbardziej prawdopodobne warianty konfiguracji sieci, w której można zaimplementować specjalny sposób uziemienia żył powrotnych,
- w końcowych etapach przeprowadzona została analiza otrzymanych wyników i propozycje rozwiązania występujących w omawianych układach problemów. Efektem było zaproponowanie rozwiązań, które mają ograniczyć skutki występowania zagrożenia przebiegowego dla powłok zewnętrznych kabli elektroenergetycznych trójfazowej linii kablowej
- ostatnim zadaniem było sformułowanie wniosków i podsumowanie przeprowadzonych prac.

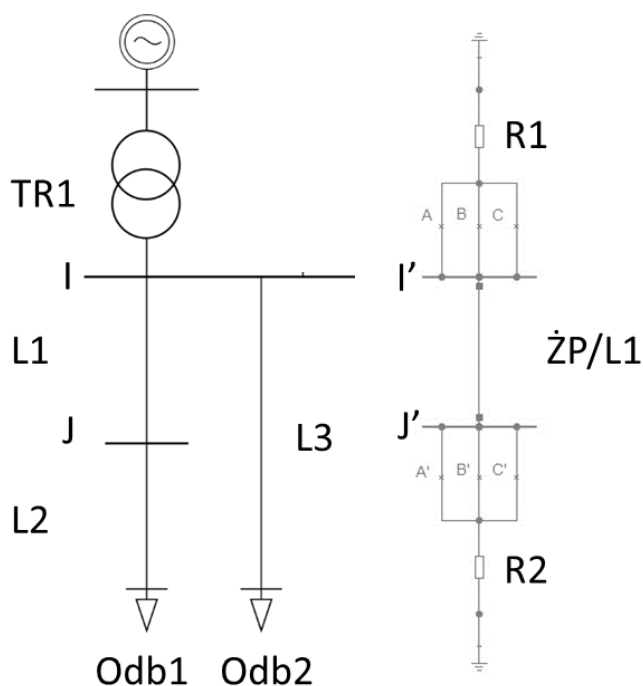
4. Analiza zjawisk przebiegowych generowanych w żyłach powrotnej kabla elektroenergetycznego SN częściowo odziemionego

4.1. Badania wstępne symulacyjne

Przeprowadzenie wstępnych symulacji komputerowych z wykorzystaniem programu komputerowego DlgSILENT Power Factory wynikało z konieczności ustalenia charakteru

i zakresu badań terenowych. Podstawowym celem symulacji wstępnych przeprowadzonych, w ujęciu chronologicznym, przed badaniami eksperymentalnymi, było określenie przedziału maksymalnych wartości przebiegów w żyłach powrotnych kabla średniego napięcia, który pozwolił na dobranie elementów układu pomiarowego oraz ustalenie niezbędnej przekładni wysokonapięciowego rezystancyjnego dzielnika napięciowego, który na potrzeby badań terenowych został specjalnie zaprojektowany i wykonany przez Autorkę.

W etapie przygotowawczym uwzględniono informacje uzyskane od Operatora na temat parametrów sieci rzeczywistej oraz założenia, które były niezbędne do przeprowadzenia symulacji. Model wykorzystany do wstępnych badań symulacyjnych przedstawiono na rysunku 5. Kolejność zdarzeń zamodelowana w procesie symulacji komputerowej została dobrana w taki sposób, aby zobrazować napięcie indukowane w żyłach powrotnych w stanie pracy normalnej, w stanie zakłóceń oraz po jego ustaniu.



Rys. 5. Model testowy fragmentu sieci średniego napięcia do analizy porównawczej przedstawiający układ do zmian konfiguracji uziemienia żyły powrotnej kabla elektroenergetycznego – symulacje wstępne

Uzyskane w wyniku symulacji wstępnych przebiegi napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego pozwoliły na określenie poziomu spodziewanych

w trakcie badań eksperymentalnych przebiegów ziemnozwarciowych. W tabeli nr 1 przedstawione zostało zestawienie wyników dla wariantów a, b oraz c przeprowadzonych symulacji. Zamieszczone w niej wartości napięcia indukowanego w żyłce powrotnej w trakcie trwania jednofazowego zwarcia doziemnego mają charakter bezwzględny i nie uwzględniają kierunku przepływu prądu. Zgodnie z zawartością tabeli, wartości bezwzględne otrzymane dla nieuziemionych w trakcie badania faz świadczą o możliwości osiągnięcia przez przebiegi ziemnozwarciowe w żyłkach powrotnych wartości powyżej 4 kV, przy założeniu, że w trakcie badań eksperymentalnych warunki będą zbliżone do warunków, jakie zostały przyjęte w programie komputerowym. Na podstawie otrzymanych wyników badań zaprojektowano układ pomiarowy wykorzystany do badań eksperymentalnych terenowych.

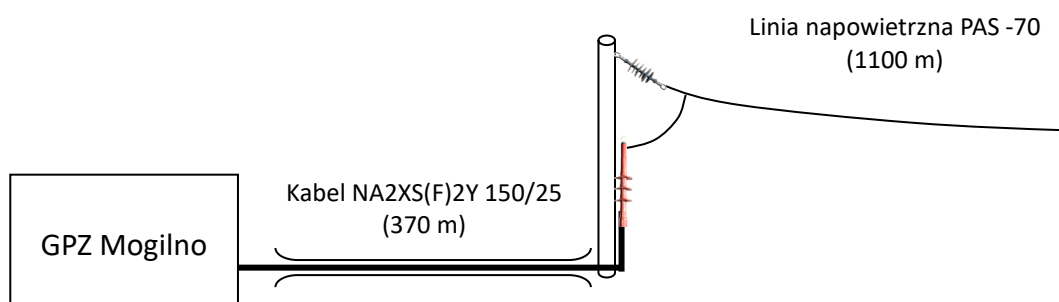
Tabela 1. Zestawienie wartości napięć wyindukowanych w żyłce powrotnej w trakcie symulacji wstępnych w miejscu przyłączenia do stacji elektroenergetycznej

Wariant konfiguracji pracy żyłki powrotnej	Wartość bezwzględna maksymalnego napięcia wyindukowane w żyłce powrotnej w trakcie przepływu prądu doziemnego przez fazę A w [V]		
	<i>faza A</i>	<i>faza B</i>	<i>faza C</i>
wariant a	3826	644	669
wariant b	4211	1775	1084
wariant c	1985		132

4.2. Badania terenowe

Przeprowadzenie badań terenowych umożliwiła współpraca Instytutu Elektroenergetyki z operatorem sieci dystrybucyjnej, firmą Enea Operator SA, która udostępniła fragment swojej sieci, w celu wykonania prób zwarciovych niezbędnych do przeprowadzenia pomiarów napięć indukowanych w żyłkach powrotnych kabla elektroenergetycznego, przy różnych wariantach pracy. Przygotowanie do badań eksperymentalnych wymagało doboru urządzeń pomiarowych, których zadaniem miał być pomiar napięcia indukowanego w żyłkach powrotnych kabla elektroenergetycznego. Przewidywane poziomy napięć wynikające z pojawiających się w układzie spodziewanych przebiegów ziemnozwarciowych wskazywały na konieczność przygotowania układu do pomiarów wysokonapięciowych.

W celu realizacji zadań badawczych przygotowane zostały dwa stanowiska pomiarowe oraz stanowisko do wykonywania prób zwarciovych, ulokowane w pobliżu słupa elektroenergetycznego sieci SN o napięciu 15 kV w miejscu połączenia linii napowietrznej z linią kablową. Słup betonowy z głowicą kablową, wybrany jako miejsce zainstalowania układu pomiarowego, stanowił miejsce połączenia przygotowanej do badań linii kablowej o długości 370 m i wykonanej z kabla typu NA2XS(F)2Y 150/25 mm², wychodzącej z szyn stacji elektroenergetycznej, oraz linii napowietrznej izolowanej typu PAS o przekroju 70 mm² i długości 1100 m, w której przeprowadzone zostały próby zwarciovie. Schemat reprezentujący badany fragment sieci został przedstawiony na rysunku 6. Wykonywanie zwarcia doziemnego w linii napowietrznej było skoordynowane ze zmianą sposobu uziemienia żył powrotnych linii kablowej przyłączonej do części napowietrznej sekcji na słupie elektroenergetycznym. W rzeczywistym układzie żyły powrotne kabla pracują z obustronnym uziemieniem.



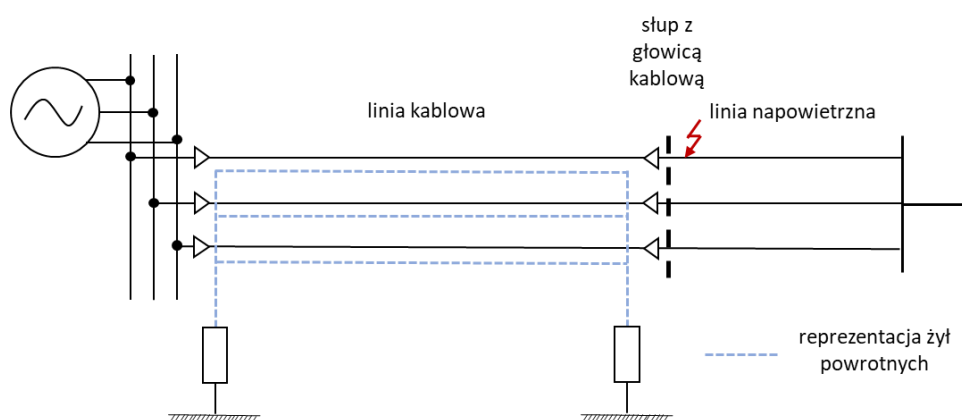
Rys. 6. Schemat reprezentujący badany fragment sieci

Aparatura pomiarowa do eksperymentalnego ustalenia poziomów przebiegów ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych kabla została umieszczona na przygotowanym na potrzeby tych badań pomoście pomiarowym, co należało uwzględnić w trakcie doboru metody badawczej. Wykorzystując analizę wstępnych symulacji komputerowych wykonanych w programie Power Factory, ustalono spodziewany poziom napięć w zakresie od 1,5 kV do 5 kV, co pozwoliło na opracowanie koncepcji układu pomiarowego. Ze względu na prostotę schematu, wielkość układu oraz szerokie możliwości pomiarowe zdecydowano o skonstruowaniu dla tych celów trójfazowego rezystancyjnego dzielnika napięciowego dostosowanego do pracy z oscyloskopem cyfrowym. W przypadku układu do pomiaru poziomu przebiegów ziemnozwarciowych istniała możliwość zapisu wartości chwilowych napięć tylko dla faz odziemionych na stanowisku pomiarowym, zainstalowanym na pomoście pomiarowym.

Wynikało to z możliwości podłączenia układu dzielnika do odziemionego końca żyły powrotnej, wykorzystując wyprowadzenia z dzielnika. Wiązało się to z niemożliwością wykonania pomiaru napięcia żył uziemionych, dlatego w przypadku uziemienia obustronnego pomiar napięcia uzyskano z rejestratora parametrów sieciowych zainstalowanego na stanowisku w stacji.

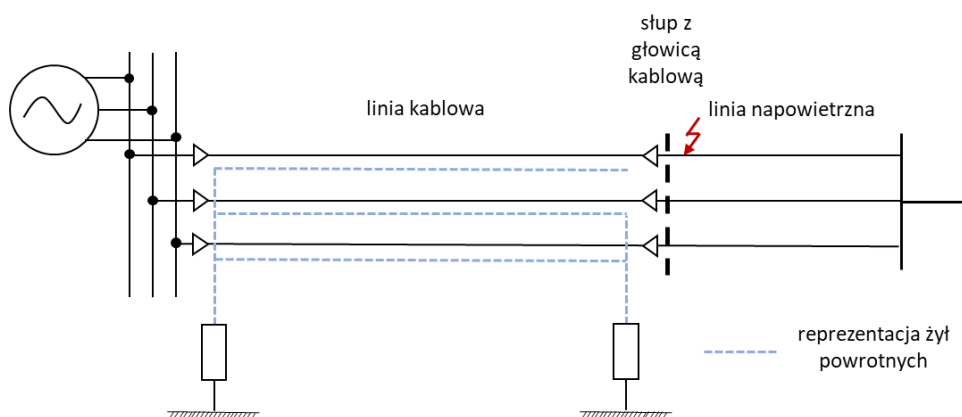
W celu ujednolicenia sposobu przedstawiania wyników otrzymanych w trakcie symulacji oraz badań terenowych, wprowadzone zostały oznaczenia, które pozwolą na identyfikację poszczególnych konfiguracji uziemienia żył powrotnych kabli elektroenergetycznych:

- wariant 0 - zwarcie doziemne, jednofazowe w fazie linii napowietrznej przy obustronnym uziemieniu żył powrotnych linii kablowej



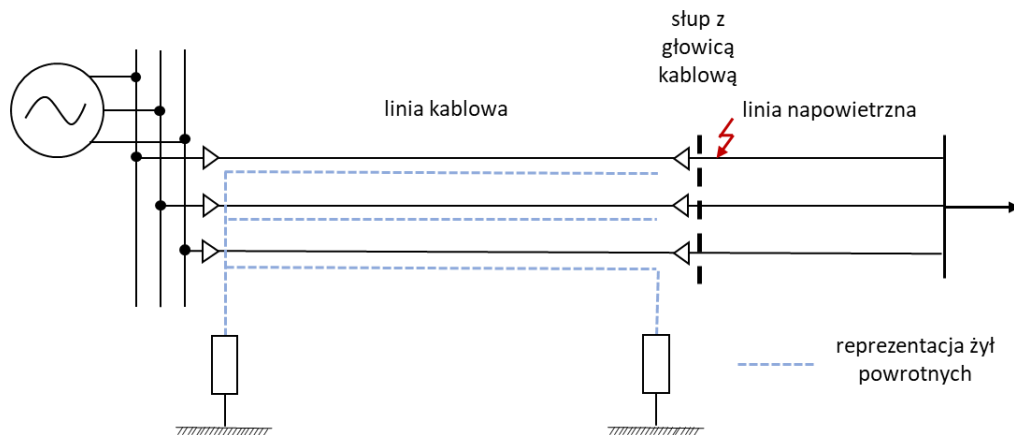
Rys. 7. Schemat poglądowy konfiguracji połączenia żył powrotnych w linii kablowej

- wariant a – zwarcie doziemne, jednofazowe w fazie linii napowietrznej przy konfiguracji uziemienia żyły powrotnej kabla z dwiema fazami uziemionymi dwustronnie i jedną jednostronnie w linii kablowej



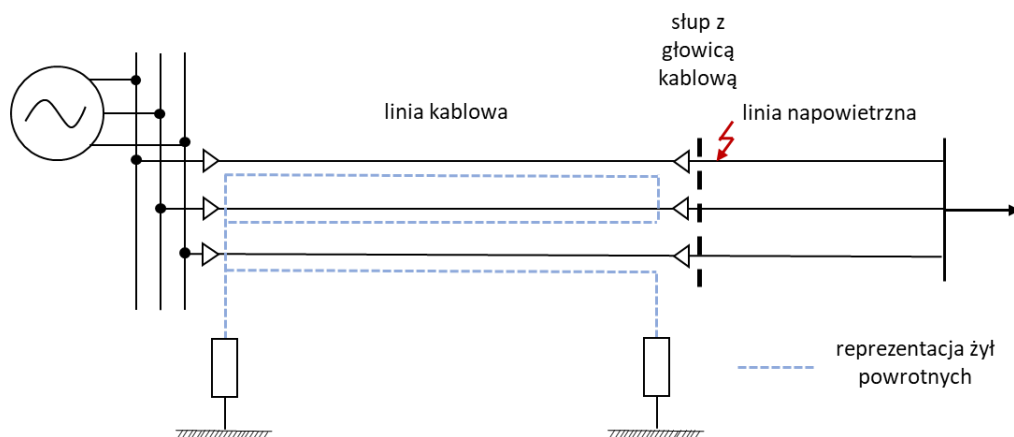
Rys. 8. Schemat poglądowy konfiguracji połączenia żył powrotnych w linii kablowej

- wariant b - zwarcie doziemne, jednofazowe w fazie linii napowietrznej przy konfiguracji uziemienia żyły powrotnej kabla z jedną fazą uziemioną dwustronnie i dwiema jednostronnie w linii kablowej



Rys. 9. Schemat poglądowy konfiguracji połączenia żył powrotnych w linii kablowej

- wariant c - zwarcie doziemne, jednofazowe w fazie linii napowietrznej przy konfiguracji uziemienia żyły powrotnej kabla z jedną fazą uziemioną dwustronnie i dwiema fazami połączonymi po stronie nieuziemionej w linii kablowej



Rys. 10. Schemat poglądowy konfiguracji połączenia żył powrotnych w linii kablowej

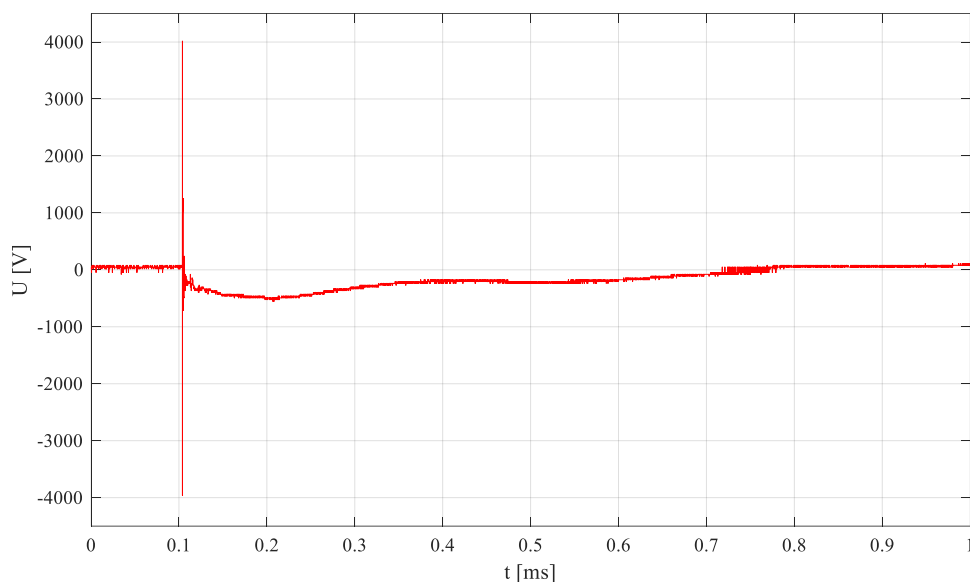
W tabeli 2 zostały zestawione otrzymane w wyniku badań eksperymentalnych maksymalne wartości napięć chwilowych wyindukowanych w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego dla wszystkich wybranych sposobów konfiguracji pracy żył powrotnych kabli elektroenergetycznych, odczytane z zarejestrowanych przebiegów. Zgodnie z przewidywaniami potwierdzonymi w trakcie przeprowadzenia badań symulacyjnych,

otrzymane wyniki dla wszystkich konfiguracji żył powrotnych mieszczą się w zakresie pomiarowym do 5 kV.

Tabela 2. Zestawienie wartości napięć wyindukowanych w żyłach powrotnych dla badań terenowych

Wariant konfiguracji pracy żyły powrotnej	Wartość bezwzględna maksymalnego napięcia wyindukowane w żyłę powrotnej w trakcie przepływu prądu doziemnego przez fazę A w [V]	
	<i>faza A</i>	<i>faza B</i>
wariant 0	47	-
wariant a	4014	-
wariant b	3957	2198
wariant c	3459	

Rysunek nr 11 reprezentuje przykładowy przebieg napięcia dla wariantu a, które zostało wyindukowane w żyłę powrotnej fazy A linii kablowej, przy zwarcie w linii napowietrznej tej samej fazy.



Rys. 11. Przebieg napięcia indukowanego w żyłę powrotnej nieuziemionej jednostronnie fazy A badanego kabla elektroenergetycznego w trakcie zwarcia doziemnego – wariant a

Wszystkie otrzymane wyniki dla tego konkretnego przypadku pokazują, że napięcie, zarówno zmierzone, jak i zasymulowane, nie przekracza bezpiecznego poziomu, które zgodnie z normami przyjmuje się na poziomie 5 kV. Wartości bezwzględnych maksymalnych napięć indukowanych w żyłach powrotnych powstałych w wyniku pojawienia się w układzie zjawiska zakłóceniewego w postaci zwarcia doziemnego w jednej z faz, otrzymane w wyniku symulacji wstępnych i badań terenowych, można zestawiać wykorzystując kryterium wielkościowe oraz skali. Zgodnie z wynikami zamieszczonymi w tabeli 3 można wnioskować, że skala i sposób zmian wielkości przepięć ziemnozwarciowych dla poszczególnych wariantów są spójne, a sposób zmian napięć między wariantami jest zachowany dla wszystkich rodzajów badań. Fundamentalną różnicą między symulacyjnymi metodami badawczymi, a wykonywaniem pomiarów w rzeczywistych układach elektroenergetycznych są uproszczenia modeli komputerowych, które pozwalają na dobranie tylko najbardziej istotnych z punktu widzenia obliczeń elektroenergetycznych parametrów. Znaczący wpływ na rozbieżność rezultatów może mieć również fakt, że wyniki badań symulacyjnych to przebiegi sinusoidalne napięć indukowanych w żyłach powrotnych w czasie pracy pod obciążeniem oraz w stanie zakłóceniewym, natomiast wyniki badań terenowych stanowią nieustalone, niesinusoidalne przebiegi w czasie pokazujące przepięcie ziemnozwarciowe pojawiające się w momencie powstania zwarcia i ustające w czasie dla układu bez obciążeniowego.

Tabela 3. Tabela porównawcza wartości maksymalnych przepięć ziemnozwarciowych dla wszystkich badanych wariantów konfiguracji uziemienia żyły powrotnej dla badań terenowych i symulacyjnych

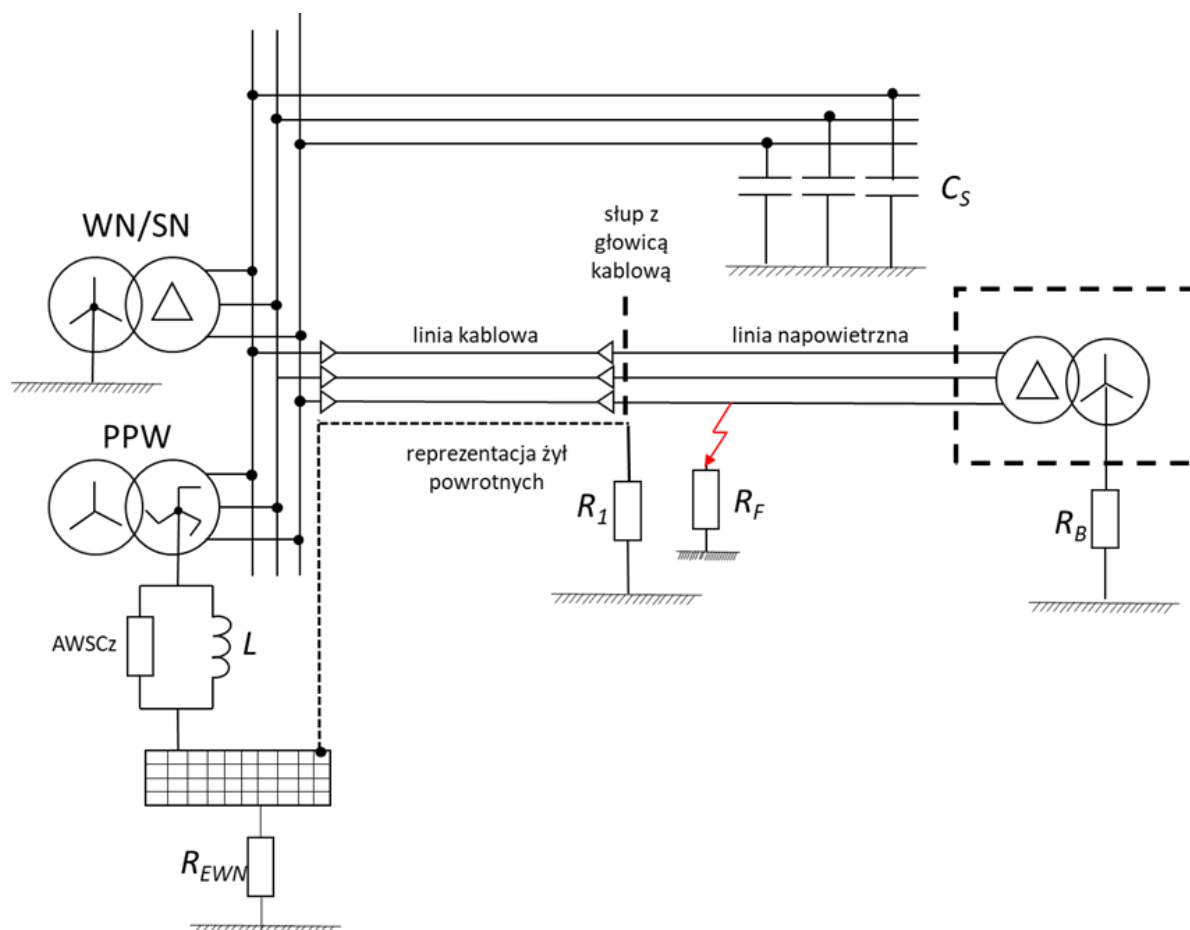
Typ badania	Napięcie [V]			
	variant a	variant b		variant c
	faza A	faza A	faza B	faza A+B
badania terenowe	4014	3957	2192	3459
symulacje wstępne	3826	4211	1775	1985

4.3. Badania symulacyjne

4.3.1. Schemat ogólny

Ocena wpływu zmian parametrów sieci na powstanie przepięć ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych kabla, przy zastosowaniu proponowanych w rozprawie wariantów konfiguracji ich pracy, opierać się będzie na badaniach symulacyjnych przeprowadzonych z wykorzystaniem narzędzia DIgSILENT Power Factory w wersji programu z roku 2022.

Na rysunku 8. przedstawiony został schemat poglądowy fragmentu sieci elektroenergetycznej, który posłużył jako punkt wyjścia do stworzenia modelu symulacyjnego. Sieć, przyjęta jako podstawowa konfiguracja układu, składa się z części zasilającej układ w stacji WN/SN z możliwością dopasowania sposobu pracy punktu neutralnego strony SN. W podstawowym wariancie sieć uziemiona jest przez dławik gaszący.



Rys. 12. Schemat poglądowy fragmentu sieci do badań przebiegów napięć ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej

Ponadto stacja wyposażona jest w dwa pola liniowe, spośród których jedno z pól, kablowo-napowietrzne, będzie stanowiło miejsce wykonywania modyfikacji. Zakres badań będzie obejmował badanie maksymalnego poziomu napięć ziemnozwarciowych powstających w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego na skutek występowania zwarcia doziemnego w pobliżu kabla. Ograniczenie elementów modelu symulacyjnego miało na celu ograniczenie możliwości wprowadzenia zmiennych, które mogłyby w niemożliwy do skontrolowania sposób wpłynąć na poziom napięć ziemnozwarciowych, a tym samym mogłyby zaburzyć ocenę wpływu wybranych jako zmienne właściwości sieci.

Kroki symulacji komputerowej zostały dobrane w sposób pozwalający zarejestrować napięcia indukowane w żyłach powrotnych w stanie pracy normalnej oraz podczas zmiany stanu na zakłóceniu wynikający ze zwarcia doziemnego. Parametry symulacji dobrane zostały zgodnie z tabelą 4. Program komputerowy zastosowany do badań symulacyjnych objętych tematem rozprawy pozwala na stworzenie zdarzeń symulacyjnych o określonych właściwościach, w trakcie których obliczane są wielkości charakterystyczne dla wszystkich elementów zawartych w zamodelowanej sieci elektroenergetycznej. W przypadku analizy przebiegów ziemnozwarciowych podstawowym celem zdarzenia jest zasymulowanie zwarcia doziemnego, którego prąd wpłynie na indukowane w żyłach powrotnych kabla napięcia, przy jednoczesnym przepływie prądu przez żyły robocze kabla elektroenergetycznego. Opis zdarzenia symulacyjnego zamieszczono w tabeli nr 4.

Tabela 4. Właściwości zdarzeń symulacyjnych w programie Power Factory

Charakterystyka symulacji	
Czas trwania symulacji	1,2 s
Czas wystąpienia zdarzenia zakłóceniewego	Po 0,5 s od rozpoczęcia symulacji
Rodzaj zdarzenia zakłóceniewego	Zwarcie doziemne jednofazowe
Miejsce zdarzenia zakłóceniewego	Linia napowietrzna L2, faza A
Odległość miejsca zdarzenia od obiektu badanego	10 m od słupa z głowicą kablową
Czas wyłączenia zdarzenia zakłóceniewego	Po 1 s od rozpoczęcia symulacji
Miejsce badania napięć indukowanych	miejsce reprezentujące słup z głowicą kablową, do którego dołączona jest badana trójfazowa linia kablowa

4.3.2. Ocena wpływu parametrów na poziom przebiegów ziemnozwarciowych

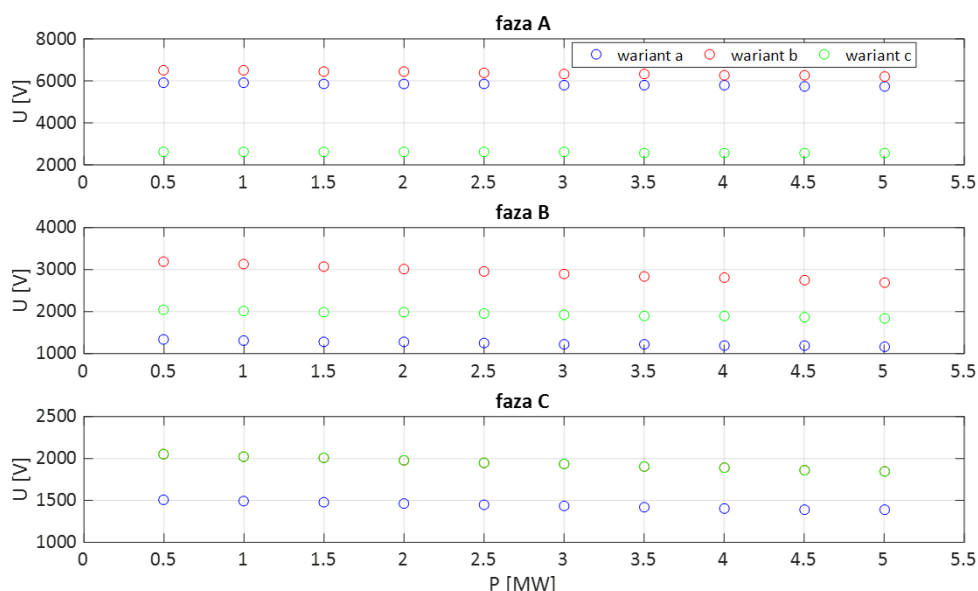
Zgodnie z wynikami badań eksperymentalnych przeprowadzonych w warunkach sieci rzeczywistej w trakcie prób zwarcowych w terenie oraz z założeniami symulacyjnymi poczynionymi na potrzeby badań z wykorzystaniem narzędzi komputerowych,

zidentyfikowano parametry sieci elektroenergetycznej, które mają wpływ na zmianę poziomu napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego w wyniku zmiany konfiguracji ich uziemienia. Symulacje komputerowe zostały przeprowadzone dla trzech wariantów pracy żył powrotnych ciągu kablowego, a ocenie podlegały bezwzględne, maksymalne wartości napięcia indukowanego w żyłach powrotnych, przy zmianie wybranych parametrów.

Zgodnie z warunkami symulacji ustalonymi we wcześniejszych akapitach zmianie będą podlegać takie parametry jak: obciążenie kabla prądem roboczym, sposób ułożenia trójfazowej linii kablowej, sposób pracy punktu neutralnego sieci SN, pole przekroju poprzecznego żył roboczych i powrotnych, długość linii kablowej oraz rezystancja przejścia w miejscu zwarcia. Najważniejsze rezultaty dla poszczególnych zakresów zmiennych przedstawione zostały w postaci przykładowych wykresów i przebiegów oraz tabel z wynikami maksymalnych napięć ziemnozwarciowych.

OBCIĄŻENIE KABLA PRĄDEM ROBOCZYM

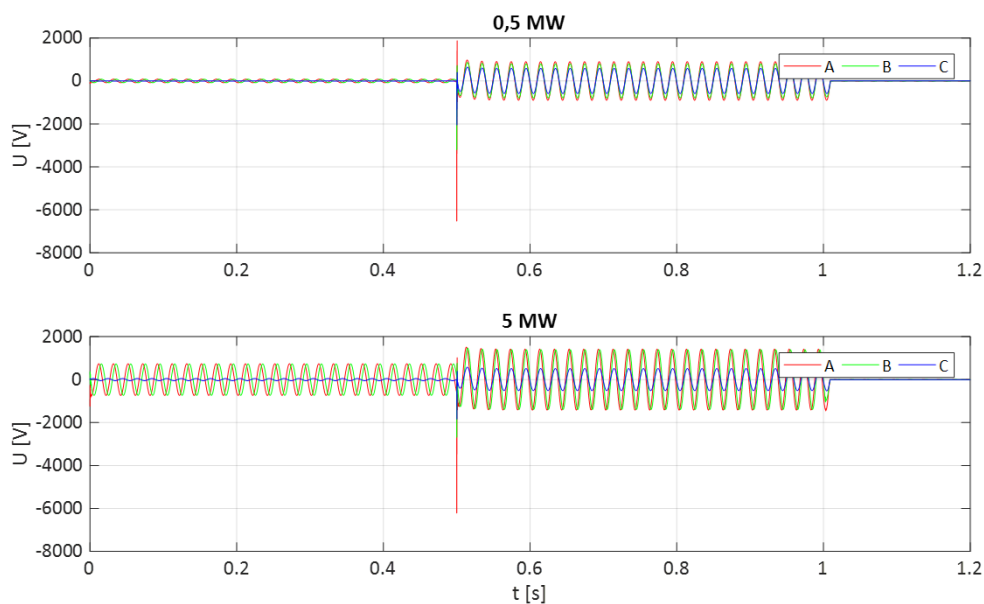
Graficzna reprezentacja wyników wskazuje na znaczącą relację między prądami obciążenia w żyłach roboczych linii kablowej, a napięciami indukowanymi w żyłach powrotnych w trakcie powstawania zwarcia.



Rys. 13. Wpływ zmiany prądu roboczego linii kablowej na napięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej

Zgodnie z wykresem zmian można zauważyć, że wraz ze wzrostem obciążenia, napięcia są tłumione i przy bardzo dużych obciążeniach linii kablowej, napięcia są mniejsze niż przy

małych obciążeniach, chociaż zgodnie z przebiegami napięć w czasie, napięcia indukowane w żyłach powrotnych w stanie zwarcia wzrastają wraz z mocą odbioru. W celu zobrazowania tego zjawiska przedstawiono przykładowe porównanie przebiegów napięć indukowanych w żyłach powrotnych wszystkich faz linii kablowej, które zamieszczono na rysunku 14. Dla wariantu b i obciążenia 0,5 MW oraz 5 MW przedstawiono zmienność napięcia w czasie w miejscu przyłączenia linii kablowej do słupa linii napowietrznej.



Rys. 14. Przykładowe przebiegi napięć indukowanych w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej przy mocy odbioru a. $P_{Odb1} = 0,5$ MW oraz b. $P_{Odb1} = 5$ MW dla wariantu b

SPOSÓB UŁOŻENIA TRÓJFAZOWEJ LINII KABLOWEJ

Do układania w ziemi trójfazowych linii kablowych wykorzystuje się głównie dwie metody rozmieszczania kabli jednożyłowych – układ trójkąta i układ płaski. W układzie trójkąta kable jednożyłowe stykają się na całej długości, a zatem odległości między osiami poszczególnych kabli są takie same we wszystkich punktach ciągu kablowego i równe średnicy zewnętrznej tych kabli. W przypadku układu płaskiego odległości między środkami kabli są różne i zależne od standardu, w którym została ułożona linia kablowa. Sposób ułożenia jednożyłowych kabli ma znaczący wpływ na indukowanie się prądów i napięć w metalowych żyłach powrotnych tych kabli.

Dobre metody ułożenia i odległości między jednożyłowymi kablami dobrane zostały na podstawie danych literaturowych oraz standardów i norm krajowych. Założono, że przewody

zostały ułożone w rowach, na głębokości 0,8 m. W ramach badań symulacyjnych przeprowadzone zostały analizy zdarzeń zwarciovych, zgodne z założeniami poczynionymi na wstępie.

Tabela 5. Bezwzględne maksymalne wartości przebiegów ziemnozwarciowych otrzymane w żyłach powrotnych faz A, B oraz C dla różnych sposobów ułożenia trójfazowej linii kablowej

Układ kabli	Wariant	$U_f [V]$		
		A	B	C
trójkąt	a	5857	1268	1468
	b	6417	3019	1977
	c	2621		1976
płaski 36 mm	a	5861	1256	1475
	b	6418	3009	1977
	c	2622		1977
płaski 70 mm	a	5861	1254	1473
	b	6418	3007	1975
	c	2622		1975
płaski 100 mm	a	5863	1253	1472
	b	6419	3006	1972
	c	2622		1972

SPOSÓB PRACY PUNKTU NEUTRALNEGO SIECI SN

Celem wykorzystania nieskutecznie uziemionego punktu neutralnego w sieciach średniego napięcia jest uzyskanie małych wartości prądów zwarcia doziemnego jednofazowego, które dzięki temu rozwiązaniu są wielokrotnie mniejsze niż prądy zwarcia międzyfazowego. Z punktu widzenia napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych wartość prądu przepływającego przez żyły robocze, a tym samym również prądy zwarciovowe, mają istotny wpływ na ich poziom. W ramach symulacji komputerowej zamodelowano pięć różnych wersji sieci: o punktach neutralnych izolowanym,

uziemionym przez rezystor o dwóch prądach znamionowych 300 A i 500 A, skompensowanym (bez i z AWSCz) o prądzie dławika uziemiającego równym 60 A i prądzie automatyki wymuszania składowej czynnej równym 30 A. Analizując wyniki symulacji można zauważyć, że wielkość napięcia indukowanego w żyłach powrotnych w trakcie trwania zwarcia zmienia się odpowiednio do wielkości prądów zwarciovych spodziewanych dla poszczególnych urządzeń pracujących w punkcie neutralnym pola potrzeb własnych. Co jednak warto podkreślić, sposób uziemienia punktu neutralnego nie jest związany z maksymalnym przepięciem ziemnozwarciowym otrzymanym w wyniku symulacji dla wszystkich wariantów w przypadku zwarcia w fazie A, którego wyniki przedstawiono w tabeli zbiorczej nr 6.

Tabela 6. Bezwzględne maksymalne wartości przepięć ziemnozwarciowych wygenerowane dla wybranych sposobów uziemienia punktu neutralnego sieci SN

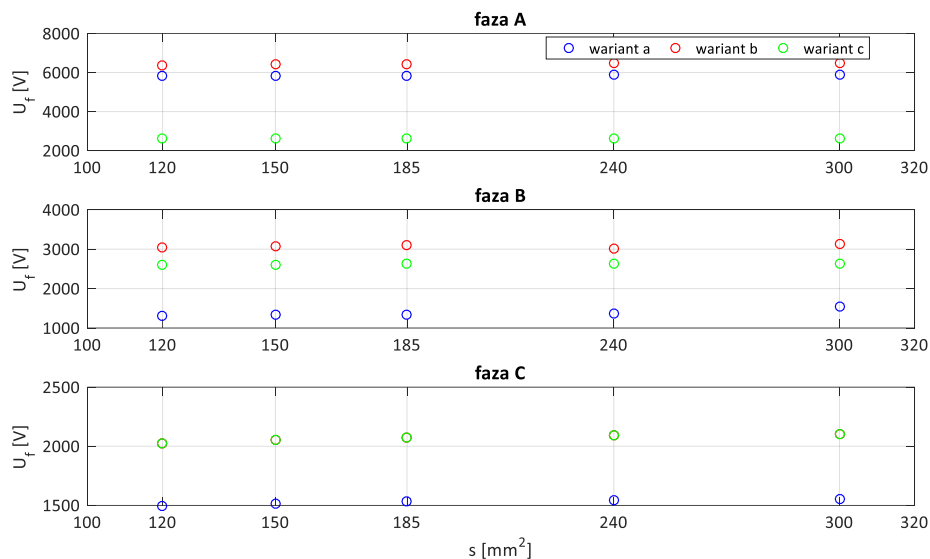
Sposób uziemienia punktu neutralnego	Wariant	$U_f [V]$		
		A	B	C
izolowany	a	5857	1267	1467
	b	6417	3021	1975
	c	2621		1975
skompensowany	a	5857	1268	1468
	b	6417	3021	1977
	c	2621		1977
skompensowany +AWSCz	a	5857	1268	1468
	b	6417	3021	1977
	c	2621		1977
rezystor 300 A	a	5857	1328	1524
	b	6417	3021	2053
	c	2621		2053
rezystor 500 A	a	5857	1419	1528
	b	6417	3170	2338
	c	2621		2338

POLE PRZEKROJU POPRZECZNEGO ŻYŁY ROBOCZEJ

Rezystancja żył roboczych zmniejsza się odwrotnie proporcjonalnie do ich pola przekroju poprzecznego, a zatem czym większe pole przekroju poprzecznego kabla tym mniejszych strat można się spodziewać. W przypadku przepięć ziemnozwarciowych istotny wpływ będzie miało również geometryczne rozmieszczenie żył w układzie. W celu przeprowadzenia symulacji przy zmiennym polu przekroju żyły roboczej zdecydowano się na pogrupowanie ich ze względu na pole przekroju żył powrotnych.

Pole przekrojów poprzecznych powłok metalowych i pozostałe parametry kabli wybrane do badań zostały zaczerpnięte z kart katalogowych kabli średniego napięcia o izolacji polietylenowej dwóch firm: NKT oraz Telefoniki. Dla kabli firmy NKT zdecydowano się na symulacje napięć w żyłach powrotnych o polach przekroju 16, 25 oraz 50 mm². W związku z okrojonym typoszeregiem przekrojów dla firmy Telefonika do analiz wykorzystano tylko produkowane przez nich w szerokim zakresie kable o przekroju poprzecznym żyły powrotnej równym 50 mm².

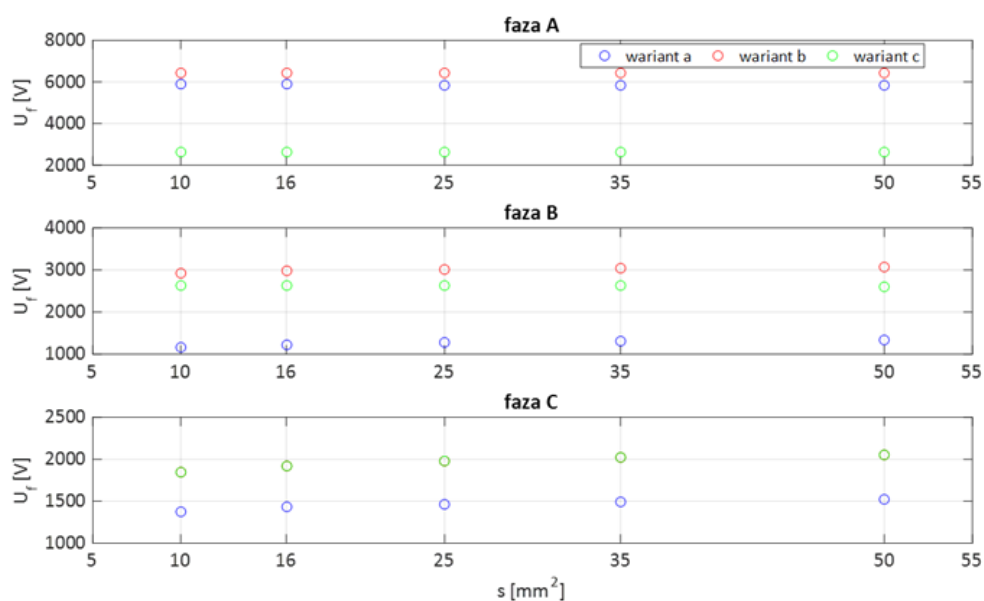
Jako reprezentację wyników zaprezentowano wykres zależności przepięcia od pola przekroju poprzecznego żyły roboczej dla przykładowego układu z kablem elektroenergetycznym o stałym polu przekroju poprzecznego żyły powrotnej równym 50 mm².



Rys. 15. Wpływ zmiany pola przekroju żyły roboczej linii kablowej przy stałym polu przekroju żyły powrotnej równym 50 mm² na przepięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej (firma NKT)

POLE PRZĘKROJU POPRZECZNEGO ŻYŁY POWROTNEJ

Zmiany prądów i napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego zależą również od ich pola przekroju poprzecznego. Zgodnie z wartościami katalogowymi, rezystancja żył powrotnych o większych polach przekroju będzie mniejsza w porównaniu do żył o mniejszych polach przekroju. Badania symulacyjne przeprowadzono dla dwóch pól przekroju poprzecznego żyły roboczej równych 120 i 150 mm², współpracujących z żyłami powrotnymi o polu przekroju poprzecznym równym: 10, 16, 25, 35 oraz 50 mm². Na rysunku 16 zaprezentowano graficzne ujęcie wartości przebiegów w układzie z kablami o polu przekroju poprzecznego żyły roboczej równym 150 mm². Uzyskane wyniki wskazują na nieznaczny spadek wartości maksymalnego napięcia ziemnozwarciowego w żyłach powrotnych fazy A, oraz wzrost w przypadku pozostałych faz, bez względu na sposób uziemienia żył powrotnych linii kablowych.

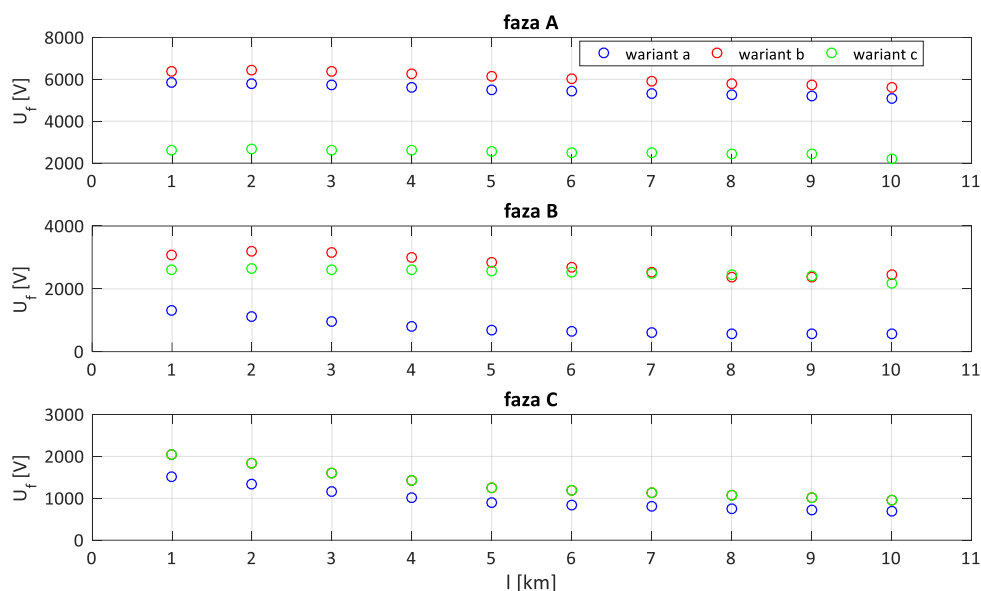


Rys. 16. Wpływ zmiany pola przekroju żyły powrotnej linii kablowej przy stałym polu przekroju żyły roboczej równym 150 mm² na napięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej

DŁUGOŚĆ LINII KABLOWEJ

Długość linii dystrybucyjnej jest ważną wielkością z punktu widzenia parametrów ich schematów zastępczych, a zatem wielkości charakterystycznych, takich jak: prądy i napięcia w fazach. Zakres wybranych długości kabla od 1 km do 10 km jest zakresem skrajnym

i zakładającym, że kabel stworzony jest z jednego, spójnego odcinka. Wyznaczenie wpływu zmian długości kabla na poziom napięć indukowanych w powłoce metalowej z wykorzystaniem symulacji komputerowej zostało przeprowadzone dla trzech przekrojów poprzecznych żył kabla – 120/25 oraz 150/25 oraz 150/50. Graficzna reprezentacja wyników dla przekroju poprzecznego kabla 150/50 zamieszczona została na rysunku 17. Otrzymane wyniki wskazują na zachowanie pewnej powtarzalności względem wpływu długości kabla na napięcie indukowane w żyłach powrotnych, która związana jest z tłumieniem rezystancyjnym przepięcia we wszystkich trzech fazach, dla wariantów a oraz c, oraz tłumieniem przepięcia w żyłach powrotnych faz A i C. Dla wariantu b, żyła powrotna pozostaje jednostronnie połączona z uziemieniem, a zatem w fazie B zmienia się rozptyw prądów wpływający na indukowanie się napięcia w obwodzie powrotnym tej fazy.

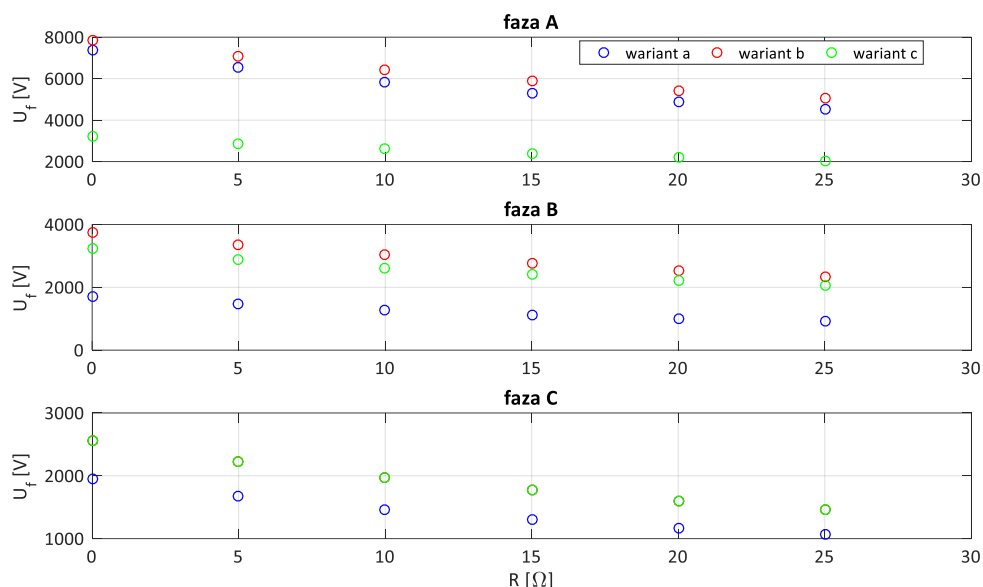


Rys. 17. Wpływ zmiany długości linii kablowej na przepięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych dla kabla NA2XS(F)2Y o przekroju 150/50

REZYSTANCJA PRZEJŚCIA W MIEJSCU ZWARCIA

Ostatnią kategorią prowadzonych badań jest ocena wpływu wielkości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia doziemnego na poziom przepięć ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych. Zgodnie z literaturą, rezystancja przejścia jest parametrem wykorzystywanym do obliczenia poziomu parametrów ziemnozwarciowych i wzrost jej wartości będzie miał wpływ na zmniejszenie się prądów zwarciovych. Zakres tej części badań obejmował zmianę rezystancji

przejścia w zakresie od $0\ \Omega$ do $25\ \Omega$, czyli przedział zwarć niskooporowych. Symulacje wykonano dla wszystkich trzech wariantów, przy podstawowych parametrach modelu sieci, a wyniki przedstawiono na rysunku 18 w postaci wykresu zmienności napięć indukowanych w żyłach powrotnych trzech faz linii kablowej w zależności od rezystancji przejścia.

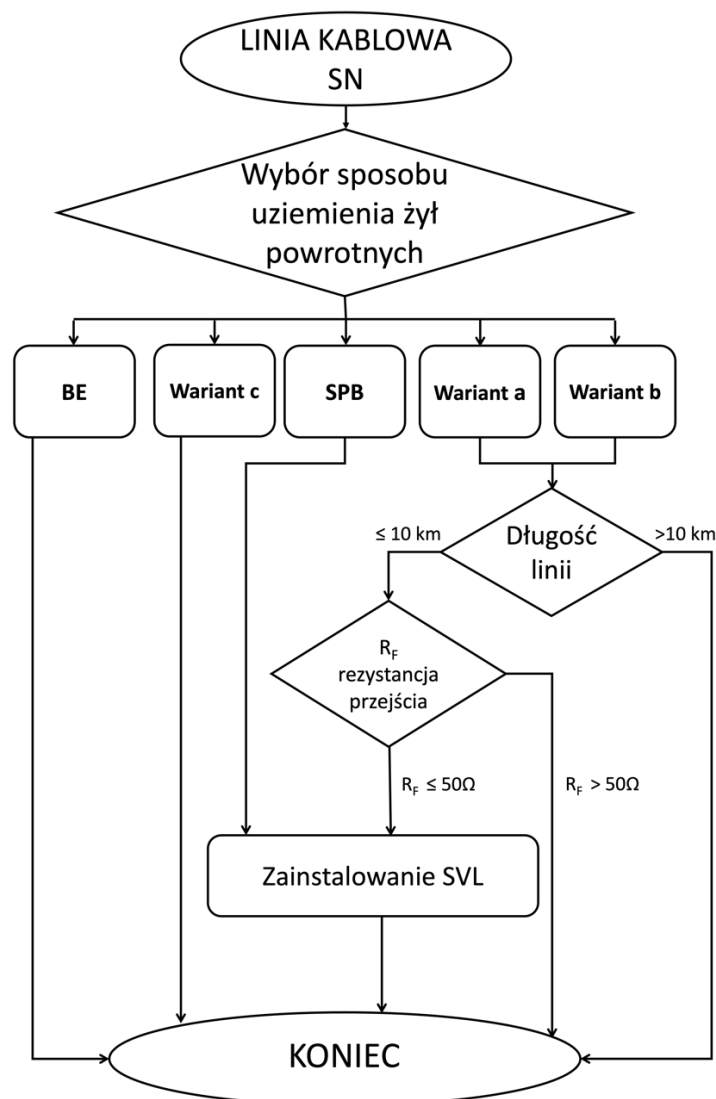


Rys. 18. Wpływ zmiany wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia na przepięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej.

Analiza otrzymanych wyników pozwala zauważyć znaczący wpływ rezystancji przejścia na przepięcie ziemnozwarciowe, w wyniku którego dla zwarć metalicznych wartości przepięć są największe, natomiast wraz ze wzrostem rezystancji przejścia napięcie indukowane w żyłę powrotnej w wyniku pojawienia się zwarcia maleje, z podobną tendencją dla każdego z rozpatrywanych wariantów i dla wszystkich żył powrotnych. Jak można zauważyć, różnice między przepięciami ziemnozwarciowymi dla tej zmiennej są najbardziej znaczące spośród wszystkich dotychczas rozpatrywanych zależności. Poziom przepięcie ziemnozwarciowych przy rezystancji przejścia $R_F = 0\ \Omega$ to prawie 8 kV dla wariantu b, co wskazuje na znaczne przekroczenie bezpiecznego dla powłoki zewnętrznej kabla poziomu napięcia pracy. Wzrost rezystancji przejścia w miejscu zwarcia wpływa na zmniejszenie się maksymalnej wartości napięcia wyindukowanego w żyłę powrotnej w wyniku wystąpienia tego zwarcia w pobliżu linii kablowej.

5. Wytyczne ochrony linii kablowej SN przed skutkami wystąpienia przepięć w żyłach powrotnej

Dla oceny wariantów uziemienia żył powrotnych trójfazowej linii kablowej zaprezentowanych w rozprawie wytypowano spośród badań te zmienne, dla których różnice przepięć między skrajnymi wartościami zaimplementowanymi w modelu są istotnie większe. Zwiększenie się długości linii kablowej oraz wzrost wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia skutkują zmniejszeniem się przepięć w żyłach roboczych. W obu tych przypadkach wraz ze wzrostem tych wartości, wzrasta również rezystancja zwarcia układu. Oznacza to, że dodatkowa rezystancja w układzie stanowi najpewniejszy sposób tłumienia przepięć ziemnozwarciowych.



Rys. 19. Uproszczony algorytm blokowy wyboru układu uziemienia żył powrotnych

Oznacza to również, że w celu zminimalizowania przepięć ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych istotne jest, aby przepięcia ziemnozwarciowe w żyłach roboczych powodujące indukowanie się napięcia w tych pierwszych były jak najniższe. W sytuacji, gdy w układzie nie da się ograniczyć poziomu przepięć ziemnozwarciowych związanych z możliwym zagrożeniem zwarciovym należy rozważyć wybór konfiguracji uziemienia żył powrotnych, który nie ograniczy strat energii, ale zabezpieczy żyły powrotne przed przepięciami, czyli uziemienie obustronne. Wybór wariantów proponowanych w rozprawie lub układu z jednostronnym uziemieniem żył powrotnych może wymagać zainstalowania ograniczników przepięć w powłokach metalowych kabla SVL, zgodnie z algorytmem z rysunku 19.

6. Wnioski

Podstawą podjęcia tematu rozprawy była próba odpowiedzi na wyzwania zminimalizowania strat dystrybucji energii elektrycznej w kablach elektroenergetycznych średniego napięcia związanych z indukowaniem się prądów przepływu w żyłach powrotnych tych kabli. Jednym z rozwiązań tego problemu są zaproponowane we wstępie do pracy warianty z różnymi konfiguracjami uziemienia żył powrotnych trójfazowych linii kablowych. Zaletami rozwiązań obejmujących dwustronne i jednostronne uziemienie żył powrotnych, poza zmniejszeniem strat energii, są również niewielkie nakłady związane z wprowadzeniem tych koncepcji do istniejących już sieci elektroenergetycznych. W podstawowej wersji zaproponowane warianty nie wymagają zmian w układach funkcjonalnych, poza odziemieniem jednej lub dwóch żył powrotnych trójfazowej linii i mogą być zastosowane w dowolnym istniejącym układzie, bez konieczności zmiany elementów systemu. Najważniejszym wyznacznikiem takiego postępowania było określenie czy przepięcia mogące pojawić się na nieziemionych żyłach powrotnych nie będą stanowiły zagrożenia przepięciowego dla izolacji zewnętrznej kabla.

Głównym osiągnięciem pracy było określenie poziomów przepięć na jakie narażona będzie powłoka zewnętrzna kabla elektroenergetycznego w następstwie zmiany sposobu uziemienia żyły powrotnej otrzymane zarówno w wyniku przeprowadzenia badań terenowych, jak i symulacyjnych. Otrzymane na ich podstawie wartości maksymalne przepięć ziemnozwarciowych indukowanych w żyłach powrotnych jako efekt pojawienia się zwarcia w ciągu kablowo-napowietrznym, wskazują na konfiguracje pracy sieci, w których wykorzystanie zaproponowanych w rozprawie wariantów będzie możliwe, przy zapewnieniu

izolacji zewnętrznej kabla bezpiecznych warunków pracy, przy jednoczesnym nieingerowaniu w układ sieci, a także nie dołączaniu dodatkowych urządzeń.

Dorobek naukowy

Publikacje związane z tematem rozprawy

1. **Schött-Szymczak A.**, Zjawiska przepięciowe w elektroenergetycznych kablach SN ze szczególnym uwzględnieniem sposobu pracy ich żyły powrotnej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2022, R. 98, nr 10, s. 124-127
2. **Schött-Szymczak A.**, Krzysztof Walczak K., Impact of Cable Configuration on the Voltage Induced in Cable Screen during Work with One-Sidedly Ungrounded Cable Screen, *Energies*, 2021, vol. 14, no. 14, s. 4263-1-4263-14
3. **Schött-Szymczak A.**, Krzysztof Walczak K., Analysis of Overvoltages Appearing in One-Sidedly Ungrounded MV Power Cable Screen, *Energies*, 2020, vol. 13, no. 7, s. 1821-1-1821-14
4. **Schött A.**, Algorytmy doboru uziemienia w liniach napowietrznych powyżej 1 kV, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, 2018, Issue 94, s. 41-50
5. **Schött A.**, Dodatkowa ochrona od porażeń przy słupach linii o napięciu powyżej 1 kV, *Przegląd Naukowo-Metodyczny. Edukacja dla Bezpieczeństwa*, 2018, 1(38), s. 1102-1113
6. Lorenc J., **Schött A.**, Staszak B., Wspomaganie układów pomiarowych parametrów doziemnych sieci SN, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, 2017, Issue 90, s. 33-43

Pozostałe publikacje:

1. **Schött-Szymczak A.**, Krzysztof Walczak K., Use of Capacitive Probes to Detect Asymmetry and Earth Fault in a Medium-Voltage Power Network, *Energies*, 2025, vol. 18, no. 9, 2254
2. Handke J., Olejnik B., **Schött A.**, Algorytmy samoczynnego częstotliwościowego odciążania w świetle obowiązujących rozporządzeń Komisji Europejskiej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2019, R. 95, nr 2, s. 7-10
3. Lorenc J., Olejnik B., **Schött A.**, Overcurrent protection in MV grid with local energy sources, *E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 64, s. 08005-1-08005-5
4. Lorenc J., Olejnik B., **Schött A.**, Urbański P., Zięba B., Reklozer ziemnozwarciowy dla sieci SN, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2018, nr 6, s. 34-39
5. **Schött A.**, Transformatory wielkiej mocy pracujące w trybie quasi-dławika rozruchowego w liniach 220 kV, *Przegląd Elektrotechniczny* - 2018, R. 94, nr 10, s. 130-133
6. Hoppel W., Olejnik B., **Schött A.**, Czy słup betonowy jest słupem z materiału izolacyjnego, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2015, nr 3, s. 14-19

Udział w badaniach prowadzonych w ramach projektów badawczych na PP:

1. **Schött-Szymczak A.**, Walczak K., Badanie wpływu sposobu uziemienia żył powrotnych kabli elektroenergetycznych na zagrożenie porażeniowe w stacjach elektroenergetycznych, R1744_2021
2. **Schött-Szymczak A.**, Walczak K., Ograniczenie strat przesyłowych w żyłach powrotnych kabli średniego napięcia bez narażania izolacji powłoki na uszkodzenia elektryczne, R1550_2021
3. **Schött-Szymczak A.**, Obliczanie impedancji składowej zgodnej oraz impedancji składowej zerowej dla 12 linii napowietrznych o napięciu 110 kV, na podstawie których obliczone zostaną nastawy zabezpieczeń linii 110 kV. R1396_2020
4. **Schött-Szymczak A.**, Walczak K., Ograniczenie strat przesyłowych w żyłach powrotnych kabli średniego napięcia bez narażania izolacji powłoki na uszkodzenia elektryczne, R703_2020
5. Andruszkiewicz J., Staszak B., Olejnik B., **Schött A.**, Wiśniewski A., Dobór rezystorów w punkcie zerowym sieci SN, wyznaczenie nastaw zabezpieczeń oraz wytyczne działań w różnych stanach pracy dla sieci zasilanych z GPZ Krauthofera i GPZ Wawrzyńca, R559688_2019

6. Andruszkiewicz J., Staszak B., Olejnik B., **Schött A.**, Wiśniewski A., Wyznaczenie nastaw zabezpieczeń przy reklozerach i wskaźników przepływu prądu zwarciovego w RD Wolsztyn wraz z wyznaczeniem pojemnościowego prądu zwarciovego sieci SN w GPZ Sława, R559638_2019
7. Andruszkiewicz J., Bąk D., Kwapisz A., Lorenc J., Łowczowski K., Staszak B., Olejnik B., **Schött A.**, Szymańska Z., Walczak K., Weychan A., Wiśniewski A., Możliwości nowoczesnych rozwiązań automatyki zabezpieczeniowej i sterowania w zakresie poprawy ciągłości zasilania , R559354_2019
8. Andruszkiewicz J., Handke J., Lorenc J., Staszak B., Olejnik B., **Schött A.**, Wiśniewski A., Analiza sposobu pracy punktu neutralnego w sieci SN zasilanej z GPZ Żelechowo, R521527_2017
9. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Staszak B., **Schött A.**, Wiśniewski A., Analiza przebiegu awarii w GPZ Cytadela w dniu 18.10.2016 r. Etap II. Opracowanie zaleceń i nowych rozwiązań w zakresie poprawy skuteczności urządzeń EAZ w GPZ Cytadela, R507312_2017