

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI

INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI



ROZPRAWA DOKTORSKA

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

Podziękowania

Składam serdeczne podziękowania Panu Promotorowi dr. hab. inż. Krzysztofowi Walczakowi, prof. PP za poświęcony czas i pomoc w procesie pisania rozprawy doktorskiej.

Dziękuję za okazane wsparcie mojej Rodzinie i Przyjaciołom, w szczególności mojemu mężowi Cyprianowi, za wspieranie mnie w trudnych momentach i wszystkie cenne wskazówki.

SPIS TREŚCI

1.	Wprowadzenie	9
2.	Kable elektroenergetyczne średniego napięcia	18
2.1.	Konstrukcje kabli SN	18
2.2.	Parametry jednostkowe linii kablowej	25
2.3.	Sposób pracy linii kablowej ze szczególnym uwzględnieniem sposobu połączenia żyły powrotnej	34
2.4.	Sposoby ograniczenia strat w żyłce powrotnej linii kablowej SN	43
2.5.	Zjawiska przepięciowe w linii kablowej SN	51
2.6.	Ochrona linii kablowych średniego napięcia przed zagrożeniem przepięciowym	57
3.	Cel, tezy i zakres rozprawy	61
4.	Analiza zjawisk przepięciowych generowanych w żyłce powrotnej kabla elektroenergetycznego SN częściowo nieuziemionego	64
4.1.	Metodyka badań	64
4.2.	Modelowanie kabli	66
4.3.	Model sieci elektroenergetycznej w programie Power Factory	70
4.4.	Wstępne analizy testowe zjawisk przepięciowych zachodzących w żyłce powrotnej kabla jako następstwa zwarcia doziemnego – symulacje komputerowe w programie Power Factory	76
4.5.	Weryfikacja modelu podczas badań terenowych	81
4.5.1.	Wprowadzenie	81
4.5.2.	Opis eksperymentu i aparatury pomiarowej	82
4.5.3.	Wyniki badań terenowych	90
4.5.4.	Porównanie otrzymanych wyników podczas badań terenowych ze wstępnymi symulacjami komputerowymi	96
4.6.	Uzupełniające analizy zjawisk przepięciowych – symulacje komputerowe w programie Power Factory	99
4.7.	Podsumowanie	108
5.	Analiza zjawisk przepięciowych generowanych w żyłce powrotnej w zależności od konfiguracji i parametrów linii elektroenergetycznej	111
5.1.	Zakres analizy i zmienności poszczególnych parametrów modelowanego fragmentu sieci elektroenergetycznej	111
5.2.	Schemat ogólny modelu sieci elektroenergetycznej SN	118
5.3.	Ocena wpływu zmiany parametrów na poziom napięć ziemnozwarciowych	124
5.3.1.	Wprowadzenie	124
5.3.2.	Ocena obciążenia kabla prądem roboczym	125

5.3.3.	Ocena wpływu ułożenia linii kablowej	128
5.3.4.	Ocena wpływu sposobu pracy punktu neutralnego sieci średniego napięcia	133
5.3.5.	Ocena wpływu pola przekroju poprzecznego żyły roboczej kabla elektroenergetycznego.....	137
5.3.6.	Ocena wpływu pola przekroju poprzecznego żyły powrotnej kabla elektroenergetycznego.....	142
5.3.7.	Ocena wpływu długości kabla elektroenergetycznego	145
5.3.8.	Ocena wpływu rezystancji przejścia w miejscu zwarcia	149
5.4.	Ocena wpływu rodzaju zakłócenia ziemnozwarciowego na poziom przepięć w żyłach powrotnej	151
5.5.	Ocena zagrożenia porażeniowego wynikającego z częściowego odziemienia żyły powrotnej kabla elektroenergetycznego SN i sposoby jego minimalizacji	160
5.6.	Podsumowanie	167
6.	Wytyczne dotyczące ochrony linii kablowej SN przed skutkami wystąpienia przepięć w żyłach powrotnej	170
7.	Wnioski i rekomendacje	175
8.	Literatura	179

STRESZCZENIE

Przesył i dystrybucja energii elektrycznej z wykorzystaniem linii kablowych stanowi alternatywę dla szeroko rozpowszechnionych linii napowietrznych. Zaletą zastosowania kabli elektroenergetycznych jest zwiększenie ciągłości zasilania dzięki odizolowaniu faz od warunków zewnętrznych. Rozwiązanie to wiąże się z wyzwaniami, które przedstawione zostały we wstępie niniejszej rozprawy. Wykorzystanie kabli elektroenergetycznych wymaga zastosowania metod pozwalających na zminimalizowanie strat energii elektrycznej w takich liniach kablowych poprzez ograniczenie przepływu prądu indukowanego w ich żyłach powrotnych. W pierwszej części pracy omówiona została budowa i funkcje poszczególnych elementów składowych kabla, a także zjawiska fizyczne jakie mają miejsce w powłokach kabla, w tym również w żyłce powrotnej. Na podstawie analizy literatury przedmiotu zaproponowane zostały trzy warianty konfiguracji uziemienia żył powrotnych kabla elektroenergetycznego pozwalające na ograniczenie strat przesyłowych wynikających z przepływu prądu przez żyły powrotne poprzez jednostronne nieuziemienie jednej bądź dwóch żył powrotnych linii kablowych. Indukowanie się w nieuziemionych żyłach powrotnych napięć wpłynęło na wybór metod badawczych, które bazowały na określeniu wpływu wystąpienia w sieci zakłóceń ziemnozwarciowych wynikających z jednofazowego zwarcia doziemnego na przepięcia indukowane w żyłach powrotnych o zaproponowanych sposobach uziemienia. Przeprowadzone analizy miały formę badań eksperymentalnych oraz badań symulacyjnych. Wyniki badań eksperymentalnych przedstawione w rozprawie bazują na testach terenowych przeprowadzonych w rzeczywistej sieci. Wykorzystanie badań symulacyjnych służyło do oceny wpływu parametrów linii kablowej, parametrów sieci elektroenergetycznej oraz rodzaju zakłócenia na poziom przepięć ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych pracujących w proponowanych wariantach konfiguracji uziemienia. W pracy przeprowadzono analizę wpływu zmiany sposobu uziemienia żył powrotnych linii kablowej SN na możliwe zagrożenie porażeniowe w miejscu odziemienia żył powrotnych kabla związane z ograniczeniem redukcyjnego wpływu tych powłok. W rezultacie przedstawiono propozycje doboru środków ochrony przed przepięciami dla powłoki zewnętrznej kabla elektroenergetycznego przy pojawieniu się zagrożenia przepięciowego w żyłach powrotnych.

ABSTRACT

Transmission and distribution of electricity using cable lines is an alternative to the widespread overhead lines. The advantage of using power cables is their limited increase in power supply continuity due to the isolation of phases from external conditions. This solution is associated with challenges that were presented in the introduction to this dissertation. The use of power cables with a metal sheath requires the use of methods that allow for minimizing electrical energy losses in such cable lines by limiting the flow of current induced in their sheaths. The first part of the dissertation discusses the structure and function of individual cable components, as well as physical phenomena that take place in cable sheaths, including the cable screen. Based on the analysis of the literature on the subject, three variants of the grounding configuration of the screens of a power cable were proposed, allowing for the reduction of transmission losses resulting from the flow of current through the cable screens by unilaterally not grounding one or two screens of cable lines. The induction of voltages in ungrounded cable screens influenced the choice of research methods, which were based on determining the effect of ground fault disturbances in the network resulting from a single-phase ground fault on the overvoltage induced in the screen with the proposed grounding methods. The analyses carried out took the form of experimental and simulation studies. The results of the experimental studies presented in the thesis are based on field tests carried out in the actual network. The use of simulation studies was used to assess the effect of the cable line parameters, power network parameters and the type of disturbance on the level of ground fault overvoltage in the screens of power cables operating in the proposed variants of the grounding configuration. The paper also analyzed the effect of changing the method of grounding the cable screens of the MV cable line on the possible shock hazard at the place of grounding of the cable screens related to limiting the reductive effect of these coatings. As a result, proposals were presented for the selection of surge protection measures for the outer sheath of a power cable in the event of a surge hazard in the cable screens.

1. Wprowadzenie

Bezpieczna i niezawodna praca nowoczesnych systemów elektroenergetycznych wymaga mierzenia się z zadaniami i problemami, których charakter stanowi niejednokrotnie wyzwanie dla operatorów systemów elektroenergetycznych i źródło tematów badawczych dla jednostek naukowych. Rozwój odnawialnych źródeł energii wynikający z dostrzeganego, znaczącego i negatywnego wpływu pozyskiwania energii ze źródeł konwencjonalnych, szybko zmieniająca się geopolityka związana z bezpieczeństwem narodowym oraz bezpieczeństwem dostępności surowców naturalnych niezbędnych do budowy i poprawnej eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, zwiększenie się urbanizacji terenów miast i wsi oraz zagęszczenie zaludnienia prowadzące do powstania skoncentrowanych odbiorów dużej mocy, które wymagają zapewnienia ciągłości dostaw energii elektrycznej i poprawienia poziomu bezpieczeństwa porażeniowego ludzi oraz zwierząt – te wszystkie zmiany oraz wyzwania stojące przed energetyką zawodową zobowiązują do transformacji sposobu myślenia o systemie elektroenergetycznym jako całości i jego poszczególnych elementach. Z punktu widzenia komunalnego odbiorcy energii elektrycznej najważniejszym kryterium oceny jakości pracy systemu elektroenergetycznego jest ciągłość dostaw energii i jak najniższy poziom zagrożenia porażeniowego w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych. Jedną z możliwości zapewnienia tych wskaźników na jak najwyższym poziomie jest zmiana sposobu przesyłu i dystrybucji energii elektrycznej, z najczęściej do tej pory wykorzystywanych linii napowietrznych, na linie kablowe. Taką zmianę cechuje również pozytywny odbiór społeczny związany ze zmniejszonym, z punktu widzenia odbiorcy, wpływem na środowisko i estetykę otoczenia.

Elektroenergetyczne linie kablowe znane są od XIX wieku, natomiast współczesne kable energetyczne o izolacji wytłaczanej zostały wprowadzone na rynek w latach 60. XX w. Od tego czasu prowadzone są prace, które mają na celu zwiększyć ich możliwości przesyłowe, zoptymalizować warunki pracy, zminimalizować problemy eksploatacyjne i poprawić bezpieczeństwo. Największy rozwój w dziedzinie dotyczącej kabli elektroenergetycznych o izolacji wytłaczanej przypada na ostatnie dwudziestolecie i dotyczy w głównej mierze zagadnień związanych z kablami najwyższych i wysokich napięć [4, 14, 16, 73]. Zapewnienie ciągłości zasilania ze strony sieci przesyłowej jest

istotnym parametrem oceny jakości energii elektrycznej, rzutującym na wszystkie poziomy napięcie, co wiąże się ze zwiększonym zainteresowaniem badawczym problemami sieci przesyłowej i urządzeń w niej pracujących. Wykorzystanie w miejscach narażonych na wyłączenia związane z warunkami zewnętrznymi linii kablowych pozwala z reguły na zmniejszenie przerw w zasilaniu. Wadą takich rozwiązań jest zwiększenie nakładów finansowych na budowę sieci, wprowadzenie do sieci dodatkowych urządzeń stanowiących możliwe źródło awarii bądź problemów eksploatacyjnych [28, 71, 77], jak i straty energii elektrycznej w żyłach roboczych kabla i w powłokach przewodzących [29, 132].

Zagadnienia dotyczące wykorzystania i eksploatacji 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 zwarcowego i współpracę z urządzeniami automatyki zabezpieczeniowej w celu szybkiego wyłączenia zagrażających izolacji kabla prądów zwarcowych [20, 39, 83]. 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 zwarcowego oraz bezpieczeństwo porażeniowe i przeciwprzepięciowe. Wykorzystując taką konfigurację, napięcie na żyłach powrotnych jest pomijalnie niskie, co skutkuje możliwością spełnienia warunków ochrony przepięciowej bez konieczności stosowania dodatkowych środków ochrony. Istotną wadą takiego rozwiązania jest pojawienie się w trakcie pracy normalnej znaczących strat energii elektrycznej wynikających z przepływu prądów powłokowych będących skutkiem wyindukowania się w żyłach powrotnych 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. Na wyróżnienie zasługują straty w żyłach roboczych wynikające z impedancji linii kablowej, straty dielektryczne, których poziom zależy między innymi od

pojemności kabla oraz najistotniejsze, z punktu widzenia niniejszej rozprawy, straty w żyłę powrotnej związane z przepływem przez nie prądów powłokowych. Sposobami na zminimalizowanie strat energii elektrycznej wynikających z powyższych zjawisk może być zmniejszanie dobieranych przekrojów znamionowych żył roboczych i powrotnych [26, 56] czy zmiana sposobu ułożenia i zmniejszenie odległości między fazami linii kablowej [42]. Wzrost odległości między fazami jednożyłowych kabli elektroenergetycznych skutkuje zwiększeniem się poziomu strat, co prowadzi do wniosku, że w układzie trójkątnym straty będą znacznie niższe niż w układzie płaskim, nawet przy minimalnych odległościach międzyfazowych. Straty energii elektrycznej wynikające z przepływu prądów przez żyły powrotne można ograniczyć wykorzystując zmianę sposobu konfiguracji uziemienia tych żył [21, 33]. Najpopularniejszymi metodami uziemienia żył powrotnych kabli elektroenergetycznych SN jest ich obustronne uziemienie na końcach ciągu kablowego. Układ ten sprzyja zwiększeniu strat przesyłowych poprzez indukowanie się w żyłę powrotnej siły elektromotorycznej, wynikającej z przepływu prądu przez żyłę roboczą w stanie pracy normalnej. Redukcja strat w kablowych sieciach SN jest możliwa poprzez wykorzystanie metod stosowanych w liniach kablowych WN i NN, a mianowicie zastosowania 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 powrotnej, przy jednoczesnym zapewnieniu spełnienia wymagań stawianych żyłom powrotnym. Propozycja układu, który spełnia większość tych wymagań została przedstawiona przez zespół badawczy Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej i opisana w artykule naukowym [1]. 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. W opracowaniu ujęto rachunek ekonomiczny uzasadniający przeprowadzenie zmian konfiguracji żył powrotnych oraz przeprowadzono analizę związaną ze stanami zakłóceniovymi jakie mogą mieć miejsce w nieuziemionych i uziemionych fazach żyły

powrotnej w kontekście zadziałania zabezpieczeń oraz ochrony porażeniowej, jak i przepięciowej. Analiza zagadnienia poruszonego w artykule 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 żyłę roboczej kabla elektroenergetycznego prądu przemiennego będzie skutkował proporcjonalnym dla tego układu wzrostem poziomu napięć wyindukowanych w żyłę powrotnej. Takie zjawisko będzie miało miejsce w przypadku wystąpienia warunków zakłóceńowych, podczas których prąd przepływający przez żyłę roboczą będzie krotnością prądu roboczego, co następuje między innymi w trakcie trwania zwarc 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 zwarc w sieci SN, spośród których 85% to zwarcia samogasnące [58, 85, 93]. Zdarzenia o charakterze wolnoziemnym, którymi są zwarcia doziemne, stanowią źródło ziemnozwarciowych przebiegów dorywczych, które mogą stanowić zagrożenie dla izolacji urządzeń elektroenergetycznych. Poziom przebieg dorywczych będzie wynikał zarówno z wartości prądu zakłóceńowego powstałego w wyniku zwarcia doziemnego, jak i z długości kabla oraz z indukcyjności wzajemnej żyły roboczej i powłok kabla zależącej od wymiarów geometrycznych układu i przenikalności magnetycznej środowiska. Wszystkie te składowe, wpływające na zagrożenie przepięciowe mogące pojawić się w trakcie zwarc doziemnych w linii kablowej, będą znaczące z punktu widzenia zmiany sposobu uziemienia żył powrotnych. Konfiguracja uziemienia żył powrotnych może mieć istotny wpływ na poziom przebiegów 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. Podjęcie zagadnienia badawczego dotyczącego oceny bezpieczeństwa izolacji XLPE kabli elektroenergetycznych SN ze względu na poziomy napięcie wyindukowanych w nieuziemionych fazach żyły powrotnej dla specjalnego, proponowanego sposobu pracy żył powrotnych, przy założeniu różnych wariantów pracy sieci oraz parametrów linii kablowej, jest w związku z tym uzasadnione z punktu widzenia zarówno technicznego, jak i naukowego.

Pierwszym etapem badania zjawiska przepięć ziemnozwarciowych w kablach elektroenergetycznych SN z proponowanym wcześniej wariantem konfiguracji uziemienia żył powrotnych było przeprowadzenie przeglądu literaturowego, który pomógłby potwierdzić założenia dotyczące rozpatrywanego układu sieci i usystematyzować wiedzę dotyczącą przepięć ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych kabli SN. W literaturze naukowej, zarówno polskiej, jak i zagranicznej zagadnienia przepięć ziemnozwarciowych wynikających ze sposobu uziemienia żył powrotnych kabli elektroenergetycznych są szeroko prezentowane dla napięć wysokich (WN) i najwyższych (NN), co pozwala na wnioskowanie, że istnieje zasadność podjęcia tej tematyki również dla sieci kablowych SN. Współczesne akty prawne, zarówno światowe, jak i polskie, nie prezentują kompleksowych wytycznych projektowania i eksploatacji linii kablowych z uwzględnieniem zastosowania specjalnych sposobów uziemienia żył powrotnych kabli i aspektów koordynacji izolacji [47, 99, 102]. Oznacza to potrzebę przeprowadzenia dogłębnej analizy i obliczeń w celu wykorzystywania proponowanego w rozprawie rozwiązania w praktyce. W tym celu zdecydowano się na przeprowadzenie badań naukowych łączących metody eksperymentalne z metodami symulacji komputerowej. Wykorzystanie symulacji komputerowej umożliwia rozwinięcie zagadnienia o szereg wariantów niemożliwych do zrealizowania w trakcie badań eksperymentalnych w rzeczywistych układach.

Badania eksperymentalne wykonywane w ramach współpracy Politechniki Poznańskiej z przemysłem zostały przeprowadzone na zlecenie operatora sieci dystrybucyjnej Enea Operator Sp. z o.o. i stanowiły kontynuację prac badawczych skupionych na zminimalizowaniu strat energii elektrycznej w żyłach powrotnych poprzez zastosowanie specjalnego uziemienia żyły powrotnej kabla elektroenergetycznego SN.

Celem przeprowadzenia testów było uzyskanie rzeczywistej informacji o poziomie napięć mogących pojawić się w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego SN w przypadku zmiany jego domyślnej konfiguracji na tę zaproponowaną w trakcie prac badawczych i uwzględniającą straty energii. Operator sieci dystrybucyjnej udostępnił w tym celu fragment istniejącej sieci, pozwalając na przeprowadzenie prób zwarciovych dla wcześniej ustalonych wariantów. Przygotowanie do badań terenowych wymagało odpowiedniego doboru urządzeń pomiarowych, skonstruowanych i dostosowanych z uwzględnieniem warunków, jakie miały panować w trakcie wykonywania badań w sieci testowej oraz mając na uwadze spodziewany poziom przepięć ziemnozwarciowych uzyskany w trakcie wstępnych symulacji komputerowych przeprowadzonych z wykorzystaniem programu komputerowego DIgSILENT Power Factory. Uzyskane w trakcie badań eksperymentalnych wyniki poziomów napięć, porównane z wynikami otrzymanymi w wyniku symulacji komputerowej, stanowiły podstawę do rozbudowania zagadnienia i stworzenia modelu komputerowego do zweryfikowania poziomów przepięć ziemnozwarciowych dla rozbudowanych wariantów sieci elektroenergetycznej w celu określenia możliwości i zakresu zastosowania badanego rozwiązania technicznego.

Metody analityczne stosowane powszechnie do obliczania parametrów stanu pracy linii kablowych cechują się wprowadzeniem znacznych uproszczeń względem rzeczywistych układów i mogą stanowić źródło nieprawidłowości w ocenie faktycznego stanu tych układów. W klasycznym ujęciu obliczeń analitycznych stosuje się modele linii Schelkunoff'a z uwzględnieniem impedancji obwodów ziemnopowrotnych Carsona i Pollaczka [10, 103, 117, 128, 133]. Przy założeniach tych metod modele impedancyjne obwodów ziemnopowrotnych niezbędnych do obliczeń parametrów linii kablowych opierają się jedynie na analizie stanów ustalonych o stałej częstotliwości, a zatem rachunki nie pozwalają na dokonanie analizy stanów przejściowych. W następstwie takich założeń model matematyczny ogranicza możliwości analizy zjawisk i otrzymywanych w trakcie jego obliczeń wyników. Wykorzystanie metod symulacji komputerowej do projektowania linii kablowych i analizy zjawisk towarzyszących pracy kabli w sieci pozwala na uzyskanie dokładniejszych wyników niż przy użyciu metody klasycznej obliczeń parametrów pracy sieci nieuwzględniających wpływu częstotliwości w przypadku występowania stanów zakłóceń. Metody numeryczne, na których

opierają się modele komputerowe, pozwalają na analizę i obliczanie parametrów układów elektrycznych w stanach nieustalonych z uwzględnieniem dziedziny częstotliwości, wykorzystując złożone algorytmy obliczeniowe, których opis klasycznymi metodami analizy matematycznej byłby utrudniony ze względu na stopień skomplikowania [25, 37].

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. Stanowią one podstawowy rodzaj urządzeń chroniących elementy układu elektroenergetycznego przed nadmiernym, niekontrolowanym wzrostem napięcia. Podstawową ich cechą jest posiadanie rezystancji, której wartość zmienia się w odpowiedzi na napięcie. Konsekwencją spadku rezystancji układu jest wzrost prądu, a zatem i możliwość odprowadzania energii przepięcia do ziemi. Najpowszechniejszym rodzajem ograniczników przepięć, stosowanym obecnie do współpracy z liniami kablowymi, są ograniczniki beziskiernikowe wyposażone w warystory z tlenków metali, które stanowią ochronę osłon kabli od przepięć piorunowych i łączeniowych [94, 118]. Wyróżniają się zdolnością do przyjmowania znacznych porcji energii a także ciągłością charakterystyki napięciowo-prądowej. W przypadku przepięć o częstotliwości sieciowej, czyli przepięć dorywczych, ograniczniki beziskiernikowe mogą ulegać zniszczeniu. W kablach elektroenergetycznych przepięcia dorywcze wynikają z występowania indukcji magnetycznej, która powoduje wyindukowanie się wzdłuż metalicznej powłoki siły elektromotorycznej, zależnej od prądu płynącego w żyłach roboczych, długości kabla, a także od przenikalności magnetycznej i innych parametrów układu. Największe zagrożenie przepięciowe występuje właśnie w momencie przepływu przez żyłę roboczą kabla prądu zwarciovego i tym samym indukowania się przepięć zakłóceńowych w żyłach powrotnych. Wynikające z tego napięcia indukowane, a przede wszystkim maksymalna wartość przepięcia dorywczego, powinny stanowić podstawę doboru parametrów warystorowego ogranicznika przepięć do współpracy z żyłami powrotnymi [90]. Innym wariantem pozwalającym na wykorzystanie alternatywnych konfiguracji uziemienia żyły

powrotnej jest wyposażenie linii kablowej w kabel powrotny ECC (ang. earth continuity conductor), który wykorzystuje się w przypadku uziemienia jednostronnego SPB (ang. single point bonding). Decyzja o wykorzystaniu proponowanych rozwiązań dla wykorzystywanej w rozprawie konfiguracji uziemienia żył powrotnych kabla SN zależy będzie od maksymalnych poziomów napięć ziemnozwarciowych ustalonych dla przyjętych w trakcie badań kryteriów oraz bezpieczeństwa przeciwporażeniowego, z uwzględnieniem rachunku ekonomicznego takich rozwiązań.

Prezentowana rozprawa doktorska składa się z sześciu rozdziałów, podsumowania oraz spisu literatury.

W rozdziale drugim omówione zostały wiadomości teoretyczne dotyczące elektroenergetycznych linii kablowych, przede wszystkim budowy jednożyłowych kabli elektroenergetycznych. Przedstawiono charakterystyki ich powłok oraz formuły pozwalające obliczyć parametry wzdłużne i poprzeczne kabli. Zaprezentowane zostały zależności fizyczne dotyczące jednożyłowych kabli elektroenergetycznych pracujących w układzie trójfazowym. Szczególna uwaga poświęcona została żył powrotnej, która jest głównym przedmiotem badań w rozprawie. Opisano warunki jakie musi ona spełniać w linii kablowej, najpowszechniej wykorzystywane sposoby jej uziemienia oraz wyzwania jakie są z nią związane. Przedstawiono sposoby ograniczenia strat w żył powrotnej i sposób ich obliczania, a także proponowane zmiany konfiguracji sposobu uziemienia żył powrotnych. Rozdział zamyka wprowadzenie do zagadnień dotyczących napięć ziemnozwarciowych w sieciach SN, ich pochodzenia oraz analizy.

W rozdziale trzecim przedstawiono cel rozprawy, tezy główne i tezę pomocniczą oraz zakres prac, które zostały przedsięwzięte na potrzeby udowodnienia postawionych tez.

Rozdział czwarty rozpoczyna część badawczą rozprawy, w której zaprezentowano przyjętą metodologię badawczą wraz z opisem narzędzi. W rozdziale zamieszczono wyniki badań symulacyjnych w programie DIgSILENT Power Factory oraz badań eksperymentalnych terenowych dotyczących wpływu zmiany sposobu uziemienia żył powrotnych elektroenergetycznej linii kablowej SN na napięcia ziemnozwarciowe mogące pojawić się w tych żyłach w wyniku wystąpienia jednofazowego zwarcia doziemnego w ciągu kablowo-napowietrznym. Przedstawione przebiegi oraz wartości maksymalne napięć otrzymanych w wyniku badań stanowią podstawę do przeprowadzenia symulacji komputerowych.

Wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych w programie komputerowym zaprezentowano w rozdziale piątym. Przedstawiono przebiegi i wykresy pozwalające na ocenę zależności poziomu przepięć ziemnozwarciowych powstających w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego w wyniku pojawienia się w sieci zwarcia doziemnego od parametrów linii kablowych w powiązaniu ze zmianami sposobu uziemienia tych żył. Jednym z elementów prac badawczych było określenie wpływu rodzaju zakłócenia na przebieg napięcia indukowanego w nieuziemionych żyłach powrotnych linii kablowej i określenie maksymalnego napięcia pojawiającego się w trakcie ich trwania. W końcowych podrozdziałach przedstawiono ocenę zagrożenie porażeniowego, która jest następstwem częściowego nieuziemienia żył powrotnych.

W rozdziale szóstym zamieszczono wytyczne dotyczące ochrony linii kablowej przed skutkami przepięć mogących wystąpić w żyłach powrotnej w rezultacie zmiany konfiguracji ich uziemienia. Zaproponowano rozwiązania pozwalające na zastosowanie układów pracy żył powrotnych ograniczających straty energii elektrycznej przy jednoczesnym zapewnieniu bezpieczeństwa.

W rozdziale siódmym, będącym podsumowaniem rozprawy, zawarto wnioski końcowe w oparciu o przeprowadzone badania i określono dalsze kierunki badań, które można podjąć w ramach przedmiotu rozprawy.

2. Kable elektroenergetyczne średniego napięcia

2.1. Konstrukcje kabli SN

Znane współcześnie metody przesyłu energii elektrycznej na duże odległości wymagają wykorzystania linii przesyłowych jakimi są przewody napowietrzne bądź kable elektroenergetyczne. Zgodnie z aktualnymi danymi, na terenie Polski znaczący procent linii stanowią linie napowietrzne. W przypadku przesyłu energii przewodami napowietrznymi należy liczyć się ze zwiększonym prawdopodobieństwem awarii w wyniku zaistnienia niekorzystnych warunków atmosferycznych, natomiast niewątpliwą zaletą tego typu rozwiązania jest stosunkowo niewielki koszt budowy takich sieci. W przypadku większości kabli zasadniczym wyzwaniem jest koszt, zarówno zainstalowania takiego układu, jak i jego naprawy w przypadku awarii. Operatorzy systemu decydują się jednak na zwiększenie liczby przyłączy kablowych, na każdym poziomie napięć, w związku z wymaganiami dotyczącymi ich niewielkiego wpływu na środowisko naturalne, warunki krajobrazowe czy bezpieczeństwa takich układów dla ludzi i zwierząt. Dane dotyczące całkowitej długości przyłączy elektroenergetycznych operatora systemu elektroenergetycznego oraz wszystkich spółek dystrybucyjnych przedstawiono w tabeli 2.1, zawartej poniżej.

Tabela nr 2.1. Długość przyłączy elektroenergetycznych w przeliczeniu na jeden tor za rok 2023 [108]

Poziom napięcia	Całkowita długość przyłączy [km]	Linia napowietrzna [km]	Linia kablowa [km]	Procent udziału linii kablowych [%]
NN	16 074	15 934	140	0,9
WN	34 375	33 674	701	2,0
SN	309 100	214 651	94 449	30,6
nn	455 334	280 450	174 884	38,4

W roku 2023, na terenie Polski, łączna długość linii elektroenergetycznych przekroczyła 990 tys. km, z czego aż 77% stanowią linie niskiego oraz średniego napięcia.

Wśród nich na szczególną uwagę zasługują linie kablowe średniego napięcia. W przeciągu ostatnich lat największy wzrost zadań inwestycyjnych w zakresie linii dystrybucyjnych zauważyć można właśnie dla tego typu przyłączy. Zgodnie ze Sprawozdaniem z wyników monitorowania bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej za okres od dnia 1 stycznia 2021 r. do dnia 31. grudnia 2022 r. [87], sporządzonego przez Ministerstwo Klimatu i Środowiska, najczęściej modernizowanymi i budowanymi w latach 2021-2022 liniami dystrybucyjnymi były właśnie linie kablowe średniego napięcia. W latach tych łącznie zmodernizowano 2,88 tys. km oraz wybudowano 1,83 tys. km przyłączy kablowych. W kolejnym roku 2023, to właśnie ten rodzaj linii został w stosunku do lat poprzednich rozbudowany aż o 3,68 tys. km, co stanowi rekord pod względem wzmacniania tego typu infrastruktury i podniosło procentowy udział sieci kablowych SN w całkowitej długości przyłączy o 1 p.p. Rozwój tego segmentu sektora dystrybucyjnego wiąże się również ze zwiększonymi wymaganiami stawianymi konstrukcjom kabli oraz układom, w których one pracują. Zastępowanie linii napowietrznych liniami kablowymi oraz tworzenie nowych linii kablowych powoduje wzrost strat przesyłowych w sieci elektroenergetycznej. Jest to związane z budową linii kablowych, czyli faktem, że oprócz strat przesyłowych wynikających z przepływu prądu żyłami roboczymi, należy liczyć się również ze stratami wynikającymi z przepływu prądu przez żyły powrotne.

Parametry techniczne kabli elektroenergetycznych wynikają z krajowej normalizacji. Celem procesu normalizacji jest racjonalizacja produkcji i usług poprzez stosowanie uznanych reguł technicznych lub rozwiązań organizacyjnych, usuwanie barier technicznych w handlu i zapobieganie ich powstawaniu, zapewnienie ochrony życia, zdrowia, środowiska i interesu konsumentów oraz zapewnienie bezpieczeństwa pracy, poprawy funkcjonalności, kompatybilności i zamienności produktów, jakości niezawodności wyrobu, procesów i usług, a także podjęcie działania na rzecz uwzględnienia interesów w normalizacji europejskiej i międzynarodowej oraz ułatwiania porozumiewania się przez określenie zunifikowanych terminów, definicji, oznaczeń i symboli do powszechnego stosowania [34]. W przypadku normalizacji wyrobów elektroenergetycznych prace nad normami i ich przyjęcie na drodze kompromisu przeprowadzane przez polską jednostkę normalizacyjną odbywa się na podstawie wymagań stawianych takim wyrobom przez europejskie i międzynarodowe organizacje normalizacyjne [115]. Stosowanie polskich norm jest dobrowolne, ale w związku

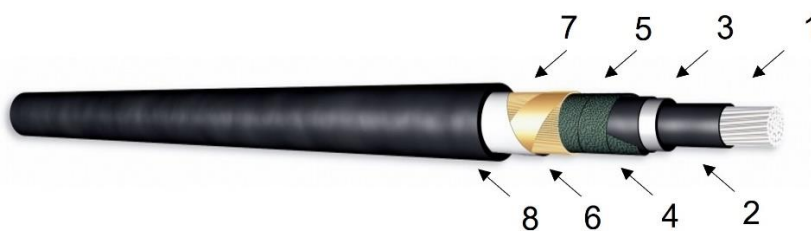
z usprawnieniem procesów większość przedsiębiorstw elektroenergetycznych stosuje wspólne terminy, oznaczenia czy symbole.

Ze względu na napięcie znamionowe można wyróżnić następujący podział kabli elektroenergetycznych:

- niskiego napięcia – do 0,6/1 kV,
- średniego napięcia – powyżej 0,6/1 kV do 18/30 kV,
- wysokiego napięcia – powyżej 18/30 kV.

Aktualnie wykorzystywane w elektroenergetyce kable niskiego i średniego napięcia bazują na rozwiązaniach wykorzystujących tworzywa sztuczne do budowy izolacji i powłoki. Są to takie materiały jak polwinit, polietylen usieciowany czy guma etylenowo-propylenowa. Dawniej wykorzystywane kable o izolacji z papieru przesyconego i powłoce ołowianej są stosowane bardzo rzadko, przede wszystkim ze względu na wysokie koszty produkcji oraz ich eksploatację.

Interesujące z punktu widzenia rozprawy kable średniego napięcia wykonywane są w układach jednożyłowych lub trójżyłowych. W przypadku kabli na napięcie znamionowe 3,6/6 kV najczęściej stosowane są konstrukcje trójżyłowe o izolacji i powłoce z polwinitu, z żyłą powrotną z taśm i drutów miedzianych. W przypadku kabli na napięcia powyżej 3,6/6 kV zastosowanie znajdują konstrukcje jednożyłowe z izolacją z polietylenu usieciowanego lub w wyjątkowych sytuacjach kable o izolacji papierowo-olejowej [45, 48, 100, 101]. W związku z tematem rozprawy bliżej przedstawiony zostanie jeden typ kabla elektroenergetycznego.



Rys.2.1. Kabel jednożyłowy XUHAkXS na napięcie 12/20 kV firmy TF Kable o następujących powłokach: 1 – żyła robocza aluminiowa, 2 – ekran półprzewodzący, 3 – izolacja z polietylenu usieciowanego, 4 – ekran półprzewodzący zewnętrzny, 5 – taśma półprzewodząca blokująca wodę, 6 – żyła powrotna z drutów miedzianych i taśmy miedzianej, 7 – taśma nieprzewodząca blokująca wodę, 8 – powłoka z polietylenu termoplastycznego [63]



Rys.2.2. Kabel jednożyłowy XUHAKXS na napięcie 12/20 kV firmy NKT o następujących powłokach: 1 – żyła przewodząca aluminiowa, 2 – warstwa półprzewodząca wewnętrzną, 3 – izolacja z polietylenu usieciowanego, 4 – warstwa półprzewodząca zewnętrzną, 5 – uszczelnienie wzdłużne przeciwko wnikaniu wilgoci, 6 – żyła powrotna z drutów miedzianych i taśmy miedzianej, 7 – taśma nieprzewodząca, 8 – zewnętrzna powłoka polietylenowa [62]

Na rysunkach 2.1 i 2.2 przedstawione zostały typowe konstrukcje jednożyłowego kabla elektroenergetycznego o napięciu 12/20 kV z żyłą aluminiową o izolacji z polietylenu usieciowanego z żyłą powrotną miedzianą oraz z powłoką z polietylenu, na przykładzie kabli dwóch czołowych producentów [62, 63]. Poniżej przedstawione zostaną informacje dotyczące powłok kabla elektroenergetycznego i ich roli, natomiast w podrozdziale 2.2 szczegółowo omówione zostaną najbardziej kluczowe pod względem modelowania komputerowego parametry jednostkowe kabli elektroenergetycznych.

Żyła robocza

Podstawowym elementem każdego kabla jest żyła robocza, której zadaniem jest przewodzenie prądu elektrycznego. W zależności od zastosowania, spotyka się żyły wykonane z drutów miedzianych lub aluminiowych. W przypadku kabli elektroenergetycznych SN, właściwości elektryczne aluminium, chociaż znacząco gorsze od właściwości miedzi, są jednak uznawane za wystarczające, dlatego w tego typu elementach przesyłowych materiał ten jest chętnie stosowany. Biorąc pod uwagę jego mały ciężar właściwy oraz oszczędności wynikające z zastosowania tego materiału (jest to materiał prawie czterokrotnie tańszy od miedzi), jest najczęściej wybieranym rozwiązaniem w przypadku przewodów i kabli średnich, wysokich i najwyższych napięć [40]. Żyły robocze dzieli się ze względu na kształt na okrągłe oraz sektorowe, a ze względu

na budowę na jednodrutowe i wielodrutowe. W ramach rozprawy omawiane będą kable elektroenergetyczne o żyłach roboczych aluminiowych okrągłych wielodrutowych o przekroju w kształcie wycinka koła i wykonanych z wielu drutów. Ze względu na przekroje kabli SN, których dotyczyć będzie modelowanie komputerowe, nie uwzględnia się podczas analizy efektu naskórkowości [19].

Warstwa półprzewodząca wewnętrzna

Żyłą roboczą kabla wykonana jest ze skręconych ze sobą drutów przewodzących, pomiędzy którymi mogą występować szczeliny powietrzne. W takim układzie, aby uzyskać poprawny rozkład pola elektrycznego i zabezpieczyć izolację przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz cieplnymi wynikającymi z nierównomiernego rozkładu pola, stosuje się warstwę półprzewodzącą wewnętrzną. W kablach elektroenergetycznych o napięciu znamionowym powyżej 6 kV wymagane jest zastosowanie niemetalicznego, przewodzącego ekranu, którego celem jest wyrównanie natężenia pola elektrycznego na powierzchni żyły roboczej. Ekran wewnętrzny wytłaczany jest na żyłę w procesie produkcyjnym. Ze względu na różnicę w rezystywności pomiędzy materiałem warstwy półprzewodzącej a zastosowanym w kablu przewodnikiem, przyjmuje się brak przepływu prądu między tymi elementami, a ekran ten, w trakcie modelowania komputerowego, traktuje się jako element izolacji.

Izolacja

Rodzaj zastosowanej izolacji kabla elektroenergetycznego to obszerny dział zainteresowania elektroenergetyki. Najbardziej znanymi i powszechnymi rodzajami izolacji kabli średnich i wysokich napięć są izolacja papierowo-olejowa oraz izolacja wytłaczana z polietylenu lub gumy etylenowo-propylenowej. Obecnie, w związku z szeregiem zalet, do budowy nowych sieci elektroenergetycznych wykorzystuje się kable w izolacji wytłaczanej z polietylenu usieciowanego (XLPE), który zastąpił poprzednią generację polietylenu termoplastycznego (PE). Przykładowo, w porównaniu do poprzednich technologii wykonywania izolacji, zastosowanie materiału XLPE pozwoliło uzyskać lepsze właściwości termiczne, a co za tym idzie możliwy stał się wzrost temperatury pracy dopuszczalnej długotrwale kabla w porównaniu np. do kabli wykonanych z izolacją z polietylenu termoplastycznego [88].

Warstwa półprzewodząca zewnętrzna

Dla kabla jednożyłowego o promieniowym rozkładzie pola elektrycznego stosuje się również ekran przewodzący zewnętrzny, który nakładany jest na izolację wewnętrzną. Dodatkowa powłoka ma na celu zapobieganie pojawianiu się wyładowań niezupełnych pomiędzy izolacją a żyłą powrotną, które mogą być spowodowane szczelinami powietrznymi wynikającymi z nierównomiernej budowy żyły powrotnej. Tak samo jak w przypadku ekranu półprzewodzącego wewnętrznego, rezystywność materiału, z którego wykonywana jest ta warstwa jest znacząco większa od rezystywności materiału, z którego wykonuje się żyły powrotne, zatem w przypadku obliczania impedancji kabla, element ten jest traktowany jak izolacja. W przypadku linii kablowych SN warstwy te nie mają znaczącego wpływu na pojemność kabla [84].

Żyła powrotna

Żyła powrotna, nazywana również ekranem metalicznym to warstwa, której głównym zadaniem jest przewodzenie prądu zakłóceniewego w przypadku awarii kabla elektroenergetycznego. Ekran metaliczny nałożony jest współosiowo na ośrodek kabla i skonstruowany jest w formie: powłoki metalowej spawanej lub wytłoczonej, drutów, taśm lub ich połączenia. Dodatkową funkcją żyły powrotnej może być również zapewnienie ochrony przed wilgocią, w takich sytuacjach najczęściej stosuje się jednolite ekrany. Konstrukcja, jak i materiał z jakich jest wykonany ten element, różni się w zależności od właściwości, jakie chce się uzyskać.

W większości jednożyłowych kabli, wykorzystywanych aktualnie w elektroenergetyce, spotkać można żyłą powrotną wykonaną w postaci drutów miedzianych z dodatkowymi taśmami. Zapewnia to osiągnięcie wymaganej i pewnej drogi dla przepływu prądu zakłóceniewego.

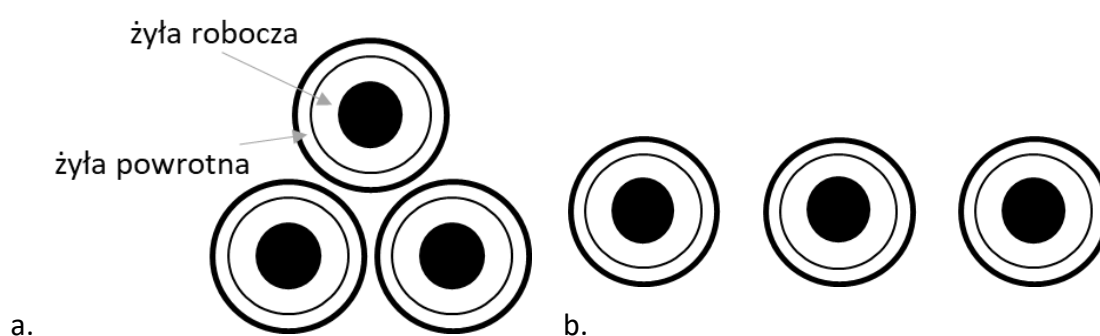
Powłoka zewnętrzna

Ostatnim elementem budowy kabla jest powłoka zewnętrzna, nazywana również osłoną, która w zależności od zastosowania może być wykonywana jako szczelna warstwa metalu (ołów, aluminium, stal, miedź) lub materiału niemetalicznego (polwinit, polietylen, poliuretan czy guma). Jej zadaniem jest odizolowanie wewnętrznych powłok kabla od środowiska zewnętrznego, a przede wszystkim od wilgoci. Na element ten oddziałują siły związane zarówno z indukowaniem się prądów zakłóceniewych w żyłę

roboczej, jak i żyły powrotnej kabla, w związku z tym grubość tej warstwy musi być dopasowana do wymagań, które ma spełnić dana linia kablowa [46].

Konfiguracja ułożenia linii kablowej

Sposób ułożenia linii kablowych podyktowany jest ich zastosowaniem. W przypadku sieci elektroenergetycznych średniego napięcia najczęstszym rozwiązaniem jest układanie kabli w gruncie. Proces ten jest ściśle określony przez normy krajowe [96, 116], ale także rozporządzenia spółek zarządzających siecią dystrybucyjną [121, 123]. W przypadku jednofazowych kabli elektroenergetycznych średniego napięcia w układzie trójfazowym stosowane są dwie konfiguracje – układ płaski oraz trójkątny.



Rys. 2.3. Warianty konfiguracji ułożenia kabli trójfazowej linii średniego napięcia: a. układ trójkątny, b. układ płaski

W trakcie projektowania i budowy elektroenergetycznych linii kablowych należy powoływać się na normę SEP N SEP-E 004:2022-08: Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe. Projektowanie i budowa [2]. Zakres normy obejmuje również takie informacje jak: odległości między kablami poszczególnych faz układu trójfazowego, głębokości ich ułożenia czy preferowane konfiguracje ułożenia kabli jednożyłowych w układzie trójfazowym. Głębokość ułożenia kabli w gruncie jest związana z napięciem znamionowym, przy jakim będzie pracować układ. Zgodnie z normą, sposób ułożenia trójfazowej linii kablowej może być zależny od ilości miejsca jakie zostało przeznaczone na linię kablową. Na terenach zurbanizowanych zaleca się wykorzystanie układu trójkątnego, z wierzchołkiem trójkąta skierowanym ku górze tak, aby wszystkie fazy się stykały. Na terenach leśnych i rolniczych dopuszczalny jest układ płaski, w którym odległość między poszczególnymi fazami nie powinna przekraczać 7 cm. W związku z szeregiem zalet, między innymi ekonomicznych i konstrukcyjnych, ułożenie trójfazowej

linii kablowej w trójkąt jest najpowszechniejszą metodą stosowaną w trakcie ich budowy. O ile głębokość ułożenia kabli, przy zachowaniu niezbędnych zasad budowy linii kablowych, nie ma wpływu na parametry techniczne takiej linii, to sposób ułożenia jest istotny z punktu widzenia parametrów elektrycznych linii. W zależności bowiem od konfiguracji układu kabli w gruncie zmienia się reaktancja indukcyjna kabli, a z kolei wartość indukcyjności dla linii kablowych maleje wraz ze wzrostem odległości między poszczególnymi fazami linii kablowej [63].

2.2. Parametry jednostkowe linii kablowej

Podstawowe parametry jednostkowe niezbędne do uzyskania wartości impedancji zgodnej i zerowej dla kabla elektroenergetycznego wynikają z budowy geometrycznej kabla jednożyłowego oraz ze sposobu ułożenia linii trójfazowej. Wzory umożliwiające obliczenie rezystancji jednostkowej ρ [Ω/km] powłok przewodzących kabla zostały przedstawione za pomocą wyrażeń (2.1) oraz (2.2):

$$\rho_L = \frac{1000}{\gamma_L s_L} \quad (2.1)$$

$$\rho_P = \frac{1000}{\gamma_P s_P} \quad (2.2)$$

gdzie ρ_L – rezystancja jednostkowa żyły roboczej [Ω/km], γ_L – przewodność materiału, z którego wykonana jest żyła robocza [$\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$], s_L – pole przekroju poprzecznego żyły roboczej [mm^2], ρ_P – rezystancja jednostkowa żyły roboczej [Ω/km], γ_P – przewodność materiału, z którego wykonana jest żyła robocza [$\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$], s_P – pole przekroju poprzecznego żyły roboczej [mm^2].

W przypadku reaktancji jednostkowej należy posłużyć się metodami wyznaczania indukcyjności jednostkowej na bazie strumienia magnetycznego wywołanego przepływem prądu w przewodzie. Do wyznaczenia wartości indukcyjności poszczególnych faz w symetrycznym układzie trójfazowym zakłada się pomięcie prądów płynących w metalowych powłokach, ekranach czy uzbrojeniu. Oznacza to, że indukcyjności żył roboczych faz układu wyznacza się dla żył powrotnych nieuziemionych.

Wyprowadzenie wzorów na indukcyjności jednostkowe L [H/km] w układzie trójfazowym symetrycznym jest możliwe przy zastosowaniu zasady superpozycji, która pozwala na wyznaczenie strumieni skojarzonych z każdą parą przewodów. Graficzna

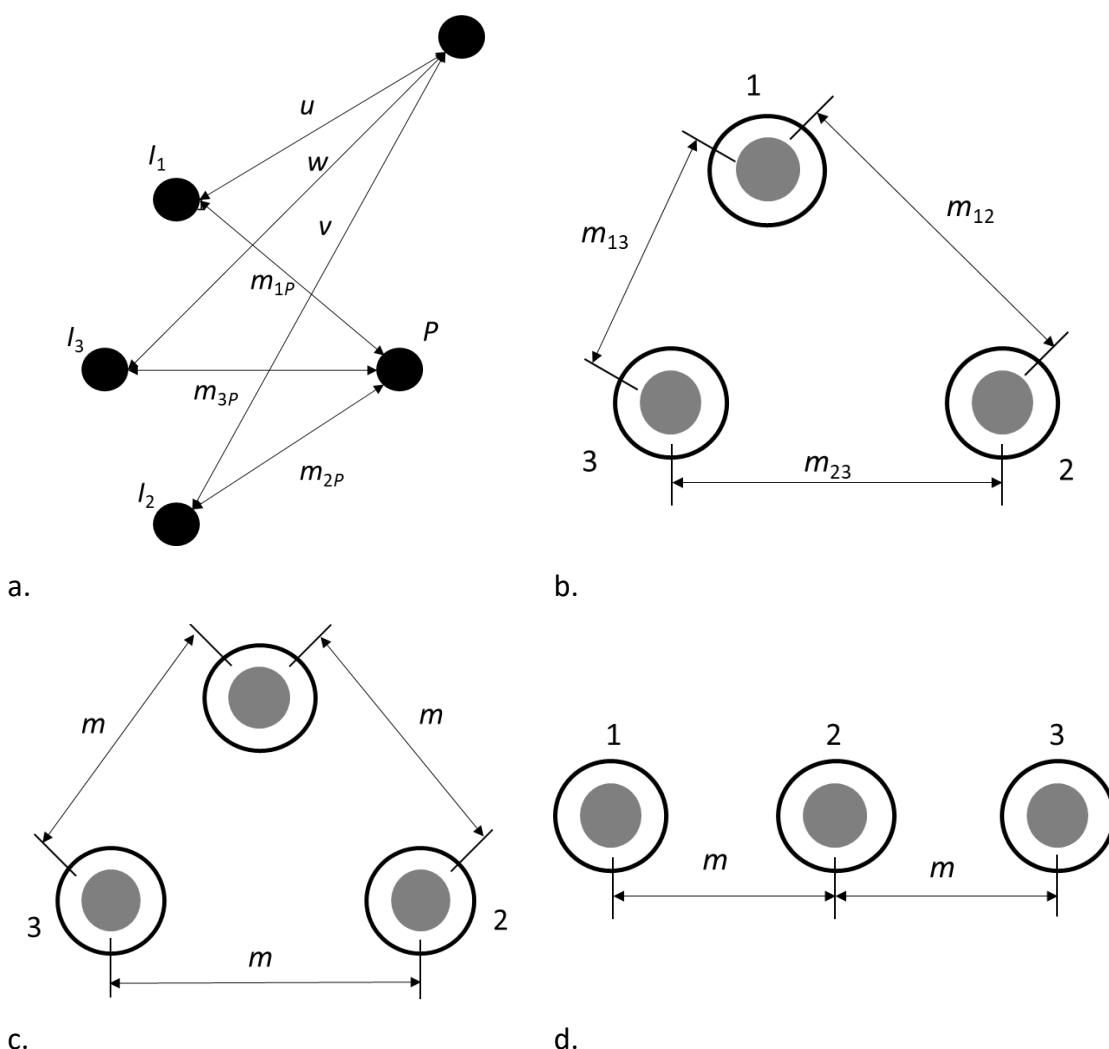
interpretacja tego wyprowadzenia przedstawiona została na rysunku 2.4.a. Skojarzone ze sobą pary przewodów 1-Z, 2-Z, 3-Z zastępują rzeczywisty układ trójfazowy pozwalając na uzyskanie wzorów (2.3), (2.4) oraz (2.5):

$$\underline{L}_1 = \left(\ln \frac{D_{12}D_{31}}{r_o^2} + j\sqrt{3} \ln \frac{D_{12}}{D_{31}} \right) 10^{-4} \quad (2.3)$$

$$\underline{L}_2 = \left(\ln \frac{D_{23}D_{12}}{r_o^2} + j\sqrt{3} \ln \frac{D_{23}}{D_{12}} \right) 10^{-4} \quad (2.4)$$

$$\underline{L}_3 = \left(\ln \frac{D_{31}D_{23}}{r_o^2} + j\sqrt{3} \ln \frac{D_{31}}{D_{23}} \right) 10^{-4} \quad (2.5)$$

gdzie D_{12} , D_{23} , D_{31} – odległości między środkami przewodów fazowych (odpowiednio fazy 1 i 2, fazy 2 i 3 oraz fazy 3 i 1, zgodnie z rysunkiem 2.4.b), r_o – promień przewodu.



Rys. 2.4. Rysunek pomocniczy do obliczania indukcyjności i napięć indukowanych a. graficzna interpretacja do wyznaczania impedancji w przewodach skojarzonych z linią trójfazową, b. ułożenie kabli w układzie trójkąta, c. ułożenie kabli w układzie trójkąta równobocznego, d. ułożenie kabli w układzie płaskim [135]

Indukcyjność średnia przewodów L_m [H/km] w układzie trójkątnym jest zgodna ze wzorem (2.6), natomiast w przypadku trójkąta równobocznego odległości między środkami przewodów są takie same, a zatem indukcyjność można przedstawić wzorem (2.7):

$$L_m = 2 \left(\ln \frac{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}}{r_o} \right) 10^{-4} \quad (2.6)$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = L = 2 \left(\ln \frac{D}{r_o} \right) 10^{-4} \quad (2.7)$$

W przypadku przedstawionym na rysunku 2.4.d., gdzie trzy przewody ułożone są w układzie płaskim w tej samej odległości od siebie, zależności (2.8), (2.9) oraz (2.10) przedstawić można uproszczonymi wzorami:

$$\underline{L}_1 = \left(\ln \frac{2D^2}{r_o^2} - j\sqrt{3}\ln 2 \right) 10^{-4} \quad (2.8)$$

$$\underline{L}_2 = \left(\ln \frac{D^2}{r_o^2} \right) 10^{-4} \quad (2.9)$$

$$\underline{L}_3 = \left(\ln \frac{2D^2}{r_o^2} + j\sqrt{3}\ln 2 \right) 10^{-4} \quad (2.10)$$

Średnia wartość indukcyjności jednostkowej w układzie płaskim przedstawiona może być za pomocą wyrażenia (2.11):

$$L_m = 2 \left(\ln \frac{2D^2}{r_o^2} \right) 10^{-7} \quad (2.11)$$

Analiza parametrów poprzecznych linii SN obejmuje określenie wartości konduktancji G (inaczej nazywanej upływnością) i susceptancji pojemnościowej B . W przypadku linii kablowych stratność materiałów izolacyjnych wpływających na konduktancję jest pomijalnie mała i zazwyczaj mniejsza niż $1\mu\text{S/km}$. Wyznaczenie parametrów poprzecznych linii kablowej, a zatem pojemności będącej źródłem susceptancji, odbywa się z wykorzystaniem współczynników Maxwella [5]. Współczynniki te wyznacza się z analizy układów elektrod: przewód-ziemia oraz przewód-przewód. Wzór (2.12) obrazuje zależność łączącą potencjał elektrod $\underline{V}$ z ich ładunkami elektrycznymi $\underline{Q}$ z użyciem współczynników Maxwella.

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_{L1} \\ \underline{V}_{L2} \\ \underline{V}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{L1L1} & K_{L1L2} & K_{L1L3} \\ K_{L2L1} & K_{L2L2} & K_{L2L3} \\ K_{L3L1} & K_{L3L2} & K_{L3L3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Q}_{L1} \\ \underline{Q}_{L2} \\ \underline{Q}_{L3} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Współczynniki K_{ij} o wartościach jednostkowych wyznaczanych na 1 km linii wyrażane są w jednostce km/F i wyznaczone bezpośrednio z wymiarów geometrycznych i stałych materiałowych linii kablowej. W przypadku kabla jednożyłowego uwzględnia się jedynie zawarte w głównej przekątnej macierzy (2.12) wartości współczynników własnych K_W . Jest to związane z brakiem oddziaływań pól elektrycznych żył roboczych z uwagi na ekranowanie. Współczynnik K_W oblicza się ze wzoru (2.13):

$$K_W = \frac{10^{-9}}{2\pi\epsilon_0\epsilon_k} \ln \frac{R}{r} \approx \frac{18}{\epsilon_k} \ln \frac{R}{r} \quad (2.13)$$

gdzie R – promień przekroju poprzecznego izolacji zewnętrznej jednożyłowego kabla elektroenergetycznego [cm], r – promień izolacji wewnętrznej żyły roboczej [cm], ϵ_0 – przenikalność dielektryczna próżni, ϵ_k – względna przenikalność dielektryczna materiału izolacyjnego kabla (dla polietylenu XLPE wynosi ona 2,4 [6]).

Na podstawie przekształceń macierzy (2.12) można otrzymać wzory pozwalające obliczyć pojemność wszystkich trzech składowych symetrycznych pojemności zaprezentowane wzorami (2.14) i (2.15).

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{K_W - K_M} \quad (2.14)$$

$$C_0 = \frac{1}{K_W + 2K_M} \quad (2.15)$$

W przypadku stosowanych obecnie najczęściej kabli jednożyłowych, pojemność zgodna i zerowa są sobie równe. Korzystając z podstawienia wzoru (2.13) do wzoru (2.14) przy założeniu, że dla kabla jednożyłowego współczynnik Maxwella wynikający z zależności między przewodami K_M jest równy 0, otrzymujemy następującą zależność:

$$C_1 = C_0 = \frac{\epsilon_k}{18 \ln \frac{R}{r}} \quad (2.16)$$

Kable elektroenergetyczne z izolacją z polietylenu usieciowanego charakteryzują się z reguły mniejszą pojemnością niż kable trójżyłowe. Bazując na wzorze (2.16) można wnioskować, że o rozkładzie pola elektrycznego, a zatem o jego pojemności decydować będzie stosunek promieni przekroju poprzecznego warstw półprzewodzących. W związku z faktem, że w wyniku zależności wynikających z konstrukcji kabla, stosunek R/r zawiera się w zakresie (1;2,5), to funkcja logarytmiczna, dla której ten stosunek jest liczbą logarytmowaną, będzie wykazywał silną zależność od jej zmian.

Konsekwencją budowy współczesnych elektroenergetycznych linii kablowych, która zakłada występowanie w kablu przewodzącej żyły roboczej oraz żyły powrotnej, jest konieczność przeprowadzenia analizy oddziaływań wzajemnych obwodów ziemnopowrotnych, która prowadzi do uzyskania informacji o parametrach podłużnych linii kablowych. Wpływ żył powrotnych na parametry jednostkowe w liniach kablowych można porównać do wpływu przewodu odgromowego w sieciach napowietrznych, z różnicami wynikającymi oczywiście z samego modelu kabla. Dla trójfazowej linii kablowej zbudowanej z trzech jednożyłowych kabli w układzie trójkątnym w modelu występują obwody ziemnopowrotne o poniżej wymienionych impedancjach:

$\underline{W}_L$ – impedancja własna obwodu żyły roboczej

$\underline{W}_P$ – impedancja własna obwodu żyły powrotnej

$\underline{M}_{LL}$ – impedancja wzajemna odvodu żył roboczych

$\underline{M}_{LPW}$ – impedancja wzajemna żyły roboczej i żyły powrotnej pojedynczego kabla

$\underline{M}_{LPZ}$ – impedancja wzajemna żyły roboczej i żył powrotnych pozostałych kabli

$\underline{M}_{PP}$ – impedancja wzajemna żył powrotnych

Dla trójfazowej linii kablowej z żyłami powrotnymi model impedancyjny można przedstawić z wykorzystaniem poniższej postaci algebraicznej:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_{L1} \\ \Delta \underline{U}_{L2} \\ \Delta \underline{U}_{L3} \\ \Delta \underline{U}_{P1} \\ \Delta \underline{U}_{P2} \\ \Delta \underline{U}_{P3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{W}_L & \underline{M}_{LL} & \underline{M}_{LL} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPZ} \\ \underline{M}_{LL} & \underline{W}_L & \underline{M}_{LL} & \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{LPZ} \\ \underline{M}_{LL} & \underline{M}_{LL} & \underline{W}_L & \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPW} \\ \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPZ} & \underline{W}_P & \underline{M}_{PP} & \underline{M}_{PP} \\ \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{PP} & \underline{W}_P & \underline{M}_{PP} \\ \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{PP} & \underline{M}_{PP} & \underline{W}_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} \\ \underline{I}_{L3} \\ \underline{I}_{P1} \\ \underline{I}_{P2} \\ \underline{I}_{P3} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

W celu wyznaczenia impedancji zgodnej układu opisanego przedstawionym powyżej wyrażeniem przyjmuje się bezimpedancyjne uziemienie żył powrotnych. W takim układzie napięcia indukowane w żyłach powrotnych są równe $\Delta \underline{U}_{P1} = \Delta \underline{U}_{P2} = \Delta \underline{U}_{P3} = 0$, natomiast prądy składowej zgodnej płynące przez żyły robocze są symetryczne i podlegają zależnościom $\underline{I}_{L2} = a^2 \underline{I}_{L1}$ oraz $\underline{I}_{L3} = a \underline{I}_{L1}$. W takim układzie również prądy wyindukowane w żyłach powrotnej będą miały charakter symetryczny. W tej sytuacji model można przestawić za pomocą wyrażenia (2.18).

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{L1} \\ \Delta U_{L2} \\ \Delta U_{L3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{W}_L & \underline{M}_{LL} & \underline{M}_{LL} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPZ} \\ \underline{M}_{LL} & \underline{W}_L & \underline{M}_{LL} & \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{LPZ} \\ \underline{M}_{LL} & \underline{M}_{LL} & \underline{W}_L & \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPW} \\ \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPZ} & \underline{W}_P & \underline{M}_{PP} & \underline{M}_{PP} \\ \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{PP} & \underline{W}_P & \underline{M}_{PP} \\ \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPZ} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{PP} & \underline{M}_{PP} & \underline{W}_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1} \\ a^2 \underline{I}_{L1} \\ a \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{P1} \\ a^2 \underline{I}_{P1} \\ a \underline{I}_{P1} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Wykorzystując znajomość wzoru (2.19) na impedancję jednostkową wzajemną dwóch obwodów ziemnopowrotnych można zauważyć, że średnia odległość między środkami geometrycznymi przewodów w kształcie walca jest dla układów żyła robocza - żyła robocza, żyła powrotna - żyła powrotna oraz żyła robocza - żyła powrotna, tożsama i impedancje wzajemne można przedstawić w formie ujednoliconej jako impedancję wzajemną $\underline{M}$. Ujednolicając tę wielkość otrzymuje się równanie (2.20), gdzie impedancje wzajemne żył roboczych i impedancje wzajemne żył powrotnych zastąpione zostały tą samą wielkością:

$$\underline{M}_j = 10^{-3} f + j 4 \pi 10^{-4} f \ln \frac{D_n}{D} \quad (2.19)$$

gdzie f – częstotliwość sieciowa [Hz], $D_n = 660 \sqrt{\rho_n / f}$ – składnik, który definiuje się jako odległość rozważanego przewodu od fikcyjnego przewodu powrotnego o średnicy jednego metra znajdującego się w ziemi [m], D – średnia odległość między przewodami fazowymi linii [m].

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{L1} \\ \Delta U_{L2} \\ \Delta U_{L3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{W}_L & \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{W}_L & \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{M} & \underline{W}_L & \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} \\ \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{M} & \underline{W}_P & \underline{M} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{W}_P & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{M} & \underline{W}_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{L1} \\ a^2 \underline{I}_{L1} \\ a \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{P1} \\ a^2 \underline{I}_{P1} \\ a \underline{I}_{P1} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Przedstawioną macierz można wykorzystać do obliczenia prądów i napięć w powłokach kabla elektroenergetycznego. Przykładowo, dla fazy L1 można wyodrębnić równanie czwarte (2.21), które pozwoli na wyznaczenie prądu $\underline{I}_{P1}$ żyły powrotnej P1 (2.22).

$$0 = (\underline{M}_{LPW} - \underline{M}) \underline{I}_{L1} + (\underline{W}_P - \underline{M}) \underline{I}_{P1} \quad (2.21)$$

$$\underline{I}_{P1} = - \frac{\underline{M}_{LPW} - \underline{M}}{\underline{W}_P - \underline{M}} \underline{I}_{L1} \quad (2.22)$$

Otrzymane równanie (2.22) opisujące zależność prądu płynącego w żyły powrotnej P1 fazy L1 od prądu płynącego w żyły roboczej fazy L1 oraz impedancji własnych i wzajemnych żył kabla elektroenergetycznego wskazuje na indukowanie się w żyłach

powrotnych prądów kolejności zgodnej. Jest to związane z inną wartością impedancji wzajemnej pomiędzy żyłą roboczą fazy i jej żyłą powrotną oraz impedancji wzajemnej pomiędzy tą żyłą powrotną a pozostałymi żyłami powrotnymi.

Chcąc uzyskać z równania (2.20) wartość impedancji zgodnej linii kablowej należy wyznaczyć równanie opisujące różnicę napięcia na żyłę roboczej przykładowej fazy. W poniższym przypadku (2.23) jest to napięcie na żyłę roboczej L1. Wykorzystując to równanie oraz eliminując z równania I_{P1} z wykorzystaniem wzoru (2.24) można otrzymać zależność opisującą stosunek napięcia ΔU_{L1} na żyłę roboczej fazy L1 do prądu I_{L1} płynącego w tej fazie, która stanowi reprezentację impedancji żyły roboczej wykorzystującą impedancje własne oraz wzajemne układu kablowego:

$$\Delta U_{L1} = (\underline{W}_L - \underline{M})I_{L1} + (\underline{M}_{LPW} - \underline{M})I_{P1} \quad (2.23)$$

$$\underline{Z}_{L1} = \frac{\Delta U_{L1}}{I_{L1}} = (\underline{W}_L - \underline{M}) - \frac{(\underline{M}_{LPW} - \underline{M})^2}{\underline{W}_P - \underline{M}} \quad (2.24)$$

Korzystając z powyższych równań, w celu obliczenia impedancji jednostkowej, należy wyznaczyć impedancje własne i zależne wyrażone w jednostce Ω/km zgodne z równaniami (2.25) - (2.28):

$$\underline{W}_L = \rho_L + 10^{-3}f + j4\pi 10^{-4}f \ln \frac{D_n}{r_{L0}} = \rho_L + 0,05 + j0,0628 \ln \frac{D_n}{r_{L0}} \quad (2.25)$$

$$\underline{W}_P = \rho_P + 10^{-3}f + j4\pi 10^{-4}f \ln \frac{D_n}{r_P} = \rho_P + 0,05 + j0,0628 \ln \frac{D_n}{r_P} \quad (2.26)$$

$$\underline{M} = 10^{-3}f + j4\pi 10^{-4}f \ln \frac{D_n}{b} = 0,05 + j0,0628 \ln \frac{D_n}{b} \quad (2.27)$$

$$\underline{M}_{LPW} = 10^{-3}f + j4\pi 10^{-4}f \ln \frac{D_n}{r_P} = 0,05 + j0,0628 \ln \frac{D_n}{r_P} \quad (2.28)$$

gdzie ρ_L – rezystancja jednostkowa linii [Ω/km], ρ_P – rezystancja jednostkowa żyły powrotnej [Ω/km], f – częstotliwość sieciowa [Hz], $D_n = 660\sqrt{\rho_n/f}$ – składnik, który definiuje się jako odległość rozważanego przewodu od fikcyjnego przewodu powrotnego o średnicy jednego metra znajdującego się w ziemi [m], r_{L0} – promień żyły roboczej [m], r_P – promień żyły powrotnej [m], b – odległość między środkami geometrycznymi żył roboczych (powrotnych) [m].

Wykorzystanie wyrażań pozwalających obliczyć impedancje własne i wzajemne, przedstawione w powyższych wzorach, pozwalają na przekształcenie i uzyskanie wyrażenia umożliwiającego obliczenie impedancji zgodnej wybranej fazy kabla elektroenergetycznej. Dla przykładu we wzorze (2.29) przedstawiona została formuła

pozwalająca obliczyć impedancję fazy L1 z wykorzystaniem jednostkowych wartości rezystancji i reaktancji żyły roboczej oraz żyły powrotnej.

$$\underline{Z}_{L1} = \rho_L + \rho_P \frac{X_P^2}{\rho_P^2 + X_P^2} + j(X_L - X_P \frac{X_P^2}{\rho_P^2 + X_P^2}) \quad (2.29)$$

W powyższym wzorze wykorzystano reaktancje żył roboczych X_L i powrotnych X_P , których wartości pisane są wzorami (2.30) oraz (2.31) zamieszczonymi poniżej:

$$X_L = 0,0628 \ln \frac{b}{r_{L0}} \quad (2.30)$$

$$X_P = 0,0628 \ln \frac{b}{r_P} \quad (2.31)$$

W rozważaniach dotyczących stanów zakłóceń należy również uwzględnić parametry składowej zerowej, a więc i impedancję składowej zerowej kabla elektroenergetycznego. Rozpatrując dwa przypadki – uziemienia obustronnego żyły powrotnej przez rezystancję o wartości równej 0 i uziemienia przez rezystancję o bardzo dużej impedancji. W pierwszym z przypadków $\Delta \underline{U}_{P1} = \Delta \underline{U}_{P2} = \Delta \underline{U}_{P3} = 0$, a prądy w żyłach powrotnych wynikają z wyindukowanych prądów przepływu wynikających z prądów zerowych żył roboczych:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{U}_{L1} \\ \Delta \underline{U}_{L2} \\ \Delta \underline{U}_{L3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{W}_L & \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{W}_L & \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{M} & \underline{W}_L & \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} \\ \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{M} & \underline{W}_P & \underline{M} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{W}_P & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{M} & \underline{W}_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_0 \\ \underline{I}_0 \\ \underline{I}_{0P} \\ \underline{I}_{0P} \\ \underline{I}_{0P} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Wyznaczenie prądu żyły powrotnej możliwe jest przez wyodrębnienie równania z macierzy (2.32). Pozwala to na zapis zależności dla żyły powrotnej wzorem (2.33), który umożliwia wyznaczenie prądu zerowego żyły powrotnej jak we wzorze (2.34). W konsekwencji możliwe jest wyznaczenie impedancji zerowej kabla z uwzględnieniem redukcyjnego wpływu żył powrotnych w postaci wzoru (2.35).

$$0 = (\underline{M}_{LPW} + 2\underline{M})\underline{I}_0 + (\underline{W}_P + 2\underline{M})\underline{I}_{0P} \quad (2.33)$$

$$\underline{I}_{0P} = -\frac{\underline{M}_{LPW} + 2\underline{M}}{\underline{W}_P + 2\underline{M}}\underline{I}_0 \quad (2.34)$$

$$\underline{Z}_{L1} = \frac{\Delta \underline{U}_{L1}}{\underline{I}_{L1}} = (\underline{W}_L + 2\underline{M}) - \frac{(\underline{M}_{LPW} + 2\underline{M})^2}{\underline{W}_P + 2\underline{M}} \quad (2.35)$$

Biorąc pod uwagę zależności pozwalające wyznaczyć impedancje własne i wzajemne przedstawione wyrażeniami od (2.25) do (2.28) można wyznaczyć impedancję zerową

w układzie z uziemionymi obustronnie żyłami powrotnymi wykorzystując parametry linii kablowej:

$$\underline{Z}_0 = \rho_L + 0,15 + j0,0628 \ln \frac{D_n^3}{r_{L0} b^2} - \frac{\left(0,15 + 0,0628 \ln \frac{D_n^3}{r_P b^2}\right)}{\rho_P + 0,15 + 0,0628 \ln \frac{D_n^3}{r_P b^2}} \quad (2.36)$$

Na podstawie otrzymanego powyżej wzoru można zauważyć, jak duży wpływ na współczynnik redukcyjny powłoki przewodzącej ma jej rezystancja. Korzystając ze wzoru na współczynnik redukcyjny r_E (2.37) i podstawiając do niego wyznaczone z macierzy (2.32) składowe zerowe prądów w kablu elektroenergetycznym otrzymuje się formułę (2.38). Współczynnik redukcyjny w otrzymanej poprzez podstawienia formie określa jaka część prądu składowej zerowej popłynie do ziemi za pośrednictwem układu uziemiającego żył powrotnych. Obliczenia takie są możliwe do wykonania z wykorzystaniem właściwości fizycznych i parametrów geometrycznych linii kablowej.

$$r_E = \frac{|3\underline{I}_P| - |3\underline{I}_{0P}|}{|3\underline{I}_{0L}|} \quad (2.37)$$

$$r_E = 1 - \frac{|\underline{M}_{LPW} + 2\underline{M}|}{|\underline{W}_P + 2\underline{M}|} = \frac{\rho_P}{\sqrt{\rho_P + 0,0628 \ln \frac{D_n^3}{r_P b^2}}} \quad (2.38)$$

W drugim rozpatrywanym przypadku żyły powrotne uziemione są przez dużą impedancję. W takiej sytuacji na żyłach powrotnych pojawia się potencjał, a prądy płynące żyłami powrotnymi stanowią cały prąd zerowy, o zwrocie przeciwnym do prądu płynącego żyłami roboczymi. W takiej sytuacji zależności impedancji można przedstawić równaniem (2.39).

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{L1} \\ \Delta U_{L2} \\ \Delta U_{L3} \\ \Delta U_{P1} \\ \Delta U_{P2} \\ \Delta U_{P3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{W}_L & \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{W}_L & \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{M} & \underline{W}_L & \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} \\ \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{M} & \underline{W}_P & \underline{M} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{W}_P & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{M} & \underline{W}_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_0 \\ \underline{I}_0 \\ -\underline{I}_0 \\ -\underline{I}_0 \\ -\underline{I}_0 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

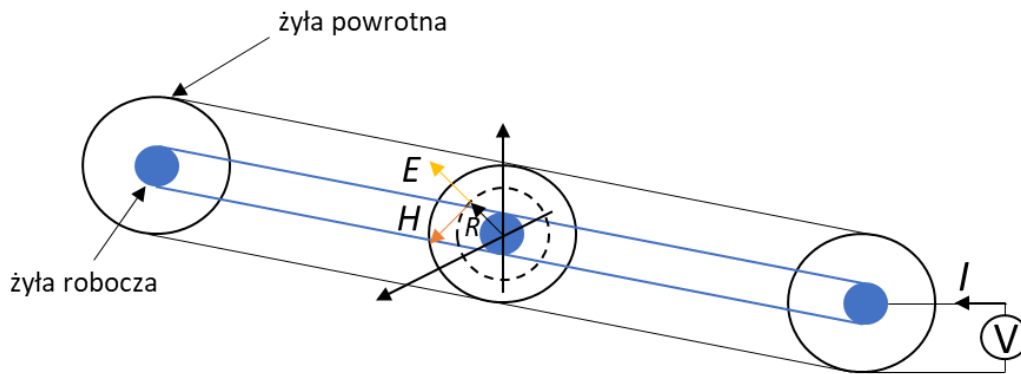
Analogicznie do pierwszego przypadku powyższa macierz pozwala na obliczenie prądów i napięć w żyłach kabla elektroenergetycznego. Dla przykładowej fazy L1 można wyodrębnić równanie (2.40), które pozwala na wyznaczenie impedancji składowej zerowej żyły roboczej kabla wyrażonej za pomocą wzoru (2.41):

$$\Delta U_{L1} = (\underline{W}_L + 2\underline{M} - \underline{M}_{LPW} - \underline{M})\underline{I}_0 \quad (2.40)$$

$$\underline{Z}_0 = \frac{\Delta U_{L1}}{I_0} = (\underline{W}_L - \underline{M}_{LPw}) = \rho_L + j0,0628 \ln \frac{r_P}{r_{L0}} \quad (2.41)$$

2.3. Sposób pracy linii kablowej ze szczególnym uwzględnieniem sposobu połączenia żyły powrotnej

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 [11, 12, 23, 68, 69].



Rys. 2.5. Schemat poglądowy przepływu prądów powłokowych w liniach kablowych

Na rysunku 2.5 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. W ogólnym przypadku indukcja magnetyczna pola magnetycznego B , które zostało wytworzone przez dowolny obwód elektryczny, tworzy w otaczającej go przestrzeni linie bez początku oraz końca. Mają one charakter ciągły, co oznacza, że strumień przenikający przez powierzchnię zamkniętą zawsze jest równy zeru:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.42)$$

W omawianych rozważeniach uwzględniane jest powstawanie strumienia pola magnetycznego w przewodniku żyły powrotnej, stanowiącego zamknięty obwód.

Przewodnik ten umieszczony jest w zmiennym polu magnetycznym pochodzącym od przepływu prądu I przez żyłę roboczą. Linie sił pola wyznaczone zostają w okręgach o promieniu R , wyznaczając tym samym kontur całkowania. Oznacza to, że zależność przedstawiona powyżej zostanie przekształcona w następujący sposób:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \mu \cdot I \quad (2.43)$$

$$\oint_S B \cdot dS \cdot \cos\alpha = \mu \cdot I \quad (2.44)$$

$$B \oint_S dS = \mu \cdot I \quad (2.45)$$

$$B \cdot 2\pi R = \mu \cdot I \quad (2.46)$$

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2\pi R} \quad (2.47)$$

Do obliczeń na potrzeby analizy zagadnień w obrębie elektrotechniki, podatność magnetyczną materiałów nie będących ferromagnetykami przyjmuje się na poziomie zero. Pozwala to na określenie prostej zależności między strumieniem pola magnetycznego, a jego natężeniem, wynikające z występowania przenikalności magnetycznej ośrodka μ . W ośrodkach nieferromagnetycznych wektory natężenia magnetycznego i strumienia magnetycznego pokrywają się. Natężenie pola magnetycznego H w odległości R od przewodnika z prądem będzie wynikało zatem z wartości strumienia i będzie zgodne ze wzorem (2.49):

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.48)$$

$$H = \frac{I}{2\pi R} \quad (2.49)$$

Siły pola elektrycznego wynikające z przepływu prądu elektrycznego przez żyłę roboczą kabla można opisać korzystając z prawa Gaussa. W układzie przedstawionym na rysunku 2.5. żyłę roboczą oraz żyłę powrotną można potraktować jako okładziny kondensatora o różnych potencjałach. Wiedząc, że jedynym źródłem potencjału w układzie jest potencjał żyły roboczej można, stosując prawo Coulomba, określić natężenie pola elektrycznego wewnątrz kabla E . Wyprowadzenie tej wielkości przedstawione zostało poniżej:

$$\psi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (2.50)$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \mathbf{1}_R \quad (2.51)$$

$$\psi_E = \int_S \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \mathbf{1}_R \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{d\vec{S}}{R^2} \mathbf{1}_R = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (2.52)$$

$$\int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (2.53)$$

Wiedząc, że S to całkowite pole powierzchni, w której zamknięty jest strumień wektora natężenia pola elektrycznego, w którym nie występują dodatkowe źródła wektora E , a przekrojem poprzeczny kabla elektroenergetycznego o promieniu całkowitym promieniu r_c i długości l , to ładunek Q znajdujący się w tym polu można przedstawić z wykorzystaniem wzoru (2.54) w następujący sposób:

$$Q = E\epsilon_0 2\pi r_c l \quad (2.54)$$

Pamiętając założenie, że żyła robocza oraz żyła powrotna stanowią okładziny kondensatora o różnych potencjałach możemy korzystając ze wzoru na napięcie U_{AB} między tymi okładzinami określić, jakie między tymi elementami kabla pojawi się natężenie pola elektrycznego E , czyli pomiędzy zewnętrzną powierzchnią żyły roboczej o promieniu r_1 , a wewnętrzną powierzchnią ekranu metalicznego o promieniu r_2 :

$$U_{AB} = V_A - V_B = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (2.55)$$

$$U_{12} = \int_{r_1}^{r_2} E \cdot dr = \frac{Q}{\epsilon_0 2\pi l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{Q}{\epsilon_0 2\pi l} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.56)$$

$$E = \frac{U_{12}}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2.57)$$

Konsekwencją przepływu prądu przez żyłę roboczą jest zatem wyindukowanie się siły elektromotorycznej w materiale żyły powrotnej. Obustronne zamknięcie obwodu ekranu metalicznego przez ziemię, wykorzystując uzziemienie obustronne, spowoduje przepływ prądu powłokowego i konieczność wykorzystywania specjalnego uzziemienia żył powrotnych.

Zgodnie z teorią obwodów ziemnopowrotnych, w przewodzie ułożonym równolegle do trzech przewodów, przez które przepływa symetryczny prąd trójfazowy, indukuje się napięcie wynikające z natężenia pola elektrycznego E [V/m] o wartości opisanej wzorem (2.58):

$$\underline{E}_p = j\omega I_2 2 \cdot 10^{-7} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{D_{1p} D_{3p}}{D_{2p}^2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{D_{3p}}{D_{1p}} \right) \quad (2.58)$$

gdzie 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 (2.59) oraz (2.60):

$$\underline{I}_1 = a\underline{I}_2; \underline{I}_3 = a^2\underline{I}_2 \quad (2.59)$$

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.60)$$

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 (2.58):

$$\underline{E}_1 = j\omega\underline{I}_2 2 \cdot 10^{-7} \left(-\frac{1}{2} \ln \frac{2D_{12}^2}{dD_{31}} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{2D_{31}}{d} \right) \quad (2.61)$$

$$\underline{E}_2 = j\omega\underline{I}_2 2 \cdot 10^{-7} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{4D_{12}D_{23}}{d^2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{D_{23}}{D_{12}} \right) \quad (2.62)$$

$$\underline{E}_3 = j\omega\underline{I}_2 2 \cdot 10^{-7} \left(-\frac{1}{2} \ln \frac{2D_{23}^2}{dD_{31}} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{2D_{13}}{d} \right) \quad (2.63)$$

gdzie d – średnia średnica żyły powrotnej.

Otrzymane w ten sposób wzory można przekształcić w sposób, który pozwoli obliczyć napięcia indukowane w żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych ułożonych w trójkąt równoboczny, w którym odległości między przewodami są sobie równe:

$$\underline{E}_1 = j\omega\underline{I}_2 2 \cdot 10^{-7} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \ln \frac{2D}{d} \quad (2.64)$$

$$\underline{E}_2 = j\omega\underline{I}_2 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{2D}{d} \quad (2.65)$$

$$\underline{E}_3 = j\omega\underline{I}_2 2 \cdot 10^{-7} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \ln \frac{2b}{d} \quad (2.66)$$

Analogicznie przedstawia się sposób obliczania napięć indukowanych w żyłach powrotnych trójfazowych układów kablowych realizowanych w układzie płaskim o jednakowych odległościach między przewodami. Wzory pozwalające obliczyć napięcia przedstawiają się następująco:

$$\underline{E}_1 = j\omega\underline{I}_2 2 \cdot 10^{-7} \left(-\frac{1}{2} \ln \frac{D}{d} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{4D}{d} \right) \quad (2.67)$$

$$\underline{E}_2 = j\omega L_2 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{2D}{d} \quad (2.68)$$

$$\underline{E}_3 = j\omega L_2 2 \cdot 10^{-7} \left(-\frac{1}{2} \ln \frac{D}{d} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{4D}{d} \right) \quad (2.69)$$

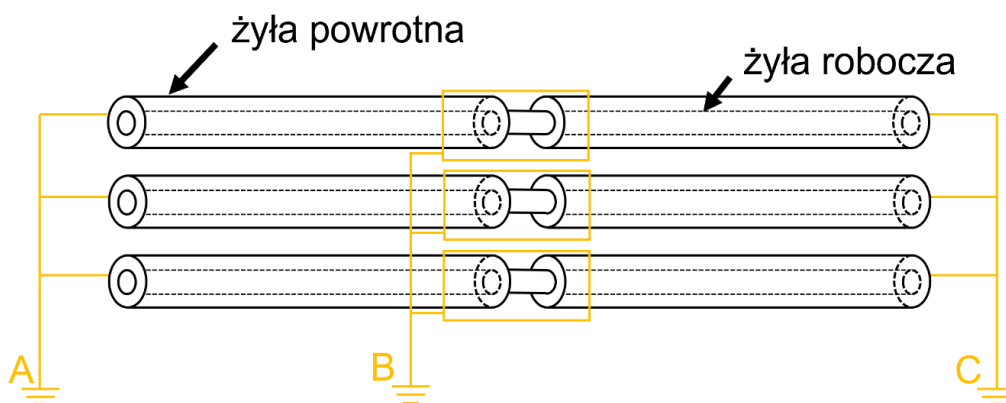
W wyniku przedstawionych w powyższych akapitach sił oddziaływujących na powłoki kabli elektroenergetycznych, w żyłach powrotnych dochodzi do przepływu indukowanego prądu elektrycznego, którego konsekwencją jest powstawanie strat energii elektrycznej [22]. Jest to jeden z czynników, których występowanie 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 [17, 47]. Bez względu na sposób w jaki są wykonane, uziemienia ekranów metalicznych muszą spełniać następujące warunki:

- zapewniać uziemienie kabla elektroenergetycznego,
- zagwarantować drogę przepływu dla prądu zakłócenowego 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.

Spełnienie wszystkich tych warunków jest ważnym zagadnieniem, które rozpatruje się dla linii kablowych na wszystkich poziomach napięć, ale najczęściej wykorzystywane sposoby łączenia żyły powrotnej z ziemią są w stanie zapewnić całkowite spełnienie części z tych wymagań. Poniżej przedstawiona została charakterystyka najpopularniej stosowanych sposobów pracy uziemienia żył powrotnych wraz z oceną ich zastosowania w liniach kablowych średniego napięcia, wykorzystując wymogi stawiane przez normy i standardy.

Uziemienie obustronne BE (ang. Both End bonding) to uziemienie dwustronne, najczęściej wielokrotne. W przypadku kabli elektroenergetycznych o długości krótszej niż 2 km wykonane poprzez zastosowanie metalicznego połączenia żyły powrotnej i punktu uziemienia na początku i na końcu. Dla linii kablowych dłuższych niż 2 km, uziemienie to jest wielokrotne. Wykonuje się je poprzez łączenie z uziomami ekranów metalicznych odcinków kablowych, które składają się na linię kablową oraz uziemienie żył na początku i na końcu takiego ciągu kablowego (Rys. 2.6).

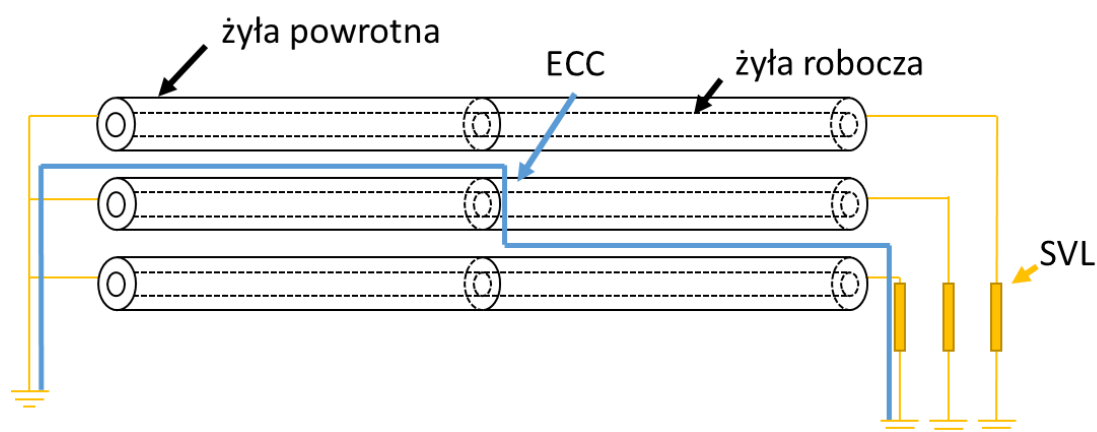


Rys. 2.6. Schemat funkcjonalny uziemienia obustronnego żył powrotnych z dodatkowym punktem B przy uziemieniu wielokrotnym

Rozwiązanie to zapewnia spełnienie części wymagań stawianych przez normy, ponieważ dzięki takiej pracy linii kablowej poziomy napięcie indukowanych w powłokach kabla mają wartości minimalne, a droga przepływu prądu zakłócenowego jest zachowana. Napięcia indukujące się w żyłach powrotnych kabli pracujących z uziemieniem obustronnym jest ograniczane prawie do zera i przyjmuje się, że we wszystkich punktach połączenia żyły powrotnej z uziemieniem potencjał równy jest potencjałowi ziemi [13]. Uziemienie dwustronne nie wymaga zastosowania ograniczników przepięć, co jest niewątpliwą zaletą z punktu widzenia eksploatacji i utrzymania linii kablowej. Podstawową wadą tego rozwiązania jest natomiast pojawianie się w tym układzie przepływu prądów powłokowych, które skutkują zwiększeniem strat energii elektrycznej i zmniejszeniem dopuszczalnej obciążalności długotrwałej kabla [7, 38]. Zgodnie z przywołaną literaturą, w takich układach prądy powłokowe wyindukowane w żyłę powrotną mogą osiągnąć ponad połowę wartości prądu żyły roboczej. Uziemienie obustronne stosuje się w polskim systemie

elektroenergetycznym na poziomie napięć: średnim i niskim. Na świecie najczęstszym zastosowaniem tego sposobu do uziemiania żył powrotnych są podwodne kablowe linie elektroenergetyczne [29, 55].

Uziemienie jednostronne SPB (ang. Single Point Bonding) to sposób pracy żył powrotnych polegający na wyizolowaniu żyły powrotnej kabla na jednym jego końcu i połączeniu go przez ogranicznik przepięć z uziemieniem. Drugi koniec linii kablowej jest uziemiony bezpośrednio. Przykładowe połączenie jednostronne przedstawiono na rysunku 2.7.



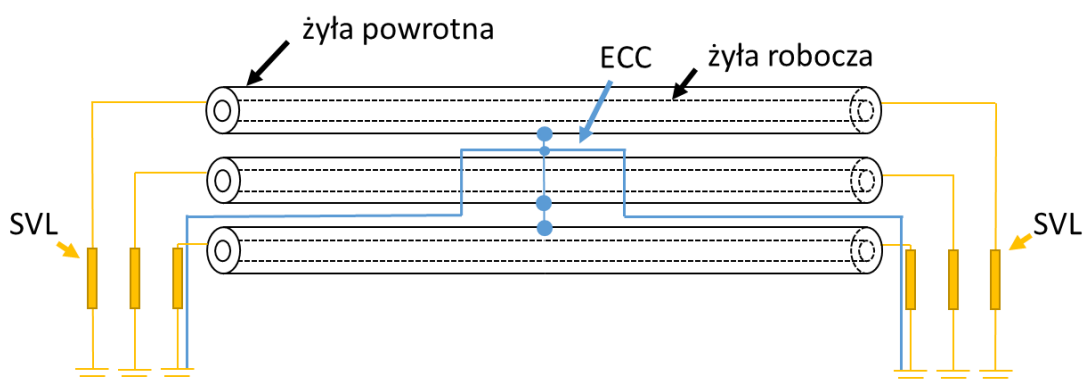
Rys. 2.7. Schemat funkcjonalny uziemienia jednostronnego żył powrotnych

Rozwiązanie z wykorzystaniem ograniczników przepięć uniemożliwia przepływ prądu powłokowego, a co za tym idzie zmniejszają się do minimum straty przesyłowe wynikające z przepływu prądu indukowanego w żyłę powrotnej. Napięcia indukowane w powłokach kabla są na poziomie akceptowanym i porównywalnym z układem krzyżowym [47]. Głównym problemem tego rozwiązania jest jego praca w warunkach zakłóceń. W przypadku zwarć pochodzących spoza linii kablowej, przepięć łączeniowych czy atmosferycznych, miejsca odizolowania żyły powrotnej od potencjału ziemi są szczególnie narażone na pojawienie się dużych wartości napięć indukowanych. Oznacza to rozbudowaną procedurę doboru parametrów ograniczników przepięć, które mają zostać wykorzystane w tym rozwiązaniu.

Spełnienie warunku zapewnienia drogi przepływu prądu zakłóceń jest możliwe przez zastosowanie kabla powrotnego ECC (Rys. 2.7). Podczas zwarcia doziemnego w układzie prąd składowej zerowej, przy wykorzystaniu uziemienia SPB, nie ma, z wyjątkiem sytuacji uszkodzenia kabla, zagwarantowanej drogi przepływu. Oznacza

to, że w układzie następuje znaczący wzrost napięć indukowanych w powłokach kabla, a to prowadzi do dalszych uszkodzeń. W związku z tym potrzebny jest zewnętrzny przewód pozwalający na przepływ prądu zakłóceń i ograniczenie skutków zwarciovych. Zastosowanie kabla powrotnego wymaga również uwzględnienia warunków jego zainstalowania w układzie. Dla przykładu w liniach kablowych w układzie płaskim należy ECC ułożyć w transpozycji, aby zminimalizować indukowanie się w nim napięć [22, 32].

W specjalnych sytuacjach, gdy w trakcie pracy normalnej wartość napięcia indukowanego w żyłce powrotnej uziemionej jednostronnie znacząco przekracza wartości dopuszczalne określone wymaganiami dla danej linii kablowej i nie ma możliwości odpowiedniego doboru ograniczników przepięć do ochrony powłok kabla, miejsce uziemienia żyły powrotnej można zlokalizować pośrodku długości kabla (Rys. 2.8). W takim układzie oba końce linii kablowej połączone są z uziemieniem przez ograniczniki przepięć, a układ ten jest w stanie ograniczyć napięcia indukowane w takim układzie względem klasycznego uziemienia jednostronnego.

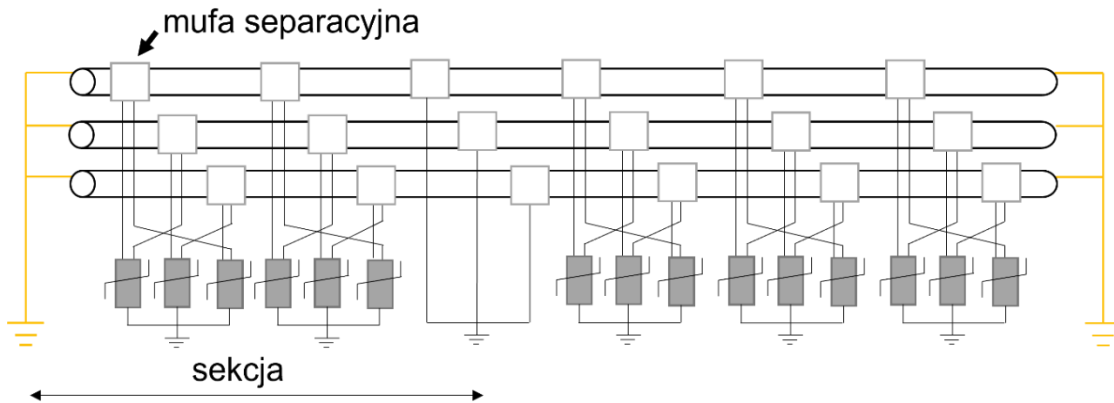


Rys. 2.8. Schemat funkcjonalny uziemienia jednostronnego żyły powrotnej z uziemieniem pośrodku długości linii kablowej

Najważniejszą zaletą tego rozwiązania jest ograniczenie przepływu prądów powłokowych, a co za tym idzie strat przesyłowych i zwiększenie możliwej obciążalności długotrwałej. Jest to, wraz z uziemieniem krzyżowym, najczęściej stosowany sposób pracy linii kablowych wysokiego napięcia.

Uziemienie krzyżowe CB (ang. Cross-bonding) to sposób uziemienia żył powrotnych, który stosuje się w przypadku linii kablowych o większych długościach. Polega on na przerywaniu ciągłości żył powrotnych kabli jednożyłowych w poszczególnych fazach

w celu stworzenia sekcji, a następnie łączeniu ich w odpowiedniej konfiguracji z żyłami powrotnymi kolejnej sekcji. Metodę można zastosować tylko w sytuacji linii kablowej, która złożona jest z minimum 3 sekcji lub ich wielokrotności. Linia kablowa uziemiona jest bezpośrednio na obu końcach, natomiast wszystkie sekcje są separowane przez ograniczniki przepięć, jak pokazano to na rysunku 2.9.



Rys. 2.9. Schemat funkcjonalny uziemienia krzyżowego żył powrotnych

Krzyżowanie połączeń żył powrotnych ma na celu zredukowanie napięć w nich indukowanych, przy jednoczesnej minimalizacji przepływu prądu powłokowego. W idealnych warunkach zredukowanie prądu powłokowego będzie wynikało z sumowania w układzie trójfazowym prądów przesuniętych względem siebie o 120° , co w konsekwencji doprowadzi do sprowadzenia prądu indukowanego w żyłę powrotnej do zera. W rzeczywistych układach nie jest to możliwe, a zatem przyjmuje się, że konstrukcja uziemienia w układzie cross-bonding jest wykonana poprawnie, jeśli prąd powłokowy nie przekracza 10% prądu, który mógłby pojawić się w tym układzie przy zastosowaniu uziemienia obustronnego żyły powrotnej [9, 57].

Ze względu na zwiększoną ilość urządzeń niezbędną do zaprojektowania i zainstalowania oraz utrudnioną eksploatację linii kablowych z żyłami powrotnymi i uziemionymi krzyżowo, nie jest to rozwiązanie popularne w przypadku sieci dystrybucyjnych średniego i niskiego napięcia. Zastosowanie muf separacyjnych oraz układów ograniczników przepięć w skrzynkach CB zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia awarii wynikających z występowania przepięć łączeniowych i atmosferycznych oraz zmniejsza możliwości lokalizacji miejsca uszkodzenia linii kablowej.

2.4. Sposoby ograniczenia strat w żyłce powrotnej linii kablowej SN

Straty energii elektrycznej to jeden z ważniejszych czynników wpływających na innowacyjność w sektorze energetyki. Potrzeba ich redukcji stanowi motywację do rozwoju urządzeń elektroenergetycznych oraz układów sieciowych. Z definicji, straty mocy i energii stanowią potrzeby energetyczne własne składowych elementów sieci, które biorą udział w procesie przesyłu i dystrybucji energii elektrycznej, a zatem ich możliwa do obliczenia w procesie analizy wielkość wynika z parametrów schematów zastępczych elementów stanowiących rozpatrywaną sieć. Straty można podzielić ze względu na pochodzenie na straty obciążeniowe oraz straty jałowe. Przedstawione poniżej formuły obrazują ogólne straty mocy czynnej i biernej w elementach sieciowych.

Straty mocy czynnej są sumą strat obciążeniowych ΔP_o i strat jałowych ΔP_j . Straty obciążeniowe wynikają z występowania rezystancji w gałęziach podłużnych schematu zastępczego elementu sieciowego i uwzględniają przepływ prądu obciążenia przez ten element. Zgodnie ze wzorami (2.70) oraz (2.71) straty te są zależne od obciążenia elementu mocą czynną oraz bierną, a w związku z tym przyjmują charakter losowy, zgodny z charakterem zmian obciążenia w czasie [124]. Uwzględnienie w obliczeniach poziomu strat obciążeniowych mocy czynnej urządzeń powszechnie używanych w sieciach elektroenergetycznych wskazuje na konieczność wykorzystania w obliczeniach parametrów elektroenergetycznych linii napowietrznych i kablowych oraz transformatorów i możliwość pominięcia dławików i kondensatorów. Straty jałowe mocy czynnej wyznaczone są dla gałęzi poprzecznych schematu zastępczego elementu sieci i wynikają z występowania konduktancji elementu sieci. Zakładając niewielką zmienność napięcia i konduktancji w czasie, wartość straty jałowej przyjmuje się jako stałą, a uwzględnienie jej w dalszych obliczeniach zależy od poziomu napięcia i urządzenia, w którym występują. Dla przykładu, w przypadku napowietrznych linii elektroenergetycznych o napięciu znamionowym $U_n < 30$ kV oraz linii kablowych o napięciu znamionowym $U_n < 20$ kV nie ma potrzeby wyznaczania strat jałowych, ze względu na ich niski poziom.

$$\Delta P = \Delta P_o + \Delta P_j \quad (2.70)$$

$$\Delta P_o = 3I^2 R \quad (2.71)$$

$$\Delta P_j = U_i^2 G_i \quad (2.72)$$

gdzie: I – wartość skuteczna natężenia prądu w danym elemencie sieciowym [A];
 R – rezystancja podłużna elementu sieciowego [Ω]; U_i – napięcie międzyprzewodowe [V],
 G_i – konduktancja i -te gałęzi [S].

Straty mocy biernej wynikające z obciążenia prądem roboczym wynikają z występowania reaktancji w gałęzi podłużnej schematu zastępczego elementu sieci. Straty te są zmienne w czasie i mają charakter indukcyjny dla takich urządzeń jak: linie elektroenergetyczne, transformatory i dławiki. Straty jałowe mocy biernej wynikają z występowania susceptancji w gałęzi poprzecznej schematu:

$$\Delta Q = \Delta Q_o + \Delta Q_j \quad (2.73)$$

$$\Delta Q_o = 3I^2 X \quad (2.74)$$

$$\Delta Q_j = U_i^2 B_i \quad (2.75)$$

gdzie: I – wartość skuteczna natężenia prądu w danym elemencie sieciowym [A];
 X – reaktancja podłużna elementu sieciowego [Ω]; U_i – napięcie międzyprzewodowe [V],
 B_i – susceptancja i -te gałęzi [S].

Wyznaczenie strat energii elektrycznej jest możliwe poprzez ujęcie strat mocy w wybranym przedziale czasowym. Straty te określone są jako potrzeby własne sieci lub energetyczne potrzeby własne sieci. Straty energii oblicza się z zależności przedstawionej wzorem (2.76), który pozwala na wyznaczenie pola powierzchni pod krzywą przedstawiającą przebieg zmian mocy w czasie T_a :

$$\Delta E = \int_0^{T_a} \Delta P_t dt \quad (2.76)$$

gdzie: ΔP_t – chwilowe straty mocy czynnej [W]; T_a – czas obliczeniowy, czyli czas, dla którego wyznacza się straty energii [s].

W związku z podziałem strat mocy na straty jałowe i obciążeniowe, analogicznie można wyznaczyć obciążeniowe i jałowe straty energii elektrycznej. Składowe wzoru (2.76) opisującego straty energii w systemie elektroenergetycznym zostały przedstawione poniżej, w formie uwzględniającej stałą wartość strat mocy jałowych ΔP_j oraz zależność strat obciążeniowych od chwilowego stopnia obciążenia mocą pozorną, z których wynika względny czas trwania strat maksymalnych τ_w :

$$\begin{aligned} \Delta E &= \int_0^{T_a} \Delta P_t dt = \int_0^{T_a} [\Delta P_j + \Delta P_{ot}] dt \\ &= \Delta E_j + \Delta E_o \end{aligned} \quad (2.77)$$

$$\Delta E_J = \Delta P_J \cdot f \cdot T_a \quad (2.78)$$

$$\Delta E_o = \Delta P_{os} \cdot \tau_w \cdot T_a \quad (2.79)$$

gdzie: f – względny czas występowania strat jałowych [s], τ_w – względny czas trwania strat maksymalnych [s].

W przypadku elektroenergetycznych linii kablowych straty mocy czynnej, których konsekwencją są straty energii elektrycznej, wynikają z występowania parametrów podłużnych schematu zastępczego, takich jak rezystancja, oraz parametrów poprzecznych. Straty jałowe w liniach kablowych wynikają z występowania strat dielektrycznych. W takiej sytuacji, we wzorze (2.80) pozostaje tylko element ΔP_{die} , który pozwala na matematyczne opisanie strat wynikających z pojemności kabla z uwzględnieniem współczynnika stratności izolacji kabla, zależnego od rodzaju materiału izolacyjnego zastosowanego w konstrukcji. Dla współcześnie najczęściej wykorzystywanych kabli o izolacji z polietylenu usieciowanego XLPE wartość współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$ jest mniejszy niż 0,004, co pozwoliło na zminimalizowanie strat dielektrycznych względem wcześniej wykorzystywanych konstrukcji [89].

$$\Delta P_J = \Delta P_{die} + \Delta P_{ul} \quad (2.80)$$

$$\Delta P_J = U_n^2 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot tg\delta \cdot l_k \quad (2.81)$$

gdzie: U_n – napięcie znamionowe linii kablowej, [kV]; C_0 – pojemność jednostkowa kabla [$\mu F/km$]; $tg\delta$ – współczynnik stratności izolacji kabla; l_k – długość linii kablowej [km].

$$\Delta P_{obc} = 3I^2 R_L = 3I^2 R_{t0} l = \frac{S^2}{U_N^2} \cdot R_{t0} \cdot l = \frac{P^2 + Q^2}{U_N^2} \cdot R_{t0} \cdot l \quad (2.82)$$

gdzie: I – prąd obciążenia [A]; l – długość linii [km]; R_{t0} – rezystancja jednostkowa przewodu [Ω/km] w temperaturze pracy przewodu; S – moc pozorna [kVA]; P – moc czynna [kW]; Q – moc [kVar]; U – napięcia znamionowe [kV].

Straty energii elektrycznej w powłokach metalowych kabli jednożyłowych pracujących ze sobą w układzie trójfazowym powstają na skutek przepływu przez nie prądów indukowanych, co jest rezultatem połączenia ich na obu końcach ciągu kablowego. W takiej konfiguracji straty wynikające z przepływu prądu przez powłokę metalową są proporcjonalne do kwadratu prądu obciążenia. Wyprowadzenie wzorów na straty energii elektrycznej w powłokach metalowych można rozpocząć od przeanalizowania układu dwóch jednożyłowych kabli elektroenergetycznych ułożonych

równoległe i tworzących układ jednofazowy. Dla uproszczenia obliczeń zakłada się, że układ ten jest uziemiony jednostronnie, a po stronie nieuziemionej powłoki są połączone. Napięcie na nieuziemionym końcu oznaczone zostało jako U_i . Napięcia indukowane w powłoce obu kabli będą natomiast równe co do wielkości, ale będą miały przeciwny zwrot. Taka sama zależność dotyczy również prądów wyindukowanych w tych powłokach. Wzór pozwalający je obliczyć został przedstawiony wyrażeniem (2.83):

$$I_P = \frac{E_1 - U_i}{R_P + jX_P}; -I_P = \frac{-E_1 - U_i}{R_P + jX_P} \quad (2.83)$$

gdzie: E_1 – napięcie indukowane w powłoce [V], U_i – napięcie na nieuziemionym końcu przewodu [V], R_P – rezystancja powłoki [Ω], X_P – reaktancja powłoki [Ω].

Po dodaniu równań (2.83) otrzymuje się wyrażenie na prąd w powłoce metalowej (2.84), w którym pomijany jest wpływ napięcia na nieuziemionym końcu, a zatem dla układu dwufazowego prąd w przypadku połączenia obustronnego powłok metalowych z ziemią i uziemiania jednostronnego z połączonymi powłokami na nieuziemionym końcu będzie tożsamy i moduł tego prądu można przedstawić wzorem (2.85):

$$I_P = \frac{E_1}{R_P + jX_P} = \frac{-jIX_P}{R_P + jX_P} \quad (2.84)$$

$$I_P = \frac{IX_P}{\sqrt{R_P^2 + X_P^2}} \quad (2.85)$$

Straty energii elektrycznej w powłoce metalowej w układzie jednofazowym, a zatem i w interesującej z punktu widzenia tematu rozprawy żył powrotnej, można obliczyć wykorzystując wzór (2.86):

$$I_P^2 R_P = \frac{I^2 X_P^2 R_P}{R_P^2 + X_P^2} \quad (2.86)$$

Dla symetrycznego układu trójfazowego można wyznaczyć straty energii elektrycznej w ogólnym przypadku, zakładając połączenie na obydwu końcach i uziemienie jednostronne powłok metalicznych. Prądy w powłokach trzech kabli tworzących taki układ można oznaczyć jako I_{P1} , $I_{P2} = -I_{P1} - I_{P3}$ oraz I_{P3} . Przyjmuje się, że wzdłuż powłok pojawia się potencjał względem ziemi. Ponieważ powłoki są zwarte na obu swoich końcach, napięcie U_P będzie przyjmować taką samą wartość dla wszystkich kabli, a w niektórych przypadkach może być równe 0. Korzystając z równań na spadki napięć w poszczególnych powłokach przedstawione wzorami (2.87) - (2.90) można wyprowadzić wartość napięcia na powłoce:

$$R_P I_{P1} = -jX_1(L_1 + I_{P1}) + jX_a(L_3 + I_{P3}) - \underline{U}_P \quad (2.87)$$

$$-R_P(I_{P1} + I_{P3}) = jX_1(L_1 + I_{P1}) + jX_3(L_3 + I_{P3}) - \underline{U}_P \quad (2.88)$$

$$R_P I_{P3} = -jX_3(L_3 + I_{P3}) + jX_b(L_1 + I_{P1}) - \underline{U}_P \quad (2.89)$$

$$\underline{U}_P = \frac{1}{3}j[X_a(L_3 + I_{P3}) + jX_b(L_1 + I_{P1})] \quad (2.90)$$

Uporządkowanie równań pozwalających na wyznaczenie spadków napięć, korzystając z wyznaczonego wzoru na napięcie powłoki metalowej, pozwala na wyprowadzenie wzorów na prądy powłokowe faz P1 oraz P3. Napięci fazy P2 obliczyć można z zależności (2.93) wykorzystując podstawienie:

$$I_{P1} \left[R_P + j \left(X_1 + \frac{1}{3} X_b \right) \right] + I_{P3} \left(-j \frac{2}{3} X_a \right) \quad (2.91)$$

$$= L_1 \left[-j \left(X_1 + \frac{1}{3} X_b \right) \right] + L_3 \left(j \frac{2}{3} X_a \right)$$

$$I_{P1} \left(-j \frac{2}{3} X_b \right) + I_{P1} \left[R_P + j \left(X_3 + \frac{1}{3} X_a \right) \right] \quad (2.92)$$

$$= L_1 \left(j \frac{2}{3} X_b \right) + L_3 \left[-j \left(X_3 + \frac{1}{3} X_a \right) \right]$$

$$-I_{P2} = I_{P1} + I_{P3} \quad (2.93)$$

Wyodrębniając ze wzorów (2.25)-(2.28) reaktancje jednostkowe powłok kabla elektroenergetycznego można je, po przekształceniu, przedstawić wyrażeniami (2.94)-(2.97). Wzory pozwalające na obliczenie reaktancji linii kablowej są niezbędne do wyznaczenia wartości prądów w powłokach z wykorzystaniem wzorów (2.85)-(2.87) zamieszczonych powyżej.

$$X_1 = 2\omega \ln \frac{m_{12}}{r_P} \quad (2.94)$$

$$X_3 = 2\omega \ln \frac{m_{23}}{r_P} \quad (2.95)$$

$$X_a = 2\omega \ln \frac{m_{31}}{m_{12}} \quad (2.96)$$

$$X_b = 2\omega \ln \frac{m_{31}}{m_{23}} \quad (2.97)$$

Reasumując, całkowite straty mocy w powłokach obliczyć można wykorzystując wzór (2.98):

$$\Delta P = 3P_P = R_P(I_{P1}^2 + I_{P2}^2 + I_{P3}^2) \quad (2.98)$$

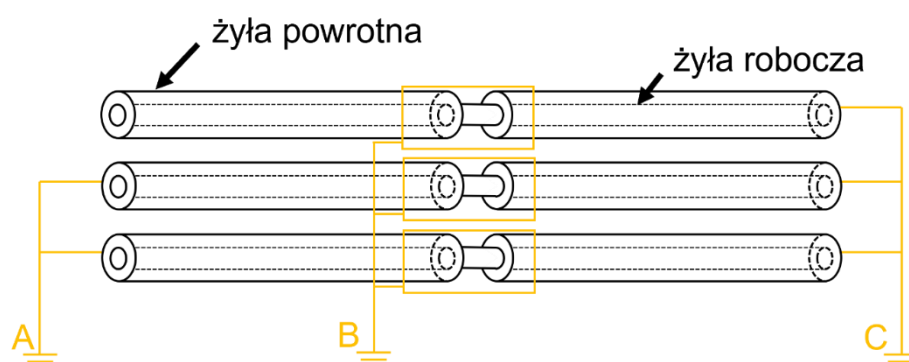
Podsumowując - w elektroenergetycznych liniach kablowych straty energii elektrycznej mają miejsce zarówno w żył roboczej, jak i izolacji oraz metalowych, przewodzących powłokach kabla. Spośród strat obciążeniowych można wyróżnić straty

wynikające z rezystancji materiału, z jakiego jest ona zbudowana [18] – przedstawione wzorem 2.36, natomiast wśród strat jałowych wymienić należy przede wszystkim straty dielektryczne wynikające z całej konstrukcji kabla [44] i przedstawione wzorem 2.35. W żyle powrotnej straty wynikają z szeregu czynników, takich jak: indukowane napięcie, przepływ prądu powłokowego i prądy wirowe. Wyznaczenie ich umożliwia określenie prądu przepływającego przez tę powłokę o znanej rezystancji jednostkowej. Zgodnie z literaturą można wnioskować, że straty w liniach kablowych zależą od pól przekrojów poprzecznych żył roboczych oraz powrotnych, ułożenia jej w układzie płaskich lub trójkątnym, a w znaczącym stopniu od sposobu uziemienia żył powrotnych kabli [30, 53, 72, 78, 92].

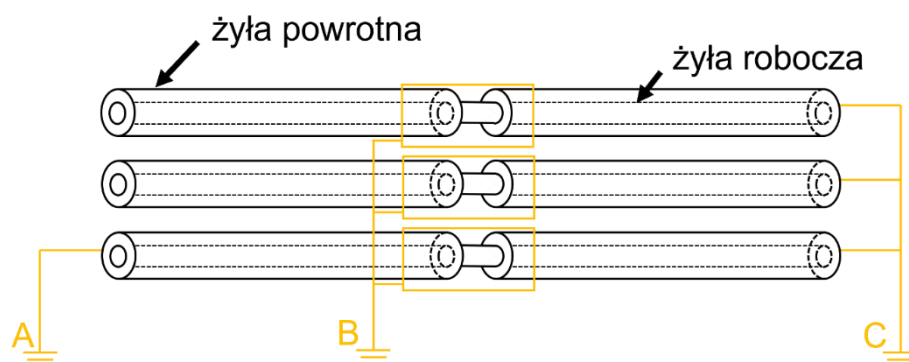
W żyle powrotnej kabla występują straty wynikające z prądu indukowanego w tej powłoce, który omówiono w punkcie 2.2 oraz z występowania prądów wirowych [3, 91]. Straty wynikające z występowania prądów wirowych są pomijalnie małe i niezależne od konfiguracji sieci, natomiast straty wynikające z prądu przepływającego przez żyły powrotne mogą w skrajnych przypadkach przyjmować wartości porównywalne, bądź większe od strat w żyle roboczej [42]. W przypadku sieci SN w polskim systemie elektroenergetycznym najczęstszym sposobem pracy żył powrotnych jest ich połączenie po obu stronach odcinka kablowego i uziemienie dwustronne (BE). Charakterystyka pracy z takim układem została przedstawiona w poprzednim podrozdziale i uwzględnia najważniejszy czynnik wpływający na wzrost strat energii elektrycznej w takich układach, a mianowicie przepływ prądu powłokowego w żyłach powrotnych. Jedną z możliwości redukcji poziomu strat w liniach kablowych jest zatem zmiana konfiguracji uziemienia żył powrotnych tych kabli. Podstawowe propozycje to zastosowanie innych wariantów połączeń żyły powrotnej, czyli uziemienia jednostronnego, krzyżowego czy uziemienia krzyżowego z transpozycją. W celu ograniczenia poziomu prądu powłokowego, możliwe jest również zastosowanie dodatkowych rezystancji lub indukcyjności w miejscu uziemienia żył powrotnych, muf łączeniowych bądź przepleceniowych [57, 109]. Rozbudowana sieć dystrybucyjna średniego napięcia utrudnia jednak wykorzystanie tych metod, przy jednoczesnym zachowaniu ochrony przeciwporażeniowej oraz przeciwprzepięciowej na odpowiednim poziomie. W przypadku zastosowania uziemienia jednostronnego czy cross-bondingu niezbędne jest zainstalowanie ograniczników przepięć, które stanowią dodatkowy element eksploatacyjny sieci.

Ponadto, istnieje większe prawdopodobieństwo problemów eksploatacyjnych wynikających z trudności w wykrywaniu awarii kabli oraz osprzętu kablowego [1, 55]. W przypadku zainstalowania dodatkowych rezystywności i reaktancji zaburzona zostaje droga spływu prądu zakłóceń i zwiększa się prawdopodobieństwo zagrożenia porażeniowego.

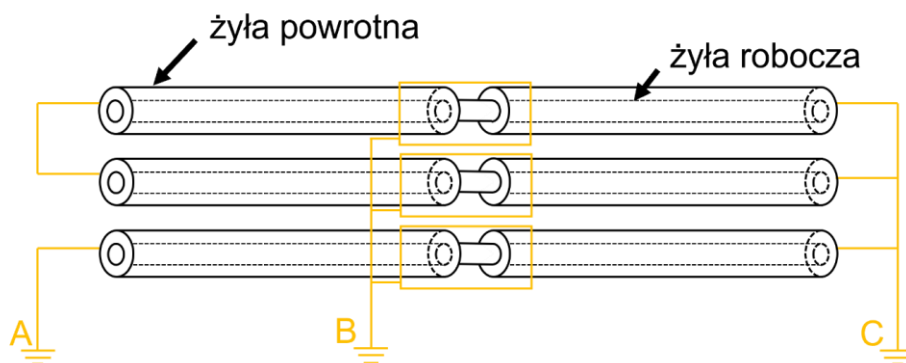
W związku z powyższymi zastrzeżeniami zostały zaproponowane zmiany w podejściu do konfiguracji obustronnego uziemienia żył powrotnych kabli średniego napięcia. Ograniczenie strat energii elektrycznej w kablach, przy jednoczesnym zapewnieniu ochrony przeciwporażeniowej i zminimalizowaniu zagrożenia przepięciowego, jest możliwe poprzez zaproponowanie alternatywnego układu połączeń żyły powrotnej przedstawionego na rysunkach 2.10, 2.11 oraz 2.12. Na potrzeby rozprawy konfiguracje sposobu uziemienia żył powrotnych otrzymały oznaczenia: wariant a, wariant b oraz wariant c. Oznaczenia zostały dopasowane do schematów funkcjonalnych w sposób, który ułatwi rozróżnienie ich w dalszych częściach pracy.



Rys. 2.10. Schemat funkcjonalny wariantu uziemienia obustronnego z nieuziemioną jednostronnie jedną fazą żyły powrotnej – wariant a



Rys. 2.11. Schemat funkcjonalny wariantu uziemienia obustronnego z nieuziemionymi jednostronnie dwiema fazami żył powrotnych – wariant b



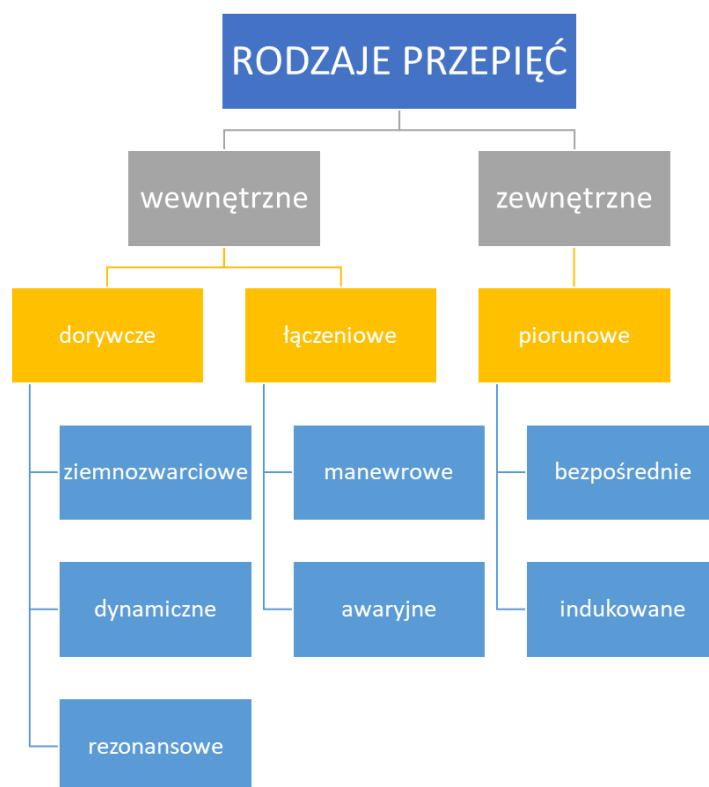
Rys. 2.12. Schemat funkcjonalny wariantu uziemienia obustronnego z nieziemionymi jednostronnie dwiema fazami żył powrotnych i zwartymi – wariant c

Rozwiązanie proponowane w rozprawie jest efektem współpracy naukowców Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej z firmą Enea Operator Spółka z o.o. i zostało szczegółowo przedstawione w artykule [1]. 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 nieziemiania 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 [43, 105, 106] wynikające z występowania napięć rażeniowych spowodowanych przepływem prądu zwarciovego w układzie. W przypadku jednostronnego nieziemienia 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 tego sposobu pracy żył powrotnych jest możliwość występowania przebiegów zagrażających powłoce zewnętrznej linii kablowej. W przypadku pracy normalnej nie występuje zagrożenie przepięciowe w liniach z jednostronnie nieuziemiającymi, całkowicie lub częściowo, żyłami powrotnymi. Znaczące zagrożenie pojawia się natomiast w momencie występowania zwarcia 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 [137, 138]. W dalszych rozdziałach rozprawy przedstawione zostaną badania dotyczące zjawisk przepięciowych w liniach kablowo-napowietrznych średniego napięcia z alternatywnym sposobem uziemienia żył powrotnych.

2.5. Zjawiska przepięciowe w linii kablowej SN

Przepięcia w układach elektroenergetycznych to zjawiska związane z wystąpieniem przemijającego wzrostu napięcia w urządzeniu powyżej poziomu jego napięcia roboczego dopuszczalnego długotrwale.



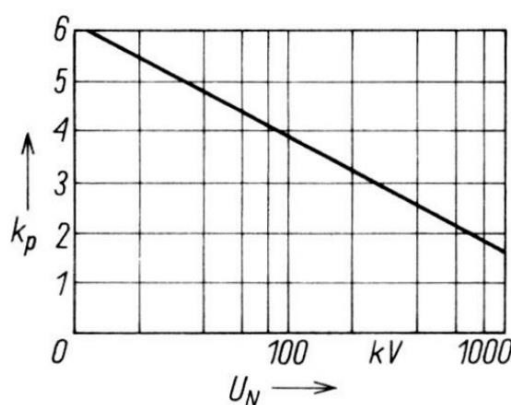
Rys. 2.13. Podział przepięć ze względu na źródło pochodzenia zakłócenia

Ich źródłem może być układ w jakim pracuje urządzenie (przebiecia łączeniowe), ale może również wynikać z występowania sprzyjających czynników zewnętrznych (przebiecia atmosferyczne). Opis przebiecia w urządzeniach elektroenergetycznych wymaga określenia przyczyny powstania zjawiska, a następnie określenia właściwych mu parametrów, takich jak: wartość szczytowa oraz czas trwania. Podział przebiec ze względu na ich pochodzenie wewnętrzne lub zewnętrzne wraz z podziałem na źródła tych zakłóceń zostały przedstawione na rysunku 2.13.

Przebiegi czasowe przebiec są na ogół nieregularne i wynikają z losowego przebiegu zjawiska, któremu towarzyszą. To samo tyczy się poziomów przebiec, które ze względu na stochastyczny charakter, podlegają ocenie probabilistycznej. W celu scharakteryzowania zagrożenia przebieciowego wykorzystuje się parametr opisujący wartość przebiecia - współczynnik przebiec k_p . Wyraża on stosunek wartości przebiecia U_{pm} do maksymalnego napięcia roboczego dopuszczalnego długotrwale U_{rm} . Rozpatrując systemy elektroenergetyczne trójfazowe, stosunek ten dotyczy wartości szczytowej przebiecia mierzony względem części uziemionej i skutecznej wartości maksymalnego napięcia fazowego U_{rm} i został on przedstawiony jako wzór (2.99):

$$k_p = \frac{\sqrt{3}U_{pm}}{\sqrt{2}U_{rm}} \quad (2.99)$$

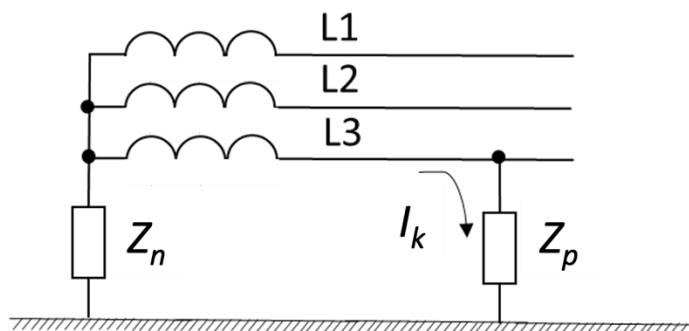
Na poziom współczynnika przebiec można wpływać poprzez odpowiedni dobór wytrzymałości izolacji oraz jej środków ochrony. Należy zwrócić uwagę na fakt, że czym wyższy poziom napięcia w układzie, tym większe są koszty izolacji, a co za tym idzie, tym bardziej powinna być ograniczona wartość współczynnika przebiec [35].



Rys. 2.14. Wytrzymałość izolacji na przebiecia wewnętrzne [35]

Ochrona przepięciowa w elektroenergetycznych sieciach średniego napięcia realizowana jest dla przebiegów o pochodzeniu zewnętrznym, jak i wewnętrznym. W przypadku przebiegów wewnętrznych, inaczej sieciowych, mówimy o nagłym wzroście napięcia w urządzeniu powstałym na skutek czynności łączeniowych, wystąpienia ferorezonansu lub zwarcia doziemnych trwałych lub przemijających. Przepięcia łączeniowe wynikają z naturalnej eksploatacji systemów elektroenergetycznych i są elementem, który należy uwzględnić w doborze urządzeń i układów pracy sieci. W sytuacji, gdy w sieci dochodzi do przełączenia, załączenia bądź wyłączenia w układzie pojawia się przemijający sygnał przepięciowy, który skutkuje zmianą stanu pracy z ustalonego na nieustalony. Przepięcia wynikające z operacji sieciowych są silnie tłumione w układach, w których impedancja charakteryzuje się większym udziałem rezystancji niż reaktancji. Szczytowe wartości przebiegów będą zależały od parametrów technicznych sieci, parametrów łącznika oraz obciążenia sieci, w momencie przeprowadzenia czynności łączeniowej [36]. Najwyższe wartości współczynnika przebiegów dla tych zjawisk wynoszą 6,0, co zgodnie z rysunkiem 2.14 wskazuje na wartości nieprzekraczające wytrzymałości izolacji na przepięcia wewnętrzne dla sieci średnich napięć [130].

Istotnym zjawiskiem towarzyszącym pracy sieci średniego napięcia są wynikające z występowania zwarcia doziemnych przepięcia ziemnozwarciowe wolnozmiennne. Przepięcia tego typu rozpatrywane są w stanie ustalonym, w chwili, gdy stan przejściowy jest zakończony, a zwarcie przewodu fazowego z ziemią pozostaje trwałe. W przypadku sieci elektroenergetycznych dotyczą one symetrycznie zasilanych układów trójfazowych, w których punkt neutralny ma napięcie względem ziemi równe zero. Zazwyczaj spotyka się niesymetryczną konstrukcję takich układów, zarówno w stanie pracy bezobciążeniowej, jak i pod obciążeniem, co wiąże się z różnymi wartościami przewodności i pojemności przewodów w układzie [58, 74, 75, 76]. Taka naturalna asymetria wprowadza w punkcie neutralnym napięcie U_0 , które nazywane jest napięciem asymetrii. Skutkuje to przesunięciem napięć fazowych U_{L1} , U_{L2} oraz U_{L3} na wykresie wskazowym napięcia. Najpowszechniejsza asymetria naturalna to asymetria pojemnościowa, która powoduje niewielkie zmiany w napięciach sieci trójfazowej. Skrajnym przypadkiem wzrostu U_0 jest zwarcie przewodu fazowego z ziemią, zaprezentowane na rysunku 2.15.



Rys. 2.15. Schemat układu trójfazowego ze zwarcie doziemnym w fazie L3

W zależności od impedancji przejścia Z_p można wyznaczyć napięcia w fazach trójfazowego układu przewodów. W przypadku zwarcia metalicznego, gdy impedancja przejścia Z_p jest równa zero, napięcie w fazie zwartej L3 jest równe 0, napięcie w fazach zdrowych L1 i L2 pozostaje bez zmian, a napięcie asymetrii rośnie w zakresie od zera do napięcia fazowego w zależności od impedancji uziemienia punktu neutralnego Z_n . W przypadku, gdy impedancja przejścia Z_p dąży do nieskończoności – napięcie asymetrii U_0 jest równe napięciu fazowemu, napięcie w fazie zwartej jest równe $U_{L3}=0$, zaś napięcia pozostałych przewodów przyjmują wartość międzyfazową $U_{L1}=U_{L13}$, $U_{L2}=U_{L23}$. W najpowszechniejszym przypadku, gdy impedancja przejścia należy do zakresu $0 < Z_p < \infty$ napięcia przyjmują wartości pośrednie między napięciem fazowym U_f i $\sqrt{3}U_f$. Napięcia w poszczególnych, niezwartych fazach, można obliczyć korzystając ze wzoru (2.100). W przypadku sieci z punktem neutralnym niebezpośrednio uziemionym zależność ta pozwoli na określenie napięć w fazach zdrowych na poziomie $\sqrt{3}U_f$.

$$U_{L1} = U_{L2} = \frac{\sqrt{3}U_f \sqrt{Z_0^2 + Z_0 Z_2 + Z_2^2}}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (2.100)$$

$$U_{L3} = 0 \quad (2.101)$$

Przebiegi w takich sytuacjach można opisać z wykorzystaniem dwóch współczynników – współczynnika zwarcia doziemnego k_e oraz współczynnika uziemienia sieci k_u . W przypadku k_e mówimy o stosunku napięcia fazowego U_{L1z} wyznaczonego względem potencjału ziemi dla dowolnego punktu fazy zdrowej w czasie trwania zwarcia w innej fazie do napięcia w tym miejscu przed zwarcie U_{L10} .

Współczynnik uziemienia jest równy ilorazowi współczynnika doziemienia i odwrotności $\sqrt{3}$. Jest on również nazywany współczynnikiem uziemienia punktu neutralnego:

$$k_e = \frac{U_{L1z}}{U_{L1o}} \quad (2.102)$$

$$k_e = \frac{U_{L1z}}{\sqrt{3}U_{L1o}} \quad (2.103)$$

W wyniku pojawienia się w układzie zwarcia doziemnego, poza powstaniem przepięć ziemnozwarciowych wolnozmiennych opisanych w stanie ustalonym można wyróżnić również przepięcia ziemnozwarciowe szybkozmiennne. Są one następstwem procesów przejściowych, które towarzyszą zmianie struktury sieci po pojawieniu się zwarcia przewodu z ziemią. W wyniku tych zmian, na przebiegi napięć roboczych lub przebiegi przepięć wolnozmiennych nakładają się przebiegi oscylacyjne tłumione. Częstotliwość tych przebiegów jest równa częstotliwości drgań własnych układu i jest zazwyczaj znacznie wyższa od częstotliwości, z którą pracuje sieć. W sytuacji wystąpienia zwarcia metalicznego lub pojawienia się zwarcia w układzie ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym proces ustaje po zaniku przebiegu oscylacyjnego. Inaczej sytuacja wygląda w niektórych przypadkach sieci o punkcie neutralnym uziemionym nieskutecznie, takich jak sieć izolowana bądź uziemiona przez rezystancję. W tych układach prąd pojemnościowy z jednej strony nie jest wystarczający do podtrzymania ciągłego palenia się łuku, a z drugiej jest zbyt duży, aby łuk uległ ostatecznemu zgaszeniu przy przejściu prądu przez zero. Oznacza to występowanie wielokrotnego zapłonu łuku i w konsekwencji występowanie procesów przejściowych. Wyjaśnienie mechanizmów narastania i gaszenia łuku omawiane są bardzo szeroko w literaturze [24, 51, 95].

Ze względu na poziom zagrożenia przepięciowego, jak i porażeniowego, najniebezpieczniejszym wariantem zwarć doziemnych są zwarcia doziemne trwałe o charakterze łukowym, w których możliwość samogaśnięcia łuku elektrycznego jest ograniczona. Ważnym elementem ograniczenia wpływu zwarć łukowych na izolację urządzeń jest zapewnienie prądu granicznego gaszenia łuku na poziomie do 30 A. Na parametr ten ma wpływ dobór sposobu pracy punktu neutralnego sieci średnich napięć [43, 119].

Tabela 2.2. Wartości współczynnika przebiegów ze względu na sposób uziemienia punktu neutralnego sieci SN [120]

Przebieg ziemnozwarciowe	Sposób uziemienia punktu neutralnego sieci SN		
	izolowany	uziemiony przez indukcyjność	uziemiony przez rezystancję
w chwili wystąpienia zwarcia doziemnego	2,5	2,5	2,1
podczas trwania zwarcia doziemnego z łukiem przerywanym	3,5 do 4,0	2,9	2,2
przy wyłączeniu zwarcia	2,0	-	-

Z punktu widzenia ochrony przebiegowej najkorzystniejszym wariantem jest uziemienie punktu neutralnego transformatora uziemianego przez rezystor. Dla takiego sposobu pracy sieci wartości współczynnika przebiegów są najmniejsze i wynika to ze stosunku prądu czynnego do pojemnościowego w prądzie zwarciovym. Zwiększenie wartości prądu czynnego będzie charakteryzowało układ lepszymi warunkami tłumienia przebiegów ziemnozwarciowych. Wadami tego rozwiązania są bardzo duży prąd ziemnozwarciowy i brak możliwości gaszenia zwań łukowych, co powoduje ograniczenia wykorzystania takiego rozwiązania w sieciach napowietrznych i mieszanych z dużym udziałem linii napowietrznych ze względu na zwiększone zagrożenie porażeniowe w takich układach. Rozwiązanie to jest natomiast polecane dla sieci kablowych. W przypadku przeważających w systemie elektroenergetycznym sieci mieszanych kablowo-napowietrznych należy skorzystać z innych sposobów pracy punktu neutralnego, którym są uziemienie przez dławik, dławik + AWSCz (Automatyka Wymuszania Składowej Czynnej) lub układ równoległy dławika i rezystora. W tych układach, przy zachowaniu możliwie jak najmniejszych przebiegów ziemnozwarciowych związanych ze zwiększeniem udziału prądu czynnego, możliwe jest zmniejszenie wartości prądu ziemnozwarciowego, co znacząco wpływa na bezpieczeństwo porażeniowe w takich układach [70, 79, 119].

2.6. Ochrona linii kablowych średniego napięcia przed zagrożeniem przepięciowym

Ograniczenie zagrożenia wynikającego z powstawania w układzie elektroenergetycznym przepięć zarówno o charakterze wewnętrznym, jak i zewnętrznym wymaga zastosowania odpowiednich środków ochrony. Dobór tych środków będzie zależny od poziomu napięć znamionowych i konfiguracji sieci, a także od sposobu pracy punktu neutralnego.

W urządzeniach o napięciu znamionowym z zakresu 6 kV-30 kV wystąpienie przepięć wewnętrznych o poziomie niebezpiecznym dla izolacji urządzeń w nim pracujących wymaga zainstalowania środków ochrony przeciwprzepięciowej, spośród których można wymienić:

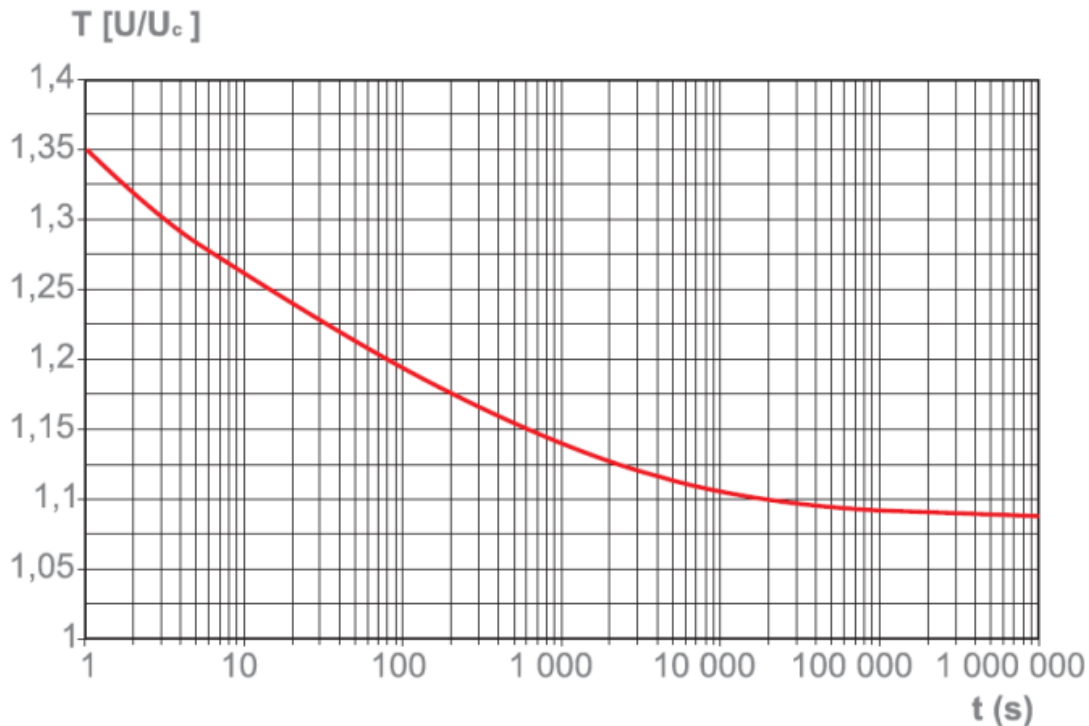
- iskierniki
- odgromniki wydmuchowe (dwuprzzerwowe iskierniki)
- warystorowe ograniczniki przepięć

Rodzaj dobranego ogranicznika przepięć będzie wynikał z jego przeznaczenia i wymagań oraz właściwości ochronnych. Podstawowym kryterium, które bierze się pod uwagę są warunki pracy, ze względu na pojawiające się przepięcia dorywcze i łączeniowe i możliwość ograniczenia poziomów napięć do wymagań stawianych izolacji chronionych urządzeń [108].

W celu doboru ogranicznika przepięć w sieci SN należy scharakteryzować parametry techniczne urządzenia, takie jak napięcie trwałej pracy U_c , znamionowy prąd wyładowczy I_n , wytrzymałość zwarciovą i wskaźnik cieplnych skutków przepływu ładunku elektrycznego Q_{th} [136]. Najważniejszym z wymienionych parametrów jest napięcie pracy trwałej U_c , z którym wiąże się poziom pozostałych parametrów, a przede wszystkim – gwarantowany poziom ochrony zabezpieczanego obiektu. W celu zapewnienia skutecznej ochrony napięcie pracy trwałej musi spełnić dwa podstawowe warunki:

- U_c musi być większe od napięcia sieciowego, które będzie długotrwale występować w warunkach eksploatacji ogranicznika przepięć na jego zaciskach,
- wytrzymałość ogranicznika na przepięcia wolnozmiennie będzie wyższa niż wartość spodziewanych w sieci przepięć wolnozmiennych. Warunek ten bazuje na charakterystyce wytrzymałości T ogranicznika przedstawionej na

przykładowym rysunku 2.16. Charakterystyka ogranicznika spełniająca ten warunek musi przebiegać powyżej wartości spodziewanych przebiegów mogących wystąpić w sieci.



Rys. 2.16. Typowa charakterystyka wytrzymałości T na napięcia wolnozmiennie [60]

W sieciach SN, w zależności od sposobu pracy punktu neutralnego, dobór ogranicznika przebiegów ze względu na napięcie trwałej pracy będzie się różnił. W przypadku sieci z punktem neutralnym izolowanym bądź sieci skompensowanej z nieznanym czasem zadziałania zabezpieczeń zwarciovych warunek bazuje na najwyższym napięciu sieci U_s . Napięcie to pojawia się w niedoziemionych fazach sieci w warunkach jednofazowego zwarcia doziemnego i może trwać długo. W takim wypadku, przy nieznanym czasie zadziałania zabezpieczeń, należy przyjąć, że napięcie trwałej pracy ogranicznika przebiegów U_c powinno spełniać zależność przedstawioną wzorem (2.104) [31].

$$U_c \geq U_s \quad (2.104)$$

W sieciach z punktem neutralnym uziemionym nieskutecznie metoda dokładna doboru ogranicznika przebiegów przebiega z wykorzystaniem informacji o czasie trwania zwarcia doziemnego. Zależność opisująca sposób doboru w takim układzie przedstawiona została wzorem (2.105). Obliczenie najmniejszej dopuszczalnej wartości

napięcia trwałej pracy ogranicznika bazuje, jak w przypadku wzoru (2.104), na najwyższym dopuszczalnym napięciu roboczym U_S , jak i na współczynniku wytrzymałości ogranicznika przepięć T , którego wartość można odczytać z rysunku 2.16.

$$U_c \geq \frac{U_S}{T} \quad (2.105)$$

Szczegółowe informacje dotyczące środków ochrony przed przepięciami zamieszczone zostały w tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Zasady ochrony od przepięć linii kablowej – ochrona przed przepięciami przenoszonymi przewodami sieci

Środki ochrony	Opis szczegółowy
Kompensacja prądu ziemnozwarciowego	Kompensacja prądu pojemnościowego zwarcia doziemnego jednofazowego za pomocą dławika, w celu umożliwienia samoczynnego gaszenia łuku
Uziemienie punktu neutralnego przez rezystancję	Szybkie tłumienie przepięć nieustalonych w stanie przejściowym dzięki odpowiednio dobranej wielkości rezystora
Automatyka zabezpieczeniowa SPZ (Samoczynne Ponowne Załączenie)	Zastosowanie podwójnego, trójfazowego SPZ
Dobór i koordynacja izolacji liniowej	Koordynacji podlega izolacja doziemna ze środkami jej ochrony przed przepięciami
Ograniczniki przepięć	- w układzie, w którym linia kablowa pracuje w polu liniowym pomiędzy liniami napowietrznymi zaleca się zastosowanie ograniczników przepięć przy głowicach kablowych niezależnie od długości linii kablowej, - w układzie, w którym linia kablowa połączona jest z linią napowietrzną z jednej, a ze stacją elektroenergetyczną z drugiej strony zaleca się zastosowanie ograniczników przepięć niezależnie od długości linii.

W przypadku potrzeby ochrony przed przepięciem powłoki zewnętrznej kabla elektroenergetycznego najpowszechniej wykorzystywanym środkiem ochrony pozostają ograniczniki przepięć SVL (ang. Sheath Voltage Limiter). Są to beziskiernikowe, warystorowe ograniczniki przepięć, które instaluje się w sytuacji, gdy na żyłę powrotnej kabla może pojawić się potencjał zagrażający powłoce. Urządzenia te instalowane są w specjalnych układach połączeń żyły powrotnej i zapewniają ochronę przeciwprzepięciową izolacji zewnętrznej kabla elektroenergetycznego oraz przekładek izolacyjnych muf separacyjnych w przypadku pojawienia się przepięć o charakterze wewnętrznym w powłokach przewodzących kabla [15, 47, 129].

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 wybór metody jej uziemienia powinien uwzględniać również inne aspekty, takie jak możliwość odprowadzania przez żyłę powrotną prądu zakłóceńowego czy minimalizację przebiegów pojawiających się w stanach nieustalonych. Podstawowym rozwiązaniem stosowanym w sieciach SN jest obustronne uziemienie żyły powrotnej linii kablowej, które spełniając większość warunków skutecznej pracy takiego uziemienia, powoduje równocześnie zwiększanie strat energii elektrycznej. Celem rozprawy jest określenie poziomów przebiegów ziemnozwarciowych pojawiających się w żyłach powrotnych kabli średniego napięcia i ocena wynikających z nich zagrożeń dla izolacji tych kabli, rozpatrując jednostronne odziemienie bądź nieuziemienie jednej lub dwóch faz żyły powrotnej. Wyznaczenie parametrów przebiegowych pozwoli na zaproponowanie rozwiązań eksploatacyjnych dla sieci SN i ograniczenie zagrożeń dla urządzeń oraz ludzi.

Tezy

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

Częściowe, jednostronne nieuziemienie 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 przebiegowe

oraz

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

Przeprowadzenie badań zjawisk przebiegowych powstających 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 przedstawionych w rozprawie obejmuje analizę zjawisk przebiegowych generowanych w żyłach powrotnej w różnej konfiguracji i przy różnych parametrach pracy sieci. W celu weryfikacji wstępnych tez dotyczących poziomów napięć w częściowo odziemionych żyłach powrotnych niezbędny był wybór metod badawczych, który pozwoliłby 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 DlgSILENT 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 napięć 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 problemów występujących w omawianych układach problemów. Efektem było zaproponowanie rozwiązań, które mają ograniczyć skutki występowania zagrożenie przepięciowego dla powłok zewnętrznych kabli elektroenergetycznych trójfazowej linii kablowej,
- ostatnim zadaniem było sformułowanie wniosków i podsumowanie przeprowadzonych prac.

4. Analiza zjawisk przebiegowych generowanych w żyłce powrotnej kabla elektroenergetycznego SN częściowo nieuziemionego

4.1. Metodyka badań

Występowanie różnorodnych zjawisk fizycznych w układach elektroenergetycznych, których właściwości są nieznane, a podejrzewa się, że mogą mieć wpływ na pracę tego układu, wymaga przeprowadzenia badań, których metodologia będzie pozwalała na przybliżenie i rozszerzenie wiedzy o charakterze tych zjawisk. Omawiane w rozprawie zagadnienie dotyczy zjawiska fizycznego, zaistniałego w rzeczywistych strukturach, złożonych z grupy elementów zmiennych, zatem układ metod dobranych ze względu na skuteczność wykonania prac w tej dziedzinie będzie wynikał z możliwości realizacji zamierzonych celów w ramach badań naukowych. Wybór odpowiedniej metody spośród metod badawczych wynika z charakteru zjawiska i wymaga doboru metod komplementarnych.

Eksperyment naukowy polega na czynnej modyfikacji zjawiska stanowiącego przedmiot badania, dokonywanej w celu poznania zależności przyczynowych pomiędzy składnikami lub warunkami przebiegu badanego zjawiska [134, 139]. Przeprowadzone w ramach rozprawy badania mają na celu potwierdzenie tez dotyczących zjawisk przebiegowych towarzyszących zmianom sposobu pracy żyły powrotnej kabla elektroenergetycznego z uwzględnieniem ich częściowego odziemienia. W tym celu zdecydowano się na metodę eksperymentalną oraz metodę symulacji komputerowej, które w sposób komplementarny mogą odpowiedzieć na pytania dotyczące wartości parametrów opisujących zjawiska przebiegowe pojawiające się w rozpatrywanych przypadkach. Dobór metod przeprowadzania badań podyktowany jest warunkami, w jakich należy przeprowadzić eksperyment, ich kosztami oraz bezpieczeństwem. Celowość oraz zakres badań eksperymentalnych zostały określone z wykorzystaniem doświadczenia wynikającego z eksploatacji sieci elektroenergetycznej i potwierdzone za pomocą narzędzi komputerowych. Badania terenowe przeprowadzono we współpracy ze spółką dystrybucyjną energii elektrycznej Enea Operator Sp. z o.o. jako etap pracy zleconej pt. „Ograniczenie strat przesyłowych w żyłach powrotnych kabli średniego napięcia bez narażania izolacji powłoki na uszkodzenia elektryczne”. Za zgodą i przy współpracy operatora sieci wykonane zostały badania terenowe pozwalające na

przeprowadzenie eksperymentu w warunkach rzeczywistych i odszukanie zależności przyczynowych między elementami lub warunkami przebiegu badanego zjawiska. Metoda eksperymentalna, polegająca na aktywnej obserwacji, zakładała przeprowadzenie badań terenowych w istniejącym już układzie sieci średniego napięcia, wykorzystując wiedzę grupy badawczej i możliwości operatora sieci. Równolegle do badań terenowych wykorzystano metodę symulacji komputerowej, która pozwoliła na weryfikację możliwości wybranego programu komputerowego w zakresie analizy zagadnienia ujętego w rozprawie. W tym celu przeprowadzono porównanie wyników uzyskanych w trakcie badań metodą eksperymentalną i tych pochodzących z zamodelowanej w programie komputerowym testowej sieci, będącej odpowiednikiem rzeczywistego układu. Wybór etapów i wariantów rozważanych w trakcie przeprowadzania symulacji komputerowej w ramach dalszych, pogłębionych badań nad omawianym zjawiskiem, wynikał z rezultatów wskazanych badań terenowych, przy uwzględnieniu szeregu zmiennych bazujących na doświadczeniu Operatorów spółek dystrybucyjnych ze sposobami pracy sieci oraz wiedzy pracowników jednostek naukowych z nimi współpracujących.

Wybór symulacji komputerowej jako metody uzupełniającej badania eksperymentalne wymaga wyboru narzędzia, które pozwoli na stworzenie modelu systemu pozwalającego na weryfikację własności badanego obiektu. Spośród szerokiego wyboru programów komputerowych pozwalających na odwzorowanie elementów systemu elektroenergetycznego zdecydowano o wyborze programu firmy DigSILENT PowerFactory.

Power Factory to aplikacja komputerowa służąca do symulacji stanów pracy układów elektrycznych z szerokim wyborem narzędzi pozwalających na analizowanie zagadnień z zakresu generacji prądu elektrycznego, pracy systemu przesyłu i dystrybucji energii elektrycznej oraz systemów przemysłowych współpracujących z systemem elektroenergetycznym. Zakres programu obejmuje standardowe i złożone zastosowania dotyczące zarówno rozproszonej generacji, jak i monitorowania i nadzoru wieloelementowych systemów testowych [8, 52, 54, 59, 82]. W przypadku omawianej kwestii wykorzystywany będzie moduł pozwalający na symulacje przebiegu zwarcia doziemnego w zaprojektowanej sieci testowej, z wykorzystaniem narzędzi pozwalających

na odczyt parametrów chwilowych w powłokach kabla elektroenergetycznego będącego fragmentem tej sieci [80, 81, 83].

4.2. Modelowanie kabli

Zamodelowanie układu elektrycznego w programie symulacyjnym wymaga stworzenia modeli matematycznych rzeczywistych urządzeń pracujących w tym układzie, korzystając z ich parametrów fizycznych i wiedzy o ich budowie. Dokładne odwzorowanie istniejącego elementu sieci elektroenergetycznej wymaga zastosowania złożonych algorytmów obliczeniowych, składających się z dużej liczby przekształceń matematycznych, które w przypadku wykorzystania klasycznej metody obliczeniowej byłyby bardzo trudne, a czasem niemożliwe do przeprowadzenia. Stąd wynika szerokie zastosowanie metod symulacji komputerowej, które wykorzystując informacje o stanie faktycznym urządzeń, pozwalają na stworzenie wielopoziomowych modeli o dużej złożoności i pozwalają na symulację zjawisk elektromagnetycznych w sposób niedostępny dla metod klasycznych [41, 86, 125, 131].

W przypadku modelowania elektroenergetycznych linii kablowych, stanowiących fragmenty obwodów ziemnopowrotnych, korzystając z konwencjonalnych metod obliczania ich impedancji, zakłada się uniezależnienie parametrów jednostkowych kabla elektroenergetycznego od częstotliwości, a zatem ograniczenie obliczeń tylko do stanów ustalonych. W programach pozwalających na symulację stanów nieustalonych wykorzystywane są modele opierające się na parametrach jednostkowych, zależnych od częstotliwości. Modele kablowe tworzone na potrzeby symulacji stanów nieustalonych, którymi również są przepięcia ziemnozwarciowe, bazują jednak na innych założeniach niż modele do obliczeń stanów ustalonych. W wybranym do badań symulacyjnym programie PowerFactory, do symulacji EMT w układach z liniami kablowymi udostępnione zostały dwa modele parametrów rozproszonych. Są to modele o stałych parametrach oraz model zależny od częstotliwości w dziedzinie fazowej. Ten drugi jest dostępny w dwóch postaciach ULM (ang. Universal Line Model) [126] oraz FDCM (ang. Frequency Dependent Cable Model) [67]. W przypadku wykonywanych na potrzeby rozprawy badań wykorzystujących symulacje komputerowe wykorzystano model ULM.

Najogólniej ujmując, modele linii przesyłowych w ujęciu częstotliwościowym można scharakteryzować za pomocą dwóch zależnych od częstotliwości macierzy funkcji przenoszenia, którymi są funkcja propagacji $A(\omega)$ oraz charakterystyczna admitancja $Y_c(\omega)$, a wyrazić można je za pomocą wzorów (4.1) oraz (4.2).

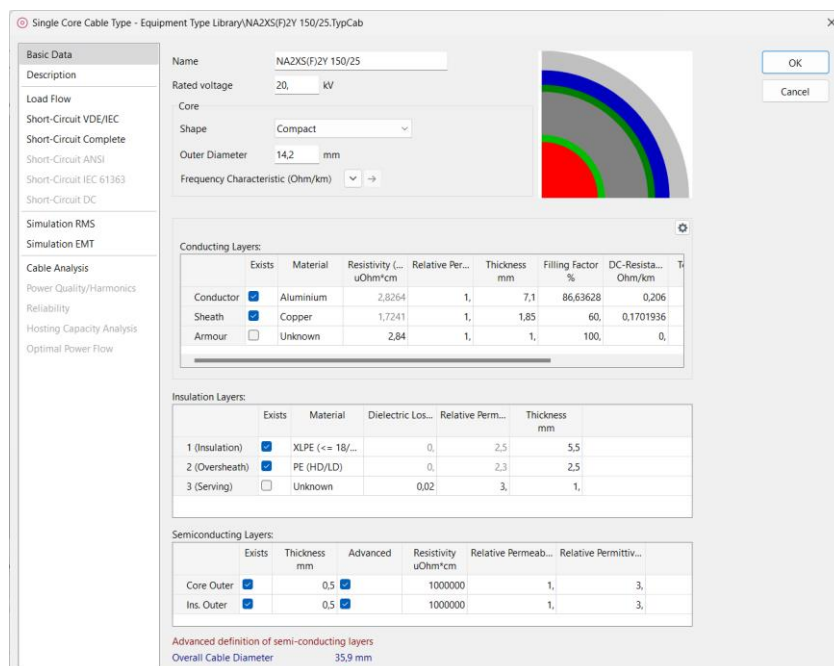
$$\mathbf{A} = e^{-\sqrt{\mathbf{YX}}l} \quad (4.1)$$

$$Y_c = Z^{-1} \cdot \sqrt{\mathbf{YX}} \quad (4.2)$$

gdzie $\mathbf{Z}$ – macierz impedancji, $\mathbf{Y}$ – macierz admitancji, l - długość linii.

Symulację w dziedzinie czasu można sformułować używając odwrotnej transformaty Fouriera powyższych funkcji, a następnie rozwiązując powiązane równania w dziedzinie czasu. Szczegółowy opis metody oraz sposobu obliczenia macierzy funkcji propagacji $\mathbf{A}(\omega)$ oraz macierzy admitancję $\mathbf{Y}(\omega)$ dostępny jest w dokumentacji programu [127].

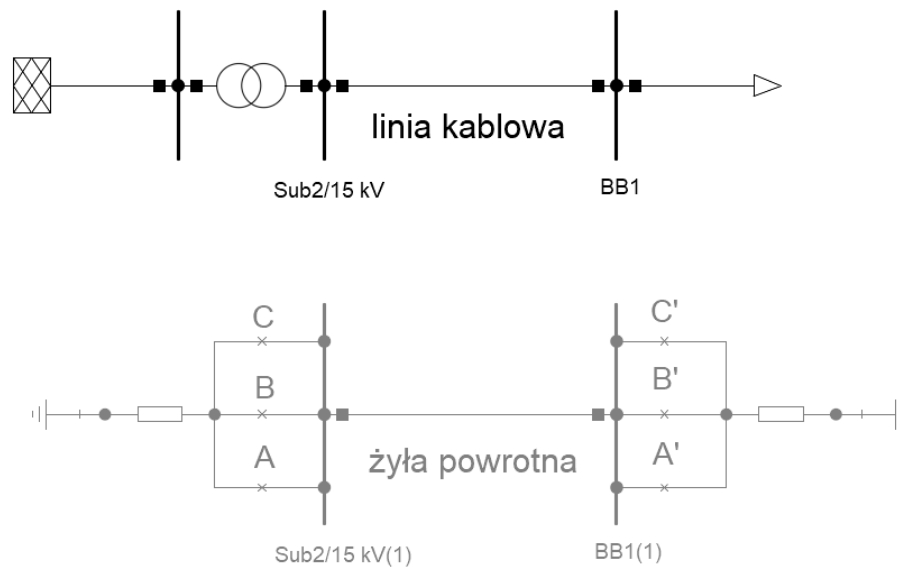
Pomimo realnych zalet metod symulacji komputerowych, wykorzystywanych do obliczeń parametrów pracy elektroenergetycznych linii kablowych, niezbędne są uproszczenia względem rzeczywistego układu, które pozwolą na odwzorowanie elementów systemu. W przypadku wybranego do celów rozprawy programu DigSILENT Power Factory, modelowanie powłok kabla jest możliwe korzystając z modułu Cable Definition, który pozwala na wybór rodzaju kabla z gotowej biblioteki [27]. Zdefiniowanie zawartości biblioteki stanowi zadanie użytkownika programu, a zatem możliwy jest dobór szczegółowych parametrów kabla uwzględniający parametry zawarte w kartach katalogowych dla wybranych przez użytkownika kabli. Podstawowym uproszczeniem wynikającym z ograniczeń programu jest modelowanie powłok kabla jako jednorodnych ośrodków i określanie procentowego poziomu wypełnienia przestrzeni przewodami tworzącymi żyłę roboczą oraz przewodami i taśmami tworzącymi żyłę powrotną. Określenie dokładnych parametrów powłok przewodzących jest możliwe również poprzez określenie rezystancji powłoki zgodnie z danymi katalogowymi, co pozwala programowi na dostosowanie procentowego poziomu wypełnienia dla określonych parametrów materiałowych. Dane dotyczące materiałów i charakterystyk powłok kabla są możliwe do zmiany w pełnym zakresie. Na rysunku 4.1. przedstawiony został widok modułu pozwalającego na dodanie kabla elektroenergetycznego do biblioteki programu wraz z niezbędnymi parametrami, dla przykładowego zamodelowanego w programie kabla NA2XS(F)2Y 150/25, z modelu którego korzystano w dalszych etapach badań.



Rys. 4.1. Widok modułu do modelowania powłok kabla w Power Factory dla przykładowego kabla elektroenergetycznego NA2XS(F)2Y 150/50 12/20 kV

Wykorzystanie w programie Power Factory zamodelowanego kabla wymaga od użytkownika przypisania go z biblioteki do istniejącego na płaszczyźnie roboczej elementu systemu. W systemie kablowym stworzonym w ten sposób nie ma możliwości modyfikowania układu połączeń żył powrotnych, ponieważ stanowią integralną część układu. Taką możliwość uzyskuje się dopiero poprzez wydzielenie żyły powrotnej kabla jako kopii kabla podstawowego i stworzenie funkcjonalnego fragmentu sieci. Układ ten stanowi odrębny element podlegający zmianom konfiguracji połączeń z możliwością wydzielenia poszczególnych faz żyły powrotnej, a w konsekwencji z możliwością przeprowadzenia rekonfiguracji sposobu uziemienia. Taki układ pozwala na zastosowanie uziemienia obustronnego i jednostronnego z modyfikacjami. Wyodrębnienie żyły powrotnej umożliwia również przeprowadzenie symulacji stanów pracy poszczególnych faz żyły powrotnej, a co za tym idzie otrzymanie przebiegów czasowych wielkości fizycznych towarzyszących tym stanom. Rozwiązanie to, wraz z rozległymi możliwościami symulacji stanów ustalonych i nieustalonych pracy sieci omawianego oprogramowania komputerowego, pozwala na wykorzystanie tego programu do przeprowadzenia obliczeń komputerowych w celu określenia zagrożenia ciągłości izolacji kabla elektroenergetycznego w wyniku wystąpienia przepięć

ziemnozwarciowych wyindukowanych w żyłach powrotnych tego kabla, przy zmianie konfiguracji połączeń żył powrotnych z ziemią. Rozwiązanie pozwalające na analizę stanów pracy żyły powrotnej kabla wykorzystane w modelu sieci elektroenergetycznej stworzonej na potrzeby badań symulacyjnych w tej części rozprawy zostało przedstawione na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Reprezentacja żył powrotnych trójfazowego układu jednożyłowych kabli elektroenergetycznych w celu modyfikacji sposobu pracy jej uziemienia z wyprowadzeniami poszczególnych faz żył powrotnych na obu końcach

Rysunek przedstawia podstawowy model układu kablowego do analizy zjawisk zachodzących w żyłę powrotnej trójfazowej linii kablowej średniego napięcia składający się z dwóch równoległych układów, posiadających różne możliwości zmian parametrów. Dla jednożyłowego kabla elektroenergetycznego średniego napięcia w systemie trójfazowym wyprowadzone zostały fazy A, B oraz C i połączone do uziemień znajdujących się na początku i końcu ciągu kablowego. Model żyły powrotnej z wydzielonymi na obu końcach fazami można wyposażyć w dwa łączniki dla każdej z faz kabla, które pozwolą na odłączanie poszczególnych żył powrotnych kabla od uziemienia. Zaprojektowane uziomy to elementy o rezystancji równej rezystancji uziemień elementów znajdujących się na obu końcach kabla, takich jak słupy czy stacje lub uziemienia stosowane na potrzeby ciągów kablowych. Parametry wszystkich elementów wykorzystanych do zamodelowania kabla elektroenergetycznego wraz z jego

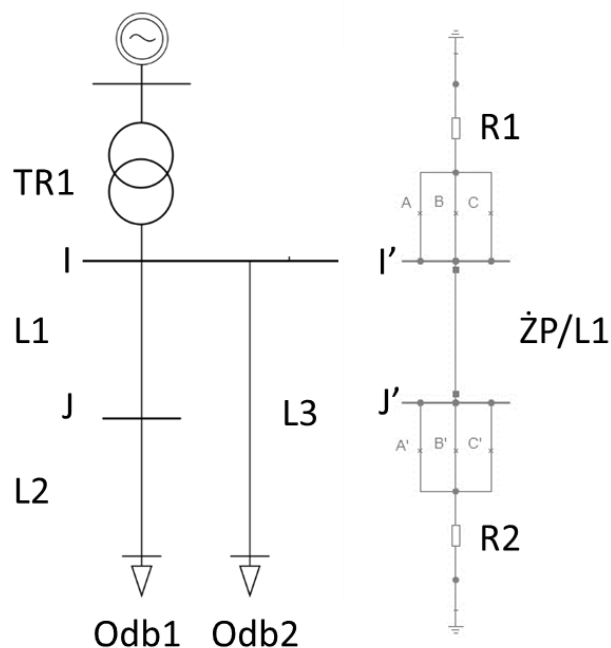
uziemieniem oraz wykorzystywane w trakcie badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych konfiguracje tego uziemienia zostały opisane w podrozdziale 4.3.

4.3. Model sieci elektroenergetycznej w programie Power Factory

Powstawanie przebiegów w układach elektroenergetycznych towarzyszy zjawiskom, które zaburzają normalną pracę układu. W przypadku sieci przesyłowych i dystrybucyjnych największym wyzwaniem są sytuacje towarzyszące pojawieniu się stanów nieustalonych, w tym zwarć doziemnych i międzyfazowych. W przypadku sieci średniego napięcia duże znaczenie, z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy układów elektrycznych, jak i bezpieczeństwa porażeniowego, mają zwarcia doziemne i towarzyszące im przebiegi ziemnozwarciowe. Ich charakterystyka została omówiona w rozdziale 3., natomiast w tej części rozprawy będą one podstawowym kryterium oceny proponowanych wariantów pracy sieci kablowych SN. Przeprowadzenie badań terenowych, w trakcie których potwierdzono możliwość pojawienia się przebiegów ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego pracujących ze specjalnym uziemieniem, poprzedzone zostało wykonaniem wstępnych symulacji komputerowych. Celem pierwszego etapu eksperymentów badawczych było uzasadnienie celowości przeprowadzenia badań terenowych oraz weryfikacja możliwości narzędzia komputerowego w zakresie wiarygodnego modelowania stanów nieustalonych w układach z kablami elektroenergetycznymi. Wykorzystanym programem komputerowym do celów przeprowadzenia badań symulacyjnych jest program Power Factory firmy DlgSILENT GMBH.

Dobór parametrów sieci testowej wynikał z warunków, które miały występować w trakcie badań terenowych. Pozyskane od operatora dane urządzeń i informacje o układzie połączeń pozwoliły na zamodelowanie fragmentu sieci odzwierciedlającego obiekt badany. Uzyskanie wyników symulacji komputerowej zbliżonych do rzeczywistego stanu sieci, przy jednoczesnym ograniczeniu złożoności modelu, wymagało wydzielenia elementów, których wpływ na omawiane zjawisko przebiegów ziemnozwarciowych będzie znaczący. W ramach wstępnych badań symulacyjnych przeprowadzono w pierwszym etapie symulacje z wykorzystaniem podstawowych informacji o układzie sieciowym, w którym miały odbyć się badania eksperymentalne, natomiast po uzyskaniu od

operatora wszystkich niezbędnych informacji przeprowadzono uzupełniające badania symulacyjne. Warunki, dane oraz wyniki obu tych analiz zostaną przedstawione poniżej jako badania symulacyjne wstępne. Na rysunku 4.3 przedstawiony został model sieci testowej, do którego zaprojektowania wykorzystano moduły wbudowane w programie Power Factory. Zamodelowane w programie fragmenty odpowiadają wycinkowi sekcji II stacji GPZ Mogilno składającej się ze źródła, transformatora zasilającego WN/SN oraz dwóch pól liniowych. Pole liniowe nr 11 to pole testowe, z przyłączoną do niego linią kablową, w której wykonywane zostały pomiary poziomów przepięć ziemnozwarciowych. Za linią kablową w polu 11 zamodelowana została połączona z linią kablową linia napowietrzna, w której zamodelowane zostało zwarcie doziemne będące źródłem przepięć w badanym układzie. Pole liniowe nr 12 pełni w modelu rolę funkcjonalną i pozwala na dopasowanie obciążenia transformatora zasilającego. W przypadku badań symulacyjnych wstępnych sieć pracuje z punktem neutralnym izolowanym.



Rys. 4.3. Model testowy fragmentu sieci średniego napięcia do analizy porównawczej przedstawiający układ do zmian konfiguracji uziemienia żyły powrotnej kabla elektroenergetycznego – symulacje wstępne

Wszystkie elementy modelu symulacyjnego to urządzenia trójfazowe działające na prąd przemienny o częstotliwości 50 Hz. Parametry odcinka kablowego o długości 370 m

wychodzącego ze stacji i połączonego z głowicą kablową na słupie w ciągu pola nr 11 zbudowanego z kabla NA2XS(F)2Y 150/25 12/20 kV zamodelowano zgodnie z wymaganiami narzędzia komputerowego opisanymi w rozdziale 4.2. Zgodnie ze standardami, żyła powrotna tego kabla jest reprezentowana jako odrębny obiekt, dzięki czemu możliwe jest wykonanie operacji modyfikujących sposób jej uziemienia. Żyły powrotne wszystkich faz połączone są na początku kabla z uziemieniem stacji WN/SN, natomiast na końcu kabla z uziemieniem słupa linii napowietrznej z głowicą kablową.

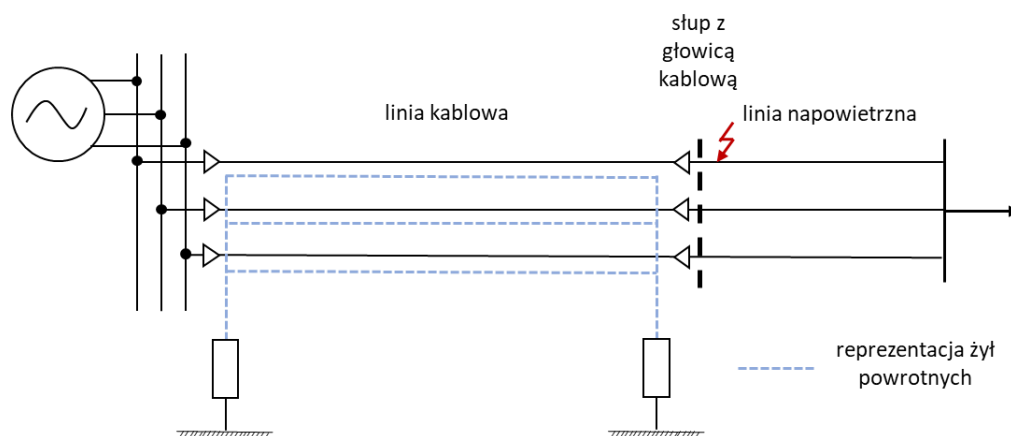
Tabela nr 4.1. Parametry elementów modelu sieci.

Oznaczenie na schemacie	Nazwa elementu	Parametry symulacji wstępnych
System	system elektroenergetyczny	$S_k'' = 10000$ MVA
TR1	transformator zasilający 110/15	$S_n = 16$ MVA $U = 110/15$ $u_z = 8\%$ $\Delta p_{Cu} = 15$ MW
L1	linia kablowa	NA2XS(F)2Y 150/25 12/20 kV ułożona na głębokości 1 m układ płaski
ŻP/L1	żyła powrotna linii kablowej	miedziana żyła o grubości znamionowej opony 2,5 mm
L2	linia napowietrzna	PAS70 1,1 km
L3	linia napowietrzna	PAS70 4 km
Odb1	odbiornik nr 1	$P_1 = 0,5$ MW $Q_1 = 0,1$ Mvar
Odb2	odbiornik nr 2	$P_2 = 2$ MW $Q_2 = 0,2$ Mvar
R1	rezystancja uziemienia stacji	$R_{E110} = 0,5$ Ω
R2	rezystancja uziemienia słupa	$R_E = 7,4$ Ω
RP	rezystancja przejścia	$R_p = 0$ Ω

W modelowanym układzie wyprowadzenia żył powrotnych przyłączone są do uziemień z wykorzystaniem łącznika, który umożliwi przeprowadzenie rekonfiguracji sposobu uziemienia tych powłok. Niezbędne do wykonania symulacji komputerowych dane urządzeń elektroenergetycznych pracujących w badanej sieci zostały przedstawione w tabeli zbiorczej nr 4.1. Informacje dotyczące parametrów elementów modelu sieci udostępnione zostały przez właściciela sieci, a zweryfikowane wykorzystując katalogi producentów tych urządzeń [62, 64, 65, 66].

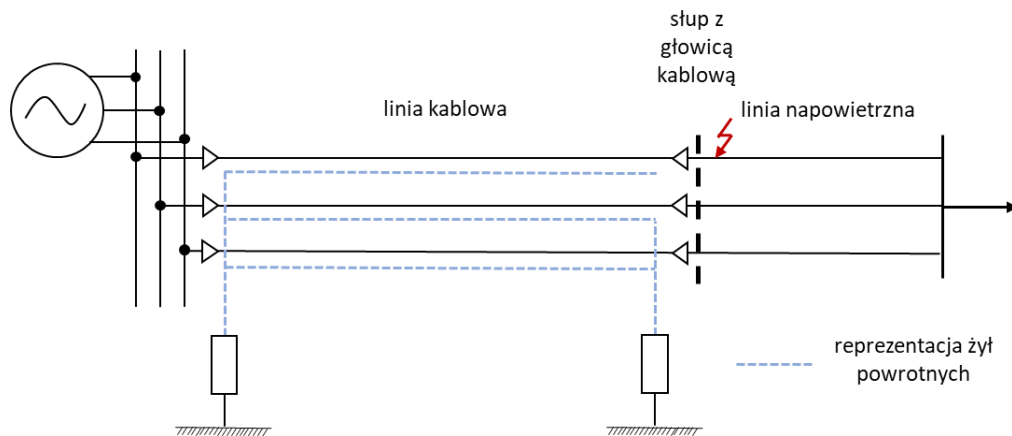
W ramach badań przewidziano wykonanie minimum czterech prób zwarciovych, którym towarzyszyć miał pomiar parametrów ziemnozwarciowych w stacji oraz przyśłupie elektroenergetycznym z głowicą kablową. Kroki przeprowadzania symulacji komputerowych podyktowane były ustaleniami dotyczącymi możliwości przeprowadzenia prób zwarciovych w sieci oraz wybranymi do zweryfikowania wariantami sposobu uziemienia żył powrotnych kabli w trójfazowym układzie sieci średniego napięcia. Schematy odpowiadają wariantom konfiguracji uziemienia żył powrotnych wprowadzonych w podrozdziale 2.4. *Sposoby ograniczania strat w żyłach powrotnej kabli SN* i uzupełnione są o wariant 0, który reprezentuje stan początkowy, w jakim pracowały żyły powrotne badanej linii kablowej, a zatem uziemienie obustronne. 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:

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



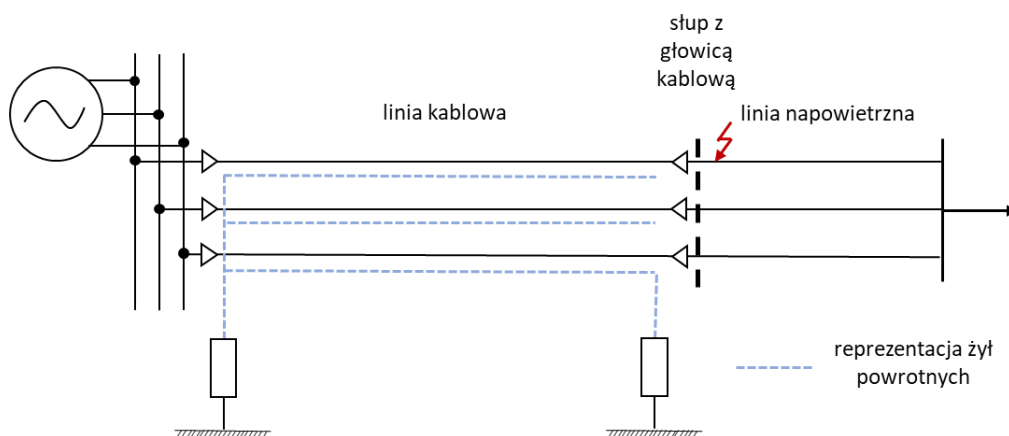
Rys. 4.4. Schemat poglądowy konfiguracji połączenia żył powrotnych w linii kablowej

- 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



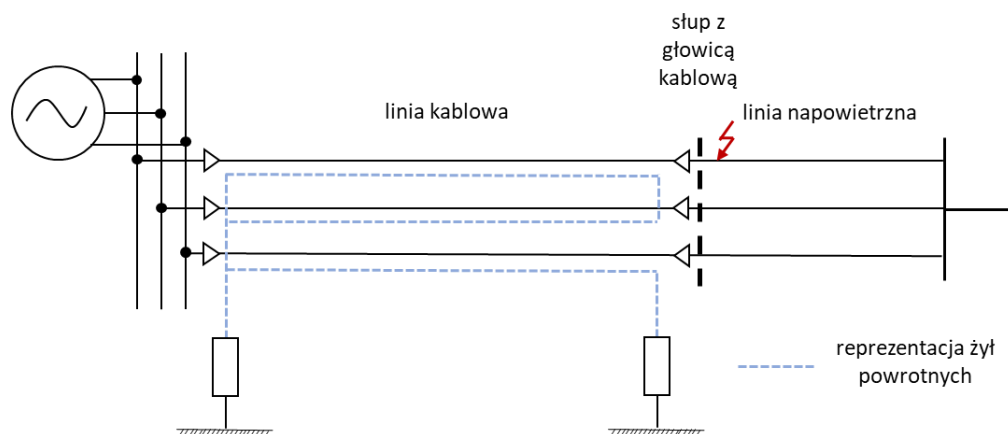
Rys. 4.5. Schemat poglądowy konfiguracji połączenia żył powrotnych w linii kablowej

- 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. 4.6. 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. 4.7. Schemat poglądowy konfiguracji połączenia żył powrotnych w linii kablowej

Warianty pracy układu zostały dobrane na podstawie zaproponowanej zmiany sposobu uziemienia żyły powrotnej mającej pozytywny wpływ na zmniejszenie się strat przesyłowych w liniach kablowych średniego napięcia, w związku ze zmniejszeniem się prądów powłokowych indukowanych w żyłach powrotnych. Dla niezmiennych parametrów sieciowych i stałych parametrów urządzeń przeprowadzono wstępne i uzupełniające symulacje zakładające cztery stany pracy sieci w trakcie przeprowadzenia badań terenowych, których schematy poglądowe zamieszczone zostały na rysunkach 4.4, 4.5, 4.6 oraz 4.7:

Badania symulacyjne poprzedzające próby zwarciove zrealizowano wykorzystując moduł Simulation RMS/EMT pozwalający na wybranie zdarzenia pojawiającego się w określonym przez użytkownika czasie trwania symulacji i określenie wartości poszczególnych parametrów, przy których ta symulacja ma zostać przeprowadzona. Ze względu na nieustalony stan zjawiska, jakim są analizowane w trakcie badań przebiegi ziemnozwarciowe, do metody superpozycji, która została wybrana jako metoda obliczania rozptyłów prądów w zamodelowanej sieci, dołączono symulacje przeprowadzone na wartościach chwilowych, co pozwoliło na uzyskanie informacji o parametrach chwilowych napięć indukowanych w żyłach powrotnych w trakcie trwania zwarcia doziemnego. Do celów badań wstępnych zamodelowane zostało zwarcie jednofazowe z ziemią w linii napowietrznej przyłączonej na końcu ciągu kablowego

w pobliżu słupa z głowicą kablową o rezystancji przejścia równej rezystancji uziemienia tego słupa. Miejsce zwarcia wyznaczono w odległości 10% długości linii od słupa z głowicą. Cały przebieg wartości chwilowych mierzonych napięć w żyłce powrotnej zawiera się w czasie równym 5 s. Symulacja rozpoczyna się od normalnego stanu pracy sekcji, natomiast w 0,5 s od momentu rozpoczęcia obliczeń pojawia się zdarzenie zwarciove o zadanych przez użytkownika parametrach, które zostaje wyłączone po czasie 3 s w przypadku symulacji wstępnych. Krok iteracji to 0,01 ms, a jego wielkość została dobrana z uwzględnieniem możliwości obliczeniowych programu komputerowego oraz mając na uwadze niezbędną do uzyskania pełnego obrazu przebiegu napięcia chwilowego dokładność pomiaru. W trakcie wstępnych analiz zdecydowano się na wykonanie zwarcia tylko w fazie A linii napowietrznej połączonej z badanym ciągiem kablowym. Związane jest to z wykorzystaniem tej fazy w trakcie wykonywania modyfikacji sposobu uziemienia żyły powrotnej we wszystkich rozpatrywanych wariantach, a zatem ze stworzeniem najbardziej prawdopodobnych warunków do powstania przepięć ziemnozwarciowych.

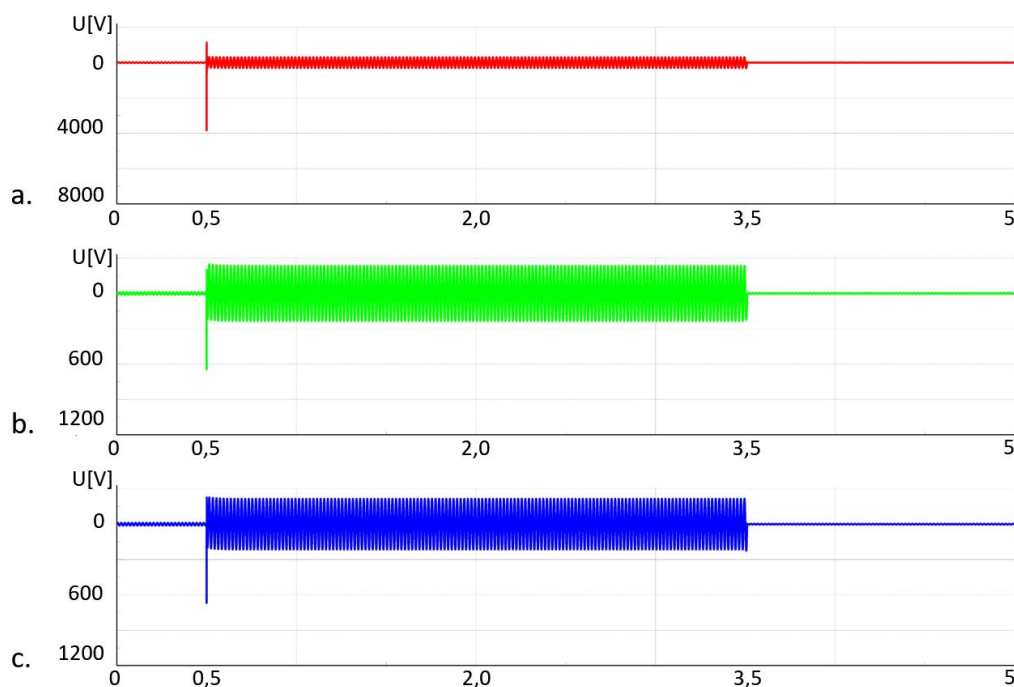
4.4. Wstępne analizy testowe zjawisk przepięciowych zachodzących w żyłce powrotnej kabla jako następstwa zwarcia doziemnego – symulacje komputerowe w programie Power Factory

Przeprowadzenie wstępnych symulacji komputerowych z wykorzystaniem omówionego we wstępie do rozdziału programu Power Factory firmy DlgSilent 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 przepięć w żyłkach powrotnych kabla średniego napięcia, który pozwolił na dobranie elementów układu pomiarowego oraz ustalenie niezbędnej przekładni układu wysokonapięciowego rezystancyjnego dzielnika napięciowego, który na potrzeby badań terenowych został specjalnie zaprojektowany i wykonany przez Autorkę. Najwyższych wartości, zgodnie z literaturą, spodziewano się dla wariantów zakładających częściowe, jednostronne nieuziemiaenie żył powrotnych. Poniżej przedstawione zostały przebiegi napięć indukowanych w żyłkach powrotnych kabli elektroenergetycznych dla trzech wariantów

pracy tych żył, otrzymane w wyniku symulacji zdarzenia obejmującego zwarcie doziemne w fazie A połączonej poprzez głowicę kablową do kabla elektroenergetycznego linii napowietrznej, zgodnie z rysunkami 4.5 do 4.7. 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 4.3, natomiast wykorzystane parametry elementów modelu zamieszczono w tabeli 4.1. Kolejność zdarzeń zamodelowana w procesie symulacji komputerowej została opisana we wcześniejszych fragmentach tego podrozdziału i obrazuje napięcie indukowane w żyłach powrotnych w stanie pracy normalnej, w stanie zakłóceniovym oraz po jego ustaniu. Widoczne poniżej wykresy pochodzą z modułu Diagrams dostępnego w wykorzystywanym programie komputerowym, a wartości maksymalne, przedstawione w tabeli 4.2, zostały pozyskane z wykorzystaniem narzędzi tego modułu.

Wariant a

Przypadek pierwszy dotyczy sytuacji, w której zamodelowana elektroenergetyczna linia kablowa pracująca z żyłami powrotnymi uziemionymi obustronnie zostaje zmodyfikowana w punkcie przyłączenia do uziemienia słupa linii napowietrznej z głowicą kablową. W fazie A, zgodnie z rysunkiem 4.5, żyła powrotna zostaje jednostronnie odłączona od uziemienia, co w konsekwencji ma spowodować brak przepływu prądu powłokowego i obniżenie strat energii elektrycznej w układzie. W takiej sytuacji zgodnie z literaturą przedmiotu, można spodziewać się powstawania w żyłach powrotnej fazy A znacznej różnicy potencjałów, która spowodowana będzie nieuziemieniem obustronnym żyły i przepływem prądu zakłóceniovego przez żyłę roboczą. Na rysunku 4.8 przedstawione zostały przebiegi napięć indukowanych w żyłach powrotnych wszystkich trzech faz linii kablowej otrzymane w wyniku przeprowadzenia symulacji na modelu sieci z linią kablową. Rejestracja napięć odbywała się w miejscu przyłączenia kabla elektroenergetycznego do linii napowietrznej i wynika z wybranego do badań terenowych miejsca rejestracji przepięć ziemnozwarciowych, które miało znajdować się na słupie linii napowietrznej z głowicą kablową. Przedstawione przebiegi, ze względu na mały krok iteracji obliczeń, nie oddają sinusoidalnego charakteru przebiegu napięcia w czasie pracy normalnej ani w czasie po wytłumieniu przepięcia ziemnozwarciowego.

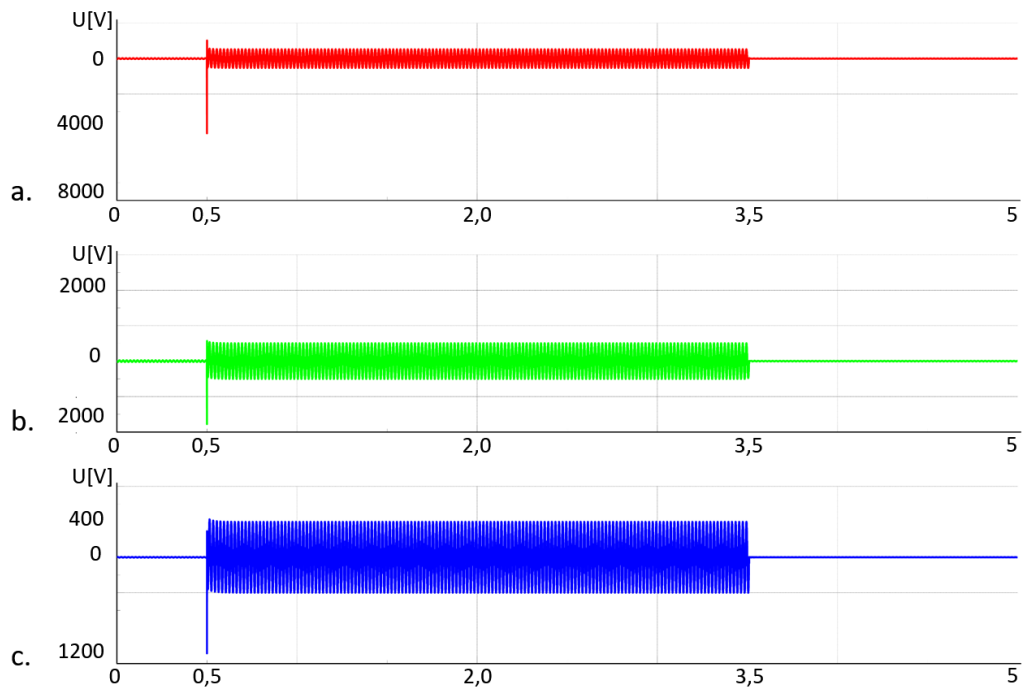


Rys. 4.8. Przebiegi napięć indukowanych w żyłach powrotnych trójfazowego kabla elektroenergetycznego na końcu ciągu kablowego: a. faza A, b. faza B, c. faza C

Najistotniejszą informacją otrzymaną dzięki symulacji komputerowej są maksymalne przebiegi ziemnozwarciowe dla wszystkich trzech faz. Jak widać, na poszczególnych przebiegach napięć największa wartość przebiegu ziemnozwarciowego pojawia się w żyłę powrotnej fazy A, przez której żyłę roboczą linii kablowej płynie prąd zasilający miejsce zwarcia. Otrzymana w wyniku symulacji maksymalna wartość przebiegu to ok. 4 kV. W żyłach powrotnych faz obustronnie uziemionych B i C przebiegi osiągnęły stosunkowo niewielką wartość 0,6 kV.

Wariant b

Ograniczenie strat energii elektrycznej wynikające z przepływu prądów powłokowych możliwe jest również poprzez wykorzystanie podwójnego, jednostronnego nieuziemiaenia żył powrotnych kabla elektroenergetycznego. W takiej konfiguracji odłączeniu od uziomu słupa elektroenergetycznego ulegają dwie żyły powrotne, zgodnie z rysunkiem 4.6. W wyniku symulacji komputerowych omówionych w tym podrozdziale, otrzymano napięcia chwilowe indukowane w żyłach powrotnych wszystkich trzech faz trójfazowej linii kablowej w trakcie trwania zwarcia doziemnego w fazie A na końcu ciągu kablowego, w miejscu połączenia przewodów roboczych poszczególnych faz kabla elektroenergetycznego i linii napowietrznej.



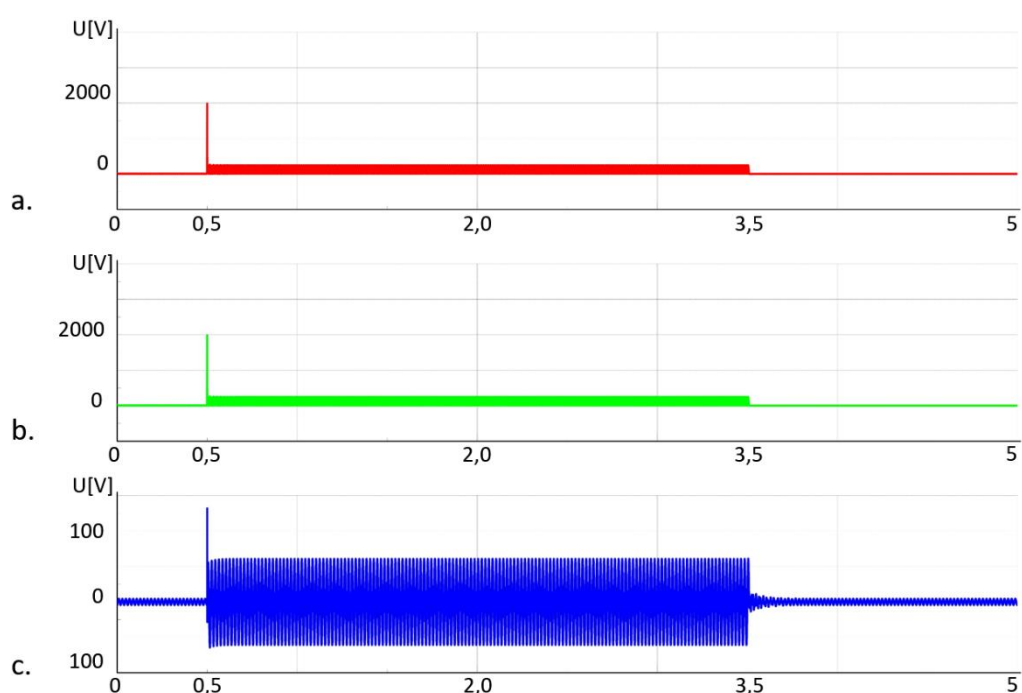
Rys. 4.9. Przebiegi napięć indukowanych w żyłach powrotnych trójfazowego kabla elektroenergetycznego na końcu ciągu kablowego: a. faza A, b. faza B, c. faza C

Jak widać na rysunku 4.9, w chwili pojawienia się zakłócenia w ciągu kablowo-napowietrznym, w żyłach powrotnych wszystkich trzech faz pojawia się przepięcie ziemnozwarciowe o charakterze zanikającym, które w przypadku żył nieziemionych jednostronnie fazy A oraz B jest kilkakrotnie większe niż dla żyły powrotnej fazy C dwustronnie uziemionej. Zgodnie z otrzymanymi wartościami maksymalna wartość napięcia pojawiająca się na nieziemionej żyły powrotnej fazy A, w której pojawia się zwarcie doziemne, jest równa ok. 4 kV, natomiast dla nieziemionej żyły powrotnej fazy B jest równa ok. 2 kV. Wskazuje to na możliwą zależność poziomu przepięcia ziemnozwarciowego w nieziemionej żyły powrotnej od fazy żył roboczej przez które przepływa zwarcie. Wiąże się to z indukowaniem się prądów w żyłach powrotnych kabli jednożyłowych w wyniku przepływu prądu przez ich żyły robocze w ramach jednej fazy.

Wariant c

Ostatni zasymulowany w trakcie badań wstępnych układ to konfiguracja wariantu b, w którym niepodłączone żyły powrotne faz A oraz B są na jednym końcu połączone, dzięki czemu można uzyskać wyrównanie potencjału tych żył. Zgodnie z założeniami symulacyjnymi, zwarcie doziemne w fazie A linii napowietrznej następuje w połowie pierwszej sekundy symulacji oraz trwa 3 sekundy. W trakcie trwania zakłócenia

zarejestrowano napięcia chwilowe wyindukowane w żyłach powrotnych na końcu ciągu kablowego, dla faz A oraz B w miejscu połączenia żył ze sobą oraz w połączonej obustronnie żyły fazy C. Zgodnie z zastosowanym modelem oraz sposobem przeprowadzania symulacji dla faz A oraz B żył powrotnych możliwe było uzyskanie przebiegu dla punktu ich połączenia. W miejscu ich połączenia, w wyniku przeprowadzenia obliczeń komputerowych, otrzymano wypadkową napięcia indukowanego w poszczególnych żyłach powrotnych, której wartość nie przekracza 2 kV. W przypadku obustronnie uziemionej żyły powrotnej fazy C, napięcie wyindukowane w tej żyły jest najmniejsze spośród wszystkich wariantów i równe ok. 0,1 kV.



Rys. 4.10. Przebiegi napięć indukowanych w żyłach powrotnych trójfazowego kabla elektroenergetycznego na końcu ciągu kablowego: a. faza A, b. faza B, c. faza C

Uzyskane w wyniku symulacji wstępnych przebiegi napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego pozwoliły na określenie poziomu spodziewanych w trakcie badań eksperymentalnych przepięć ziemnozwarciowych. W tabeli nr 4.2 przedstawione zostało zestawienie wyników dla wariantów a, b oraz c przeprowadzonych symulacji. Zamieszczone w niej wartości napięcia indukowanego w żyły 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 przebiecia ziemnozwarciowe w żyłach powrotnych wartości powyżej 4 kV, przy założeniu, że w trakcie badań eksperymentalnych warunki będą zbliżone do warunków, jakie zostały przyjęte w programie komputerowym. W takiej sytuacji należało uwzględnić również ewentualne błędy wynikające z ograniczenia modeli symulacyjnych, zakładając, że przebiecie ziemnozwarciowe może mieć wartości wyższe, także powyżej 5 kV, które uznawane jest za dopuszczalną wartość graniczną dla powłoki kabla. Na podstawie badań wstępnych opracowano i stworzono dzielnik napięciowy, którego budowa i przekładnia zostały szczegółowo omówione w podpunkcie 4.5.2.

Tabela 4.2 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

4.5. Weryfikacja modelu podczas badań terenowych

4.5.1. Wprowadzenie

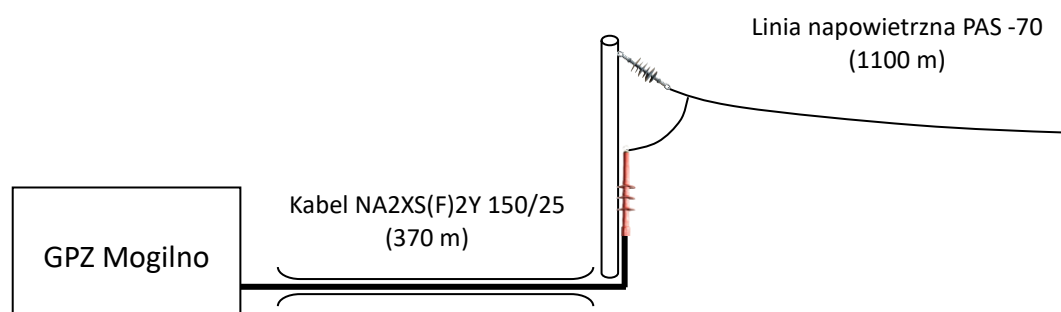
Poziom przebiec ziemnozwarciowych w żyłkach powrotnych kabli elektroenergetycznych średnich napięć, w których zmieniono konfigurację ich uziemienia z powszechnie stosowanego uziemienia obustronnego na uziemienie specjalne proponowane w ramach rozprawy, został wstępnie określony korzystając z metody symulacji komputerowych. Otrzymane wyniki na podstawie stworzonego modelu rzeczywistej sieci w programie Power Factory potwierdziły zasadność wykonania badań eksperymentalnych w terenie i pozwoliły na doprecyzowanie metod, jakie należy wykorzystać w celu otrzymania zgodnych ze stanem faktycznym rezultatów. Przeprowadzenie badań terenowych umożliwiła współpraca Instytutu Elektroenergetyki z operatorem sieci dystrybucyjnej, firmą Enea Operator, która udostępniła fragment

swojej sieci, w celu wykonania prób zwarciovych niezbędnych do przeprowadzenia pomiarów napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego, przy różnych wariantach pracy tej powłoki. Miejsce przeprowadzenia badania terenowego wykonywanego we współpracy z operatorem zostało wybrane korzystając z wiedzy eksploatacyjnej sieci w taki sposób, aby przeprowadzenie eksperymentu było bezpieczne i pozwalało na uzyskanie wymiernych wyników. Przygotowanie do badań eksperymentalnych wymagało doboru urządzeń pomiarowych, których zadaniem miał być pomiar napięcia indukowanego na żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego. Przewidywane poziomy napięcie wynikające z pojawiających się w układzie spodziewanych przepięć ziemnozwarciowych wskazywały na konieczność przygotowania układu do pomiarów wysokonapięciowych.

4.5.2. Opis eksperymentu i aparatury pomiarowej

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 był połączony z przygotowaną do badań linią kablową wychodzącą z szyn stacji elektroenergetycznej o długości 370 m zbudowaną z kabla NA2XS(F)2Y 150/25 mm² oraz linią napowietrzną izolowaną PAS o przekroju 70 mm² i długości 1100 m, w której przeprowadzone zostały próby zwarciovowe. Schemat reprezentujący badany fragment sieci został przedstawiony na rysunku 4.11. 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. Ze względu na dostępne wyprowadzenia utworzone za głowicą kablową i uziemienie żył powrotnych kabli z wykorzystaniem uziomu słupa, modyfikacje sposobu ich pracy były możliwe do wykonania bez ingerencji w istniejące połączenia. Pierwsze z dwóch stanowisk pomiarowych zlokalizowano na terenie rozdzielni SN GPZ Mogilno i w obwodach pierwotnych badanego pola liniowego umieszczono rejestrator prądów i napięć. Rejestrację wielkości mierzonych parametrów

na drugim ze stanowisk umożliwiło umiejscowienie urządzeń pomiarowych na przygotowanym w tym celu pomoście zamontowanym poniżej wyprowadzenia żył roboczych i powrotnych z kabli do linii napowietrznej, które połączone były z urządzeniami rejestrującymi stojącymi w okolicy słupa.

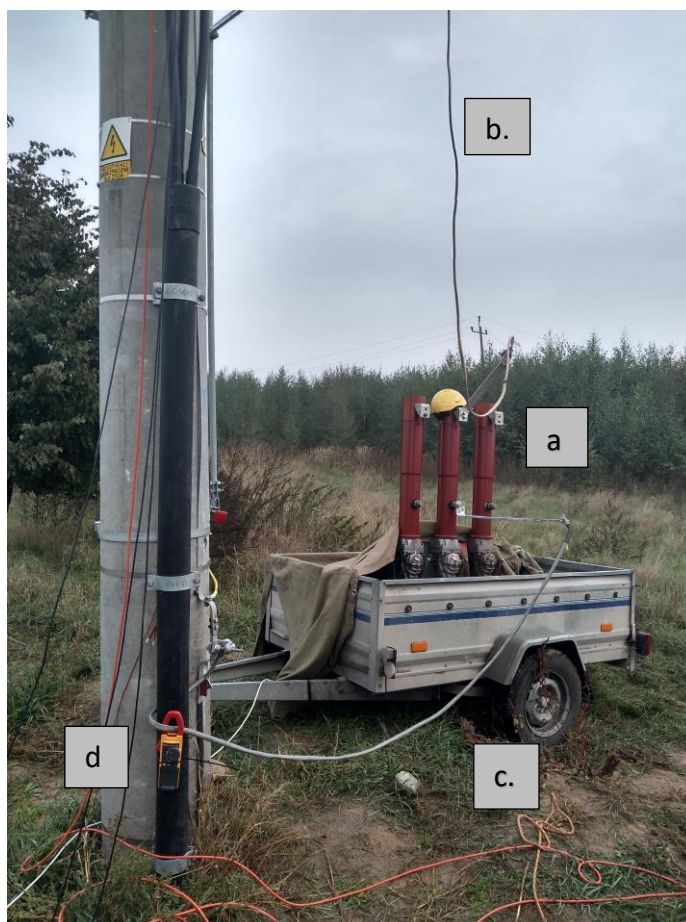


Rys. 4.11 Schemat reprezentujący badany fragment sieci

Udostępnione przez operatora sieci stanowisko do wykonywania pomiarów w trakcie prób zwarciovych ulokowane zostało przy uziemionym słupie elektroenergetycznym w sposób, który umożliwiał wykonanie zwarcia w linii napowietrznej izolowanej od strony połączenia z ciągiem kablowym. Podstawowymi elementami zapewniającymi przeprowadzenie eksperymentu w układzie był zdalnie sterowany wyłącznik, przewody łączące jeden z biegunów wyłącznika z przewodem fazowym linii napowietrznej SN i drugiego bieguna wyłącznika z uziemieniem słupa oraz układ do pomiaru prądu zwarcia doziemnego. Na rysunku 4.12 przedstawione zostało zdjęcie stanowiska badawczego wraz z oznaczeniem poszczególnych elementów. Za przeprowadzenie eksperymentu od strony technicznej odpowiedzialna była jednostka należąca do operatora sieci, a zatem wszystkie urządzenia, jak i załoga zostały przygotowane przez odpowiednie służby właściciela linii. Wykonanie testów w terenie wymaga współpracy wielu jednostek, które mają zapewnić ciągłość dostaw energii elektrycznej do odbiorców oraz minimalizację możliwych niebezpieczeństw dla ludzi i urządzeń. Wszystkie operacje przeprowadzono z uwzględnieniem aktualnie obowiązujących norm i standardów [49, 104, 121, 122].

Pole liniowe, w którym przeprowadzano testy zostało funkcjonalnie wydzielone z sieci elektroenergetycznej, a odbiorcy odłączeni, w sposób, który zapewnił im zasilanie

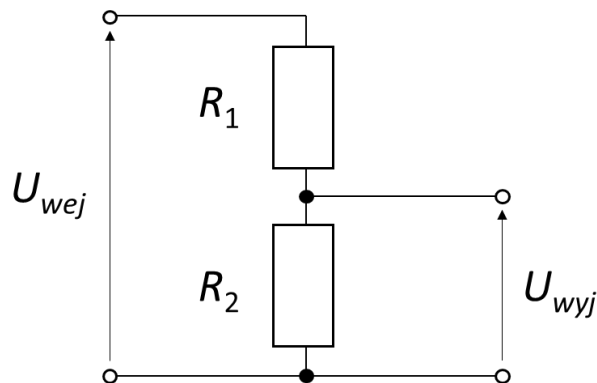
rezerwowe z innej stacji. Zapewniło to bezpieczeństwo osób postronnych i urządzeń elektrycznych w trakcie wykonywania badań.



Rys. 4.12. Stanowisko do wykonywania prób zwarciovych; a. wyłącznik, b. połączenie wyłącznika z przewodem fazowym linii SN, c. połączenie wyłącznika z uziemieniem słupa, d. amperomierz cęgowy do pomiaru prądu doziemienia

Przed podjęciem każdej próby zwarciovwej, korzystając z komunikacji telefonicznej z obsługą stacji oraz z dyspozytorem, obsługa stanowiska do wykonywania zwarcí doziemnych informowała o gotowości do wykonania testu, a następnie załączała wyłącznik na zwarcie. Dzięki komunikacji z obsługą stacji, badany fragment sieci zostawał zasilany i w ten sposób zasilano miejsce zwarcia, co wiązało się z możliwością wykonania pomiarów. Zwarcie doziemne wyłączane było przez automatykę zabezpieczeniową zainstalowaną w polu liniowym stacji elektroenergetycznej. Czas trwania zwarcia był wystarczający, aby zmierzyć parametry przebiegu w żyłach powrotnych kabli.

Aparatura pomiarowa do eksperymentalnego ustalenia poziomów przepięć ziemnozwarciowych w żyłce powrotnej 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 przedstawionych w podrozdziale 4.4, 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 w celu przeprowadzenia badań terenowych trójfazowego rezystancyjnego dzielnika napięciowego dostosowanego do pracy z oscyloskopem cyfrowym firmy Tektronix MDO3100 o częstotliwości próbkowania 5 GS/s oraz zakresie pomiarowym do 5 GHz na każdym z czterech kanałów.



Rys. 4.13. Rezystancyjny dzielnik napięciowy

Dzielnik napięciowy to czwórnik, który umożliwia uzyskanie wymaganego stosunku między napięciem wejściowym w układzie U_1 , a napięciem wyjściowym U_2 . Stosunek tych napięć stanowi przekładnię dzielnika k_U i określany jest wzorem 4.3.

$$k_U = \frac{U_1}{U_2} \quad (4.3)$$

W zależności od zastosowania układ dzielnika można skonstruować z różnych elementów biernych o charakterze rezystancyjnym, pojemnościowym bądź indukcyjnym. Najprostszym z tych rozwiązań jest zastosowanie elementów rezystancyjnych i zbudowanie dzielnika składającego się z szeregowo połączonych ze sobą oporników. Układ taki został przedstawiony na rysunku 4.13. Wartość przekładni dzielnika k_U dla układu prądu stałego określona jest wzorem (4.4) i zakłada niezmienną wartość rezystywności oporników. W rzeczywistych układach należy uwzględnić błąd

względny przekładni, który będzie zależał od zmiennej wartości rezystywności δ_{k1} oraz błędu dokładności oporników tworzących dzielnik δ_{k2} . Opis matematyczny tych zależności przedstawiono wzorami (4.5) oraz (4.6).

$$k_U = \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (4.4)$$

$$\delta_{k1} = \frac{k_U - k'_U}{k'_U} \quad (4.5)$$

$$\delta_k = \delta_{k1} + \delta_{k2} \quad (4.6)$$

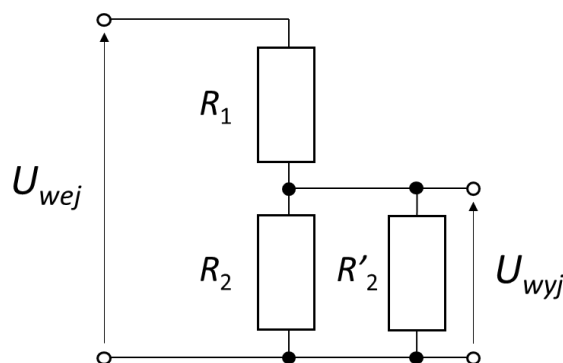
W przypadku dzielnika wykorzystywanego w układzie prądu przemiennego, rezystancja zastępowana jest impedancją, w której uwzględnia się resztkowe parametry L oraz C . Zależność określająca przekładnię takiego układu została przedstawiona jako wzór 4.7. Istnienie składowych reaktancyjnych wymaga uwzględnienia częstotliwości napięcia zasilającego. Możliwość pełnej eliminacji tego błędu występuje wtedy, gdy spełniony zostanie warunek ze wzoru 4.8 oraz 4.9. Dzielnik napięciowy o takiej konstrukcji uznawany jest za skompensowany częstotliwościowo.

$$k_U = \frac{U_1}{U_2} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} \quad (4.7)$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{C_1}{C_2} \quad (4.8)$$

$$\frac{R_1}{L_1} = \frac{R_2}{L_2} \quad (4.9)$$

Zbudowany do badań eksperymentalnych terenowych wysokonapięciowy dzielnik rezystancyjny został zaprojektowany z uwzględnieniem wiedzy na temat dzielników, wielkości oczekiwanych napięć wejściowych i wyjściowych oraz informacji dotyczącej miejsca jego zainstalowania.



Rys. 4.14. Rezystancyjny dzielnik do pomiarów wysokonapięciowych z uwzględnieniem rezystancji dodatkowych dołączonych do układu wyjściowego R'_2

Schemat poglądowy dzielnika został przedstawiony na rysunku 4.14 i pokazuje w układzie wejścia jedną, a w układzie wyjścia dwie rezystancje. Związane jest to z połączeniem równoległym wejścia pomiarowego oscyloskopu, który posiada określoną rezystancję, zgodną z zakresem pomiarowym wykorzystywanym podczas badań. Wybór parametrów rezystorów wykorzystywanych do zbudowania trójfazowego dzielnika napięciowego wynikał z próby doboru przekładni pozwalającej na zmierzenie określonych w badaniach wstępnych wielkości w sposób pozwalający na jak najdokładniejszy pomiar napięć i niezagrożający wejściu oscyloskopu.

Dobór proponowanej przekładni opierał się na ustaleniu napięcia wejściowego na poziomie do 50 kV, co zapewniłoby bezpieczeństwo układu pomiarowego. Parametrem wyjściowym do dalszych rozważań była zatem dobrana rezystancja opornika R_1 tworzącego układ wejścia dzielnika, o określonej na podstawie oczekiwanych napięć wejściowych, wartości na poziomie 100 M Ω i charakterze bezindukcyjnym, zapewniającym stałość przekładni niezależnie od częstotliwości.

Tabela 4.3. Parametry techniczne rezystora wysokonapięciowego [61]

Parametry rezystora wysokonapięciowego MOX96021006FVE firmy RoHS				
Seria	Moc znamionowa	Maksymalne napięcie	Tolerancja	Zmiana rezystancji pod wpływem temperatury TCR
MOX960	15,5 W	50 kV	1%	50 ppm

Wytypowany rezystor wysokonapięciowy charakteryzuje się szerokim zakresem temperatury pomiarowej i wysoką dokładnością wykonania. Parametry techniczne rezystora wykorzystanego w zbudowanym dzielniku napięciowym przedstawione zostały w tabeli 4.3.

Korzystając z informacji o wartości rezystancji wejścia oscyloskopu i żądanej przekładni mogącej zapewnić dokładny pomiar napięcia chwilowego, zdecydowano się na dołączanie w układzie rezystancji R_2 o wartości 511 k Ω pracującej z równolegle połączoną z R_2 rezystancją wejścia oscyloskopu o wartości 1 M Ω . Wiedząc, że ilość przeprowadzonych prób zwarciovych w sieci będzie ograniczona, a badanie niemożliwe do powtórzenia, w celu zapewnienia niezawodnego pomiaru przepięć, w przypadku kilku

pomiarów zdecydowano się na odczyt poziomu napięcia chwilowego z wykorzystaniem więcej niż jednego kanału oscyloskopu, co wprowadzało równolegle połączoną dodatkową rezystancję wejścia oscyloskopu do układu wyjściowego dzielnika. Obliczenia przekładni dzielnika napięciowego uwzględniające liczbę dołączonych wejść oscyloskopu wpływających na rezystancję wypadkową R_W przedstawione zostały wzorami od 4.10 do 4.15.

W przypadku wykorzystania w pomiarach wejścia oscyloskopu należy do obliczania przekładni układu dzielnika napięciowego uwzględnić dodatkową rezystancję R_2' o wartości 1 MΩ. Zwiększenie ilości wykorzystywanych kanałów pomiarowych zmienia natomiast rezystancję dodatkową - dodając równolegle kolejne wejście o rezystancji 1 MΩ, jednocześnie zmniejsza się przekładnię.

Przekładnia dzielnika bez rezystancji dodatkowych R_2' :

$$R_W = R_2 = 511 \text{ k}\Omega \quad (4.10)$$

$$k_U = 1 + \frac{R_1}{R_W} = 1 + \frac{100 \cdot 10^6}{511 \cdot 10^3} = 196,7 \quad (4.11)$$

Przekładnia dzielnika z rezystancją dodatkową R_2' równą rezystancji wejścia oscyloskopu:

$$R_W = \frac{R_2 \cdot R_2'}{R_2 + R_2'} = \frac{511 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^6}{511 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^6} = 338,19 \text{ k}\Omega \quad (4.12)$$

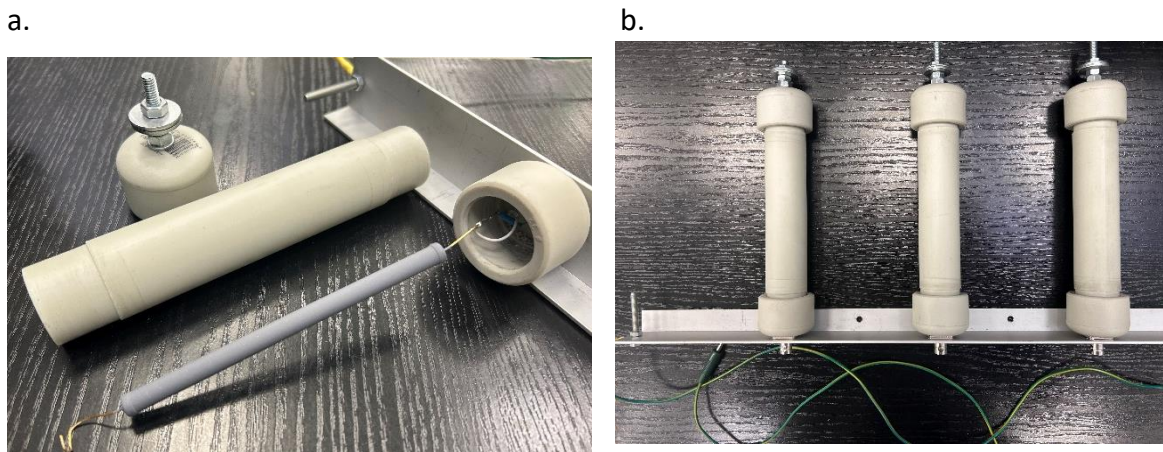
$$k_U = 1 + \frac{R_1}{R_W} = 1 + \frac{100 \cdot 10^6}{338,19 \cdot 10^3} = 296,7 \quad (4.13)$$

Przekładnia dzielnika z rezystancją dodatkową R_2' równą równoległemu połączeniu dwóch rezystancji wejścia oscyloskopu:

$$R_W = \frac{R_2 \cdot R_2'}{R_2 + R_2'} = \frac{511 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^6}{511 \cdot 10^3 + 0,5 \cdot 10^6} = 252,72 \text{ k}\Omega \quad (4.14)$$

$$k_U = 1 + \frac{R_1}{R_W} = 1 + \frac{100 \cdot 10^6}{252,72 \cdot 10^3} = 396,69 \quad (4.15)$$

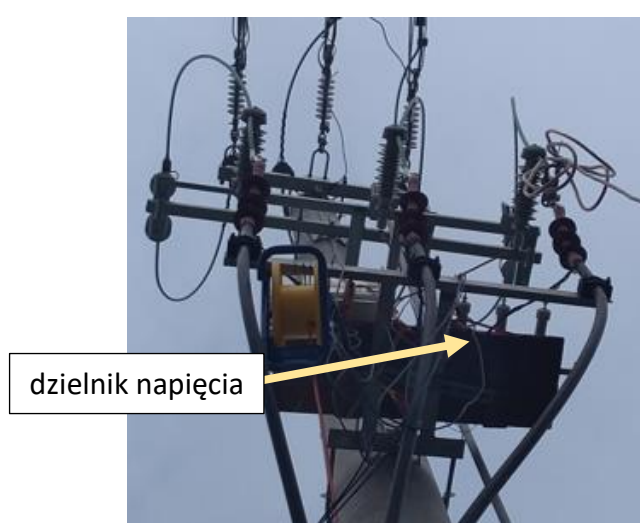
Budowa funkcjonalnego układu trójfazowego dzielników napięcia wykorzystujących pojedyncze elementy rezystancyjne wymagała technicznych rozwiązań, których zastosowanie pozwoliło na sprostanie warunkom w jakich układ pomiarowy miał pracować. Dzielnik napięciowy należało zabezpieczyć przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz ewentualnymi niesprzyjającymi warunkami atmosferycznymi mogącymi wystąpić w trakcie badań (Rys. 4.15.a).



Rys. 4.15. Zdjęcia elementów dzielnika: a. rezystor wysokonapięciowy R_1 w osłonie polipropylenowych, b. trójfazowy układ rezystancyjnych dzielników napięciowych umieszczonych w osłonach i zainstalowany na metalowej listwie z przewodem uziemiającym

Ochronę taką zapewniła obudowa wykonana z rur polipropylenowych, w których stworzone zostały otwory wyjściowe dla zacisku łączącego dzielnik z odziemioną żyłą powrotną kabla oraz wyprowadzenia złącza BNC, które pozwalało na połączenie się z oscyloskopem. Ze względu na miejsce zainstalowania dzielnika, które wyznaczono na słupie z głowicą kablową, na pomoście pomiarowym przygotowanym do tego zdania, dzielniki przymocowano do stalowej listwy. Pozwoliło to na zabezpieczenie urządzeń przed przemieszczaniem się, a także na połączenie wszystkich wyprowadzeń złączy BNC i przyłączenie do wspólnego potencjału zerowego, którego źródłem był przewód uziemienia łączący listwę z bednarką słupa elektroenergetycznego (Rys. 4.15.b). Umieszczenie części układu pomiarowego poza zasięgiem wymagało stworzenia odpowiednio długich i wytrzymałych przewodów mogących połączyć oscyloskop z dzielnikiem z wykorzystaniem odpowiedniej technologii. Sposób zainstalowania dzielników na słupie został zaprezentowany na rysunku 4.16, który przedstawia zdjęcie pomostu wraz z aparaturą pomiarową, wykonane w dniu przeprowadzania badań eksperymentalnych. Proces rejestrowania prądów i napięć zwarciovych w trakcie badań eksperymentalnych odbywał się z wykorzystaniem opisanego wcześniej układu dzielnika i oscyloskopu, jak i z wykorzystaniem rejestratorów parametrów sieciowych zainstalowanych w kilku miejscach pola liniowego, które było obiektem badań. W przypadku układu do pomiaru poziomu przepięć 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, a zatem w przypadku uziemienia obustronnego pomiar napięcia uzyskano z rejestratora parametrów sieciowych zainstalowanego na stanowisku w stacji, w miejscu wyprowadzenia żył powrotnych kabli do uziemienia stacyjnego. Oznacza to, że dla wariantu 0 uzyskany wynik można porównać jedynie z wynikami symulacji odpowiadającymi wartością napięć w żyłach powrotnych na początku ciągu kablowego.



Rys. 4.16. Pomost zainstalowany na słupie z głowicą kablową przeznaczoną do montażu urządzeń pomiarowych w trakcie badań terenowych

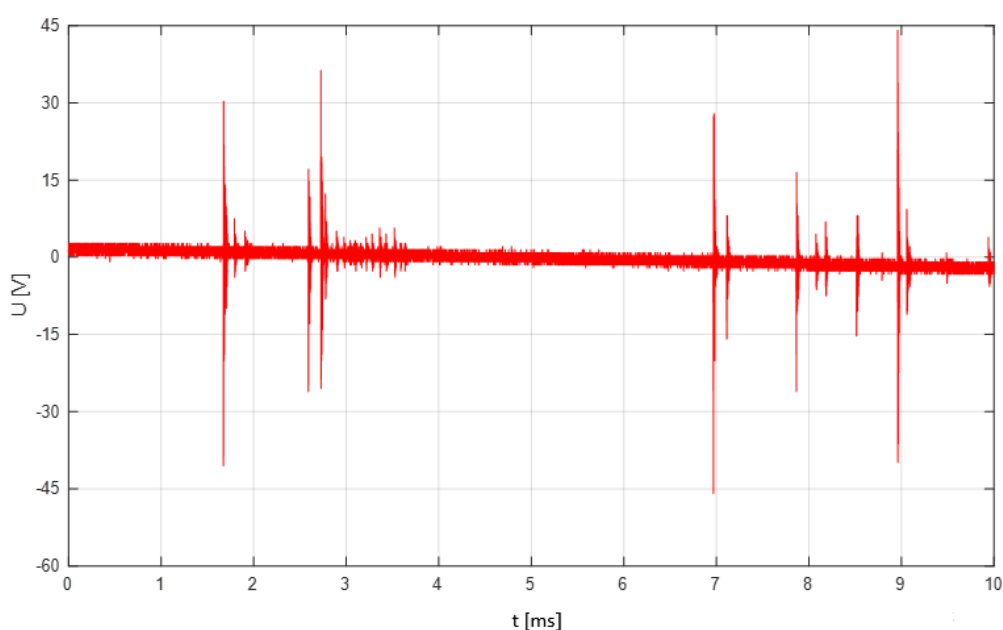
4.5.3. Wyniki badań terenowych

W niniejszym podrozdziale zaprezentowane zostaną wyniki uzyskane w trakcie przeprowadzenia eksperymentu badawczego w sieci elektroenergetycznej średniego napięcia zgodnie z warunkami opisanymi w poprzednich podrozdziałach. Na rysunkach od 4.22 do 4.25 przedstawiono przebiegi wartości chwilowych napięć wyindukowanych w żyłach powrotnych jednożyłowych kabli elektroenergetycznego średniego napięcia, stanowiących trójfazowy układ kablowy, zmierzone w trakcie prób zwarciovych z wykorzystaniem wysokonapięciowego dzielnika rezystancyjnego oraz oscyloskopu. Fazy oznaczone zostały jako A, B oraz C, a numeracja została przyjęta od prawej strony, a zwarcie wykonywane było w fazie A. Zmiana konfiguracji sposobu uziemienia żył

powrotnych wykonana na wyprowadzeniach żył za głowicą linii kablowej, w miejscu przyłączenia do uziemienia słupa została przeprowadzona zgodnie z wariantami przyjętymi w podrozdziale 4.3.

Wariant 0

Wstępna próba zwarciova została przeprowadzona dla warunków normalnych pracy sieci, bez zmian konfiguracji sposobu uziemienia żyły powrotnej linii kablowej, a zatem z jej połączonymi i uziemionymi obustronnie wszystkimi fazami. Wartości parametrów zbadane w takim układzie miały stanowić jeden z punktów odniesienia do oceny zagrożenia przepięciowego w proponowanej konfiguracji połączeń żył powrotnych. Na rysunku 4.17 przedstawiony został zarejestrowany w trakcie próby zwarciovej przebieg wartości chwilowych napięcia w fazie A, w której wykonane zostało zwarcie.



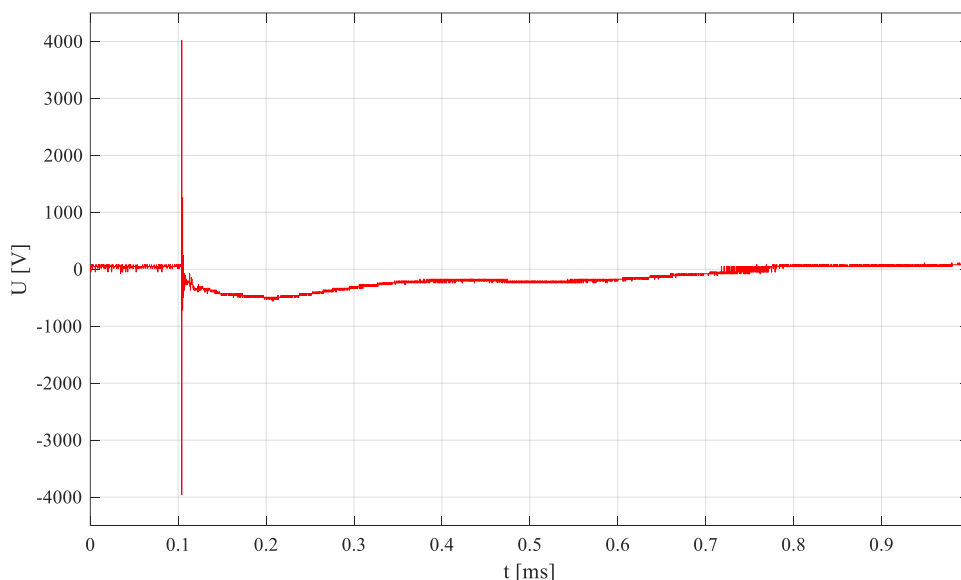
Rys. 4.17. Przebieg napięcia wyindukowanego w żył powrotnej fazy A w linii kablowej obustronnie uziemionej zarejestrowany w stacji elektroenergetycznej – wariant 0

Uzyskany przebieg pochodzi z rejestratora zainstalowanego na moście kablowym i połączonego z początkiem żył powrotnych w stacji elektroenergetycznej zaprezentowanej na rysunku 4.11 jako GPZ Mogilno. Konfiguracja pracy żył kablowych z obustronnym uziemieniem wiąże się z niemożliwością podłączenia układu dzielnika napięciowego i oscyloskopu przy słupie do wyprowadzeń żył powrotnych na końcu kabla

w przypadku nierozłączenia tych żył z uziemieniem słupa. Na otrzymanym przebiegu widać kilka przebiegów, które pojawiały się w żyłach powrotnych w miejscu ich połączenia z uziemieniem stacji elektroenergetycznej w trakcie wykonywania pomiarów. Część z nich ma charakter łączeniowy, natomiast przebiegi o największej wartości szczytowej i równej ok. 50 V, to wartości, które pojawiły się na skutek przeprowadzenia próby zwarciowej w polu liniowym sekcji, w której przyłączona została linia kablowa.

Wariant a

Przeprowadzenie kolejnej próby zwarciowej w układzie badanym wiązało się ze zrealizowaniem zmiany konfiguracji układu połączeń żył powrotnych z uziemieniem słupa elektroenergetycznego. Modyfikacja układu w trakcie badań terenowych była prowadzona zgodnie z wytycznymi Operatora sieci elektroenergetycznej i wykonywana przez specjalnie do tych celów przygotowany zespół. Zgodnie z przyjętymi do badań symulacyjnych oraz terenowych wariantami, na końcu kabli elektroenergetycznych tworzących badany ciąg kablowy, żyły powrotne trzech faz zostały odłączone od uziemienia słupa elektroenergetycznego. Nowego połączenia z uziemieniem dokonano w taki sposób, aby żyła powrotna fazy A pozostała nieuziemiona, a żyły powrotne faz B oraz C zostały ponownie przyłączone do uziemienia słupa.

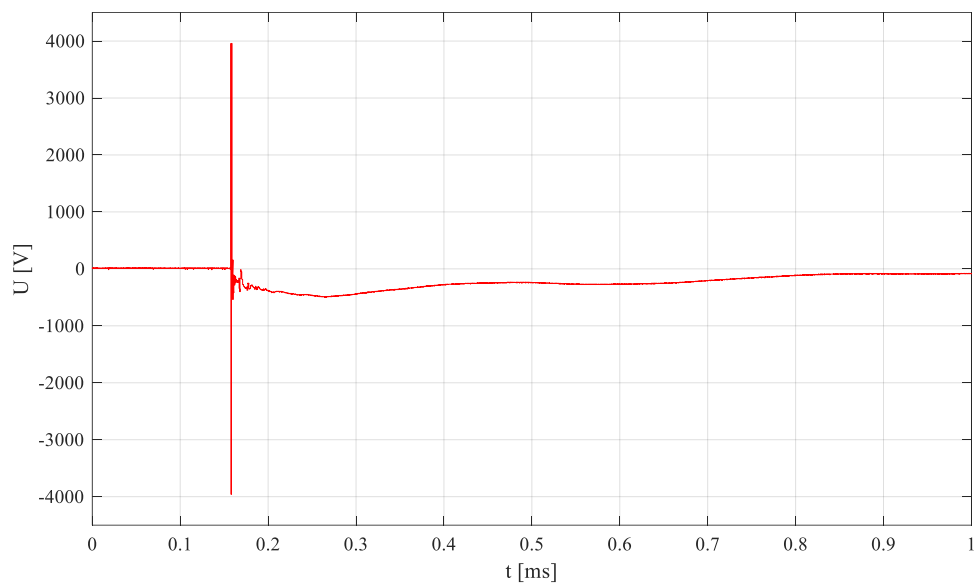


Rys. 4.18. Przebieg napięcia indukowanego w żyłę powrotnej nieuziemionej jednostronnie fazy A badanego kabla elektroenergetycznego w trakcie zwarcia doziemnego – wariant a

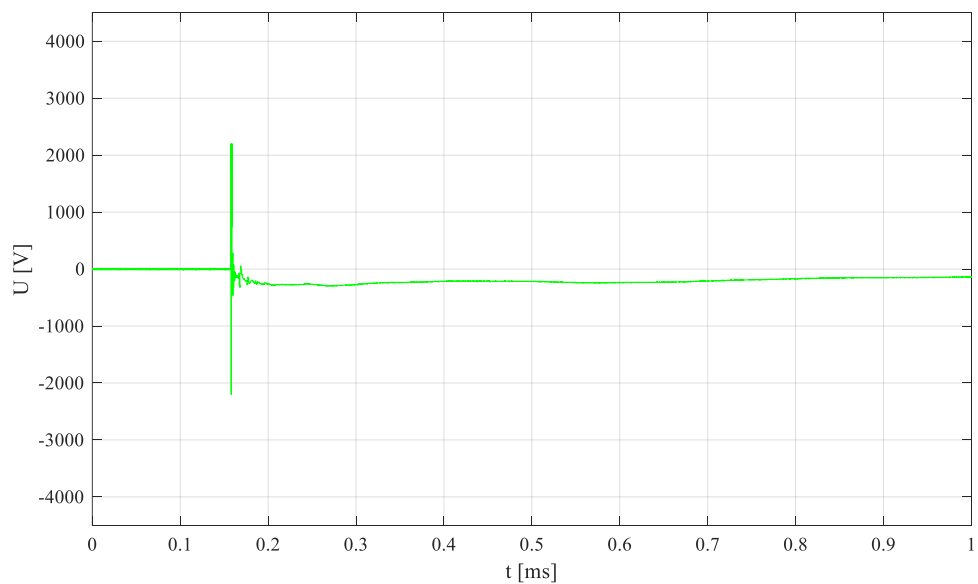
Korzystając z przygotowanego wysokonapięciowego układu pomiarowego z dzielnikiem napięciowym, przeprowadzono pomiar w odziemionej fazie A. Na rysunku 4.18 przedstawiono zarejestrowany przy użyciu oscyloskopu, przebieg napięcia chwilowego w żyłce powrotnej nieuziemionej fazy A linii kablowej w trakcie trwania zwarcia w tej fazie. Otrzymany w wyniku pomiarów przebieg ma charakter niesinusoidalny. Jest to związane z brakiem przepływu prądów odbiorów w żyłkach roboczych kabla. Maksymalne napięcie wyindukowane w takim układzie w żyłce powrotnej nieuziemionej fazy, w której to fazie jednocześnie przyływał prąd zwarcia doziemnego wynosi ok. 4 kV. Zwrot napięcia uzyskany w trakcie rejestracji jest przeciwny do zwrotu napięcia sieciowego.

Wariant b

W wariantcie drugim odłączeniu od uziemienia słupa elektroenergetycznego ulegały żyły powrotne faz A oraz B, co pozwoliło na przeprowadzenie analizy parametrów przepięcia ziemnozwarciowego w układzie o najniższych zakładanych stratach energii elektrycznej. To rozwiązanie, tak samo jak w przypadku nieuziemionej jednostronnie żyły powrotnej fazy A, ma jednak negatywny wpływ na wzrost wartości napięcia indukowanego w tej powłoce. Przeprowadzenie eksperymentu wymagało zmiany konfiguracji połączenia wyprowadzeń żył powrotnych z uziemieniem słupa, w taki sposób, aby tylko faza C pozostała uziemiona, a fazy A oraz B pozostały nieprzyłączone. Wolne końce żył powrotnych przyłączono do oddzielnych faz układu pomiarowego. Rejestracja przebiegów napięć w poszczególnych fazach była możliwa dzięki podłączeniu nieuziemionych żył powrotnych do dwóch faz wysokonapięciowego dzielnika, a następnie do wejść oscyloskopu pomiarowego. Przebieg wartości chwilowej napięcia wyindukowanego w żyłkach powrotnych nieuziemionych faz A i B przedstawione zostały odpowiednio na rysunku 4.19 oraz 4.20. Wartość szczytowa przepięcia ziemnozwarciowego wyindukowanego w nieuziemionej żyłce powrotnej fazy A równa jest około 4 kV, tak samo jak w wariantcie a. Dla nieuziemionej jednostronnie żyły powrotnej fazy B, w której to fazie prąd zwarcia nie płynie przez żyłkę roboczą, wartość wyindukowanego napięcia nie przekracza ok. 2,5 kV. Zwroty napięć zmierzonych na końcu obu żył powrotnych są zgodne.



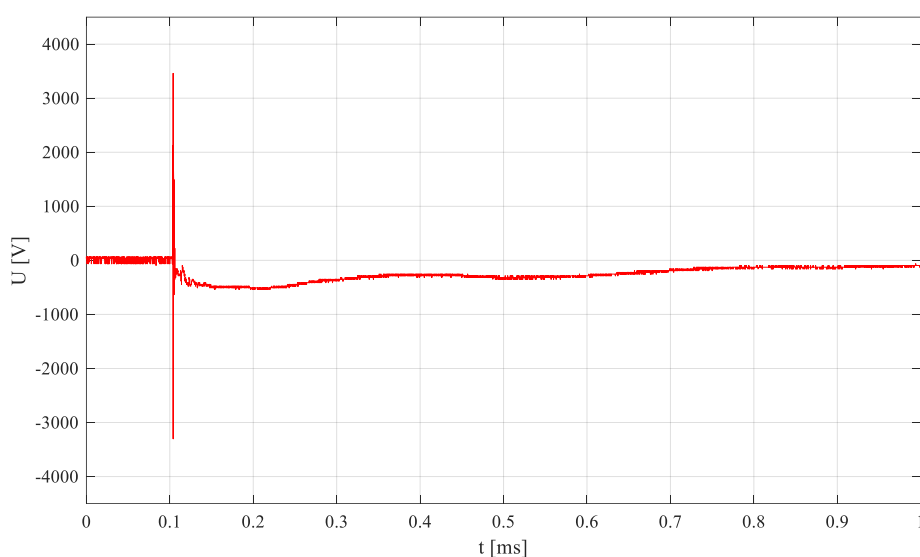
Rys. 4.19. Przebieg napięcia indukowanego w żyłę powrotnej nieuziemionej jednostronnie fazy A badanego kabla elektroenergetycznego w trakcie zwarcia doziemnego – wariant b



Rys. 4.20. Przebieg napięcia indukowanego w żyłę powrotnej nieuziemionej jednostronnie fazy B badanego kabla elektroenergetycznego w trakcie zwarcia doziemnego – wariant b

Wariant c

Ostatni przeprowadzony eksperyment wymagał zmodyfikowania wariantu c i połączenia na końcu ciągu kablowego nieziemionych żył powrotnych faz A oraz B, co miało skutkować wyrównaniem się potencjałów pojawiających się w tych fazach w trakcie wystąpienia jednofazowego zwarcia doziemnego w sieci, przy jednoczesnym ograniczeniu strat względem wartości dla wariantu a. Ze względu na specyfikę układu pomiarowego zmierzone zostało napięcie w punkcie połączenia żył powrotnych obu nieziemionych faz, które przymocowano do jednej, wspólnej fazy dzielnika wysokonapięciowego. Zwarcie doziemne zostało, tak jak w pozostałych przypadkach, wykonane w fazie A. Przebiegi napięć chwilowych uzyskanych dla takiej konfiguracji dla żył powrotnych wszystkich trzech faz kabla w sytuacji zwarcia w fazie A linii napowietrznej oraz połączenia i odziemienia żyły powrotnej dwóch faz kabla pokazano na rysunku 4.21.



Rys. 4.21. Przebieg napięcia indukowanego w miejscu połączenia jednostronnie nieziemionych żył powrotnych faz A i B badanego kabla elektroenergetycznego w trakcie zwarcia doziemnego – wariant c

Do badań wykorzystano dwie równolegle połączone rezystancje wejścia oscyloskopu. Takie rozwiązanie pozwala na zmierzenie parametru z dwiema różnymi rozdzielczościami, co w przypadku badań zjawisk o charakterze nieustalonym może pozwolić na dokładniejszą rejestrację wyników. Przebieg napięcia wyindukowanego

w miejscu połączenia żył powrotnych faz A i B przedstawia wartość szczytową przepięcia, która wynosi ok. 3,5 kV. Jest to wartość wypadkowa napięć, które zostały wyindukowane w połączonych żyłach.

W tabeli 4.4 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 4.4. Zestawienie wartości napięć wyindukowanych w żyłach powrotnych dla badań terenowych

Wariant konfiguracji pracy żyły powrotnej	Wartość bezwzględna maksymalnego napięcia wyindukowane w żyłę powrotną 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	

4.5.4. Porównanie otrzymanych wyników podczas badań terenowych ze wstępnymi symulacjami komputerowymi

Wykorzystany do badań symulacyjnych program komputerowy Power Factory pozwolił na zamodelowanie układu sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym równym 15 kV, w którym głównymi atrybutami dostosowywanymi do badanych zagadnień były parametry kabla elektroenergetycznego. Na szczególną uwagę zasługuje możliwość wydzielenia w programie żyły powrotnej kabla w sposób, który pozwala na modyfikację sposobu uziemienia jego żył powrotnych oraz wygenerowanie wielkości odpowiadających parametrom poszczególnych żył. Ze względu na swoją specyfikę, badania terenowe przeprowadzane w rzeczywistej sieci elektroenergetycznej

i wywołujące zagrożenie dla tego układu (w tym przypadku zwarcie) stanowią rzadkość. Powód ich podjęcia musi być udokumentowany, a sposób ich wykonania musi być przemyślany i dostosowany do szeregu warunków, jakie można w trakcie takich badań spotkać. Badania literaturowe i otrzymane wyniki symulacji wstępnych stanowiły wystarczającą podstawę do potwierdzenia zasadności przeprowadzenia prób eksperymentalnych. Ponadto, pozwoliły na dobór urządzeń pomiarowych, które w sposób pewny i niezawodny pozwoliły na rejestrację zastanych w trakcie eksperymentów wielkości charakterystycznych układu. Wszechstronnie przygotowanie do prób zwarciovych z wykorzystaniem symulacji komputerowych pozwala na otrzymanie wyników, które można przeanalizować i porównać do tych otrzymanych w trakcie rzeczywistych pomiarów w sieci.

Dla konkretnej sieci o określonych parametrach elementów składowych i właściwościach, gdy nieuziemieniu ulega tylko jedna faza, w której dodatkowo pojawia się zwarcie doziemne, wartości maksymalnych napięć wyindukowanych w nieuziemionej żyły powrotnej kabla elektroenergetycznego nie przekraczają wartości 5 kV. Przy takich wartościach napięć generowanych w żyłach powrotnych można uznać, że nie nastąpi przebicie i uszkodzenie powłoki zewnętrznej. Takie założenie wynika z wytycznych dotyczących próby szczelności powłoki kabla elektroenergetycznego średniego napięcia, który w trakcie badania powinien móc wytrzymać potencjał o wartości 5 kV przez czas 1 minuty [100]. Nie oznacza to jednak, że takie rozwiązanie nie będzie stwarzało zagrożenia przepięciowego w przypadku zmiany konfiguracji układu, w którym pracuje linia kablowa. To samo tyczy się rozwiązań, w których jednostronnie nie uziemia się dwóch faz lub gdy są one jednostronnie połączone dla wyrównania potencjału, ale nie uziemione. Wszystkie otrzymane wyniki dla tego konkretnego przypadku pokazują, że napięcie, zarówno zmierzone, jak i zasymulowane nie przekracza bezpiecznego poziomu. Wartości bezwzględnych maksymalnych napięć indukowanych w żyłach powrotnych powstałych w wyniku pojawienia się w układzie zjawiska zakłóceniovego w postaci zwarcia doziemnego w jednej z faz otrzymane w wyniku symulacji wstępnych i uzupełniających, a także badań terenowych można zestawiać wykorzystując kryterium wielkościowe oraz skali. Zgodnie z wynikami zamieszczonymi w tabelach 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 zakłóceń, natomiast wyniki badań terenowych stanowią nieustalone, niesinusoidalne przebiegi w czasie pokazujące przebiegi ziemnozwarciowe pojawiające się w momencie powstania zwarcia i ustające w czasie dla układu bez obciążeniowego.

Tabela 4.5. 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

Na różnice występujących między wynikami badań terenowych a wynikami badań symulacyjnych dla wariantu c, w trakcie którego badano wpływ połączenia jednostronnie nieuziemionych żył powrotnych kabla na przepięcie ziemnozwarciowe w punkcie połączenia, największy wpływ może mieć metoda przeprowadzenia badań symulacyjnych. W trakcie symulacji komputerowej wartość w punkcie styku faz obliczana jest na podstawie napięć w poszczególnych fazach żyły powrotnej bez uwzględnienia w trakcie obliczeń wyrównania potencjału w miejscu ich połączenia. W rzeczywistym układzie potencjał wynikający z rozptywu prądu zwarcowego i prądu przepływu w połączonych żyłach powrotnych podlega wyrównaniu od żyły o wyższym potencjale do żyły o niższym potencjale i zmniejszeniu poprzez spadek napięcia na impedancji połączonych żył powrotnych. W związku z brakiem dodatkowych funkcjonalności programu komputerowego pozwalających na rzeczywiste połączenie żył powrotnych w celu zobrazowania ich wspólnego potencjału w układzie, wykorzystany zostanie

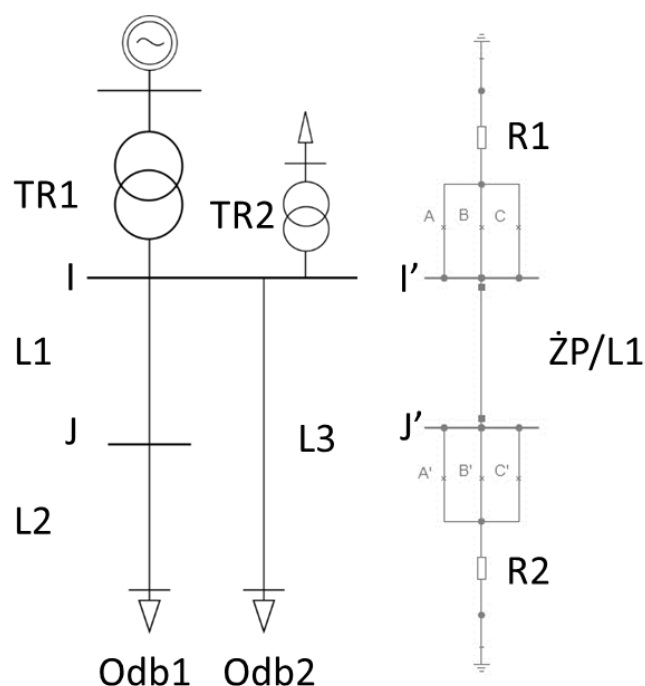
zaproponowany model, a otrzymane wyniki będą przeanalizowane z uwzględnieniem wiedzy na temat różnic między układem rzeczywistym a modelem symulacyjnym.

4.6. Uzupełniające analizy zjawisk przebiegowych – symulacje komputerowe w programie Power Factory

Po przeprowadzeniu badań eksperymentalnych uzupełniono wyniki symulacyjnych badań wstępnych i poszerzono je o badania uzupełniające, na których wykonanie pozwoliło uzyskanie rozszerzonych danych od Operatora sieci elektroenergetycznej, w której przeprowadzono testy poligonowe oraz ustalenie dodatkowych wytycznych opisanych w tym podrozdziale. Poniżej przedstawione zostały rezultaty uzyskane w programie PowerFactory, z wykorzystaniem modelu z rysunku 4.22 oraz danych do tego modelu zamieszczonych w tabeli porównawczej 4.8. Zaprezentowane poniżej przebiegi otrzymane zostały w wyniku przeprowadzenia symulacji stanów ziemnozwarciowych

W celu przeprowadzenia symulacji komputerowej pozwalającej na porównanie wyników z tymi otrzymanymi w pierwszej części rozdziału zrealizowano analizę przebiegów ziemnozwarciowych w zamodelowanej sieci z wykorzystaniem modułu Simulation RMS/EMT. Większość parametrów symulacji, a także wykorzystane metody były tożsame z metodami wykorzystanymi w przypadku wstępnych symulacji komputerowych. Oznacza to, że dla symulacji bazującej na wartościach nieustalonych EMT wybrano zdarzenie bazujące na symulacji zwarcia jednofazowego z ziemią w linii napowietrznej przyłączonej głowicą kablową do badanego odcinka kabla elektroenergetycznego. Dokładne miejsce zwarcia zostało określone jako 10% długości linii napowietrznej licząc od słupa z głowicą kablową, a rezystancja przejścia w miejscu zwarcia była równa rezystancji uziemienia tego słupa, czyli $R_p = 10 \Omega$. Czas trwania symulacji wielkości elektrycznych w trakcie zdarzenia to 1,2 s. W pierwszej fazie, trwającej 0,5 s zobaczyć można przebieg generowanej wartości w trakcie pracy normalnej sekcji, natomiast po zakończeniu tego czasu pojawia się zdarzenie zwarcia o zadanych przez użytkownika parametrach. Zwarcie doziemne w linii napowietrznej zostaje wyłączone po kolejnej 0,5 s. W celu uzyskania najdokładniejszych wyników wartości szczytowej przebiegu krok iteracji wynosi 0,01 ms. Otrzymane wartości napięć chwilowych wygenerowanych

w żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych w wyniku opisanej powyżej symulacji zostały opracowane z wykorzystaniem narzędzia komputerowego Matlab, w sposób, który pozwolił na jednoznaczność przedstawienia przebiegów i zwiększył czytelność wszystkich zmian stanów.



Rys. 4.22. Model testowy fragmentu sieci średniego napięcia do analizy porównawczej przedstawiający układ do zmian konfiguracji uziemienia żyły powrotnej kabla elektroenergetycznego – symulacje uzupełniające

Na rysunkach od 4.23 do 4.26 przedstawiono przebiegi wartości chwilowych napięć wyindukowanych w żyłach powrotnych jednożyłowych kabli elektroenergetycznego średniego napięcia, stanowiących trójfazowy układ kablowy. Fazy oznaczone zostały jako A, B oraz C. Zmianie konfiguracji sposobu uziemienia żył powrotnych w omawianych w tej części rozprawy przypadkach podlegać będą fazy A oraz B zgodnie z opisanymi wcześniej wariantami i przedstawionymi na rysunkach 4.4 do 4.7. Dla każdego z wariantów przedstawiono przebiegi chwilowe zarejestrowane w dwóch miejscach modelu – na początku ciągu kablowego, w miejscu przyłączenia żył powrotnych do uziemienia stacji oraz na końcu ciągu kablowego, w miejscu przyłączenia żył powrotnych do uziemienia słupa elektroenergetycznego z głowicą kablową. Dodatkowym i uzupełniającym fragmentem, nie rozpatrywanym w trakcie symulacji wstępnych, jest

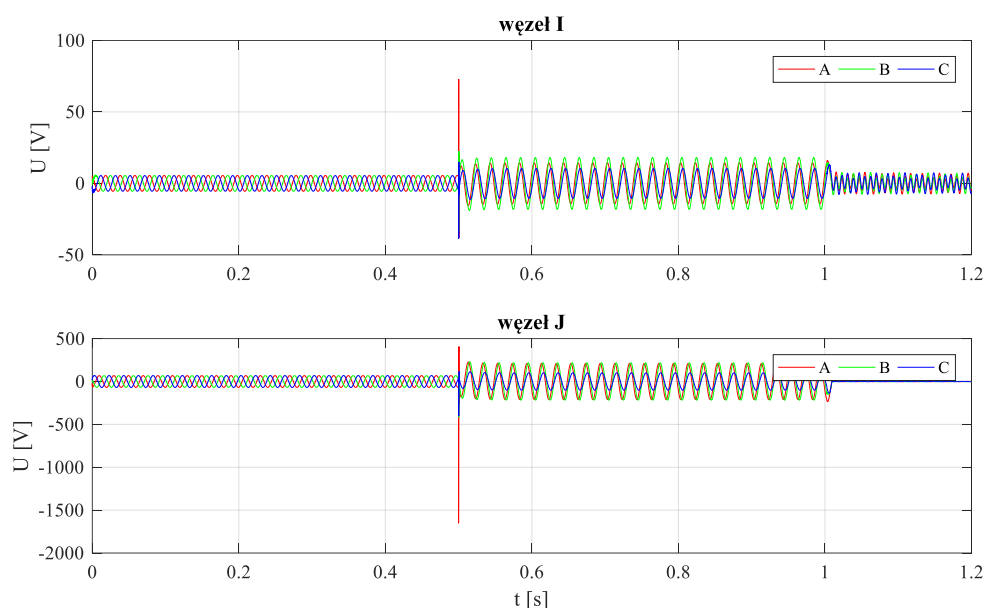
zasymulowanie dla tego modelu wariantu 0, który odpowiada stanowi pracy żyły powrotnej z obustronnym uziemieniem. Taka konfiguracja uziemienia żył powrotnych kabla elektroenergetycznego jest standardowym rozwiązaniem dla sieci średniego napięcia.

Tabela nr 4.6. Parametry elementów modelu sieci.

Oznaczenie na schemacie	Nazwa elementu	Parametry symulacji uzupełniających
System	system elektroenergetyczny	$S_k'' = 10000$ MVA
TR1	transformator zasilający 110/15	$S_n = 16$ MVA $U = 110/15$ $u_z = 8\%$ $\Delta p_{Cu} = 15$ MW
TR2	transformator uziemiający 15/0,4	$S_n = 1,09$ MVA $U = 15/0,4$ $u_z = 5,5\%$ $\Delta p_{Cu} = 1,9$ kW
L1	linia kablowa	NA2XS(F)2Y 150/25 12/20 kV ułożona na głębokości 0,8 m układ trójkątny
ŻP/L1	żyła powrotna linii kablowej	miedziana żyła o grubości znamionowej opony 2,5 mm
L2	linia napowietrzna	PAS70 1,1 km
L3	linia napowietrzna	PAS70 4 km
Odb1	odbiornik nr 1	$P_1 = 0,5$ MW $\cos\varphi_L = 0,95$
Odb2	odbiornik nr 2	$P_2 = 2$ MW $\cos\varphi_L = 0,95$
R1	rezystancja uziemienia stacji	$R_{E110} = 0,5$ Ω
R2	rezystancja uziemienia słupa	$R_E = 7,4$ Ω
RP	rezystancja przejścia	$R_p = 10$ Ω

Wariant 0

Jako pierwsza została wykonana symulacja dla układu rzeczywistego, z uziemieniem obustronnym żył powrotnych kabli. Pozwoli to, w dalszej części badań, na ocenę różnicy poziomu napięć ziemnozwarciowych dla aktualnie wykorzystywanego w sieciach średniego napięcia sposobu pracy żyły powrotnej, charakteryzującego się znacznymi stratami energii elektrycznej. Na rysunku 4.23 przedstawiono przebiegi napięć chwilowych w żyłach powrotnych wszystkich trzech faz kabla podczas zwarcia w fazie A linii napowietrznej połączonej z kablem na jego początku i na jego końcu.



Rys 4.23. Przebiegi napięć indukowanych w żyłach powrotnych trójfazowego kabla elektroenergetycznego dla wariantu 0 na końcu ciągu kablowego a. w węźle I, b. w węźle J

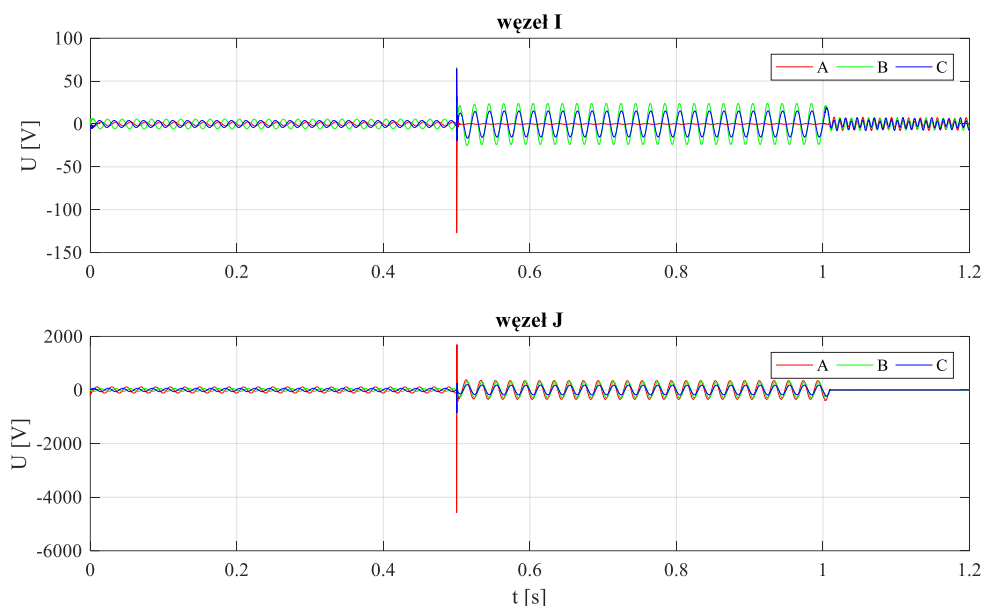
Zgodnie z opisem kroków symulacji w chwili powstania jednofazowego zwarcia w linii napowietrznej, które przypada na 0,5 s symulacji, w żyłach powrotnych wszystkich trzech faz linii kablowej, przez którą przepływa prąd zwarciový zasilający miejsce zwarcia, pojawia się wyindukowane napięcie ziemnozwarciowe. W zależności od miejsca, dla którego przeprowadzane były obliczenia, skala zjawiska się zmienia. W węźle I, w którym żyły powrotne wszystkich faz są przyłączone do uziemienia stacji, natomiast w węźle J żyły powrotne wszystkich faz są przyłączone do uziemienia słupa z głowicą kablową. Otrzymane wyniki symulacji wskazują na minimalną wartość napięcia indukowanego w żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych w sytuacji, gdy nie ma zwarcia i wzrost napięcia indukowanego w przypadku wystąpienia zakłócenia. W chwili

pojawienia się zwarcia jednofazowego doziemnego w pobliżu węzła J, napięcie wyindukowane w żyłę powrotnej fazy A, w której występuje zwarcie, wzrasta na obu końcach. Przepięcie ziemnozwarciowe jest znacznie większe po stronie zwarcia i wynosi ok. 1,5 kV, w porównaniu do strony przyłączonej do stacji elektroenergetycznej, gdzie przepięcie ziemnozwarciowe jest równe mniej niż 100 V. Dla pozostałych żył powrotnych faz, w których nie pojawia się zwarcie przepięcie ziemnozwarciowe uzyskuje wartość znacznie mniejszą niż dla fazy, w której występuje zakłócenie. Warto zwrócić uwagę na przeciwny zwrot napięć wygenerowanych w takim układzie. Sugeruje on pochodzenie przepięcia ziemnozwarciowego od węzła J z zasilania od miejsca zwarcia, natomiast w przypadku węzła I będzie jedynie wynikiem indukowania się napięcia w żyłę powrotnej na podstawie prądów przepływających przez żyły robocze.

Wariant a

Pierwszą rekonfiguracją wykonaną w modelu było przełączenie łącznika żyły powrotnej z uziemieniem na końcu ciągu kablowego w stan otwarty, który powoduje jednostronne nieuziemienie żyły powrotnej fazy A. Takie rozwiązanie ma korzystnie wpłynąć na straty energii elektrycznej, natomiast może negatywnie wpływać na spływanie do ziemi prądów zwarciovych indukowanych w tej powłoce. Na rysunku 4.24 przedstawiono przebiegi napięć chwilowych w żyłach powrotnych wszystkich trzech faz kabla w sytuacji zwarcia w fazie A linii napowietrznej i odziemienia żyły powrotnej tej samej fazy na końcu ciągu, w miejscu połączenia linii kablowej z linią napowietrzną. Zaprezentowane przebiegi dotyczą węzłów I oraz J oznaczone zgodnie z rysunkiem 4.22. W węźle I znajdującym się w stacji elektroenergetycznej i będącym początkiem ciągu kablowego wszystkie trzy żyły powrotne linii kablowej są uziemione z wykorzystaniem uziomu stacji. Napięcia wygenerowane w tym punkcie układu są najmniejsze i dla żyły powrotnej fazy, w której jest zwarcie, przepięcie ziemnozwarciowe wynikające z zakłócenia nie przekracza 150 V. W przypadku węzła J, który znajduje się w miejscu połączenia linii kablowej z linią napowietrzną, czyli reprezentuje słup z głowicą kablową, dla nieuziemionej żyły powrotnej fazy A przepięcie ziemnozwarciowe jest największe i osiąga wartość ponad 4,5 kV. W przypadku żył powrotnych uziemionych obustronnie przepięcie ziemnozwarciowe również rośnie, co jest związane ze sprzężeniami wzajemnymi między powłokami przewodzącymi linii kablowej. Wartości przepięć w tych

żyłach przekraczają 0,8 kV, a zatem mniej niż 20% przepięcia w nieuziemionej żyłce powrotnej.

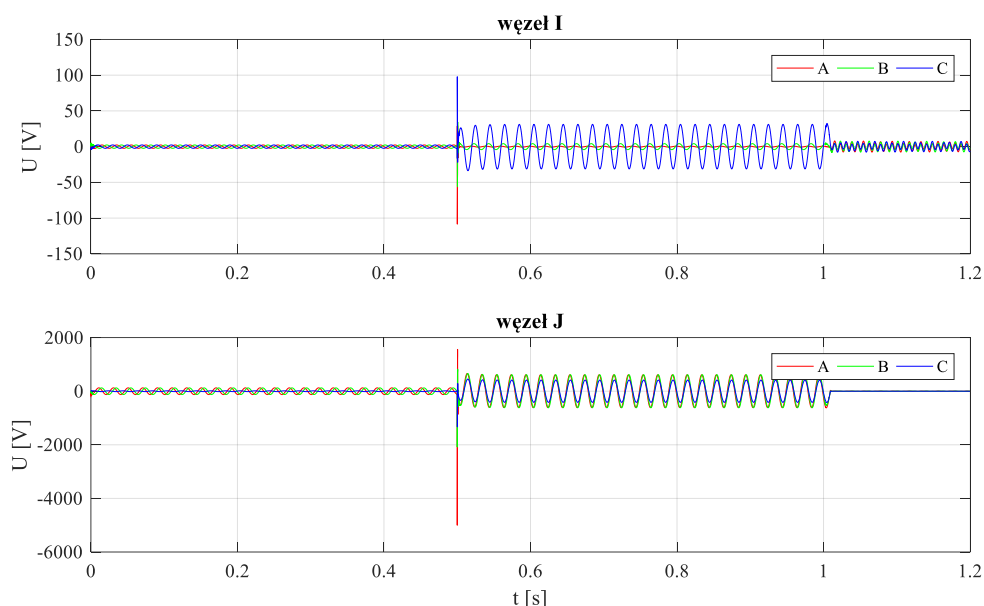


Rys 4.24. Przebiegi napięć indukowanych w żyłach powrotnych trójfazowego kabla elektroenergetycznego dla wariantu a na końcu ciągu kablowego: a. w węźle I, b. w węźle J

Wariant b

Kolejna zmiana konfiguracji zakładała przełączenie łącznika na końcu kabla w stan otwarty dla faz A oraz B, co pozwalało na jednostronne odziemienie żył powrotnych dwóch faz. To rozwiązanie jest najkorzystniejsze z punktu widzenia minimalizowania strat energii elektrycznej, ale tak samo jak w przypadku nieuziemionej jednostronnie żyły powrotnej fazy A, ma negatywny wpływ na poziom napięć indukowanych w tych żyłach. Przebiegi w żyłach powrotnych wszystkich trzech faz kabla w sytuacji zwarcia w fazie A linii napowietrznej i odziemienia żyły powrotnych faz A i B, w dwóch miejscach pomiarowych, na końcu i na początku kabla, przedstawione zostały na rysunku 4.25. Zgodnie z przewidywaniami, przepięcie pojawiające się w żyłach powrotnych po stronie nieuziemionych żył powrotnych jest znacznie większe niż w przypadku przepięć po stronie uziemionej. Dla żyły powrotnej fazy A, w której pojawia się zwarcie, przepięcie na początku ciągu kablowego osiąga wartość ok. 110 V, natomiast na końcu ciągu kablowego, w pobliżu miejsca zwarcia i przy nieuziemieniu żyły w tym miejscu, przepięcie ziemnozwarciowe osiąga wartość ok. 5 kV. Dla nieuziemionej jednostronnie żyły fazy B przepięcie przy słupie z głowicą kablową również osiągało większą wartość niż

w przypadku przepięcia w miejscu połączenia z uziemieniem stacji. I tak, dla węzła I przepięcie osiągnęło wartość ok. 60 V, a w węźle J ponad 2 kV. W przypadku żyły powrotnej fazy C uziemionej obustronnie przepięcie również wzrosło względem wariantu a, szczególnie w węźle J, gdzie osiągnęło wartość 1,3 kV.

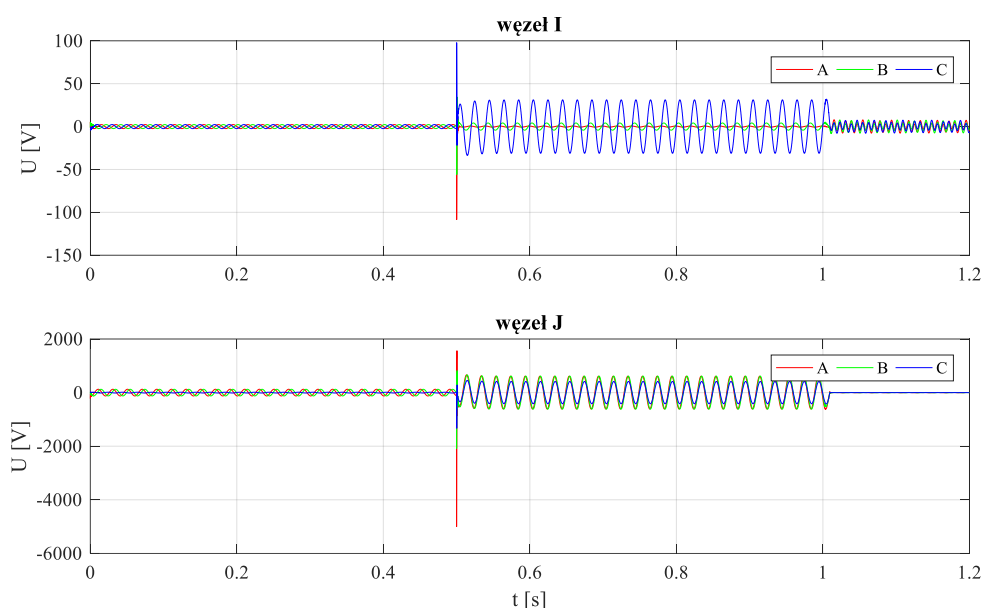


Rys 4.25. Przebiegi napięć indukowanych w żyłach powrotnych trójfazowego kabla elektroenergetycznego dla wariantu b na końcu ciągu kablowego: a. w węźle I, b. w węźle J

Wariant c

Ostatnią modyfikacją wykonaną w modelu było połączenie na końcu ciągu kablowego żył powrotnych faz A oraz B i przełączenie łącznika w stan otwarty, skutkujące nieuziemieniem żył powrotnych fazy A i B. To rozwiązanie ma na celu sprawdzenie możliwości zmniejszenia poziomu przepięć ziemnozwarciowych w stosunku do wariantu b, przy jednoczesnym utrzymaniu pozytywnego wpływu na zmniejszenie strat. Przebiegi napięć chwilowych uzyskanych dla takiej konfiguracji dla żył powrotnych wszystkich trzech faz kabla w sytuacji zwarcia w fazie A linii napowietrznej oraz połączenia i odziemienia żyły powrotnej dwóch faz kabla na jego początku i końcu pokazano na rysunku 4.26. Przebiegi zaprezentowane dla tego przypadku są w gruncie rzeczy tożsame z przebiegami dla wariantu b. Największą różnicę stanowi zaś wartość zasymulowana w miejscu połączenia żył powrotnych faz A oraz B w węźle J, która, zgodnie z tabelą 4.4., wynosi ok. 2 kV. Drobną różnicę stanowi również wartość przepięcia wygenerowanego

w obustronnie uziemionej żył powrotnej fazy C, która w zestawieniu z maksymalną wartością przepięcia w tej samej fazie dla wariantu b różni się o 9 V.



Rys 4.26. Przebiegi napięć indukowanych w żyłach powrotnych trójfazowego kabla elektroenergetycznego dla wariantu c na końcu ciągu kablowego: a. w węźle I, b. w węźle J

Przeprowadzone uzupełniające badania symulacyjne wykazały, że w zaproponowanym modelu o określonych i niezmiennych parametrach, po dokonaniu rekonfiguracji sposobu uziemienia żył powrotnych należy spodziewać się znaczącego wzrostu poziomu przepięć ziemnozwarciowych, które mogą mieć negatywny wpływ na wytrzymałość izolacji kabla elektroenergetycznego pracującego w tym układzie. W tabelach zbiorczych nr 4.3 oraz 4.4 przedstawiono maksymalne, bezwzględne wartości napięć chwilowych wyindukowanych w żyłach powrotnych kabla dla wszystkich 4 wariantów w trzech fazach przy założeniu, że w każdym przypadku zwarcie powstało w fazie A, w linii napowietrznej przyłączonej do omawianej linii kablowej w odległości 110 m od słupa z głowicą kablową. Ze względu na cel wykonywania badań wstępnych, do analizy zjawiska przepięciowego w żyłach powrotnych zastosowano wartości bezwzględne, bez szczegółowego określania kierunku przepływu prądu oraz spadku napięcia wynikającego z przepływu prądu zwarciovego w układzie sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym.

W przypadku opisywanych w tym rozdziale badań symulacyjnych wstępnych oraz uzupełniających również modele różniły się między sobą. Zakładając, że algorytmy obliczeniowe programu dla obu konfiguracji modeli były jednakowe, można wnioskować, że wpływ na poziom przepięć ziemnozwarciowych mogą mieć między innymi zmiana sposobu pracy punktu neutralnego, sposób ułożenia linii kablowej czy rezystancja przejścia w miejscu doziemienia. Te wszystkie parametry, zgodnie z tabelą 4.1, będą rozpatrywane jako zmienne wykorzystywane do symulacji komputerowych w dalszej części pracy. Istotny wpływ na wyniki badań symulacyjnych ma również obciążenie linii kablowej.

Tabela 4.3 Zestawienie wartości napięć wyindukowanych w żyłę powrotnej w trakcie symulacji wstępnych w miejscu przyłączenia do stacji elektroenergetycznej

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>	<i>faza C</i>
wariant 0	72,87	33,55	38,61
wariant a	126,7	64,26	65,65
wariant b	108,4	55,87	97,79
wariant c	108,4	55,87	97,79

Tabela 4.4 Zestawienie wartości napięć wyindukowanych w żyłę powrotnej w trakcie symulacji wstępnych w miejscu przyłączenia do głowicy słupa elektroenergetycznego

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>	<i>faza C</i>
wariant 0	1651	415,9	400,8
wariant a	4573	895	864,3
wariant b	5000	2082	1320
wariant c	2051		1329

4.7. Podsumowanie

Porównując rezultaty badań eksperymentalnych oraz symulacyjnych, uwzględniając zakres zmienności otrzymanych wyników oraz zakres błędów, którymi względem układu rzeczywistego charakteryzuje się metoda symulacji komputerowej, można wnioskować, że sieć zamodelowana w programie Power Factory DigSILENT odzwierciedla parametry sieci w zakresie pozwalającym na przeprowadzenie dalszych badań nad przepięciami ziemnozwarciowymi w żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych z wykorzystaniem tego narzędzia. W celu określenia wpływu poszczególnych parametrów pracy sieci elektroenergetycznej na wielkość napięć indukowanych w żyłach powrotnych należy przeanalizować otrzymane podczas eksperymentów wyniki. Zgodnie z zestawieniami przedstawionymi w tabelach z podpunktu 4.5 rząd otrzymanych wielkości porównywanych badań został zachowany. Wiążąca się z błędami symulacyjnymi różnica w wynikach może być związana z parametrami kabla oraz sposobem jego zamodelowania. Warto zwrócić również uwagę na obciążenie, które w przypadku badań terenowych było wyłączone, a zatem przepięcie ziemnozwarciowe wiąże się tylko z przepływem prądu zwarcia, a na jego poziom nie ma wpływu prąd obciążenia. Inaczej sytuacja przedstawia się w programie komputerowym, w którym niemożliwym jest wykonanie symulacji w linii w wybranym zakresie bez przyłączenia odbiorów. Dodatkowy przepływ prądu związany z zasilaniem odbiorów ma wpływ na wysokość prądu płynącego przez żyłę roboczą, a tym samym na napięcia indukowane w żyłach powrotnych, zgodnie ze wzorami z rozdziału 2.

Mimo istotnego wpływu prądów płynących w żyłach roboczych na prądy indukowane w żyłach obustronnie uziemionych oraz napięcia indukujące się w żyłach powrotnych przy zastosowaniu ich jednostronnego nieuziemienia, pominięcie poziomu prądu wyindukowanego w żyłach powrotnych w trakcie pracy normalnej oraz zakłócenia nie miało istotnego wpływu na spodziewane wartości przepięć. Może ono natomiast stanowić istotną informację w przypadku próby obliczania strat energii elektrycznej, będących argumentem wyjściowym do przeprowadzenia powyższych badań. Obliczenia strat energii elektrycznej wynikające z badań symulacyjnych wraz z informacją o indukowaniu się prądu w żyłach powrotnych w rozpatrywanych w rozprawie wariantach zostaną przedstawione w rozdziale 5, wraz z modelem, którego

elementy i parametry zostały dobrane na podstawie badań porównawczych przedstawionych w powyższych rozdziałach.

Ważnymi elementami przeprowadzonych badań są również otrzymane przebiegi napięć indukowanych w żyłach powrotnych w wyniku przepływu prądu przez żyły robocze i prądy zwarciove zamykające się przez ziemię. Na szczególną uwagę zasługują czoła fal przepięciowych generowanych w żyłach powrotnych, ich charakter, kształt i kierunek [67, 89, 126]. Zgodnie z teorią obwodów, w stanie ustalonym, w układach trójfazowych symetrycznych obciążonych rezystancyjnie przebiegi napięcia i prądów są w fazie, a dla układów RLC są przesunięte w fazie o kąt, odpowiedni dla danego stosunku elementów kąt. Ponadto, zgodnie ze wstępem teoretycznym zamieszczonym w rozdziale 2 tej rozprawy, można wykazać, że prądy indukowane w żyłach powrotnych na skutek przepływu prądu przez żyłę roboczą będą miały ten sam zwrot co prąd, który je wywołał. Oznacza to, że fazy i kierunek napięcia indukowanego w żyłach powrotnych oraz prądów przepływu będą zgodne z fazą i zwrotem ich wielkości źródłowych. Taki stan rzeczy powoduje, że w przypadku badania przepięć ziemnozwarciowych w sieci przebiegi napięciowe będą wykazywały przeciwny zwrot do zwrotu przepływu prądu w badanej sieci w przypadku pomiarów na końcu linii kablowej i zgodny w przypadku pomiarów na początku ciągu kablowego. Pojawienie się prądu zwarciove w wyniku powstania zwarcia doziemnego w sieci ma wpływ na zmianę przepływu prądu w układzie, w którym prądy zwarc doziemnych zamykają się przez ziemię i przez urządzenia zainstalowane w miejscu uziemienia punktu neutralnego w stacji elektroenergetycznej. W omawianym przypadku, gdy kabel elektroenergetyczny pracuje w układzie z obustronnym uziemieniem żyły powrotnej, zgodnie z powyższymi twierdzeniami, przepięcie ziemnozwarciowe pojawia się na początku żyły roboczej, zgodnie z kierunkiem napięcia sieciowego, a na końcu przeciwnie do napięcia sieciowego, dla wszystkich faz, co można zobaczyć na rysunku 4.12 dla symulacji uzupełniającej w wariantcie 0. Po zmianie konfiguracji uziemienia żył roboczych i zmianie drogi zamknięcia się prądu ziemnozwarciowego w układzie, przepięcie dla żyły powrotnej fazy A, która została odziemiona na końcu ciągu kablowego, również zmieniło zwrot, który jest wynikiem potencjału, który pojawił się w punkcie nieuziemienia tej żyły. W przypadku wariantu b zwroty przebiegów napięć indukowanych w żyłach zarówno żył powrotnych fazy A oraz B ulegają zmianie. Zagadnienie dotyczące rozptyłu prądów ziemnozwarciowych dla sieci

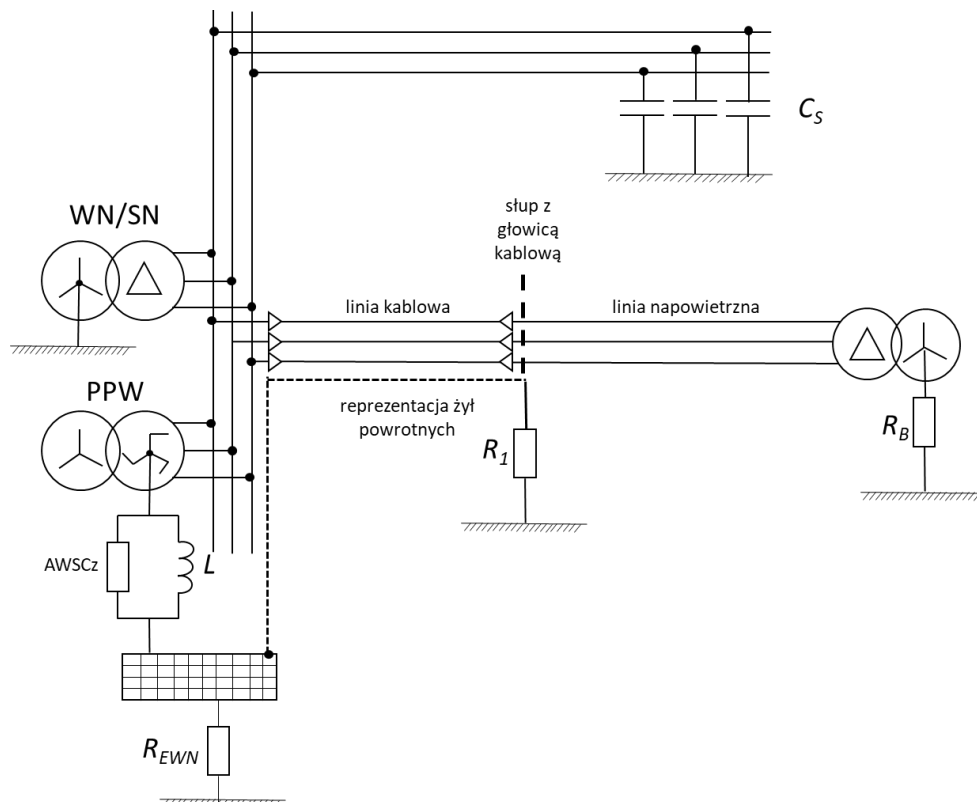
SN z ciągiem kablowo-napowietrznym i omówienie wariantów pracy żył powrotnych z uwzględnieniem zmiany sposobu pracy żyły powrotnej przedstawione zostało w podrozdziale 5.1, a wpływ zmiany tych parametrów sieci na zagrożenie porażeniowe opisany został w podpunkcie 5.4 niniejszej rozprawy.

Podsumowując, zrealizowane badania eksperymentalne i symulacyjne oraz ich wyniki w formie przebiegów zmian napięcia w czasie, a także wnioski wyciągnięte z otrzymanych wyników dotyczące wartości maksymalnych, bezwzględnych napięć wyindukowanych w żyłach powrotnych stanowią podstawę do kontynuowania badań symulacyjnych z wykorzystaniem prostego modelu sieci elektroenergetycznej, w której kluczową rolę pełnią parametry dotyczące właściwości kabla elektroenergetycznego. Zmiana tych parametrów w symulacji komputerowej wynikających z przeprowadzenia badań eksperymentalnych to naturalna kontynuacja badań naukowych dotyczących zjawisk przepięciowych w żyłach powrotnych.

5. Analiza zjawisk przepięciowych generowanych w żyłach powrotnej w zależności od konfiguracji i parametrów linii elektroenergetycznej

5.1. Zakres analizy i zmienności poszczególnych parametrów modelowanego fragmentu sieci elektroenergetycznej

Propozycja alternatywnych sposobów konfiguracji pracy żył powrotnych elektroenergetycznych kabli średniego napięcia z uwzględnieniem zmniejszenia strat energii elektrycznej wynikających z ograniczenia w takim układzie przepływu prądów indukowanych, wymaga analizy właściwości elementów oraz wielkości charakterystycznych sieci pracującej ze zmienioną konfiguracją. W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną rozważania dotyczące napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych w trakcie wystąpienia stanów zakłóceń w sieci średniego napięcia wraz z oceną wpływu parametrów tej sieci na poziomy napięć.



Rys. 5.1. Schemat poglądowy fragmentu sieci, w której wykonano symulacje przepływu prądu indukowanego w żyłach powrotnych linii kablowej w wybranych wariantach ich uziemienia

Przeprowadzenie takich badań należy poprzedzić analizą parametrów, które mogą mieć znaczący wpływ na zmianę poziomu zagrożenia przepięciowego w linii kablowej. Podstawowy punkt odniesienia stanowić może wzór (2.50) pozwalający na obliczenie wartości natężenia pola elektrycznego E [V/m] indukującego się w przewodzie ułożonym równolegle do trzech przewodów, przez które przepływa symetryczny prąd trójfazowy. Wersje tego wzoru, w zależności od sposobu ułożenia przewodów z prądem, zostały zamieszczone w rozdziale 2.2 i bazują na zależności napięcia indukowanego w żyłach powrotnych od prądów symetrycznych przepływających w układzie oraz parametrów linii kablowej. W przypadku rozpatrywanych przebiegów ziemnozwarciowych w sieci średniego napięcia z linią kablową prądy, z których wynikać będą indukowane w żyłach powrotnych napięcia, będą niesymetryczne, a ich rozptyw zależny od parametrów całej sieci. Oznacza to, że ustalenie parametrów, które należy uznać za znaczące w przypadku zmiany wartości przebiegów w żyłach powrotnych, wymaga również zapoznania się z rozptyłem prądów ziemnozwarciowych w sieci średniego napięcia z liniami mieszanymi kablowo-napowietrznymi.

Punktem wyjścia do opracowywania nowych metod konfiguracji pracy żył powrotnych kabla elektroenergetycznego była potrzeba zminimalizowania strat energii elektrycznej wynikających z przepływu prądu powłokowego przez żyły powrotne. Zgodnie z literaturą straty te, w wyjątkowych sytuacjach, mogą przekraczać straty wynikające z przepływu prądów przez żyły robocze. Przeprowadzenie dalszych rozważań dotyczących przebiegów ziemnozwarciowych w układach kablowych z żyłami nieuziemiającymi jednostronnie zostało zatem poprzedzone obliczeniami tych strat dla bazowego modelu kabla elektroenergetycznego, wybranego do dalszych rozważań jako podstawowy wariant. Na rysunku 5.1 przedstawiony został schemat układu, w którym pracuje kabel średniego napięcia NA2XS(F)2Y o przekroju przewodów 150/25, będący modelem bazowym stanowiącym postać wyjściową do przeprowadzania oceny wpływu zmian parametrów pracy sieci na przebiegi ziemnozwarciowe. Parametry modelu kabla jednożyłowego stworzonego w programie przedstawiono na rysunku 5.2. Dla zamodelowanego kabla elektroenergetycznego w sieci średniego napięcia przeprowadzono symulacje komputerowe z wykorzystaniem programu PowerFactory DlgSILET, pozwalające na uzyskanie wartości prądów przepływających przez jego powłoki metalowe w trakcie pracy normalnej. Symulacje przeprowadzono dla modelu sieci, który

wykorzystywany będzie do dalszych badań symulacyjnych. Prąd przepływający przez żyłę roboczą kabla wynika z mocy odbioru trójfazowego, symetrycznego o parametrach $P = 2 \text{ MW}$ oraz $\cos \varphi = 0,95$, a rezystancja żył powrotnych zgodnie z danymi katalogowymi wynosi $0,89 \text{ } \Omega/\text{km}$ [63]. Przyjęta do analizy długość ciągu kablowego wynosi 1 km . Korzystając ze wzorów zamieszczonych w podrozdziale 2.3, dotyczącym sposobu obliczania strat w żyłach powrotnych, parametrów żył powrotnych kabla elektroenergetycznego oraz wyników symulacji komputerowej, uzyskano wyniki pozwalające na oszacowanie zmian strat energii elektrycznej w zależności od wybranego wariantu uziemienia żył powrotnych trójfazowej linii kablowej.

Single Core Cable Type - Equipment Type Library\NKT NA2XS(F)2Y 150/25.TypCab

Name: NKT NA2XS(F)2Y 150/25

Rated voltage: 15, kV

Core Shape: Compact

Outer Diameter: 14,2 mm

Frequency Characteristic (Ohm/km):

Conducting Layers:

	Exists	Material	Resistivity (uOhm*cm)	Relative Per...	Thickness mm	Filling Factor %	DC-Resista... Ohm/km	Tr
Conductor	☒	Aluminium	2,8264	1,	7,1	91,	0,1961217	
Sheath	☒	Copper	1,7241	1,	1,	25,92583	0,72	
Armour	☐	Unknown	2,84	1,	1,	100,	0,	

Insulation Layers:

	Exists	Material	Dielectric Los...	Relative Perm...	Thickness mm
1 (Insulation)	☒	XLPE (<= 18/...	0,	2,5	5,5
2 (Oversheath)	☒	PE (HD/LD)	0,	2,3	2,5
3 (Serving)	☐	Unknown	0,02	3,	1,

Semiconducting Layers:

	Exists	Thickness mm	Advanced	Resistivity uOhm*cm	Relative Permeab...	Relative Permittiv...
Core Outer	☒	1,	☒	1000000	1,	1000,
Ins. Outer	☒	0,6	☒	1000000	1,	1000,

Advanced definition of semi-conducting layers

Overall Cable Diameter: 35,4 mm

Rys. 5.2. Model bazowego kabla elektroenergetycznego NA2XS(F)2Y 150/25 12/20 kV w układzie trójkąta

Wariant 0

W przypadku podstawowej konfiguracji pracy żyły powrotnej, żyły wszystkich faz uziemione są obustronnie, co skutkuje przepływem prądu powłokowego we wszystkich żyłach powrotnych. Zgodnie z podstawowym wzorem (2.98) na stratę mocy w powłokach metalowych, można wyprowadzić wzór (5.1) bazujący na rezystancji żyły powrotnej

R_P oraz prądach wyindukowanych w żyłach powrotnych faz A, B oraz C oznaczonych odpowiednio I_{PA} , I_{PB} , I_{PC} . W wyniku symulacji przeprowadzonej dla modelu bazowego kabla energetycznego i otrzymaniu wartości prądów indukowanych w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego w stanie pracy normalnej, z obciążeniem symetrycznym, straty mocy można szacować na poziomie 666,5 W:

$$\Delta P = R_P(I_{PA}^2 + I_{PB}^2 + I_{PC}^2) \quad (5.1)$$

$$\Delta P = 0,89 \cdot (15,83^2 + 15,63^2 + 15,83^2) = 666,5 \text{ W} \quad (5.2)$$

Wariant a

Nieuziemienie jednej z żył powrotnych na końcu ciągu kablowego, które jest oznaczane w przeprowadzanych analizach jako wariant a, pozwala na ograniczenie przepływu prądu powłokowego. Zaburzenie drogi przepływu prądu w żyłę powrotnej niepołączoną jednostronnie z uziemieniem fazy ogranicza ten prąd praktycznie do zera. Zakładając, że odziemiona została faza A, a fazy B oraz C są uziemione obustronnie i wykorzystując wzór bazowy otrzymuje się zależność (5.3), która w konsekwencji pozwala na wyznaczenie wartości straty mocy na poziomie 339,3 W, przy założeniu rezystancji żyły powrotnej R_P równej $0,89 \Omega$ oraz prądów wynikających z symulacji komputerowej równych $I_{PB} = 13,63 \text{ A}$ oraz $I_{PC} = 13,98 \text{ A}$:

$$\Delta P = R_P(I_{PB}^2 + I_{PC}^2) \quad (5.3)$$

$$\Delta P = 0,89 \cdot (13,63^2 + 13,98^2) = 339,3 \text{ W} \quad (5.4)$$

Wariant b i c

Różnica wynikająca z połączenia powłok między wariantem b i c w sytuacji obciążenia symetrycznego, nie ma istotnego wpływu na przepływ prądów powłokowych. Można zatem założyć, że w tym przypadku prąd indukowany przepływa tylko przez obustronnie uziemioną fazę C. Wzór pozwalający obliczyć stratę mocy dla obu wariantów został przedstawiony jako formuła (5.5), a po podstawieniu wartości rezystancji żyły powrotnej i prądu $I_{PC} = 2,1 \text{ A}$ uzyskanego w wyniku symulacji dla wariantów b i c, obliczona strata jest równa 3,9 W:

$$\Delta P = 3P_P = R_P I_{PC}^2 \quad (5.5)$$

$$\Delta P = 0,89 \cdot 2,1^2 = 3,9 \text{ W} \quad (5.6)$$

Otrzymane wyniki pokazują, że w rozpatrywanej w trakcie badań symulacyjnych modyfikacji sieci największe straty energii elektrycznej można wskazać dla układu

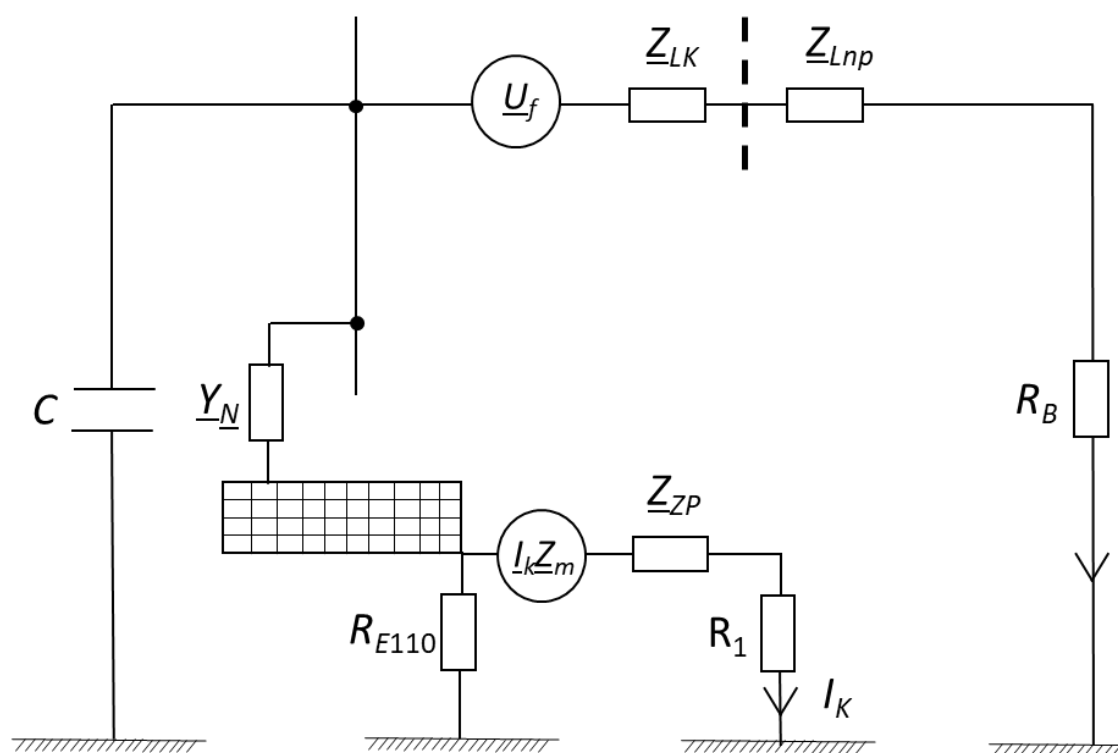
z obustronnym uziemieniem żył powrotnych, zaś najmniejsze straty dla wariantów z odziemionymi żyłami powrotnymi dwóch z trzech faz. Jak można zauważyć, zmniejszenie się strat energii elektrycznej w wyniku rekonfiguracji uziemienia żył powrotnych wpływa zarówno na drogę przepływu prądów indukowanych w żyłach nieuziemionych, jak i na poziom prądów w żyłach uziemionych. Wyniki obliczeń strat energii elektrycznej dla wybranego na potrzeby dalszych badań symulacyjnych przypadku, miały na celu uzasadnienie przeprowadzania dalszych analiz w świetle ekonomicznej zasadności dokonania zmian konfiguracji układów pracy żył powrotnych.

Przedstawione w Rozdziale 4. badania eksperymentalne i zestawienie ich wyników z przebiegami przebiegów ziemnozwarciowych otrzymanymi w programie Power Factory DigSILENT potwierdzają zasadność wykorzystania programu do dalszych badań symulacyjnych, szczególnie dla wariantów, w których pojedyncze fazy trójfazowego układu kablowego są nieuziemione na jednym z końców. Istotną zaletą wybranego do badań programu komputerowego jest szeroka możliwość modyfikacji parametrów urządzeń elektroenergetycznych pracujących w sieci. Zgodnie z przeglądem literatury przedmiotu i badaniami terenowymi wspomagany symulacjami komputerowymi można zakładać, że skala ewentualnego zagrożenia przepięciowego powstałego w wyniku zwarcia doziemnych, będzie wynikała ze zmiany parametrów sieci wpływających na rozptył prądów zwarciovych w sieci średniego napięcia, jak i parametrów ciągu kablowego. W celu analizy rozptyłu prądów ziemnozwarciowych w sieci wykorzystany zostanie przykładowy układ sieciowy odpowiadający sieci SN z wyodrębnionym polem liniowym kablowo-napowietrznym. Do początkowych rozważań wykorzystano założenie, że zwarcie w polu liniowym będzie miało miejsce na końcu linii napowietrznej, w miejscu połączenia ze stacją SN/nn. W sytuacji założonej do analizy, żyły powrotne pracują z uziemieniem obustronnym. Schemat poglądowy takiej konfiguracji został przedstawiony na rysunku 5.1, natomiast schemat kreskowy, na którym zamieszczono reprezentacje parametrów istotnych do omówienia rozptyłu prądu zwarciovego przedstawiono na rysunku 5.3.

Zakładając powstanie zwarcia w miejscu odległym od linii kablowej można przyjąć, że prąd zwarcia zamknie się poprzez pojemność sieci oraz wypadkową impedancję stacji 110/SN wynikającą z rezystancji uziemienia stacji i ze sposobu pracy punktu neutralnego. Ze względu na dużo większą rezystancję uziemienia słupa z głowicą kablową niż

rezystancję stacji elektroenergetycznej, uproszczeniu podlega rozptyw prądów w żyłach powrotnych linii kablowej. W takim układzie prąd przepływający przez ekrany kabli jest wypadkową wartości prądu zwarciovego wpływającego od strony ich uziemienia w stacji i przepływu prądu indukowanego w wyniku sprzężeń magnetycznych między powłokami metalowymi w obwodzie ziemnopowrotnym. Obustronne uziemienie żył powrotnych zagwarantuje wyrównanie potencjału na obu końcach ciągu kablowego i zminimalizowanie napięcia indukowanego w tych żyłach.

W sytuacji, gdy żyły powrotne jednej bądź dwóch faz pozostają jednostronnie nieziemione, potencjał wynikający z przyptywu prądu przez żyły powrotne pozostaje niewyrównany, a co za tym idzie, w sytuacji, gdy wzrasta prąd w żyłę powrotnej, wzrasta również napięcie. Oznacza to także, że zwrot wektora napięcia będzie zgodny ze zwrotem wektora prądu, co w omawianym wypadku powinno wskazywać na kierunek zgodny z kierunkiem przepływu prądu.



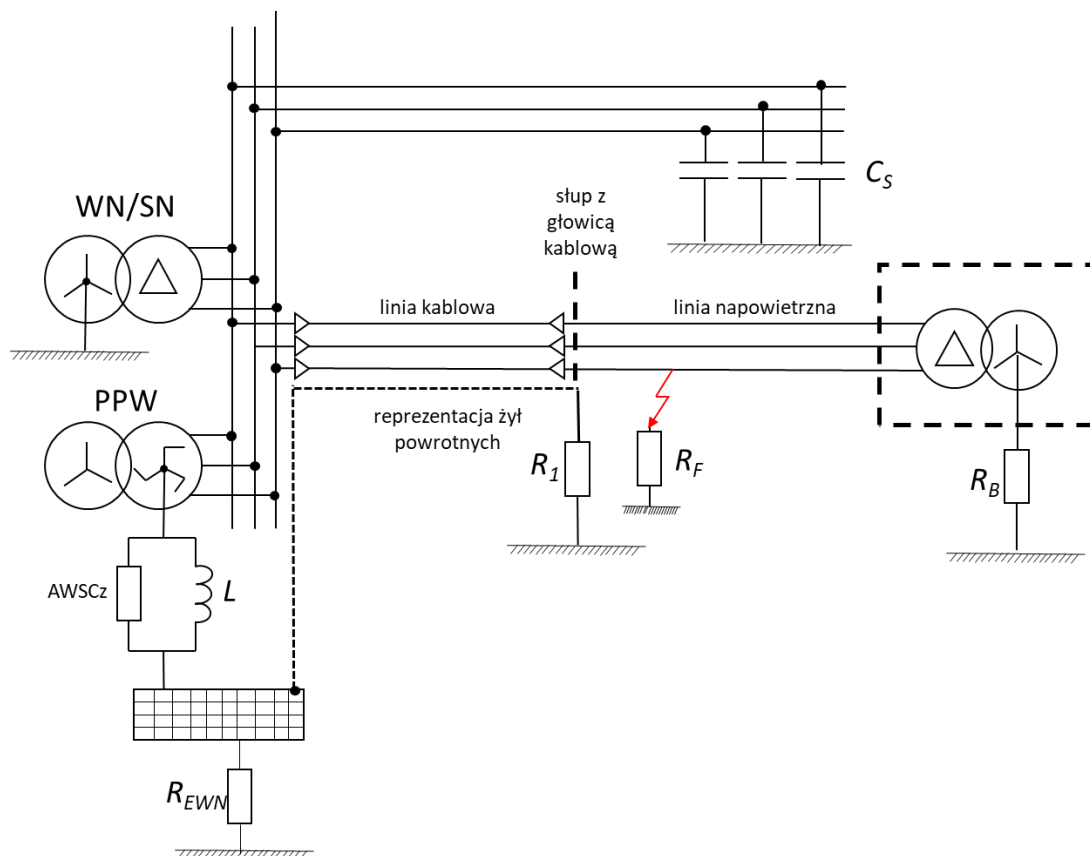
Rys. 5.3. Schemat kreskowy sieci elektroenergetycznej, w której występuje zwarcie na końcu ciągu kablowo-napowietrznego, gdzie: $\underline{U}_f$ – napięcie fazowe, $\underline{Z}_{LK}$ – impedancja linii kablowej, $\underline{Z}_{Lnp}$ – impedancja linii napowietrznej, R_B – rezystancja uziemienia stacji SN/nn, R_1 – rezystancja uziemienia słupa z głowicą kablową, R_{E110} – rezystancja stacji 110/SN, I_K – prąd zwarciov, $\underline{Z}_{ZP}$ – impedancja żyły powrotnej, $\underline{Y}_N$ – admitancja punktu neutralnego sieci SN, C_S – pojemność sieci

Warunki przepływu prądu przez żyły robocze ulegną modyfikacji również w sytuacji, gdy zmieni się miejsce wystąpienia zwarcia w układzie. Zwarcie w pobliżu konstrukcji wsporczej wyposażonej w głowicę kablową może spowodować zmianę kierunku przepływu prądu zwarciovego w żyłach przyłączonych do uziemienia tej konstrukcji, ze względu na możliwość zamknięcia się prądu zakłóceniovego przez te rezystancje. Warunkiem koniecznym, aby uzyskać taką drogę przepływu jest wystarczająco mała rezystancja uziemienia R_1 , która zgodnie z normami dla słupa z głowicą kablową musi mieć wartość nie większą niż 10Ω [98].

W wyniku przeprowadzonych badań terenowych oraz symulacyjnych wybrany został model sieci elektroenergetycznej do przeprowadzenia dalszych badań eksperymentalnych, których celem było określenie poziomu przepięć ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych linii kablowej średniego napięcia przy zastosowaniu alternatywnych sposobów uziemienia tych żył. Dobór elementów modelu podyktowany był znajomością zjawisk mających wpływ na indukowanie się napięć w żyłach powrotnych w trakcie trwania zwarcia doziemnego, a zatem prądów płynących w żyłach roboczych i parametrów linii kablowej. Dla uproszczenia zagadnienia zdecydowano o wykorzystaniu standardowych modeli urządzeń, takich jak: transformator zasilający, transformator uziemiający czy linie napowietrzne, dla których parametry nie będą zmieniane podczas symulacji. Z punktu widzenia sieci o punkcie neutralnym uziemionym nieskutecznie, wartość prądu zwarcia doziemnego będzie zależna od rodzaju i parametrów urządzenia pracującego w punkcie neutralnym transformatora w polu potrzeb własnych stacji. Z punktu widzenia wpływu parametrów linii kablowej na napięcie indukowane w żyłę powrotnej należy szczególną uwagę zwrócić na geometryczne zależności między powłokami metalowymi, które mają swoje źródło w odległościach między poszczególnymi kablami, ale także w przekrojach poprzecznych tych powłok. Wszystkie zmienne i stałe analizowane w modelu sieci elektroenergetycznej do badań zjawisk przepięciowych w żyłach powrotnych zostały zamieszczone w rozdziałach 5.2 oraz 5.3, wraz z zakresem zmienności wybranych parametrów.

5.2. Schemat ogólny modelu sieci elektroenergetycznej SN

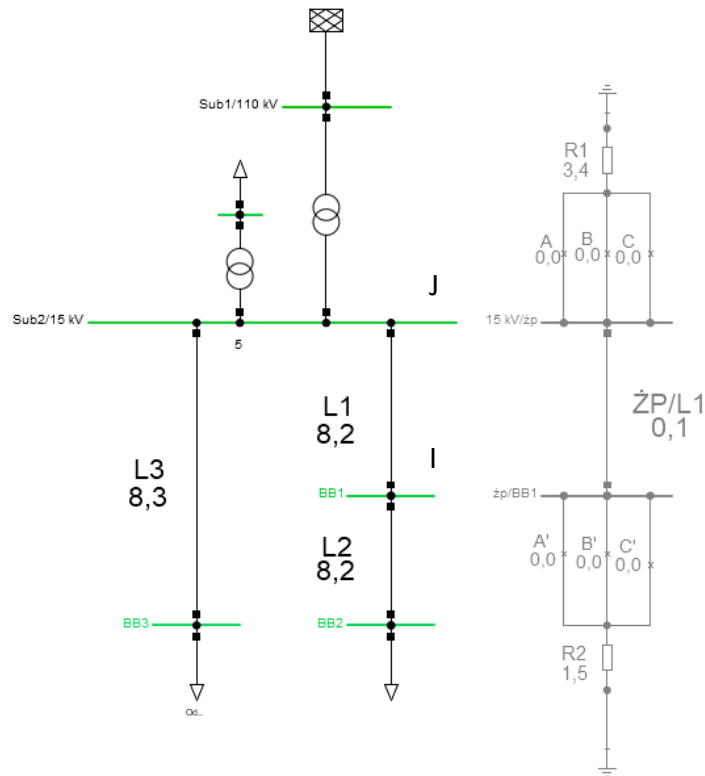
Ocena wpływu zmian parametrów sieci na powstanie przebiegów ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych kabla przy zastosowaniu proponowanych w rozprawie wariantów konfiguracji ich pracy opierać się będzie na badaniach symulacyjnych przeprowadzonych z wykorzystaniem narzędzia Power Factory DigSILENT w wersji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



Rys. 5.4. Schemat poglądowy fragmentu sieci do badań przebiegów ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej

Na rysunku 5.4 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 wariantcie sieć uziemiona jest przez dławik gaszący. 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 przebiegów ziemnozwarciowych powstających w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego na

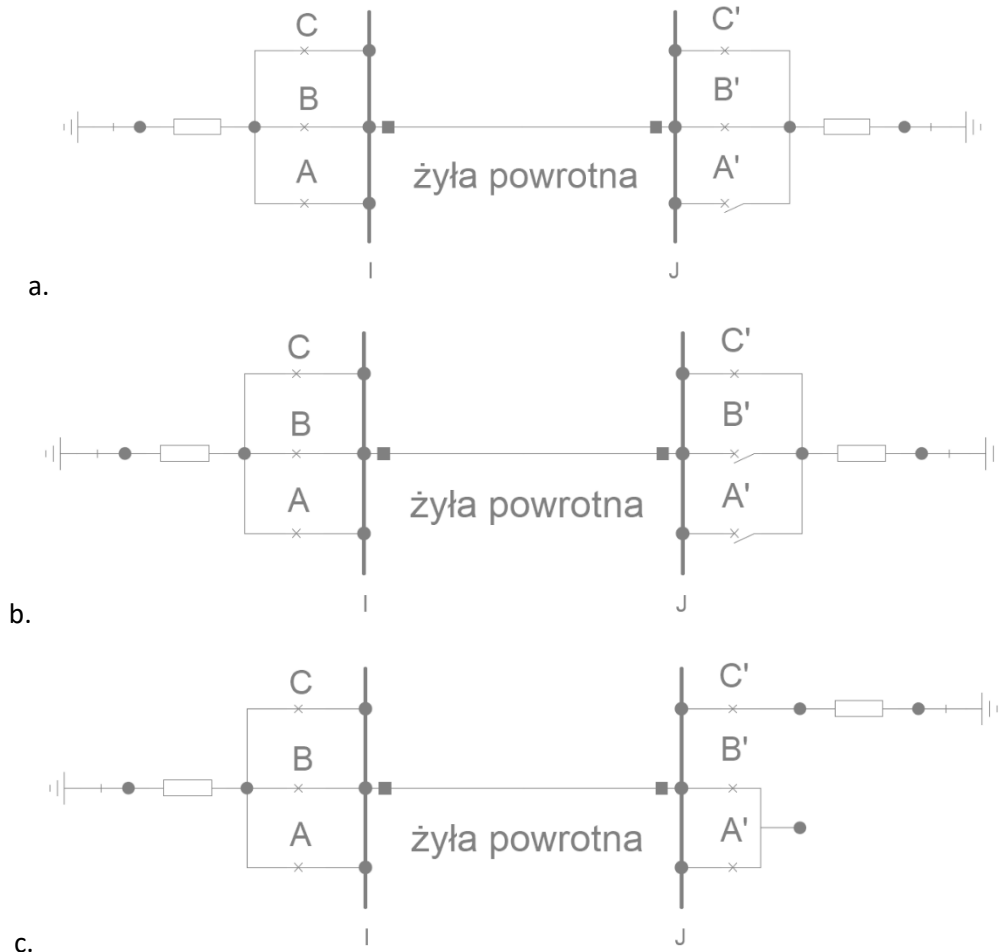
skutek występowania zwarcia doziemnego w pobliżu kabla. Model symulacyjny sieci stworzony na potrzeby badań został przedstawiony na rysunku 5.5. Ograniczenie liczby elementów modelu symulacyjnego miało na celu ograniczenie możliwości wprowadzenia zmiennych, które mogłyby w niemożliwy do skontrolowania sposób wpłynąć na poziom przepięć ziemnozwarciowych, a tym samym mogłyby zaburzyć ocenę wpływu wybranych jako zmienne właściwości sieci.



Rys. 5.5. Model sieci zaimplementowany w programie Power Factory do badań przepięć ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej

Modelowanie wariantów symulacji, które zostały określone w rozdziale 2 rozprawy było możliwe dzięki wydzieleniu żyły powrotnej z linii kablowej, a następnie odseparowaniu faz żył powrotnych w układzie trójfazowym. Każda faza, po stronie przyłączenia do stacji, jak i w miejscu połączenia z linią napowietrzną, została wyposażona w wyłącznik pozwalający na zmianę konfiguracji układu z obustronnie uziemionego do wariantu a, w którym nieuziemiona pozostaje faza A (rys. 5.6.a) lub wariantu B, w którym nieuziemione zostają fazy A i B (rys. 5.6.b). W przypadku wariantu C, połączenie pomiędzy żyłami powrotnymi faz A i B realizowano z zastosowaniem łącznika, w którym przeprowadzano rejestrację przebiegów napięcia (rys. 5.6.c).

W przebiegu badań zdecydowano o wykonywaniu rekonfiguracji połączeń żył powrotnych w miejscu połączenia kabla z linią napowietrzną, w związku ze zwiększonym zagrożeniem przepięciowym w miejscu takiego połączenia w porównaniu z punktem łączenia żył powrotnych w stacji elektroenergetycznej.



Rys. 5.6. Konfiguracja połączeń uzziemienia żył powrotnych w modelu sieci elektroenergetycznej: a. wariant a, b. wariant b, c. wariant c

Parametry elementów składowych modelu sieci elektroenergetycznej wybranej do przeprowadzenia badań przedstawione zostały w tabeli 5.1. Podstawą ich doboru były składowe rzeczywistej sieci, w której przeprowadzono badania terenowe. Elementy składowe zamieszczone w tabeli podzielono ze względu na wpływ zmiany ich parametrów na poziom napięcie ziemnozwarciowych. Do parametrów zmiennych zaliczono zatem wszystkie informacje dotyczące kabla elektroenergetycznego, odbioru w ciągu kablowo-napowietrznym oraz rezystancji przejścia w miejscu zwarcia w linii napowietrznej przyłączonej do kabla elektroenergetycznego. Modyfikacji ulegał również

sposób pracy punktu neutralnego sieci. Pozostałe parametry w trakcie badań symulacyjnych pozostały niezmiennie, zgodne z pierwotnymi założeniami. Zakres zmiany parametrów wraz z uzasadnieniem wyboru ich przedziałów został zamieszczony w podpunkcie 5.3.

Tabela nr 5.1. Parametry elementów modelu sieci.

Oznaczenie	Nazwa elementu	Parametry symulacji
Parametry stałe		
S	system elektroenergetyczny	$S_k'' = 10000$ MVA
TR1	transformator zasilający 110/15	$S_n = 16$ MVA $u = 110/15$ $u_z = 8\%$ $\Delta p_{Cu} = 15$ MW
TR2	transformator uziemiający 15/0,4	$S_n = 1,09$ MVA $u = 15/0,4$ $u_z = 5,5\%$ $\Delta p_{Cu} = 1,9$ kW
R1	rezystancja uziemienia stacji	$R_{E110} = 0,5$ Ω
R2	rezystancja uziemienia słupa	$R_E = 10$ Ω
Odb2	odbiornik nr 2	$P_2 = 2$ MW $\cos\varphi_L = 0,95$
L2	linia napowietrzna	PAS 70 1 km
L3	linia napowietrzna	PAS 70 2 km
Parametry zmienne		
L1	linia kablowa	NA2XS(F)2Y 150/25 12/20 kV ułożona na głębokości 0,8 m układ trójkątny
ŻP/L1	żyła powrotna linii kablowej	miedziana żyła o grubości 2,5 mm
Odb1	odbiornik nr 1	$P_1 = 2$ MW $\cos\varphi_L = 0,95$
RF	rezystancja przejścia	$R_F = 10$ Ω
PN	dławik uziemiający	$X_L = 144,3$ Ω

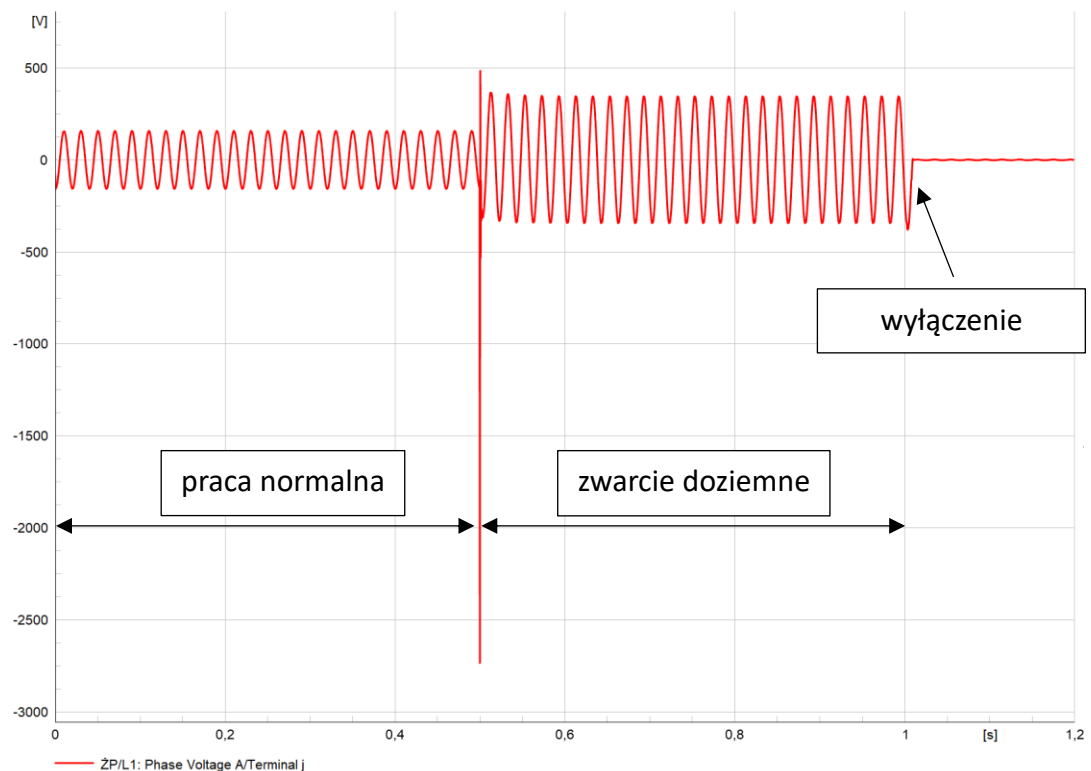
Kroki symulacji komputerowej zostały dobrane w sposób pozwalający zarejestrować napięcia indukowane w żyłach powrotnych w stanie pracy normalnej oraz podczas zmiany stanu na zakłóceniu wynikający ze zwarcia doziemnego. Parametry symulacji dobrane zostały zgodnie z tabelą 5.2. Program komputerowy zastosowany 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.

Tabela 5.2. 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	Węzeł J – miejsce reprezentujące słup z głowicą kablową, do którego dołączona jest badana trójfazowa linia kablowa

Otrzymane w wyniku przeprowadzenia zdarzenia symulacyjnego przebiegi wartości charakterystycznych były możliwe do uzyskania przy użyciu narzędzia Diagrams, które pozwala na analizę zmienności wielkości w czasie trwania symulacji. Takie rozwiązanie pozwoliło na ustalenie zarówno maksymalnych wartości przebiegu występującego w trakcie zwarcia doziemnego, jak i charakteru przebiegu napięcia w trakcie trwania zakłócenia. Przykładowy przebieg napięcia dla parametrów podstawowych zamieszczonych w tabeli 5.1 oraz dla właściwości zdarzeń symulacyjnych opisanych

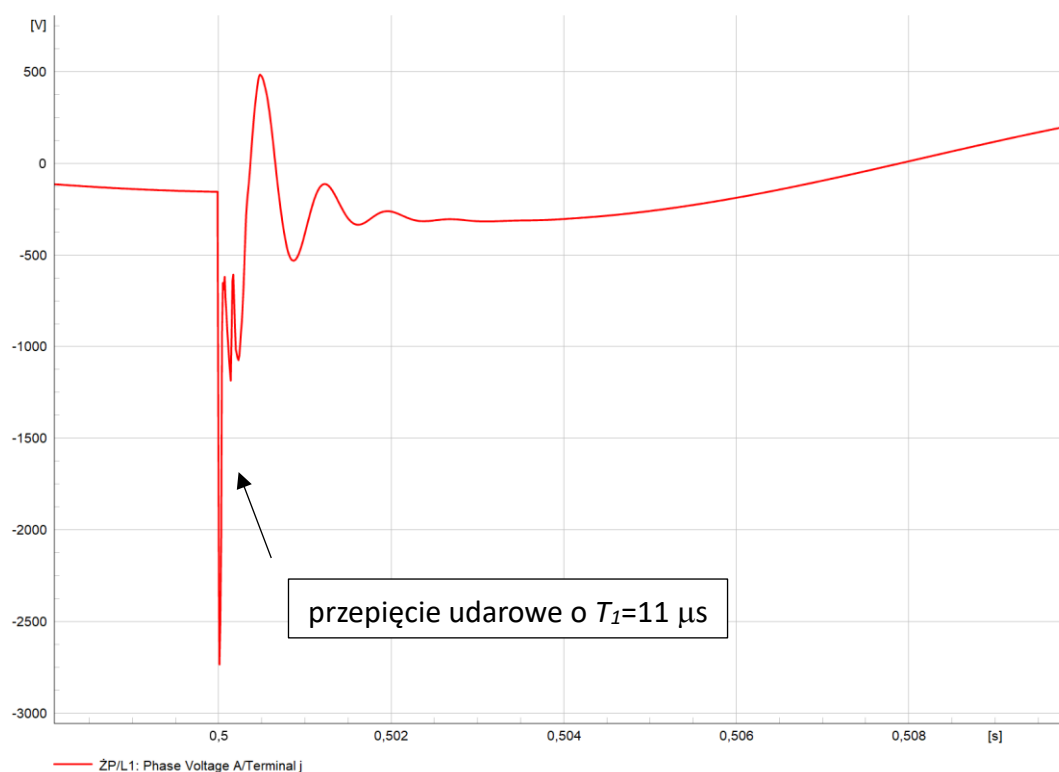
w tabeli 5.2 przedstawiony został na rysunku 5.7. Modelowy przebieg został otrzymany w wyniku przeprowadzenia symulacji zwarcia doziemnego w fazie A linii napowietrznej połączone z linią kablową pracującą z obustronnym uziemieniem, a jego wynikiem jest przebieg napięcia zarejestrowany w żyłę powrotnej fazy A w miejscu połączenia linii kablowej z linią napowietrzną, które w rzeczywistym układzie byłoby głowicą kablową umiejscowioną na słupie linii napowietrznej. W modelu miejsce to oznaczone zostało jako węzeł J. Na zamieszczonym poniżej przebiegu widać znaczącą różnicę pomiędzy poziomami napięć przed i po wystąpieniu zwarcia doziemnego, wyindukowanych w żyłę powrotnej, jak i przebiecie ziemnozwarciowe związane z pojawieniem się zwarcia doziemnego w pobliżu uziemienia słupa linii, do którego przyłączone są żyły powrotne kabla.



Rys. 5.7. Przykładowy przebieg zdarzeń w trakcie trwania symulacji przedstawiony jako napięcie zmienne w czasie dla żyły powrotnej fazy A

W celu zobrazowania charakteru przebiegów powstających w żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych symulowanych w programie, na rysunku 5.8 przedstawiono przybliżenie fragmentu przebiegu przykładowego z rysunku 5.7, w którym pojawia się przebiecie ziemnozwarciowe. Zgodnie z literaturą jest to przebiecie udarowe o stromym

czołe [J] i czasie narastania T_1 mniejszym niż 20 μs . Tłumienie fali przepięciowej w układzie, które skutkuje zmniejszeniem stromości czoła i amplitudy, a w konsekwencji powrót do przebiegu sinusoidalnego, następuje w rezultacie tłumienia rezystancyjnego. Wynika ono między innymi ze strat energii w rezystancji przewodów bądź ziemi. W przypadku obwodu ziemnopowrotnego straty energii w ziemi będą znacznie większe i za ich przyczyną przepięcie ziemnozwarciowe zostanie stłumione.



Rys. 5.8. Przybliżenie fali przepięciowej będącej fragmentem przebiegu napięcia indukowanego w żyłce powrotnej kabla elektroenergetycznego zasymulowanego w programie Power Factory

5.3. Ocena wpływu zmiany parametrów na poziom przepięć ziemnozwarciowych

5.3.1. Wprowadzenie

Zgodnie z wynikami badań eksperymentalnych przeprowadzonych w warunkach sieci rzeczywistej w trakcie prób zwarciovych 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:

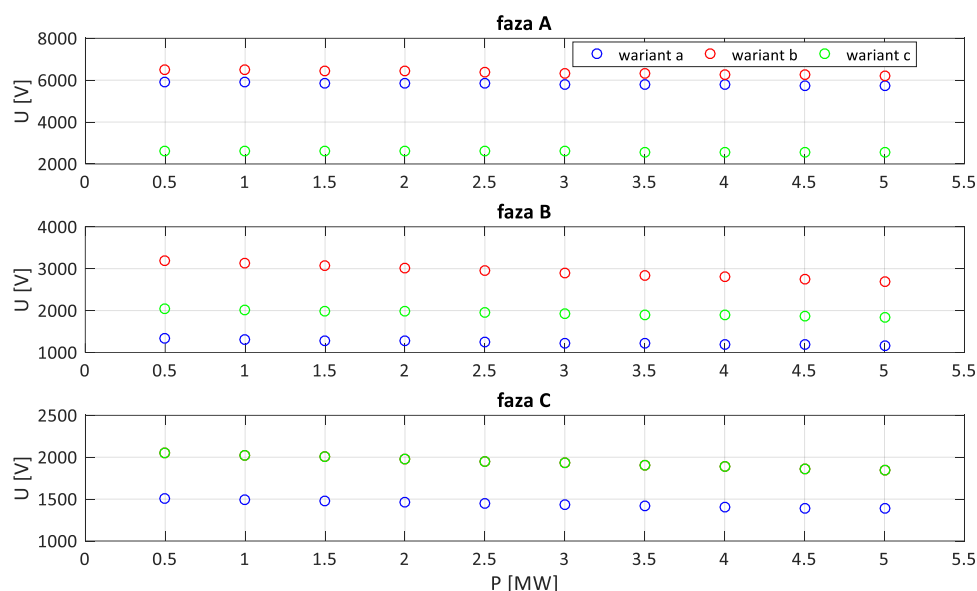
- obciążenie kabla prądem roboczym,
- sposób ułożenia trójfazowej linii kablowej,
- sposób pracy punktu neutralnego sieci SN,
- pole przekroju poprzecznego żyły roboczej,
- pole przekroju poprzecznego żyły powrotnej,
- długość linii kablowej,
- rezystancja przejścia w miejscu zwarcia.

Zakres zmienności parametrów sieci oraz wyniki symulacji komputerowych przedstawione zostały w postaci wykresów i przebiegów oraz tabel z wynikami maksymalnych przepięć ziemnozwarciowych w podpunktach od 5.3.1 do 5.3.7.

5.3.2. Ocena obciążenia kabla prądem roboczym

W chwili pojawienia się zwarcia w sieci elektroenergetycznej miejsce jego wystąpienia zasilane jest sumą prądów zwarciovych wynikających z konfiguracji sieci oraz rodzaju zwarcia, natomiast w tym samym czasie w fazach zdrowych płynie prąd zasilający odbiory. W przypadku żył powrotnych jednożyłowych kabli elektroenergetycznych tworzących układ trójfazowy, których jedną z głównych funkcji jest zagwarantowanie drogi przepływu dla prądu zakłóceniovego, należy uwzględnić również indukowanie się prądów i napięć wynikających z sprzężeń między powłokami metalowymi i przepływu prądu obciążenia w kablach zdrowych faz. W takiej sytuacji, w zależności od rodzaju zakłócenia i stopnia obciążenia prądem roboczym żył roboczych kabla, napięcie indukowane w żyłach powrotnych będzie się zmieniać. Dla trzech wariantów konfiguracji uziemienia żył powrotnych przeprowadzono badania symulacyjne, w trakcie których zmieniany został zakres obciążenia kabla elektroenergetycznego prądem roboczym. Wyniki zostały przedstawione w formie

wykresu przedstawiającego zmienność maksymalnego napięcia ziemnozwarciowego ze względu na obciążenie kabla prądem roboczym. Wykres pozwala na ocenę wpływu wariantu sposobu konfiguracji uziemienia żył powrotnych z punktu widzenia zwiększonego obciążenia prądowego linii kablowej.



Rys. 5.9. Wpływ zmiany prądu roboczego linii kablowej na napięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej

Przedział doboru zmiennych w wybranym modelu wynikał przede wszystkim z przyjętych parametrów elementów sieci, a przede wszystkim z obciążalności transformatora zasilającego o mocy $S_n=16$ MVA oraz dopuszczalnej obciążalności prądowej kabla elektroenergetycznego NA2XS(F)2Y 150/25 w ziemi w układzie trójkąta, która wynosi $I_{dd} = 320$ A i linii napowietrznej PAS 70 w ciągu kablowo-napowietrznym o $I_{dd} = 295$ A [A, B, C]. Ze względu na model sieci wielkością zmienną była moc odbioru odbiornika przyłączonego do ciągu kablowo-napowietrznego Odb1, a informacje o modelu pozwoliły na wybranie zakresu mocy obciążeniowej o wartości minimalnej 0,5 MW równej 3,125% mocy transformatora do wartości maksymalnej 5 MW, co daje 31,25% mocy transformatora, z krokiem co 0,5 MW. Pozwoliło to na nie przekroczenie maksymalnych dopuszczalnych prądów kabla i linii napowietrznej, przy jednoczesnym zapewnieniu najszerszego spektrum możliwości zasilania odbiorów z linii. Stosunek zmian maksymalnych napięć ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych trzech faz linii

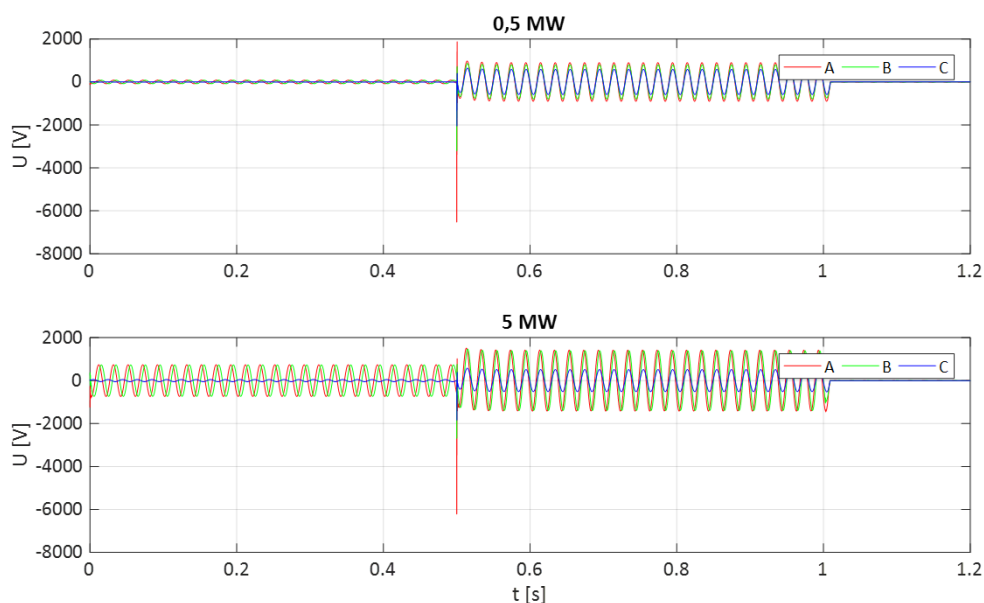
kablowej w zależności od wariantu ich uziemienia został przedstawiony w sposób graficzny na rysunku 5.9.

W tabeli 5.3. zamieszczono dokładne wartości maksymalnych przebiegów ziemnozwarciowych otrzymane w wyniku symulacji. Wartości te wskazują na znaczącą relację między prądami obciążenia płynącymi przez żyły robocze linii kablowej, a przepięciami indukowanymi w żyłach powrotnych w trakcie powstawania zwarcia. Zgodnie z tabelą wyników można zauważyć, że wraz ze wzrostem obciążenia napięcia są tłumione i przy bardzo dużych obciążeniach linii kablowej, przepięcia 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.

Tabela 5.3. Bezwzględne maksymalne wartości przebiegów ziemnozwarciowych

	variant a			variant b			variant c	
	U_f [V]			U_f [V]			U_f [V]	
P_{Odb1} [MW]	A	B	C	A	B	C	A + B	C
0,5	5931	1326	1513	6528	3204	2049	2635	2049
1	5906	1307	1498	6490	3141	2024	2635	2024
1,5	5881	1287	1483	6453	3080	2000	2635	2000
2	5857	1268	1468	6419	3024	1978	2621	1977
2,5	5834	1249	1454	6384	2965	1954	2608	1953
3	5811	1231	1440	6349	2908	1931	2594	1930
3,5	5788	1212	1425	6315	2852	1909	2581	1908
4	5766	1194	1411	6282	2797	1886	2569	1885
4,5	5744	1177	1397	6249	2743	1864	2557	1863
5	5722	1159	1383	6217	2690	1842	2545	1841

Przykładowe porównanie przebiegów napięć indukowanych w żyłach powrotnych wszystkich faz linii kablowej zilustrowane zostało na rysunku 5.10. 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.

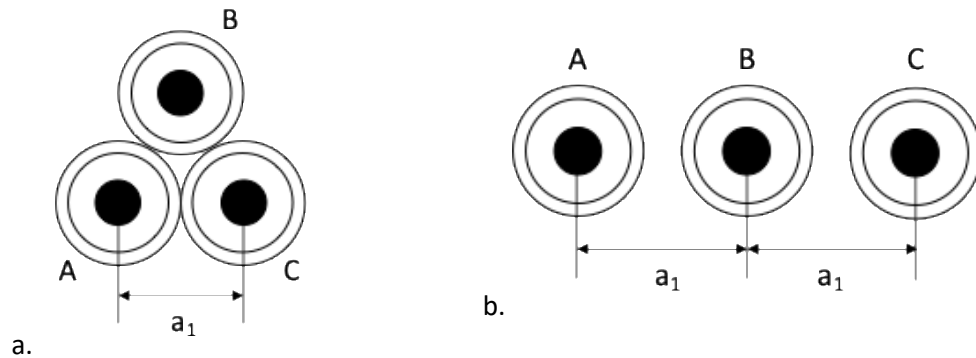


Rys. 5.10. Przebiegi napięć indukowanych w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej przy mocy odbioru a. $P_{Odb1} = 0,5 \text{ MW}$ oraz b. $P_{Odb1} = 5 \text{ MW}$ dla wariantu b

5.3.3. Ocena wpływu ułożenia 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 powłokach metalowych tych kabli. Układ trójkąta równobocznego zapewnia, przy symetrycznym zasileniu we wszystkich fazach, równomierne zmniejszenie napięć i prądów indukowanych, które wynika ze skojarzonych strumieni magnetycznych w takim układzie. Układ płaski będzie charakteryzował się natomiast niesymetrycznością sprzężeń związaną z nierównymi odległościami między powłokami metalowymi kabla. W takim układzie stopień skojarzenia strumieni magnetycznych między skrajnymi fazami zmniejsza się, co powoduje wzrost wartości indukowanych w fazach skrajnych [D, E]. Metody ułożenia i odległości między jednożyłowymi kablami dobrane zostały na podstawie danych literaturowych dotyczących standardów i norm krajowych. Założono,

że przewody zostały ułożone w rowach, na głębokości 0,8 m [F]. Ilustrację sposobu ułożenia kabli wraz z zaznaczonymi odległościami przedstawiono na rysunku 5.11. Odległości między geometrycznymi środkami jednożyłowych kabli elektroenergetycznych zostały wybrane na podstawie przykładów literaturowych i danych katalogowych kabli.



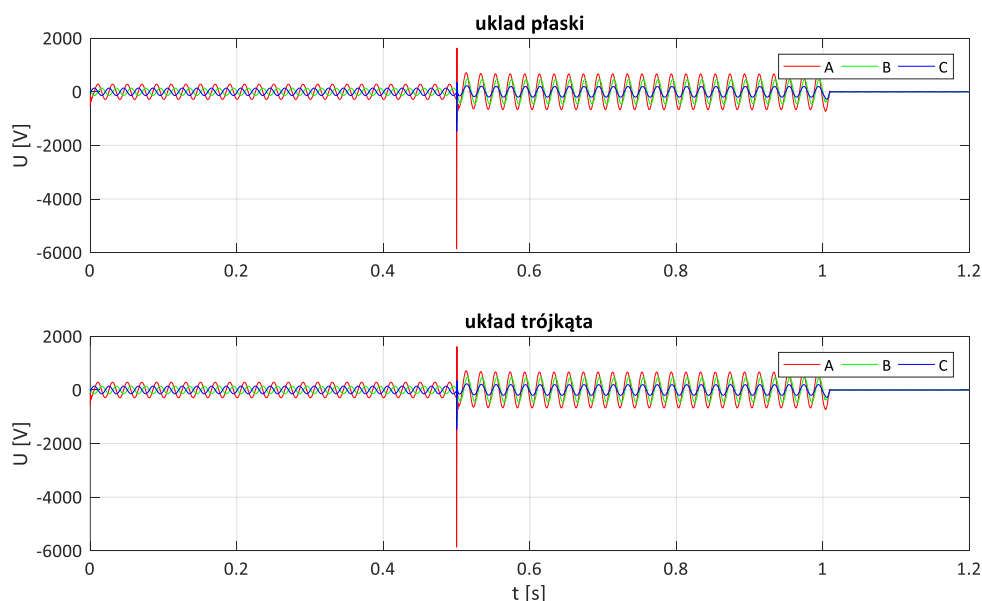
Rys. 5.11. Układ kabli jednożyłowych a. układ trójkąta równobocznego o odległości między środkami geometrycznymi równej średnicy przewodu, a zatem $a_1=36$ mm, b. układ płaski o odległości między środkami geometrycznymi kabli równymi $a_1=36$ mm lub $a_1=70$ mm lub $a_1=10$ mm

W ramach badań symulacyjnych przeprowadzone zostały analizy zdarzeń zwarciovych, zgodne z założeniami poczynionymi na wstępie. Zmianę wykonano tylko w modelu kabla, natomiast pozostałe parametry sieci pozostały niezmiennie. Symulacje zostały przeprowadzone dla wszystkich trzech wariantów konfiguracji uziemienia żyły powrotnej, których wyniki w postaci przebiegów przedstawiono na rysunkach 5.12, 5.13 oraz 5.14, a w tabelach 5.4, 5.5 oraz 5.6 zamieszczono wartości maksymalnych przepięć ziemnozwarciowych.

Wariant a

Przebiegi zmienności napięcia w czasie trwania symulacji, zaprezentowane na rysunku 5.12, obrazują napięcia we wszystkich żyłach powrotnych kabla, na końcu ciągu kablowego, w miejscu odłączenia żyły powrotnej fazy A od uziemienia dla dwóch przypadków, układu trójkąta równobocznego z żyłami stykającymi się na całej długości linii oraz układu płaskiego, w którym środki żył powrotnych oddalone są od siebie o 7 cm. Zgodnie z wynikami maksymalnych wartości napięć indukujących się w czasie

trwania zwarcia doziemnego można zauważyć, że zmiana sposobu ułożenia w ziemi jednożyłowych kabli nie ma istotnego wpływu na przepięcie ziemnozwarciowe.



Rys. 5.12. Przebieg napięcia indukowanego w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej w zależności od sposobu ułożenia kabli dla wariantu a

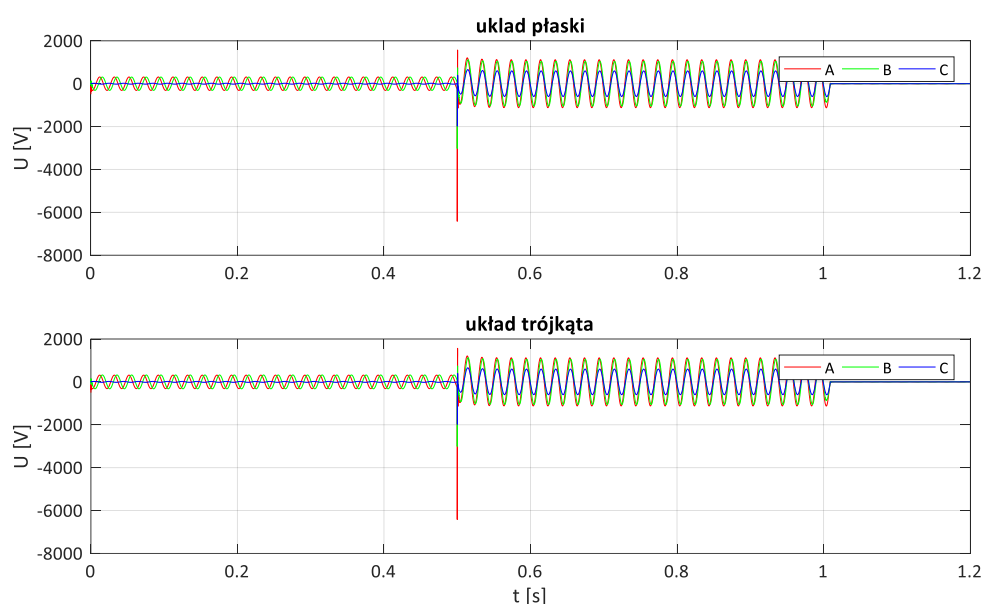
Tabela 5.4. Bezwzględne maksymalne wartości przepięć ziemnozwarciowych otrzymane dla wariantu a w żyłach powrotnych faz A, B oraz C

Układ kabli	$U_f [V]$		
	A	B	C
trójkąt	5857	1268	1468
płaski 36 mm	5861	1256	1475
płaski 70 mm	5861	1254	1473
płaski 100 mm	5863	1253	1472

Wariant b

Symulacja wariantu b, w trakcie którego linia kablowa pracuje z jednostronnie nieuziemiałymi dwiema żyłami powrotnymi faz A i B, pozwoliła na przeanalizowanie zmian przepięć ziemnozwarciowych ze względu na ułożenie kabli w układzie trójfazowym. Przebiegi zmian napięcia względem czasu we wszystkich żyłach powrotnych dla zasymulowanych przypadków układu płaskiego z odległościami 70 cm oraz układu trójkąta, zostały pokazane na rysunku 5.13. Na maksymalne wartości

przebieg napięć ziemnozwarciowych, chociaż wyższe niż dla wariantu a, nie ma istotnego wpływu, z punktu widzenia zagrożenia przepięciowego, sposób ułożenia kabli w ziemi.



Rys. 5.13. Przebieg napięcia indukowanego w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej w zależności od sposobu ułożenia kabli dla wariantu b

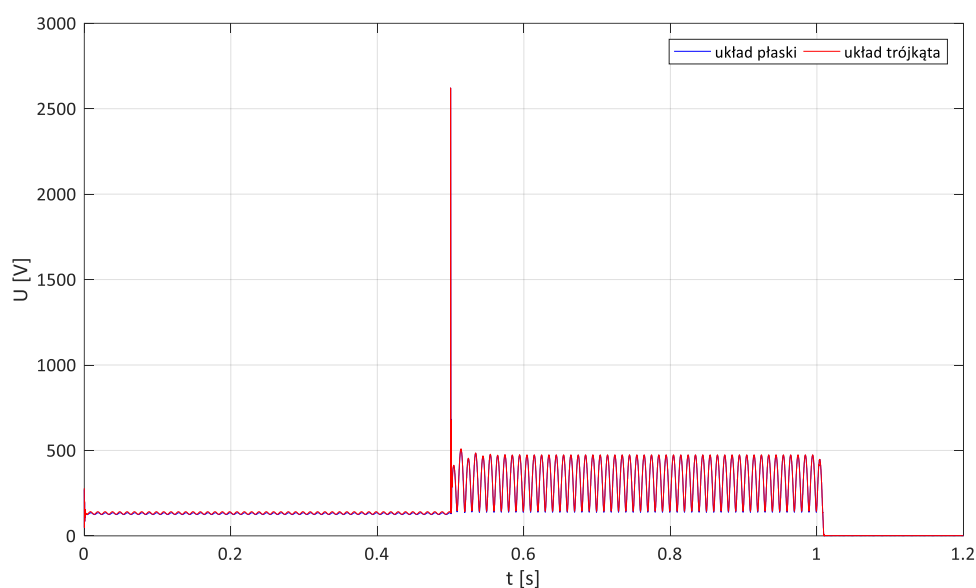
Tabela 5.5. Bezwzględne maksymalne wartości przepięć ziemnozwarciowych otrzymane dla wariantu b w żyłach powrotnych faz A, B oraz C

Układ kabli	$U_f [V]$		
	A	B	C
trójkąt	6417	3019	1977
płaski 36 mm	6418	3009	1977
płaski 70 mm	6418	3007	1975
płaski 100 mm	6419	3006	1972

Wariant c

W sytuacji, gdy jednostronnemu nieuziemieniu podlegają dwie żyły powrotne układu kablowego i jednocześnie zostają one połączone w miejscu układu, w którym są nieuziemione, przebieg zależności napięcia od czasu trwania symulacji możliwy jest do uzyskania tylko w punkcie ich połączenia. Jak widać na rysunku 5.14 powoduje to zmianę zwrotu z jakim występuje maksymalne przepięcie ziemnozwarciowe, co związane jest

z sumowaniem się przebiegów napięć w żyłach powrotnych faz A i B, które mają charakter sinusoidalny i są względem siebie przesunięte w fazie. Zgodnie z rysunkiem widać, że przebiegi napięcia uzyskane w wyniku przeprowadzenia symulacji zwarcia doziemnego w fazie A, w punkcie połączenia żył powrotnych, charakteryzują się takim samym poziomem napięć. Różnice wynikające z ułożenia kabli w układzie płaskim (odległość 7 cm) i trójkąta równobocznego widoczne są w tabeli 5.6 i z punktu widzenia zagrożenia przepięciowego nie są istotne.



Rys. 5.14. Przebieg napięcia indukowanego w punkcie połączenia żył powrotnych faz A i B trójfazowej linii kablowej w zależności od sposobu ułożenia kabli dla wariantu c

Tabela 5.6. Bezwzględne maksymalne wartości przepięć ziemnozwarciowych otrzymane dla wariant c w żyłach powrotnych faz A, B oraz C

Układ kabli	$U_f [V]$	
	A+B	C
trójkąt	2621	1976
płaski 36 mm	2622	1977
płaski 70 mm	2622	1975
płaski 100 mm	2622	1972

5.3.4. Ocena wpływu sposobu pracy punktu neutralnego sieci średniego napięcia

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. Wartości prądów ziemnozwarciowych dla poszczególnych sieci średniego napięcia wynoszą:

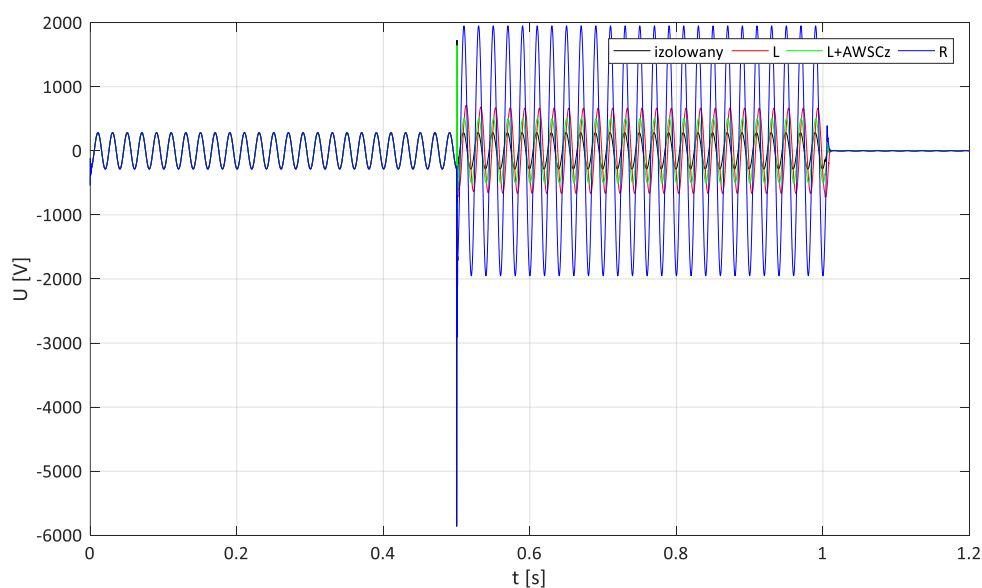
- o punkcie neutralnym izolowanym do 40 A,
- o punkcie neutralnym uziemionym przez rezystor 150-550 A,
- o punkcie neutralnym skompensowanym do 80 A i powiększone o prąd I_{WSCz} (15-25 A na sekcję rozdzielni).

Z punktu widzenia napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych wartość prądu przepływającego przez żyły robocze, a tym samym również prądy zwarcia, mają istotny wpływ na ich poziom. W ramach symulacji komputerowej zamodelowano pięć różnych wersji sieci: o punkcie neutralnym izolowanym, uziemionym przez rezystor o dwóch prądach znamionowych 300 A i 500 A, skompensowanym bez i z I_{WSCz} , o prądzie dławika uziemiającego równym 60 A i prądzie automatyki wymuszania składowej czynnej równym 30 A. Niewymienione w podpunkcie parametry sieci pozostają niezmiennie i zgodne z podstawowymi założeniami modelu. Wszystkie badania przeprowadzono dla trzech wariantów pracy żył powrotnych, a wyniki przedstawiono w formie przebiegów zmian napięcia w czasie w trakcie implementacji zdarzenia symulacyjnego dla: fazy A i wariantu a (rys.5.15), faz A oraz B i wariantu b (rys. 5.16 i 5.17) oraz dla miejsca połączenia żył powrotnych faz A i B i wariantu c (rys. 5.18). Zgodnie z przewidywaniami, bazującymi na uprzednio wykonanych badaniach, w zaprezentowanych wynikach można zauważyć brak wpływu zmiany sposobu uziemienia żył powrotnych na wielkości przepięć ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych, przy jednoczesnym zachowaniu tendencji zmian pomiędzy różnymi wariantami sposobu pracy żył powrotnych.

Wariant a

Na rysunku 5.15 przedstawiony został przebieg napięcia indukowanego w żyłę powrotnej fazy A w trakcie trwania symulacji w wariantcie a dla 4 wybranych sposobów uziemienia punktu neutralnego. Zgodnie z przewidywaniami dla punktu neutralnego

uziemionego przez rezystor, dla którego prądy ziemnozwarciowe będą największe, największe są również napięcia indukowane w nieuziemionej żyłce powrotnej kabla (niebieski przebieg). W przypadku punktu neutralnego izolowanego wartości prądów są najmniejsze i tak samo najmniejsze jest napięcie. Okazuje się, że w tym wariantcie sposób pracy punktu neutralnego nie wpływa jednak na maksymalne przebiegi ziemnozwarciowe w żyłce powrotnej, którego wartość wynosi prawie 6 kV.

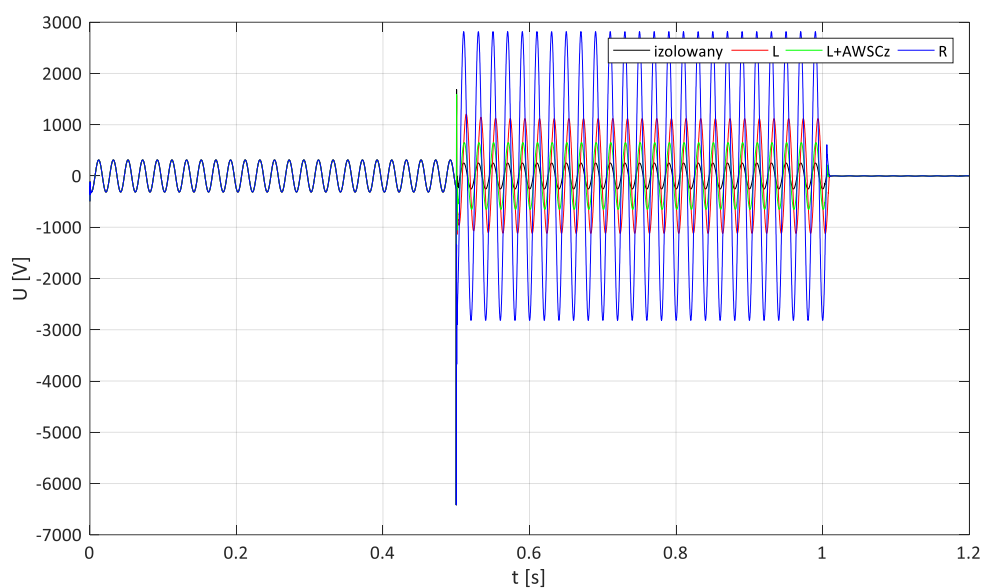


Rys. 5.15. Przebiegi napięć indukowanych w żyłce powrotnej fazy A trójfazowej linii kablowej w zależności od sposobu pracy punktu neutralnego dla wariantu a

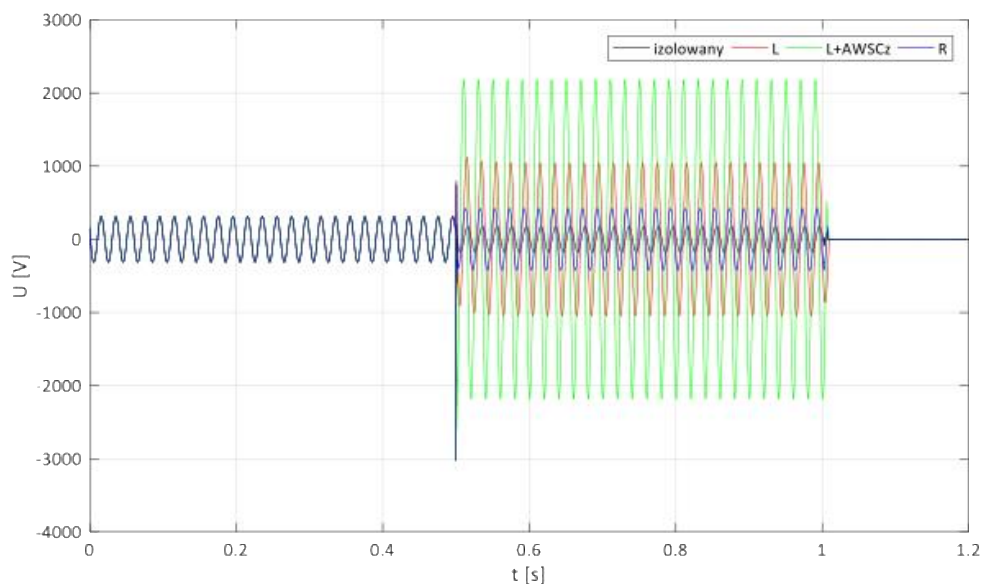
Wariant b

W przypadku jednostronnego nieuziemiaenia dwóch z trzech faz żył powrotnych napięcia wyindukowane w żyłach w trakcie trwania zwarcia rosną dla wszystkich sposobów pracy punktu neutralnego sieci SN (porównanie rys. 5.15 oraz 5.16 dla fazy A), natomiast różnica między przebiegami pozostaje zgodna z tendencją między wariantami uziemiaenia żył powrotnych. To samo tyczy się różnic między przebiegami w żyłach powrotnych faz A i B. Dla żyłki powrotnej fazy A, w której występuje zwarcie napięcie ziemnozwarciowe jest większe niż w przypadku fazy B, w której zwarcie nie występuje. Warto jednak zwrócić uwagę na różnicę między napięciami indukowanymi w trakcie trwania zwarcia. W żyłach roboczych faz, przez które nie przepływa prąd zwarcia, w trakcie pojawienia się zwarcia w układzie skompensowanym z AWSCz przepływa składowa czynna prądu wymuszona przez automatykę. Powoduje to wzrost

wyindukowanego napięcia w żyłce powrotnej tej fazy, co można zauważyć na przebiegu 5.17.



Rys. 5.16. Przebieg napięcia indukowanego w żyłce powrotnej fazy A trójfazowej linii kablowej w zależności od sposobu pracy punktu neutralnego dla wariantu b

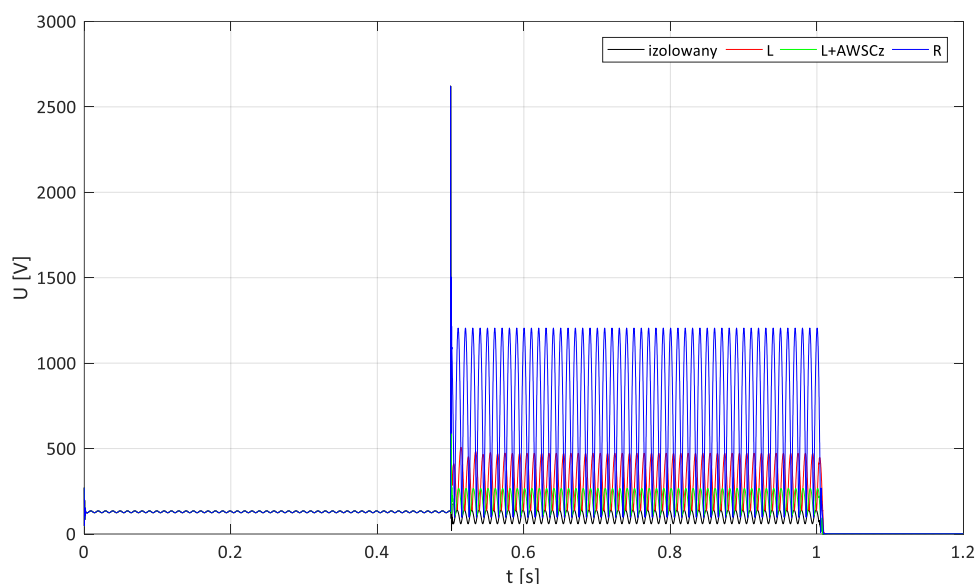


Rys. 5.17. Przebieg napięcia indukowanego w żyłce powrotnej fazy B trójfazowej linii kablowej w zależności od sposobu pracy punktu neutralnego dla wariantu b

Wariant c

Dla wariantu c, przedstawionego na rysunku 5.18, napięcia zarejestrowane w punkcie połączenia nieziemionych żył powrotnych faz A oraz B wskazują na

zachowanie trendu dotyczącego wpływu prądu ziemnozwarciowego na napięcie indukowane. Zgodnie z wynikami z tabeli 5.7 maksymalne przepięcie pojawiające się na nieziemionych i połączonych żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych nie zmienia się pod wpływem zmian sposobu uziemienia punktu neutralnego sieci.



Rys. 5.18. Przebieg napięcia indukowanego w połączonych żyłach powrotnych faz A i B trójfazowej linii kablowej w zależności od sposobu pracy punktu neutralnego dla wariantu c

W obrębie poszczególnych wariantów widać zależność sposobu uziemienia punktu neutralnego na poziom napięcia indukowanego w czasie trwania zwarcia. 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. Poziom przepięcia ziemnozwarciowego jest natomiast różny w zależności od sposobu uziemienia punktu neutralnego dla żył powrotnych faz, w których nie występuje zwarcie doziemne, co wiąże się ze sprzężeniami magnetycznymi między tymi fazami. Wyniki analizy maksymalnych wartości napięć wygenerowanych dla żył powrotnych wszystkich faz linii kablowej w wybranych wariantach przedstawione zostały w tabeli 5.7.

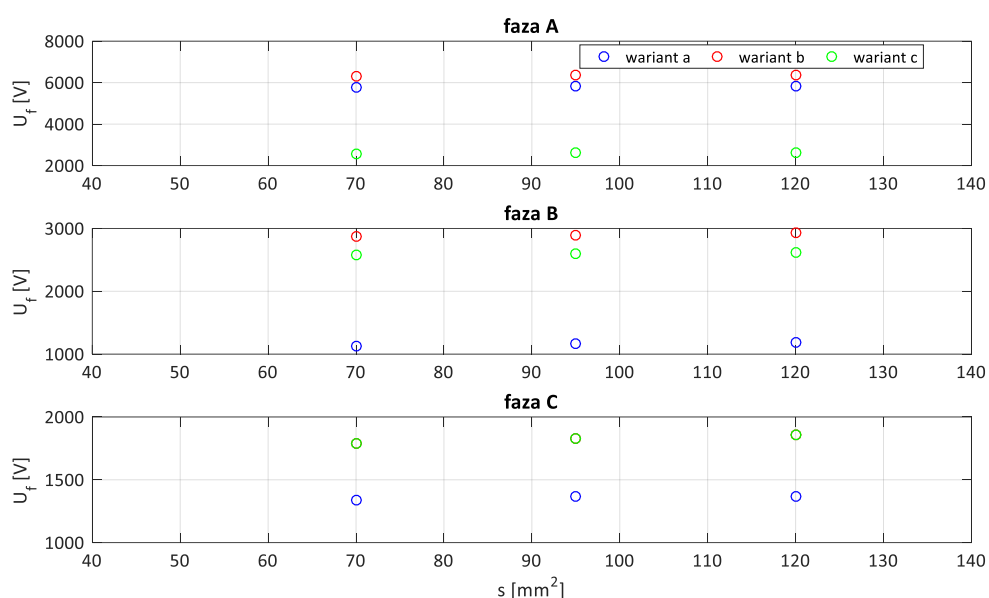
Tabela 5.7. Bezwzględne maksymalne wartości przepięć ziemnozwarciowych wygenerowane dla wybranych sposobów uziemienia punktu neutralnego sieci SN

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

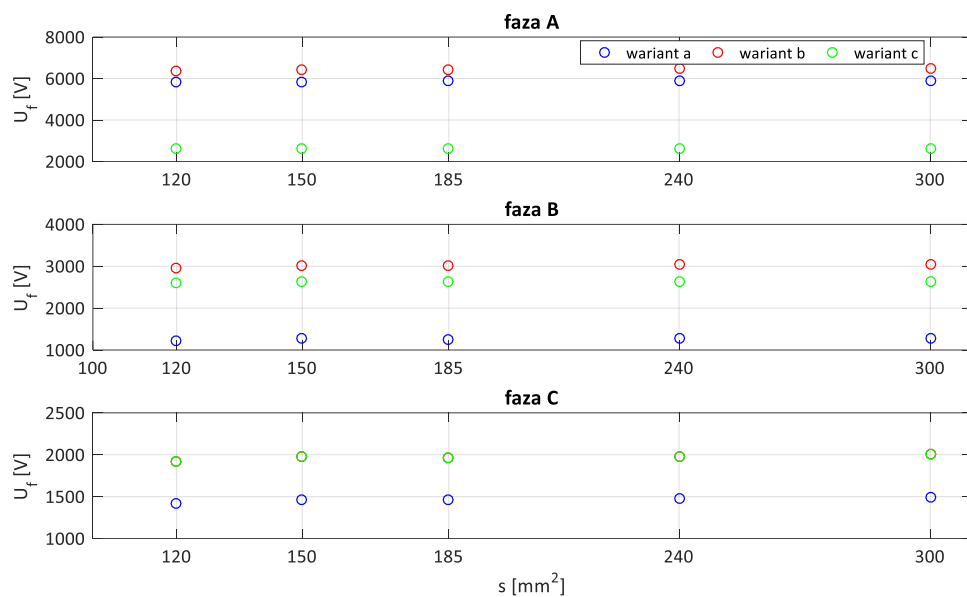
5.3.5. Ocena wpływu pola przekroju poprzecznego żyły roboczej kabla elektroenergetycznego

Parametry linii kablowej, szczególnie związane z powłokami metalowymi, mają znaczący wpływ na indukowanie się prądów i napięć w żyłach powrotnych. Pierwszym z parametrów wybranym do zmian w celu oceny jego wpływu na poziom przepięć indukowanych w żyłach powrotnych linii kablowych o zaproponowanych w rozprawie konfiguracjach jest pole przekroju poprzecznego żyły roboczej kabli jednożyłowych tworzących linię kablową. 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. Do przeprowadzenia symulacji przy zmiennym polu

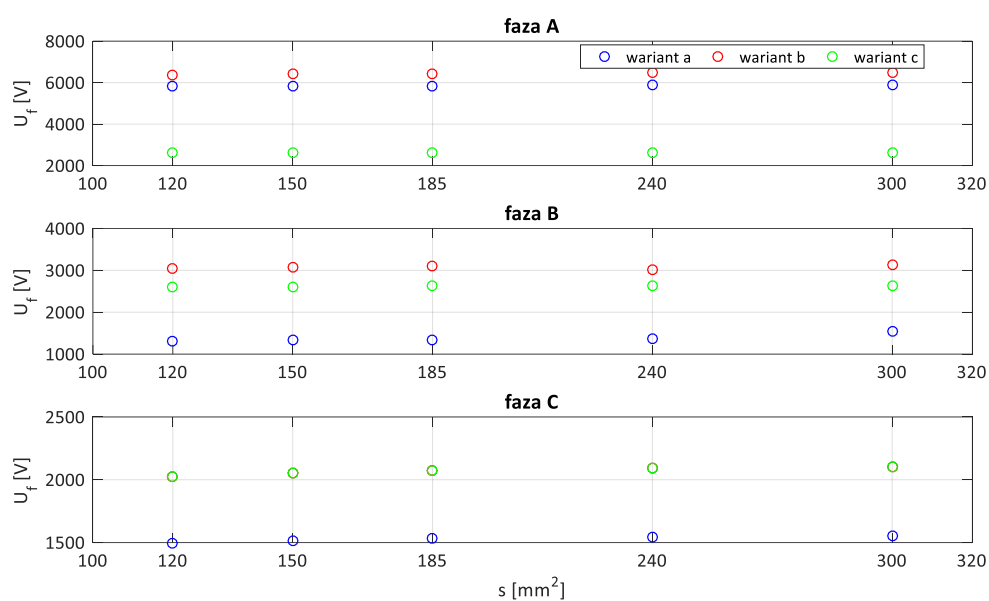
przekroju żyły roboczej zdecydowano się na pogrupowanie ich ze względu na pole przekroju żył powrotnych. Dodatkowym kryterium doboru modeli kabla jest uwzględnienie konstrukcji różnych producentów. Pozostałe parametry zamodelowanej sieci nie uległy zmianie. Na rysunkach 5.19, 5.20 oraz 5.21 przedstawione zostały wykresy obrazujące wpływ zmian pola przekroju żyły roboczej w kablu jednożyłowym linii kablowej dla stałej wartości pola przekroju żyły powrotnej na maksymalną wartość napięcia indukowanego w tych żyłach powrotnych, przy konfiguracjach ich uziemienia zgodnych z wariantami a, b oraz c. 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. Na zamieszczonych poniżej wykresach porównano maksymalne wartości napięć otrzymane w żyłach powrotnych wszystkich faz linii kablowej, ze względu na wariant sposobu pracy ich uziemienia. W tabelach 5.8 oraz 5.9 zamieszczone zostały bezwzględne wartości przepięć ziemnozwarciowych przedstawione w sposób graficzny na rysunkach.



Rys. 5.19. Wpływ zmiany pola przekroju żyły roboczej linii kablowej przy stałym polu przekroju żyły powrotnej równym 16 mm² na przepięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej (firma NKT)



Rys. 5.20. Wpływ zmiany pola przekroju żyły roboczej linii kablowej przy stałym polu przekroju żyły powrotnej równym 25 mm^2 na przepięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej (firma NKT)

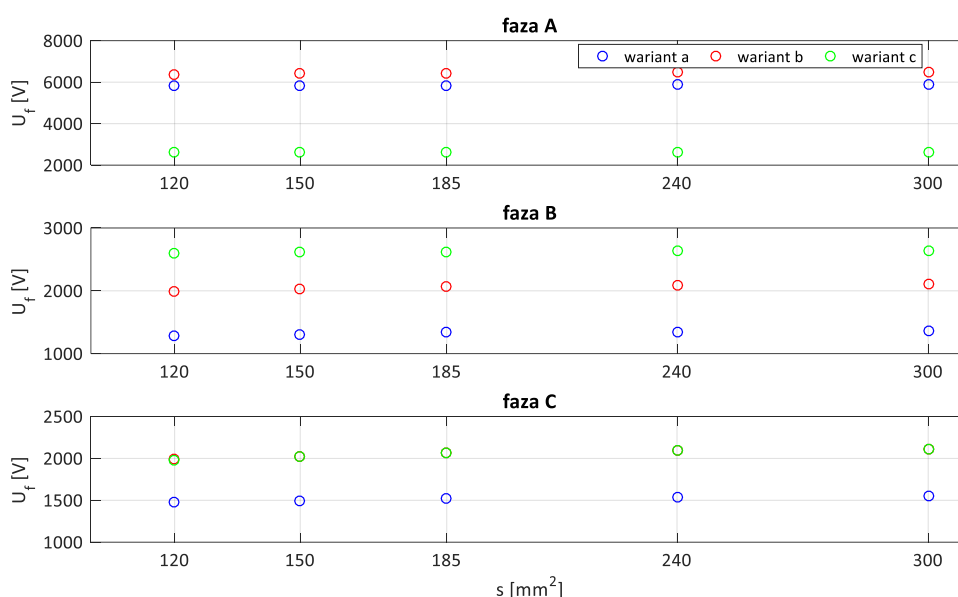


Rys. 5.21. Wpływ zmiany pola przekroju żyły roboczej linii kablowej przy stałym polu przekroju żyły powrotnej równym 50 mm^2 na przepięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej (firma NKT)

Tabela 5.8. Bezwzględne maksymalne wartości przepięć ziemnozwarciowych dla wybranych kabli firm NKT oraz Telefonika wygenerowane dla różnych pól przekroju żyły roboczej

Producent	Przekrój żyły powrotnej	Przekrój żyły roboczej	Wariant	$U_f [V]$		
				A	B	C
NKT	16	70	a	5779	1135	1342
			b	6809	2865	1793
			c	2579		1793
		95	a	5823	1159	1367
			b	6358	2899	1827
			c	2599		1827
		120	a	5850	1177	1386
			b	6389	2923	1853
			c	2612		1853
	25	120	a	5836	1222	1425
			b	6386	2969	1914
			c	2609		1914
		150	a	5857	1268	1468
			b	6417	3021	1977
			c	2621		1977
		185	a	5878	1254	1457
			b	6435	3010	1958
			c	2629		1958
		240	a	5900	1271	1475
			b	6461	3032	1983
			c	2639		1983
		300	a	5916	1285	1489
			b	6480	3049	2002
			c	2647		2002
	50	120	a	5813	1306	1499
			b	6383	3052	2026
			c	2606		2026
		150	a	5834	1324	1516
			b	6407	3073	2051
			c	2616		2051
		185	a	5856	1339	1531
			b	6432	3091	2071
			c	2626		2071
		240	a	5879	1353	1546
			b	6458	3110	2092
			c	2637		2092
		300	a	5896	1360	1554
			b	6476	3120	2102
			c	2645		2102

Na rysunku 5.19 przedstawiony został wpływ zmian pola przekroju poprzecznego żyły roboczej kabla elektroenergetycznego, przy stałym polu przekroju poprzecznym żyły powrotnej dla parametrów jednożyłowego kabla uzyskanych z katalogu firmy Telefonika. Porównując otrzymane zależności można zauważyć, że różnice między sposobem modelowania kabla w związku ze zmianą jego parametrów, będą miały tylko w niewielkim stopniu wpływ na maksymalne napięcia ziemnozwarciowe wyindukowane w trakcie trwania zwarcia doziemnego. Szczególnie widoczne jest to dla wartości zamieszczonych w tabelach wynikowych. Otrzymane i zaprezentowane poniżej wyniki należy porównać z wynikami przedstawionymi na wykresie 5.21 i w tabeli 5.8, w części dotyczącej kabla o polu przekroju żyły powrotnej równym 50 mm^2 . Jak widać, wartości maksymalnych napięć generowanych na końcu żył powrotnych trójfazowej linii kablowej pracujących z różnymi konfiguracjami uziemienia różnią się nieznacznie, a ich szczegółowa konstrukcja zależna od producenta nie będzie miała wpływu na możliwość oceny zagrożenia napięciowego w takim układzie.



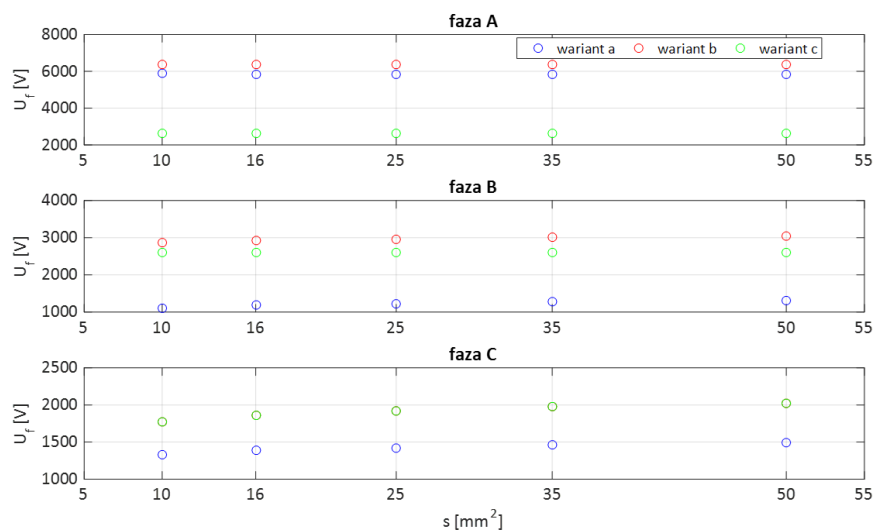
Rys. 5.22. Wpływ zmiany pola przekroju żyły roboczej linii kablowej przy stałym polu przekroju żyły powrotnej równym 50 mm^2 na napięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej (firma Telefonika)

Tabela 5.9. Bezwzględne maksymalne wartości przebiegów ziemnozwarciowych dla wybranych kabli firmy Telefonika wygenerowane dla zmiennej wartości pola przekroju żyły roboczej

Producent	Przekrój żyły powrotnej	Przekrój żyły roboczej	Wariant	$U_f [V]$		
				A	B	C
Telefonika	50	120	a	5803	1278	1473
			b	6366	3022	1989
			c	2600		1989
		150	a	5838	1301	1496
			b	6407	3052	2021
			c	2616		2021
		185	a	5856	1336	1529
			b	6432	3089	2068
			c	2626		2068
		240	a	5879	1351	1544
			b	6458	3108	2089
			c	2637		2089
		300	a	5896	1362	1555
			b	6477	3122	2105
			c	2645		2105

5.3.6. Ocena wpływu pola przekroju poprzecznego żyły powrotnej kabla elektroenergetycznego

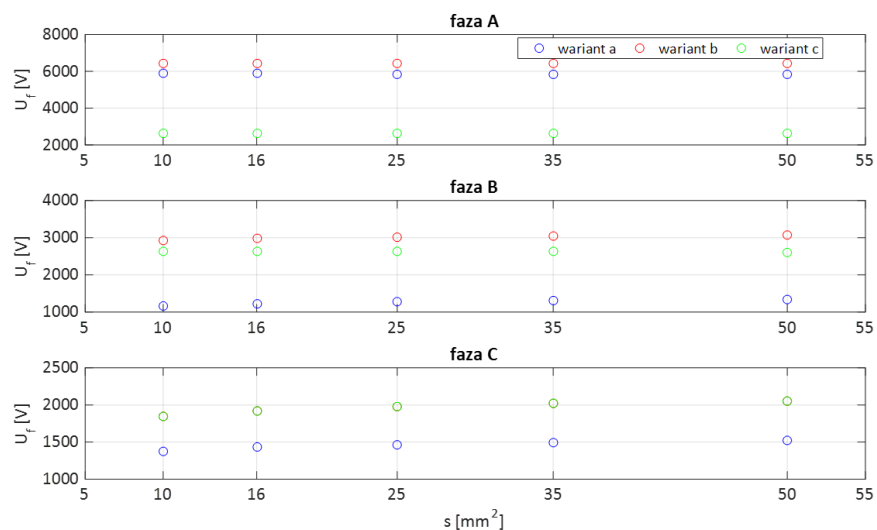
Zmiany prądów i napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego zależą również od ich pola przekroju poprzecznego. Zgodnie z wartościami katalogowymi, rezystancja żył powrotnych o większych polach przekroju będzie mniejsza w porównaniu do żył o mniejszych polach przekroju. Badania 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. Do symulacji wykorzystano podstawowy model sieci zaprezentowany we wstępie do omawianych badań. Na rysunku 5.23 i w tabeli zobrazowane zostały zależności między maksymalnymi przebiegami ziemnozwarciowymi w żyłach powrotnych linii kablowej dla trzech wariantów konfiguracji ich pracy przy stałym polu przekroju poprzecznego równym 120 mm².



Rys. 5.23. Wpływ zmiany pola przekroju żyły powrotnej linii kablowej przy stałym polu przekroju żyły roboczej równym 120 mm^2 na przepięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej

Tabela 5.10. Bezwzględne maksymalne wartości przepięć ziemnozwarciowych dla kabli firmy NKT wygenerowane dla zmiennej wartości pola przekroju żyły powrotnej

Przekrój żyły roboczej	Przekrój żyły powrotnej	Wariant	$U_f \text{ [V]}$		
			A	B	C
120	10	a	5873	1112	1327
		b	6396	2855	1765
		c	2616		1765
	16	a	5850	1177	1386
		b	6389	2923	1853
		c	2612		1853
	25	a	5836	1222	1425
		b	6386	2969	1914
		c	2609		1914
	35	a	5823	1268	1465
		b	6384	3014	1975
		c	2607		1975
	50	a	5813	1306	1499
		b	6383	3052	2026
		c	2606		2026



Rys. 5.24. Wpływ zmiany pola przekroju żyły powrotnej linii kablowej przy stałym polu przekroju żyły roboczej równym 150 mm² na przepięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej

Tabela 5.11. Bezwzględne maksymalne wartości przepięć ziemnozwarciowych dla kabli firmy NKT wygenerowane dla zmiennej wartości pola przekroju żyły powrotnej

Przekrój żyły roboczej	Przekrój żyły powrotnej	Wariant	U _f [V]		
			A	B	C
150	10	a	5883	1168	1380
		b	6420	2919	1842
		c	2625		1842
	16	a	5863	1229	1434
		b	6415	2982	1925
		c	2621		1925
	25	a	5857	1268	1468
		b	6417	3021	1977
		c	2621		1977
	35	a	5841	1304	1499
		b	6410	3055	2025
		c	2618		2025
	50	a	5834	1324	1516
		b	6407	3073	2051
		c	2616		2051

Na rysunku 5.24 oraz w tabeli 5.12 przedstawiono reprezentację przebiegów w układzie z kablami o polu przekroju poprzecznego żyły roboczej równym 150 mm^2 . Porównanie uzyskanych wyników może wskazać na wpływ pola przekroju żyły powrotnej na poziom przebiegów generowanych w wyniku powstania w układzie zwarcia doziemnego jednofazowego. Uzyskane wyniki wskazują na nieznaczny spadek wartości maksymalnego przebiegu ziemnozwarciowego w żyłę powrotnej fazy A, natomiast wzrost w przypadku pozostałych faz, bez względu na sposób uziemienia żył powrotnych linii kablowych.

5.3.7. Ocena wpływu długości kabla elektroenergetycznego

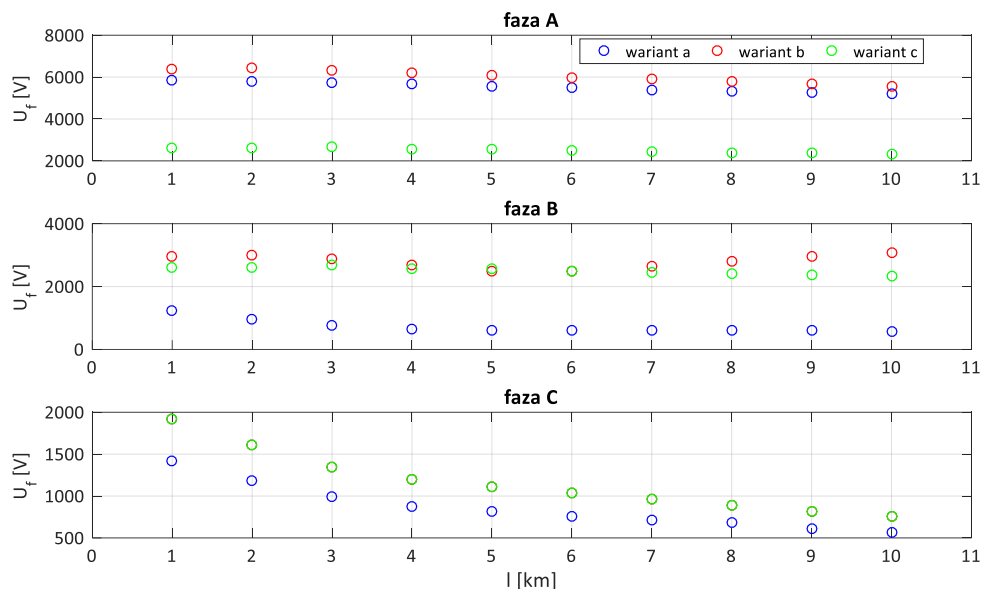
Długość linii dystrybucyjnej jest ważną wielkością z punktu widzenia parametrów ich schematów zastępczych, a zatem wielkości charakterystycznych, takich jak prądy i napięcia w fazach. Zakres wybranych długości kabla od 1 km do 10 km jest zakresem skrajnym i zakładającym, że kabel stworzony jest z jednego, 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 i przedstawione na rysunkach 5.21, 5.22 oraz 5.23. Dla żył powrotnych trzech faz linii kablowej przeprowadzono symulacje zwarcia doziemnego w pobliżu linii kablowej, której wynikiem był przebieg napięcia w czasie w żyłę powrotnej, a wartością odczytaną z przebiegu do dalszych analiz była maksymalna wartość napięcia indukowanego w tych powłokach w momencie pojawienia się zwarcia doziemnego. Graficzna reprezentacja wyników zamieszczona została na wykresach z rysunków 5.25, 5.26 oraz 5.27.

Wszystkie wartości maksymalnych przebiegów dla poszczególnych rodzajów kabli z wyróżnieniem wariantu sposobu uziemienia żył powrotnych kabla zostały zaprezentowane w tabelach 5.12, 5.13 oraz 5.14.

Otrzymane wyniki wskazują na zachowanie pewnej powtarzalności względem wpływu długości kabla na napięcie indukowane w żyłach powrotnych, która związana jest z tłumieniem rezystancyjnym przebiegu we wszystkich trzech fazach, dla wariantów a oraz c oraz tłumieniem przebiegu w żyłach powrotnych faz A i C. Dla wariantu b

pozostaje jednostronnie połączona z uziemieniem, a zatem w fazie zmienia się rozptyw prądów wpływający na indukowanie się napięcia w obwodzie powrotnym tej fazy.

NA2XS(F)2Y 120/25

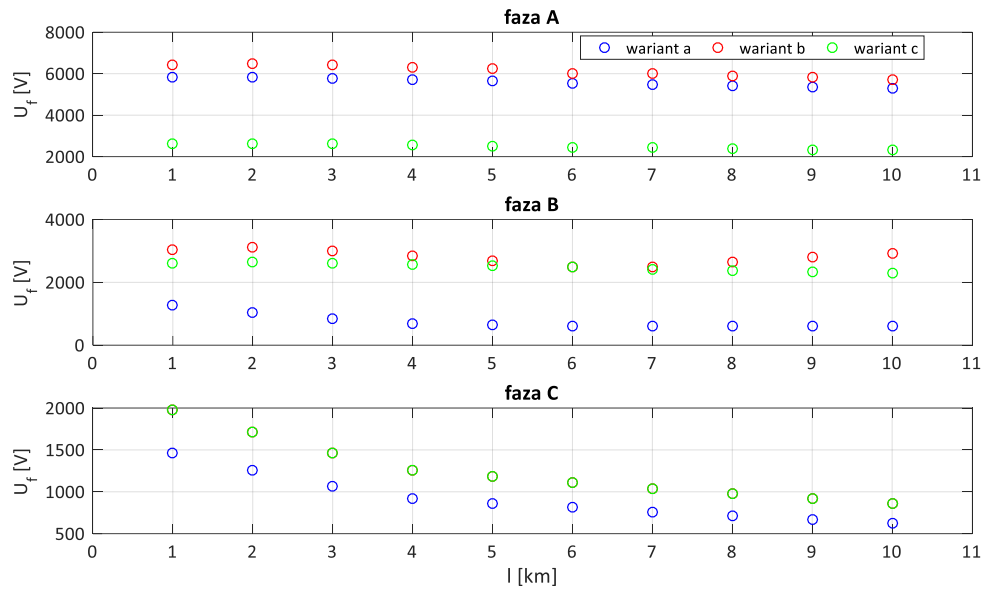


Rys. 5.25. Wpływ zmiany długości linii kablowej na przepięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych dla kabla o przekroju 120/25

Tabela 5.12. Bezwzględne maksymalne wartości przepięć ziemnozwarciowych kabla elektroenergetycznego o przekroju 120/25 i różnej długości

	wariant a			wariant b			wariant c	
	U_f [V]			U_f [V]			U_f [V]	
l [km]	A	B	C	A	B	C	A+B	C
1	5836	1222	1425	6386	2969	1914	2609	1914
2	5813	966,9	1186	6425	3016	1614	2625	1614
3	5736	768,2	988,8	6347	2878	1347	2595	1347
4	5648	646,9	871,9	3235	2687	1196	2554	1196
5	5561	606,4	815,5	6115	2485	1115	2551	1115
6	5480	604,9	759,9	5996	2471	1034	2471	1034
7	5404	604,2	706,9	5883	2657	957,9	2434	957,9
8	5335	600	657,3	5777	2821	886,9	2402	886,9
9	5272	593,4	611,3	5679	2966	821,3	2374	821,3
10	5214	585,2	568,7	5588	3095	760,9	2349	760,9

NA2XS(F)2Y 150/25

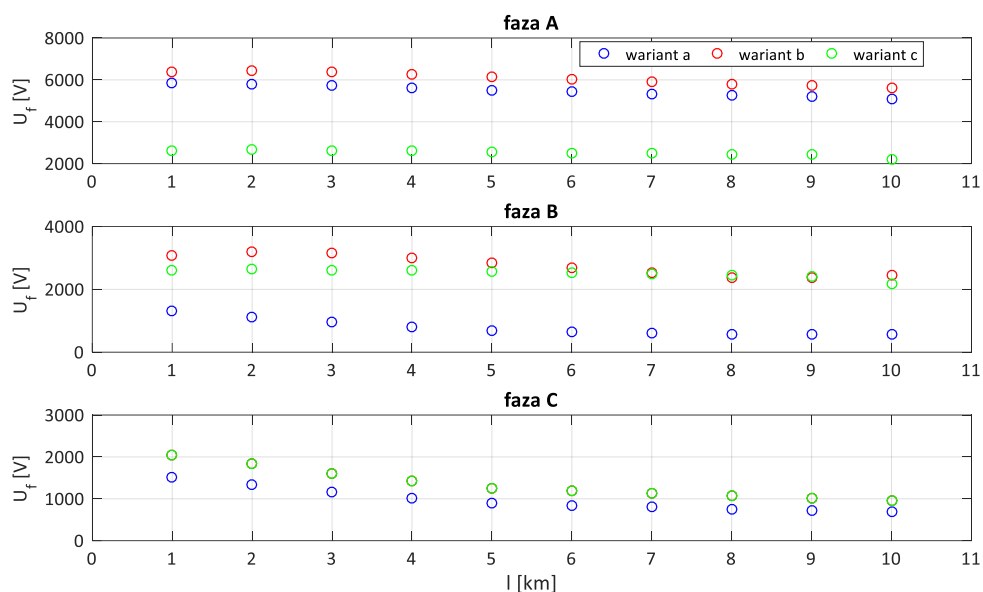


Rys. 5.26. Wpływ zmiany długości linii kablowej na przebiegi ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych dla kabla o przekroju 150/25

Tabela 5.13. Bezwzględne maksymalne wartości napięć ziemnozwarciowych kabla elektroenergetycznego o przekroju 150/25 i różnej długości

	wariant a			wariant b			wariant c	
	U _f [V]			U _f [V]			U _f [V]	
l [km]	A	B	C	A	B	C	A+B	C
1	5857	1268	1468	6417	3021	1977	2621	1977
2	5851	1036	1253	6484	3114	1714	2648	1714
3	5788	847,4	1069	6428	3012	1466	2626	1466
4	5710	696,9	916,4	6333	2850	1262	2590	1262
5	5631	632,9	861,6	6226	2670	1189	2550	1189
6	5555	601,3	811,4	6017	2489	1115	2512	1115
7	5483	604,3	762,5	6012	2484	1044	2479	1044
8	5416	603,4	716	5912	2644	976,4	2443	976,4
9	5355	599,9	672,1	5817	2787	913	2414	913
10	5298	594,5	631	5729	2915	854	2388	854

NA2XS(F)2Y 150/50



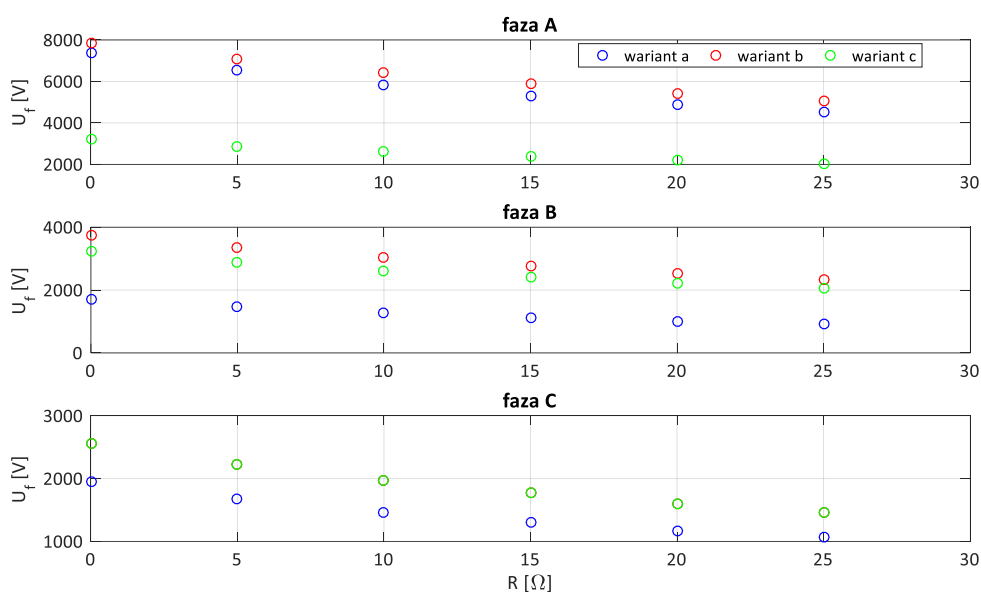
Rys. 5.27. Wpływ zmiany długości linii kablowej na przepięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych dla kabla o przekroju 150/50

Tabela 5.14. Bezwzględne maksymalne wartości przepięć ziemnozwarciowych kabla elektroenergetycznego o przekroju 150/50 i różnej długości

	wariant a			wariant b			wariant c	
	U _f [V]			U _f [V]			U _f [V]	
l [km]	A	B	C	A	B	C	A+B	C
1	5834	1324	1516	6407	3073	2051	2616	2051
2	5807	1122	1330	6465	3212	1835	2639	1835
3	5722	948,3	1162	6398	3148	1612	2612	1612
4	5624	804,1	1017	6291	3016	1413	2569	1413
5	5525	692,5	895,9	6172	2860	1260	2522	1260
6	5430	639	851,2	6050	2699	1193	2475	1193
7	5340	589,8	806,9	5931	2539	1127	2430	1127
8	5256	577,5	763,9	5817	2385	1064	2388	1064
9	5177	577,2	722,8	5710	2359	1004	2349	1004
10	5105	574,9	683,8	5608	2469	946,5	2313	946,5

5.3.8. Ocena wpływu rezystancji przejścia w miejscu zwarcia

Ostatnią kategorią zmian będzie ocena wpływu wielkości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia doziemnego na poziom napięć ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych. Zgodnie z literaturą, rezystancja przejścia jest parametrem wykorzystywanym do obliczenia poziomów parametrów ziemnozwarciowych i wzrost jej wartości będzie miał wpływ na zmniejszenie się prądów zwarciovych [G, H]. W literaturze najczęściej spotyka się rozważania zakładające zwarcia niskooporowe, a przede wszystkim zwarcia metaliczne, czyli o rezystancji $R_F = 0 \Omega$. Zakres tej części badań obejmował zmianę rezystancji przejścia w zakresie od 0Ω do 25Ω , czyli przedział zwarcń niskooporowych. Symulacje wykonano dla wszystkich trzech wariantów, przy podstawowych parametrach modelu sieci, a wyniki przedstawiono w postaci wykresów zmienności napięć indukowanych w żyłach powrotnych trzech faz linii kablowej w zależności od rezystancji przejścia na rysunku 5.28.



Rys. 5.28. Wpływ zmiany wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia na napięcia ziemnozwarciowe indukowane w żyłach powrotnych trójfazowej linii kablowej

Analiza otrzymanych wyników pozwala zauważyć znaczący wpływ rezystancji przejścia na napięcie ziemnozwarciowe, w wyniku którego dla zwarcń metalicznych wartości napięć są największe, natomiast wraz ze wzrostem rezystancji przejścia napięcie indukowane w żyłę powrotnej w wyniku pojawienia się zwarcia maleje, dla

każdego z rozpatrywanych wariantów i dla wszystkich żył powrotnych z podobną tendencją. W tabeli 5.15 zamieszczono natomiast wyniki maksymalnych wartości przebiegów ziemnozwarciowych zaprezentowanych na wykresach. Jak można zauważyć różnice między przebiegami ziemnozwarciowymi przy zwarcu metalicznym, a zwarciami niskooporowymi jest najbardziej znacząca spośród wszystkich dotychczas rozpatrywanych zależności. Poziom przebieg 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 żył powrotnej w wyniku wystąpienia tego zwarcia w pobliżu linii kablowej.

Tabela 5.15. Bezwzględne maksymalne wartości przebiegów ziemnozwarciowych otrzymane dla różnych wartości rezystancji przejścia w miejscu zwarcia

Rezystancja przejścia R_F	Wariant	$U_f [V]$		
		A	B	C
0	a	7353	1716	1952
	b	7878	3749	2567
	c	3218		2567
5	a	6517	1461	1677
	b	7071	3347	2235
	c	2888		2235
10	a	5857	1268	1468
	b	6417	3021	1977
	c	2621		1977
15	a	5322	1118	1306
	b	5877	2751	1772
	c	2401		1722
20	a	4880	999	1176
	b	5423	2525	1606
	c	2216		1606
25	a	4509	902,3	1070
	b	5037	2332	1468
	c	2058		1468

5.4. Ocena wpływu rodzaju zakłócenia ziemnozwarciowego na poziom przepięć w żyłach powrotnej

Najczęstszymi zakłóceniami w sieciach średnich napięć są zwarcia, spośród których największa część dotyczy zwarcia jednofazowego z ziemią. W przebiegu badań terenowych oraz symulacyjnych rozpatrywano zwarcia doziemne jednofazowe, które występowały w tej samej fazie, która dla każdego z wariantów sposobu pracy żył powrotnych linii kablowej pozostawała odziemiona. W ramach badań symulacyjnych zaprezentowanych w niniejszym rozdziale przedstawione zostaną przebiegi napięć indukowanych w żyłach powrotnych linii kablowej w trakcie powstawania zwarć innego rodzaju niż dotychczas przedstawionych. W ramach dodatkowych badań przedstawione zostaną:

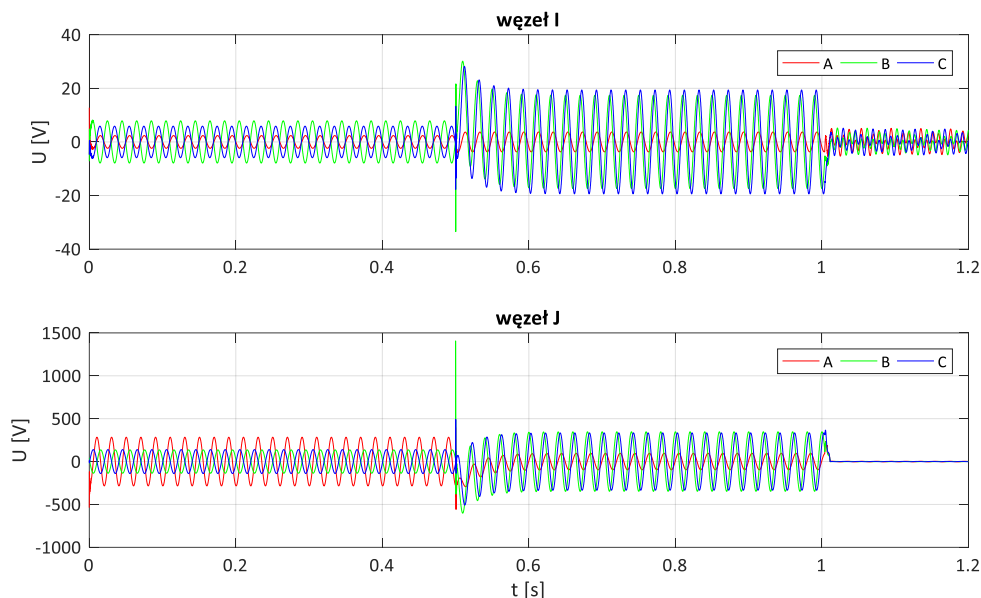
- 1) zwarcie doziemne jednofazowe w fazie B,
- 2) zwarcie doziemne jednofazowe w fazie C,
- 3) zwarcie dwufazowe bez udziału ziemi między fazami A oraz B,
- 4) zwarcie dwufazowe bez udziału ziemi między fazami A oraz C,
- 5) zwarcie trójfazowe.

W podrozdziale przedstawione zostaną przebiegi zmian napięcia w żyłach powrotnych w czasie wystąpienia zdarzeń zakłóceńowych, zasymulowane w modelu sieci wykorzystanym do wcześniejszych badań i przedstawionym na rysunku 5.5. Tak samo jak w przypadku modelu wykorzystanego w poprzednich symulacjach, parametry elementów sieci pozostają bez zmian i jedyną formą ingerencji w model pozostała zmiana rodzaju zakłócenia zaimplementowanego w trakcie zdarzenia symulacyjnego. Wszystkie zaproponowane rodzaje zwarcia zostały zrealizowane w linii napowietrznej połączonej w polu liniowym z linią kablową, w niewielkiej odległości od ich miejsca połączenia. Część z wybranych do badań zwarć, to zwarcia międzyfazowe, które nie uwzględniają przepływu prądu w obwodzie ziemnopowrotnym, a zatem indukowanie się napięcia w żyłach powrotnych będzie związane wzajemnymi oddziaływaniami żył przewodzących linii kablowej. Wyniki przedstawione poniżej w postaci przebiegów napięć indukowanych w żyłach powrotnych linii kablowej zostały ograniczone do symulacji układu o konfiguracjach uziemienia żył powrotnych zaproponowanych jako warianty a i b.

1) Zwarcie doziemne jednofazowe w fazie B

W przypadku zwarcia jednofazowego w dowolnej fazie linii napowietrznej połączonej z linią kablową, przez żyłę roboczą tej fazy przepływać będzie zmienny w czasie prąd zwarciovowy, którego charakter będzie miał wpływ na indukowanie się w żyłach powrotnych linii kablowej prądu i napięcia, w zależności od układu uziemienia tych żył powrotnych. W rozpatrywanym układzie prąd zwarciovowy płynąć będzie przez przewód fazowy B, co będzie wynikiem zwarcia przewodem linii napowietrznej tej samej fazy. W zależności od wariantu konfiguracji uziemienia żył powrotnych kabla, prąd zwarciovowy płynący w fazie B może mieć różny wpływ na poziom napięć indukowanych w żyłach powrotnych linii trójfazowej.

Wariant a

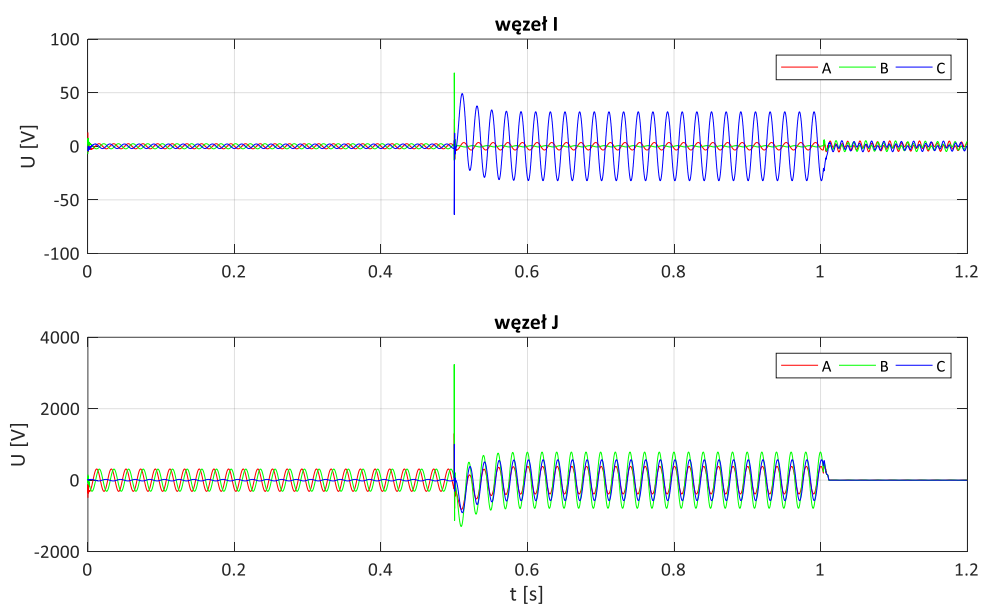


Rys. 5.29. Przebiegi napięcia indukowanego w żyłach powrotnych linii kablowej w trakcie zdarzenia symulacyjnego przy zwarciu doziemnym fazy B dla wariantu a

Uziemienie obustronne żył powrotnych faz B i C linii kablowej wiąże się z przepływem pewnej części prądu zwarciovowego przez te żyły powrotne kabla elektroenergetycznego. Zgodnie ze zwrotem wektorów napięcia dla przepięć ziemnozwarciowych występujących na początku pojawienia się w zdarzeniu symulacyjnym zwarcia, można wnioskować, że w sytuacji przepływu prądu przez żyłę roboczą kabla elektroenergetycznego, którego żyła powrotna jest obustronnie

uziemiona zwrot jej napięcia będzie zgodny ze zwrotem napięcia w sieci. Dla wariantu a najwyższą wartość przebiegu zarejestrowano w żył powrotnej fazy B w węźle J, który jest reprezentacją słupa z głowicą kablową, a zatem miejsca połączenia linii kablowej z linią napowietrzną, w której zamodelowano zwarcie. W sytuacji, gdy rozpatrywany jest wariant b, a żyła powrotna fazy B, w której zasymulowano zwarcie jest jednostronnie odziemiona po stronie węzła J, maksymalna wartość napięcia dla tej fazy, przy przyjętych parametrach, nie przekracza 4 kV. Jest to również największa wartość przebiegu jaka pojawia się we wszystkich z trzech żył powrotnych linii kablowej.

Wariant b



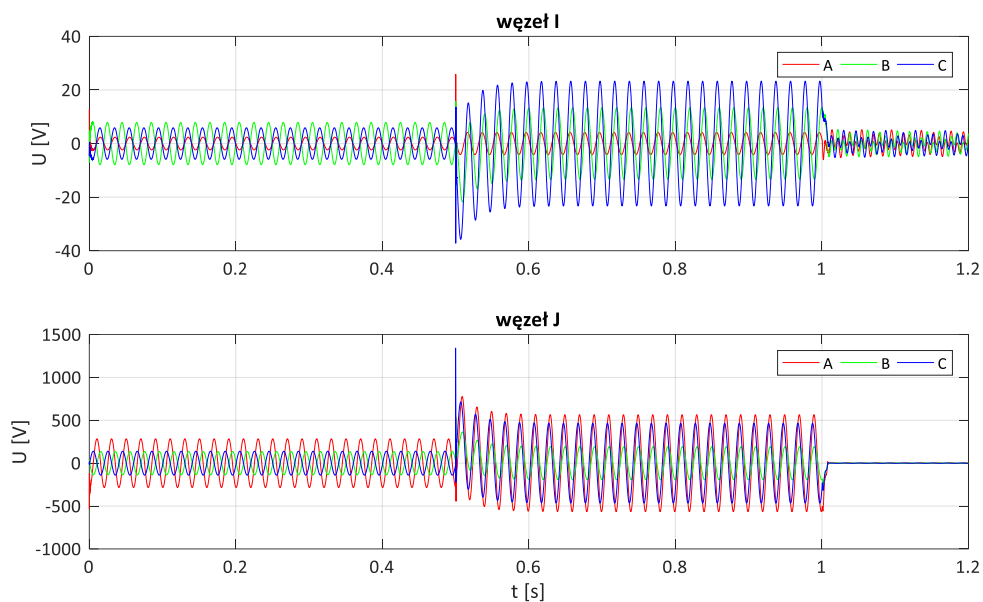
Rys. 5.30. Przebiegi napięcia indukowanego w żyłach powrotnych linii kablowej w trakcie zdarzenia symulacyjnego przy zwarciu doziemnym fazy B dla wariantu b

2) Zwarcie jednofazowe w fazie C

Żyła powrotna fazy C linii kablowej jest elementem tego układu, który dla każdego wariantu konfiguracji uziemienia żył powrotnych pozostaje uziemiony obustronnie. Wyniki przedstawiające przebiegi napięć indukowanych we wszystkich trzech żyłach powrotnych linii kablowej zostały zamieszczone na rysunkach 5.31 oraz 5.32. Porównując te przebiegi można zauważyć, że różnice poziomów napięć wygenerowanych dla stanu ustalonego, czyli w trakcie pierwszej 0,5 s symulacji, wynikają ze sposobu uziemienia żył powrotnych wszystkich faz. W węźle J, gdzie dla wariantu a pozostaje nieuziemiona żyła powrotna fazy A, wartość napięcia indukowanego w stanie pracy normalnej jest znacznie

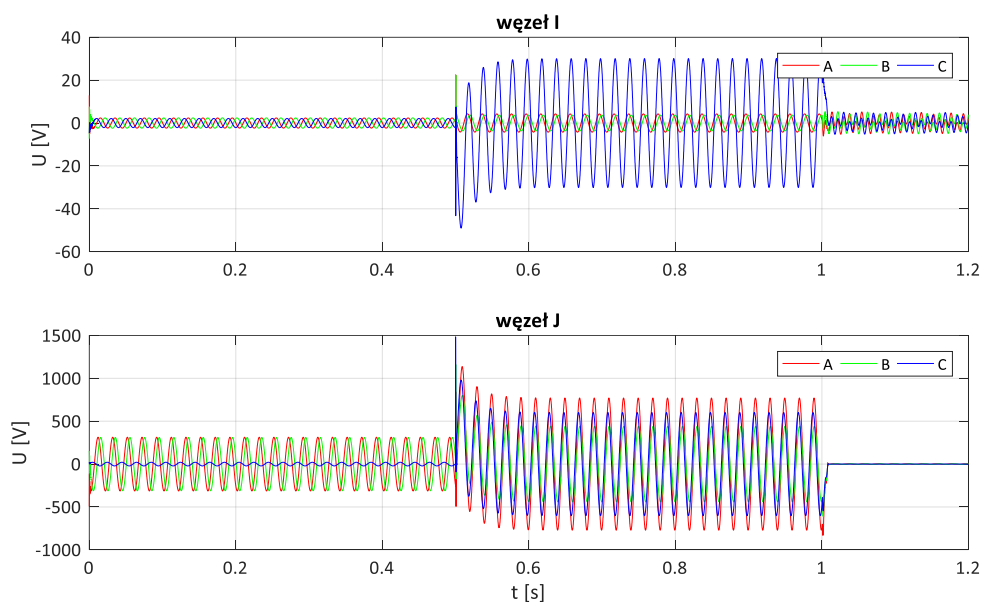
większa niż napięć indukowanych w pozostałych, obustronnie uziemionych fazach (rys. 5.31).

Wariant a



Rys. 5.31. Przebiegi napięcia indukowanego w żyłach powrotnych linii kablowej w trakcie zdarzenia symulacyjnego przy zwarciu doziemnym fazy C dla wariantu a

Wariant b



Rys. 5.32. Przebiegi napięcia indukowanego w żyłach powrotnych linii kablowej w trakcie zdarzenia symulacyjnego przy zwarciu doziemnym fazy C dla wariantu b

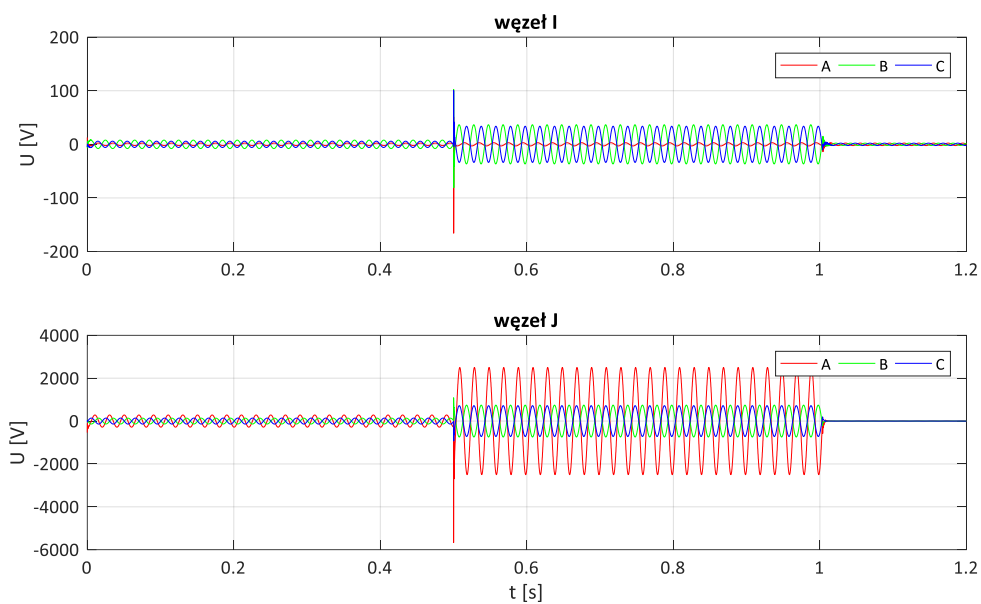
To samo dotyczy wariantu b, gdzie jedynie żyła powrotna fazy C pozostaje obustronnie uziemiona. Na przebiegu napięcia w węźle J na rysunku 5.32 widać, że napięcia wyindukowane w żyłach powrotnych faz jednostronnie uziemionych są w tych warunkach wyższe niż w żyłach fazy C. Na rysunkach warto również zauważyć, że wartości napięć indukowanych w obustronnie uziemionych żyłach w stanie ustalonym przed zwarciem są niewielkie i równe, zarówno na początku, jak i na końcu powłoki, a zatem zachowane jest wyrównanie potencjału wynikające z obustronnego uziemienia.

Jak wykazała analiza, dla obu wariantów przebiegi ziemnozwarciowe zasymulowane w układzie jest największe w żyłach powrotnych fazy C, w której powstało zwarcie. Wygenerowane przebiegi charakteryzują się najmniejszymi poziomami napięć ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych kabli spośród wszystkich dotychczas przeprowadzonych badań symulacyjnych. Wartości napięć, indukowane w żyłach powrotnych wszystkich trzech faz w trakcie trwania zwarcia, również są na podobnym poziomie, szczególnie w miejscu odziemienia faz A i B przy słupie z głowicą kablową (węzeł J).

3) Zwarcie dwufazowe faz A i B

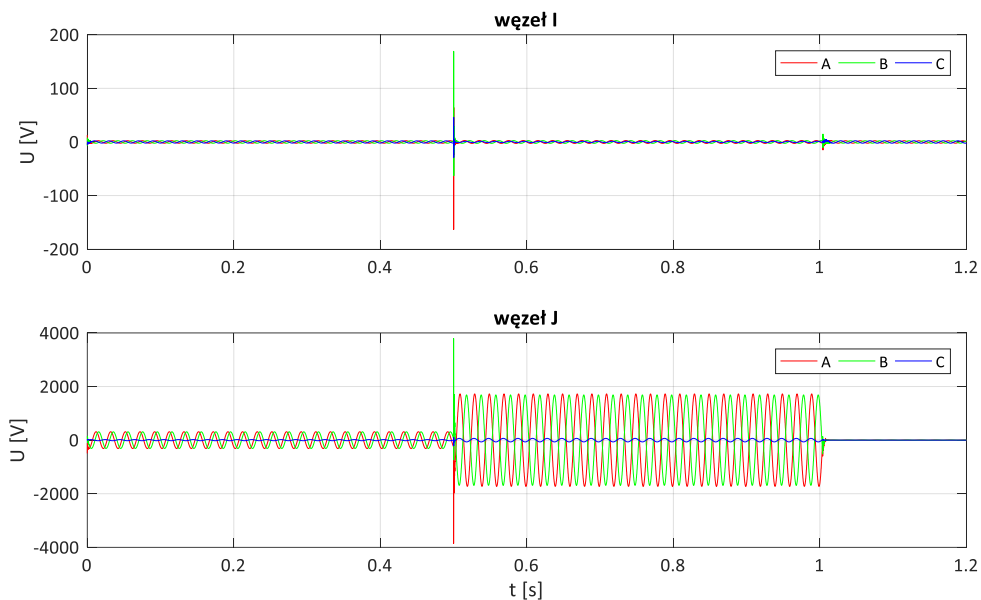
Przeprowadzona symulacja zwarcia dwufazowego między fazami A i B linii napowietrznej połączonej z linią kablową bez udziału ziemi wpływa na ograniczenie rozptyłu prądów tylko do przewodów fazowych linii dystrybucyjnych, a zatem w rozważaniach dotyczących zwarc międzyfazowych nie zostaje ujęty charakter redukcyjny żył powrotnych kabla i możliwość rozptyłu prądu w tych żyłach. Przebiegi ziemnozwarciowe w żyłach powrotnych kabli elektroenergetycznych trójfazowej linii wynikają zatem tylko ze wzrostu wartości prądów płynących w żyłach roboczych. Te natomiast skutkują wyindukowaniem się napięć w żyłach powrotnych nieuziemionych obustronnie. W przypadku żył uziemionych obustronnie przepływ prądu zwarcowego będzie wiązał się przede wszystkim ze zwiększeniem się prądu powłokowego przepływającego przez zamkniętą w obwodzie ziemnopowrotnym żyłę. Taki przepływ w konsekwencji spowoduje wzrost potencjału żyły na całej jej długości. Najbardziej widoczne jest to dla wariantu a i żył powrotnych faz B i C obustronnie uziemionych, których przebiegi widoczne są na rysunku 5.33.

Wariant a



Rys. 5.33. Przebiegi napięcia indukowanego w żyłach powrotnych linii kablowej w trakcie zdarzenia symulacyjnego przy zwarciu międzyfazowym bez udziału ziemi faz A i B dla wariantu a

Wariant b



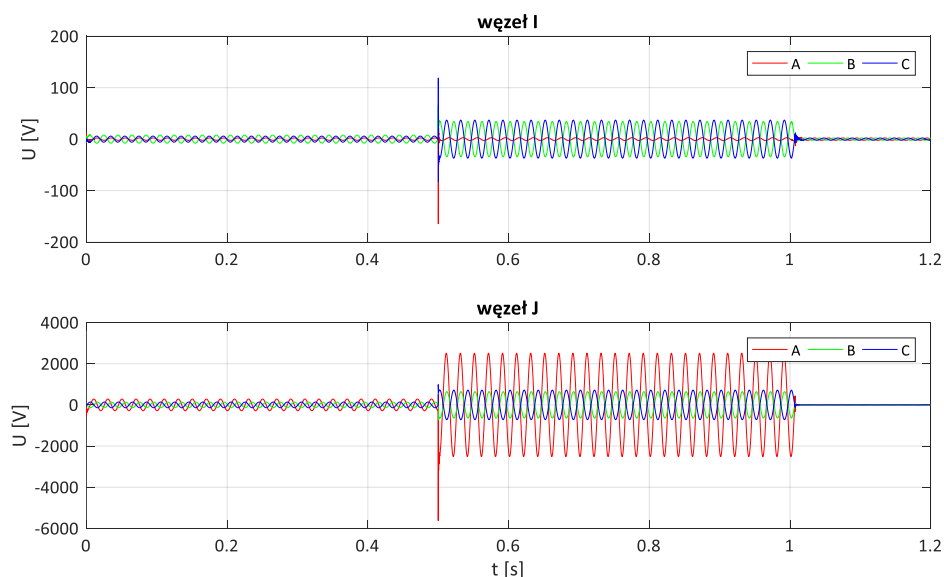
Rys. 5.34. Przebiegi napięcia indukowanego w żyłach powrotnych linii kablowej w trakcie zdarzenia symulacyjnego przy zwarciu międzyfazowym bez udziału ziemi faz A i B dla wariantu b

Wartości przebiegów otrzymanych w wyniku symulacji w nieziemionych żyłach powrotnych są duże, porównywalne do tych, otrzymywanych w trakcie zwarcia doziemnych w fazach, których żyły powrotne są odziemione, także z uwzględnieniem zwrotu wektorów napięć (rysunek 5.34 z wariantem b). Również napięcia indukowane w trakcie trwania zwarcia w żyłach powrotnych są znacznie większe od napięć, które pojawiają się w czasie stanu ustalonego, szczególnie dla odziemionych żył. Warto zauważyć, że napięcia indukowane w przypadku zwarcia międzyfazowego między dwiema fazami A i B, w których są jednostronnie nieziemione żyły powrotne linii kablowej powoduje taki sam wzrost napięć w tych powłokach (rys. 5.34, węzeł J).

4) Zwarcie dwufazowe faz AC

W uzupełnieniu do badania symulacyjnego ze zwarcie dwufazowym między fazami A i B linii napowietrznej w ciągu kablowym zdecydowano o przeprowadzeniu zwarcia dwufazowego między fazami A i C. Żyła powrotna fazy C linii kablowej w wariantach a i b pozostaje obustronnie odziemiona, więc przeprowadzenie takiej symulacji pozwoli na określenie różnicy między przebiegami i napięciami indukowanymi w żyłach nieziemionych A i B.

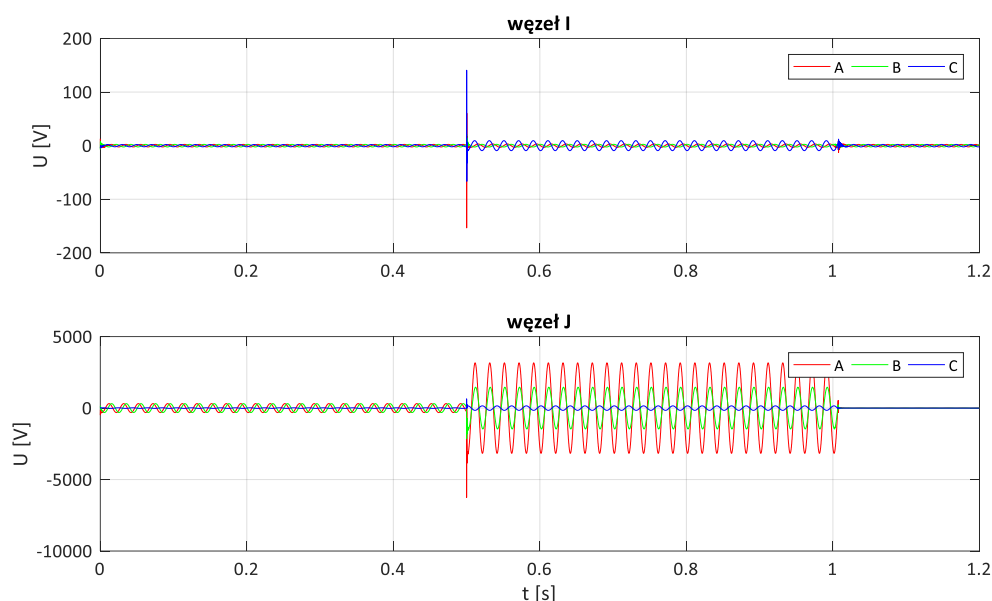
Wariant a



Rys. 5.35. Przebiegi napięcia indukowanego w żyłach powrotnych linii kablowej w trakcie zdarzenia symulacyjnego przy zwarciu międzyfazowym bez udziału ziemi faz A i C dla wariantu a

Patrząc na przebieg napięcia dla wariantu a na rysunku 5.35. można zauważyć, że wartość szczytowa przepięcia w fazie nieuziemionej jest znacznie wyższa niż dla przepięcia w fazie uziemionej – dla fazy A jest to ok. 6 kV, natomiast dla fazy C jest to ok. 100 V. Dla wariantu b, zaprezentowanego na rysunku 5.36., w którym nieuziemione jednostronnie pozostają żyły powrotne faz A i B, w przeciwieństwie do zwarcia dwufazowego w przypadku A+B, napięcia indukowane są wyższe dla zwartej fazy A. Wiąże się to z przepływem prądu zwarciovego przez fazę A żyły roboczej.

Wariant b



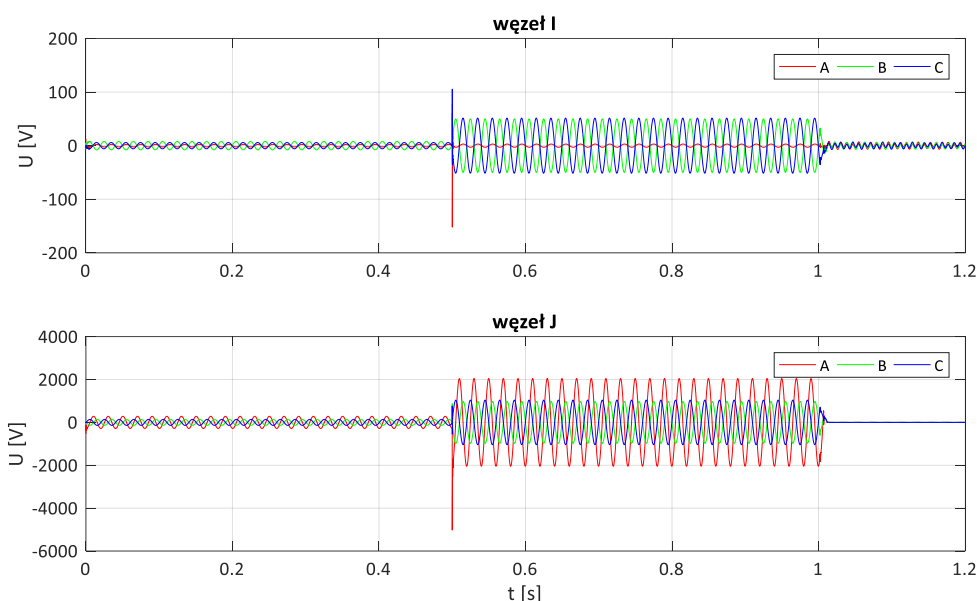
Rys. 5.36. Przebiegi napięcia indukowanego w żyłach powrotnych linii kablowej w trakcie zdarzenia symulacyjnego przy zwarciu międzyfazowym bez udziału ziemi faz A i C dla wariantu b

5) Zwarcie trójfazowe

Sytuacją, w której prąd zwarciovowy płynący wszystkimi fazami żył roboczych kabla powinien być największy, jest zwarcie trójfazowe. W takim układzie prąd zwarciovowy przepływa przez wszystkie trzy fazy żyły roboczej kabla. W przypadku linii kablowej w układzie trójfazowym, gdzie odległości między geometrycznymi środkami kabli są takie same, a zatem sprzężenia elektromagnetyczne będą tożsame w każdej z powłok metalowych, w żyłach powrotnych uziemionych obustronnie wyindukuje się prąd przepływu o takiej samej wartości, natomiast w żyły powrotnej nieuziemionej powstanie przepięcie ziemnozwarciowe i napięcie indukowane będzie znacznie większe niż w żyłach powrotnych faz obustronnie uziemionych.

Dla wariantów a i b zamieszczonych na kolejnych rysunkach, wartość napięcia osiągnięta zarówno po stronie stacji, jak i słupa z głowicą kablową w przypadku przebiegów ziemnozwarciowych jest porównywalna co do wielkości z uzyskanymi przebiegami przy zwarciach jednofazowych. Również napięcia indukowane w trakcie trwania zwarcia są w podobnym zakresie jak w przypadku zwarć jednofazowych. Jak widać na rysunkach 5.37 napięcia wygenerowane w żyłach powrotnych faz uziemionych B i C w trakcie trwania zwarcia są takie same co do wielkości i różnią się przesunięciem fazowym.

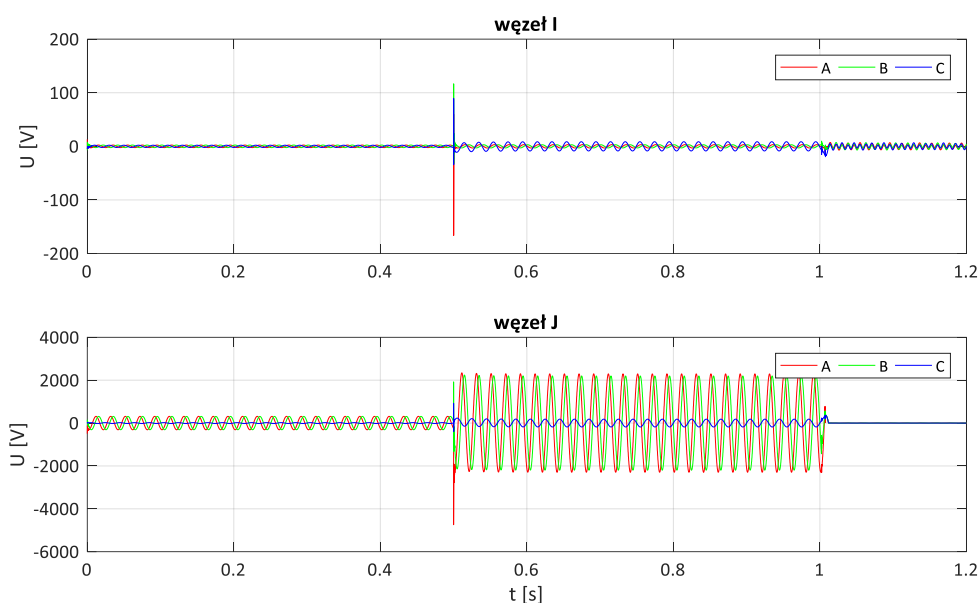
Wariant a



Rys. 5.37. Przebiegi napięcia indukowanego w żyłach powrotnych linii kablowej w trakcie zdarzenia symulacyjnego przy zwarciu trójfazowym dla wariantu a

Na przebiegach zaprezentowanych na rysunku 5.38 widać napięcia generowane w żyłach powrotnych kabla, gdy dla faz A i B żyły te są niepołączone z uziemieniem słupa z głowicą kablową. W tym przypadku również napięcia wyindukowane w żyłach pracujących w ten sam sposób mają taką samą wartość. Dla węzła J można zauważyć, że napięcia indukowane w żyłę powrotnej fazy A i B są sobie równe i przesunięte w fazie, natomiast dla obustronnie uziemionej żyły fazy C napięcie jest najmniejsze.

Wariant b



Rys. 5.38. Przebiegi napięcia indukowanego w żyłach powrotnych linii kablowej w trakcie zdarzenia symulacyjnego przy zwarciu trójfazowym dla wariantu b

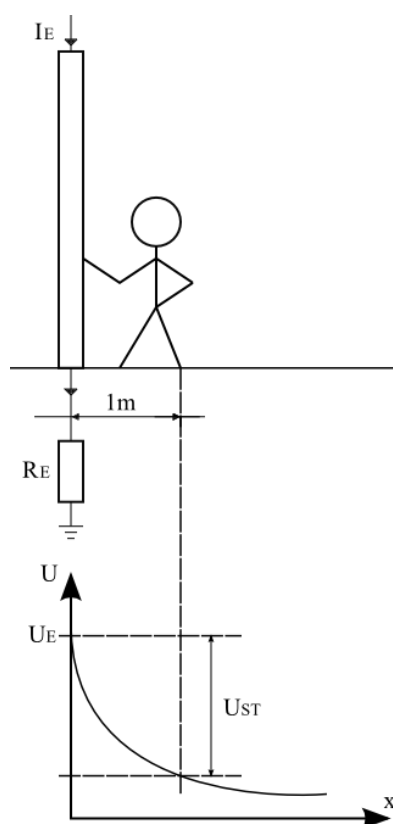
5.5. Ocena zagrożenia porażeniowego wynikającego z częściowego odziemienia żyły powrotnej kabla elektroenergetycznego SN i sposoby jego minimalizacji

Zagrożenie porażeniowe mogące wystąpić pod wpływem pojawienia się zdarzenia zakłóceń w sieci o napięciu przemiennym jest przedmiotem wielu opracowań i prac naukowych [43, 98]. W przypadku sieci o nieskutecznie uziemionym punkcie neutralnym o napięciu powyżej 1 kV rozpatrywane jest rażenie wywołane przez prąd przemienny o stałej częstotliwości, a przyjęta droga rażenia w takich układach to rękostopy lub w nielicznych przypadkach stopa-stop. Rażenie można podzielić ze względu na rodzaj dotyku, który je wywołuje. Taki podział dotyczy dotyku bezpośredniego, który odnosi się do kontaktu elektrycznego ludzi lub zwierząt z częściami czynnymi oraz dotyku pośredniego, który oznacza kontakt ludzi lub zwierząt z częściami przewodzącymi dostępnymi, które w stanie zakłócenia znalazły się pod napięciem [97]. W przypadku próby określenia wpływu konfiguracji uziemienia żyły powrotnej na zagrożenie porażeniowe istotne są aspekty dotyczące rażenia pośredniego, które nazywane jest również rażeniem przy uszkodzeniu. Podstawowym warunkiem powstania zagrożenia w takiej sytuacji jest wystąpienie uszkodzenia prowadzącego do przepływu prądu przez

elementy przewodzące dostępne. Części przewodzące dostępne to część urządzenia, która jest przewodząca i normalnie nie jest częścią czynną, ale w wyniku uszkodzenia może znaleźć się pod napięciem. W sieciach powyżej 1 kV jedynym uszkodzeniem, jakie może wywołać niebezpieczne dla zdrowia i życia skutki, jest zwarcie z udziałem ziemi – jednofazowe, dwufazowe z ziemią lub wielofazowe z udziałem ziemi.

Na rysunku 5.39 przedstawiony został mechanizm powstawania napięć na częściach przewodzących dostępnych. W przypadku linii napowietrznych SN oraz WN zagrożenie porażeniowe odnosi się w głównej mierze do kontaktu po przez dotyk pośredni na drodze dłoń-konstrukcja wsporcza. Zwiększenie zagrożenia porażeniowego następuje przy jednoczesnym wystąpieniu trzech czynników środowiskowych:

- zwarcie doziemne w linii,
- zbyt wysokie napięcie, wtedy też prąd rażeniowy powoduje groźne dla zdrowia lub życia człowieka skutki,
- dotknięcie w trakcie doziemienia części przewodzącej znajdującej się pod napięciem w wyniku uszkodzenia np. izolacji.



Rys. 5.39. Schemat rażenia człowieka na skutek dotyku pośredniego na drodze ręka-stopy

Oprócz wyżej wymienionych czynników na zwiększenie zagrożenia porażeniowego ma wpływ napięcie z jakim pracuje rozpatrywana linia oraz liczba i jakość izolacji oraz zabezpieczeń. Prąd uszkodzeniowy płynący przez konstrukcję wsporczą w najgorszym wypadku może przyjmować wartość prądu zwarcia doziemnego I_{k1} . Prąd ten płynie przez konstrukcję wsporczą, przy której powstało zwarcie i przez uziemienie tej konstrukcji. W takim przypadku obwód rażeniowy staje się gałęzią równoległą do obwodu zwarciovego i charakteryzuje się znacząco większym oporem [113, 114].

W przypadku rażenia na skutek dotyku pośredniego należy rozważyć przede wszystkim prąd rażeniowy przepływający przez ciało człowieka. Zminimalizowanie niebezpieczeństwa porażeniowego jest możliwe poprzez określenie czynników mających wpływ na efekt rażenia. Są to przede wszystkim:

- wartość prądu płynąca przez ciało rażonego,
- czas przepływu tego prądu,
- droga rażenia.

Ze względu na ogólne założenie dla linii wysokiego napięcia, że przepływ prądu zachodzi na drodze ręka-stopy, analizie podlegają tylko dwa pierwsze czynniki.

Do doboru środka ochrony od porażań w sieciach średniego napięcia, którym jest uziemienie urządzeń elektrycznych, należy przeanalizować wartość napięcia dotykowego spodziewanego U_{ST} , które pojawi się podczas doziemienia pomiędzy częściami przewodzącymi a ziemią, w momencie, gdy części te nie są dotykane. Wartość napięcia dotykowego spodziewanego zależy od napięcia uziomowego U_E oraz od współczynnika dotykowego α_{ST} , zależnego przede wszystkim od kształtu uziomu.

$$U_{ST} = \alpha_{ST} U_E \quad (5.7)$$

Wykorzystując schemat zastępczy obwodu rażeniowego i znajomość zależności na napięcie dotykowe spodziewane można wyprowadzić wzór na prąd rażenia I_B , przepływający przez ciało człowieka w czasie trwania doziemienia. Wyprowadzenie wzoru przedstawione zostało wzorami (5.8), (5.9) i (5.10).

$$I_B = \frac{U_{ST}}{R_p + Z_B + R_a} \quad (5.8)$$

$$I_B = \frac{\alpha_{ST} U_E}{R_p + Z_B + R_a} \quad (5.9)$$

$$I_B = \frac{\alpha_{ST} I_E R_E}{R_P + Z_B + R_a} \quad (5.10)$$

gdzie: I_B – prąd rażeniowy, α_{ST} – współczynnik dotykowy, I_E – prąd uziomowy, R_E – rezystancja uziemienia, R_P – rezystancja przejścia, Z_B – impedancja ciała człowieka, R_a – rezystancja dodatkowa.

Analizując wzór (5.10) można określić od jakich wartości zależy prąd rażeniowy, a co za tym idzie skutki rażenia. Dzięki temu można dobrać odpowiednie środki ochrony. Zgodnie ze wzorem można uznać, że podstawowym czynnikiem mającym wpływ na wartość prądu I_B jest prąd uziomowy I_E , którego rzeczywista wartość zależy od prądu doziemienia lub jest do niego proporcjonalny. Oznacza to, że im wyższy prąd ziemnozwarciowy w sieci tym wyższe wymagania ochrony od porażeń. Ponadto znaczny wpływ na skutki rażeniowe mają impedancje znajdujące się w mianowniku wyrażenia (5.10). Rezystancja przejścia R_P determinowana jest głównie przez materiał z jakiego wykonana jest konstrukcja wsporcza, natomiast na rezystancję dodatkową R_a mają wpływ takie rzeczy jak rezystancja obuwia i gruntu wokół konstrukcji wsporczej. Obie te wielkości nie mogą jednak stanowić podstawy doboru ochrony od porażeń [6, 7].

W sieciach, w których uwzględnia się redukcyjny charakter przewodów odgromowych linii napowietrznych i żył powrotnych kabli elektroenergetycznych do obliczenia prądów uziomowych niezbędne jest uwzględnienie współczynnika redukcyjnego. W przypadku linii średniego napięcia, ze względu na brak przewodów odgromowych, uwzględnia się jedynie redukcyjny charakter żył powrotnych. Prąd zwarcia doziemnego I_{k1} w takim układzie będzie rozptywał się zarówno przez ziemię, jak i żyłą powrotną, a zatem jego wartość spływająca do uziemienia w pobliżu miejsca zwarcia zmaleje. Wzór pozwalający obliczyć współczynnik redukcyjny r_E został przedstawiony w podrozdziale 2.2. Parametry jednostkowe linii kablowej. Wzór, który zostanie wykorzystany do analizy zmian tego współczynnika w wyniku zmiany konfiguracji sposobu uziemienia żyły powrotnej został zaprezentowany wzorem (5.11).

$$r_E = 1 - \frac{|3I_{OP}|}{|3I_{OL}|} = 1 - \frac{|M_{LPW} + 2M|}{|W_P + 2M|} = \frac{\rho_P}{\sqrt{\rho_P + 0,0628 \ln \frac{D_n^3}{r_P b^2}}} \quad (5.11)$$

Zgodnie ze wzorem (5.11) oraz formułami pozwalającymi obliczyć impedancje pojawiające się w tym wzorze i zamieszczone w rozdziale 2, można zauważyć, że

największy wpływ na charakter redukcyjny żył powrotnych ma ich rezystancja. Wzór przedstawiony powyżej bazuje na prądach składowych zerowych płynących w żyłę roboczej $3I_{0L}$ oraz w żyłę powrotnej $3I_{0P}$ linii kablowej. W celu wyznaczenia tych wartości należy uwzględnić równania impedancyjne linii kablowej, które odpowiadają przepływowi przez żyłę roboczą kabla prądu zwarciovego. W zależności od sposobu uziemienia żył powrotnych linii kablowej można zastosować równania przedstawione w części teoretycznej pracy, w Rozdziale 2. I tak, w sytuacji obustronnego uziemienia żył powrotnych zastosowanie znajduje formuła (2.32) a w przypadku braku uziemienia żył powrotnych formuła (2.39). Biorąc pod uwagę wszystkie te informacje można zatem wyznaczyć macierz, która będzie odpowiadała równaniu impedancji zerowej dla układu z jednostronnie uziemioną żyłą powrotną jednej fazy i obustronnie uziemionymi żyłami powrotnymi dwóch pozostałych faz. Taka formuła przedstawiona została wzorem (5.12)

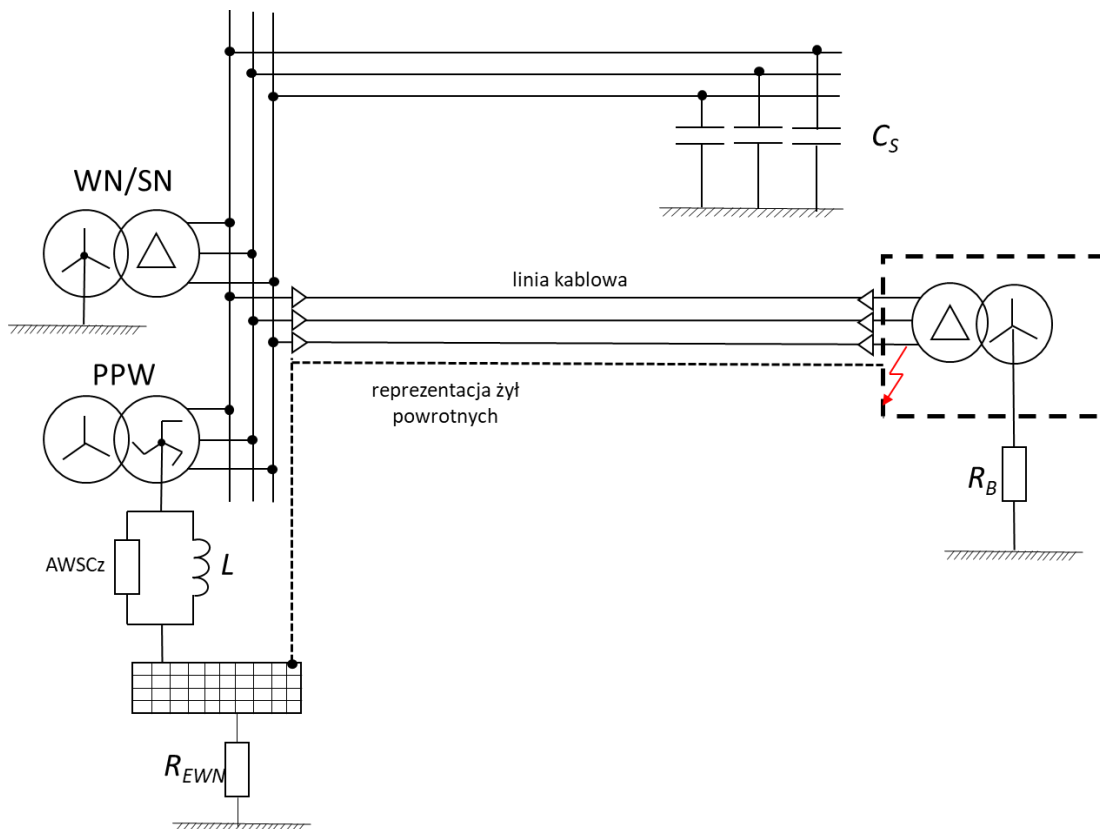
$$\begin{bmatrix} \Delta U_{LA} \\ \Delta U_{LB} \\ \Delta U_{LC} \\ \Delta U_{PA} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{W}_L & \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{W}_L & \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{M} & \underline{W}_L & \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} \\ \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{M} & \underline{W}_P & \underline{M} & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{W}_P & \underline{M} \\ \underline{M} & \underline{M} & \underline{M}_{LPW} & \underline{M} & \underline{M} & \underline{W}_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{0L} \\ I_{0L} \\ I_{0L} \\ -I_{0L} \\ I_{0P} \\ I_{0P} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Układ równań przedstawiony macierzą (5.12) wskazuje na sposób, w jaki można obliczyć prądy i napięcia w żyłach powrotnych w sytuacji, gdy rozpatrujemy wariant a. Układ ten pozwala na wyznaczenie współczynnika powrotu na podstawie równania 4-tej macierzy, które zostało wyodrębnione we wzorze (5.13).

$$\Delta U_{PA} = (\underline{M}_{LPW} + 2\underline{M} - \underline{W}_P) \cdot I_{0L} + 2\underline{M} \cdot I_{0P} \quad (5.13)$$

Równanie to pozwala na wyznaczenie wartości współczynnika powrotu w opisywanym układzie przy znajomości wartości napięcia na żyłę powrotnej fazy A w trakcie trwania zwarcia.

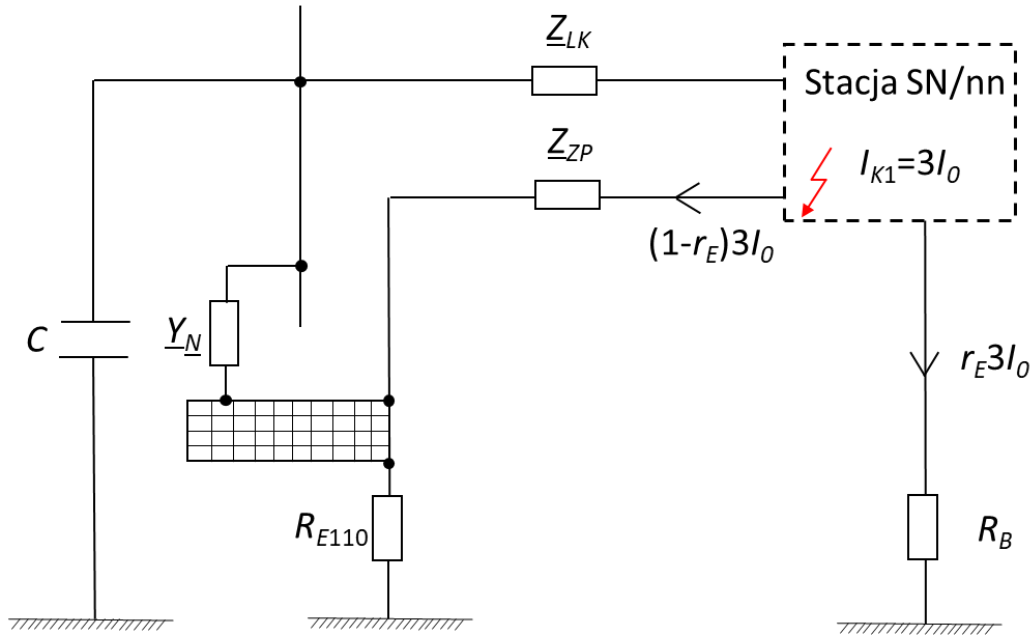
Obliczenia uproszczone współczynnika powrotu, które pozwolą na ograniczenie potrzebnych informacji można bazować na przykładowym układzie pracy linii kablowej. Sytuacja, w której można uwzględnić współczynnik redukcyjny została przedstawiona na rysunku 5.40. Schemat sieci reprezentuje zjawisko redukcyjnego oddziaływania żył powrotnych kabli w sytuacji powstania zakłócenia w stacji SN/nn. Układ ten spełnia podstawowy warunek, w którym współczynnik powrotu r_E bierze się pod uwagę, a mianowicie żyła powrotna zachowuje w tym układzie ciągłość.



Rys. 5.40. Schemat sieci do opisu zjawiska redukcyjnego oddziaływania żył powrotnych kabli elektroenergetycznych średniego napięcia

Na rysunku 5.41 zaprezentowany został schemat kreskowy modelu sieci elektroenergetycznej, w którym uwzględnia się redukcyjny charakter żył powrotnych kabli elektroenergetycznych bazujący na schemacie z rysunku 5.40. Na ilustracji przedstawiony został rozptył prądu zwarcia doziemnego I_{K1} , który pojawił się w stacji SN/nn. Składowe tego prądu przepływające przez uziemienia z uwzględnieniem zjawiska redukcyjnego żyły powrotnej zostały zaznaczone na rysunku.

Uproszczona metoda wyznaczenia współczynnika redukcyjnego w linii kablowej bazuje na uwzględnieniu wystąpienia różnicy potencjałów między uziemieniami stacji WN/SN oraz stacji SN/nn, pomiędzy którymi pracuje omawiana linia kablowa. Na podstawie schematu 5.41 można przeprowadzić ocenę współczynnika powrotu.



Rys. 5.41. Schemat kreskowy sieci elektroenergetycznej, w której występuje zwarcie na końcu ciągu kablowo-napowietrznego, gdzie: Z_{LK} – impedancja linii kablowej, R_B – rezystancja uziemienia stacji SN/nn, R_{E110} – rezystancja stacji 110/SN, Z_{ZP} – impedancja żyły powrotnej, Y_N – admitancja punktu neutralnego sieci SN, C_s – pojemność sieci

Do obliczenia potencjałów na poszczególnych elementach układu wykorzystuje się informacje o impedancjach własnej i wzajemnej żył powrotnych oraz o rezystancjach uziemień zainstalowanych w stacji WN/SN oraz stacji SN/nn.

$$(1 - r_E)3I_0 \cdot W_P - 3I_0 \cdot M = r_E 3I_0 \cdot R_{E110} + r_E 3I_0 \cdot R_B \quad (5.12)$$

Przekształcenie wzoru (5.12) pozwalające na obliczenie współczynnika redukcyjnego bazującego na wartości prądu składowej zerowej oraz parametrach układu. Wyprowadzenie wzoru na współczynnik powrotu zaprezentowano wzorami (5.13), (5.14) oraz (5.15)

$$3I_0 \cdot W_P - r_E 3I_0 \cdot W_P - 3M = r_E 3I_0 (R_{E110} + R_B) \quad (5.13)$$

$$Z_{ZP} - r_E Z_{ZP} - 3M = r_E (R_{E110} + R_B) \quad (5.14)$$

$$r_E = \frac{W_P - M}{R_{E110} + R_B + W_P} \quad (5.15)$$

Zgodnie z otrzymanymi wzorami pozwalającymi obliczyć współczynnik redukcyjny można wnioskować, że najsilniej zależny jest on od rezystancji, zarówno żył powrotnych, jak i rezystancji uziemień. Przypuszcza się, że w przypadku wariantu uziemienia a i b, gdzie zmianie ulegnie składnik dotyczący impedancji wzajemnej, zarówno we wzorze

podstawowym (5.11), jak i w wyprowadzeniu uproszczonym (5.15) w zakresie średniej odległości międzyprzewodowej, zakres tej zmiany nie będzie miał istotnego wpływu na wartość współczynnika. Może to oznaczać, że konfiguracja uziemienia żył powrotnych będzie miała marginalne znaczenie w sytuacji, gdy uwzględniany będzie redukcyjny wpływ żył powrotnych na rozptyw prądu zwarciovego w sieci SN z linią kablową. Zgodnie ze źródłami literaturowymi może jednak nastąpić spadek wartości współczynnika redukcyjnego. Warto zatem, w sytuacji, gdy należy zapewnić odpowiednie warunki ochrony od porażeń dla jednej z zaproponowanych konfiguracji uziemienia żył powrotnych, skorzystać ze sposobu obliczania rozptywu prądu, który nie uwzględni współczynnika powrotu. Będzie to wiązało się zaostreniem warunków bezpieczeństwa porażeniowego jakie musi spełnić sieć.

5.6. Podsumowanie

Zaistnienie zagrożenia przepięciowego w żyłach powrotnych linii kablowych SN wynikające z powstania zwarcia doziemnego w sieci elektroenergetycznej zostało ocenione na podstawie zmian parametrów linii kablowej i sieci, w której ona pracuje. Dobór parametrów możliwy był dzięki przeprowadzeniu badań terenowych i weryfikacji wyników z wykorzystaniem programu komputerowego. Spośród możliwych do wyboru zmiennych zdecydowano o przeprowadzeniu oceny wpływu takich parametrów jak obciążenie kabla prądem roboczym, sposób ułożenia linii kablowej, pole przekroju poprzecznego żył przewodzących kabla, sposób pracy punktu neutralnego czy rezystancja przejścia w miejscu zwarcia. Zdecydowano również o sprawdzeniu wpływu rodzaju zakłócenia w sieci na poziom przepięć ziemnozwarciowych. Analiza porównawcza otrzymanych wyników została przedstawiona w podpunktach niniejszego rozdziału, a na jej podstawie można spróbować ocenić wpływ poziomu wybranych zmiennych na interesujące z punktu widzenia rozprawy parametry.

Podstawową konkluzją wynikającą ze wszystkich przeprowadzonych badań jest zachowanie stosunku maksymalnej wartości przepięć otrzymanych dla różnych konfiguracji uziemienia żył powrotnych. Są one dla wszystkich trzech wariantów, niezależnie od innych parametrów i zmiennych, w zależności tożsamej do otrzymanej

w wyniku badań terenowych i wstępnych symulacyjnych zamieszczonych w rozdziale 4. Innymi słowy, najwyższe przebiecia ziemnozwarciowe generowane są w wariancie b, natomiast najniższe w wariancie c. Ich poziom natomiast zmienia się w zależności od wybranego do analizy parametru zmiennego.

W przypadku pierwszego badania symulacyjnego ocenie podlegała wartość napięcia indukowanego w żyłach powrotnych wynikającego ze wzrostu prądu przepływającego przez żyły robocze linii kablowej. W tej sytuacji można zauważyć, że napięcie w stanach ustalonych wzrasta wraz ze wzrostem mocy odbiorów, przy jednoczesnym zmniejszaniu się wartości przebiec ziemnozwarciowych. Może to wynikać ze zwiększonego tłumienia przebiec w układach o większych prądach obciążenia. Kolejna zmienna dotyczyła sposobu ułożenia faz trójfazowej linii kablowej. Dla powszechnie stosowanych rozwiązań różnice między wartościami otrzymanymi w wyniku symulacji przebiec w układzie z linią kablową były pomijalnie niskie i wskazywały minimalnie na zwiększenie się przebiec w układzie płaskim, co może być związane ze zwiększonym wpływem sprzężenia wzajemnego na napięcia indukowane w liniach kablowych ułożonych w taki sposób.

Ważną zmienną z punktu widzenia poziomu napięcia sieci jest wpływ sposobu pracy punktu neutralnego na poziom przebiec ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych. W tym punkcie można zauważyć, że w związku z wpływem sposobu uziemienia na poziomy prądów ziemnozwarciowych, wartości przebiec indukowanych w żyłach również ulegają zmianie. I tak, dla modeli sieci z uziemieniem punktu neutralnego przez rezystor, w którym prądy ziemnozwarciowe, jak i przebiecia ziemnozwarciowe w żyłach roboczych są największe, przebiecia indukowane w żyłach powrotnych dla wszystkich trzech wariantów są największe. Na przebiegach zamieszczonych w podrozdziale widać również wpływ sposobu pracy punktu neutralnego na napięcia indukowane w stanach ustalonych.

Analiza wpływu zmiany pola przekroju poprzecznego zarówno żył roboczych, jak i żył powrotnych wskazuje na istnienie zależności. Dla żył roboczych zwiększenie pola przekroju poprzecznego będzie powodowało zwiększenie się przebiec indukowanych w żyłach powrotnych. Zwiększenie pola przekroju poprzecznego żyły powrotnej natomiast będzie skutkowało zmniejszeniem się indukowanych przebiec. Pomimo widocznych tendencji, zakres zmian w obu przypadkach nie wpływał istotnie z punktu

widzenia zagrożenia przepięciowego na poziom maksymalnego uzyskanego przepięcia w żadnym rozpatrywanym wariancie.

Wpływ długości odcinka kablowego na przepięcie ziemnozwarciowe związany jest z pojawieniem się tłumienia i spadkiem napięć. Zwiększanie długości ciągu kablowego, który pracuje w dowolnym z trzech wariantów uziemienia żyły powrotnej, będzie wpływał na zmniejszenie się maksymalnej wartości przepięcia w tych żyłach. Należy zauważyć, że zakres wybranych długości został narzucony przez rozwiązania techniczne.

Ostatnią uwzględnioną zmienną była wartość rezystancji przejścia w miejscu zwarcia. Dla tego parametru zmiany wartości maksymalnego przepięcia są największe i związane są z występowaniem tłumienia rezystancyjnego. W sytuacji hipotetycznej, gdy $R_F = 0 \Omega$ i mamy do czynienia ze zwarcie metalicznym, przepięcie ziemnozwarciowe jest największe. Zwiększenie tej wartości powoduje spadek wartości przepięcia generowanego w żyłę powrotnej, a zatem wskazuje na silne tłumienie przepięcia.

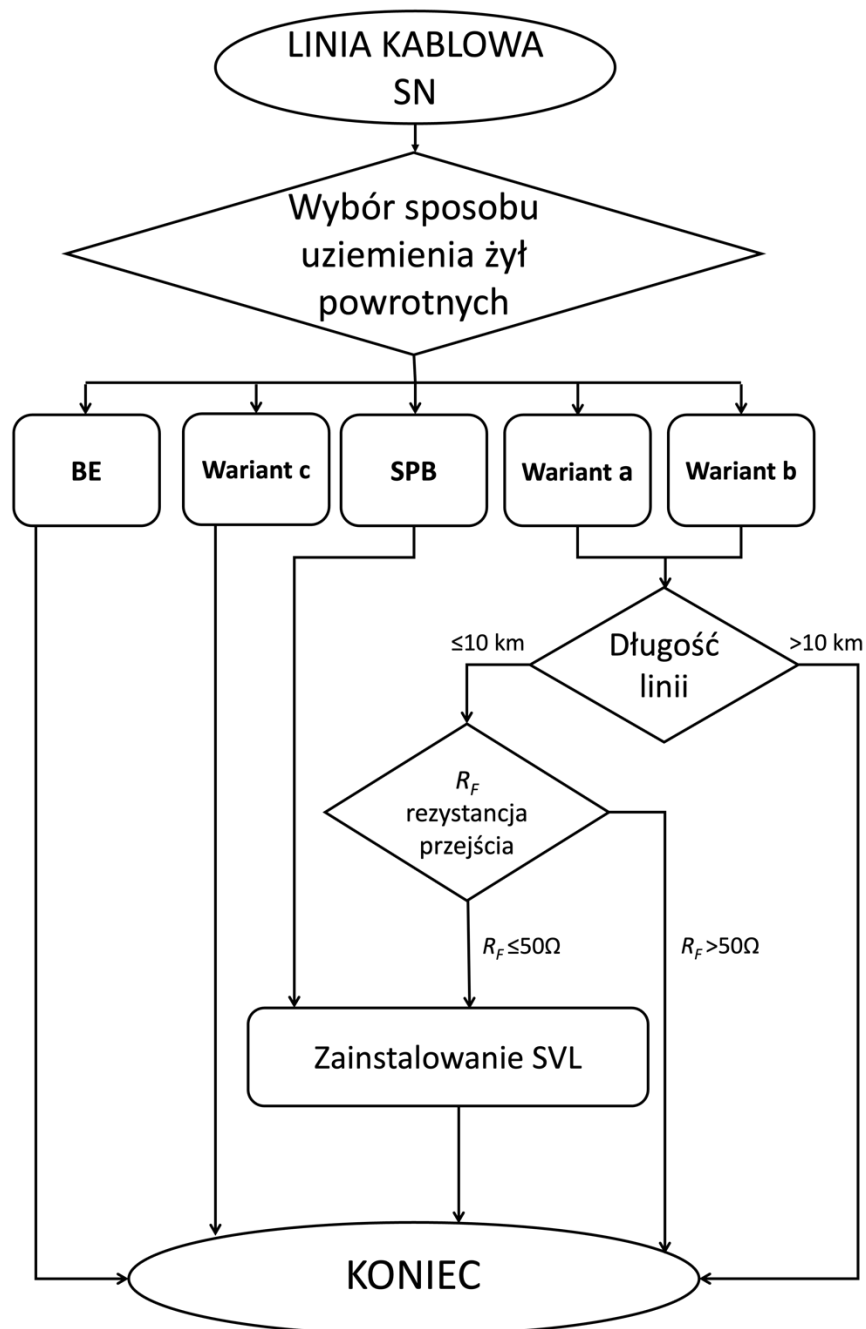
Wyniki badań przeprowadzonych w celu oceny wpływu rodzaju zakłócenia na uzyskaną maksymalną wartość przepięcia indukowanego w żyłę powrotnej pokazują, że rodzaj wybranego zwarcia i jego charakter będzie miał wpływ na rozptył prądów i napięć oraz ich zwroty, natomiast nie będzie miał istotnego znaczenia z punktu widzenia maksymalnej wartości przepięcia ziemnozwarciowego, które może pojawić się w żyłę powrotnej w wyniku jego wystąpienia. Wybór zwarcia jednofazowego jako podstawowego zakłócenia symulowanego w badaniach, pozwala na uzyskanie miarodajnych wyników, dla sytuacji najbardziej prawdopodobnej, a możliwość wystąpienia zwarcia innego rodzaju w sieci, w której zastosowany zostanie dowolny z wariantów konfiguracji uziemienia żył powrotnych nie będzie miał istotnego wpływu na bezpieczeństwo izolacji zewnętrznej rozpatrywanego kabla.

6. Wytyczne dotyczące ochrony linii kablowej SN przed skutkami wystąpienia przebiegów w żyłach powrotnej

Sposób uziemienia żył powrotnych kabli elektroenergetycznych w układzie trójfazowym jest istotnym elementem projektowania linii kablowej. Oprócz podstawowych warunków, które musi spełnić taki układ, jak zapewnienie uziemienia kabla elektroenergetycznego, zagwarantowanie drogi przepływu dla prądu zakłóceniewego przez żyłę powrotną czy znaczącego zmniejszenia strat energii elektrycznej należy również uwzględnić poziom i charakter napięć indukowanych w tych żyłach. Zgodnie z założeniami, odpowiednio dobrane do układu uziemienie żył powrotnych powinno zapewnić ograniczenie napięcia indukowanego na żyłach powrotnych do akceptowalnego i minimalnego poziomu, jak i ograniczenie przebiegu w stanach przejściowych do poziomu akceptowalnego, z uwzględnieniem połączeń z ogranicznikami przebiegów. Bazując na badaniach symulacyjnych przeprowadzonych w ramach analiz dotyczących przebiegów ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych z alternatywnym sposobem ich uziemienia, została przeprowadzona ocena wybranych zmiennych na poziomie tych przebiegów. Zgodnie z wnioskami z badań można założyć, że podstawowymi parametrami wpływającymi na poziom przebiegów ziemnozwarciowych będą długość linii oraz rezystancja przejścia w miejscu zwarcia.

Dla oceny wariantów uziemienia żył powrotnych trójfazowej linii kablowej zaprezentowanych w rozprawie można pominąć zmienne, przy modyfikacji których wartość przebiegu nie zmienia się o więcej niż 5%. W przypadku wytypowanych spośród badań symulacyjnych zmiennych, różnice przebiegów 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 przebiegów 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 przebiegów ziemnozwarciowych. Oznacza to również, że w celu zminimalizowania przebiegów ziemnozwarciowych w żyłach powrotnych istotne jest, aby przebiegia ziemnozwarciowe w żyłach roboczych, powodujące indukowanie się napięcia w tych pierwszych były jak najniższe. W sytuacji, gdy w układzie nie da się ograniczyć poziomu przebiegów

ziemnozwarciowych związanych z możliwym zagrożeniem zwarciovym, należy rozważyć wybór konfiguracji uziemienia żył powrotnych, który nie ograniczy strat energii, ale zabezpieczy żyły powrotne przed przebiegami, czyli uziemienie obustronne. Wybór wariantów proponowanych w rozprawie lub układu z jednostronnym uziemieniem żył powrotnych może wymagać zainstalowania ograniczników przepięć typu SVL w powłokach metalowych kabla SVL, zgodnie z algorytmem z rysunku 5.42.



Rys. 5.42. Uproszczony algorytm blokowy wyboru ochrony przeciwprzepięciowej żył powrotnych dla projektowanego układu uziemienia tych żył

Dla otrzymanych w wyniku badań symulacyjnych i terenowych wyników można przedstawić uproszczony algorytm blokowy pozwalający na określenie sposobu uziemienia żyły powrotnej oraz jej ochrony od przepięć wewnętrznych. Do stworzenia algorytmu wykorzystano przede wszystkim wyniki oceny zmiennych przedstawione w Rozdziale 5. Poniżej zaprezentowany zostanie opis kroków algorytmu wraz z uzasadnieniem ich pojawienia.

Jako jeden z kroków algorytmu przypisano blok operacyjny „Zainstalowanie SVL”. Podstawowym sposobem ochrony powłoki zewnętrznej kabla elektroenergetycznego jest wykorzystanie ograniczników przepięć SVL (ang. Sheath Voltage Limiter). Stosowane są one we wszystkich rozwiązaniach, które wymagają ograniczenia napięć indukowanych w żyłach powrotnych poprzez sposób ich pracy, a ich dobór wymaga znajomości parametrów fizycznych układu, w którym pracują ochraniane żyły powrotne. W zaproponowanych metodach nie uwzględniono rozwiązań innych niż ograniczniki SVL. Zostały one odrzucone ze względu na duże koszty (ECC) lub mały zakres zadziałania i brak realnej ochrony przeciwprzepięciowej (rezystory połączone w obwód żył powrotnych).

Początkiem algorytmu jest wybór sposobu uziemienia żył powrotnych kabli SN. Metody zaprezentowane na grafice zostały wybrane na podstawie najpowszechniejszych metod stosowanych w przypadku linii SN, to jest uziemienie obustronne BE i uziemienie jednostronne SPB z uwzględnieniem proponowanych konfiguracji z nieuziemioną jedną lub dwiema żyłami faz kabla. W przypadku wyboru uziemienia obustronnego nie ma potrzeby zastosowania ochrony przeciwprzepięciowej w żyłach powrotnych linii kablowej, co jest związane z wyrównaniem potencjałów po obu stronach kabla. W takiej sytuacji można zakończyć kroki algorytmu. To samo dotyczy wyboru wariantu c, w którym zakłada się jednostronne nieuziemienie dwóch faz żył powrotnych, a następnie połączenie ich, w celu zminimalizowania potencjału. Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami oraz sugerowanymi wartościami strat energii elektrycznej obliczonymi we wstępie do rozdziału 5. można wnioskować, że najbardziej skutecznym rozwiązaniem będzie wybór wariantu c, który w przeprowadzonych badaniach symulacyjnych wykazuje najmniejsze wartości przepięć ziemnozwarciowych. W ocenie tej konfiguracji uziemienia należy uwzględnić jednak wyniki badań terenowych, w których różnice potencjałów w układzie podlegały innym zmianom niż w przypadku symulacji. Warto również zwrócić uwagę na możliwość występowania w rzeczywistych sieciach zarówno symetrycznych,

jak i niesymetrycznych obciążeń. Przepływ prądów w żyłach roboczych zależy od charakteru odbioru, których wyindukuje w nieuziemionych żyłach powrotnych prądy przepływu o przeciwnych zwrotach, może mieć wpływ na poziom strat energii elektrycznej. W sytuacji, gdy prądy indukowane w żyłach powrotnych są symetryczne, ich wartości zniosą się, natomiast w układzie niesymetrycznym wartość prądu płynącego przez żyłę powrotną może wprowadzać dodatkowe straty, które będą porównywalne z wartościami przed zmianą konfiguracji. Zastosowanie tego wariantu wymaga rozważenie z punktu widzenia opłacalności ekonomicznej i powinno bazować na znajomości odbioru, który zasila linia kablowa.

Opcja trzecia wyboru rodzaju uziemienia żył powrotnych kabla zakłada zastosowanie układu z jednostronnym uziemieniem żył powrotnych. W takim układzie po stronie, po której żyły powrotne są nieuziemiene stosuje się ograniczniki przepięć SVL. Zainstalowanie ich w obwodzie żył powrotnych powinno być wystarczającym zabezpieczeniem izolacji zewnętrznej kabli przed przepięciami.

Ostatnimi konfiguracjami uziemienia żył powrotnych są zaproponowane w ramach rozprawy warianty a i b. Uzyskane dla tych konfiguracji wyniki przepięć ziemnozwarciowych wskazują na większe możliwości dopasowania układu do oczekiwanych wartości przepięć mogących się pojawić w żyłach powrotnych. W ocenie tych przepięć pod uwagę zostały wzięte wartości dwóch parametrów – długości linii kablowej oraz możliwej rezystancji przejścia w miejscu zwarcia. Warunki, jakie muszą spełnić te parametry, będą spójne dla obu wariantów. W przypadku obu proponowanych wariantów nie ma potrzeby zastosowania ograniczników SVL w sytuacji, gdy długość linii kablowej jest większa niż 10 km. Taka wartość, zgodnie z założeniami i wynikami badań, będzie stanowić wystarczającą wartość rezystancji dodatkowej, która pozwoli na wytłumienie maksymalnego napięcia pojawiającego się na początku zwarcia doziemnego.

Gdy długość linii ma wartość poniżej 10 km, parametry obwodu nie gwarantują wystarczających warunków do tłumienia rezystancyjnego, a zatem zgodnie z otrzymanymi wartościami przepięć ziemnozwarciowych indukowanych w żyłach powrotnych należy rozważyć również dodatkowy parametr zmienny. Rezystancja przejścia w miejscu zwarcia R_F tłumi przepięcia ziemnozwarciowe, a zatem przepięcia indukowane w żyłę powrotnej również zostaną dzięki temu parametrowi stłumione. Na

potrzeby algorytmu zdecydowano o podziale rezystancji przejścia ze względu na jej wartość określającą charakter zwarcia. Wartości mniejsze i równe $50\ \Omega$ nazywane są zvarciami niskooporowymi, a jako wartości typowe dla zwarć wysokooporowych przyjęto wartości powyżej $50\ \Omega$. W takim układzie przy założeniu, że linie są krótsze niż 10 km, a zwarcie jest wysokooporowe również można zdecydować o nie wprowadzaniu do obwodu żył powrotnych ograniczników przepięć SVL.

W przypadku zwarć niskooporowych, a tym bardziej w niezwykle rzadkim przypadku wystąpienia zwarcia metalicznego, możliwe jest pojawienie się w układzie w wyniku zwarcia doziemnego, przepięcia o bardzo dużej wartości. Oznacza to, że w układach, zarówno tych, w których istnieje prawdopodobieństwo pojawienia się zwarć niskooporowych, jak i tych o rezystancji przejścia bliskiej zeru, należy zastosować ograniczniki przepięć do ochrony powłoki zewnętrznej kabla elektroenergetycznego dla nieuziemionych faz żył powrotnych.

7. Wnioski i rekomendacje

Występowanie zjawiska indukcji magnetycznej w metalowych powłokach kabli elektroenergetycznych wynika ze wzajemnego oddziaływania powłok kabli, a zatem indukowanie się wielkości elektrycznych w żyłę powrotnej kabla jest konsekwencją przepływu prądu przez żyłę roboczą. W sytuacji obustronnego uziemienia żył powrotnych potencjał na obu końcach kabla jest równy i bliski zeru. W takim układzie pojawiają się natomiast warunki pozwalające na przepływ prądu powłokowego. Skutkuje on pojawieniem się strat na impedancji żyły powrotnej i w konsekwencji zwiększeniem strat całkowitych w sieci elektroenergetycznej. W sytuacji jednostronnego nieuziemienia żył powrotnych nie ma warunków do przepływu prądu powłokowego. W wyniku różnicy potencjałów na obu końcach tej powłoki powstają natomiast warunki do wyindukowania się napięcia. W sytuacji, gdy w układzie pojawia się zakłócenie o charakterze zwarciovym, konsekwencją indukowania się napięcia może być pojawienie się na żyłę powrotnej przepięcia.

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 konfiguracjami uziemienia żył powrotnych trójfazowych linii kablowych. Zaletami tych rozwiązań, stanowiących konfigurację składające się z dwustronnie i jednostronnie uziemionych żył powrotnych, poza zmniejszeniem strat energii, są również niewielkie nakłady związane z wprowadzeniem tych rozwiązań 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 będzie określenie czy przepięcia mogące pojawić się na nieuziemionych żyłach powrotnych, będą stanowiły zagrożenie przepięciowe dla izolacji zewnętrznej kabla.

Pochodzenie przepięć mogących indukować się w żyłach powrotnych kabli SN może być różne i zależne od rodzaju operacji sieciowych lub zakłócenia. Jednym z najbardziej

niebezpiecznych rodzajów przebiegów w sieciach SN są przebiegi ziemnozwarciowe będące konsekwencją zakłóceń ziemnozwarciowych, czyli zwarć doziemnych. Najczęściej pojawiają się one w liniach napowietrznych i kablowo-napowietrznych, w których uszkodzeniu mogą ulegać nieizolowane przewody. Dobór układu do badania wpływu takich zjawisk na indukowanie się w żyłach powrotnych kabla przebiegów ziemnozwarciowych wynikał zatem z cech sieci elektroenergetycznej. W związku z tym zdecydowano o przeprowadzeniu eksperymentów związanych z układem trójfazowym kabli pracujących w sekcji kablowo-napowietrznej, przy założeniu pojawienia się najbardziej prawdopodobnego zwarcia jednofazowego.

W ramach prac badawczych obejmujących temat rozprawy przeprowadzono w pierwszej kolejności badania terenowe we współpracy Instytutu Elektroenergetyki z operatorem sieci dystrybucyjnej, firmą Enea Operator Sp. z o.o. Ze względu na wyjątkowy charakter takich badań i jedyną możliwość wykonania prób zwarciovych z wykorzystaniem rzeczywistego fragmentu sieci, eksperyment poprzedzono badaniami wstępnymi symulacyjnymi w celu identyfikacji możliwych do otrzymania wartości przebiegów i przygotowania układu pomiarowego. Zrealizowanie pomiarów napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego, przy różnych wariantach pracy tej powłoki w stanie bez obciążeniowym rzeczywistej sieci, pozwoliło na potwierdzenie przypuszczeń dotyczących powstawania istotnych z punktu widzenia wytrzymałości izolacji zewnętrznej wartości. Otrzymanie takich wyników pozwoliło na przeprowadzenie badań symulacyjnych z wykorzystaniem programu DlgSILENT PowerFactory. W tej części rozprawy przedstawiona została ocena wpływu wybranych na podstawie wyników badań terenowych i symulacyjnych uzupełniających zmiennych. Otrzymane wyniki badań wskazują na znaczący wpływ parametrów o charakterze rezystancyjnym na tłumienie przebiegów. Ważnym aspektem poruszonym również w tej części rozprawy jest brak związku większości parametrów mogących mieć wpływ na wartość prądów przepływających przez żyłę roboczą z przebiegiem. Warto nadmienić, że parametry te miały natomiast istotny wpływ na napięcia indukowane w trakcie trwania zwarcia. Na szczególną uwagę zasługują parametry dotyczące prądu obciążenia płynącego w żyłę roboczej czy sposobu uziemienia punktu neutralnego sieci SN. W obu tych przypadkach zmiana parametrów do oceny poziomu przebiegów ziemnozwarciowych stanowiła przede wszystkim zmianę wartości prądu przepływającego w żyłę roboczej.

Zastosowanie alternatywnych sposobów uziemienia żył powrotnych jest również ważnym zagadnieniem z punktu widzenia zagrożenia porażeniowego. Zgodnie z założeniami poczynionymi w pracy, zastosowanie zaproponowanych rozwiązań nie wpłynie znacząco na zwiększenie zagrożenia porażeniowego. W szczególności dotyczy to układów, w których linia kablowa pracuje w jednej sekcji z linią napowietrzną. W takim przypadku nie uwzględnia się współczynnika redukcyjnego. Oznacza to przyjęcie możliwie najbardziej surowych warunków, a dobór urządzeń i środków ochrony dotyczy całkowitego prądu zwarcia bez wpływu redukcyjnego oddziaływania na niego żył powrotnych. Z praktycznego punktu widzenia takie rozwiązanie powinno rozstrzygać w rozpatrywanych układach problemy dotyczące rozptywu prądu ziemnozwarciowego, natomiast z naukowego punktu widzenia jest to niewiadoma, na której rozwiązanie obecny stan wiedzy nie pozwala.

Głównym osiągnięciem pracy było określenie poziomów przepięć na jakie narażona będzie powłoka zewnętrzna kabla elektroenergetycznego w wyniku zmiany sposobu uziemienia żyły powrotnej zarówno w wyniku przeprowadzenia badań terenowych, jak i symulacyjnych. Otrzymane w ich wyniku wartości maksymalne przepięć ziemnozwarciowych indukowanych w żyłach powrotnych jako następstwo pojawienia się zwarcia w ciągu kablowo-napowietrznym, wskazują na możliwe konfiguracje pracy sieci, w których wykorzystanie zaproponowanych w rozprawie wariantów będzie możliwe, z zapewnieniem izolacji zewnętrznej kabla bezpiecznych warunków pracy, przy jednoczesnym nieingerowaniu w układ ani niedołączaniu dodatkowych urządzeń.

Osiągnięte cele badawcze pozwalają stwierdzić słuszność postawionych w rozprawie tez. Zarówno w wyniku badań eksperymentalnych, jak i symulacyjnych potwierdzono możliwość wygenerowania w częściowo i jednostronne nieuziemionej, jednej lub dwóch fazach żył powrotnych jednożyłowych kabli elektroenergetycznych pracujących w układzie trójfazowym, niebezpiecznych zjawisk przepięciowych. Ocena skali tego zjawiska przeprowadzona w ramach wyżej opisanych badań, z którego wynika ewentualne zagrożenie przepięciowe, pozwala zatem na dobór odpowiednich zabezpieczeń, w celu uniknięcia uszkodzenia kabla, w którym dokonuje się rekonfiguracji uziemienia żyły powrotnej. Potwierdzenie obu sformułowanych w rozprawie tez odbywało się z wykorzystaniem tezy pomocniczej, która zakładała możliwość zamodelowania w programie komputerowym żyły powrotnej kabla

elektroenergetycznego średniego napięcia w celu wiarygodnej oceny zjawisk przebiegowych zachodzących w różnych konfiguracjach sieci elektroenergetycznej. Zaproponowany w wyniku przeprowadzonych badań uproszczony algorytm doboru sposobu uziemienia żyły powrotnej stanowi możliwe do wykorzystania w praktyce narzędzie pozwalające na odpowiedni wybór rozwiązania bezpiecznego dla izolacji zewnętrznej kabla, przy jednoczesnym zapewnieniu innych parametrów, które musi spełniać uziemienie żył powrotnych. Poruszona w ramach pracy tematyka dotycząca zjawisk związanych z zagrożeniem przebiegowym w liniach kablowych oraz zagrożeniami wynikającymi z występowania w układach sieci SN zwarć doziemnych, jest przedmiotem prac badawczych, również z udziałem i współudziałem Autorki, czego potwierdzeniem są publikacje, raporty i wystąpienia konferencyjne [76, 110, 111, 112, 113, 114]

Zrealizowane badania wskazują na wiele możliwych ścieżek dalszego rozwoju w ramach tematyki dotyczącej zagadnień związanych z indukowaniem się wielkości elektrycznych w powłokach linii kablowych i ich wpływem na bezpieczeństwo pracy takich linii. W zakresie ochrony przeciwprzebiegowej badania mogą zostać rozszerzone o różne konfiguracje sieci, a także układy przemysłowe, w których linie kablowe wykazujące się bardzo dużymi stratami i narażone są na częste przebiegi łączeniowe. Rozwinięcie zagadnienia przebiegowego w przypadku żył powrotnych może również dotyczyć możliwej propagacji przebiegów atmosferycznych na żyły powrotne linii kablowych SN połączonych z liniami napowietrznymi.

8. Literatura

1. Andruszkiewicz J., Lorenc J., Łowczowski K., Weychan A., Zawodniak J., *Energy losses' reduction in metallic screens of MV cable power lines and busbar bridges composed of single-core cables*, Eksploatacja i Niezawodność, 2020, 22(1), s. 15-25.
2. Antonov A.A., Gusev A. N., Dvorkin D. V., Volkov M. S., *Case Studies for Optimal Cable Line Placement and Sheath Grounding to Increase its Operational Characteristics*, IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Riga, Latvia, 2020, s. 1-7.
3. Barrett J. S., Anders G.J., *Circulating current and hysteresis losses in screens, sheaths and armour of electric power cables – mathematical models and comparison with IEC Standard 287*, IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology, 1997, vol. 144, Issue 3, s. 101-110.
4. Benato R., *Multiconductor Analysis of Underground Power Transmission Systems: EHV AC Cables*, Electric Power Systems Research, 2009, 79, s. 27-38.
5. Bernas S., Ciok Z., *Modele matematyczne elementów systemu elektrycznego*, Warszawa, WNT, 1977.
6. Boron W., Bogacz M., *Wybrane kryteria oceny i doboru izolacji elektroenergetycznych kabli górniczych*, Mechanizacja i Automatyzacja górnictwa, 2014, nr 6(520), s. 5-11.
7. Boryń H., Wojtas S., *Prądy indukowane w metalowych powłokach kabli średniego napięcia*, Automatyka, Elektryka, Zakłócenia, Vol. 3, Nr. 7, 56-61, 2012.
8. Bula I., Zejnullahu M., Bisenieks M., Alidemaj A., Hajrizi E., Bula E., *Impact of Switching to 20 KV to Reduce Losses in the Distribution System-Simulation with Power Factory Software*, IEEE 63th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Riga, Latvia, 2022, s. 1-5.
9. Candela R., Mittolo M., Sanseverino E., Gattuso A., *A Model for Assessing the Magnitude and Distribution of Sheath Currents in Medium and High-Voltage Cable Lines*, IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(6), s.6250-6257.
10. Carson J., *Electromagnetic theory and the foundations of the electric circuit theory*, The Bell System Technical Journal, 1927.
11. Cholewicki T., *Elektrotechnika teoretyczna Tom I*, wydanie II, WNT, Warszawa, 1971.
12. Cholewicki T., *Elektrotechnika teoretyczna Tom II*, wydanie II, WNT, Warszawa, 1969.
13. *CIGRE Guide to the Protection of Specially Bonded Cable Systems Against Sheath Overvoltage*, Electra No. 128, 1990.
14. CIGRE Technical Brochure 189: *Insulation co-ordination for HV AC underground cable system*, Working Group 21/33, 2001.
15. CIGRE Technical Brochure 797: *Sheath Bonding Systems of AC Transmission Cables - Design, Testing, and Maintenance*, CIGRE WG B1.50, 2020.
16. CIGRE Technical Brochure 531: *Cable system electrical characteristics*, Working Group B1.30, April 2013.
17. CIGRE Technical Brochure 283: *Special bonding of high voltage power cables*, Working group B1.18, 2005.
18. CIGRE Working Group on Losses Reduction CIRED WG CC-2015-2, *Reduction of Technical and Non-Technical Losses in Distribution Network*, CIRED overview, 2017.
19. Cywiński A., Chwastek K., *Modeling of skin and proximity effects in multi-bundle cable lines*, Progress in Applied Electrical Engineering, Koscielisko, Poland, 2019, s. 1-5.
20. Czapp S., Dobrzyński K., *Safety Issues Referred to Induced Sheath Voltages in High-Voltage Power Cables—Case Study*, Applied Science, 2020, vol. 10, s. 6706.
21. Czapp S., Dobrzyński K., Klucznik J., Lubośny Z., *Analysis of Induced Voltages and Power Losses in High Voltage Cables for Selected Methods of Cables Sheaths Bonding*, Acta Energetica, 2017, vol. no 2(31), s. 29-35.

22. Czapp S., Dobrzynski K., Klucznik J., Lubosny Z., *Impact of configuration of earth continuity conductor on induced sheath voltages in power cables*, International Conference on Information and Digital Technologies, Rzeszow, Poland, 2016, pp. 59-63.
23. Czarnywojtek P., Kozłowski J., Machczyński W., *Elektromagnetyzm*, Wydawnictwo Uczelni Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego w Kaliszu, Kalisz, 2011.
24. Darwish H.A., Elkalashy N. I., *Universal arc representation using EMTP*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, vol. 20, no. 2, s. 772-779.
25. Das J.C., *Electrical Power System*, New Age International, New Delhi 2006. 2.102
26. Deng X., Ouyang B., Kong X., Zhao J., Xia R., *Optimization of AC Resistance of Large Cross-section High-voltage Cable Conductor*, High Voltage Engineering, 2016, vol. 2, s. 522-527.
27. DlgSILENT PowerFactory Version 2022 User Manual, Online Edition, 2022, [Dostęp online: 09.2024].
28. Dong X., Yuan Y., Gao Z., Zhou, C., Wallace P., Alkali B., Sheng B., Zhou H., *Analysis of Cable Failure Modes and Cable Joint Failure Detection via Sheath Circulating Current*, In Proceedings of the Electrical Insulation Conference, Philadelphia, PA, USA, 8–11 June 2014.
29. Du X., Liu X., Tang Y., Li T., Wang S., Li N., *Research on the Optimization of Grounding Methods and Power Loss Reduction Based on AC 500kV XLPE Submarine Cable Project*, IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, Johor Bahru, Malaysia, 2021, s. 394-397.
30. Du Z., Xiao Q., Zhang Y., Chen J., Qiu Y., Liang J., *Study of sheath circulating current and loss-reducing of 500kV long-distance submarine cables*, IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Hong Kong, China, 2013, pp. 1-5.
31. Duda D., Gacek Z., *Przepięcia w sieciach elektroenergetycznych i ochrona przed przepięciami*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2015.
32. Duda D., Szadkowski M., *Kable ECC w układzie SPB kabli wysokiego napięcia*, Przegląd Elektrotechniczny, 2016, R. 92, nr 10, s. 104-107.
33. Duda D., Szadkowski M., *Ochrona przeciwprzepięciowa osłon kabli WN w różnych układach połączeń żył powrotnych*, Przegląd Elektrotechniczny, 2014, 10, s. 37-40.
34. Dz.U. 2015 poz. 1483 Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 8 września 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy o normalizacji.
35. Flisowski Z., *Technika Wysokich Napięć*, WNT, Warszawa, 1999.
36. Gacek Z., *Technika Wysokich Napięć. Izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. Przepięcia i ochrona przed przepięciami*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1999.
37. Glover J.D., Overbye T.J., Sarma M.S., *Power System Analysis and Design*, USA 2017.
38. Gouramanis K. V., Kaloudas C. G., Papadopoulos T. A., Papagiannis G. K., Stasinis K., *Sheath voltage calculations in long medium voltage power cables*, IEEE Trondheim PowerTech, Trondheim, Norway, 2011.
39. Gong Q., Li K., Zheng J., Sheng Y., Li S., Xu Y., *Study on Sheath Voltage and Earth Potential Rises of the Hybrid Overhead-cable Lines*, 5th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering, Chongqing, China, 2022, s. 240-244.
40. Grobicki J., Germata M., *Przewody i kable elektroenergetyczne*, Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2019.
41. He B., Zhou Y., Li H., Ye T., Fan S., Wang X., *Fault Identification of High-voltage Cable Sheath Grounding System Based on Ground Current Analysis*, IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration, Wuhan, China, 2020, pp. 3248-3251.
42. Heiss A., Balzer G., Schmitt O., Richter B., *Surge arresters for cable sheath preventing power losses in MV networks*, 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED, Amsterdam, Netherlands, 2001, vol.1 no 482.

43. Hoppel W., *Sieci średnich napięć. Automatyka zabezpieczeniowa i ochrona od porażeń*, Wydawnictwo WNT, 2017.
44. Idir N., Weens Y., Franchaud J. -J., *Skin effect and dielectric loss models of power cables*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 147-154.
45. IEC 60502-4:2023 *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) - Part 4: Test requirements on accessories for cables with rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV).*
46. IEC 60840:2011 *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV ($U_m = 36$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV) - Test methods and requirements.*
47. IEEE *Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV*; IEEE Standard Association: Piscataway, NJ, USA, 2014.
48. IEEE *Guide for the Design and Installation of Cable Systems in Substations*, 2015, vol., no., pp.1-250.
49. *Instrukcja organizacji bezpiecznej pracy przy urządzeniach elektroenergetycznych*, Enea Operator Sp. z o.o.
50. *Instrukcja ruchu i eksploatacji sieci dystrybucyjnej*, Enea Operator Sp. z o.o., 2014.
51. Iturregi A., Torres E., Zamora I., Buigues G., *Considerations for Simulation of the Switching Arc*, Przegląd Elektrotechniczny, 2012, r.88, nr 1a, s.104-107.
52. Ivković, S., Bosović, A., Musić, M., *Optimal Capacitor Placement in Real Distribution Network with Reactive Power Support of Distributed Generation*. B&H Electrical Engineering, Sciendo, Vol. 18 (Issue 1), (2024) pp. 12-23.
53. Jakubowski J., Paśniewski M., Kibler M., *Cross-bonding in Middle Voltage Distribution Grids, as a Method of Energy Efficiency Improvement*, 21st International Conference on Electricity Distribution, CIRED, Frankfurt, 6-9 June 2011, paper No 0438.
54. Jiménez-Ruiz, J.; Honrubia-Escribano, A.; Gómez-Lázaro, E., *Combined Use of Python and DlgSILENT PowerFactory to Analyse Power Systems with Large Amounts of Variable Renewable Generation*, Electronics, 2024, 13, 2134.
55. Jlang H., Lei Z., Yuan C., Huang X., Mei R., Huang T., Xie J., Pan W., *Operating Ampacity and Calculation Method for AC Submarine Cables Considering Sheath Circulation*, 10th International Forum on Electrical Engineering and Automation, Nanjing, China, 2023, pp. 612-616.
56. Jung C., Lee J., Kang J., Wang X., Song Y., *Characteristics and Reduction of Sheath Circulating Currents in Underground Power Cable Systems*, International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2004, 1.
57. Jung C.K., Lee J. B., Kang J. W., Wang X. H., Song Y. H., *Sheath current characteristic and its reduction on underground power cable system*, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, San Francisco, CA, USA, 2005, Vol. 3, pp. 2562-2569.
58. Kacejko P., Machowski J., Pijarski P., Smolarczyk A., *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2022.
59. Karaca, E., Nuroğlu, F.M., *Analysis of hybrid AC/DC transmission system: A Turkey case study*, IET Generation Transmission Distribution, 18, 3017–3028 (2024).
60. Katalog Apator, Aparatura łączeniowa, s 15 - <https://api.apator.com/uploads/oferta/aparatura-laczeniowa/ograniczniki/ograniczniki.pdf> [Dostęp online: 04.2025].
61. Karta charakterystyki Super Mox Series, RoHS Ohmite, <https://www.ohmite.com/assets/images/res-supermox.pdf>, [Dostęp online: 03.2025].
62. Katalog Kable elektroenergetyczne średniego napięcia z izolacją XLPE, NKT https://www.nkt.com.pl/fileadmin/user_upload/Products/Data_sheets/NA2XS_F_2Y__X_UHAKXS__12_20_kV_DS_PL_EN.pdf [Dostęp online: 02.2020]

63. Katalog Kable i przewody elektroenergetyczne, Telefonika, wydanie VI, 2024 r. [Dostęp online: 09.2024].
64. Katalog przewodów linii napowietrznej PAS 70 s. 26–27. <https://www.eltrim.com.pl/assets/katalogi/Katalog-przewody-napowietrzne-2020.pdf>, [Dostęp online: 03.2025].
65. Katalog Transformator uziemiający <http://www.ftz.pl/transformatory-uziemiajace-olejowe.php> [Dostęp online: 02. 2020].
66. Katalog Transformer 110/15 <http://www.ftz.pl/download/Transformatory%20Mocy.pdf> [Dostęp online: 02.2020].
67. Kocar I., Mahseredjian J., *Accurate frequency dependent cable model for electromagnetic transients*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2015.
68. Krakowski M., *Obwody ziemnopowrotne*, Wydawnictwo Naukowe WNT, Warszawa, 1979.
69. Krakowski M., *Elektrotechnika Teoretyczna. Pole elektromagnetyczne. Tom 2*, wydanie 5, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1995.
70. Kujszczyk S., *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze, Tom 2*, praca zbiorowa, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2004.
71. Leufkens P. P., Wegbrans B. H. M., *Cross Bonding and a Special Interruption Joint for HV XLPE Cable in Relation with the Use of Metal Oxide Surge Arresters*, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Paris, France, 28 August - 3 September, 1988.
72. Lin Y. Xu Z., *Cable Sheath Loss Reduction Strategy Research Based on the Coupled Line Model*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, vol. 30, no. 5, pp. 2303-2311.
73. Liu Y., Chen J., Zhao M., *Study on Mechanical Characteristics of Bonding Interface of Smooth Aluminium Composite Sheath in HV XLPE Cables*, IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 2020, s. 1-4.
74. Lorenc J., *Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007.
75. Lorenc J., Staszak B., *Modelowanie zjawisk wywołujących asymetrię napięć doziemnych w sieciach SN*, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, Poznań 2016.
76. Lorenc J., Staszak B., Schött A., *Wspomaganie układów pomiarowych parametrów doziemnych sieci SN*, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, Issue 90, 2017.
77. Luo J., Li Z., Li H., Luo M., *Waterproof Surge Protective Grounding Devices for HV Power Cable Lines*, International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chongqing, China, 2008, s. 253-256.
78. Łowczowski K., *Badanie wpływu ułożenia kabli na straty energii w żyłce powrotnej - symulacja w programie PowerFactory*, Przegląd Elektrotechniczny, 10, p. 54-57, 2016.
79. Łowczowski K., *Symulacja zjawisk ziemnozwarciowych w sieci SN uziemionej przez układ równoległy*, Poznan University of Technology Academic Journals, 2018, nr 94, s.157-169.
80. Łowczowski K., Lorenc J., Andruszkiewicz J., Nadolny Z., Zawodniak J., *Novel Earth Fault Protection Algorithm Based on MV Cable Screen Zero Sequence Current Filter*, Energies 2019, 12, 3190.
81. Łowczowski K., Lorenc J., Tomczewski A., Nadolny Z., Zawodniak J., *Monitoring of MV Cable Screens, Cable Joints and Earthing Systems Using Cable Screen Current Measurements*, Energies 2020, 13, 3438.
82. Łowczowski K., Miller P., Udzik M., Złotecka D., *Switching Operations in 110 kV Networks in the Context of Synchro-Check and Mitigation of Switching Stress by Utilizing Proper Control of Renewables and Energy Storages*, Energies 2023, 16, 6434.
83. Łowczowski K., Nadolny Z., Olejnik B., *Analysis of Cable Screen Currents for Diagnostics Purposes*, Energies, 2019, 12, 1348.

84. Maher R., El-Faraskoury A., Attia M. A., Emaram A., *Current Carrying Capacity Enhancement of High Voltage Underground Cables*, 24th International Middle East Power System Conference, Mansoura, Egypt, 2023, pp. 1-7.
85. Marciniak L., *Wykrywanie zwarć doziemnych w sieciach średnich napięć z wykorzystaniem trzeciej harmonicznej sygnałów*, Przegląd Elektrotechniczny, 2017, 93, nr 3, s. 56-59.
86. Matuszak M., Szuchnik K., Kołtun M., Ratkowski F., Bonczkowska A., *Zastosowanie specjalnego uziemienia żył powrotnych w liniach kablowych SN*, Przegląd Elektrotechniczny, 2019, r. 87, nr 5 st. 26-30.
87. Ministerstwo Klimatu i Środowiska, *Sprawozdanie z wyników monitorowania bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej za okres od dnia 1 stycznia 2021 r. do dnia 31 grudnia 2022 r.*, Warszawa, lipiec 2023 r.
88. Mościcka-Grzesiak H., *Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce*, praca zbiorowa, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1996.
89. Muzi F., Dercosi Persichini R., *An analysis of overvoltages in large MV-cable installations*, IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Hong Kong, China, 2012, pp. 156-160.
90. Nichols P., *Minimum voltage rating of sheath voltage limiters in underground cable systems: The influence of corrugated cable sheaths*, 47th International Universities Power Engineering Conference, Uxbridge, UK, 2012, pp. 1-6.
91. Novak B., Koller L., Berta I., *Loss reduction in cable sheathing*, Renewable Energy and Power Quality Journal, 2010, 1(08), s. 293-297.
92. Novak B., Koller L., *Current Distribution and Losses of Grouped Underground Cables*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, vol. 26, no. 3, pp. 1514-1521.
93. Olejnik B., *Doziemne zwarcia przerywane w sieci średniego napięcia*, Poznan University of Technology Academic Journals, 2017, nr 90.
94. Parmigiani B., Quaggia D., Elli E. Franchina S., *Zinc Oxide Sheath Voltage Limiter for HV and EHV Power Cable: Field Experience and Laboratory Tests*, IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, vol. 1, no. 1, pp. 164-170.
95. Peters J. F., Slepian J., *Voltages induced by arcing grounds*, Journal of the American Institute of Electrical Engineers, 1923, vol. 42, no. 8, s. 781-792.
96. PN-EN 50117-1:2019-10 wersja angielska *Kable współosiowe - Część 1: Specyfikacja ogólna*.
97. PN-EN 50341-1 *Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV –Część 1: Wymagania ogólne – Specyfikacje wspólne*.
98. PN-EN 50341-2-22 *Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV*.
99. PN-HD 605 S1:2007 *Kable elektroenergetyczne - Dodatkowe metody badania*.
100. PN-HD 620 S2:2010 *Kable energetyczne o izolacji wytłaczanej na napięcie znamionowe od 3,6/6 (7,2) kV do 20,8/36(42) kV łącznie*.
101. PN-HD 621 S1:2003 *Kable elektroenergetyczne średniego napięcia o izolacji papierowej przesyczonej*
102. PN-HD 629.1 S2:2006 *Badania osprzętu przeznaczonego do kabli na napięcie znamionowe 3,6/6(7,2) kV do 20,8/36 (42) kV - Część 1: Kable o izolacji wytłaczanej*.
103. Pollaczek V. F., *Über die Felter der Wechselstromleitung mit Erde und der Horizontalantenne*, Elektrische Nachrichtentechnik, 1927, vol. 7, no. 4, pp. 295-304.
104. *Pomiary i diagnostyka linii kablowych wysokiego i średniego napięcia*, Standard w sieci dystrybucyjnej Enea Operator sp. z o.o., 2024.
105. Pons E, Colella P, Napoli R, Tommasini R., *Impact of MV Ground Fault Current Distribution on Global Earthing Systems*, IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51, s. 4961-4968.

106. Popović L. M., *Ground Fault Current Distribution When a Ground Fault Occurs in HV Substations Located in an Urban Area*, Progress In Electromagnetics Research 2014; 59: 167-179.
107. Ramowa instrukcja eksploatacji elektroenergetycznych linii kablowych, Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej (PTPiREE), 2011.
108. Raport PTPiREE: Ochrona Sieci Elektroenergetycznych od Przepięć, Poznań, 2005.
109. Sakalkale S., Kanakgiri K., *Study of Underground Power Cable Considering Sheath Circulating Current*, Proceedings of Fourth IRF International Conference 2014; 7-10.
110. **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
111. **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
112. **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
113. **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 5.5D
114. **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 5.5C
115. Sektory normalizacji <https://www.pkn.pl/normalizacja/sektory-normalizacji/elektrotechnika> [Dostęp online: 09.2024].
116. SEP E 004:2022-08 Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe. Projektowanie i budowa.
117. Shelkunoff S.A., *The electromagnetic theory of coaxial transmission lines and cylindrical shields*, The Bell System Technical Journal, 1934, vol. 13, issue 4, s. 532-579.
118. Shirai Y., Mlyato Y., Taguchi M., Shitsu M., Hatta H., Muroya S., Chiba M., Nitta T., *Over-voltage suppression in a fault current limiter by a ZnO varistor*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2003, vol. 13, no. 2, pp. 2064-2067.
119. Shirkovets A., Vasilyeva A., Telegin A., Sarin L., *Transient processes at single phase-to-ground faults in combined grounded networks*, Electric Power Quality and Supply Reliability, Tartu, Estonia, 2012, pp. 1-7.
120. Skomudek W., *Analiza i ocena skutków przepięć w elektroenergetycznych sieciach średniego i wysokiego napięcia*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2008.
121. Standard techniczny: *Elektroenergetyczne linie kablowe średniego napięcia*, Enea Operator sp. z o.o., 2024.
122. Standard techniczny: *Pomiary i diagnostyka linii kablowych wysokiego i średniego napięcia*, Enea Operator sp. z o.o., 2023.
123. Standard techniczny nr 36/2020 warunków budowy elektroenergetycznych linii kablowych SN na terenie TAURON Dystrybucja S.A., 2020 r.
124. Straty energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych praca zbiorowa pod redakcją Jerzego Kulczyckiego, PTPiREE, Poznań 2009 r.
125. Su W., Zhou X., Xu J., Yang F., *Power cable rating models and their applications*, CIGRE 2010 Proceedings, Nanjing, 2010, pp. 1-7.
126. Tartibi M., Morched A., Gustavsen B., *A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables*, IEEE Transactions on Power Delivery, 14, 1999.
127. TechRef_CableSystem, [Dostęp online: 04.2025]

128. Uribe-Campos F., *Numerical Infinite Series Solution of the Ground-Return Pollaczek Integral*, Ingenieria Investigacion y Tecnologia, 2015, 1, s. 49-58.
129. Vlachokyriakou O. et al., *A New Approach for Sheath Voltage Limiters in Medium Voltage systems*, 36th International Conference on Lightning Protection, Cape Town, South Africa, 2022, pp. 518-522.
130. Walczak K., Zawodniak J.J., *Ochrona przed wewnętrznymi przepięciami w sieciach SN - podstawy teoretyczne*, Automatyka-Elektryka-Zakłócenia, vol.10, nr 3(37), 2019.
131. Wang T., Cheng Y., Zhang Z., Fang Y., Bai J., *Simulation Research on Distribution Cable Arc Model Based on EMTP-ATP*, 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering, Shanghai, China, 2024, pp. 1898-1903.
132. Wang Y., Zhao J.K., *Low loss design study for HV AC cable system*, 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), Xi'an, China, 2017, s. 97-101.
133. Wedepohl L.M., Wilcox D. J., *Transient analysis of underground power-transmission systems*, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1973, vol. 120, No. 2, pp. 253-260.
134. Wiśłocki K., *Metodologia i redakcja prac naukowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2013, Poznań.
135. Włodarski R., Bucholc J., *Linie kablowe bardzo wysokich napięć. Projektowanie i budowa*, WNT, Warszawa, 1979.
136. Zawodniak J., Piekarski W., Gliszczyński M., *Zasady doboru ograniczników przepięć w sieciach średniego napięcia (SN)*, Automatyka, Elektryka, Zakłócenia, 2020, vol. 11, nr 1(39) s. 44-53.
137. Zhao X., Li J., Pu L., Ju Z., S. Ren and W. Duan, *Transient Overvoltage in 10kV Hybrid OHL-Cable System during Line Energization*, IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, 2018.
138. Zhao D., Zhang J., Huang H., Ma R., *Overvoltage and insulation coordination of 220 kV urban cable and hybrid lines*, East China Electric Power, vol. 40, no. 2, pp. 270-274, Feb. 2012.
139. Zieliński J., *Metodologia pracy naukowej*, ASPRA, 2013.